



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวสุมาตราอันดามันใน
บริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และบริเวณใกล้เคียง

โดย อธิติ ตริสิริสัตยวงศ์และคณะ

9 พฤษภาคม 2556

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการการติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวสุมาตราอันดามันใน
บริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และบริเวณใกล้เคียง

คณะผู้วิจัย

1. อธิธิ ตรีสิริสัตยวงศ์
2. เฉลิมชนม์ สติระพจน์
3. ศักดา ธรรมวิทวัส

สังกัด

- จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
กรมทรัพยากรธรณี

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)
(ความเห็นในรายงานนี้เป็นของผู้วิจัย สกว.ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

Executive Summary

ปัญหาน้ำท่วมจากน้ำทะเลหนุนและการกัดเซาะชายฝั่งถือเป็นปัญหาใหญ่ที่เกิดขึ้นกับพื้นที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน แม้ว่าปัญหาดังกล่าวอาจเป็นผลพวงจากสาเหตุหลายประการ แต่ก็เป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าการลดระดับของผิวดินเมื่อเทียบกับระดับน้ำทะเลเฉลี่ยที่ค่อย ๆ สูงขึ้นจากสภาวะโลกร้อนก็เป็นสาเหตุสำคัญประการหนึ่ง ที่ผ่านมา การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงค่าระดับผิวดินมักคำนึงถึงเฉพาะการทรุดตัวของชั้นดิน/ทรายซึ่งเป็นตะกอนที่ทับถมอยู่บนแผ่นเปลือกโลกที่เป็นชั้นหิน โดยอิงกับสมมติฐานที่ว่าแผ่นเปลือกโลกในบริเวณนี้ซึ่งอยู่ห่างจากรอยเลื่อนมีพลังขนาดใหญ่มีลักษณะสถิตย์ ไม่มีการเคลื่อนตัว

อย่างไรก็ตาม การแปรเปลี่ยนไปตามเวลาของค่าพิกัดที่ได้จากการประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบ PPP (Precise Point Positioning) ซึ่งให้พิกัดเที่ยงตรงสูงในระดับมิลลิเมตรในบริเวณสถานีรับวัดหลายแห่งที่เป็นเขาหินหรือหินโผล่แสดงให้เห็นว่าสมมติฐานดังกล่าวไม่เป็นจริง งานศึกษาทางธรณีฟิสิกส์หลายชิ้นในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ในช่วงกลางทศวรรษ 1990 ถึงประมาณปี 2004 ซึ่งเป็นช่วงปลายของช่วงเวลาที่เราเรียกว่า Interseismic Period ของวงจรแผ่นดินไหว แสดงให้เห็นว่า ในบริเวณประเทศไทยและมาเลเซียซึ่งอยู่ใน Far-field จากแนวร่องลึกบาดาลทางตะวันตกของเกาะสุมาตราและทะเลอันดามัน (ซึ่งเป็นบริเวณที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียมุดลงใต้แผ่นเปลือกโลกซุนดา) พบการยกตัวขึ้นอย่างช้า ๆ ของเปลือกโลกด้วยอัตราไม่กี่มิลลิเมตรต่อปี ส่วนในทางราบตรวจพบการเคลื่อนตัวไปทางตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างน้อยด้วยอัตราประมาณ 32 มม/ปี หลังเหตุการณ์แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันขนาด Mw9.2 ที่เกิดขึ้นเมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2004 อนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางดิ่งที่ได้จากสถานีจีพีเอสต่อหลายสถานีแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีการลดระดับอย่างรวดเร็วของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณดังกล่าว โดยการลดระดับสุทธิในช่วงปี 2005 – 2010 ที่ตรวจวัดได้ที่ จ.ชุมพรและ จ.เชียงใหม่มีขนาด 67 และ 24 มม ตามลำดับ ในขณะที่อนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางราบแสดงให้เห็นถึงทิศทางที่เปลี่ยนเป็นการเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันตกเฉียงใต้เข้าหาบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหว การลดระดับของเปลือกโลกในช่วงเวลาหลังแผ่นดินไหว (Postseismic Period) ที่ตรวจพบนี้ทำให้เกิดความกังวลขึ้นว่าพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลชายฝั่ง ซึ่งมีค่าระดับผิวดินต่ำมากในระดับเพียง 1-2 มเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง อาจเผชิญปัญหาน้ำทะเลท่วมหรือผลกระทบทางกายภาพอื่น ๆ เช่น การกัดเซาะชายฝั่งที่รุนแรงขึ้น หาก Postseismic Period ดำเนินต่อเนื่องเป็นเวลายาวนานและก่อให้เกิดการลดระดับสุทธิมีขนาดใหญ่ จึงเป็นที่มาของงานวิจัยชิ้นนี้

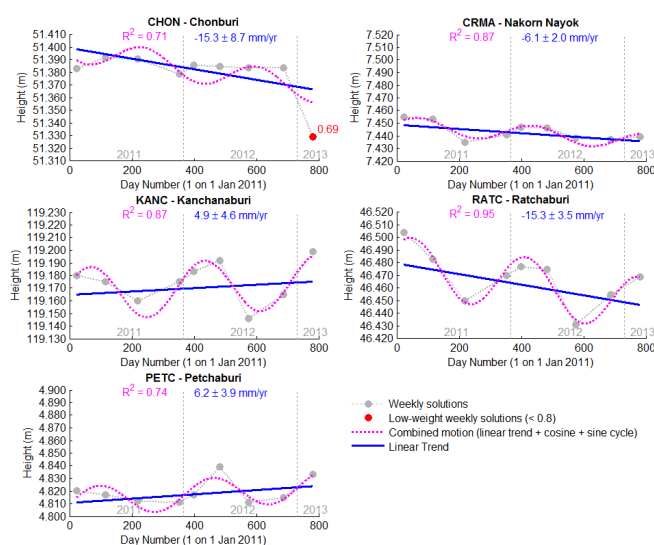
วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือการหาคำตอบว่าในปัจจุบันแผ่นเปลือกโลกในบริเวณพื้นที่ศึกษามีอัตราและทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งอย่างไรและมีแนวโน้มในอนาคตเป็นเช่นไร เนื่องจากพื้นที่ศึกษาอยู่ใน Far-field การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดเล็กในระดับเพียงมิลลิเมตรหรือเซนติเมตรต่อปี ในช่วงเวลาสั้น ๆ เพียงไม่กี่ปี ขนาดของการเคลื่อนตัวจึงไม่ใหญ่พอที่จะปรากฏให้เห็นประจักษ์ทางกายภาพดังเช่นที่เกิดขึ้นในบริเวณ Near-field ที่พบเกาะปะการังจำนวนมากถูกยกตัวขึ้นเหนือผิวน้ำหรือจมลงใต้น้ำตามช่วงเวลาในวงจรแผ่นดินไหว การตรวจวัดการเคลื่อนตัวจึงจำเป็นต้องใช้วิธีการรับวัดหา

ค่าพิกัดของตำแหน่งที่สนใจแล้ววิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดที่เกิดขึ้นตามเวลาที่ผ่านไป โดยที่ค่าพิกัดที่นำมาใช้ในการวิเคราะห์จะต้องมีความเที่ยงตรงสูงในระดับมิลลิเมตรจึงจะเพียงพอที่จะแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวขนาดเล็กในช่วงเวลาสั้น ๆ ได้ วิธีการตรวจหาการเคลื่อนตัวที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้จึงเป็นวิธีการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแล้วนำมาประมวลผลแบบ PPP ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นสำหรับใช้ในงานทางด้านยื่อเดติกและธรณีฟิสิกส์มาตั้งแต่ปี 1997

อย่างไรก็ตาม แม้ความสนใจหาการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกในงานวิจัยนี้จะอยู่ในพื้นที่ชายฝั่งปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน แต่ไม่สามารถใช้ตำแหน่งใด ๆ ในพื้นที่ศึกษาเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวได้ เนื่องจากแผ่นเปลือกโลกที่เป็นหินในบริเวณนี้ถูกปกคลุมด้วยชั้นตะกอนดิน/ทรายที่หนามากอย่างน้อยหลายร้อยเมตร และในบางบริเวณที่เคยมีการเจาะสำรวจเพื่อหาปิโตรเลียม (เขตรัฐบุรณะ) พบว่ามีความหนาถึงประมาณ 2 กิโลเมตร ชั้นตะกอนเหล่านี้เป็นที่ทราบกันดีว่ามีการทรุดตัวขนาดใหญ่เกิดขึ้นต่อเนื่องมาเป็นเวลากว่าสามสิบปีแล้วจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้ ทำให้การใช้ตำแหน่งตรวจสอบที่วางอยู่บนผิวดินหรือติดตั้งเข้ากับโครงสร้างอาคารหรือสิ่งปลูกสร้างถาวรใด ๆ ก็ตามซึ่งมีฐานรากลึกลงไป ในชั้นทรายเพียง 20-50 เมตรไม่เหมาะสม เนื่องจากจะมีการทรุดตัวของชั้นดิน/ทรายปะปนเข้ามาด้วย และไม่สามารถแยกแยะออกจากการเคลื่อนตัวของชั้นหินได้ ทางเลือกทางหนึ่งในการแก้ปัญหาขึ้นคือการสร้างฐานรากของตำแหน่งตรวจสอบให้ลึกลงไปถึงชั้นหิน แต่การเจาะชั้นตะกอนที่มีความหนาในระดับกิโลเมตรเพื่อให้ถึงชั้นหินเป็นสิ่งที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่าที่จะเป็นไปได้ แนวทางที่เป็นไปได้จึงเป็นการเลือกภูเขาหรือหินโผล่ในบริเวณรอบ ๆ พื้นที่ศึกษาที่มีระยะห่างไปถึงจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันใกล้เคียงกับของพื้นที่ศึกษาเพื่อใช้เป็นตัวแทน โดยอาศัยข้อเท็จจริงที่ว่าใน Far-field การเปลี่ยนแปลงใด ๆ ก็ตามย่อมเกิดขึ้นช้าและค่อยเป็นค่อยไป ดังนั้น อัตราการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดได้ในบริเวณใกล้เคียงจึงสามารถอนุมานได้ว่าเป็นอัตราเดียวกันกับที่เกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษา

โครงการวิจัยนี้วิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกจากข้อมูลทำสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ได้จากสถานีรังวัดแบบเป็นครั้ง ๆ (Campaign GPS Station) จำนวน 5 สถานีรอบกรุงเทพมหานครที่ดำเนินการทั้งสิ้น 9 ครั้ง ในช่วงเดือนมกราคม 2011 ถึงกุมภาพันธ์ 2013 รวมทั้งได้ใช้ข้อมูลในช่วงมกราคม 2012 ถึงมกราคม 2013 จากสถานีรังวัดจีพีเอสต่อเนื่อง (Continuous GPS Station) SPRB ที่ติดตั้งใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางราบแสดงให้เห็นตรงกันทุกสถานีถึงการเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างออกด้วยอัตราประมาณ 28 มม/ปี ทั้งทิศทางและอัตราการเคลื่อนตัวทางราบที่ตรวจวัดได้นี้ใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวในช่วง Interseismic ที่เคยมีการศึกษาไว้ จึงเป็นเครื่องบ่งชี้ว่าการเคลื่อนตัวช่วง Postseismic ได้สิ้นสุดหรือเกือบสิ้นสุดลงแล้ว ดังนั้น ในทางดิ่ง การลดระดับจึงควรสิ้นสุดหรือเกือบสิ้นสุดลงด้วยเช่นกัน และการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกที่ตรวจวัดได้จึงควรแสดงให้เห็นการกลับมายกตัวขึ้นอีกครั้งหรือหากยังลดระดับอยู่ก็ควรจะมีค่าที่ต่ำมาก

อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวทางดิ่งที่ตรวจวัดได้ไม่ได้ให้ผลสอดคล้องทั้งหมดกับข้อสรุปทางราบ ผลการวิเคราะห์อนุกรมเวลาของพิกัดทางดิ่งของสถานีรังวัดแบบเป็นครั้ง ๆ แสดงให้เห็นการยกตัวที่



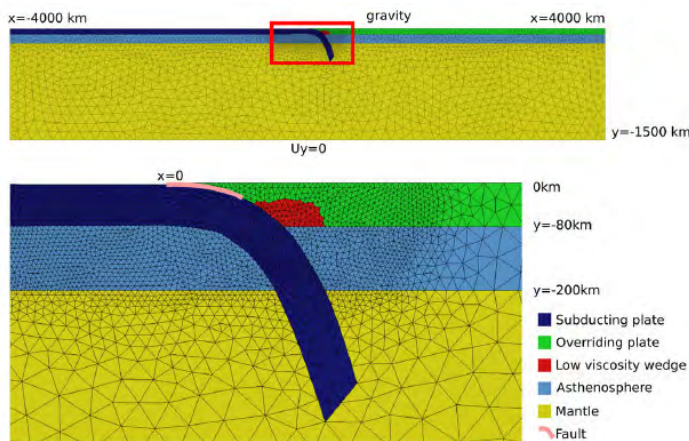
สถานี KANC ในจังหวัดกาญจนบุรี (4.9 ± 4.6 มม/ปี) และที่สถานี RATC ในจังหวัดเพชรบุรี (6.2 ± 3.9 มม/ปี) ทั้งสองสถานีนี้อยู่ทางฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษาและให้ผลสอดคล้องกับการยกตัว (1.5 ± 4.0 มม/ปี) ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB ที่อยู่ทางฝั่งตะวันตกเช่นเดียวกัน ในทางกลับกัน พบการลดระดับที่สถานี CHON ในจังหวัดชลบุรี (-15.3 ± 8.7 มม/ปี) และสถานี CRMA ในจังหวัดนครนายก (-6.1 ± 2.0 มม/ปี) ซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันออกของพื้นที่ศึกษา

สถานีที่เป็นข้อยกเว้นของรูปแบบทางตำแหน่งที่พบนี้คือสถานี RATC ในจังหวัดราชบุรีซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันตกให้ผลที่ไม่สอดคล้องกับกลุ่ม โดยตรวจพบการลดระดับ (-15.3 ± 3.5 มม/ปี) แทนที่จะเป็นการยกตัว

นอกจากรูปแบบในเชิงตำแหน่งแล้ว ในเชิงตัวเลขพบว่ากลุ่มสถานีทางฝั่งตะวันตกที่แสดงการยกตัวมีอัตราที่ค่อนข้างต่ำ (1.5 ถึง 6.2 มม/ปี) ในขณะที่กลุ่มสถานีที่แสดงการลดระดับที่มีอัตราที่ค่อนข้างสูง (-6.1 ถึง -15.3 มม/ปี) การเคลื่อนตัวทางดิ่งที่ตรวจวัดได้นี้จึงยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าช่วงเวลา Postseismic ในพื้นที่ศึกษาสิ้นสุดแล้วหรือยัง อย่างไรก็ตาม เนื่องจากกลไกรอยเลื่อนในบริเวณร่องลึกบาดาลซุนดาที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางดิ่ง Postseismic เป็นกลไกเดียวกัน จึงดูไม่สมเหตุสมผลที่จะถือว่าบริเวณสถานี CHON, CRMA, RATC ยังอยู่ในช่วง Postseismic ซึ่งขัดแย้งกับข้อสรุปที่ได้จากการเคลื่อนตัวทางราบของตัวเอง สมมติฐานที่อาจเป็นไปได้เกี่ยวกับการที่ข้อมูลอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานี CHON, CRMA และ RATC ไม่สอดคล้องกับข้อมูลส่วนอื่น ๆ ที่บ่งชี้ว่าช่วงเวลา Postseismic ได้สิ้นสุดลงแล้ว คือข้อมูลที่ใช้ในโครงการนี้ยาวเพียง 2 ปี จึงอาจถูกรบกวนด้วยการเคลื่อนตัวทางดิ่งท้องถิ่นขนาดใหญ่ที่มีคาบสั้นในระดับไม่กี่ปี ที่ยังไม่สามารถแยกแยะหรือเฉลี่ยทิ้งออกไปจากข้อมูล และการรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อติดตามการเคลื่อนตัวต่อไปอีกระยะหนึ่งจะให้แนวโน้มที่ชัดเจนขึ้น ข้อสรุปรวมจากผลการตรวจวัดด้วยจีพีเอสจากข้อมูลทั้งทางราบและทางดิ่งของทุกสถานีคือถึงสิ้นปี 2012 ช่วงเวลา Postseismic ของพื้นที่ศึกษาสิ้นสุดหรือใกล้สิ้นสุดลงแล้ว และแนวโน้มการลดระดับทางดิ่งในช่วง 2-3 ปีข้างหน้าควรจะยุติลงหรือเริ่มยกตัวขึ้นให้เห็นอย่างชัดเจน

ในส่วนของการคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางดิ่งและการลดระดับสุทธิจากแบบจำลอง โครงการนี้ได้ร่วมมือกับนักวิจัยจากสถาบัน ENS ประเทศฝรั่งเศสในการนำเอาแบบจำลองกายภาพ Visco-elastic ที่พัฒนาโดยใช้วิธี Finite element ครอบคลุมพื้นที่เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินเดีย และจีน มาคำนวณค่าคาดการณ์ของการเคลื่อนตัวทางดิ่งในบริเวณฝั่งตะวันออกของพื้นที่ศึกษา (จ.ระยอง) และทางใต้ (จ.

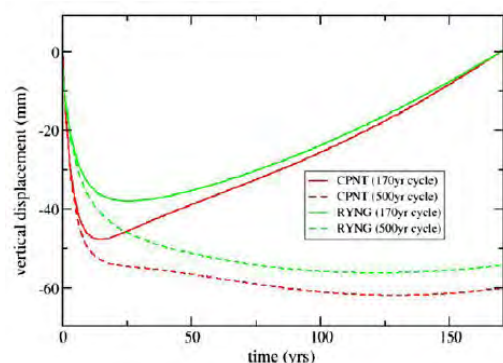
ชุมพร) ตลอดช่วงเวลาคาบอุบัติซ้ำของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน แบบจำลอง Visco-elastic พิจารณารอยเลื่อนในบริเวณร่องลึกบาดาลว่าเป็นวัสดุเบอร์เกอร์ (Burger material, วัสดุเชิงซ้อนที่



เปรียบเสมือนว่าประกอบด้วยสปริงและกระบอกสูบ) โดยถือว่าเปลือกโลกซึ่งเป็นของแข็งมีพฤติกรรมเหมือนสปริง และ Asthenosphere ซึ่งอยู่ใต้ลงไปมีพฤติกรรมในระยะสั้นเป็นแบบของแข็งแต่ในระยะยาวเป็นของหนืดเหมือนกระบอกสูบ และในชั้นเนื้อโลกที่ลึกถัดลงไปอีกเป็นของหนืดแบบจำลองนี้อธิบายการเคลื่อน

ตัวขณะเกิดแผ่นดินไหว (Coseismic Motion) ที่ตรวจพบด้วยจีพีเอสในลักษณะเดียวกับแบบจำลอง Elastic rebound กล่าวคือเกิดจากการที่เปลือกโลกขุ่นดาซึ่งถูกอัดอยู่จากการที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียดันและมุดเข้ามาติดตัวออกไปเหมือนสปริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง Elastic rebound ซึ่งพิจารณารอยเลื่อนเฉพาะส่วนที่เป็นเปลือกโลกไม่สามารถอธิบายการลดระดับที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีหลังจากแผ่นดินไหวได้ ในขณะที่แบบจำลอง Visco-elastic อธิบายว่าเป็นผลจากการที่ Asthenosphere คลายตัวออกไปยังทิศทางของร่องลึกบาดาล ทำให้พื้นที่ในบริเวณ Far field ค่อย ๆ เกิดการลดระดับลง ในการบังคับแบบจำลอง ทำโดยการแปรค่าความหนืดและคุณสมบัติการไหลอื่น ๆ ของชั้น Asthenosphere จนกระทั่งแบบจำลองให้ค่าการเคลื่อนตัวทางราบที่สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้จากสถานีจีพีเอสต่อเนื่องที่เกาะภูเก็ตในช่วงปี 2005 - 2009 จากนั้นทำการตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองโดยเปรียบเทียบค่าคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางดิ่งในช่วงปี 2005 - 2009 กับค่าตรวจวัดที่สถานีในจังหวัดชุมพร จังหวัดระยอง และสถานี ARAU ในประเทศมาเลเซีย ซึ่งพบว่าค่าคาดการณ์สอดคล้องกับค่าตรวจวัดทั้งสามสถานี

การคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางดิ่งจากแบบจำลอง Visco-elastic ใช้ค่าคาบอุบัติซ้ำ 2 ค่าได้แก่ 170 ปี (ตามผลการวิจัยที่ใช้ข้อมูลการยกตัวและจมตัวของเกาะปะการังทางฝั่งตะวันตกของเกาะสุมาตรา) และ 500 ปี (ตามที่รายงานในงานวิจัยที่ใช้วิธีหาอายุตะกอนในพื้นที่ที่เชื่อว่าคลื่นสึนามิที่เกิดจากแผ่นดินไหวเป็นตัวพัดพาไปทับถม) ในกรณีใช้คาบอุบัติซ้ำ 170 ปี ค่าคาดการณ์อัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งในปี 2012 เป็น -1.8 มม/ปี การลดระดับสุทธิ 38 มม โดยมีช่วงเวลา Postseismic 28 ปีนับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว ในขณะที่หากใช้คาบอุบัติซ้ำ 500 ปี ค่าคาดการณ์อัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งในปี



2012 เป็น -2.2 มม/ปี การลดระดับสุทธิตัว 53 มม และช่วงเวลา Postseismic 125 ปี ซึ่งทั้งสองกรณียาวนานกว่าผลจากการตรวจวัดด้วยจีพีเอสซึ่งบ่งชี้ว่าช่วงเวลา Postseismic สิ้นสุดหรือใกล้สิ้นสุดลงแล้วในเวลาเพียงประมาณ 10 ปีนับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหว

ณ ปัจจุบัน ยังเป็นการยากที่จะชี้ชัดว่าผลจากแบบจำลองหรือค่าตรวจวัดมีความน่าเชื่อถือกว่า เนื่องจากทั้งแบบจำลองและการตรวจวัดด้วยจีพีเอสต่างมีข้อจำกัดในตัวเอง ข้อจำกัดของแบบจำลองคือข้อมูลที่ใช้บังคับ (Constrain) การเคลื่อนตัวบริเวณ Far field ส่วนใหญ่อยู่ประเทศมาเลเซีย โดยในบริเวณประเทศไทยมีเพียงสถานีจีพีเอสต่อเนื่องในจังหวัดภูเก็ตเพียงตำแหน่งเดียวที่ผ่านการพิจารณาคัดเลือกว่ามีความเหมาะสมสำหรับนำมาใช้การบังคับการเคลื่อนตัว ในขณะที่ผลการเคลื่อนตัวจากจีพีเอสในพื้นที่ศึกษาจากอนุกรมเวลาที่ยาวเพียง 2 ปีในกรณีของสถานีแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ และ 1 ปีในกรณีสถานีต่อเนื่อง อย่างไรก็ตาม แม้ค่าที่ได้จากจีพีเอสและแบบจำลองจะไม่สอดคล้องกัน แต่ภายใต้บริบทของการพิจารณาผลกระทบทางกายภาพเช่นน้ำท่วมหรือการกัดเซาะชายฝั่งที่เกิดจากการลดระดับของเปลือกโลก สถานการณ์ที่แบบจำลองคาดการณ์ทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งผิดไปจากความเป็นจริงในปัจจุบันและการเคลื่อนตัวที่แท้จริงสอดคล้องกับค่าตรวจวัดจากจีพีเอส กล่าวคือ เปลือกโลกหยุดการระดับแล้ว เป็นสถานการณ์ที่ไม่น่ากังวล สถานการณ์ที่น่าเป็นห่วงคือในกรณีตรงกันข้าม เมื่อแบบจำลองคาดการณ์ทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งในปัจจุบันได้ถูกต้อง ซึ่งในกรณีเลวร้ายที่สุดคือคาบอุบัติซ้ำ 500 ปี การลดระดับสุทธิตัวที่จะเกิดขึ้นในบริเวณพื้นที่ศึกษาเป็น 53 มม ก็จะเห็นได้ว่าไม่น่ากังวลแต่อย่างใด และถึงแม้ว่าจะเผื่อไว้ในกรณีที่แบบจำลองอาจคาดการณ์ต่ำเกินจริงไปสามเท่า (เนื่องจากข้อจำกัดด้านข้อมูลใน Far field ของแบบจำลอง) การลดระดับสุทธิตัวประมาณ 160 มม ก็ยังมีขนาดเล็กกว่าการลดระดับที่เกิดจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น การทรุดตัวของแผ่นดินจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้ ซึ่งในหลายพื้นที่มีขนาดเกินกว่า 1,000 มม หลายเท่าตัว การลดระดับของเปลือกโลกอันเกิดจากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน 2004 ไม่ว่านจะสิ้นสุดลงแล้วหรือยังก็ยังไม่ทำให้ปัญหาการทรุดตัวของผิวดินรุนแรงอย่างมีนัยสำคัญกว่าที่เป็นอยู่ ยกเว้นในกรณีที่เกิดเหตุการณ์อื่นที่ก่อให้เกิดการลดระดับขนาดใหญ่ของเปลือกโลกเสริมเข้ามา เช่น แผ่นดินไหวใหญ่ในร่องลึกบาดาลซุนดาทางตะวันตกของประเทศเมียนมาร์

กล่าวโดยสรุป ผลการวิจัยในส่วนของค่าตรวจวัดจากจีพีเอสบ่งชี้ว่าการลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณพื้นที่ศึกษาที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนได้สิ้นสุดหรือเกือบสิ้นสุดลงแล้ว ซึ่งแย้งกับแบบจำลอง Visco-elastic ที่คาดการณ์ว่าการลดระดับยังจะดำเนินต่อไปอย่างน้อยอีกระยะหนึ่ง อย่างไรก็ตาม ผลที่ขัดแย้งกันนี้ก็ไม่เป็นที่น่ากังวลนัก เนื่องจากไม่ว่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่แท้จริงของเปลือกโลกในขณะนี้จะเป็นเช่นไร ก็สามารถประเมินได้ว่าค่าระดับผิวดินที่ต่ำลงจากการลดระดับสุทธิของเปลือกโลกจะมีขนาดเล็กกว่าที่เกิดขึ้นจากปัจจัยอื่นอยู่มาก และการตรวจวัดด้วยจีพีเอสต่อเนื่องไปอีก 2-3 ปีข้างหน้าจะช่วยให้ได้คำตอบที่แน่ชัดเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกในพื้นที่ศึกษา

บทคัดย่อ

รหัสโครงการ : RDG5330029

ชื่อโครงการ : การติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ในบริเวณที่ราบลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนและบริเวณใกล้เคียง

ชื่อนักวิจัย : อธิติ ตรีสิริสตัยวงศ์¹, เฉลิมชนม์ สกิระพจน์¹, ศักดา ธรรมวิทวัส²

¹คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²กรมทรัพยากรธรณี

Email address : itthi.t@eng.chula.ac.th

ระยะเวลาโครงการ : กันยายน 2553 – มีนาคม 2556

โครงการนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ค่าพิกัดเที่ยงตรงสูงจากสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อหาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันในพื้นที่ศึกษา และเพื่อเปรียบเทียบกับ การเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง Visco-elastic การวิเคราะห์อนุกรมเวลาข้อมูลจากสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ 5 สถานีในช่วงเดือนมกราคม 2011 ถึงกุมภาพันธ์ 2013 ประกอบกับข้อมูลช่วงมกราคม 2012 ถึงมกราคม 2013 จากสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB ใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี พบการเคลื่อนตัวทางราบของทุกสถานีไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ก่อนตะวันออกด้วยอัตราประมาณ 28 มม/ปี ส่วนพิกัดทางดิ่งแสดงให้เห็นทั้งการยกตัว (กาญจนบุรี 4.9 มม/ปี, เพชรบุรี 6.2 มม/ปี) และการลดระดับ (ชลบุรี -15.3 มม/ปี, นครนายก -6.1 มม/ปี และราชบุรี -15.3 มม/ปี) สำหรับข้อมูลจากสถานี SPRB แสดงให้เห็นการยกตัวด้วยอัตรา 1.5 มม/ปี ในขณะที่แบบจำลอง Visco-elastic คาดการณ์ว่าในปี 2012 เปลือกโลกในพื้นที่ศึกษายังลดระดับด้วยอัตรา -1.8 มม/ปี ถึง -2.2 มม/ปี ขึ้นกับคาบอุบัติซ้ำที่เลือกใช้ แม้ทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งบางสถานีจะไม่สอดคล้องกับแบบจำลอง แต่การศึกษาชี้ให้เห็นว่าการลดระดับจากแผ่นดินไหวมีขนาดเล็กกว่าผลจากปัจจัยอื่น ๆ เช่น การทรุดตัวจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้ จึงสรุปได้ว่าการลดระดับของเปลือกโลกจากแผ่นดินไหวจะไม่ส่งผลกระทบทางกายภาพที่น่ากังวลในพื้นที่ศึกษา อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจีพีเอสที่ใช้ในโครงการนี้ยาวเพียง 1-2 ปี จึงถูกรบกวนด้วยการเคลื่อนตัวท้องถิ่นคาบสั้นที่มีขนาดใหญ่ที่ยังไม่สามารถแยกแยะหรือเฉลี่ยทิ้งออกไปจากข้อมูล จึงควรมีการรับสัญญาณดาวเทียมเพื่อติดตามการเคลื่อนตัวต่อไปอีกอย่างน้อย 2-3 ปีเพื่อให้ได้แนวโน้มที่ชัดเจนขึ้น

คำหลัก : แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน, การเคลื่อนตัวทางดิ่งหลังแผ่นดินไหว, กรุงเทพมหานคร, การรับวัดจุดเดียวความเที่ยงตรงสูง

Abstract

Project Code : RDG5330029

Project Title : Monitoring the vertical motion after the Sumatra-Andaman mega earthquake in Chaopraya-Tachin Flood Plain area and vicinity

Investigators : Itthi Trisirisatayawong¹, Chalermchon Satirapod¹, Sakda Thammavidhavas²

¹Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

²Department of Mineral Resources

Email address : itthi.t@eng.chula.ac.th

Project Duration : September 2010 – March 2013

The research's objectives are to measure highly-precise coordinates from GPS signal of post-seismic motion of Sumatra-Andaman earthquake in the study area, and to compare the motions with those derived from a visco-elastic model. Time series of 5 campaign stations during January 2011 and February 2013, together with data during January 2012 – January 2013 from SPRB continuous GPS station in Suanpueng, Ratchaburi reveals that in horizontal all stations moved in southeast-east direction with the velocity around 28 mm/yr. In vertical, height time series show both uplift (Kanchanburi 4.9 mm/yr, Petchaburi 6.2 mm/yr) and downlift (Chonburi -15.3 mm/yr, Nakorn Nayok -6.1 mm/yr and Ratchaburi -15.3 mm/yr) while SPRB CGPS moved upward with a velocity of 1.5 mm/yr. The visco-elastic model forecasts downlift motion in 2012 with rates of -1.8 mm/yr and 2.2 mm/yr depending on recurrence period. Although vertical motions of certain GPS stations conflict with those from the model, the study shows that magnitude of post-seismic motion is smaller than those of other factors such as groundwater extraction and consequently the effect of post-seismic motion is not worrisome. However, the time series length is only 1-2 years and disturbed by relatively large magnitude of local short-term variations which cannot yet be discerned or averaged out so further monitoring of at least 2-3 years should be continued in order to achieve a more reliable trend of plate motion.

Keywords : Sumatra-Andaman earthquake, Vertical post-seismic motion, Bangkok, Precise point positioning.

สารบัญ

หน้า

1. บทนำ

1.1	ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3	ภูมิหลังทางธรณีฟิสิกส์และยี่ห้อเคซีสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก	2
1.4	แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน	7

2. การกำหนดตำแหน่งสถานีจีพีเอสเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก

2.1	ข้อจำกัดในการหาที่ตั้งสถานีจีพีเอสในพื้นที่ศึกษา	10
2.2	การสำรวจหาที่ตั้งของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ	10
2.3	การสำรวจหาที่ตั้งของสถานีจีพีเอสแบบต่อเนื่อง	14
2.4	การจัดหาและติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อการรังวัดต่อเนื่อง	16

3. การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกที่ได้จากจีพีเอส

3.1	การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส	21
3.2	การประมวลผลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อหาค่าพิกัดความเที่ยงตรงสูง	22
3.3	การวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนตัวของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	26
3.4	การวิเคราะห์ห้ออัตราการเคลื่อนตัวของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ	30

4. แบบจำลองทางกายภาพและการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง

4.1	แบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อนในร่องลึกบาดาลซุนดา	35
4.2	การจัดสมมนาเชิงปฏิบัติการของแบบจำลอง	39
4.3	การเคลื่อนตัวทางดิ่งจากแบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic	40
4.4	ค่าคาดการณ์การเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกจากแบบจำลอง	42

5. สรุปและเสนอแนะ

5.1	สรุปผลการวิจัย	45
5.2	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแบบจำลองและการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส	46
5.3	ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการสร้าง Digital archive ของข้อมูลจีพีเอส	48

สารบัญ (ต่อ)

- ภาคผนวก ก ตารางเปรียบเทียบวัตถุดิบประสงค์ กิจกรรม ผลที่คาดหวัง และผลที่ได้รับ
- ภาคผนวก ข คุณลักษณะเฉพาะเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส
- ภาคผนวก ค โปรแกรมสำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสด้วยซอฟต์แวร์ GIPSY
- ภาคผนวก ง บทความวิจัยที่เผยแพร่

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 สรุปช่วงเวลาการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบเป็นครั้ง ๆ	21
ตารางที่ 3.2 ค่าพิกัทรายวันของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	24
ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพิกัทางราบและทางดิ่งของสถานี CHON	25
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	27
ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ	31
ตารางที่ 4.1 สรุปค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกที่ได้จากแบบจำลองทาง	42

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แผนที่และรูปตัดขวางของร่องลึกบาตาลซุนดา	3
รูปที่ 1.2 การเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกก่อนและหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน 2004	4
รูปที่ 1.3 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบของแผ่นเปลือกโลกซุนดา	4
รูปที่ 1.4 การเคลื่อนตัวทางราบและทางดิ่ง ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน	5
รูปที่ 1.5 แผนที่แสดงตำแหน่งของสถานีรับวัดจีพีเอสในโครงการวิจัย	8
รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง	11
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบตำแหน่งของสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ กับแนวรอยเลื่อน	13
รูปที่ 2.3 ตำแหน่งสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ ทั้ง 5 ตำแหน่ง	14
รูปที่ 2.4 ที่ตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง ณ สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี	15
รูปที่ 2.5 อาคารที่ติดตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	16
รูปที่ 2.6 การทดสอบชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่จัดซื้อสำหรับโครงการวิจัย	17
รูปที่ 2.7 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อรับวัดอย่างต่อเนื่อง	18
รูปที่ 2.8 เสออากาศ เสอล่อฟ้า และแผ่นป้ายแสดงชื่อสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	19
รูปที่ 2.9 การดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสของสถาน SPRB	20
รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	25
รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงทางดิ่งของสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ	26
รูปที่ 3.3 การเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB	28
รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและเวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบของสถานี SPRB	29
รูปที่ 3.5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ	30
รูปที่ 3.6 การเคลื่อนตัวในทิศเหนือ-ใต้ของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ	32
รูปที่ 3.7 การเคลื่อนตัวในทิศตะวันออก-ตกของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ	33

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.1	อาณาบริเวณที่ครอบคลุมโดยโครงสร้าง Finite Element ของแบบจำลอง
รูปที่ 4.2	การจำแนกประเภทวัสดุบริเวณรอยเลื่อนตามความลึกโดยแบบจำลอง
รูปที่ 4.3	สัมมนาเชิงปฏิบัติการเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อน
รูปที่ 4.4	เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางดิ่งจากจีพีเอสและจากแบบจำลอง
รูปที่ 4.5	การเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกตลอดคาบอุบัติซ้ำของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันจากแบบจำลอง
รูปที่ 5.1	แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อน และรอยแตกจากแผ่นดินไหวต่าง ๆ ในบริเวณ Subduction zone
รูปที่ 5.2	ระบบให้บริการข้อมูลจีพีเอส SOPAC

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการ

เป็นที่ทราบกันดีว่าในช่วงประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา พื้นที่บริเวณกรุงเทพมหานครและจังหวัดชายฝั่งใกล้เคียงได้แก่ สมุทรสาคร สมุทรปราการ และฉะเชิงเทรา ประสบกับปัญหาแผ่นดินทรุดที่ค่อนข้างรุนแรง เพื่อติดตามปัญหานี้ กรมแผนที่ทหารได้มีดำเนินการวัดอัตราการทรุดตัวอย่างต่อเนื่องมาตั้งแต่ปี 1978 (เพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบเวลา รวมทั้งการอ้างอิงเอกสารซึ่งเกือบทั้งหมดเป็นภาษาอังกฤษ ในรายงานนี้จะใช้ปีศักราชสากลเป็นหลัก) ด้วยเทคนิคการทำการระดับ (Differential Leveling Technique) อย่างไรก็ดีตามอัตราการทรุดตัวของแผ่นดินที่รังวัดได้ในระยะเวลาประมาณ 15 ปีหลังซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 4 – 24 มม/ปี แล้วแต่พื้นที่ เป็นอัตราของชั้นตะกอนดิน/ทราย (ซึ่งในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีความหนาในระดับหลายร้อยเมตรไปจนถึงประมาณสองพันเมตร) ที่เคลื่อนตัวด้วยอัตราสัมพันธ์กับการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกที่รองรับอยู่ หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือเป็นอัตราการทรุดตัวที่อิงกับสมมติฐานที่ว่าแผ่นเปลือกโลกที่เป็นชั้นหินไม่มีการเคลื่อนตัวทางตั้ง

ที่ผ่านมาข้อเท็จจริงที่ว่าแผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของแผ่นเปลือกโลกซุนดา (Sundaland Plate) ก็มีการเคลื่อนตัวทางตั้งนี้ยังไม่เป็นที่ตระหนักกันในวงกว้าง เหตุการณ์แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันขนาด Mw9.2 เมื่อ 26 ธันวาคม 2004 ซึ่งเป็นแผ่นดินไหวครั้งใหญ่ที่สุดครั้งหนึ่งเท่าที่เคยมีบันทึกมาทำให้เกิดการตื่นตัวและศึกษาเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในภูมิภาคนี้ หลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน พิกัดที่คำนวณได้จากการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสหลายสถานีในประเทศอินโดนีเซีย (เกาะสุมาตรา) มาเลเซีย และไทย แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่ามีการลดระดับของค่าความสูงของสถานีต่าง ๆ ลงอย่างรวดเร็ว การลดระดับที่เกิดขึ้นพร้อมกันหลังแผ่นดินไหวและกินอาณาบริเวณกว้างขวางทั่วทั้งภูมิภาคทำให้สรุปได้อย่างแน่ชัดว่ามีความเกี่ยวข้องกับแผ่นดินไหวที่เกิดขึ้นและไม่ได้เป็นปรากฏการณ์ท้องถิ่น แต่เป็นปรากฏการณ์ขนาดใหญ่ที่มีความสัมพันธ์กับกลศาสตร์ของแนวรอยเลื่อนหรือแนวร่องลึกบาดาลซุนดา (Sunda Trench) ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน

การลดระดับอย่างรวดเร็วของแผ่นเปลือกโลกที่เกิดขึ้นในช่วง 2- 3 ปีแรกหลังจากเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน 2004 ตรวจวัดได้จากสถานีจีพีเอสบริเวณสนามบินชุมพรมีความเร็วถึงประมาณ 27 และ 16 มม/ปี ในช่วงปี 2005 และ 2006 ตามลำดับ ได้ก่อให้เกิดคำถามและความกังวลขึ้นว่าจะจะเป็นไปยาวนานเท่าไร ทิศทางการเคลื่อนตัวทางตั้งหลังแผ่นดินไหวของเปลือกโลกที่เกิดขึ้นหลังแผ่นดินไหวส่งผลให้อัตราการทรุดตัวของแผ่นดินในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลที่ตรวจวัดได้จากการทำการระดับเป็นตัวเลขที่ต่ำเกินจริง ทำให้การประเมินผลกระทบที่เกิดขึ้นจากแผ่นดินทรุดในบริบทของการระบาย

น้ำและน้ำท่วม ตลอดจนการหาแนวทางแก้ไขปัญหาก็จะไม่สามารถได้คำตอบที่ถูกต้องและน่าเชื่อถือหากไม่นำค่าการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกมาร่วมในการพิจารณา

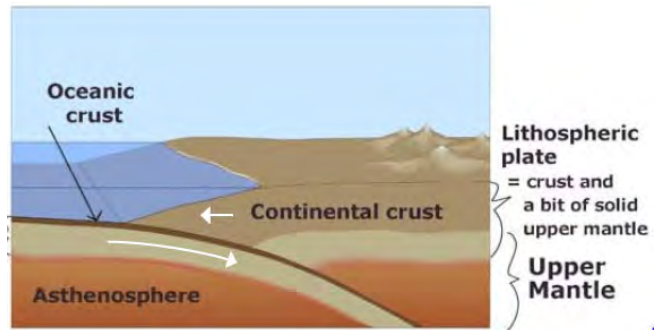
เนื่องจากค่าความสูงผิวดินธรรมชาติเหนือระดับน้ำทะเลของกรุงเทพมหานครและปริมณฑลอยู่ในช่วงเพียง 1-2 เมตรเท่านั้น หากการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกมีขนาดใหญ่และกินเวลานาน อาจทำให้พื้นที่ศูนย์กลางทางเศรษฐกิจและสังคมของประเทศเกิดความเสี่ยงจากการถูกน้ำทะเลท่วมและสร้างความเสียหายอย่างมหาศาลได้ การหาอัตราที่แน่ชัดของการลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลจึงเป็นประเด็นศึกษาที่สำคัญยิ่ง จึงเป็นที่มาของโครงการ การติดตามการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวสุมาตราอันดามันในบริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนและบริเวณใกล้เคียง

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อให้ได้ค่าพิกัดทางตรงความเที่ยงตรงสูงโดยการประมวลผลแบบ PPP จากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ได้จาก CGPS และ Campaign GPS
2. เพื่อให้ได้อัตราการเคลื่อนตัวของดิน ณ ปัจจุบันของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนและบริเวณใกล้เคียง
3. เพื่อให้ได้ภาพจำลองการเคลื่อนตัวของชั้นเปลือกโลกในระดับประเทศ สำหรับใช้ประโยชน์ในการพยากรณ์อัตราและทิศทางการเคลื่อนตัวในอนาคต

1.3 ภูมิหลังทางธรณีฟิสิกส์และยื่อเดซีสำหรับตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก

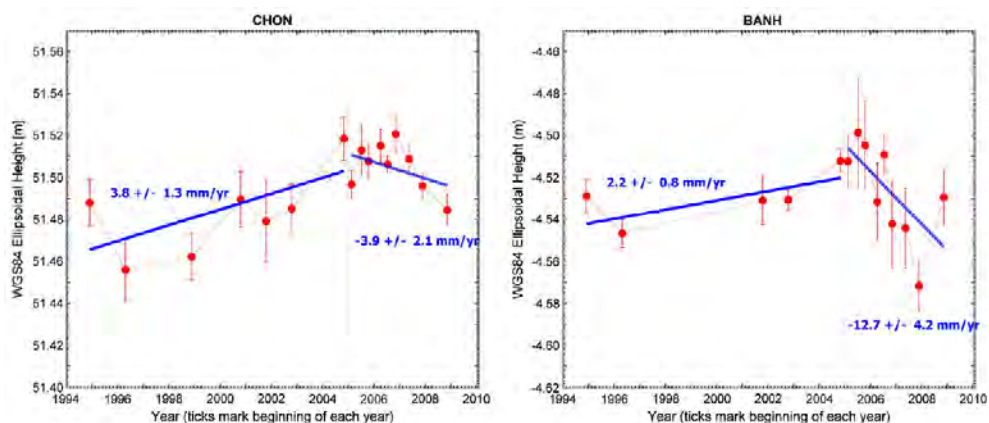
การลดระดับของเปลือกโลกที่เกิดขึ้นและตรวจพบในบริเวณประเทศไทยตั้งแต่เกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันเป็นต้นมา อาจอธิบายได้โดยอาศัยกลศาสตร์ของรอยเลื่อนชนิดที่เรียกว่า รอยเลื่อนย้อน (Reverse Fault) ที่เกิดขึ้นในบริเวณร่องลึกบาดาล (Trench) ซึ่งเป็นรอยต่อที่แผ่นเปลือกโลกมหาสมุทร (Oceanic Plate) ดันและมุดเข้าใต้แผ่นเปลือกโลกทวีป (Continental Plate) ดังเช่นในกรณีของร่องลึกบาดาลซุนดา ที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียมุดและดันเข้ามาหาแผ่นเปลือกโลกซุนดา (รูปที่ 1.1)



รูปที่ 1.1 แผนที่และรูปตัดขวางของร่องลึกบาดาลซุนดา ช้าย) แสดงแนวร่องลึกที่เกิดจากแผ่นเปลือกโลกอินเดียปะทะกับแผ่นเปลือกโลกซุนดา, ขวา) ภาคตัดขวางที่แสดงให้เห็นแผ่นเปลือกโลกมหาสมุทร ซึ่งในกรณีนี้คือแผ่นเปลือกโลกอินเดียมุดเข้าใต้แผ่นเปลือกโลกทวีป (แผ่นเปลือกโลกซุนดา) รูปทั้งสองจาก IRIS (Incorporated Research Institution for Seismology)

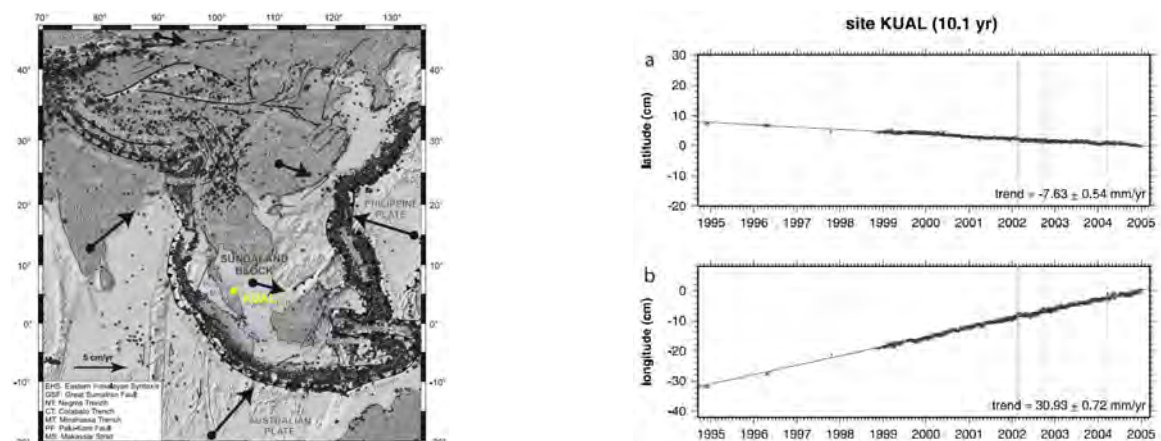
ในช่วงเวลาที่เรียกว่า Interseismic Period แรงเสียดทานระหว่างเปลือกโลกทั้งสองแผ่นมากกว่าแรงอัดหรือแรงเค้นที่เกิดจากแผ่นเปลือกโลกอินเดียดันเข้ามา พลังงานสะสมจากแรงเค้นที่มีอยู่อย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการบิดเบี้ยว (Deformation) ของเปลือกโลกทั้งสอง ในกรณีของแผ่นเปลือกโลกซุนดาที่ขี้อยู่บนแผ่นเปลือกโลกอินเดีย การบิดเบี้ยวที่เกิดขึ้นกินอาณาบริเวณกว้าง ปรากฏให้เห็นในลักษณะที่แผ่นเปลือกโลกซุนดาบริเวณภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้โก่งขึ้น ก่อให้เกิดการยกตัวขึ้นอย่างช้า ๆ ในทางดิ่ง โดยที่บริเวณที่ใกล้กับแนวร่องลึกบาดาล (Near-field) ซึ่งได้แก่ชายฝั่งและเกาะเล็ก ๆ ทางตะวันตกของเกาะสุมาตรา จะปรากฏการยกตัวที่มีขนาดใหญ่กว่าบริเวณที่ห่างออกมา (Far-field, ซึ่งได้แก่ประเทศมาเลเซีย ไทย) หลักฐานเชิงประจักษ์ของการยกตัวของแผ่นเปลือกโลกในช่วง Interseismic เห็นได้จากปะการังจำนวนมากตามเกาะขนาดเล็ก (Microatolls) นอกชายฝั่งตะวันตกของเกาะสุมาตราที่ตายเนื่องจากถูกยกตัวขึ้นเหนือระดับน้ำทะเล (Sieh et al, 1999)

ในบริเวณ Far-field การยกตัวมีอัตราที่ช้าและมีขนาดสุทธิที่เล็ก ไม่สามารถสังเกตได้ด้วยตาอย่างใดก็ตาม ข้อมูลจากงานรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสความเที่ยงตรงสูงในบริเวณจังหวัดชุมพร และชลบุรีที่กรมแผนที่ทหารได้ดำเนินการรังวัดในช่วงโครงการวิจัย GEODYSEA และ SEAMERGES ก่อนเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2004 ก็แสดงให้เห็นการยกตัวด้วยความเร็ว 2.2 และ 3.8 มม/ปีตามลำดับ (Trisirisatayawong et al, 2010) ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 การเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกก่อนและหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน 2004 แสดงการเปลี่ยนแปลงทิศทางจากยกตัวก่อนแผ่นดินไหวเป็นการลดระดับลงหลังแผ่นดินไหว (ซ้าย) บริเวณสถานีจังหวัดชลบุรี; (ขวา) ชุมพร รูปจาก Trisirisatayawong et al (2011)

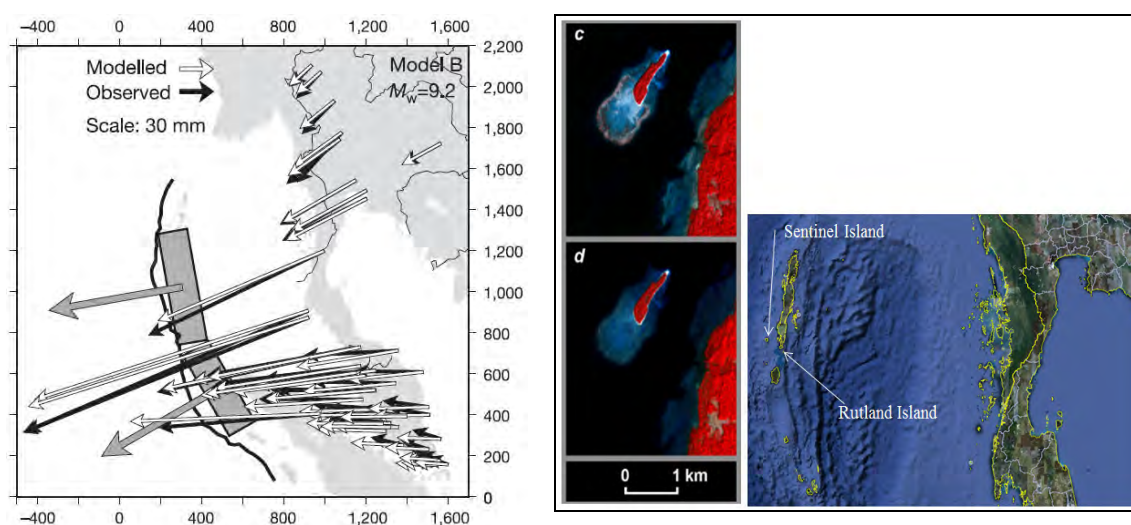
นอกจากการยกตัวที่เกิดขึ้นในช่วง Interseismic แล้ว การที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียดันแผ่นเปลือกโลกซุนดาายังทำให้แผ่นเปลือกโลกซุนดาการเคลื่อนตัวทางราบ ปริมาณการเคลื่อนตัวทางราบส่วนหนึ่งในแนวเหนือ-ใต้ถูกดูดซับด้วยแนวรอยเลื่อนสุมาตราซึ่งเป็นรอยเลื่อนเหลื่อมขวา (Right-lateral Fault) ขนาดใหญ่ที่พาดผ่านทางตะวันตกของเกาะสุมาตราและต่อเนื่องขึ้นไปทางเหนือลงไปในทะเลอันดามัน เหลือเป็นเวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบไปในแนวตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างมาก โดยมีความเร็วที่ตรวจวัดได้ที่สถานี KUAL ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศมาเลเซียประมาณ 32 มม/ปี และอะซิมุท 104° (คำนวณจากการเคลื่อนตัวในแนวเหนือ-ใต้ และตะวันออก-ตกใน Simons et al, 2007) รูปที่ 1.3 แสดงการเคลื่อนตัวทางราบของแผ่นเปลือกโลกซุนดา



รูปที่ 1.3 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบของแผ่นเปลือกโลกซุนดา (ซ้าย) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกซุนดาและแผ่นเปลือกโลกอื่น ๆ ที่อยู่รอบ ๆ (ขวา) อนุกรมเวลาของการเปลี่ยนแปลงพิกัดของสถานี KUAL ในเมือง Kuala Terengganu ทางตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศมาเลเซีย รูปขวามือแสดงการเปลี่ยนแปลงพิกัดตามแนวเหนือ-ใต้ รูปขวาล่างแสดงตามแนวตะวันออก-ตก ทั้งสองรูปจาก Simons et al (2007)

เมื่อเวลาผ่านไป แรงเค้นที่สะสมจะมากขึ้นเรื่อย ๆ จนมากกว่าแรงเสียดทานระหว่างแผ่นเปลือกโลก แผ่นเปลือกโลกซุนดาที่ถูกอัดและโค้งอยู่จากการที่ถูกดันโดยแผ่นเปลือกโลกอินเดียจะไถล (Slip) และดีดตัวออกไป ซึ่งเป็นการปลดปล่อยพลังงานที่สะสมอยู่เกิดเป็นแผ่นดินไหว การดีดตัวกลับของแผ่นเปลือกโลกที่เกิดขึ้นปรากฏเป็นการเคลื่อนตัว ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหว (Coseismic Motion) ในทางราบมีทิศทางไปหาตำแหน่งศูนย์กลางแผ่นดินไหว และในทางตั้งเกิดการลดระดับลงอย่างรวดเร็ว ค่าการเคลื่อนตัว ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวสามารถตรวจวัดได้การเปรียบเทียบค่าพิกัดของตำแหน่งต่างเดียวกันก่อนและหลังการเกิดแผ่นดินไหว

งานวิจัยของ Vigny et al (2005) แสดงให้เห็นว่าเกิดการเคลื่อนตัวทางราบ ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวในบริเวณประเทศมาเลเซีย ไทย และอินโดนีเซียอย่างชัดเจนว่ามีทิศทางไปทางตะวันตกหรือตะวันตกเฉียงใต้มุ่งไปยังศูนย์กลางแผ่นดินไหว สำหรับทางตั้ง การดีดตัวออกไปทางตะวันตกเฉียงใต้ของแผ่นเปลือกโลกซุนดาทำให้เกิดการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกที่ปรากฏให้เห็นที่เกาะ Rutland ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของหมู่เกาะนิโคบาร์-อันดามัน (Meltzner et al, 2006) อย่างไรก็ตามในบริเวณประเทศไทยและมาเลเซียที่อยู่ใน Far-field ข้อมูลจากสถานีจีพีเอสไม่ได้แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวทางตั้ง ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวแต่ประการใด



รูปที่ 1.4 การเคลื่อนตัวทางราบและทางตั้ง ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ซ้าย) การเคลื่อนตัวทางราบที่ตรวจวัดได้จากจีพีเอส (รูปจาก Vigny et al, 2005); ขวา) ภาพผสมสีที่ได้จากดาวเทียม Aster แสดงให้เห็นว่าเมื่อเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันแนวปะการังรอบเกาะ Rutland (รูป d) จมลงเมื่อเทียบกับภาพก่อนเกิดแผ่นดินไหว (รูป c) รูป c,d จาก Meltzner et al, 2006)

ในช่วงต้นหลังเหตุการณ์แผ่นดินไหว (Postseismic Period) การเคลื่อนตัวทางราบยังคงมีทิศทางสอดคล้องกับการเคลื่อนตัว ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหว งานของ Satirapod et al (2010) แสดงให้เห็นระยะการเคลื่อนตัวทางราบทั้งหมดนับจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวเดือนธันวาคม 2004 จนถึงเดือนพฤศจิกายน 2008 ในบริเวณต่าง ๆ ของประเทศไทย (ภูเก็ต 664 มม, ชุมพร 422 มม, ชลบุรี 207 มม,

ศรีสะเกษ 105 มม, อุตริดิษฐ์ 81 มม) สำหรับการเคลื่อนตัวทางดิ่ง งานของ อิทธิ ตรีสิริสัตยวงศ์ และคณะ (2554) แสดงให้เห็นการลดระดับสุทธิตั้งแต่ต้นปี 2005 ถึงสิ้นปี 2010 ที่บริเวณจังหวัดชุมพรและเชียงใหม่เป็น 67 และ 24 มม ตามลำดับ งานศึกษาการเคลื่อนตัวหลังแผ่นดินไหวในบริเวณร่องลึกบาดาลอื่น ๆ เช่น ร่องลึกบาดาล Nankai ทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศญี่ปุ่น ก็แสดงให้เห็นการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งจากการยกตัวก่อนเกิดแผ่นดินไหวเป็นการลดระดับลงหลังแผ่นดินไหวในลักษณะนี้เช่นกัน ดังรายงานโดย Savage and Thatcher (1992) และ Tabei et al (2005)

อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกทั้งทางราบและทางดิ่งหลังแผ่นดินไหวมีทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนตัวในช่วง Interseismic ดังนั้น ถ้าหากการเกิดแผ่นดินไหวเป็นไปตามทฤษฎีวงจรแผ่นดินไหว (Seismic Cycle) ที่มีแนวคิดว่าการเกิดแผ่นดินไหวขนาดใหญ่ไม่ได้เกิดแบบสุ่ม (Random) แต่จะเกิดซ้ำเป็นระยะ ๆ ในบริเวณเดิมของรอยเลื่อนและมีเวลาห่างกันโดยประมาณตามคาบอุบัติซ้ำ (Recurrence Period, ช่วงเวลาเฉลี่ยจากการเกิดแผ่นดินไหวครั้งหนึ่งไปยังครั้งถัดไป) ในที่สุด การเคลื่อนตัวหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน 2004 ของเปลือกโลกซุนดา (ทางดิ่งลดระดับ, ทางราบไปทางตะวันตกเฉียงใต้) ควรจะต้องค่อย ๆ สิ้นสุดลงและเริ่มกลับไปสู่ช่วง Interseismic (ทางดิ่งยกตัว, ทางราบไปทางตะวันออก) อีกครั้ง โดยแนวคิดนี้ ทำให้เป็นไปได้ที่จะสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายการลดระดับหลังแผ่นดินไหวว่าจะค่อย ๆ มีอัตราช้าลงอย่างไร ลดระดับสุทธิเท่าไรและกินเวลายาวนานเท่าไร จนกระทั่งการลดระดับสิ้นสุดลง หากมีข้อมูลคาบอนุกรมเวลาความสูงที่เที่ยงตรงและยาวนานพอ

การหาอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกทำได้โดยการสร้างอนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางดิ่ง การเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดทางดิ่งเทียบกับเวลาที่ผ่านไปจะทำให้สามารถคำนวณหาอัตราหรือความเร็วของการเคลื่อนตัวได้ แต่เนื่องจากการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกมีอัตราเร็วในระดับมิลลิเมตร/ปี ดังนั้น เทคนิคการรังวัดที่ใช้จึงจำเป็นต้องให้ค่าพิกัดที่มีความถูกต้องเที่ยงตรงลงไปถึงระดับมิลลิเมตร การรังวัดที่ให้ความถูกต้องในระดับนี้อาจมีทางเลือกได้สองทางกล่าวคือ 1) การใช้ VLBI (Very Long Baseline Interferometry) หรือ 2) การใช้สัญญาณดาวเทียมจีพีเอส เนื่องจากการวัดจาก VLBI จำเป็นต้องมีสถานีวัดที่มีมูลค่าการก่อสร้างและติดตั้งสูงกว่าหลายเท่าเมื่อเทียบกับการใช้เทคโนโลยีจีพีเอส งานวิจัยเกือบทั้งหมดทางด้านนี้รวมทั้งงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการใช้สัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในการตรวจวัดหาการเปลี่ยนแปลงความสูงของแผ่นเปลือกโลก

การหาค่าพิกัดที่มีความเที่ยงตรงสูงมากสำหรับใช้ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคที่เป็นที่ยอมรับในงานธรณีฟิสิกส์ระดับสากลที่เรียกว่า PPP (Precise Point Positioning, ดูรายละเอียดใน Zumberge et al, 1997) โดยอาศัยการเก็บข้อมูลด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสชนิดสองความถี่ (Dual-frequency Geodetic/Geophysic GPS receiver) แล้วนำข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่รังวัดได้มาประมวลผลด้วยซอฟต์แวร์ GIPSY (GPS Inferred Positioning System) ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางด้านงานวิทยาศาสตร์และอวกาศที่พัฒนาโดย JPL (Jet Propulsion Laboratory) ค่าพิกัดที่ได้จากเทคนิคนี้มีความถูกต้องในระดับมิลลิเมตร ซึ่งทำให้อนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางดิ่งที่นำมาใช้เพื่อคำนวณหาอัตราการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในบริเวณกรุงเทพมหานครมีความเที่ยงตรงในระดับมิลลิเมตรด้วยเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งที่จะเลือกเพื่อเป็นสถานีตรวจวัดไม่สามารถใช้อาคารหรือสิ่งปลูกสร้างใดในบริเวณกรุงเทพมหานครหรือจังหวัดใกล้เคียงได้ เนื่องจากฐานรากของตัวอาคารหรือโครงสร้างเหล่านี้ล้วนแต่อยู่บนชั้นทราย ทำให้อัตราการเคลื่อนตัวที่ได้ไม่ได้มีแนวทางการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกเท่านั้น แต่จะมีการทรุดตัวของชั้นดิน/ทรายปะปนเข้ามาด้วยและไม่สามารถแยกแยะได้ เนื่องจากบริเวณกรุงเทพมหานครไม่มีภูเขาหรือหินโผล่ (Outcrop) ที่สามารถใช้ตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกได้ และการเจาะชั้นดินที่มีความหนาอย่างน้อยหลายร้อยเมตรและในบางบริเวณที่เคยมีการเจาะสำรวจเพื่อหาปิโตรเลียม (เขตรัฐบุรณะ) พบว่ามีความหนาถึงประมาณ 2 กิโลเมตรเพื่อให้ถึงชั้นหินก็เป็นสิ่งที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงเกินกว่าที่จะเป็นไปได้ แนวคิดของงานวิจัยนี้จึงจะทำการติดตั้งสถานีรับสัญญาณจีพีเอสในสถานที่ราชการหรือสถานที่ที่มีโครงสร้างบนชั้นหิน มีความปลอดภัยและมั่นใจว่าจะมีผู้รับชอบในการการควบคุมดูแลเครื่องรับสัญญาณทั้งในระหว่างการดำเนินโครงการและหลังจากโครงการเสร็จสิ้นลงแล้ว

1.4 แนวทาง/ขั้นตอนการดำเนินงาน

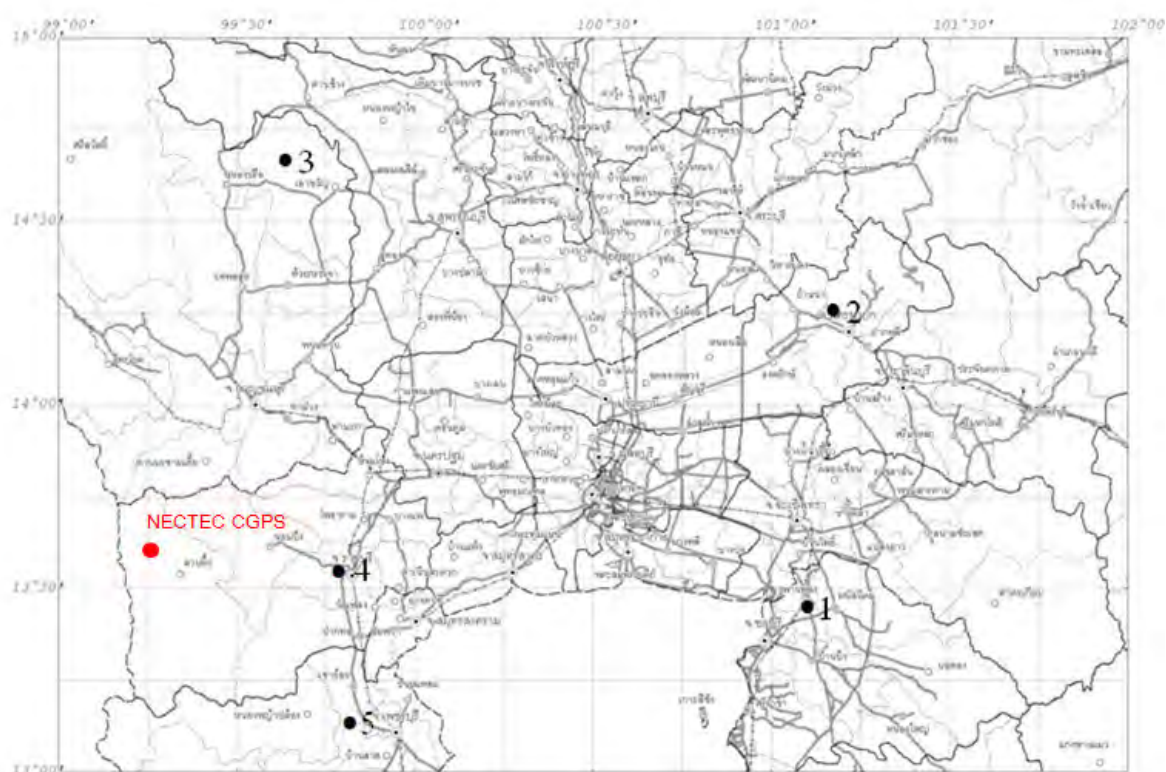
โครงการวิจัยที่ สกว. (สำนักงานกองทุนวิจัยแห่งชาติ) ให้การสนับสนุนนี้เป็นการดำเนินการควบคู่กับโครงการที่มีวัตถุประสงค์เดียวกันที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติให้การสนับสนุน โดยในส่วนของทาง สกว. จะเป็นการรณรงค์ในลักษณะเป็นครั้ง ๆ (Campaign GPS) ทุก ๆ ช่วงเวลาประมาณ 3 เดือนในตำแหน่งตำแหน่งที่เป็นหินโผล่จำนวน 5 ตำแหน่งรอบกรุงเทพมหานคร โดยมีกรมแผนที่ทหารเป็นผู้ดำเนินการออกรังวัดให้ในตำแหน่งที่เลือกตามช่วงเวลาที่กำหนด สำหรับในส่วนที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติให้การสนับสนุนจะเป็นการรณรงค์แบบต่อเนื่อง (Continuous GPS หรือที่เรียกว่า CGPS) โดยคณะผู้วิจัยได้จัดซื้อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS ชนิดที่ใช้กับงานทางด้านยื่อเด็คและธรณีฟิสิกส์ชนิด 2 ความถี่จำนวน 1 เครื่องและดำเนินการติดตั้งสถานีบริเวณ อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ตำแหน่งของสถานีจีพีเอสแบบเป็นครั้ง ๆ 5 สถานีและสถานี CGPS แสดงในรูปที่ 1.5 ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ได้จากทั้งกรณีรณรงค์เป็นครั้ง ๆ และแบบต่อเนื่อง คณะผู้วิจัยเป็นผู้ดำเนินการประมวลผลเพื่อให้ได้ค่าพิกัด และทำการวิเคราะห์เพื่อหาอัตราการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก

ในช่วงเวลาของโครงการวิจัยนี้ อนุกรมเวลาของค่าพิกัดที่คำนวณจากสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสทั้งจาก CGPS และจาก Campaign CGPS จะทำให้สามารถวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่กำลังเกิดขึ้นในพื้นที่ศึกษาได้ อย่างไรก็ตาม การประเมินว่าการลดระดับของเปลือกโลกจะสิ้นสุดลงเมื่อไรซึ่งเป็นโจทย์วิจัยที่สำคัญขึ้นอยู่กับคาบอุบัติซ้ำ (Recurrence Period) ของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 2 ค่าที่แตกต่างกันมากคือ

- ประมาณ 500 ปี ซึ่งเป็นค่าที่รายงานโดย Jankaew et al (2008) และ Monecke et al (2008) ในงานวิจัยที่ใช้วิธีตรวจหาอายุของตะกอนที่พัดพามาโดยคลื่นสึนามิ

- ประมาณ 170 ปี เป็นค่าที่รายงานโดย Natawidjaja et al (2006), Sieh et al (2008) ในงานวิจัยที่ใช้วิธีการตรวจซากปะการังที่ถูกยกตัวขึ้นเหนือผิวน้ำในบริเวณหมู่เกาะ Metawai ทางตะวันตกของเกาะสุมาตรา

อนุกรมเวลาที่ได้จากจีพีเอสที่ได้ดำเนินการไปในโครงการนี้ซึ่งกระจายอยู่รอบ ๆ พื้นที่ศึกษา จะทำให้สามารถคำนวณอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งได้อย่างน่าเชื่อถือมากขึ้น และเมื่อรวมกับอนุกรมเวลาของค่าความสูงที่สร้างจากแบบจำลองทางธรณีฟิกส์ (พัฒนาโดยนักวิจัยของสถาบัน Ecole Normal Supreme ประเทศฝรั่งเศส) บนพื้นฐานของคาบอุบัติซ้ำทั้ง 2 กรณี ก็จะทำให้สามารถสรุปได้ชัดเจนมากขึ้นว่าการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกในช่วง Postseismic ที่ผ่านมาสอดคล้องกับกรณีใดและน่าจะสิ้นสุดเมื่อใด



รูปที่ 1.5 แผนที่แสดงตำแหน่งของสถานีจีพีเอสในโครงการวิจัย จุดที่มีหมายเลขกำกับเป็นตำแหน่งสถานีรังวัดแบบเป็นครั้ง ๆ (Campaign GPS) จำนวน 5 สถานีรอบ ๆ พื้นที่ศึกษา ส่วน NECTEC CGPS เป็นตำแหน่งของสถานี CGPS ที่ติดตั้งใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ภายใต้โครงการที่ได้รับการสนับสนุนร่วมจากศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

โดยสรุป ขั้นตอนในการทำวิจัยสามารถแบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลักดังนี้

1. ดำเนินการสำรวจหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานีรังวัดดาวเทียมจีพีเอสทั้งแบบเป็นครั้ง ๆ และแบบต่อเนื่อง

2. จัดซื้อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสและอุปกรณ์ที่จำเป็นต่องานวิจัย และดำเนินการติดตั้งและทดสอบสถานีฐานแบบถาวร CGPS
3. ประมวลผลหาค่าพิกัดจากข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสและวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัว
4. การประยุกต์ใช้ผลจากแบบจำลองทางกายภาพและเปรียบเทียบผลที่ได้จากแบบจำลองกับค่าตรวจวัดที่ได้จากจีพีเอส
5. สรุปผลงานวิจัย และข้อเสนอแนะ ตลอดจนแนวทางในการสร้าง Digital Archive ของข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจากสถานีจีพีเอสที่ติดตั้งในโครงการนี้และสถานีจีพีเอสอื่น ๆ ในประเทศเพื่อประโยชน์กับงานวิจัยด้านต่าง ๆ ที่ต้องใช้สัญญาณดาวเทียมจีพีเอสต่อไปในอนาคต

รายละเอียดเกี่ยวกับการดำเนินงานในขั้นตอนที่ 1-2 แสดงไว้ในบทที่ 3 ของรายงานสมบูรณ์ฉบับนี้ สำหรับรายละเอียดการดำเนินงานรังวัดและประมวลผลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสและการประมาณค่าจากแบบจำลองในขั้นตอนที่ 3 และ 4 แสดงไว้ในบทที่ 3 และ 4 ตามลำดับ และการสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะต่าง ๆ ตามขั้นตอนที่ 5 แสดงไว้ในบทที่ 5

2. การกำหนดตำแหน่งสถานีจีพีเอสเพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก

2.1 ข้อจำกัดในการหาที่ตั้งสถานีจีพีเอสในพื้นที่ศึกษา

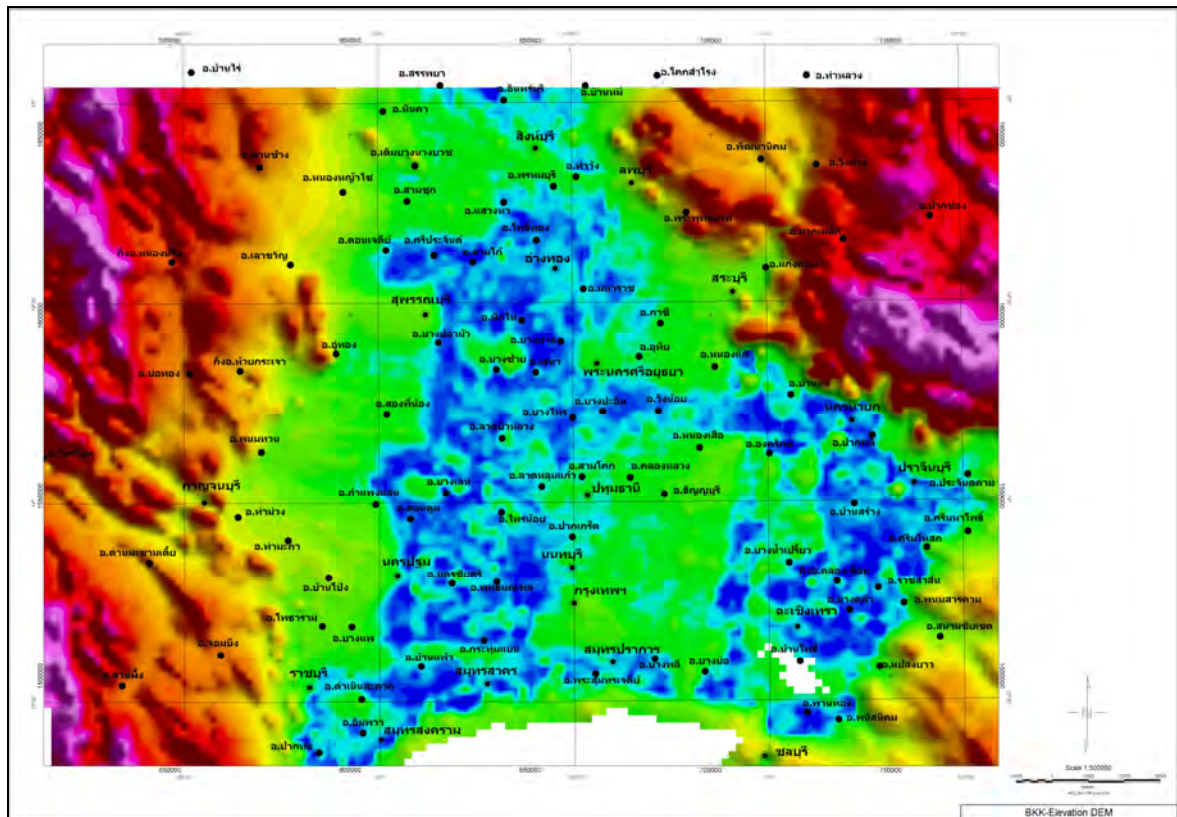
การหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานีจีพีเอสเป็นขั้นตอนที่สำคัญยิ่ง การเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมจะเป็นหลักประกันที่ทำให้เชื่อมั่นได้ว่าการเคลื่อนตัวที่สังเกตเห็นเป็นการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก ไม่ใช่การเคลื่อนตัวของสิ่งอื่น ๆ ที่ปะปนเข้ามาและอาจทำให้วิเคราะห์ผลผิดพลาดได้ ดังนั้นเงื่อนไขหลักที่สำคัญที่สุดในการเลือกตำแหน่งที่เหมาะสมสำหรับติดตั้ง CGPS ในโครงการนี้คือต้องเป็นตำแหน่งที่อยู่บนชั้นหิน เพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของชั้นตะกอนดิน/ทรายที่อาจมีการเคลื่อนตัวจากสาเหตุอื่น เช่น การทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลหรือจากน้ำหนักของสิ่งปลูกสร้างขนาดใหญ่มาปะปน

อย่างไรก็ตาม เงื่อนไขข้างต้นทำให้ไม่สามารถเลือกตำแหน่งใด ๆ ในพื้นที่ศึกษาบริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนสำหรับเป็นสถานีจีพีเอสได้ เนื่องจากในพื้นที่ดังกล่าวชั้นหินอยู่ลงไปลึกมากในระดับหลายร้อยเมตรไปจนถึงประมาณสองพันเมตร อาคารสิ่งปลูกสร้างทั้งหมดมีฐานรากที่ลึกลงไปเพียงชั้นทราย (หรือในบริบทของอุทกธรณีวิทยาคือชั้นน้ำกรุงเทพ) ซึ่งอยู่ลึกจากผิวดินเพียง 20-50 เมตรเท่านั้น

การหาตำแหน่งของสถานีจีพีเอสจึงจำเป็นต้องใช้พื้นที่ที่เป็นภูเขาหรือมีหินโผล่ (Outcrop) ในบริเวณจังหวัดอื่น ๆ ที่อยู่ไม่ห่างมากจากพื้นที่ศึกษา โดยให้มีระยะทางจากตำแหน่งที่เลือกถึงจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันใกล้เคียงกันกับระยะทางจากบริเวณชายฝั่งพื้นที่ศึกษาไปถึงจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (ประมาณ 1,000 กิโลเมตร) โดยอาศัยหลักการที่ว่าพื้นที่ศึกษาอยู่ใน Far-field ของเหตุการณ์แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน จึงมีการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ จากบริเวณหนึ่งไปยังอีกบริเวณหนึ่ง การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกของสองบริเวณที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกันจึงอาจถือได้ว่ามีค่าเท่ากัน และสามารถใช้ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษาเป็นตัวแทน (Proxy) เพื่อหาอัตราการเคลื่อนตัวได้

2.2 การสำรวจหาที่ตั้งของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ

ที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน และบริเวณใกล้เคียง เป็นส่วนหนึ่งของลุ่มแอ่งภาคกลาง ซึ่งคาดว่าเกิดขึ้นประมาณต้นสมัยโอลิโกซีน เนื่องจากการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ จึงทำให้เกิดรอยเลื่อนปกติในแนวเหนือ-ใต้ ทำให้โลกทรุดตัวเกิดเป็นแอ่งกึ่งกราเบน ซึ่งมีลักษณะเป็นแอ่งลึกทางด้านตะวันตก ลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่สำรวจ ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่ม ซึ่งเป็นแหล่งปลูกข้าวที่สำคัญของประเทศไทย ระดับของผิวดินจะอยู่เหนือระดับน้ำทะเลเล็กน้อยและบางแห่งอยู่ใต้ระดับน้ำทะเล ทางตะวันตกของและตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ ซึ่งเป็นขอบแอ่ง จะเป็นเนินเขาและภูเขาสูง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แผนที่แสดงลักษณะภูมิประเทศของพื้นที่ศึกษาและบริเวณใกล้เคียง (ข้อมูล DEM จากดาวเทียม Aster)

ธรณีวิทยาส่วนใหญ่เป็นหินตะกอนยุคควอเทอร์นารีสมัยไพลสโตซีน ปิดทับหินยุคเทอร์เชียรี มีความหนาของชั้นตะกอนประมาณ 650 เมตร ถึง 1,830 เมตร พื้นที่แต่อย่างใดก็ตามเนื่องจากพื้นที่ที่ศึกษานั้นเป็นชั้นตะกอนที่มีความหนามาก จึงไม่เหมาะสมในการที่ใช้เป็นจุดที่จะทำการศึกษาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกทางดิ่งได้ ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้เลือกบริเวณที่เป็นหินแกรนิต ซึ่งเป็นแนวต่อเนื่องยาวตามแนวเหนือ-ใต้ ตั้งแต่จังหวัดเชียงใหม่ ผ่านบริเวณตะวันตก ได้แก่ จังหวัดอุทัยธานี กาญจนบุรี สุพรรณบุรี รวมถึงกลุ่มแอ่งภาคกลาง ผ่านบริเวณภาคตะวันออกได้แก่ จังหวัดชลบุรีและระยอง ลงไปในอ่าวไทยและคลุมภาคใต้ตอนล่าง หินแกรนิตดังกล่าวส่วนใหญ่จะแทรกซ้อนขึ้นในหินชั้นยุคพาเลโอโซอิกตอนล่าง และหินปูนเกรดสูง ที่ถูกปิดอัดคดโค้งบิดงอ

การเลือกตำแหน่งสำหรับศึกษาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก มีหลักเกณฑ์ดังนี้

- บริเวณที่ทำการตรวจวัดจะต้องเป็นบริเวณที่มีหินโผล่ (outcrop) ของชุดหินที่สามารถแทนหินฐาน (Bed rock) ของบริเวณพื้นที่ศึกษาได้
- บริเวณที่ทำการตรวจวัดจะต้องพยายามให้อยู่ในด้านเดียวกันของรอยเลื่อนขนาดใหญ่ให้มากที่สุด

- บริเวณที่ทำการตรวจวัดจะต้องไม่มีต้นไม้ สิ่งก่อสร้าง หรือวัตถุขนาดใหญ่ที่อาจมาบดบังสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

จากหลักเกณฑ์ดังกล่าว คณะผู้ศึกษาจึงได้เลือกตำแหน่งที่ทำการศึกษาค้นคว้าเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นที่ศึกษาจำนวน 5 ตำแหน่ง (ดังแสดงในรูปที่ 2.2) ดังนี้

ตำแหน่งที่ 1 บริเวณ PBM 1408 (หมู่ระดับชั้นที่ 1) สถานที่ตั้งอยู่ใน ป.พัน.21 รอ. อ.เมือง จ.ชลบุรี เป็นหินแกรนิต มีลักษณะเนื้อหินเป็นดอก หยาบปานกลางถึงหยาบ มีแร่ประกอบหินจำพวกแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์ หินเปกมาไตต์ หินแอฟไลต์ สายหินควอตซ์และผนังหินควอตซ์

ตำแหน่งที่ 2 บริเวณเขาสูง อ.เมือง จ.ราชบุรี เป็นหินปูนเนื้อแน่นเป็นชั้น สีเทาถึงเทาอมน้ำเงินแทรกสลับด้วยหินเชิร์ต หินทรายและหินปูน กรวดเหลี่ยมเชื่อมและประสานด้วยแร่ซิลิกา

ตำแหน่งที่ 3 อยู่ในบริเวณ รร.นายร้อย จปร. จ.นครนายก เป็นหินอัคนีจำพวกไรโอไลต์และแอนไดไซต์

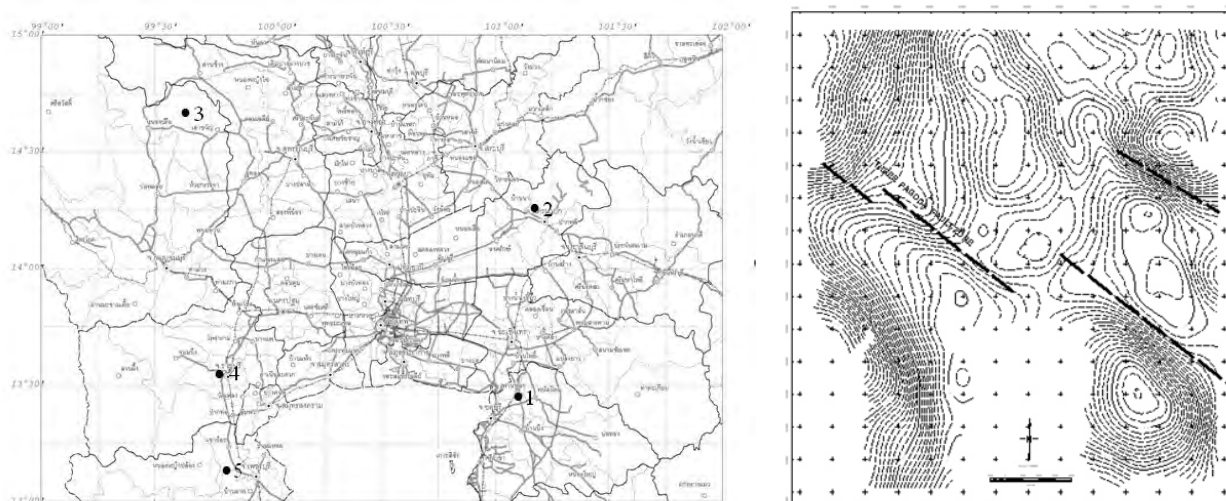
ตำแหน่งที่ 4 บริเวณเขา บ้านหนองไผ่ล้อม ต.บ้านหนองฝ้าย อ.เลาขวัญ จ.กาญจนบุรี เป็นหินแกรนิต มีลักษณะเนื้อหินเป็นดอก หยาบปานกลางถึงหยาบ มีแร่ประกอบหินจำพวกแร่ควอตซ์ มัสโคไวต์ หินเปกมาไตต์ หินแอฟไลต์ สายหินควอตซ์และผนังหินควอตซ์

ตำแหน่งที่ 5 บริเวณเขาเนินเขมร อ. บ้านลาด จ.เพชรบุรี เป็นหินโคลนและหินทราย หินดินดาน สีเทาถึงสีเทาแดง

ทั้งนี้ จากการศึกษาข้อมูลวัดค่าความโน้มถ่วงของโลกของกรมทรัพยากรธรณีพบว่าในพื้นที่สำรวจมีรอยเลื่อนที่อยู่ระดับลึก ได้แก่ รอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ รอยเลื่อนที่ผ่าน จ.ชลบุรี และรอยเลื่อนที่ผ่าน จ.สระแก้ว ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ดังนั้นตำแหน่งที่ 1 ถึง ตำแหน่งที่ 4 ตั้งอยู่ในแนวหินแกรนิตชุดเดียวกันและอยู่ฝั่งเดียวกันของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์ (ยกเว้นตำแหน่งที่ 4) สำหรับตำแหน่งที่ 5 ตั้งอยู่ในบริเวณที่เป็นหินปูนในยุคเพอร์เมียน ซึ่งรองรับด้วยหินแกรนิตที่อยู่ในแนวตะวันตกของรอยเลื่อนเจดีย์สามองค์และรอยเลื่อนระนอง

เมื่อเลือกบริเวณที่จะเป็นสถานีจีพีเอสในขั้นต้นแล้วจากแผนที่แล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการสำรวจภาคสนาม 2 ครั้งในเดือนมกราคม 2554 เพื่อกำหนดตำแหน่งที่ตั้งที่แน่นอนในพื้นที่ จากนั้นสำหรับตำแหน่งที่ 3, 4 และ 5 ทำการสกัดหินเพื่อฝังหลอดทองเหลืองที่ออกแบบมาเป็นพิเศษสำหรับการรังวัดทางธรณีฟิสิกส์ ก่อนที่จะหล่อปูนปิดให้มีหัวหลอดโผล่มาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้สามารถขันเกลียวของเสาอากาศเข้ากับหัวหลอดในระหว่างการรังวัด โดยในการเลือกตำแหน่งนี้ นอกจากความเหมาะสมในแง่ของชั้นหินและการรับสัญญาณดาวเทียมแล้ว ยังพิจารณาหาพื้นที่ที่ห่างไกลจากชุมชน เพื่อหลีกเลี่ยงการจราจรขนส่ง และการก่อสร้างหรือพัฒนาที่ดินที่อาจทำให้มีการเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางตั้งหรือ

สร้างความเสียหายให้กับหมดได้ ส่วนในกรณีตำแหน่งที่ 1 และ 2 โครงการศึกษานี้อาศัยหมุดเดิมที่มีอยู่ แล้วจากโครงการอื่นก่อนหน้านี้



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบตำแหน่งของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ กับแนวรอยเลื่อน ซ้าย) ตำแหน่งสถานีจีพีเอสที่ผ่านการคัดเลือกว่ามีความเหมาะสมจำนวน 5 สถานี ขวา) แนวรอยเลื่อนจากการสำรวจข้อมูลค่าโน้มถ่วงของโลก

คณะผู้วิจัยได้กำหนดชื่อสถานีจีพีเอสแบบเป็นครั้ง ๆ ในโครงการนี้ทั้ง 5 สถานีเป็นอักษรย่อ 4 ตัวตามชื่อจังหวัดหรือสถานที่ที่ติดตั้งตามมาตรฐานของ IGS (International GNSS Service) ดังนี้

- สถานีหมายเลข 1 จ.ชลบุรี ชื่อสถานีคือ CHON
- สถานีหมายเลข 2 โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า จ.นครนายก ชื่อสถานีคือ CRMA
- สถานีหมายเลข 3 จ.กาญจนบุรี ชื่อสถานีคือ KANC
- สถานีหมายเลข 4 จ.ราชบุรี ชื่อสถานีคือ RATC
- สถานีหมายเลข 5 จ.เพชรบุรี ชื่อสถานีคือ PETC



รูปที่ 2.3 ตำแหน่งสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ ทั้ง 5 ตำแหน่ง จากซ้ายไปขวาและจากบนลงล่าง รูปแสดง การรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสครั้งที่ 1 ใน ระหว่างวันที่ 21-26 มกราคม 2554 บริเวณสถานีที่ 1 – 5 ในจังหวัดชลบุรี (CHON), นครนายก (CRMA) กาญจนบุรี (KANC) ราชบุรี (RATC) และเพชรบุรี (PETC) ตามลำดับ

2.3 การสำรวจหาที่ตั้งของสถานีจีพีเอสแบบต่อเนื่อง

คณะผู้วิจัยได้ทำการสำรวจพื้นที่บริเวณจังหวัดรอบกรุงเทพมหานครเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับสถานีจีพีเอสแบบต่อเนื่องจำนวน 2 ครั้งในช่วงเดือนมิถุนายน 2554 และได้ข้อสรุปเบื้องต้น จำนวนสามตำแหน่งได้แก่

- บริเวณสำนักงานทรัพยากรน้ำบาดาลเขต 8 อ.เมือง ราชบุรี

- มหาวิทยาลัยราชภัฏจลอมบึง อ.จลอมบึง จ.ราชบุรี
- สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส อ.สวณฝั้ง จ.ราชบุรี

อย่างไรก็ตาม สถานที่สองแห่งแรก แม้จะมีความสะดวกในแง่ของการเดินทางไปติดตั้งและบำรุงรักษามากกว่า แต่ไม่สามารถหาข้อมูลแน่ชัดว่าโครงสร้างอาคารอยู่บนชั้นหินหรือไม่ คณะผู้วิจัยจึงตัดสินใจเลือกสำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส อ.สวณฝั้ง จ.ราชบุรี (รูปที่ 2.4) เป็นสถานที่ติดตั้ง CGPS ที่เหมาะสมทั้งสภาพทางธรณีวิทยา ที่เห็นได้อย่างชัดเจนว่าตั้งอยู่บนเขาหินแกรนิตโฟลต์ที่มีความมั่นคง และระยะทางจากสำนักสงฆ์ห้วยน้ำใสไปยังจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน (1,194 กิโลเมตร) ใกล้เคียงกับระยะทางจากชายฝั่งกรุงเทพมหานครบริเวณเขตบางขุนเทียนไปยังจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหว (1,232 กิโลเมตร) เพียง 38 กิโลเมตร



รูปที่ 2.4 ที่ตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง ณ สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส อ.สวณฝั้ง จ.ราชบุรี

บริเวณสำนักสงฆ์ห้วยน้ำใสมีตำแหน่งที่เหมาะสมในเรื่องของความปลอดภัยของเครื่องมือหลายตำแหน่ง หลังจากการสำรวจโดยละเอียดแล้วได้เลือกบริเวณอาคารซึ่งมีหน้าจั่วที่สูงสามารถติดตั้งเสาอากาศที่ทำให้มีมุมรับสัญญาณดาวเทียมที่ดีเยี่ยมดังแสดงในรูปที่ 2.5 และทางสำนักสงฆ์ยินดีให้การดูแลอุปกรณ์ทั้งหมดในระยะยาว



รูปที่ 2.5 อาคารที่ติดตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB (ซ้าย) เสาและฐานรากของอาคารสำนักสงฆ์อยู่บนเชิงเขาหินแกรนิตกลาง) หลังคาอาคารสูง ซึ่งภายในสามารถเก็บเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสได้อย่างปลอดภัย รวมทั้งมีปลั๊กไฟฟ้าเพื่อจ่ายให้กับเครื่องรับสัญญาณที่จะทำการรับวัดและบันทึกข้อมูลตลอดเวลา ขวา) จั๋วหลังคาซึ่งเป็นตำแหน่งติดตั้งเสาอากาศจีพีเอสและสามารถร้อยสายสัญญาณลงมาทางช่องทางต่างเชื่อมต่อกับเครื่องรับสัญญาณที่อยู่ภายใน

2.4 การจัดหาและติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อการรับวัดอย่างต่อเนื่อง

ในส่วนของการจัดซื้อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส คณะผู้วิจัยได้ทำการกำหนดคุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส (รายละเอียดในภาคผนวก ก) และทำการจัดซื้อตามขั้นตอนการจัดซื้อจัดจ้างของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย มีผู้ยื่นซองเสนอราคาในวันที่ 29 สิงหาคม 2554 รวม 4 ราย ผ่านการพิจารณาคุณสมบัติเฉพาะ 3 ราย คัดเลือกผู้เสนอราคาต่ำสุดเป็นเครื่องรับสัญญาณแบบ Trimble รุ่น R7 GNSS ผลิตในประเทศสหรัฐอเมริกา ในวงเงิน 577,800 บาท ส่งมอบเมื่อวันที่ 28 ตุลาคม 2554

ขั้นตอนถัดจากการจัดหาเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสคือการทดสอบระบบทั้งหมดก่อนนำไปติดตั้ง ซึ่งตามแผนงานที่ตั้งไว้จะดำเนินการทันทีที่ได้รับเครื่องมือ แต่เนื่องจากเหตุการณ์น้ำท่วมใหญ่เมื่อปลายปี 2554 ทำให้การทดสอบระบบต้องเลื่อนออกไปเป็นช่วงปลายเดือนธันวาคม 2554 คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการทดสอบชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่จัดซื้อโดยติดตั้งบริเวณดาดฟ้าอาคารวิศวกรรมสำรวจเป็นเวลา 2 สัปดาห์ (รูปที่ 2.6) เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าจะไม่เกิดปัญหาในการรับสัญญาณดาวเทียมจากเครื่องรับในสถานที่ติดตั้งจริง โดยทำการกำหนดค่าในการรับสัญญาณดาวเทียมทั้ง 2 ความถี่ กับระบบดาวเทียม GPS และ GLONASS ตั้งค่าอัตราการบันทึกข้อมูลทุก 30 วินาที ค่ามุมกั้นฟ้า (Elevation mask angle) ที่ 10 องศา และการรับสัญญาณต่อเนื่องตลอดเวลาเป็นเวลา 7 วัน โดยกำหนดให้เครื่องรับทำการตัดไฟล์ข้อมูลทุก 24 ชั่วโมง ผลการทดสอบระบบสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 2.6 การทดสอบชุดเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมที่จัดซื้อสำหรับโครงการวิจัย บริเวณตาดฟ้าอาคารภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

หลังจากที่ผ่านการทดสอบแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการติดตั้งชุดเครื่องรับสัญญาณภาคสนาม ณ สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส เมื่อวันที่ 7-8 มกราคม 2555 โดยทำการจัดสร้างแท่นวางเสาอากาศสำหรับใช้ในการติดตั้งเสาอากาศของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเข้ากับอาคาร และเสาล่อฟ้าแบบพิเศษขึ้นสำหรับติดตั้งกับผนังคอนกรีต โดยทุกชิ้นส่วนทำจากเหล็กกล้าปลอดสนิม รูปที่ 2.7 แสดงการติดตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่องที่ อ.สวนผึ้ง

อย่างไรก็ตามเมื่อรับสัญญาณดาวเทียมไปได้ระยะหนึ่งได้รับแจ้งจากทางสำนักสงฆ์ว่าระบบจ่ายไฟของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสมีปัญหาขัดข้อง คณะผู้วิจัยจึงได้เดินทางเข้าไปพร้อมกับเจ้าหน้าที่บริษัทผู้แทนจำหน่ายเพื่อทำการแก้ไขและเริ่มรับสัญญาณดาวเทียมอีกครั้งในวันที่ 12 มกราคม 2555 ต่อเนื่องมาจนถึงปัจจุบันโดยไม่มีปัญหาใด ๆ เกิดขึ้นอีก



รูปที่ 2.7 การติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อรับวัดอย่างต่อเนื่อง แสดงการติดตั้งที่สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ระหว่างวันที่ 7-8 มกราคม 2555 (บนซ้าย) เจ้าหน้าที่ทางเทคนิคทำการติดตั้งนั่งร้าน (บน ขวา) ช่างไฟฟ้าเดินสายไฟและต่อไฟเข้าสายไฟหลักของสำนักสงฆ์ (ล่างซ้าย) ติดตั้งตู้เก็บชุดเครื่องรับสัญญาณและ UPS ในศาลาใหญ่ แล้วทดสอบรับวัดและตั้งค่าชุดเครื่องรับสัญญาณ (ล่างขวา) เสร็จสิ้นการติดตั้งแล้ว เก็บอุปกรณ์ไว้ในตู้และติดป้ายสถานี CGPS

คณะผู้วิจัยได้กำหนดชื่อสถานี CGPS ที่ติดตั้งที่สำนักสงฆ์ห้วยน้ำใสที่ได้รับการสนับสนุนจาก ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาตินี้ตามข้อกำหนดของ IGS ว่า SBRB ตามชื่ออำเภอ สวนผึ้งและจังหวัดราชบุรีที่เป็นที่ตั้งของสถานี ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 เสาอากาศ เสาหล่อฟ้าและ
แผ่นป้ายแสดงชื่อสถานีจีพีเอสต่อ
เนื่อง SPRB และหน่วยงาน
ผู้ดำเนินการและสนับสนุน

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ติดตั้งที่สถานี CGPS SPRB มีหน่วยความจำที่สามารถบันทึกข้อมูลได้ต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ปี อย่างไรก็ตาม เพื่อป้องกันความสูญเสียข้อมูลซึ่งอาจเกิดจากเหตุสุดวิสัย เช่น เกิดอัคคีภัย แผงวงจรหน่วยความจำเสียหายจนไม่สามารถซ่อมแซมได้ จึงจำเป็นต้องมีการดาวน์โหลดข้อมูลออกจากหน่วยความจำของเครื่องรับสัญญาณเป็นระยะ ๆ เนื่องจากตำแหน่งของสถานี SPRB ไม่สามารถใช้บริการจากผู้ให้บริการ on-line ได้ คณะผู้วิจัยจึงจำเป็นต้องเดินทางไปยังสถานีเพื่อดาวน์โหลดข้อมูลออกจากเครื่องรับ โดยกำหนดทุกประมาณ 5-6 เดือนตามความเหมาะสม การดาวน์โหลดข้อมูลครั้งแรกดำเนินการเมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม 2555 (รูปที่ 2.9) ส่วนครั้งที่สองได้ดำเนินการเมื่อวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2556 ซึ่งในระหว่างการดาวน์โหลดข้อมูลแต่ละครั้งได้ทำการตรวจสอบสภาพของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม เสาอากาศและสายสัญญาณไปด้วยในตัว จนถึงปัจจุบันพบว่าเครื่องมืออุปกรณ์ทั้งหมดของสถานีเป็นปกติเรียบร้อยดีทุกประการ



รูปที่ 2.9 การดาวน์โหลดข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสของสถานี SPRB ดำเนินการครั้งแรก เมื่อวันที่ 28 พฤษภาคม 2555

3. การเคลื่อนตัวของเปลือกโลกที่ได้จากจีพีเอส

3.1 การรังวัดสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสที่ใช้ในการวิจัยนี้สำหรับศึกษาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกได้มาจากสถานีจีพีเอส 2 กลุ่ม ดังรายละเอียดในบทที่ 2 ซึ่งนำมาสรุปในที่นี้อีก ได้แก่

- สถานีจีพีเอสต่อเนื่อง (Continuous GPS) กลุ่มแรกเป็นสถานีที่ติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสอย่างถาวรและทำการรับสัญญาณต่อเนื่องตลอดเวลา มีจำนวน 1 สถานี ได้แก่ สถานี SPRB ติดตั้งใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี
- สถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ (Campaign GPS) ในกลุ่มนี้ ไม่ได้มีการติดตั้งเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสอย่างถาวรไว้ที่ตำแหน่งสถานีเหมือนกลุ่มแรก เพียงแต่ติดตั้งหมุดโลหะไว้บนหินเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิง แล้วออกรังวัดเป็นครั้ง ๆ โดยในแต่ละครั้ง ดำเนินการรับสัญญาณต่อเนื่อง 7 วัน และดำเนินการพร้อมกันทั้งหมด สถานีในกลุ่มนี้มีอยู่ด้วยกัน 5 สถานี

ตลอดช่วงโครงการได้มีการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในลักษณะเป็นครั้ง ๆ รวม 9 ครั้ง กำหนดไว้ให้ห่างกันประมาณทุก 3 เดือน โดยกรมแผนที่ทหารเป็นผู้ดำเนินการรังวัดในสนามตามขั้นตอนและกระบวนการที่กำหนดโดยคณะผู้วิจัย แต่เนื่องจากเหตุการณ์น้ำท่วมครั้งใหญ่เมื่อเดือนตุลาคม-พฤศจิกายน 2554 (2554) ทำให้การรังวัดครั้งที่ 4 ไม่สามารถดำเนินการตามที่วางแผนได้ เนื่องจากกำลังพลทั้งหมดของกรมแผนที่ทหารจำเป็นต้องดำเนินการด้านอื่นเพื่อสนับสนุนภารกิจแก้ไขปัญหา น้ำท่วมของรัฐบาล จึงจำเป็นต้องเลื่อนการรังวัดครั้งที่ 4 ออกไปเป็นระหว่างวันที่ 16-22 ธันวาคม 2554 ตามสรุปในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สรุปช่วงเวลาการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบเป็นครั้ง ๆ

การรังวัดจีพีเอสครั้งที่	ช่วงเวลาที่ดำเนินการ
1	21-27 มกราคม 2554 (2554)
2	21-27 เมษายน 2554 (2554)
3	2-8 สิงหาคม 2554 (2554)
4	16-22 ธันวาคม 2554 (2554)
5	31 มกราคม – 6 กุมภาพันธ์ 2555 (2555)
6	23-29 เมษายน 2555 (2555)
7	24-30 กรกฎาคม 2555 (2555)
8	13-19 พฤศจิกายน 2555 (2555)
9	17-23 กุมภาพันธ์ 2556 (2556)

3.2 การประมวลผลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสเพื่อหาค่าพิกัดความเที่ยงตรงสูง

ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ใช้ในโครงการวิจัยนี้ได้มาจากเครื่องรับวัดแบบยี่ห้อเดคซิดสองความถี่ (Dual-frequency geodetic receiver) (ซึ่งแตกต่างจากสัญญาณที่ใช้ในเครื่องหาตำแหน่งจีพีเอสแบบมือถือที่ใช้กันทั่วไป) เพื่อให้ได้ค่าความถูกต้องสูงสุดของตำแหน่งสัมบูรณ์ทางราบและทางตั้ง ข้อมูลที่ได้จะนำมาประมวลผลด้วยเทคนิคที่เรียกว่าจุดเดียวความเที่ยงตรงสูง (Precise Point Positioning, PPP) ร่วมกับข้อมูลวงโคจรดาวเทียมแบบเที่ยงตรงและค่าตรวจแก้ทางานาฬิกาดาวเทียม (Precise satellite orbit and satellite clock corrections) การประมวลผลใช้ซอฟต์แวร์ GIPSY-OASIS II (GPS-Inferred Positioning System and Orbit Analysis Simulation Software Package) หรือที่เรียกสั้น ๆ ว่า GIPSY ซึ่งพัฒนาโดยหน่วยงาน Jet Propulsion Laboratory (JPL) สำหรับงานทางด้านยี่ห้อเดคซิดและธรณีฟิสิกส์ โดยภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้รับอนุญาตอย่างเป็นทางการจาก JPL ให้สามารถใช้ซอฟต์แวร์ GIPSY เพื่องานศึกษาวิจัยได้ ผลลัพธ์ที่ได้จะต้องได้รับการตรวจแก้เพื่อขจัดผลลัพธ์จากปรากฏการณ์คาบสั้นต่าง ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อค่าแนวโน้มการเคลื่อนตัวระยะยาวที่แท้จริง (ข้อมูลค่าแก้ต่าง ๆ ที่ใช้ในซอฟต์แวร์ GIPSY สามารถดาวน์โหลดได้จาก ftp://sideshow.jpl.nasa.gov/pub/gipsy_products/)

เนื่องจากข้อมูลวงโคจรแบบเที่ยงตรงและค่าตรวจแก้ทางานาฬิกาดาวเทียมต้องใช้เวลาประมาณ 12-14 วันหลังจากการรับสัญญาณ (Latency) จึงจะได้ข้อมูลที่เป็นผลสุดท้าย การหาตำแหน่งโดยวิธี PPP จึงต้องรอประมาณ 2 สัปดาห์นับจากวันรับสัญญาณดาวเทียมจึงจะสามารถเริ่มประมวลผลได้

ขั้นตอนการประมวลผลแบบ PPP โดยซอฟต์แวร์ GIPSY มีรายละเอียดที่ซับซ้อนมาก แต่อาจสรุปแบ่งออกเป็นขั้นตอนหลัก ๆ ด้วยกัน 3 ขั้นตอนดังนี้

1. เป็นขั้นตอนการเลือกแบบจำลองและค่าตรวจแก้ที่ใช้ในการปรับแก้ค่าคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุด และการประมวลผลข้อมูลรายวัน ค่าตรวจแก้มีรายละเอียดดังนี้
 - ค่าความคลาดเคลื่อนจากชั้นบรรยากาศไอโอโนสเฟียร์ถูกขจัดโดยการรวมคลื่นแบบปราศจากไอโอโนสเฟียร์ (Ionosphere - free combination) จากข้อมูลเฟสของคลื่นส่ง (Zero-differenced GPS carrier phase) และข้อมูลซูโดเรนจ์
 - ตัดสัญญาณที่มีมุมตกกระทบน้อยกว่า 15 องศา ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมที่ไม่ปกติจะถูกขจัดออก
 - ข้อมูลการหน่วงสัญญาณและการหักเหของสัญญาณในชั้นบรรยากาศโทรโปสเฟียร์ถูกขจัดออกโดยใช้แบบจำลองค่าน้ำหนักตามห้วงเวลา
 - ค่าพิกัดดาวเทียมและนาฬิกาดาวเทียมอาศัยข้อมูลวงโคจรดาวเทียมและค่าตรวจแก้ทางานาฬิกาดาวเทียมความละเอียดสูง
 - ผลกระทบจาก Ocean loading ถูกขจัดออกโดยแบบจำลอง GOTOO.2
 - ค่าแก้ความต่างของจุดรับสัญญาณบนจานรับสัญญาณ (Phase Center) ใช้ค่าล่าสุดจากหน่วยงาน U.S. National Geodetic Survey

2. ข้อมูลแต่ละจุดที่ประมวลผลได้แต่ละวันจากขั้นตอนที่หนึ่ง จะถูกรวมเข้าด้วยกันเป็นผลลัพธ์รายวัน (Daily Solutions) ในขั้นตอนนี้ค่าพิกัดที่เป็นผลลัพธ์ของแต่ละสถานีในโครงข่ายยังคงเป็นค่าที่ได้โดยตรงจากการประมวลผลด้วยเทคนิค PPP จากซอฟต์แวร์ GIPSY และยังไม่ได้อ้างอิงกับระบบพิกัดที่ต้องการ ซึ่งในขั้นตอนถัดไปจะเป็นการยึดตรึงผลลัพธ์ค่าพิกัดเฉลี่ยรายวันหรือ Daily Solutions ของโครงข่ายที่ได้เข้ากับระบบอ้างอิง ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ซึ่งจะต้องใช้ข้อมูลของสถานี IGS เข้าร่วมประมวลผลต่อไป
3. เป็นขั้นตอนการยึดตรึงผลลัพธ์ค่าพิกัดเฉลี่ยของโครงข่ายเข้ากับกรอบพิกัดอ้างอิงโลก ITRF จะเป็นการนำผลลัพธ์ที่ได้จากการประมวลผลแบบ PPP ของแต่ละสถานีในโครงข่าย ซึ่งยังไม่ได้ถูกยึดตรึงเข้ากับระบบพิกัดใด ๆ นำมาแปลงค่าพิกัดเข้าสู่กรอบ ITRF ที่ต้องการ โดยใช้ค่าพิกัดและความเร็วในการเคลื่อนตัวของสถานี IGS ที่มีความเสถียรในบริเวณประเทศรอบ ๆ ประเทศไทยมาทำการแปลงพิกัดเข้าสู่กรอบ ITRF ผลลัพธ์ที่ได้คือ Daily Solutions ในกรอบพิกัดอ้างอิง ITRF 2005 ซึ่งถือเป็นตำแหน่งของแต่ละสถานีในแต่ละวันสำหรับการใช้ในการดำเนินงานต่อไป

ทั้งนี้ในการประมวลผลข้อมูลทั้งสามขั้นตอน คณะผู้วิจัยได้พัฒนา Script ซึ่งเป็นโปรแกรมกึ่งสำเร็จรูปสำหรับการประมวลผลข้อมูล ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข

ทั้งค่าพิกัดรายวันที่ได้จากขั้นตอนข้างต้นอ้างอิงอยู่กับกรอบระบบพิกัดอ้างอิงสากลของโลกที่เรียกว่า ITRF (International Terrestrial Reference Frame) ซึ่งโดยเนื้อแท้แล้วคือระบบพิกัดฉากคาร์ทีเซียนสามมิติ (X, Y, Z) ที่มีจุดกำเนิดอยู่ที่ศูนย์กลางมวลสารของโลก พิกัดฉาก ITRF นี้ไม่ให้จินตภาพในทางราบและทางตั้ง จึงไม่สะดวกสำหรับงานทางด้านธรณีฟิสิกส์และงานศึกษาต่าง ๆ ที่มักใช้ค่าพิกัดยี่ห้อเดดิก กล่าวคือ ละติจูด, ลองจิจูด สำหรับบอกตำแหน่งทางราบ และความสูงเหนือผิวพื้นหลักฐานอ้างอิง (Datum) สำหรับบอกตำแหน่งทางตั้งมากกว่า เพื่อความสะดวก ขั้นตอนเพิ่มเติมจึงเป็นการแปลงค่าพิกัดฉาก X, Y, Z ไปเป็นค่าพิกัดยี่ห้อเดดิกอ้างอิงกับพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 (World Geodetic System 1984)

อย่างไรก็ตาม พิกัดยี่ห้อเดดิกเป็นพิกัดเชิงขั้ว ค่าละติจูดและลองจิจูดซึ่งมีหน่วยตามมุมที่ใช้ (โดยทั่วไปคือองศา โดยที่เส้นศูนย์สูตร 1 องศาจะรองรับระยะทางบนผิวโลกประมาณ 100 กิโลเมตร) ทำให้การพิจารณาการเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางตั้งขนาดเล็กในระดับเพียงไม่กี่มิลลิเมตรทำได้ไม่สะดวก ดังนั้น เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์อัตราและขนาดการเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางตั้ง จึงทำการฉายค่าพิกัดยี่ห้อเดดิกเฉพาะค่าละติจูดและลองจิจูดไปบนระนาบแผนที่ยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator) โดยใช้พารามิเตอร์ของการฉายตามข้อตกลงสากล ผลลัพธ์ที่ได้เป็นพิกัดในรูปแบบ E, N (พิกัดฉากคาร์ทีเซียนสองมิติที่มีความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์กับพิกัดยี่ห้อเดดิกและสามารถแปลงไป-กลับระหว่างกันได้) โดย E คือ Easting เป็นการกำหนดตำแหน่งตามแนวตะวันออก-ตก ส่วน N คือ Northing แสดงตำแหน่งตามแนวเหนือ-ใต้ ค่าพิกัด E, N นี้จะใช้ในการวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัว

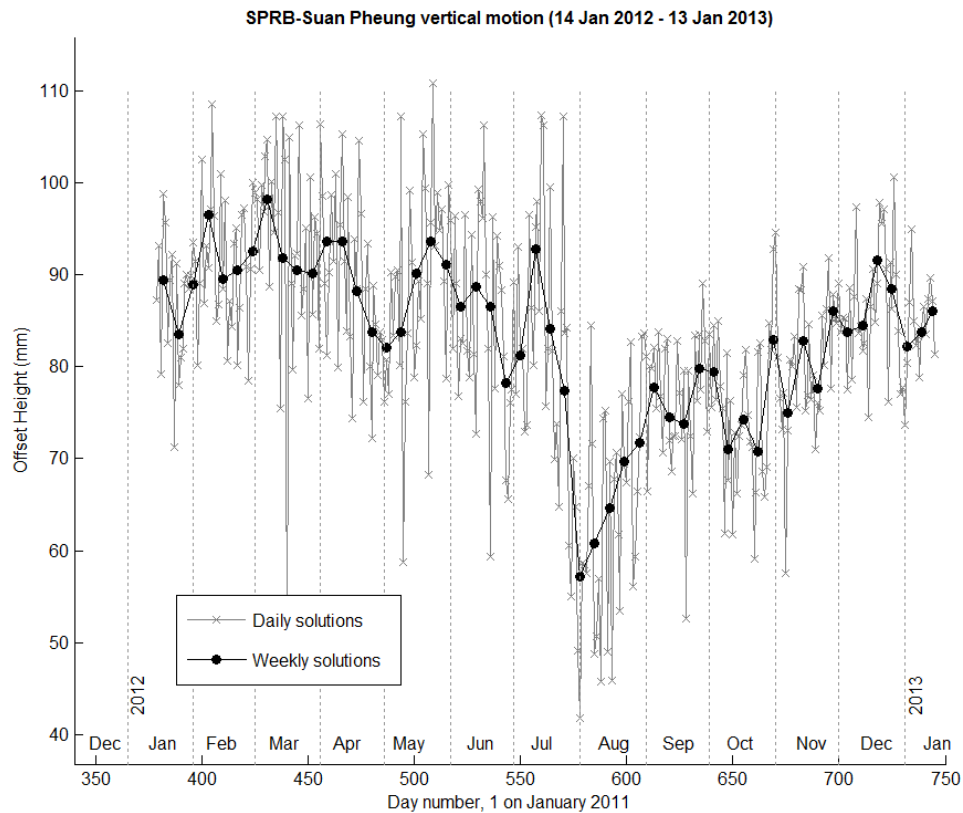
ตาราง ส่วนการหาการเคลื่อนตัวทางดิ่งจะใช้ค่าความสูงเหนือพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84 ตารางที่ 3.2 แสดงตัวอย่าง Daily Solutions ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB

ตารางที่ 3.2 ค่าพิกัดรายวันของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB; DN (Day Number) คือหมายเลขวัน ในโครงการวิจัยนี้กำหนดให้วันที่ 1 มกราคม 2011 (2554) มี DN=1; X,Y,Z เป็นค่าพิกัดในหน่วยเมตรของสถานีในระบบพิกัด ITRF รวมทั้งส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SDx, SDy, SDz) ในแต่ละมิติ; E, N เป็นค่าพิกัดฉากทางราบในระบบพิกัดฉากยูทีเอ็ม และ H คือค่าความสูงของ Phase Center ของเสาอากาศจีพีเอสเหนือผิวพื้นหลักฐานอ้างอิง WGS84

DOY	X-m	Y-m	Z-m	SDx	SDy	SDz	E-m	N-m	H-m
379	-992372.2741	6121082.3705	1488841.2002	0.0021	0.0040	0.0013	522596.3849	1502237.9345	267.0872
380	-992372.2769	6121082.3757	1488841.2023	0.0021	0.0039	0.0013	522596.3868	1502237.9352	267.0931
381	-992372.2873	6121082.3605	1488841.1985	0.0021	0.0040	0.0014	522596.3995	1502237.9346	267.0792
382	-992372.2839	6121082.3797	1488841.2056	0.0021	0.0039	0.0013	522596.3931	1502237.9373	267.0988
383	-992372.2776	6121082.3777	1488841.2041	0.0022	0.0041	0.0014	522596.3871	1502237.9365	267.0956
384	-992372.2813	6121082.3649	1488841.1989	0.0021	0.0040	0.0014	522596.3929	1502237.9343	267.0826
385	-992372.2814	6121082.3703	1488841.2058	0.0021	0.0039	0.0013	522596.3921	1502237.9397	267.0894
386	-992372.2751	6121082.3746	1488841.2042	0.0021	0.0040	0.0014	522596.3852	1502237.9374	267.0922
387	-992372.2724	6121082.3552	1488841.1960	0.0021	0.0040	0.0013	522596.3856	1502237.9340	267.0712
388	-992372.2831	6121082.3729	1488841.2015	0.0021	0.0039	0.0013	522596.3933	1502237.9349	267.0912
389	-992372.2752	6121082.3614	1488841.1978	0.0021	0.0039	0.0013	522596.3874	1502237.9342	267.0780

เนื่องจากค่าพิกัดรายวันยังมีอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงคาบสั้นต่าง ๆ หลงเหลืออยู่ เพื่อให้การพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทำได้ดีขึ้น วิธีการทั่วไปในงานธรณีฟิสิกส์สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวจะนำพิกัดรายวันมาเฉลี่ยอีกครั้งเป็นพิกัดรายสัปดาห์ (Weekly Solutions) ซึ่งจะทำให้การเปลี่ยนแปลงที่เกิดจากปัจจัยหรืออิทธิพลต่าง ๆ ที่มีคาบสั้น ๆ เพียงไม่กี่วันหักล้างกันและหมดไป รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงทางดิ่งเมื่อทำการพล็อตอนุกรมเวลาของค่าความสูงรายวันและรายสัปดาห์ที่ได้จากสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB

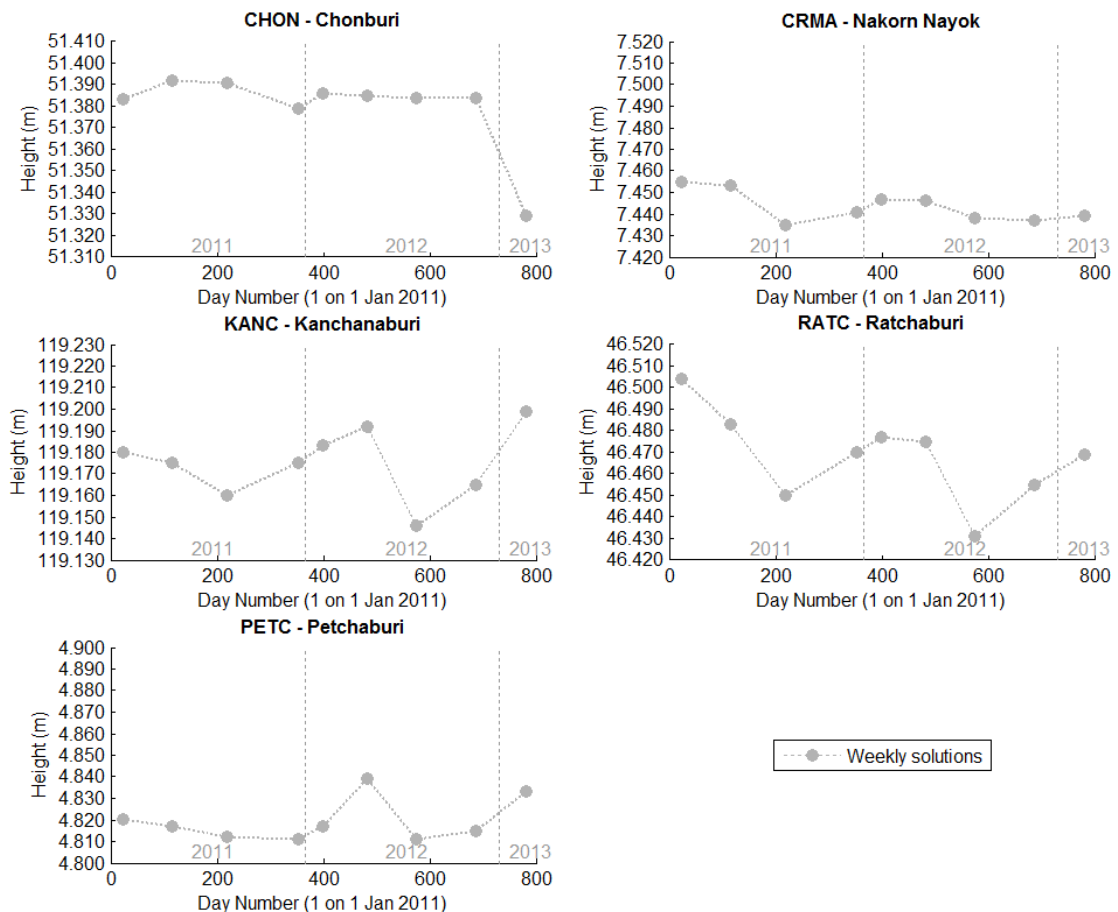
สำหรับค่าพิกัดรายวันและรายสัปดาห์ของสถานีจีพีเอสแบบเป็นครั้ง ๆ ทั้ง 5 สถานีทำการประมวลผลในลักษณะเดียวกันทุกประการ ตารางที่ 3.3 แสดงการเปลี่ยนแปลงพิกัดฉากของสถานี CHON ในจังหวัดชลบุรี และรูปที่ 3.2 แสดงการเคลื่อนตัวทางดิ่งของทั้ง 5 สถานีจากอนุกรมเวลาของค่าเฉลี่ยทางดิ่งรายสัปดาห์ทั้ง 9 ครั้ง



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB จากการพล็อตอนุกรมเวลายาว 1 ปีของค่าความสูงรายวันและรายสัปดาห์ ค่าความสูงที่แสดงเป็นค่า Offset จากความสูงเฉลี่ยของทั้งอนุกรมเวลา

ตารางที่ 3.3 การเปลี่ยนแปลงค่าพิกัดทางราบและทางดิ่งของสถานี CHON จากการรังวัดแบบเป็นครั้ง ๆ ทั้ง 9 ครั้งในช่วงเวลาโครงการ พิกัดทางราบ Easting และ Northing อยู่ในระบบพิกัดฉาก UTM zone 47 พิกัดทางดิ่งอ้างอิงกับผิวทหรรี ค่าพิกัดของแต่ละแกนที่แสดงเป็นค่าเฉลี่ยรายสัปดาห์ (Weekly Solutions)

หมายเลข-ชื่อสถานี	จังหวัด	รังวัดครั้งที่	Easting (m)	Northing (m)	Height (m)
1 CHON	ชลบุรี	1	721666.3566	1451362.7220	51.3827
		2	721666.3666	1451362.7222	51.3924
		3	721666.3675	1451362.7212	51.3906
		4	721666.3839	1451362.7116	51.3789
		5	721666.3868	1451362.7113	51.3856
		6	721666.3918	1451362.7182	51.3849
		7	721666.3983	1451362.7168	51.3835
		8	721666.4086	1451362.7134	51.3836
		9	721666.4134	1451362.7046	51.3287



รูปที่ 3.2 การเปลี่ยนแปลงทางดิ่งของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ แสดงค่าความสูงรายสัปดาห์ของแต่ละสถานีที่ได้จากการออกรังวัดทั้ง 9 ครั้ง (ช่วงวันที่ออกรังวัดตามตารางที่ 3.1)

3.3 การวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนตัวของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB

อนุกรมเวลายาว 1 ปีของค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์ของสถานี SPRB ในรูปที่ 3.1 แสดงลักษณะกระเพื่อมขึ้นลงของแผ่นดินและปรากฏให้เห็นเป็นวงจรรายปี (Annual Cycle) ซึ่งแผ่นดินมีค่าระดับค่อนข้างสูงในช่วงต้นปีและค่อย ๆ ลดระดับลงจนต่ำสุดในช่วงปลายเดือนกรกฎาคม จากนั้นจึงเริ่มยกตัวขึ้นสูงอีกครั้งในช่วงเดือนธันวาคม ลักษณะวงจรรายปีนี้ปรากฏให้เห็นในสถานี CGPS อื่น ๆ ในประเทศไทยเช่นกัน วงจรรายปีนี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากสาเหตุอะไรและมีความเป็นไปได้หลายประการ เช่น จากการแปรเปลี่ยนตามฤดูกาลของสภาพอากาศซึ่งหนักในฤดูหนาวและกดทับแผ่นดินมากกว่าอากาศที่เบากว่าในฤดูร้อนและฝน เป็นต้น

การวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ของค่าเฉลี่ยรายสัปดาห์แสดงให้เห็นวงจรทางธรรมชาติที่มีคาบต่าง ๆ กันอีกหลายคาบ อย่างไรก็ตามพบว่า เฉพาะคาบรายปีทั้ง sine และ cosine coefficient เท่านั้นที่มี

ขนาดใหญ่มากกว่าคาบอื่น ๆ เป็นอย่างมาก ดังนั้น การเคลื่อนตัวทางดิ่งทั้งหมดที่ปรากฏให้เห็นจึงอาจพิจารณาได้ว่าเป็นผลรวมของคาบรายปี sine , คาบรายปี cosine และแนวโน้มระยะยาวที่ถือว่ามีความเป็นเชิงเส้น งานวิจัยนี้จึงจำลองการเคลื่อนตัวทั้งหมดด้วยฟังก์ชันลูกผสมระหว่างฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันไซน์/โคไซน์ดังแสดงตามสมการที่ 3.1 ต่อไปนี้

$$h_t = c + at + A_1 \cos\left(2\pi \frac{t}{365.25}\right) + A_2 \sin\left(2\pi \frac{t}{365.25}\right) \quad (3.1)$$

โดยที่

t คือ หมายเลขวันของกลางสัปดาห์

h_t คือ ค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์

และพารามิเตอร์ของสมการทั้ง 4 เทอมได้แก่

c คือ ค่าคงที่

a คือ อัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่ง

A_1, A_2 คือ แอมพลิจูดของคาบรายปีของ sine และ cosine ตามลำดับ

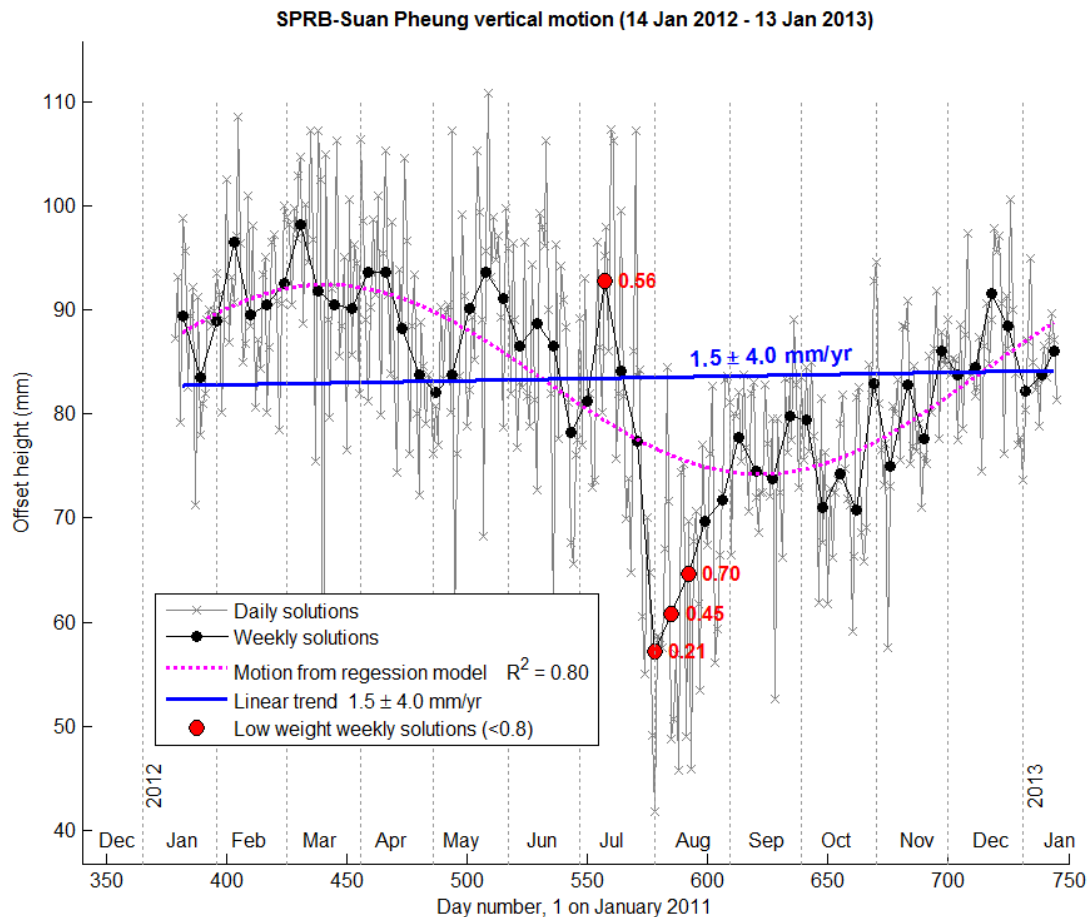
พารามิเตอร์ทั้ง 4 ตัวของสมการที่ 3.1 $[a, c, A_1, A_2]$ คำนวณโดยวิธีการ IRLS (Iteratively Reweighted Least Square) ตามรายละเอียดใน Holland and Welsh (1977) ซึ่งเป็นวิธีการ Regression แบบวนซ้ำซึ่งแตกต่างจากวิธี Regression ปกติในส่วนที่การคำนวณค่าพารามิเตอร์จะให้น้ำหนักของค่าสังเกต (ในที่นี้คือค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์) แต่ละค่าไม่เท่ากัน โดยน้ำหนักจะแปรผกผันกับเศษคงเหลือ (Residual) ที่คำนวณได้ในแต่ละรอบ และการวนซ้ำจะสิ้นสุดลงเมื่อไม่มีการเปลี่ยนแปลงของค่าเศษคงเหลือ วิธี IRLS ถือเป็นวิธีที่ Robust เนื่องจากการให้ค่าน้ำหนักหรือการพิจารณาว่าค่าสังเกตใดเป็น Outlier เป็นการคำนวณที่มีกฎเกณฑ์แน่ชัดและไม่ขึ้นกับการตัดสินใจของผู้คำนวณดังเช่นวิธี Regression ปกติ ค่าพารามิเตอร์ทั้ง 4 ที่คำนวณได้แสดงในตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB ที่ได้จากวิธี IRLS Regression

พารามิเตอร์	ค่าที่คำนวณได้ (mm)	Standard error (mm)
c	81.3	6.0
a	1.5	4.0
A_1	4.7	1.1
A_2	8.2	1.7

ค่าอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่เป็นผลจากการวิเคราะห์ IRLS Regression แสดงให้เห็นว่าในช่วงปี 2012 เปลือกโลกบริเวณสถานี SPRB มีการยกตัวขึ้นด้วยอัตรา 1.5 มม/ปี (รูปที่ 3.3) โดยมี Standard error 4.0 มม/ปี ซึ่งใหญ่กว่าการยกตัวถึงประมาณสองเท่าครึ่ง ทำให้อัตราการยกตัวที่หาได้มีความน่าเชื่อถือที่ค่อนข้างต่ำ และยังไม่สามารถตัดความเป็นไปได้ที่ว่าสถานี SPRB อาจยังลดระดับอยู่

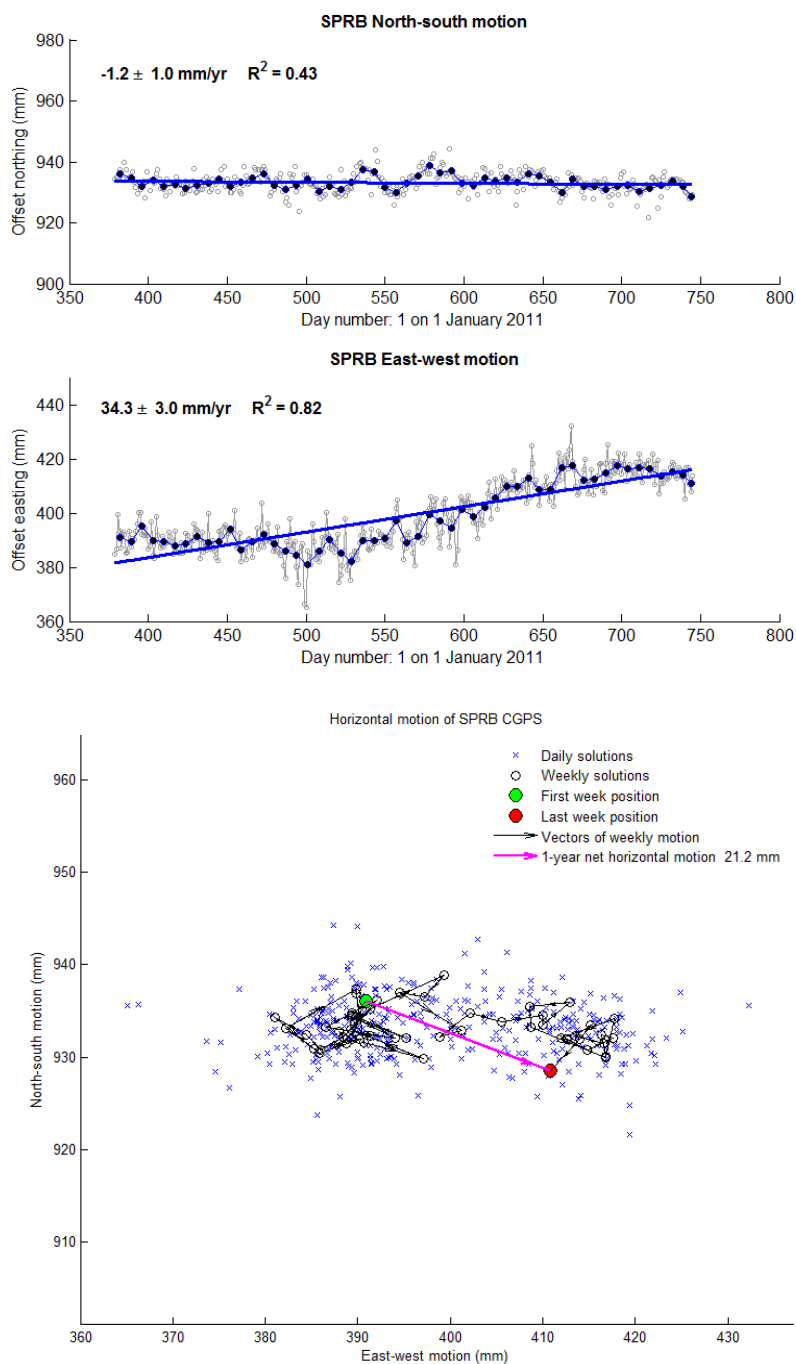
อย่างไรก็ตาม จะถือเอาตามค่าที่คำนวณได้เป็นหลักในการพิจารณาต่อไป รวมทั้งการพิจารณาเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ



รูปที่ 3.3 การเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB (เส้นประสีม่วง) ซึ่งคำนวณจากสมการที่ 3.1 โดยใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากการทำ IRLS Regression เทียบกับค่าจากการพล็อตอนุกรมเวลายาว 1 ปีของค่าความสูงรายวันและรายสัปดาห์ ค่าความสูงเป็นค่า offset จากค่าเฉลี่ยความสูงของทั้งอนุกรมเวลา เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงเฉพาะส่วนที่เป็นแนวโน้มการเคลื่อนตัวในระยะยาว

ในบริบทของการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในบริเวณ Subduction การยกตัวของแผ่นเปลือกทวีป (ในกรณีนี้คือแผ่นเปลือกโลกซุนดา) ที่ขี้อยู่บนแผ่นเปลือกโลกมหาสมุทร จะเกิดขึ้นในช่วง Interseismic (Savage and Thatcher, 1992; Tabei et al, 2005, Simons et al, 2007) การยกตัวที่ตรวจพบที่สถานี SPRB จึงบ่งบอกว่าเริ่มเข้าสู่ช่วง Interseismic เมื่อตรวจสอบการเคลื่อนตัวทางราบ (รูปที่ 3.4) พบว่าเวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบเริ่มใกล้เคียงกับการเคลื่อนตัวในช่วง Interseismic ตามผลการวิจัยของ Simons et al (2007) แม้ว่าจะอัตราเร็ว 21.2 มม/ปี จะยังช้ากว่าอัตรา 31.8 มม/ปี ณ สถานี KUAN ในเมือง Kuala Terengganu บริเวณตะวันออกเฉียงเหนือของมาเลเซียอยู่พอสมควร ข้อมูล

การเคลื่อนตัวทางราบและทางดิ่งในช่วงปี 2012 ของสถานี SPRB ซึ่งไปในทางเดียวกันว่าการเคลื่อนตัว Postseismic ได้สิ้นสุดลงแล้ว และเริ่มเข้าสู่ช่วง Interseismic ของวงจรแผ่นดินไหว

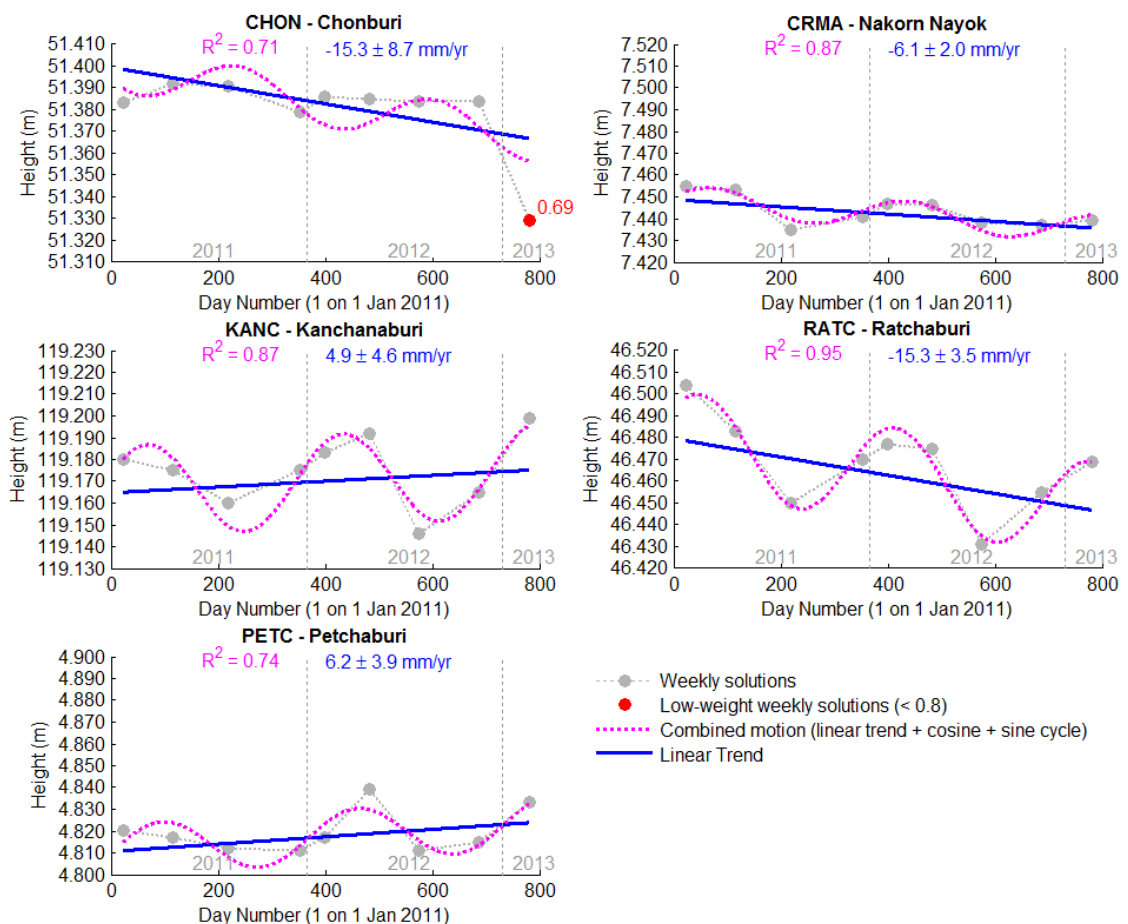


รูปที่ 3.4 การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและเวกเตอร์การเคลื่อนตัวทางราบของสถานี SPRB ในช่วงมกราคม 2012 ถึงมกราคม 2013 บน) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงในแนวตะวันออก-ใต้ กลาง) แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งในแนวตะวันออก-ตก ล่าง) เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแนวราบ

3.4 การวิเคราะห์อัตราการเคลื่อนตัวของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ

การออกรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสในกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ 5 สถานี ดำเนินการทั้งสิ้น 9 ครั้ง ทำให้แต่ละสถานีมีข้อมูลอนุกรมเวลาความสูง 9 ค่าครอบคลุมช่วงเวลา ประมาณ 2 ปี แม้จะมีจำนวนข้อมูลน้อยกว่าสถานี SPRB ที่รังวัดต่อเนื่อง 1 ปีและมีข้อมูล 52 ค่า แต่ระยะเวลาของข้อมูลกลุ่มสถานีรังวัดเป็นครั้ง ๆ ที่ยาว 2 ปีทำให้การเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นมีขนาดใหญ่กว่า และเพียงพอที่จะนำมาวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางดิ่งได้

สำหรับการวิเคราะห์หาการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีทั้ง 5 ในกลุ่มนี้ ใช้หลักการเกี่ยวกับการวิเคราะห์ข้อมูลของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB (เทคนิค IRLS ของ สมการที่ 3.1) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าความสูงของสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ CHON, CRMA, KANC, PETC, RATC เส้นประสีม่วงเป็นค่าความสูงที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่ 3.1 เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงเฉพาะส่วนที่เป็นแนวโน้มระยะยาวของการเปลี่ยนแปลงความสูง

ตารางที่ 3.5 ข้างล่างแสดงค่าพารามิเตอร์ในสมการที่ 3.1 และ Standard error ที่คำนวณได้ที่ทั้ง 5 สถานี (ยกเว้นค่า c ซึ่งเป็นค่าคงที่หรือจุดดัดบนแกนความสูง ซึ่งไม่ได้ใช้ประโยชน์)

ตารางที่ 3.5 ค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ ที่ได้จากวิธี IRLS Regression รวมทั้งค่า Standard error (SE) ของพารามิเตอร์แต่ละตัว

สถานี	อัตราทางดิ่ง (มม/ปี)	SE อัตราทางดิ่ง (มม/ปี)	แอมพลิจูดของ Cosine (มม)	SE แอมพลิจูดของ Cosine (มม)	แอมพลิจูดของ Sine (มม)	SE แอมพลิจูด ของ Sine (มม)
CHON	-15.3	8.7	5.7	7.7	8.7	9.3
CRMA	-6.1	2.0	1.9	1.8	6.3	2.1
KANC	4.9	4.6	8.0	4.0	19.6	4.9
RATC	-15.3	3.5	14.0	3.1	17.3	3.7
PETC	6.2	3.9	1.1	3.4	11.9	4.1

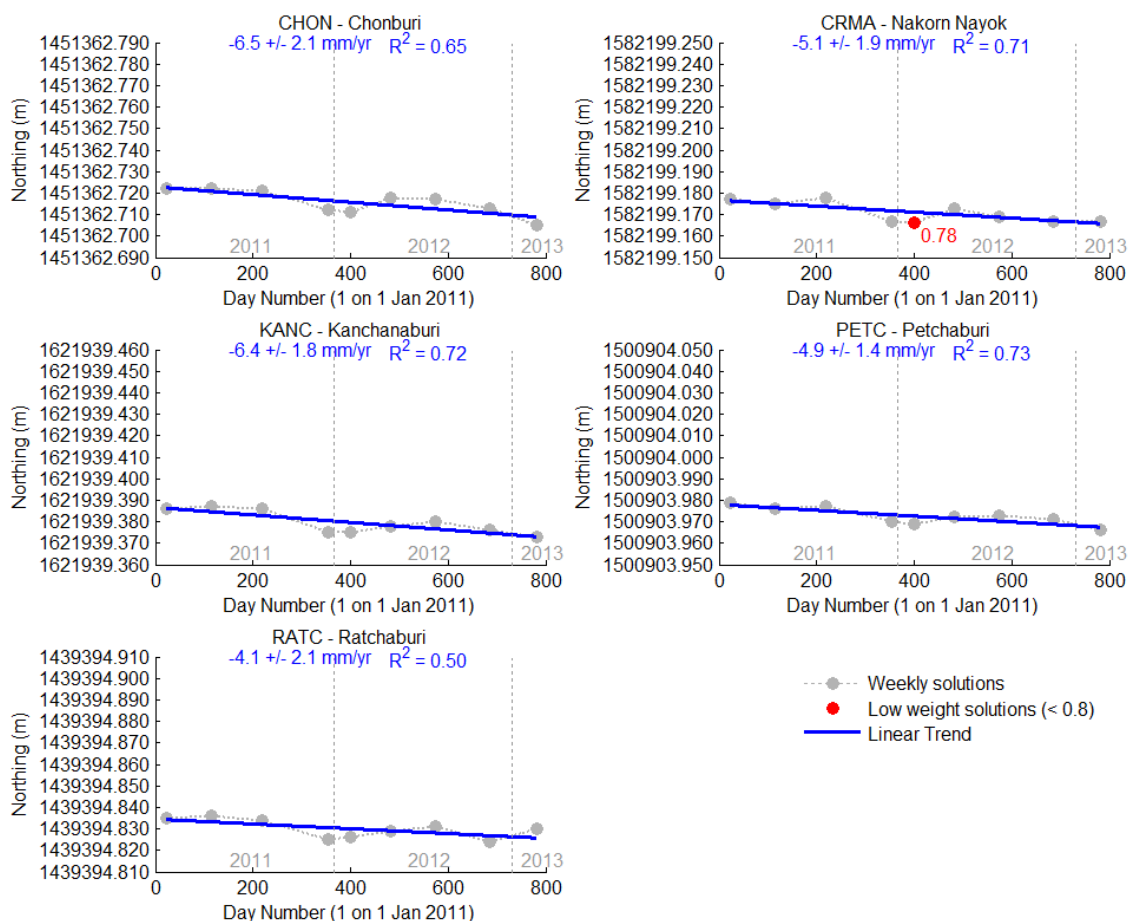
ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางดิ่งทั้ง 5 สถานีให้ผลลัพธ์ที่แตกต่างกัน โดยปรากฏว่าสถานีทางฝั่งตะวันออกของพื้นที่ศึกษา (CHON และ CRMA) แสดงการลดระดับของเปลือกโลก ในขณะที่สถานทางฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษา (KANC และ PETC) แสดงการยกตัวขึ้น สำหรับสถานีที่ให้ผลลัพธ์ขัดแย้งกับกลุ่มคือสถานี RATC ใน อ.เมือง จ.ราชบุรี ซึ่งแสดงการลดระดับ แย้งกับสถานี KANC และ PETC ซึ่งอยู่ในฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษาเหมือนกัน และแย้งกับสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB ใน อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ซึ่งอยู่ห่างออกไปไม่ไกลนัก ซึ่งเมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนตัวขึ้นลงของสถานี RATC ที่ได้จากการรังวัดแต่ละครั้งแล้ว พบว่ามีรูปแบบเหมือนกับสถานี KANC และ PETC แต่ต่างกันตรงที่สถานี KANC และ PETC มีค่าความสูงสองค่าแรกของต้นปี 2011 ต่ำกว่าหรือใกล้เคียงกับความสูงช่วงต้นปี 2012 ในขณะที่ค่าความสูงสองค่าแรกในช่วงต้นปี 2011 ของสถานี RATC สูงกว่าค่าความสูงในช่วงต้นปี 2012 อยู่มาก จึงทำให้แนวโน้มการเคลื่อนตัวของ RATC ออกมาในทิศทางลดระดับอย่างรวดเร็วถึง -15.3 มม/ปี

ในขณะเดียวกัน อัตราการลดระดับของสถานี CHON ซึ่งมีค่าถึง -15.3 มม/ปี ถือเป็นค่าที่เร็วมาก โดยในรูปที่ 3.5 แสดงให้เห็นชัดเจนว่าเกิดจากค่าความสูงที่ได้จากการรังวัดครั้งที่ 9 ซึ่งเป็นครั้งสุดท้ายต่ำกว่าค่าในครั้งที่ 8 ถึงประมาณ 60 มม คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบ Log sheet ที่บันทึกการออกรังวัดไม่พบว่ามีกรดำเนินการผิดปกติแต่ประการใด รวมทั้งทดลองคำนวณซ้ำแต่ก็ได้ผลลัพธ์เช่นเดิม จึงสรุปว่าสาเหตุไม่ได้เกิดจากความผิดพลาดในการดำเนินงานขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง เนื่องจากจำนวนค่าความสูงทั้งหมดมีเพียง 9 ค่า จึงมีจำนวนน้อยเกินกว่าที่จะสรุปว่าค่าความสูงจากการรังวัดครั้งที่ 9 ของสถานี CHON ควรจะถือเป็น Outlier และตัดออกไปจากการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวหรือไม่ กอปรกับวิธี IRLS ไม่ปฏิเสธค่ารังวัดนี้โดยให้น้ำหนัก 0.69 ในการศึกษาจึงจะยึดถืออัตราการเคลื่อนตัวที่คำนวณได้ (อย่างไรก็ตาม หากทดลองตัดค่าความสูงนี้ออกจากการวิเคราะห์ การเคลื่อนตัวทางดิ่งของสถานี CHON ยังคงเป็นการลดระดับแต่อัตราช้าลงเป็น -2.3 ± 3.0 มม/ปี)

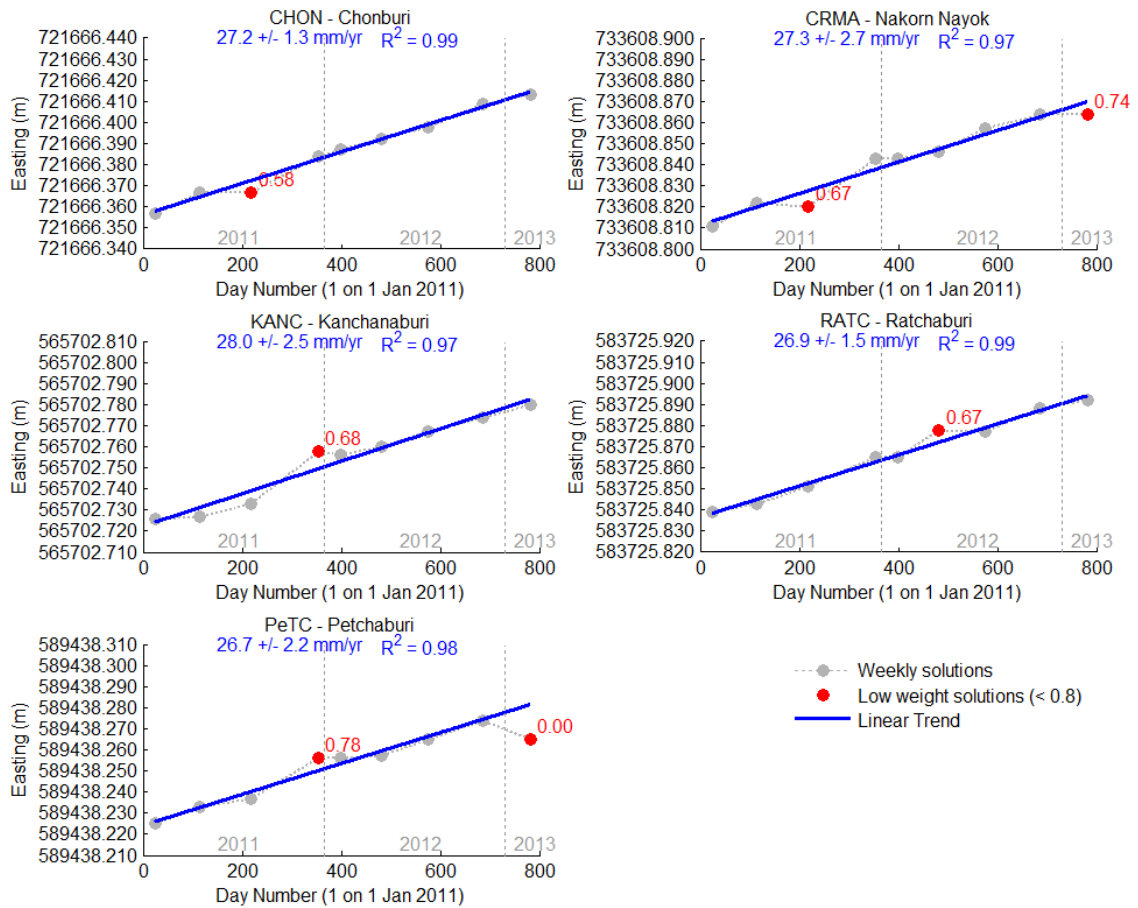
การที่ค่าการเคลื่อนตัวของสถานี RATC ขัดแย้งกับกลุ่มสถานีทางฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษาและอัตราการลดระดับของสถานี CHON และ RATC ซึ่งเป็นไปอย่างรวดเร็วถึง -15.3 มม/ปี มีความเป็นไปได้หลายกรณีไม่ว่าจะเกิดจากการบวกรวมด้วยการเคลื่อนตัวท้องถิ่น หรือเกิดจากปรากฏการณ์ธรรมชาติ และ

ทำให้การพิจารณาว่าเปลือกโลกในบริเวณพื้นที่ศึกษายังลดระดับ (อยู่ในช่วง Postseismic) หรือกลับมา ยกตัวขึ้น (เข้าสู่ช่วง Interseismic) ไม่สามารถหาข้อสรุปได้ชัดเจนจากการพิจารณาการเคลื่อนตัวทางดิ่ง เพียงประการเดียว การพิจารณาการเคลื่อนตัวทางราบที่เกิดขึ้นจึงเป็นหนทางหนึ่งที่จะช่วยในการให้ได้ ความชัดเจนขึ้น

เช่นเดียวกับการตรวจหาการเคลื่อนตัวทางราบของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB การตรวจหา การเคลื่อนตัวทางราบของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ แยกพิจารณาเป็นสองทิศทางคือการ เคลื่อนตัวแนวตะวันออก-ใต้ และในแนวตะวันตก-ตก โดยทั้งสองกรณีใช้สมการเส้นตรงเป็น แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการทำ Regression แบบ IRLS (กล่าวคือมีพารามิเตอร์เพียงสองเทอมแรก ของสมการที่ 3.1) ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ



รูปที่ 3.6 การเคลื่อนตัวในทิศเหนือ-ใต้ของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรังวัดเป็นครั้ง ๆ CHON, CRMA, KANC, PETC, RATC เส้นทึบสีน้ำเงินแสดงแนวโน้มระยะยาวของการเคลื่อนตัว ทุกสถานีแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวไปทางทิศใต้ด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยทุกสถานีประมาณ 5.4 มม/ปี



รูปที่ 3.7 การเคลื่อนตัวในทิศตะวันออก-ตกของสถานีจีพีเอส CHON, CRMA, KANC, PETC, RATC เส้นที่บสีน้ำเงินแสดงแนวโน้มระยะยาวของการเคลื่อนตัว ทุกสถานีแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกด้วยอัตราเร็วเฉลี่ยทุกสถานีประมาณ 27.2 มม/ปี

ผลการวิเคราะห์พิกัดทางราบดังแสดงในรูปที่ 3.6 และ 3.7 แสดงให้เห็นว่าในช่วงปี 2011-2012 การเคลื่อนตัวทางราบของทุกสถานีในกลุ่มที่รังวัดเป็นครั้ง ๆ ใกล้เคียงกันและสอดคล้องกันทั้งขนาดและทิศทาง โดยอาจสรุปได้ดังนี้

- อัตราเร็วเฉลี่ยของกลุ่มในแนวตะวันออก-ตกอยู่ที่ 27.2 มม/ปี
- อัตราเร็วเฉลี่ยของกลุ่มในแนวเหนือ-ใต้อยู่ที่ 5.4 มม/ปี
- อัตราเร็วสุทธิเฉลี่ยของกลุ่มคือ 27.7 มม/ปี
- ทิศทางเฉลี่ยของเวกเตอร์การเคลื่อนตัวสุทธิทางราบคืออะซิมุท 102° หรืออยู่ในทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างตะวันออก

ทั้งอัตราเร็วสุทธิและทิศทางการเคลื่อนตัวทางราบของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ ทั้ง 5 สถานี (27.7 มม/ปี, 102°) สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวในช่วง Interseismic ของสถานี KUAN ในประเทศมาเลเซีย (30.8 มม/ปี, 104°) ตามค่าที่คำนวณจากรายงานของ Simons et al (2007) และใกล้เคียงพอสมควรกับค่าที่ได้จากสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB (34.3 มม/ปี, 92°) โดยที่ความแตกต่างระหว่างค่าของสถานี SPRB กับค่าเฉลี่ยของกลุ่มสถานีแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ อาจอยู่ที่ช่วงเวลาที่ข้อมูลยาวไม่เท่ากัน

ดังนั้น หากพิจารณาจากการเคลื่อนตัวทางราบ ทุกสถานีให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกันว่าการเคลื่อนตัวในช่วง Postseismic ได้สิ้นสุดหรือเกือบสิ้นสุดลงแล้ว และค่าการเคลื่อนตัวทางราบที่สอดคล้องกันเป็นอย่างดีของสถานีจีพีเอสทุกสถานีเป็นเหตุผลสำคัญที่ทำให้คณะผู้วิจัยสรุปว่าการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในบริเวณพื้นที่ศึกษาเริ่มเข้าสู่ช่วง Interseismic ของวงจรแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน

4. แบบจำลองทางกายภาพและการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง

4.1 แบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อนในร่องลึกบาดาลซุนดา

นอกจากการหาอัตราการเคลื่อนตัวที่เกิดขึ้นในปัจจุบันแล้ว ความต้องการสำคัญอีกประการหนึ่งของงานวิจัยเพื่อหาการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยคือการพยากรณ์การเคลื่อนตัวในอนาคต ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการประยุกต์ใช้ในงานศึกษาวิจัยอื่น ๆ ที่จำเป็นต้องทราบอัตราการเคลื่อนตัวของแผ่นดิน เช่น การศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำทะเล หรือการศึกษาปัญหาน้ำท่วม การพยากรณ์ค่าการเคลื่อนตัวในอนาคตโดยอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังเช่นสมการที่ 3.1 เป็นแบบจำลองชนิด Empirical ที่อาศัยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ในการอธิบายการเคลื่อนตัว แม้ว่าแบบจำลองนี้จะสามารถใช้ได้ดีในการคำนวณหาอัตราเร็วและ/หรืออัตราเร่งหรืออัตราหน่วงของการเคลื่อนตัวของแผ่นเปลือกโลกในช่วงเวลาที่มีข้อมูล แต่การคาดการณ์หรือพยากรณ์การเคลื่อนตัวในอนาคตเป็นการประมาณนอกช่วง (Extrapolation) เป็นจุดอ่อนของแบบจำลองที่เป็นแบบ Empirical เนื่องจากฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้เป็นเพียงการสะท้อนรูปแบบการเคลื่อนตัวที่สังเกตได้ (จากจีพีเอส) ในช่วงเวลาสั้น ๆ ไม่กี่ปีหลังแผ่นดินไหว และไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกลศาสตร์ของรอยเลื่อนหรือปัจจัยทางธรณีฟิสิกส์ที่มีหลายปัจจัย โดยที่แต่ละปัจจัยมี time scale ที่แตกต่างกัน และมีพฤติกรรมที่ในแต่ละช่วงเวลาแตกต่างกันไปด้วย

แม้ว่าอัตราการเคลื่อนตัวล่าสุดทั้งทางราบและทางดิ่งในปี 2012 ของพื้นที่ศึกษาซึ่งอนุมานจากค่าที่วิเคราะห์ได้ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB (ดังแสดงในหัวข้อ 3.3 ของรายงานฉบับนี้) และของกลุ่มสถานีจีพีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ จำนวน 5 สถานี แต่เนื่องจากอนุกรมเวลาของค่าพิคคิที่ได้จากจีพีเอสในโครงการวิจัยนี้มีความยาวเพียง 1-2 ปี ซึ่งสั้นมากเมื่อเทียบกับคาบอุบัติซ้ำของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ไม่ว่าจะเป็นกรณี 170 ปีตามที่รายงานโดย Natawidjaja (2006), Sieh et al (2008), หรือ 500 ปีตาม Jankaew et al (2007), Monecke et al (2008) ภาพการเคลื่อนตัวและแนวโน้มต่าง ๆ จึงยังขาดความชัดเจนอยู่มาก ในบริเวณใกล้เคียงกับพื้นที่ศึกษามีสถานี CGPS อีก 2 แห่ง ได้สถานี STSH บริเวณอ่าวสัตหีบ จ.ชลบุรี ซึ่งเริ่มรับสัญญาณตั้งแต่เดือนมกราคม 2008 และสถานี RYNG ใน อ.บ้านแพ้ว จ.ระยอง สถานี RYNG เริ่มรับสัญญาณตั้งแต่อ่อนเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันเล็กน้อย แต่เนื่องจากไม่มีข้อมูลแน่ชัดเกี่ยวกับฐานราก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวทางดิ่ง ในบริเวณใกล้กับกรุงเทพมหานครจึงมีเพียงสถานี SATH เพียงสถานีเดียวที่มีฐานรากอยู่บนชั้นหิน แต่ก็มีมีความยาวข้อมูลจีพีเอสเพียง 5 ปีเศษ และไม่ต่อเนื่อง โดยข้อมูลในปี 2010 ขาดหายไป และขาดในบางเดือนในช่วงต้น จึงถือได้ว่าค่อนข้างสั้นเกินกว่าจะใช้พิจารณาแนวโน้มระยะยาวได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเป็นการพยากรณ์การเคลื่อนตัวในอนาคตที่ไกลออกไปในระดับสิบปีหรือไกลกว่านั้น

นอกจากสถานี STSH และ RYNG แล้ว ประเทศไทยยังมีสถานี CGPS อีกจำนวนหนึ่งในจังหวัด เชียงใหม่ ชุมพร และภูเก็ต แต่สถานี CGPS เหล่านี้อยู่ไกลจากพื้นที่ศึกษาและมีระยะห่างจากจุด ศูนย์กลางแผ่นดินไหวแตกต่างจากพื้นที่ศึกษามาก จึงไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่ศึกษา

เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนขึ้นเกี่ยวกับสถานการณ์การลดระดับของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทย โครงการวิจัยนี้จึงได้ร่วมมือกับกลุ่มนักวิจัยของ Laboratoire de Géologie, Ecole Normale Supérieure (ENS) ประเทศฝรั่งเศส ซึ่งเป็นผู้พัฒนาแบบจำลองทางกายภาพ (Physical model) ของ รอยเลื่อนในร่องลึกบาดาลซุนดา เพื่อพยากรณ์การเคลื่อนตัวทั้งทางราบและทางตั้งที่เกิดขึ้นในช่วงต่าง ๆ ของวงจรแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน แบบจำลองนี้เป็นแบบ Visco-elastic ซึ่งแตกต่างจาก แบบจำลอง Elastic ที่ใช้กันโดยทั่วไป สาเหตุที่เลือกใช้แบบจำลอง Visco-elast เนื่องจากในกรณี แผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน พบว่าแบบจำลองประเภท Elastic อธิบายการเคลื่อนตัว ณ ขณะเกิด แผ่นดินไหว (Coseismic motion) ทั้งทางราบและทางตั้งได้ดีเฉพาะบริเวณ Near-field แต่มีปัญหา หลายประการทั้งในเชิงตำแหน่งและเวลาได้แก่

- การลดระดับใน Far-field ที่ตรวจไม่พบ ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหว แต่กลับพบว่าเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องในช่วงเวลาถัดมา ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลอง Elastic
- ค่าการเคลื่อนตัวทางราบในช่วง Postseismic ที่ได้จากแบบจำลอง Elastic ไม่สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้ในบริเวณประเทศไทยและมาเลเซีย โดยการเคลื่อนตัวทาง ราบสุทธิที่ตรวจพบในประเทศไทยและรายงานโดย Satirapod et al (2008) มีขนาดใหญ่ กว่าค่าที่คาดการณ์ด้วยแบบจำลอง Elastic ถึง 3 เท่า
- ทั้งในบริเวณ Near-field และ Far-field แบบจำลอง Elastic ไม่สามารถอธิบายการลด ระดับที่เกิดขึ้นเป็นเวลานานหลายปีหลังจากแผ่นดินไหว ซึ่งไม่สอดคล้องกับพฤติกรรมของ เปลือกโลกที่อธิบายโดยแบบจำลอง Elastic ว่าการลดระดับเกิดจากการติดตัวกลับ (Rebound) ของแผ่นเปลือกโลกทวีปที่ขี้อยู่บนแผ่นเปลือกโลกมหาสมุทร จึง เกิดขึ้นอย่างฉับพลันและดำรงอยู่เป็นช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น

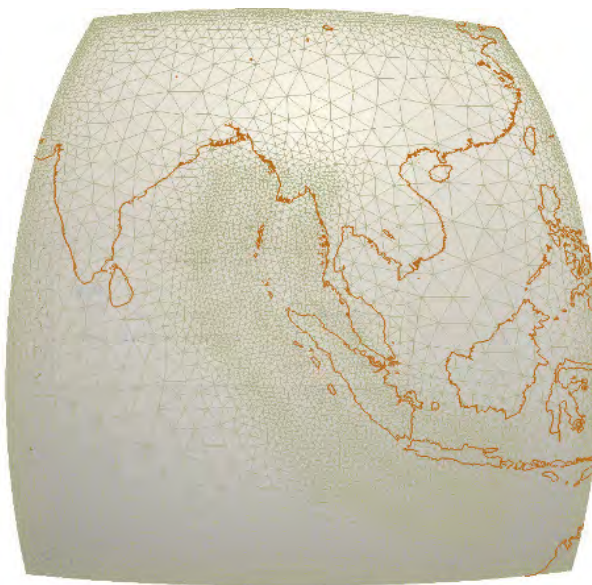
ด้วยเหตุนี้ การที่จะอธิบายการเคลื่อนตัวหลังแผ่นดินไหวที่มีขนาดใหญ่และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ ตรวจพบได้ในบริเวณ Far-field จึงจำเป็นต้องนำเอาการคลายตัว (Relaxation) อย่างช้า ๆ ในลักษณะ ของหนืดของชั้น Asthenosphere ซึ่งเป็นส่วนบนของเนื้อโลก (Mantle) เข้ามาร่วมพิจารณาด้วย โดย ถือว่าวัสดุในชั้น Asthenosphere มีคุณสมบัติทางกลเป็นแบบ Viscoelastic กล่าวคือมีพฤติกรรมใน ช่วงเวลาสั้น ๆ (Short time-scale) ในลักษณะที่เป็นวัสดุยืดหยุ่นเหมือนสปริงและมีพฤติกรรมในระยะ ยาว (Long time-scale) ในลักษณะที่เป็นวัสดุหนืดคล้ายกับกระบอกสูบ

จากข้างต้น แบบจำลอง Visco-elastic แบ่งรอยเลื่อนในบริเวณร่องลึกบาดาลออกเป็นวัสดุสาม ประเภทตามความลึก โดยเปลือกโลกซึ่งอยู่ชั้นบนสุดเป็นของแข็งที่มีพฤติกรรมเหมือนสปริง ส่วน Asthenosphere ซึ่งอยู่ใต้ลงไปถือว่าเป็นวัสดุเบอร์เกอร์ (Burger material, วัสดุเชิงซ้อนที่เปรียบเสมือน

ว่าประกอบด้วยสปริงและกระบอกสูบ) และชั้นถัดจาก Asthenosphere ลงไปคือชั้นเนื้อโลกเป็นวัสดุแบบแมกซ์เวลล์ (Maxwell material) ที่เป็นของหนืด

แบบจำลองนี้อธิบายการเคลื่อนตัวขณะเกิดแผ่นดินไหว (Coseismic Motion) ที่ตรวจพบด้วยจีพีเอสในลักษณะเดียวกับแบบจำลอง Elastic rebound กล่าวคือเกิดจากการที่เปลือกโลกซุนดาซึ่งถูกอัดอยู่จากการที่แผ่นเปลือกโลกอินเดียดันและมุดเข้ามาติดตัวออกไปเหมือนสปริง อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง Elastic rebound ซึ่งพิจารณารอยเลื่อนเฉพาะส่วนที่เป็นเปลือกโลกไม่สามารถอธิบายการลดระดับที่เกิดขึ้นต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปีหลังจากแผ่นดินไหวได้ ในขณะที่แบบจำลอง Visco-elastic อธิบายว่าเป็นผลจากการที่ Asthenosphere คลายตัวออกไปยังทิศทางของร่องลึกบาดาล ทำให้พื้นที่ในบริเวณ Far field ค่อย ๆ เกิดการลดระดับลง

แบบจำลองนี้มีขนาดครอบคลุมพื้นที่ทั้งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินเดีย และจีน (รูปที่ 4.1)

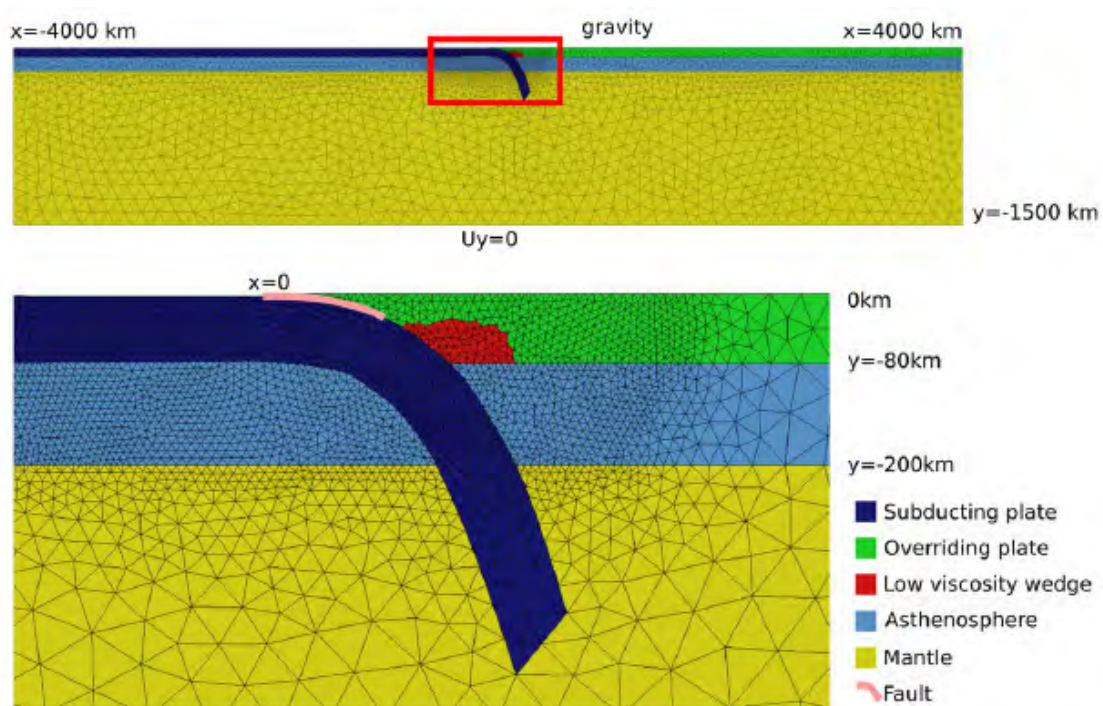


รูปที่ 4.1 อาณาบริเวณที่ครอบคลุมโดยโครงสร้าง Finite Element ของแบบจำลอง

รูปที่ 4.2 แสดงแบบจำลอง Visco-elastic ที่พัฒนาขึ้นโดย ENS (รายละเอียดดูใน Trubienko et al, 2013) โดยสรุปแล้วแบบจำลองนี้ใช้วิธี Finite Element โดยอาศัยซอฟต์แวร์ Z-set/Zébulon (Z-set, 2011) ในการแบ่งส่วนโลกออกเป็นชิ้นส่วนเล็ก ๆ และแบ่งชิ้นส่วนเหล่านี้ออกเป็น 3 ชั้นตามความลึกดังกล่าวข้างต้น โดยเปลือกโลกมีพฤติกรรมแบบยืดหยุ่นหรือ Elastic ถัดมาคือ Asthenosphere ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นได้ทั้งแบบยืดหยุ่นและหนืดแบบ Burgers Visco-elastic และชั้น Mantle ซึ่งอยู่ถัดลงไปมีพฤติกรรมแบบ Maxwell Visco-elastic ที่มีค่าความหนืดตั้งแต่ 3×10^{19} Pas ที่ความลึก 200 กิโลเมตรไปจนถึง 3×10^{21} Pas ที่ความลึก 670 กิโลเมตร ถัดจากความลึกนี้เป็นต้นไป

แบบจำลองนี้กำหนดให้มีค่าความหนืดคงที่เป็น 3×10^{21} Pas การกำหนดค่าความหนืดเหล่านี้ตลอดจนพารามิเตอร์อื่น ๆ ของบริเวณรอยเลื่อนทำได้โดยการกำหนดค่าเบื้องต้นแล้วค่อย ๆ ปรับเปลี่ยนโดยให้ค่าคาดการณ์การเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลองสอดคล้องกับค่าตรวจวัดที่ได้จากจีพีเอสในบริเวณพื้นที่เหล่านี้

- Near field (เกาะเล็ก ๆ นอกชายฝั่งตะวันตกของเกาะสุมาตรา) - SUGAR (Sumatra GPS Array) Network
- Middle field (เกาะสุมาตรา และ หมู่เกาะนิโคบาร์-อันดามัน) - SUGAR Network และ สถานีจีเอสแบบรับวัดเป็นครั้ง ๆ ตามที่รายงานโดย Gahalaut et al (2008)
- Far field (ประเทศมาเลเซียและประเทศไทย) - สถานีจีพีเอสต่อเนื่องในประเทศมาเลเซีย และสถานีจีพีเอสต่อเนื่องภูเก็ต



รูปที่ 4.2 การจำแนกประเภทวัสดุบริเวณรอยเลื่อนตามความลึกโดยแบบจำลอง (รูปจาก Trubienko et al, 2013)

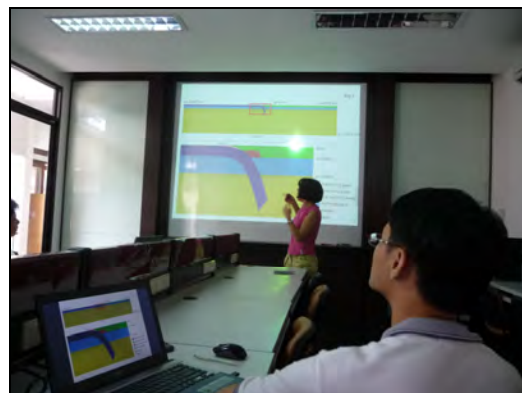
รายละเอียดของแบบจำลองและการพัฒนาแบบจำลอง รวมถึงรายละเอียดปลีกย่อยของการกำหนดพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของแบบจำลอง เช่น Low viscosity wedge, Locking depth ฯลฯ ดูได้ในงานตีพิมพ์ของกลุ่มผู้พัฒนาแบบจำลองใน Trubienko et al (2013)

4.2 การจัดสัมมนาเชิงปฏิบัติการของแบบจำลอง

คณะผู้วิจัยได้ทำการจัด Workshop ครั้งที่ 1 ดำเนินการระหว่างวันที่ 5-9 กันยายน 2011 ณ ภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ร่วมกับ Dr.Luce Fleitout นักธรณีฟิสิกส์ผู้ร่วมพัฒนาแบบจำลองจาก Le Laboratoire de Géologie, ENS (รูปที่ 4.3) โดยนอกจากคณะผู้วิจัยแล้วยังนิสิตปริญญาบัณฑิตและคณาจารย์ส่วนหนึ่งของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจเข้าร่วมด้วย ช่วงต้นของการสัมมนาเป็นการบรรยายเพื่อถ่ายทอดความรู้ให้กับคณะผู้วิจัยเกี่ยวกับแบบจำลอง Visco-elastic ที่เป็นพื้นฐานในการอธิบายการเคลื่อนตัวของดินในช่วงต่าง ๆ ของวงจรแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ตลอดจนการใช้เทคนิค Finite Elements เพื่อจำลองเรขาคณิตของแนวรอยเลื่อน ในช่วงถัดมา Dr.Luce Fleitout ได้นำเสนอผลลัพธ์เบื้องต้นของแบบจำลองที่ค่าการเคลื่อนตัวที่ตรวจวัดได้ ณ บริเวณ จ.ภูเก็ต

นอกจากการบรรยายเกี่ยวกับแนวคิดและข้อเด่นที่ทำให้แบบจำลอง Visco-elastic มีความเหมาะสมในการนำมาใช้จำลองการเคลื่อนตัวของรอยเลื่อนในบริเวณร่องลึกบาดาลแล้ว การสัมมนายังได้มีการแลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นคาบอุบัติซ้ำซึ่งคณะผู้วิจัยได้เสนอให้มีการจำลองการเคลื่อนตัวโดยใช้คาบอุบัติซ้ำ 500 ปีตามผลการศึกษาของ Jankaew et al (2008) เพิ่มเติมจากการใช้คาบอุบัติซ้ำ 170 ปีที่ทาง ENS เลือกใช้ รวมทั้งไปตรวจสอบผลเบื้องต้นของเกี่ยวกับการลดของแผ่นเปลือกโลกซุนดาที่ได้แบบจำลองกับข้อมูลของสถานี CGPS อื่น ๆ ในประเทศไทย ทำให้ได้ข้อสรุปเกี่ยวกับการปรับปรุงแบบจำลองและข้อตกลงในการจัดทำบทความทางวิชาการเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวที่ได้จากแบบจำลอง ดังปรากฏใน Satirapod et al (2012)

สำหรับการสัมมนาเชิงปฏิบัติการครั้งที่ 2 ที่กำหนดขึ้นในช่วงปลายโครงการเพื่อทำการสอบทานจากแบบจำลองกับค่าตรวจวัดที่ได้จากจีพีเอส คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการประชุมภายในแผนการจัดสัมมนาเนื่องจากผู้เชี่ยวชาญจาก ENS ไม่สามารถเดินทางมาร่วมได้



รูปที่ 4.3 สัมมนาเชิงปฏิบัติการเกี่ยวกับแบบจำลองทางกายภาพของรอยเลื่อน คณะผู้วิจัยจัดร่วมกับ Dr.Luce Fleitout ผู้เชี่ยวชาญธรณีฟิสิกส์จาก ENS ในระหว่างวันที่ 5-9 กันยายน 2011

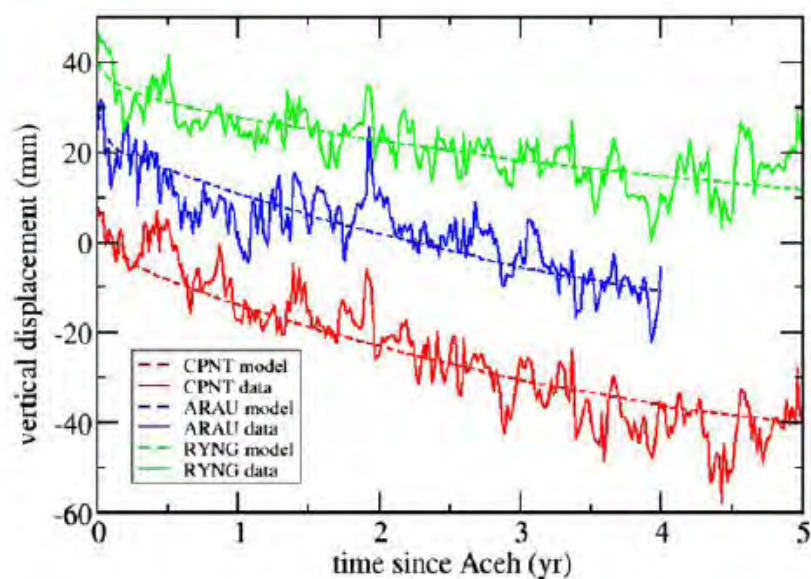
4.3 การเคลื่อนตัวทางดิ่งจากแบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic

ตามแนวคิดวงจรแผ่นดินไหว ผลรวมการเคลื่อนตัวทางดิ่งตลอดคาบอุบัติซ้ำจะเป็นศูนย์และใช้เป็นเงื่อนไขสำคัญในการพยากรณ์การเคลื่อนตัวทางดิ่งจากแบบจำลอง สำหรับการเคลื่อนตัวทางดิ่งหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน แบบจำลองนี้ใช้คาบอุบัติซ้ำ 2 ค่าได้แก่ 170 ปี และ 500 ปี และทำการแปรค่าความหนืดและคุณสมบัติการไหลอื่น ๆ ของชั้น Asthenosphere จนกระทั่งแบบจำลองให้ค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่สอดคล้องกับค่าที่ตรวจวัดได้จากสถานีจีพีเอสต่อเนื่องที่เกาะภูเก็ตในช่วงปี 2005 - 2009

การใช้ข้อมูลจากสถานีจีพีเอสต่อเนื่องเกาะภูเก็ตเพียงตำแหน่งเดียวในประเทศไทยในการบังคับแบบจำลอง มีเหตุผลสำคัญคือแบบจำลองนี้เป็นแบบจำลองในระดับภูมิภาคที่กินอาณาบริเวณกว้างหลายล้านตารางกิโลเมตร พื้นที่ประเทศไทยเป็นเพียงพื้นที่เล็ก ๆ ใน Far-field ซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นย่อมเป็นไปอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง นอกจากนี้ เหตุผลอีกประการหนึ่งคือสถานีจีพีเอสต่อเนื่องในประเทศไทยที่มีข้อมูลยาวตั้งแต่เหตุการณ์แผ่นดินไหวซึ่งมีอยู่เพียงไม่กี่สถานีล้วนมีข้อจำกัดที่ก่อให้เกิดความไม่แน่นอนเกี่ยวกับค่าการเคลื่อนตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นที่อยู่ใกล้รอยเลื่อนมีพลังหรือพื้นที่ที่

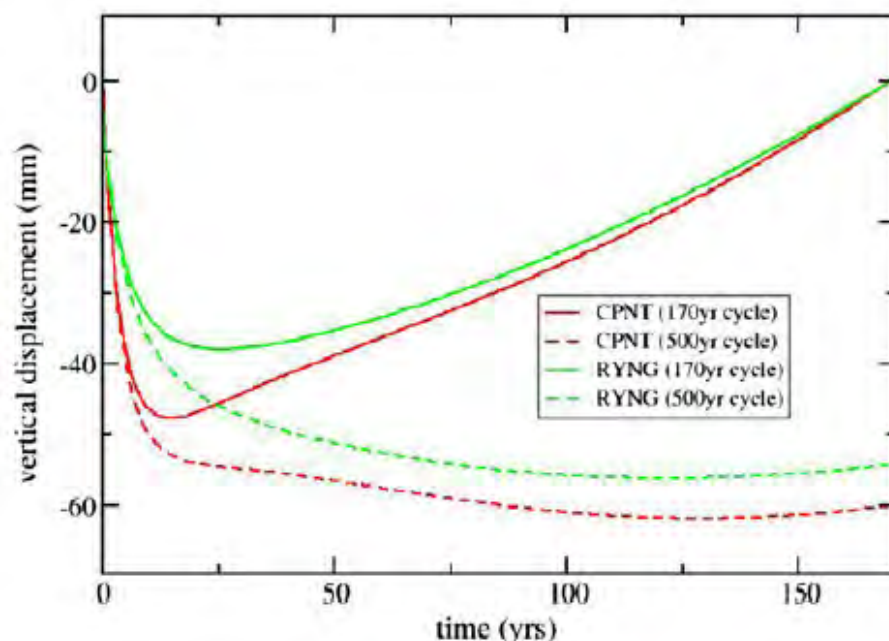
เกิดแผ่นดินไหวบ่อยครั้ง (CPNT จ.ชุมพร และ CMU1 จ.เชียงใหม่) หรือไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับฐานรากว่าอยู่บนชั้นหินหรือไม่ (RYNG จ.ระยอง) หรือมีฐานรากอยู่บนชั้นทรายซึ่งทำให้มีการเคลื่อนตัวจากการทรุดตัวปะปนเข้ามา (KMI1 กรุงเทพมหานคร)

เพื่อตรวจสอบความน่าเชื่อถือของแบบจำลอง จึงได้ใช้แบบจำลองทำการทำนายค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งในช่วงปี 2005 – 2009 ที่บริเวณสถานี CPNT ในจังหวัดชุมพร สถานี RYNG ในจังหวัดระยอง และสถานี ARAU ในประเทศมาเลเซีย ซึ่งทั้งสามสถานีได้ทำการรับสัญญาณตั้งแต่ออกเกิดแผ่นดินไหว ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางดิ่งจากจีพีเอสและจากแบบจำลอง เส้นทึบแสดงการเปลี่ยนแปลงความสูงที่รังวัดได้จากการรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส เส้นประเป็นค่าจากแบบจำลอง ลำดับจากบนลงล่างคือค่าของสถานี CPNT, ARAU และ RYNG ตามลำดับ (รูปจาก Satirapod et al, 2012)

ผลจากแบบจำลองชี้ให้เห็นว่าในช่วงปี 2005-2009 แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องดีพอสมควรเมื่อเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากจีพีเอส จึงได้ทำการพยากรณ์ค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่บริเวณสถานี CPNT และ RYNG ตลอดคาบอุบัติซ้ำ 170 ปี และ 500 ปี แสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกตลอดคาบอุบัติซ้ำของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันจากแบบจำลอง เส้นทึบแสดงการเคลื่อนตัวเมื่อใช้คาบอุบัติซ้ำ 170 ปี ส่วนเส้นประแสดงการเคลื่อนตัวเมื่อใช้คาบอุบัติซ้ำ 500 ปี ในแต่ละกรณีของคาบอุบัติซ้ำ เส้นบนคือการเคลื่อนตัวของบริเวณสถานี CPNT ส่วนเส้นล่างคือสถานี RYNG (รูปจาก Satirapod et al, 2012)

4.4 ค่าคาดการณ์จากแบบจำลองเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลก

ผลจากแบบจำลองที่แบ่งออกได้เป็น 2 กรณีตามคาบอุบัติซ้ำแสดงให้เห็นว่า หากคาบอุบัติซ้ำยาวนานในระดับ 500 ปี การลดระดับสัณฐานจะมีขนาดใหญ่กว่า และช่วงเวลา Post-seismic ที่เปลือกโลกลดระดับลงจะกินเวลายาวนานกว่ากรณีคาบอุบัติซ้ำ 170 ปี ในกรณีเลวร้ายที่สุด การลดระดับสัณฐานของเปลือกโลกที่บริเวณสถานี RYNG ที่ใช้เป็นตัวแทนของพื้นที่กรุงเทพมหานครจะอยู่ที่ประมาณ 53 มม และอยู่ต่อเนื่องไปเป็นเวลาประมาณ 150 ปีเปลือกโลกจึงจะหยุดลดระดับลงและเริ่มยกตัวขึ้นอีกครั้ง ตารางที่ 4.1 สรุปค่าการเคลื่อนตัวของทั้งสองบริเวณที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic

ตารางที่ 4.1 สรุปค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic

ตำแหน่ง	RYNG (จ.ระยอง)		CPNT (จ.ชุมพร)	
คาบอุบัติซ้ำ	170 ปี	500 ปี	170 ปี	500 ปี
การลดระดับสัณฐาน (มม)	38	53	47	62
ช่วงเวลา Post-seismic (ปี)	28	125	24	127
อัตราการลดระดับ (2012) (มม/ปี)	1.8	2.2	-	-

จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าอัตราการลดระดับของสถานี RYNG ในปี 2012 (8 ปีหลังแผ่นดินไหว) ที่ประมาณจากแบบจำลองทั้งสองกรณีของคาบอุบัติซ้ำอยู่ในระดับประมาณ 2 มม/ปี ซึ่ง

ขัดแย้งกับค่าตรวจวัดจากสถานีจีพีเอสซึ่งสรุปว่าช่วง Postseismic ได้สิ้นสุดลงแล้ว และเปลือกโลกเข้าสู่ช่วง Interseismic จึงน่าจะกำลังยกตัวขึ้น (ตามที่บ่งชี้โดยสถานีจีพีเอสในฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษา) การที่จะชี้ชัดว่าความแตกต่างเกิดจากสาเหตุใดยังเป็นเรื่องที่กระทำได้ลำบาก ณ ปัจจุบัน ด้วยข้อจำกัดใหญ่คืออนุกรมเวลาของทุกสถานีซึ่งในขณะนี้มีความยาวเพียง 1 หรือ 2 ปี สั้นเกินกว่าที่จะแสดงให้เห็นพฤติกรรมการเคลื่อนตัวที่จะช่วยแยกแยะแนวโน้มระยะยาวออกจากการเคลื่อนตัวระยะสั้นอื่น ๆ จำเป็นต้องมีการรับสัญญาณดาวเทียมต่อเนื่องไปอีกหลายปีจึงจะสามารถบอกได้แน่ชัดขึ้น

แม้ว่าทิศทางการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่ขัดแย้งกันระหว่างแบบจำลองกับค่าตรวจวัดนี้อาจไม่สามารถหาข้อสรุปที่ชัดเจนได้ในขณะนี้ว่าเป็นเช่นไร อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาภายใต้บริบทของปัญหาน้ำทะเลท่วม/การกัดเซาะชายฝั่งจากการลดระดับของเปลือกโลก อาจสมมติสถานการณ์จำลอง (Scenario) ที่เป็นไปได้ 2 สถานการณ์ต่อไปนี้

สถานการณ์ที่ 1 การยกตัวของเปลือกโลกที่ตรวจวัดที่ได้จากจีพีเอสมีความน่าเชื่อถือแต่แบบจำลองมีความผิดพลาด (เนื่องด้วยสาเหตุใดก็แล้วแต่ เช่น อาจเกิดจากข้อมูลที่ใช้ในการบังคับ (Constrain) แบบจำลองที่ใช้ในการพยากรณ์การเคลื่อนตัวในประเทศไทยเป็นข้อมูลของ จ.ภูเก็ต เพียงตำแหน่งเดียวในช่วงปี 2005-2009 เท่านั้น)

สถานการณ์ที่ 2 การลดระดับที่คาดการณ์โดยแบบจำลองให้ค่าที่สอดคล้องกับความเป็นจริง แต่ค่าตรวจวัดจากจีพีเอสผิดพลาด เช่น มีการเคลื่อนตัวท้องถิ่นที่มีคาบสั้น ๆ ไม่กี่ปีหรือการเคลื่อนตัวที่ผิดปกติที่เกิดขึ้นเป็นครั้งคราว (Episodic Motion) ปะปนเข้ามาและบดบังการเคลื่อนตัวในระยะยาวที่มีขนาดเล็กกว่า

หากสภาพการณ์ที่เป็นจริงเป็นไปตามสถานการณ์จำลองที่ 1 ซึ่งหมายความว่าเปลือกโลกเริ่มยกตัวแล้ว แสดงว่าแบบจำลองซึ่งทำนายว่าปัจจุบันยังมีการลดระดับอยู่จะให้ค่าคาดการณ์ที่เลวร้ายเกินไป ดังนั้น การลดระดับสุทธิควรจะมีขนาดน้อยกว่าค่าที่สรุปไว้ในตารางที่ 4.1 ซึ่งแม้แต่กรณีที่มาที่สุดก็มีค่าเพียง 53 มม. ซึ่งน้อยกว่าค่าการทรุดตัวของชั้นดิน (จากการสูบน้ำบาดาล) ที่ในหลายบริเวณมีขนาดหลายร้อยมิลลิเมตรอยู่หลายเท่าตัว ดังนั้น ในสถานการณ์นี้จึงสรุปได้ว่าการลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณพื้นที่กรุงเทพมหานครและปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน อันเกิดจากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ไม่ส่งผลกระทบทางกายภาพที่รุนแรงแต่ประการใด

ในกรณีที่สภาพการณ์จริงเป็นไปตามสถานการณ์จำลองที่ 2 พิจารณาเฉพาะกรณีเลวร้ายที่สุด (คาบอุบัติซ้ำ 500 ปี) เปลือกโลกยังคงลดระดับอย่างต่อเนื่องไปช้า ๆ อีกประมาณ 115 ปี และเกิดการลดระดับสุทธิ 53 มม. ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าไม่น่าจะส่งผลกระทบที่ร้ายแรงแต่ประการใด อย่างไรก็ตาม การที่แบบจำลองทางกายภาพใช้ข้อมูลที่ยาวเพียง 5 ปีของตำแหน่งเดียวที่อยู่ห่างจากพื้นที่ศึกษาถึงประมาณเกือบ 700 กิโลเมตรเป็นข้อจำกัดที่ไม่อาจปฏิเสธได้ และจำเป็นต้องเพื่อความแน่ใจได้ว่าแบบจำลองอาจประมาณค่าการลดระดับสุทธิต่ำเกินไป (Underestimate) ดังนั้นหากเพื่อความเสียง

นี้ไว้สามเท่า การลดระดับสุทธิของเปลือกโลกจะมีขนาดประมาณ 160 มม. ซึ่งก็ยังน้อยกว่าการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลซึ่งในหลายบริเวณที่มีขนาดใกล้เคียง 1,000 มม. อยู่หลายเท่าตัว

ดังนั้น การจำลองสถานการณ์ของค่าตรวจวัดจากจีพีเอสและค่าคาดการณ์จากแบบจำลองที่มีอยู่ในขณะนี้ชี้ให้เห็นว่า ไม่ว่าสภาพการณ์จริงจะเป็นไปในกรณีไหนก็ตาม ก็อาจสรุปได้ว่าการลดระดับของเปลือกโลกจากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันจะไม่ก่อให้เกิดผลกระทบที่น่ากังวลต่อปัญหาน้ำท่วม/การกัดเซาะชายฝั่งแต่ประการใด

5. สรุปและเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

โดยภาพรวม กล่าวได้ว่าโครงการการติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหว สุมาตราอันดามันในบริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีนและบริเวณใกล้เคียง สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ด้วยดี โดยผลการวิจัยอาจสรุปได้ดังนี้

- การเลือกตำแหน่งเพื่อเป็นสถานีจีพีเอสในการติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลกในบริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน จำเป็นต้องใช้บริเวณจังหวัดใกล้เคียงที่มีระยะทางไปยังจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวใกล้เคียงกัน และเป็นพื้นที่ภูเขาหรือมีหินโผล่เป็นตัวแทน เนื่องจากลักษณะพื้นที่กรุงเทพมหานครและปริมณฑลมีชั้นตะกอนหนามากปกคลุมชั้นหิน ไม่สามารถสร้างสถานีให้อยู่บนชั้นหินที่อยู่ลึกลงไปอย่างน้อยหลายร้อยเมตรได้ ผลการสำรวจได้เลือกตำแหน่งสถานีจีพีเอสแบบบังวัดเป็นครั้ง ๆ จำนวน 5 สถานีในจังหวัดชลบุรี (ชื่อสถานี CHON) นครนายก (CRMA) กาญจนบุรี (KANC) ราชบุรี (RATC) เพชรบุรี (PETC)
- การรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสของทั้ง 5 สถานีข้างต้น ดำเนินการทั้งสิ้นรวม 9 ครั้ง ในช่วงเดือนมกราคม 2011 ถึงกุมภาพันธ์ 2013 แต่ละครั้งใช้เวลารับสัญญาณรวม 7 วัน
- ในโครงการวิจัยร่วมที่สนับสนุนโดยศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ ได้ดำเนินการสำรวจและเลือกสำนักสงฆ์ห้วยน้ำใส อ.สวนผึ้ง จ.ราชบุรี ซึ่งเป็นบริเวณเขาหินแกรนิตเป็นที่ตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง และให้ชื่อเป็น SPRB
- การติดตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่อง SPRB สำเร็จเป็นที่เรียบร้อยและได้ดำเนินการรับสัญญาณต่อเนื่องมาตั้งแต่เดือนมกราคม 2012 อย่างไรก็ตาม การติดตั้งได้ล่าช้ากว่าที่คาดการณ์ไว้มากกว่า 6 เดือนเนื่องจากต้องใช้เวลาไปกับขั้นตอนการประมูลเพื่อจัดซื้อเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสตามระเบียบราชการ และจากปัญหาอุทกภัยใหญ่เมื่อปลายปี 2011
- อนุกรมเวลาของค่าความสูงสถานี SPRB ที่ได้จากการประมวลผลสัญญาณดาวเทียมด้วยวิธี PPP แสดงให้เห็นว่าในช่วงปี 2012 ณ บริเวณดังกล่าว เปลือกโลกยกตัวขึ้นด้วยอัตรา 1.5 มม./ปี และเคลื่อนตัวทางราบไปทางตะวันออกเฉียงใต้ด้วยอัตรา 21 มม./ปี
- อนุกรมเวลาของค่าความสูงสถานีจีพีเอสแบบบังวัดเป็นครั้ง ๆ ให้ค่าการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่แตกต่างกัน โดยสองสถานีในฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษา (KANC, PETC) แสดงให้เห็นการยกตัวขึ้นสอดคล้องกับสถานี SPRB ซึ่งอยู่ฝั่งตะวันตกเช่นเดียวกัน ในขณะที่สองสถานีฝั่งตะวันออก (CHON, CRMA) แสดงให้เห็นการลดระดับ โดยสถานี RATC ซึ่งอยู่ทางฝั่งตะวันตกของพื้นที่ศึกษาแสดงให้เห็นการลดระดับลง อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนตัวทางราบ

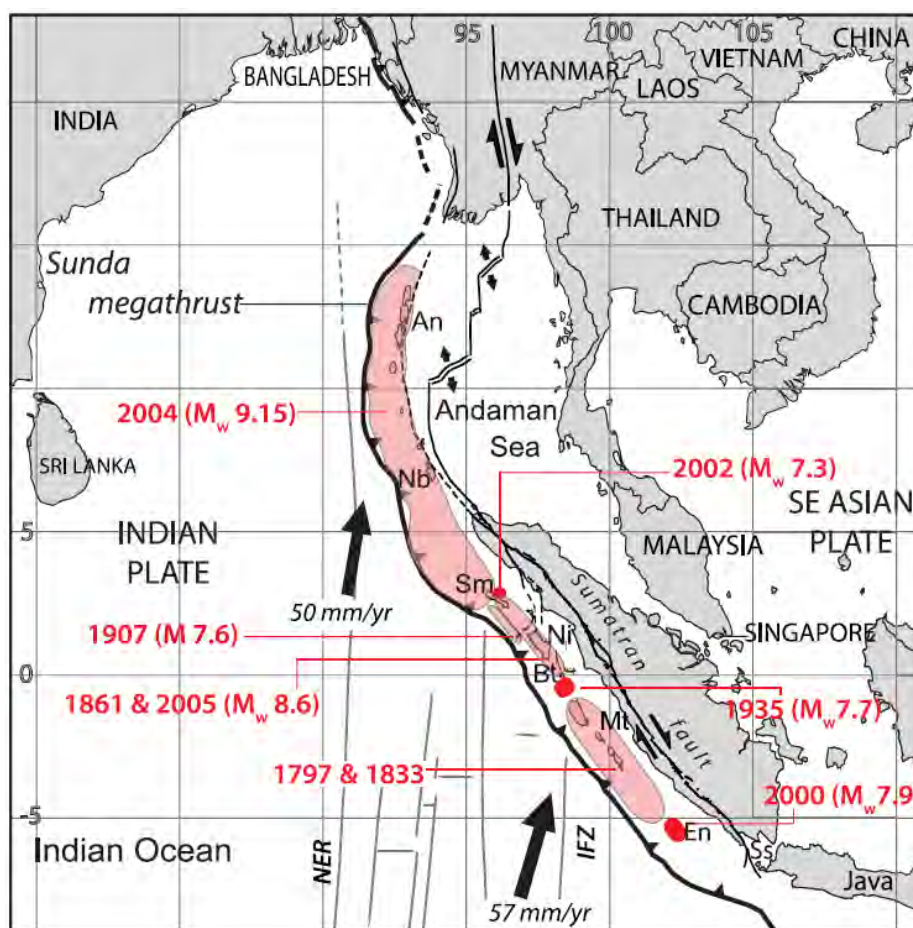
ของทุกสถานีสแสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวไปทางทิศตะวันออกเฉียงใต้ค่อนข้างสอดคล้องกันทั้งหมด

- เมื่อพิจารณาผลจากค่าตรวจวัดด้วยจีพีเอสทั้งทางราบและทางตั้งของทุกสถานีร่วมกัน ทำให้สรุปได้ว่าการเคลื่อนตัว Postseismic ได้สิ้นสุดลงและเริ่มเข้าสู่ช่วง Interseismic ของวงจรแผ่นดินไหว
- แบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic ซึ่งเป็นแบบจำลองที่สร้างโดยวิธี Finite Element ที่กินอาณาบริเวณทั้งภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ อินเดีย และจีน ให้ค่าคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงความสูงในช่วงปี 2005 -2009 ที่สอดคล้องดีกับค่าที่ได้จากการตรวจวัดด้วยจีพีเอสที่ชุมพร ระยอง และเมือง Arau ในประเทศมาเลเซีย
- แบบจำลองทางกายภาพ ค่าคาดการณ์อัตราการลดระดับในปี 2012 ของบริเวณพื้นที่ศึกษาที่ 1.8 มม/ปี หากใช้คาบอุบัติซ้ำของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันที่ 170 ปี และ 2.2 มม/ปี หากใช้คาบอุบัติซ้ำเป็น 500 ปี
- ความแตกต่างระหว่างทิศทางและอัตราการเคลื่อนตัวทางตั้งที่ได้จากการตรวจวัดด้วยจีพีเอสกับที่ได้จากแบบจำลองยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัด อย่างไรก็ตาม ค่าคาดการณ์ที่ใหญ่ที่สุดของการลดระดับสุทธิในบริเวณกรุงเทพมหานครอยู่ที่เพียงประมาณ 53 มม ในบริบทของการศึกษาและจัดการปัญหาน้ำท่วม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีของน้ำท่วมตามบริเวณชายฝั่งจากน้ำทะเล การลดระดับของเปลือกโลกจากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน จึงน่าจะก่อให้เกิดผลกระทบน้อยกว่าปัจจัยอื่น ๆ เช่นการทรุดตัวของผิวดินจากการสูบน้ำบาดาลมาใช้

5.2 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับแบบจำลองและการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ข้อมูลการทรุดตัวสุทธิและช่วงเวลาของการลดระดับที่ได้จากแบบจำลองทางกายภาพ Visco-elastic ให้ภาพที่ชัดเจนขึ้นเกี่ยวกับพฤติกรรมของการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกซุนดาในช่วง Postseismic แม้ว่าที่บริเวณสถานี SPRB ซึ่งถือเป็นตัวแทนของพื้นที่กรุงเทพมหานคร ค่าตรวจวัดของอัตราการเคลื่อนตัวทางตั้งที่ได้จะแตกต่างจากค่าคาดการณ์จากแบบจำลอง ซึ่งหากเป็นเช่นนั้นจริงก็หมายความว่าช่วงเวลา Postseismic จะกินเวลาน้อยกว่าที่คาดการณ์และการทรุดตัวสุทธิจะมีขนาดเล็กกว่าที่คาดการณ์ไว้เช่นกัน หากสมมติในกรณี Worst-case scenario ที่ให้การทรุดตัวสุทธิใหญ่กว่าที่คาดการณ์จากแบบจำลองถึง 3 เท่าก็ยังมีค่าการลดระดับสุทธิเพียงประมาณ 160 มม ซึ่งหากเปรียบเทียบกับทรุดตัวของแผ่นดินที่เกิดจากสาเหตุอื่น เช่น การสูบน้ำบาดาลมาใช้ ที่ในหลายบริเวณพบว่าก่อให้เกิดการทรุดตัวถึงกว่า 1,000 มม หรือ 1 ม ในช่วงเวลาประมาณ 30 ปีที่ผ่านมา ก็ให้เห็นได้ว่าการลดระดับของเปลือกโลกน่าจะก่อให้เกิดปัญหาหรือสร้างผลกระทบทางกายภาพที่เกี่ยวข้องกับน้ำทะเลท่วมน้อยกว่า ดังนั้น ณ ปัจจุบันยังไม่สามารถบอกได้ว่าขณะนี้แม้ว่าจะยังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าอัตราการเคลื่อนตัวทางตั้งที่ไม่สอดคล้องกันระหว่างแบบจำลองและการตรวจวัดเกิดจากสาเหตุใด

อย่างไรก็ตาม ทั้งการติดตามการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกโดยการตรวจวัดอย่างต่อเนื่องและการปรับปรุงแบบจำลองยังเป็นสิ่งที่จำเป็นและมีประโยชน์ เนื่องจากยังมีความเป็นไปได้ที่ในอนาคตอันใกล้ จะเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ในร่องลึกบาดาลในทะเลทางฝั่งตะวันตกของประเทศเมียนมาร์ ในบริเวณที่อยู่ทางด้านเหนือของบริเวณที่เป็นรอยแตก (Rupture) จากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน หลังจากที่เกิดแผ่นดินไหวตามมาอีกหลายครั้งตั้งแต่ปี 2005 ทางด้านใต้ของรอยแตก แม้ว่าจะมีการคาดการณ์ว่าแผ่นดินไหวที่จะเกิดขึ้นทางด้านเหนือของรอยแตกนี้จะมีขนาดเล็กกว่าแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน แต่เนื่องจากตำแหน่งที่อยู่ใกล้กรุงเทพมหานครมากกว่า การลระดับที่เกิดขึ้นในบริเวณประเทศไทยจึงอาจมีนัยสำคัญ และอาจมีขนาดมากกว่าการลระดับที่เกิดจากแผ่นดินไหว Nias ขนาด Mw8.6 ที่เกิดเมื่อปี 2005 (ดูรูปที่ 5.1) ที่ไม่ส่งผลกระทบทางดิ่งในบริเวณประเทศไทย



รูปที่ 5.1 แผนที่แสดงแนวรอยเลื่อน และรอยแตกจากแผ่นดินไหวต่าง ๆ ในบริเวณ Subduction zone (รูปจาก Natawidjaja et al, 2006)

ในระหว่างการจัดสัมมนาเชิงปฏิบัติการ คณะผู้วิจัยได้ปรึกษารื้อกับผู้เชี่ยวชาญทางธรณีฟิสิกส์ จาก ENS ที่ร่วมในโครงการเกี่ยวกับแนวทางการ Downscale แบบจำลองลงมาสำหรับประเทศไทย ซึ่งได้ข้อสรุปว่าน่าจะเหมาะสม เนื่องจากกลไกหลักที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัว กล่าวคือ การมุดตัวของ

แผ่นเปลือกโลกอินเดียเข้าใต้แผ่นเปลือกโลกซุนดา การขัดกันของรอยเลื่อนจากแรงเสียดทานและก่อให้เกิดความเครียดสะสมในเปลือกโลก ตลอดจนการตีกลับและการคลายตัวของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวอยู่ในบริเวณร่องลึกบาดาลที่ห่างออกไป การ Downscale แบบจำลองลงมาให้เหลือเฉพาะพื้นที่ประเทศไทยจะทำให้โครงสร้างและชิ้นส่วนในแบบจำลองขาดการเชื่อมโยงกับปัจจัยทางธรณีฟิสิกส์ที่เป็นต้นเหตุที่อยู่แหล่งกำเนิดและจะทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ไม่น่าเชื่อถือ คณะผู้วิจัยจึงได้เจรจาเกี่ยวกับความเป็นไปได้ที่ประเทศไทยจะใช้ประโยชน์จากแบบจำลองที่ ENS พัฒนาขึ้นไป โดยสรุปมีได้ 2 แนวทางคือ

1. ประสานเพื่อขอความร่วมมือในการปรับแต่งแบบจำลองเป็นครั้ง ๆ ตามกรณี ซึ่งอาจเกิดได้เมื่อมีข้อมูลเพิ่มเติมมากขึ้นกว่าที่นำมาใช้อย่างในการสร้างแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ และคาดว่าจะทำให้แบบจำลองให้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น หรือเกิดเหตุการณ์แผ่นดินไหวขนาดใหญ่ที่ก่อให้เกิดการเคลื่อนตัวใหม่ซ้อนขึ้นมากับการเคลื่อนตัว Post-seismic ของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันที่ยังดำเนินอยู่
2. หน่วยงานภาครัฐของไทยประสานอย่างเป็นทางการไปยัง ENS เพื่อขอความร่วมมือในการฝึกอบรมหรือวิจัยระยะยาวเพื่อให้ธรณีฟิสิกส์ไทยสามารถใช้แบบจำลองและปรับแต่งแบบจำลองได้เอง ทั้งนี้ทาง ENS ยินดีอนุญาตให้ใช้แบบจำลองเพื่องานทางด้านวิชาการ

สำหรับแนวทางแรก แม้ทาง ENS จะยินดีให้ความร่วมมือ แต่ความจำเป็นหรือภารกิจที่มีความสำคัญต่อประเทศไทยอาจไม่สอดคล้องกับความสนใจหรือภารกิจเฉพาะหน้าของทาง ENS คณะผู้วิจัยจึงมีความเห็นว่าแนวทางที่ 2 มีความยั่งยืนกว่าแนวทางแรก แต่จำเป็นต้องได้รับการสนับสนุนทางด้านเงินทุนจากรัฐบาลไทย รวมทั้งการคัดเลือกผู้ที่เหมาะสมและสนใจอย่างแท้จริงไปรับการศึกษาและถ่ายทอดองค์ความรู้

ในส่วนของการรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส แม้โครงการจะสิ้นสุดลงไปแล้วก็ตาม แต่การดำเนินการรังวัดในส่วนที่เป็นสถานีจีพีเอสเป็นครั้ง ๆ ยังควรที่จะดำเนินการต่อไป เนื่องจากอนุกรมเวลายาวขึ้นจะให้แนวโน้มที่ชัดเจนขึ้นของการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่เป็นผลจากแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ซึ่งจะช่วยในการดำเนินการปรับปรุงและบังคับแบบจำลองในอนาคต นอกจากนี้ ยังจะช่วยในการศึกษาทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวที่มีลักษณะวงจรรายปีว่าเกิดจากสาเหตุอะไร โดยที่การออกรังวัดอาจลดความถี่ลงเหลือเพียงทุก 6 เดือนหรือปีละ 2 ครั้ง

5.3 ข้อเสนอแนะเกี่ยวกับการสร้าง Digital archive ของข้อมูลจีพีเอส

ปัจจุบันประเทศไทยมี ข้อมูลสัญญาณจีพีเอสจากการรังวัดต่อเนื่องหรือการรังวัดซ้ำที่เดิมโดยทิ้งระยะเวลาห่างกันเป็นช่วง ๆ ในปัจจุบันมีอยู่จำนวนมากพอสมควร โดยมีการใช้งานอยู่ในสามลักษณะใหญ่ด้วยกัน ได้แก่

- การใช้งานเพื่อการรังวัดควบคุมหรือเพื่อกิจการแผนที่/นำหน ได้แก่ กรมโยธาธิการ กรมที่ดิน การท่าเรือแห่งประเทศไทย การใช้งานในลักษณะนี้มาเป็นเวลานานพอสมควรแล้ว

และจะเริ่มมีมากขึ้นเรื่อย ๆ ในอนาคต แต่เนื่องจากลักษณะใช้งานทำให้โดยทั่วไปข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสจะเก็บรักษาไว้เพียงช่วงเวลาหนึ่งเท่านั้น เช่น 1 ปี จากนั้นจะทำการลบทิ้ง ข้อมูลจากสถานีเหล่านี้จึงมีเพียงช่วงเวลาสั้น ๆ เท่านั้น

- การใช้งานทางด้านธรณีฟิสิกส์ ได้แก่ กรมแผนที่ทหาร กรมอุทกศาสตร์ กรมอุตุนิยมวิทยา กรมทรัพยากรธรณี ข้อมูลในกลุ่มนี้จะถูกรักษาโดยไม่มีการลบทิ้ง
- การใช้งานในกิจการทางด้านวิทยาศาสตร์อื่น ๆ เช่น การศึกษาบรรยากาศชั้นไอโอโนสเฟียร์ หรือการศึกษาทางด้านอุตุนิยมวิทยาเพื่อตรวจวัดความชื้นในอากาศ ข้อมูลเหล่านี้ปัจจุบันมาจากสถานีที่ได้รับการสนับสนุนจากต่างชาติเป็นหลักและฝากให้หน่วยงานในพื้นที่เป็นผู้ดูแลรักษา และโดยทั่วไปจะถูกจัดเก็บไว้ที่หน่วยงานต่างชาติ ดังตัวอย่างของสถานี CPNT ที่บริเวณใกล้สนามบินจ.ชุมพร ที่หน่วยงานกระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศของญี่ปุ่นเป็นผู้ติดตั้งและเก็บรักษาข้อมูลทั้งหมด การจะใช้ข้อมูลที่ได้จากสถานีในกลุ่มนี้จึงต้องติดต่อกับหน่วยงานผู้รักษาข้อมูลเป็นกรณี ๆ ไป

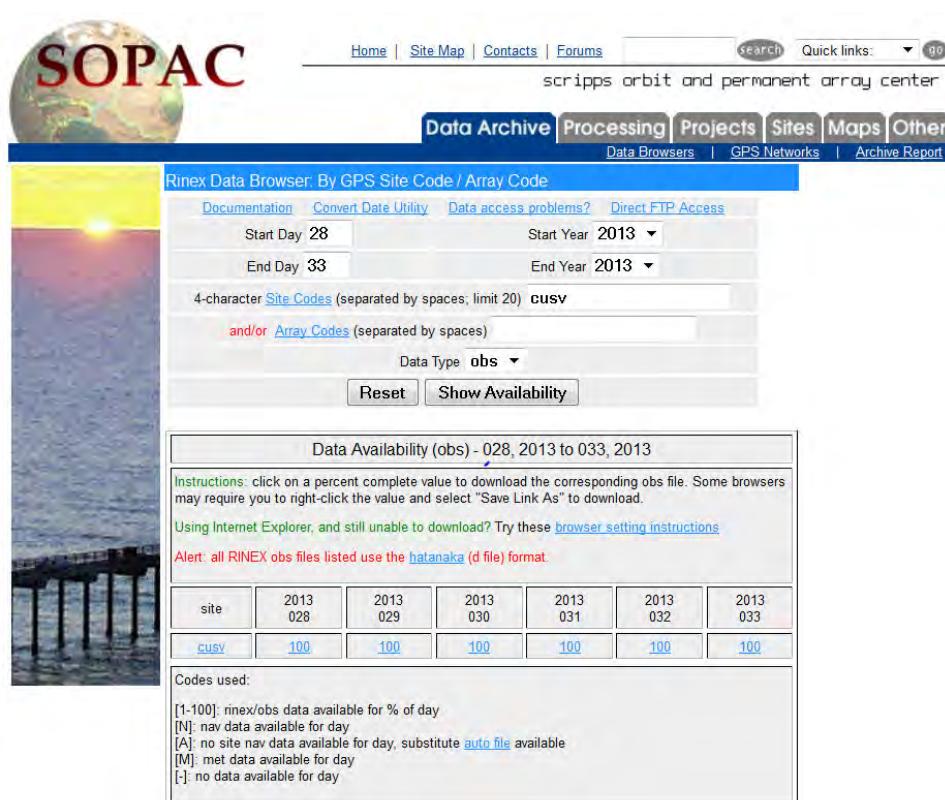
เนื่องจากความต้องการใช้งานที่แตกต่างกัน ทำให้วิธีการประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสสำหรับงานแต่ละประเภทแตกต่างกัน และให้ผลลัพธ์ที่มีความเที่ยงตรงแตกต่างกันไปด้วย ดังนั้น การจัดทำ Digital Archive เพื่อเก็บรักษาเฉพาะค่าพิกัดซึ่งถือได้ว่าเป็นผลิตภัณฑ์ (Product) ของสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส อาจทำให้การใช้งานจำกัดลง เนื่องจากค่าพิกัดที่ได้จากวิธีการประมวลผลสำหรับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงต่ำกว่า เช่น งานนำหนหรืองานทางด้านแผนที่ ไม่เหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงกว่าเช่นงานทางด้านธรณีฟิสิกส์

เพื่อความสะดวกในการใช้ข้อมูลร่วมกันในวงกว้างเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดจากการที่หน่วยงานต่าง ๆ ได้ลงทุนในการสร้างสถานีจีพีเอส การมี Digital Archive กลางของประเทศเพื่อทำหน้าที่เก็บรักษาและเผยแพร่ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสจึงเป็นเรื่องที่น่าสนับสนุนอย่างยิ่ง โดยขั้นตอนทางเทคนิคที่คณะผู้วิจัยเสนอเป็นแนวทางเดียวกับที่ใช้ในระบบ SOPAC (SCRIPPS Orbit and Permanent Array Center, <http://sopac.ucsd.edu/cgi-bin/dbDataBySite.cgi>) ซึ่งเป็นระบบ Data Archive ของ IGS (International GPS Service) ประกอบด้วย

- เก็บรักษาข้อมูลในลักษณะที่เป็นข้อมูลดิบ ในรูปแบบกลางที่สามารถนำไปประมวลผลตามความต้องการของผู้ใช้แต่ละกลุ่มได้ โดยรูปแบบข้อมูลที่เหมาะสมคือ Receiver INterchange EXchange (RINEX) ซึ่งเป็นรูปแบบกลางใช้ในระดับสากลทั่วโลกที่ไม่ขึ้นกับยี่ห้อและรุ่นของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม
- กำหนดชื่อหรือ ID ของสถานีด้วยอักษร 4 ตัว ตามมาตรฐานของ IGS
- จัดทำ Metadata ของสถานีรับสัญญาณ ตามมาตรฐานของ IGS
- พัฒนาระบบให้บริการตามแนวทางของ IGS ซึ่งให้บริการข้อมูลจีพีเอสของสถานีต่าง ๆ ทั่วโลกหลายร้อยสถานี ระบบการสืบค้นข้อมูล GPS เป็นระบบที่สามารถสืบค้นได้จากชื่อ

สถานี (รูปที่ 5.2) โดยผู้ใช้เป็นผู้ระบุวันที่ต้องการข้อมูลและสามารถดาวน์โหลดข้อมูลได้ผ่าน ftp หรือ http

การดำเนินงานตามขั้นตอนข้างต้นจำเป็นต้องมีหน่วยงานที่ทำหน้าที่บริหารจัดการ และคอยรวบรวมข้อมูล GPS ในประเทศไทยทั้งหมดเพื่อให้ง่ายต่อการสืบค้นและเกิดการใช้งานจากข้อมูลที่มีอยู่อย่างคุ้มค่า ตลอดจนทำความเข้าใจและหาข้อตกลงกับหน่วยงานที่เป็นเจ้าของข้อมูลในการเปิดให้ใช้ข้อมูลจีพีเอสร่วมกันในวงกว้าง



SOPAC scripps orbit and permanent array center

Home | Site Map | Contacts | Forums

Data Archive | Processing | Projects | Sites | Maps | Other

Data Browsers | GPS Networks | Archive Report

Rinex Data Browser: By GPS Site Code / Array Code

Documentation | Convert Date Utility | Data access problems? | Direct FTP Access

Start Day: 28 Start Year: 2013

End Day: 33 End Year: 2013

4-character Site Codes (separated by spaces; limit 20): **cusv**

and/or Array Codes (separated by spaces):

Data Type: obs

Reset Show Availability

Data Availability (obs) - 028, 2013 to 033, 2013

Instructions: click on a percent complete value to download the corresponding obs file. Some browsers may require you to right-click the value and select "Save Link As" to download.

Using Internet Explorer, and still unable to download? Try these [browser setting instructions](#)

Alert: all RINEX obs files listed use the [hatanaka](#) (d file) format.

site	2013 028	2013 029	2013 030	2013 031	2013 032	2013 033
cusv	100	100	100	100	100	100

Codes used:

[1-100]: rinex/obs data available for % of day
 [N]: nav data available for day
 [A]: no site nav data available for day, substitute [auto file](#) available
 [M]: met data available for day
 [-]: no data available for day

รูปที่ 5.2 ระบบให้บริการข้อมูลจีพีเอส SOPAC แสดงตัวอย่างของการเลือกข้อมูลจีพีเอสของสถานี CUSV (คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และเป็นสถานีที่อยู่ในสถานเครือข่ายโลกของ IGS)

เอกสารอ้างอิง

ภาษาไทย

อิทธิ ตรีสิริสตัยวงศ์, เฉลิมชนม์ สติระพจน์, ศักดา ธรรมวิทวัส, 2011 (2554), การลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2001, บทความนำเสนอในที่ประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 16, 18-20 พฤษภาคม 2554, เมืองพัทยา.

ภาษาอังกฤษ

Gahalat, V.K., Jade, S., Catherine, J.K., Gireesh, R., Ananda, M.B., Kumar, P., Narsaiah, M., Jafri, S.S.H., Ambikapathy A., Bansal, A., Chadha, R.K., Gupta, D.C., Nagarajana, B., Kumar, S., 2008. GPS measurements of postseismic deformation in the Andaman-Nicobar region following the giant 2004 Sumatra-Andaman earthquake. *Journal of Geophysical Research* 113 (B8). Doi: 10.1029/2007JB005511.

Holland, P.W., Welsch, R.E., 1977. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics – Theory and Methods* 6 (9), 813-827.

Incorporated Research Institutions for Seismology,
http://www.iris.edu/hq/programs/education_and_outreach/resources

Jankaew, K., Atwater, B.F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat T., Martin, M.E., Prendergast A., 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature* 455, 1228-1231. doi:10.1038/nature07373.

Meltzner, A.J., Sieh, K., Abrams, M., Agnew, D.C., Hudnut, K.W., Avouac, J.P., Natawidjaja, D.H., 2006. Uplift and subsidence associated with the great Aceh-Andaman earthquake of 2004. *Journal of Geophysical Research* 111, B02407. doi:10.1029/2005JB003891.

Monecke K., Finger W., Klarer D., Kongko W., McAdoo, B., Moore, A.L., Sudrajat, S.U., 2008. A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature* 455 (30). doi:10.1038/nature07374

Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Chlieh, M., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., Cheng, H., Edwards, R.L., Avouac, J. and Ward, S.N. 2006. Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research* 111. doi: 10.1029/2005JB004025. issn: 0148-0227.

Satirapod, C., Simons, W.J.F., Promthong, C. 2008. Monitoring deformation of Thai geodetic network due to the 2004 Sumatra–Andaman and 2005 Nias Earthquakes by GPS. *J. Surveying Eng. (ASCE)* 134 (3), 83–88.

Satirapod, C., Trisirisatayawong, I., Fleitout, L., Garaud, J., Simons, W., 2012. Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling. *Advances in Space Research* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.030>.

Savage, J.C., Thatcher, W., 1992. Interseismic deformation at the Nankai trough, Japan, subduction zone. *Journal of Geophysical Research* 97 (B7), 11,117–11,135

Sieh, K., D. H. Natawidjaja, A.J. Meltzner, C.C. Shen, H. Cheng, K.S. Li, B.W. Suwargadi, J. Galetzka, B. Philibosian, and R.L. Edwards. 2008. Earthquake supercycles inferred from sea level changes recorded in the corals of West Sumatra, *Science*, 322, 1674–1678, doi:10.1126/science.1163589.

Simons, W.J.F., Socquet, A., Vigny, A., Ambrosius, B.A.C., Abu, S.H., Promthong, C., Subarya, C., Sarsito, D.A., Matheussen, S., Morgan, P., Spakman, W., 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: resolving Sundaland motion and boundaries. *Journal of Geophysical Research* 112 (B06420). doi:10.1029/2005JB003868.

Tabei, T., Adachi, M., Miyazaki, S., Watanabe, T., Kato, S., 2007. Interseismic deformation of the Nankai subduction zone, southwest Japan, inferred from three-dimensional crustal velocity fields. *Earth Planet Space* 59, 1073–1082.

Trisirisatayawong, I., Naeije, M., Simons, W.J.F., Fenoglio-Marc, L., 2011. Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multisatellite altimetry. *Global Planet. Change* 76 (3–4), 137–151, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.12.010>.

Truebienko, O., Fleitout, L., Garaud, J.-D., Vigny C., 2013. Interpretation of interseismic deformations and the seismic cycle associated with large subduction earthquakes. *Tectonophysics* 589, 126–14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.027>

Vigny, C., Simons, W.J.F., Abu, S., Bamphenyu, R., Satirapod, C., Choosakul, N., Subarya, C., Socquet, A., Omar, K., Abidin, H.Z., Ambrosius, B.A.C., 2005. Insight into the 2004 Sumatra–Andaman earthquake from GPS Measurements in Southeast Asia. *Nature* 436 (14). doi:10.1038/nature03937.

Zumberge, J., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., Watkins, M., Webb, F.H., 1997. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks, *Journal of Geophysical Research* 102 (B3), 5005–5017.

Z-set, 2011. Z-set/Zébulon: Material and structure analysis suite.
<http://www.zsetsoftware.com/>.

ภาคผนวก ก

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรม และผลที่ได้

ภาคผนวก ก
ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรม และผลที่ได้

วัตถุประสงค์	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)	ผลที่ได้รับ
1. เพื่อให้ได้ค่าพิกัดทางตั้งความเที่ยงตรงสูง จากการใช้เทคนิครังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสแบบจุดเดี่ยวความเที่ยงตรงสูง	1.1 สำรวจหาตำแหน่งที่เหมาะสมของสถานีรังวัด	1. ได้สถานี CGPS สำหรับทำการติดตามการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกอย่างต่อเนื่อง	- ตามที่คาด
	1.2 ติดตั้งหมุดทองเหลืองของสถานีรังวัดแบบ Campaign	2. ได้ค่าพิกัดความเที่ยงตรงสูงสำหรับวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัว	- ตามที่คาด
	1.3 ทำการรังวัดแบบ PPP ในลักษณะ Campaign ครั้งที่ 1 และ 2		
	1.4 จัดซื้อ GPS เกรดยีออเดติก 1 ชุด		
	1.5 จัดซื้อ Notebook Computers 2 เครื่อง		
	1.6 ติดตั้งและทดสอบ CGPS		
2. เพื่อให้ได้อัตราการเคลื่อนตัวทางตั้ง ณ ปัจจุบันของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑล	2.1 คำนวณหาค่าพิกัดจากข้อมูลรังวัดจีพีเอส	3. ได้อัตราการเคลื่อนตัวและองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในประเทศไทย	- ตามที่คาด
	2.2 วิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัว	4. ได้ค่าพิกัดความเที่ยงตรงสูงสำหรับวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัว	- ตามที่คาด
		5. ได้บทความทางวิชาการระดับชาติและนานาชาติอย่างละ 1 บทความ	- ตามที่คาด
3. เพื่อให้ได้ภาพจำลองการเคลื่อนตัวทางตั้งของชั้นเปลือกโลกในระดับประเทศ	3.1 การจัดทำ Workshop เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้เกี่ยวกับการพัฒนาแบบจำลองการเคลื่อนตัวของเปลือกโลก	6. ได้ภาพจำลองการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกในประเทศไทย	- ตามที่คาด
	3.2 จัด Workshop การ Validate ผลจากแบบจำลองที่ได้กับค่าที่วัดได้จริงร่วมกับนักธรณีฟิสิกส์	7. ได้ฐานข้อมูลขององค์ความรู้ความเที่ยงตรงสูงสำหรับการวิเคราะห์หาอัตราการเคลื่อนตัวของโลกและงานประเมินผลกระทบทางกายภาพและสิ่งแวดล้อม	- ตามที่คาด โดยจัดเก็บในรูปแบบไฟล์บน Server ของภาควิชาวิศวกรรมสำรวจ

วัตถุประสงค์	กิจกรรม (activities)	ผลงานที่คาดว่าจะได้รับ (outputs)	ผลที่ได้รับ
	ผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศ	8. ได้บทความทางวิชาการระดับชาติและบทความตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติอย่างละ 1 บทความ	- ตามที่คาด ยกเว้นบทความวิชาการระดับชาติที่จะจัดทำเพื่อเผยแพร่ในการประชุมวิชาการภูมิสารสนเทศแห่งชาติในช่วงปลายปี 2556

ภาคผนวก ข

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ภาคผนวก ข

คุณลักษณะเฉพาะของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมจีพีเอส

ชุดเครื่องมือสำรวจประกอบด้วยเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS สำหรับสถานีฐาน (Base Station) และอุปกรณ์ประกอบจำนวน 1 ชุด

คุณลักษณะเฉพาะ

เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GPS พร้อมอุปกรณ์ประกอบ จำนวน 1 ชุด สำหรับสถานีฐาน (Base Station) มีรายละเอียดดังนี้

1. สามารถรับ และบันทึกข้อมูลสัญญาณดาวเทียมในรูปแบบ GPS L1/L2/L2C/L5 และ GLONASS L1/L2 ได้เป็นอย่างน้อย
2. มีช่องรับสัญญาณ จำนวนอย่างน้อย 72 ช่องรับสัญญาณ และสามารถรับสัญญาณในระบบ WAAS/EGNOS ได้
3. สามารถปฏิบัติงานรังวัดสัญญาณดาวเทียม GNSS ด้วยวิธี Static, Fast Static, Kinematic, Differential GPS (DGPS) และ Real-time Kinematics (RTK) ได้
4. เมื่อประมวลผลข้อมูลในโปรแกรมประมวลผลข้อมูลแล้ว มีความคลาดเคลื่อนของการสำรวจรังวัดด้วยวิธี Static และ Fast Static / Rapid Static ทางราบ (Horizontal) ไม่มากกว่า 3 มิลลิเมตร + 0.5 ppm ของระยะเส้นฐานที่รังวัด
5. เมื่อประมวลผลข้อมูลในโปรแกรมประมวลผลข้อมูลแล้ว มีความคลาดเคลื่อนของการสำรวจรังวัดด้วยวิธี Static และ Fast Static / Rapid Static ทางตั้ง (Vertical) ไม่มากกว่า 6 มิลลิเมตร + 0.5 ppm ของระยะเส้นฐานที่รังวัด
6. เมื่อประมวลผลข้อมูลในโปรแกรมประมวลผลข้อมูลแล้ว มีความคลาดเคลื่อนของการสำรวจรังวัดด้วยวิธี Kinematic ทางราบ (Horizontal) ไม่มากกว่า 10 มิลลิเมตร + 1 ppm ของระยะเส้นฐานที่รังวัด
7. สามารถเก็บข้อมูลโดยใช้แผ่นบันทึกข้อมูลแบบ CF card สำหรับบันทึกข้อมูลดาวเทียมได้ไม่น้อยกว่า 1 ปี โดยมีความจุไม่น้อยกว่า 2 GB หรือดีกว่า
8. สามารถรองรับค่าปรับแก้ในรูปแบบ CMR+, RTCM2.1, RTCM2.3, RTCM3.0 ได้เป็นอย่างน้อย
9. ตัวเครื่องทำจากวัสดุโลหะผสมแมกนีเซียม (Magnesium Alloy) หรืออลูมิเนียม (Aluminum) ที่มีความแข็งแรงทนทาน สามารถทนต่อการกันฝุ่นและกันน้ำตามมาตรฐาน IP67 หรือดีกว่า และกันความชื้นได้ 100 เปอร์เซ็นต์
10. รองรับการเชื่อมต่อข้อมูลแบบ Bluetooth หรือ Ethernet ได้
11. ช่วงอุณหภูมิการทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม ตั้งแต่ -40° ถึง 65°C
12. สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงสถานภาพการทำงานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และสามารถควบคุมการบันทึกข้อมูลผ่านคอมพิวเตอร์ได้
13. อุปกรณ์ประกอบของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ประกอบด้วย

- แบตเตอรี่ภายในเพื่อใช้กับเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS แต่ละเครื่องรับสัญญาณดาวเทียมให้สามารถปฏิบัติงานในสนามอย่างต่อเนื่อง ได้อย่างน้อย 6 ชั่วโมง จำนวนไม่น้อยกว่า 8 ชุด พร้อมเครื่องประจุไฟฟ้าจำนวนอย่างน้อย 1 เครื่อง
- เสืออากาศรับสัญญาณดาวเทียมแบบภายนอกที่มี Ground plane พร้อมอุปกรณ์ เพื่อใช้ในการปฏิบัติงาน จำนวนอย่างน้อย 1 ชุด
- สายสัญญาณเชื่อมต่อระหว่าง เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และเสืออากาศยาวไม่น้อยกว่า 30 เมตร 1 เส้น
- สายสัญญาณเชื่อมต่อระหว่างเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS กับเครื่องประมวลผลข้อมูลสัญญาณดาวเทียม GNSS เพื่อการถ่ายทอดข้อมูลในการประมวลผล จำนวนอย่างน้อย 1 ชุด
- ฐานกล้อง (Tribach) แบบสามเส้า ซึ่งมีฟองกลมและกล้องส่องทั้งหมด รวมทั้งมีชุดต่อฐานกล้องสำหรับติดตั้งเสืออากาศ จำนวนอย่างน้อย 1 ชุด
- กล่องแบบแข็งสำหรับบรรจุเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS พร้อมอุปกรณ์ประกอบ เพื่อการเดินทาง (Transport Case) จำนวนอย่างน้อย 1 ชุด
- มีตู้ Rack ขนาด 19 นิ้ว ที่มีประตูเปิด-ปิด ด้านหน้าและด้านหลัง สามารถล็อกได้ สำหรับใส่เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และอุปกรณ์ประกอบ จำนวน 1 ตู้
- มีเครื่องสำรองไฟ UPS สำหรับจ่ายกระแสไฟฟ้าให้เครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS และอุปกรณ์ประกอบ ในกรณีที่กระแสไฟหลักเกิดขัดข้อง ได้ไม่น้อยกว่า 24 ชั่วโมง จำนวน 1 เครื่อง
- คู่มือการใช้งานของเครื่องรับสัญญาณดาวเทียม GNSS ที่เป็นต้นฉบับภาษาอังกฤษ จำนวน อย่างน้อย 1 ชุด
- มีโปรแกรมสำหรับแปลงข้อมูลเป็น RINEX ได้
- เครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก 1 เครื่อง ที่มี คุณสมบัติอย่างน้อยดังนี้ หน่วยประมวลผล Intel core i7 ความเร็ว 2.0 GHz พร้อมระบบปฏิบัติการ Windows 7 Professional 64 bit, Hard disk 500 GB, DDR RAM 8GB, จอ LED 14” พร้อมรับประกัน 3 ปี

เงื่อนไข

1. ผู้เสนอราคามีหนังสือรับรอง การแต่งตั้งให้เป็นตัวแทนจากบริษัทผู้ผลิตเป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 5 ปี
2. ผู้เสนอราคายินดีฝึกอบรมเจ้าหน้าที่ผู้ใช้งานให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นระยะเวลาไม่น้อยกว่า 1 วัน
3. ผู้เสนอราคายินดีรับประกันตรวจสอบอุปกรณ์เครื่องรังวัดสัญญาณดาวเทียม ทุกรายการ ยกเว้นแบตเตอรี่เป็นระยะเวลาอย่างน้อย 4 ปี นับจากวันที่รับมอบ โดยไม่คิดค่าซ่อม และค่าอะไหล่ ในกรณีอุปกรณ์นั้นเกิดความเสียหายอันเนื่องมาจากการใช้งานปกติในระหว่างรับประกัน

ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูลจีพีเอสด้วยซอฟต์แวร์
GIPSY

ภาคผนวก ค

โปรแกรมสำหรับใช้ในการประมวลผลข้อมูล GPS ด้วยซอฟต์แวร์ GIPSY

```
#!/bin/csh
#
# Start Precise Point Positioning Campaign - W.J.F. Simons - 14-07-09
#
if ($#argv < 2)then
    echo "Usage: point_start day_of_year year [nrdays] [amb]"
    echo "examp: point_start 331 1994 10 amb"
    exit 1
endif
#
# Set number of days to process
#
cd $TMPDIR
rm -f * >& /dev/null
cd /tmp
rm -f * >& /dev/null
set NRDAY = 1
if ($3=="amb") then
    set save_qm_for_amb
else
    if ($3 > 1)then
        set NRDAY = $3
    endif
endif
if ($4=="amb") then
    set save_qm_for_amb
endif
#
# Directory information to process campaign
# -----
#
set RINEX = /home/gnss/ppp2011/rinex
set PROCS = /home/gnss/ppp2011/
set LOG = /home/gnss/ppp2011/log
set STA = /home/gnss/ppp2011/STA
set NIO = /home/gnss/ppp2011/nio
#
# Put your sta_pos and sta_svec files for this run in the control directory
#
cd $PROCS"control"
cp -f /home/gnss/manual/stapos/sta_id.gnss/goa/sta_info/sta_id.gnss
cp -f /home/gnss/manual/stapos/sta_pos.gnss/goa/sta_info/sta_pos.gnss
cp -f /home/gnss/manual/stapos/sta_svec.gnss/goa/sta_info/sta_svec.gnss
#
echo $1$2 > setday.opt
setday_p
source setday.com
rm -f setday.opt >& /dev/null
rm -f setday.com >& /dev/null
#
# Set the location of your orbits here (can be old or new JPL orbits)
#
setenv LORB_CACHE /home/gnss/manual/orbits
#
set FETCH = `echo $LORB_CACHE`"/"$FULLYEAR
#
# Start loop of Campaign-processing
# -----
#
# rm -f $LOG/errors.log
set COUNT = 0
set moredelsats = 0
while ($COUNT < $NRDAY)
    echo Day $DAYYEAR of $FULLYEAR
    set hdate = `echo $DATE | awk '{print(toupper($0))}'`
    set nsec = `doy2sec $FULLYEAR $DAYYEAR | awk '{printf"%i",$1}'`
    echo ""
again:
#
    cd $PROCS
    clean $DAYYEAR $DAYYEAR
    cd $RINEX
    rm -f * >& /dev/null
    cp /home/gnss/rinex2011/"$DAYYEAR"?.*D.Z . >& /dev/null
```

```

rm -f $STA/PP????$DAYYEAR.$YEAR"C" >& /dev/null
rm -f $STA/"PP"$DAYYEAR$DAYYEAR.$YEAR"C" >& /dev/null
rm -f $STA/"PPITRF00"$DAYYEAR.$YEAR"C" >& /dev/null
rm -f $NIO/PF????$DAYYEAR.* >& /dev/null
rm -f $PROCS/amb/????$DAYYEAR.* >& /dev/null
rm -f $PROCS/ambizap/$DAYYEAR/$hcdte????.* >& /dev/null
rm -f $PROCS/ambizap/$DAYYEAR/$hcdte????_free.* >& /dev/null
if (-e $LOG/ambigon.1$DAYYEAR.Z) then
    mv -f $LOG/ambigon.1$DAYYEAR.Z $LOG/ambigon.1$DAYYEAR.old.Z
endif
if (-e $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR.Z) then
    mv -f $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR.Z $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR.old.Z
endif
if (-e $LOG/tdptable$DAYYEAR"_out.Z") rm -f $LOG/tdptable$DAYYEAR"_out.Z"
if (-e $LOG/tdptable$DAYYEAR"_out") rm -f $LOG/tdptable$DAYYEAR"_out"
if (-e ../control/delsites && $?save_qm_for_amb) then
    set NRDELSITES = `cat ../control/delsites | wc -l`
    set NRRNXFILES = `ls -1 $DAYYEAR?.$YEAR"D.Z" | wc -l`
    echo $NRRNXFILES RINEX files in this run
    echo $NRRNXFILES RINEX files in this run >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
    echo ' ' >> $LOG/errors.log
    echo $NRRNXFILES RINEX files in this run >> $LOG/errors.log
    set n = 1
#
# ambizap doesn't mind more than 99 stations
#
    goto delcont
    if ($NRRNXFILES > 99)then
        echo Maximum network size for ambiguity fixing is 99
        echo Maximum network size for ambiguity fixing is 99 >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
        echo Maximum network size for ambiguity fixing is 99 >> $LOG/errors.log
        echo "Removing up to $NRDELSITES stations using the delsites file:"
        echo "Removing up to $NRDELSITES stations using the delsites file:" >> $LOG/xt-
gipsy.1$DAYYEAR
        echo "Removing up to $NRDELSITES stations using the delsites file:" >> $LOG/errors.log
    endif
    @ ntail = $NRDELSITES - 1
    set DELSITES=()
    while ($NRRNXFILES > 99)
        set DELSITE = `head -1 ../control/delsites | tail -1`
        set havedel = `ls -1 $DELSITE"D.Z" | wc -l`
        tail -$ntail ../control/delsites > delsites
        echo $DELSITE >> delsites
        mv -f delsites ../control/delsites
        if ($havedel == 1)then
            echo $DAYYEAR $DELSITE >> ../control/delsites.done
            rm -f $DELSITE"D.Z" >& /dev/null
            set DELSITES=($DELSITES $DELSITE)
            set NRRNXFILES = `ls -1 $DAYYEAR?.$YEAR"D.Z" | wc -l`
        endif
    @ n++
    if ($n > $NRDELSITES) goto delcont
end
if ($n > 1)then
    echo $DELSITES
    echo $DELSITES >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
    echo $DELSITES >> $LOG/errors.log
endif
echo ' ' >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
echo ' ' >> $LOG/errors.log
endif
delcont:
set RNXFILES = `ls -1 $DAYYEAR?.$YEAR"D.Z" | cut -c1-11`
foreach rnxfile ($RNXFILES)
    echo $rnxfile"O"
    echo ' ' >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
    echo $rnxfile"O" >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
    echo ' ' >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
    echo ' ' >> $LOG/errors.log
    echo $rnxfile"O" >> $LOG/errors.log
    echo ' ' >> $LOG/errors.log
    echo ' ' >> $LOG/clkprp.log
    echo $rnxfile"O" >> $LOG/clkprp.log
    echo ' ' >> $LOG/clkprp.log
    echo ' ' >> $LOG/ca-p.log
    echo $rnxfile"O" >> $LOG/ca-p.log
    echo ' ' >> $LOG/ca-p.log
    cd $PROCS
    rm -r -f ninja.* >& /dev/null
    rm -r -f ninjaw.* >& /dev/null
    rm -f * >& /dev/null
    cp $FETCH/$DAYYEAR/"*" . >& /dev/null
    set ahave = `ls peci Shadow TDPfile tpeo.nml | wc -l`
    if ($ahave != 4)then

```

```

echo 'JPL orbit/clock products not (all) available in' $FETCH/$DAYYEAR >> $LOG/errors.log
echo 'JPL orbit/clock products not (all) available in' $FETCH/$DAYYEAR >> $LOG/xt-
gipsy.l$DAYYEAR
    exit 1
endif
set newjpl = `ls $FULLYEAR-$MONTH-$DAY.ant.Z | wc -l`
if ($newjpl > 0 && ($FULLYEAR < 2011 || ($FULLYEAR == 2011 && $DAYYEAR < 328))) then
    echo 'WARNING: Using new JPL orbit/clock products for '$DAYYEAR' of '$FULLYEAR >>
$LOG/errors.log
    echo 'WARNING: Using new JPL orbit/clock products for '$DAYYEAR' of '$FULLYEAR >> $LOG/xt-
gipsy.l$DAYYEAR
    endif
    cd $PROCS
    if (-e $FULLYEAR-$MONTH-$DAY.ant.Z) then
        set igxyz = `zgrep SAT $FULLYEAR-$MONTH-$DAY.ant.Z | awk '{print $2}'`
        if (-e /goa/etc/antenna_cal_xmit/$igxyz) then
            gps_add.pl gps.nlm /goa/etc/antenna_cal_xmit/$igxyz
            echo "GPS satellite callibrations from $igxyz will be added to qregres.nlm"
            echo "GPS satellite callibrations from $igxyz will be added to qregres.nlm" >> $LOG/xt-
gipsy.l$DAYYEAR
            echo "GPS satellite callibrations from $igxyz will be added to qregres.nlm" >>
$LOG/errors.log
        else
            echo "WARNING: Failed to add GPS satellite calibration file $igxyz (not available)"
            echo "WARNING: Failed to add GPS satellite calibration file $igxyz (not available)" >>
$LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
            echo "WARNING: Failed to add GPS satellite calibration file $igxyz (not available)" >>
$LOG/errors.log
        endif
    endif
    set data = $FULLYEAR-$MONTH-$DAY
    #
    # extract_orbits $data _nf
    set STAT=`echo $rnxf | cut -c1-4`
    cd raw
    rm -f * >& /dev/null
    cp -f $RINEX/`echo $rnxf | cut -c1-11`"D.Z" . >& /dev/null
#
#
#
    Some RINEX files have C2 observation fields, which teqc does not like
#
#
    set c2obs = `zgrep "# / TYPES OF OBSERV" *D.Z | grep " C2" | wc -l`
    if ($c2obs == 1) then
        echo "Removing C2 observation fields in $rnxf""O"
        echo "Removing C2 observation fields in $rnxf""O" >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
        echo "Removing C2 observation fields in $rnxf""O" >> $LOG/errors.log
        set obvs = (`zgrep "# / TYPES OF OBSERV" *D.Z | cut -c11-60`)
        set sob = ()
        foreach obv ($obvs)
            set sob = ($sob `echo $obv | awk '{if ($1!="C2"){printf "%s", $1}}'`)
        end
        set obs = `echo $sob | sed "s/ //g"`
        CRZ2RNX `echo $rnxf | cut -c1-11`"D.Z" >& /dev/null
        rm -f `echo $rnxf | cut -c1-11`"D.Z"
        teqc -O.obs $sob $rnxf"O" > $rnxf"OSIG"
        mv -f $rnxf"OSIG" $rnxf"O"
        RNX2CRZ $rnxf"O"
        rm -f $rnxf"O"
    endif
#
#
#
    Special section to handle some problematic DSMM Trimble 5700 data - can be ignored
#
#
    CRZ2RNX `echo $rnxf | cut -c1-11`"D.Z" >& /dev/null
    clockprep -i $rnxf"O" -o $rnxf"O".clk >& clockprep.log
    set nsb = `grep "Strange break" clockprep.log | wc -l`
    set ndf = `grep "No discontinuities found" clockprep.log | wc -l`
    set npo = `grep "Offset in phase" clockprep.log | awk '{if (($5<-0.99&&$5>-
1.01) || ($5>0.99&&$5<1.01)){npo=npo+1}}END{printf "%i", 1.5*npo}}'`
    set t5700 = `grep "TRIMBLE 5700" $rnxf"O" | wc -l`
    echo `echo $rnxf | cut -c1-7` nsb: $nsb ndf: $ndf npo: $npo t5700: $t5700
    rm -f clockprep.log $rnxf"O".clk
    if ($nsb > 5 && $ndf == 1 && $t5700 > 0 && $npo >= $nsb) then
        clockprep -i $rnxf"O" -o $rnxf"O".clk -fixonlyphase
        echo "Forcing fixonlyphase clockprep due to strange breaks TRIMBLE 5700"
        echo "Forcing fixonlyphase clockprep due to strange breaks TRIMBLE 5700">> ../xt-
gipsy.l$DAYYEAR
        echo "Forcing fixonlyphase clockprep due to strange breaks TRIMBLE 5700">> $LOG/errors.log
        mv -f $rnxf"O".clk $rnxf"O"
    endif
#
#
#
    Windowing the RINEX file (to ensure the GPS data is from the actual day you want to
process)
#
#

```

```

    teqc -st $FULLYEAR$MONTH$DAY"000000"-e $FULLYEAR$MONTH$DAY"235959"+err /dev/null $rxnfile"O" >
$rxnfile"OWIN"
    teqc +qc -O.int 15 $rxnfile"OWIN" >& teqc.out
    mv -f $rxnfile"OWIN" $rxnfile"O" >& /dev/null
    rm -f `echo $rxnfile | cut -c1-11`"D.Z"
    RNX2CRZ $rxnfile"O" >& /dev/null
    rm -f $rxnfile"O" >& /dev/null
    set timespan = `grep SUM teqc.out | awk '{printf"%4.2f",$10}' | awk '{print $1*100}'`
    rm -f teqc.out *.io? *.mp? *.sn? *S >& /dev/null
    echo ''
    echo "Time span data: "`echo $timespan | awk '{printf"%4.2f",$1/100}'`" hours"
    echo "Time span data: "`echo $timespan | awk '{printf"%4.2f",$1/100}'`" hours" >> ../xt-
gipsy.l$DAYYEAR
    echo "Time span data: "`echo $timespan | awk '{printf"%4.2f",$1/100}'`" hours" >>
$LOG/errors.log
    echo ''
    echo '' >> ../xt-gipsy.l$DAYYEAR
#
# Ignoring RINEX files with less than 7 hours of data (can be modified, eg. 600/6/6/6 for 6
hours)
#
    if ($timespan < 200) then
        echo '' >> $LOG/errors.log
        echo Less than 7 hours of data, station $STAT will not be processed
        echo Less than 7 hours of data, station $STAT will not be processed >> ../xt-
gipsy.l$DAYYEAR
        echo Less than 7 hours of data, station $STAT will not be processed >> $LOG/errors.log
        echo ''
        echo '' >> ../xt-gipsy.l$DAYYEAR
        echo '' >> $LOG/errors.log
        goto skipped
    endif
#
# Removing Glonass satellites (now also removed by ninja) and GPS satellites as in the NANU
messages
#
    cd $PROCS/control
    grep GLO /goa/etc/PRN_GPS | awk '{printf"GLO%i ",$3}' > $PROCS/DELSATS
    if (-e delstats.inp) then
        set delstats=`cat delstats.inp | grep $FULLYEAR | grep " $DAYYEAR" " | grep ALL | sed
"s/$FULLYEAR $DAYYEAR ALL //g"`
        set delstats=($delstats `cat delstats.inp | grep $FULLYEAR | grep $DAYYEAR" " | grep $STAT |
sed "s/$FULLYEAR $DAYYEAR $STAT //g"`)
        set NGPS=`echo $delstats | wc -w | awk '{print($1)}'`
        if ($NGPS > 0) then
            echo $delstats >> $PROCS/DELSATS
        endif
    endif
    cd $PROCS
    set itr=0
    set runxt=1
    set newchi=0
    set onchi=0
    set dsat=0
    set iterr=0
    set bdata=0
    set bsol=0
    while ($runxt == 1)
        set runxt=0
        xt-gipsy fixed_precise_orbit+clock-TDP+Shadow+OcLdg_new bias_free.stacov INTV=300
RCLK=ALLGPS >>& xt-gipsy.l$DAYYEAR
# xt-gipsy fixed_precise_orbit+clock-TDP+Shadow_new bias_free.stacov INTV=300 RCLK=ALLGPS
>>& xt-gipsy.l$DAYYEAR
# check that apriori coordinates were close enough - if not iterate
    set sta_lim = 0.0002 # 10 meters
    set ztrop_lim = 0.10 # 10 cm
    set chi_lim = 5 # 5
    set nchi = `grep 'APPROXIMATE CHI-SQUARE:' xt-gipsy.l$DAYYEAR | wc -l`
    @ newchi = $nchi - $onchi
    @ onchi = $nchi
    grep 'APPROXIMATE CHI-SQUARE:' xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -$newchi | head -1 | awk
'{a=$NF;if (a > chi)iter++; else iter=0}END{print iter}' chi=$chi_lim > kkk.chi
    if (-e TDPTABLE) then
# grep $STAT TDPTABLE | egrep -a " WETZTROP" | awk
        '{limit="$ztrop_lim";b=$2;a=$3;sa=$4;sumwt=sumwt+(a-
b)/(sa*sa);sumwts=sumwts+1/(sa*sa)}END{wt=sumwt/sumwts;if(wt > limit || wt < limit*-1 || b ==
0.10){print 1}else{print 0}}' > kkk.wet
        grep $STAT TDPTABLE | egrep -a " WETZTROP" | awk
        '{limit="$ztrop_lim";b=$2;a=$3;sa=$4;sumwt=sumwt+(a-

```

```

b)/(sa*sa);sumwts=sumwts+1/(sa*sa)}END{wt=sumwt/sumwts;if(wt > limit || wt < limit*-1){print
1}else{print 0}}' > kkk.wet
    else
        grep 'Adjustments to zenith ' xt-gipsy.l$DAYYEAR | awk '{a=$NF*1000;if (a > zw || a <
zw*-1)iter=1; else iter=0}END{print iter}' zw=$ztrop_lim > kkk.wet
    endif
    grep 'Adjustments to apriori' xt-gipsy.l$DAYYEAR | awk '{if ($s > sta)iter=1; else
iter=0}END{print iter}' sta=$sta_lim > kkk.sta
    grep 'ERROR: more than 4 iterations through the filter' xt-gipsy.l$DAYYEAR | wc -l | awk
'if ($s > $iterr)'iter=1; else iter=0}END{print iter}' > kkk.ite
    set iterr = `grep 'ERROR: more than 4 iterations through the filter' xt-gipsy.l$DAYYEAR |
wc -l | awk '{print $1}'`
    set iter_apr_chi = `cat kkk.chi`
    set iter_apr_wet = `cat kkk.wet`
    set iter_apr_sta = `cat kkk.sta`
    set iter_apr_ite = `cat kkk.ite`
    rm -f kkk.wet kkk.sta kkk.chi kkk.ite >& /dev/null
    if ($iter_apr_wet == 1 || $iter_apr_sta == 1 || $iter_apr_chi == 1 || $iter_apr_ite == 1)
then
    echo ' ' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
    echo ' ' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
    if ($iter_apr_ite == 1)then
        set ressl = `awk '{if ($2=="max_post_resid")print NR}' xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -1`
        set ngps = `qm_sat QMfiled | wc -l | awk '{print $1}'`
        @ resnl = $ressl + $ngps + 2
        set rgps = `awk '{if (NR>$ressl && NR<$resnl)print $1,$2}' xt-gipsy.l$DAYYEAR | grep
GPS | head -1 | awk '{print $1}'`
        set vres = `awk '{if (NR>$ressl && NR<$resnl)print $1,$2}' xt-gipsy.l$DAYYEAR | grep
GPS | head -1 | awk '{printf"%i",$2}'`
        if ($dsat < 6)then
            if ($vres > 5)then
                echo "WARNING: Filter not converged, removing $rgps from qmfile (postfit residual
$vres cm)" >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
                echo WARNING: $STAT $DAYYEAR: Removing" $rgps from qmfile >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
                @ dsat = $dsat + 1
                del_qm -i QMfiled -s $rgps -o QMfiledd
                mv -f QMfiledd QMfiled
                set runxt=1
                mv -f bias_free.stacov bias_free.stacov_0
                rm -f filter_?.log >& /dev/null
            else
                echo "WARNING: Filter not converged, but no satellites with residual above 5 cm left"
>> xt-gipsy.l$DAYYEAR
                set iter_apr_ite = 0
                set iterr = 100
                set bdata = 1
            endif
        else
            echo "WARNING: Filter not converged, but already 6 satellites with residual above 5 cm
removed" >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
            set iter_apr_ite = 0
            set iterr = 100
            set bdata = 1
        endif
    endif
    if ($iter_apr_chi == 1 && $iter_apr_ite == 0)then
        echo $STAT $DAYYEAR: Removing EXTREME outliers from qmfile' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        if (! -e postfit_b_1.nio) then
            cp -f postfit_b.nio postfit_b_1.nio >& /dev/null
        endif
        if (! -e postfit_b_1.log) then
            cp -f postfit_b.log postfit_b_1.log >& /dev/null
        endif
        postplot $STAT ALL postfit_b_1.nio -d 110-p postscript -o postplot.ps
        rm -f .delinfo >& /dev/null
        checkres2 $STAT $DAYYEAR $FULLYEAR >& checkres.log
        cat checkres.log >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        echo 'Data to be removed:' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        cat .delinfo >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        set cclean = `wc -l qmclean | awk '{print $1}'`
        if ($cclean > 0)then
            sed "s/WARNING:There is very little/WARNING:There was very little/" xt-gipsy.l$DAYYEAR
> xto-gipsy
            mv -f xto-gipsy xt-gipsy.l$DAYYEAR
        #
        cat qmclean | grep del_qm >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        set npbef = `qm_arc QMfile | awk '{a=$7;sum=sum+a}END{print sum}'`
        rm -f .npinfo >& /dev/null
        qmclean

```

```

del_qm -i QMfile -o QMfile.arc -arc 1200 >>& xt-gipsy.l$DAYYEAR
mv -f QMfile.arc QMfile
if (! -z QMfile) then
  if (! -e .npinfo) then
    set npaft = `qm_arc QMfile | awk '{a=$7;sum=sum+a}END{print sum}'`
    @ nprem = $npbef - $npaft
    echo "WARNING: $nprem points removed, $npaft of $npbef left in QMfile" >> xt-
gipsy.l$DAYYEAR
  else
    set npbef = `head -1 .npinfo`
    set npaft = `tail -1 .npinfo`
    rm -f .npinfo >& /dev/null
    @ nprem = $npbef - $npaft
    echo "WARNING: $nprem pseudorange data points removed, $npaft of $npbef are left in
the QMfile" >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
  endif
  rm -f postfit_b_1.nio.residuals postfit_b_1.nio >& /dev/null
  set runxt=1
  mv -f bias_free.stacov bias_free.stacov_0
  rm -f filter_?.log >& /dev/null
else
  mv -f QMfile QMfile
  set iter_apr_chi=0
endif
else
  echo $STAT': Skipping iteration, no EXTREME outliers left in qmfile.' >> xt-
gipsy.l$DAYYEAR
  set iter_apr_chi=0
endif
endif
if ($iter_apr_sta == 1 && $iter_apr_chi == 0 && $iter_apr_ite == 0) then
  echo "Station Position estimate > $sta_lim" >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
  echo $STAT $DAYYEAR': ITERATING on station position' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
  cp qregres.nml qregres.nml_i$itr >& /dev/null
  sed -n '1,/NMLMonument/p' qregres.nml > qr2.nml
#      this will fail if site vector is more than $sta_lim
  awk '/STA/{printf "                %14.7f      \n", $5/1000.0}'
bias_free.stacov >> qr2.nml
  sed '1,/NMLMonument/d' qregres.nml | sed '1,3d' >> qr2.nml
  set runxt=1
  mv -f bias_free.stacov bias_free.stacov_0
  rm -f filter_?.log >& /dev/null
else
  cp qregres.nml qr2.nml >& /dev/null
endif
mv -f qregres.nml qregres_0.nml
if ($iter_apr_wet == 1 && $iter_apr_sta == 0 && $iter_apr_chi == 0 && $iter_apr_ite == 0)
then
  if (-e TDPTABLE) then
    set ztrop_est = `grep $STAT TDPTABLE | egrep -a " WETZTROP" | awk
' {b=$2;a=$3;sa=$4;sumwt=sumwt+(a-b)/(sa*sa);sumwts=sumwts+1/(sa*sa)} END{printf "%9.4f", sumwt/(sumwts)} `
    set ztrop_estr = `echo $ztrop_est | awk '{printf "%9.4f", $1}'`
  else
    set ztrop_est = `grep 'Adjustments to zenith' xt-gipsy.l$DAYYEAR | awk '{print
$NF*1000}' | tail -1`
    set ztrop_estr = `echo $ztrop_est | awk '{printf "%9.4f", $1*0.8}'`
  endif
  echo $STAT $DAYYEAR': ITERATING on WETZTROP' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
  echo "WETZTROP $ztrop_est > $ztrop_lim" >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
  awk '{if ($1=="NMLTROP_WET"){s4=$4+zt; printf "      NMLTROP_WET( 1) = %8s  \n!updated
apriori\n", $4} else print $0}' zt=$ztrop_estr qr2.nml > qregres.nml
  echo $STAT `awk '{if ($1=="NMLTROP_WET"){s4=$4+zt; printf "%8s", $4}}' zt=$ztrop_estr
qr2.nml` > ZT_STATUS
  cp qregres.nml qregres.nml_i$itr >& /dev/null
  rm -f qr2.nml >& /dev/null
  set runxt=1
  mv -f bias_free.stacov bias_free.stacov_0
  rm -f filter_?.log >& /dev/null
else
  mv qr2.nml qregres.nml
endif
echo ' ' >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
endif
@ itr++
if ($itr < 10 && $runxt == 1) then
  rm -f batch.txt rgfile prefilter.txt wash.nml >& /dev/null
endif
if ($itr >= 10 && $runxt == 1) then
  echo $STAT": 10 Successive ITERATIONS, now continuing with post processing..." >> xt-
gipsy.l$DAYYEAR

```

```

        echo setting runxt false
        set runxt=0
        set bsol=1
        mv -f bias_free.stacov_0 bias_free.stacov
    endif
end
echo "" >> clkprp.log
set cadjust = `grep Adjusting clkprp.log | wc -l`
set crestore = `grep Restoring clkprp.log | wc -l`
if ($cadjust > 0 && $crestore == 0) then
    echo $STAT $DAYYEAR ADJ >> $LOG/clkprp.chk
endif
if ($crestore > 0 && $cadjust == 0) then
    echo $STAT $DAYYEAR RES >> $LOG/clkprp.chk
endif
if ($crestore > 0 && $cadjust > 0) then
    echo $STAT $DAYYEAR RES+ADJ >> $LOG/clkprp.chk
endif
if (-e TDPTABLE) cat TDPTABLE >> $LOG/tdptable$DAYYEAR_out"
if (-e clkprp.log) cat clkprp.log >> $LOG/clkprp.log
if (-e ca-p.log) cat ca-p.log >> $LOG/ca-p.log
grep ERROR xt-gipsy.l$DAYYEAR | sed "/ then/ d" >> $LOG/errors.log
if (-e qregres.nml) then
    echo "" >> $LOG/errors.log
    echo "Antenna Type pcenter/map used:" >> $LOG/errors.log
    grep "Antenna Type :" qregres.nml | cut -c18>> $LOG/errors.log
    grep "phase_center_maps" qregres.nml | cut -c51>> $LOG/errors.log
endif
set ldata = `grep "WARNING:There is very little" xt-gipsy.l$DAYYEAR | wc -l`
set bsola = `grep "BAD NEWS" xt-gipsy.l$DAYYEAR | wc -l`
if ($bsol == 0 && $bsola > 0) then
    set bsola = `grep "edt_stat=" xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -1 | cut -c10-10`
    set noutliers = `grep "TOTAL:" xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -1 | awk '{printf"%i",$3}'`
    if ($bsola == 2 && $noutliers != 0) then
        echo $STAT": Solution not well CONDITIONED, removing..." >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
        set bsol = 1
    endif
endif
set ldata2=`grep "TOTAL:" xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -1 | awk '{n=$4-$3;if(n<300){print
1}else{print 0}}'`
if ($ldata2==1) then
    echo $STAT": Solution based on less than 300 data POINTS, removing..." >> xt-gipsy.l$DAYYEAR
endif
echo "" >> $LOG/errors.log
grep -E "CHI|WARNING|Error|edtpnt2_|ITERA|EXTREME|CONDITIONED|POINTS" xt-gipsy.l$DAYYEAR >>
$LOG/errors.log
echo "" >> $LOG/errors.log
grep "Adjustments to" xt-gipsy.l$DAYYEAR | tail -2 >> $LOG/errors.log
if ($ldata == 0 && $ldata2==0 && $bdata == 0 && $bsol == 0) then
    if ($?save_qm_for_amb && -e bias_free.stacov) then
        mkdir amb >& /dev/null
        mkdir ambizap >& /dev/null
        mkdir ambizap/$DAYYEAR >& /dev/null
        sta_rcvr AS $STAT >> amb/rcvr AS$DAYYEAR.table
        cp -f QMfiled amb/$STAT$DAYYEAR.qm >& /dev/null
        cp -f QMfiled ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.qm >& /dev/null
        compress ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.qm
        smap4fix accum.nio smooth.nio SMCOV >& smap4fix.log
        phase_count batch.txt SMCOV | head -1 >> amb/BIASES$DAYYEAR.table
        cp -f SMCOV amb/$STAT$DAYYEAR.smcov >& /dev/null
        cp -f SMCOV ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.smcov >& /dev/null
        compress ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.smcov
        if (-e ZT_STATUS) cat ZT_STATUS >> amb/ZT_STATUS$DAYYEAR.table
        if (-e point1.txt) cat point1.txt > amb/$STAT$DAYYEAR.point
        if (-e point1.txt) cat point1.txt > ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.point
        cp -f bias_free.stacov ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT_free.stacov" >& /dev/null
        grep $STAT $STA_ID | head -1 > ambizap/$DAYYEAR/$hcdates$STAT.sta_id
        grep $STAT $STA_SVEC > out
        set nline = `wc -l out | awk '{print $1}'`
        while ($nline > 0)
            set visec = `tail -$nline out | head -1 | sed "s:// /g" | awk '{print $3,$4,$5,$6,$7,$8}' |
cal2sec - | awk '{printf"%i",$1}'`
            set vlsec = `tail -$nline out | head -1 | sed "s:// /g" | awk '{sec="$visec";print
sec+$9}'`
            set ok = `echo $nsec $visec $vlsec | awk '{if ($1 > $2 && $1 < $3){print 1}else{print 0}}'`
            if ($ok == 1) then
                tail -$nline out | head -1 > out.new
                mv -f out.new out
                set nline = 0
            else

```

```

        @ nline = $nline - 1
    endif
end
mv -f out ambizap/$DAYYEAR/$hcddate$STAT.sta_svec
grep $STAT $STA_POS > out
set nline = `wc -l out | awk '{print $1}`
while ($nline > 0)
    set visec = `tail -$nline out | head -1 | sed "s:/ /g" | awk '{print $2,$3,$4,$5,$6,$7}' |
cal2sec - | awk '{printf"%i", $1}`
    set vlsec = `tail -$nline out | head -1 | sed "s:/ /g" | awk '{sec="$visec";print
sec+($8*86400)}'`
    set ok = `echo $nsec $visec $vlsec | awk '{if ($1 > $2 && $1 < $3){print 1}else{print 0}}'`
    if ($ok == 1)then
        tail -$nline out | head -1 > out.new
        mv -f out.new out
        set nline = 0
    else
        @ nline = $nline - 1
    endif
end
mv -f out ambizap/$DAYYEAR/$hcddate$STAT.sta_pos
endif
cp -f bias_free.stacov $STA/PP`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR."$YEAR"C" >& /dev/null
cat xt-gipsy.l$DAYYEAR >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
cp -f postfit_b.nio $NIO/PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio" >& /dev/null
cd $NIO
if ($STAT != "EANH" && $STAT != "EATT" && $STAT != "ETHA") then
    rm -f *C`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".p"* >& /dev/null
    rm -f P*`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio.residual"* >& /dev/null
    postplot `echo $rxnfile | cut -c1-4` ALL PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio" -d 110.p
postscript -o PC`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".ps" >& /dev/null
    cat PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio.residuals" > postfit_b.nio.residuals
    postplot `echo $rxnfile | cut -c1-4` ALL PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio" -d 120.p
postscript -o LC`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".ps" >& /dev/null
    cat PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio.residuals" >> postfit_b.nio.residuals
    mv -f postfit_b.nio.residuals PL`echo $rxnfile | cut -c1-4`$DAYYEAR".nio.residuals" >&
/dev/null
    rm -f tmpfn.* >& /dev/null
endif
rm -f *.nio >& /dev/null
compress *$DAYYEAR.nio.residuals
compress *$DAYYEAR.ps
else
skipped:
    cd $PROCS
    echo Station coordinates for $STAT on $DAYYEAR could not be properly estimated. >> xt-
gipsy.l$DAYYEAR
    cat xt-gipsy.l$DAYYEAR >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
endif
end
cd $STA
rm -f "PP"$DAYYEAR$DAYYEAR". "$YEAR"C" >& /dev/null
rm -f "PPITRF00"$DAYYEAR". "$YEAR"C" >& /dev/null
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
echo "Merging all station coordinates for day $DAYYEAR of $FULLYEAR": " >> $LOG/xt-
gipsy.l$DAYYEAR
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
stamrg -i PP????$DAYYEAR". "$YEAR"C" -o "PP"$DAYYEAR$DAYYEAR". "$YEAR"C"
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
echo "Applying XFILE for day $DAYYEAR of $FULLYEAR": " >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
apply -x ../XFILE -i "PP"$DAYYEAR$DAYYEAR". "$YEAR"C" -o "PPITRF00"$DAYYEAR". "$YEAR"C" -r -t -s
>>& $LOG/xt-gipsy.l$DAYYEAR
cd ../rinex
set rinfiles = `ls -1 ????$DAYYEAR?.$ {YEAR}D.Z | cut -c1-4`
cd ../STA
set stafil = `ls -1 PP????$DAYYEAR.$ {YEAR}C | cut -c3-6`
cd ../log
if (-e tdptable$DAYYEAR"_out") compress tdptable$DAYYEAR"_out"
set foundone = 0
foreach rinfile ($rinfiles)
    set found = 0
    foreach stafile ($stafil)
        if ($stafile == $rinfile) then
            set found = 1
        endif
    end
    if ($found == 0)then
        set few = `grep "coordinates for "$rinfile" on "$DAYYEAR" could not" xt-gipsy.l$DAYYEAR |
wc -l`

```

```

        set few2=`grep $rinfile": 10 Successive ITERATIONS, now continuing with post" xt-
gipsy.1$DAYYEAR | wc -l`
        set few3=`grep $rinfile": Solution not well CONDITIONED, removing" xt-gipsy.1$DAYYEAR | wc
-1`
        set few4=`grep $rinfile": Solution based on less than 300 data POINTS" xt-gipsy.1$DAYYEAR |
wc -1`
        set few5=`grep "station \"$rinfile\" will not be processed" xt-gipsy.1$DAYYEAR | wc -1`
        echo $FULLYEAR $DAYYEAR $rinfile $few $few2 $few3 $few4 $few5 >> failed.log
        set few = `grep "coordinates for \"$rinfile\" on \"$DAYYEAR\" could not" xt-gipsy.1$DAYYEAR |
wc -1`
        @ few = $few + $few2+$few3
        if ($few == 0) set foundone = 1
        endif
    end
    set foundone = 0
    if ($?save_qm_for_amb && -e ../amb/rcvr_AS$DAYYEAR.table && $foundone == 0) then
        cd $PROCS
        if ($moredelsats == 1) then
            set moredelsats = 0
            goto moveon
        endif
        cd amb
        rm -f sats .sats dsats >& /dev/null
        set files = `ls ??????.qm`
        foreach file ($files)
            qm_sat $file >> sats
        end
        set usats = `sort -u sats`
        foreach usat ($usats)
            set ns = `grep $usat sats | wc -l | awk '{print $1}'`
            echo $usat $ns >> .sats
        end
        sort -nk2.sats > sats
        set ts = `wc -l sats | awk '{print $1}'`
        set tsi = `wc -l sats | awk '{print $1}'`
        set cnt = 1
        while ($ts > 30)
            head -ncnt sats | tail -1 | awk '{print $1}' >> dsats
            @ ts = $ts - 1
            @ cnt++
        end
        if ($cnt > 1) then
            set moredelsats = 1
            echo "Too many sats left ($tsi)"
            echo "Too many sats left ($tsi)" >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
            echo "Too many sats left ($tsi)" >> $LOG/errors.log
            set newdelsats=(`cat dsats`)
            echo "Removing sat(s) $newdelsats"
            echo "Removing sat(s) $newdelsats" >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
            echo "Removing sat(s) $newdelsats" >> $LOG/errors.log
        endif
        if ($moredelsats == 1) then
            if (-e ../control/delsats.inp) then
                set havedelsats=`cat ../control/delsats.inp | grep $FULLYEAR | grep $DAYYEAR" " | grep
ALL | wc -l | awk '{print $1}'`
                if ($havedelsats > 0) then
                    set delsats=`cat ../control/delsats.inp | grep $FULLYEAR | grep $DAYYEAR" " | grep ALL |
sed "s/$FULLYEAR $DAYYEAR ALL //g"`
                    cat ../control/delsats.inp | sed "s/$FULLYEAR $DAYYEAR ALL $delsats/$FULLYEAR $DAYYEAR
ALL $delsats $newdelsats/g" > ../control/.delsats.inp
                    mv -f ../control/.delsats.inp ../control/delsats.inp
                else
                    echo $FULLYEAR $DAYYEAR ALL $newdelsats >> ../control/delsats.inp
                endif
            else
                echo $FULLYEAR $DAYYEAR ALL $newdelsats > ../control/delsats.inp
            endif
            echo "Starting again with PPP" >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
            echo "Starting again with PPP, day " $DAYYEAR >> $LOG/errors.log
            cd ..
            clean $DAYYEAR $DAYYEAR
            goto again
        endif
        cd $PROCS
    moveon:
        rm -f -r work >& /dev/null
        mkdir work
        #
        # Skipping previous (iterative) ambigon2 scheme to solve ambiguities - use ambizap instead
        # Ambizap also uses ambigon2 but does per baseline and hence works much much faster!
        #
        goto skip_ambigon

```

```

set STACOVs
set QMs
set POINTs=()
set SMCOVs
cd amb
foreach i (*$DAYYEAR.smcov)
  set sta = `echo $i | awk '{print substr($1,1,4)}'`
  set d = `echo $i | awk '{print substr($1,5,3)}'`
  if (-e ../STA/PP${sta}$d.$(YEAR)C && -e $sta$d.qm) then
    set STACOVs = ($STACOVs PP${sta}$d.$(YEAR)C)
    set QMs = ($QMs $sta$d.qm)
    cp -f rcvr_AS$DAYYEAR.table ../work/rcvr_AS.table >& /dev/null
    set SMCOVs = ($SMCOVs $i)
  endif
end
cd ../STA
catcov $STACOVs > ../work/PP$DAYYEAR$DAYYEAR.STACOV
cd ../amb
cp -f BIASES$DAYYEAR.table ../work/BIASES.table >& /dev/null
cp -f ZT_STATUS$DAYYEAR.table ../work/ZT_STATUS.table >& /dev/null
cp -f rcvr_AS$DAYYEAR.table ../work/rcvr_AS.table >& /dev/null
merg_qm $QMs ../work/QMfile
if ($#POINTs > 0) then
  cat $POINTs > ../work/POINT.TXT
else
  echo "" > ../work/POINT.TXT
endif
cd ../work
ln -s ../amb/*smcov .
cp $FETCH/$DAYYEAR/"*" . >& /dev/null
# set data = $FULLYEAR-$MONTH-$DAY
# extract orbits $data _nf
qm_sta QMfile | grep RTPJ > .refsta
qm_sta QMfile | grep UUMK >> .refsta
qm_sta QMfile | grep GRIK >> .refsta
qm_sta QMfile | grep ARAU >> .refsta
qm_sta QMfile | grep PHKT >> .refsta
qm_sta QMfile | grep KUAL >> .refsta
qm_sta QMfile | grep RTSD >> .refsta
qm_sta QMfile | grep RYNG >> .refsta
qm_sta QMfile | grep WATP >> .refsta
qm_sta QMfile | grep TOMI >> .refsta
qm_sta QMfile | grep BAKO >> .refsta
qm_sta QMfile | grep PHUK >> .refsta
qm_sta QMfile | grep WATA >> .refsta
qm_sta QMfile | grep TAIW >> .refsta
qm_sta QMfile | grep IISC >> .refsta
qm_sta QMfile | grep TSKB >> .refsta
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
echo "Reference station ambigon iterations:" `head -1.refsta` >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
echo " " >> $LOG/xt-gipsy.1$DAYYEAR
rm -f ../STA/PP$DAYYEAR$DAYYEAR.$(YEAR)C >& /dev/null
rm -f ../STA/PFITRF00$DAYYEAR.$(YEAR)C >& /dev/null
time ambigon_p1tn QMfile fix.stacov `head -1.refsta` NONE PP$DAYYEAR$DAYYEAR.STACOV POINT.TXT
$SMCOVs >& ambigon.log
set astat = $status
if (! $astat) then
  grep -i antenna ../STA/PP$DAYYEAR.$(YEAR)C | sed 's/^.*:/' >> fix.stacov
  cp -f fix.stacov ../STA/PP$DAYYEAR$DAYYEAR.$(YEAR)C >& /dev/null
  if (-e XFILE) then
    apply -x XFILE -i fix.stacov -o "PFITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C" -r -t -s >>& ambigon.log
  endif
  mv -f amb_point.*_001../log/amb_points.1$DAYYEAR >& /dev/null
  transform -f ../STA/"PFITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C" -i fix.stacov -o
  "PFITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"TC" -r -t -s
# mv -f "PFITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"TC" ../STA
mv -f "PFITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C" ../STA
endif
echo " " `head -1.refsta` >> ../log/xt-gipsy.1$DAYYEAR
amb_sum ambigon.log | grep fixed >> ../log/xt-gipsy.1$DAYYEAR
echo " " `head -1.refsta` >> ../log/xt-gipsy.1$DAYYEAR
cp -f BIASES.table ../log/BIASES$DAYYEAR.table >& /dev/null
cp -f ambigon.nml ../log/ambigon.1$DAYYEAR >& /dev/null
cat ambigon.log >> ../log/ambigon.1$DAYYEAR
cd ../log
amb_stat ambigon.1$DAYYEAR >> xt-gipsy.1$DAYYEAR"
skip_ambigon:
cd $PROCS
cd work
rm -r -f ../ambizap/out$DAYYEAR >& /dev/null
mkdir ../ambizap/out$DAYYEAR >& /dev/null
if (-e ../amb/ZT_STATUS$DAYYEAR.table) cp -f ../amb/ZT_STATUS$DAYYEAR.table
../ambizap/out$DAYYEAR/ZT_STATUS.table >& /dev/null

```

```

        if (-e ../amb/BIASES$DAYYEAR.table) cp -f ../amb/BIASES$DAYYEAR.table
../ambizap/out$DAYYEAR/BIASES.table >& /dev/null
    ambizap ../ambizap/$DAYYEAR/ ../ambizap/out$DAYYEAR/ >& $LOG/ambizap.l$DAYYEAR
    stamrg -i ../ambizap/out$DAYYEAR/solution/*_fix.stacov -o PZ$DAYYEAR$DAYYEAR.${YEAR}C >>&
$LOG/ambizap.l$DAYYEAR
    if (-e ../XFILE) then
        apply -x ../XFILE -i PZ$DAYYEAR$DAYYEAR.${YEAR}C -o "PZITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C" -r -t -s
>>& $LOG/ambizap.l$DAYYEAR
    endif
    if (-e "PZ"$DAYYEAR$DAYYEAR"."$YEAR"C") mv -f "PZ"$DAYYEAR$DAYYEAR"."$YEAR"C" ../STA
    if (-e "PZITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C") mv -f "PZITRF00$DAYYEAR"."$YEAR"C" ../STA
    endif
##    cd ../amb
##    rm -f *$DAYYEAR*
#    compress *$DAYYEAR*
    cd ../log
    compress *.l$DAYYEAR
#
    @ COUNT ++
    echo $DAYYP $FULLYEAR > setday.opt
    setday_p
    source setday.com
end
rm -f setday.opt >& /dev/null
rm -f setday.com >& /dev/null
rm -f .refsta >& /dev/null
cd $PROCS
#    rm -f *

```

ภาคผนวก ง

บทความเผยแพร่จากงานวิจัย



Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling

C. Satirapod^{a,*}, I. Trisirisatayawong^a, L. Fleitout^b, J.D. Garaud^{b,c}, W.J.F. Simons^d

^a Department of Survey Engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand

^b Geology Laboratory, Ecole Normale Supérieure (ENS), Paris, France

^c Onera – The French Aerospace Lab, F-92322 Châtillon, France

^d Faculty of Aerospace Engineering, Delft University of Technology, The Netherlands

Abstract

Following previous findings from ongoing GPS research in Thailand since 2004 we continue to exploit the GPS technique to monitor and model land motions induced by the Sumatra–Andaman Earthquake. Our latest results show that up to the end of 2010, Thailand has been co-seismically displaced and is subsequently undergoing a post-seismic horizontal deformation with total displacements (co-seismic plus post-seismic) ranging from 10.5 to 74.7 cm. We observed the largest horizontal displacements in the southern part of Thailand and moderate and small displacements in the central and northern parts. In addition to horizontal displacements throughout Thailand, continuous GPS measurements show that large parts of Thailand are subsiding at rates up to 1 cm/yr. It is the first time that such vertical post-seismic deformations at large distances (650–1500 km away from the Earthquake's epicentre) have been recorded. We have investigated the physical processes leading to the observed subsidence. While after-slip on the subduction interface induces negligible or even slightly positive vertical motions, relaxation in the asthenosphere is associated with a sizable subsidence. Predictions from a 3D finite element model feature an asthenosphere with an effective viscosity of the order of 3×10^{18} Pas, fit the horizontal post-seismic data and the observed subsidence well. This model is then used to predict the subsidence over the whole seismic cycle. The subsidence should go on with a diminishing rate through the next two decades and its final magnitude should not exceed 10 cm in the Bangkok area.

The post-seismic subsidence makes it difficult to identify other geophysical signals, particularly sea level rise, when observed from tide gauge data and thus there is a need for reliable estimation of subsidence velocities. This phenomenon may also worsen coastal erosion and flooding from sea water and so cause a considerable impact on the socio-economic development of coastal and low-lying areas, especially in the greater Bangkok area.

Crown copyright © 2012 Published by Elsevier Ltd. on behalf of COSPAR. All rights reserved.

Keywords: GPS; Sumatra–Andaman Earthquake; Geophysical modelling; Vertical motion

1. Introduction

The Sumatra–Andaman Earthquake on December 26th, 2004 caused significant (co-seismic) surface displacements up to a couple of thousand kilometers away from its epicenter (Stein and Okal, 2005; Vigny et al., 2005). Thailand was co-seismically displaced and has been subsequently undergoing a decreasing post-seismic deformation at centimeter to decimeter level (in between 2005 and 2010)

(Panumastakul et al., 2012). Indirect observations of post-seismic subsidence from tidal and altimetry data at many Thai tide gauges were reported in a previous study (see Figs. 3 and 7 in Trisirisatayawong et al., 2011) but the associated vertical post-seismic displacements were not determined. The greater Bangkok region is now also facing severe land subsidence problems with highly varying rates up to a couple of cm/yr in some areas (Aobpaet et al., 2009). In addition, sea level rise in the Gulf of Thailand at a rate of 4 mm/yr has been reported in Trisirisatayawong et al. (2011). These results indicate that the significant magnitudes of these three phenomena (land subsidence, sea

* Corresponding author. Tel.: +66 2 218 6651x312; fax: +66 2 218 6650.
E-mail address: chalermchon.s@chula.ac.th (C. Satirapod).

level rise and post-seismic subsidence) in this region are strongly correlated. These phenomena may have a considerable impact on the socio-economic development of coastal and low-lying areas especially in the Greater Bangkok area.

Therefore we try here to provide answers to the following questions: Can GPS data confirm the post-seismic subsidence inferred from tide gauges? How does this subsidence vary throughout Thailand? How long can we expect these vertical displacements to continue? And finally what kind of physical processes can induce such vertical motions after an earthquake? Therefore the observed position changes at Continuous GPS (CGPS) stations in Thailand are analysed in this paper (see also Satirapod et al., 2011b). The details of the GPS measurements and the data processing strategy used are explained. The resulting horizontal and vertical displacements in Thailand following the major earthquakes near Sumatra (2004–2009) are updated in Section 3. Then, using results from 3D finite element simulations, the physical processes that can cause post-seismic subsidence over such large distances are discussed (Section 4) along with some possible future subsidence scenarios. Finally, we discuss the implications of extended post-seismic subsidence, predicted by the geophysical modelling on the monitoring of relative sea-level changes in Thailand.

2. GPS observations and data processing strategy

The long-term tectonic motions at the zero-order Thai geodetic network of the Royal Thai Survey Department (RTSD) are well determined by means of repeatedly observed GPS points from 1994 to 2004 (Simons et al., 2007). After the Great Sumatra–Andaman Earthquake multiple GPS campaign re-measurements were carried out at these network points to monitor the subsequent horizontal post-seismic displacements in Thailand (Satirapod et al., 2008; Panumatrakul et al., 2012). An overview of the zero-order geodetic network points in Thailand (RTSD campaign sites) is illustrated in Fig. 1. However, to better monitor the vertical displacements, data from CGPS stations are also needed. Fortunately, the National Institute of Information and Communications Technology (NICT) of Japan installed four CGPS stations around Thailand since 2005 and one additional EU-ASEAN SEAMERGES project station, RYNG, located in Rayong province has been available since mid 2004 (see Fig. 1 for the location of CGPS stations used in this study). Apart from the GPS data within Thailand, the GPS solutions of CGPS station ARAU operated by the Department of Surveys and Mapping Malaysia (DSMM) in the South-East Asia region have been provided by the Universiti Teknologi Malaysia (UTM) under the ongoing collaboration in the latest GEOTECDI-SONG project.

The absolute GPS positioning technique, known as the GPS Precise Point Positioning (PPP) technique, available in the GIPSY-OASIS II software (Zumberge et al., 1997)

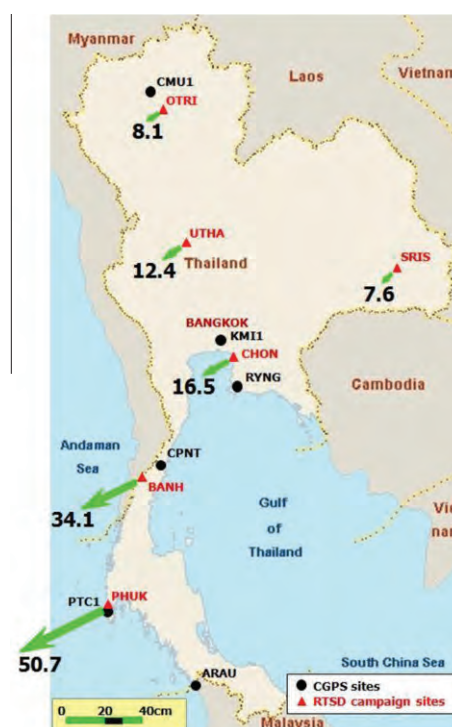


Fig. 1. Location of the RTSD campaign sites and CGPS stations and horizontal post-seismic displacements due to the Sumatra–Andaman, Nias and Bengkulu Earthquakes at the RTSD sites up to November 2010.

was used as the main GPS data processing strategy (using the latest update that incorporates absolute International GNSS Service (IGS) antenna phase centre variations) to derive precise absolute coordinates from the additional CGPS stations in daily batches. The PPP strategy requires consistent GPS orbits and clocks, which together with the Earth rotation parameters were retrieved from JPL (using re-processed orbits from 2005 onwards). The daily (ambiguity-free) solutions were transformed into the ITRF2005 (Altamimi et al., 2007) using the standard daily transformation parameters (XFILES) provided by JPL and subsequently combined into weekly-averaged solutions. Further details on the (campaign) data processing can be found in (Satirapod et al., 2008; Satirapod et al., 2011a; Simons et al., 2007).

3. Horizontal and vertical displacements in Thailand after the earthquakes

For the horizontal displacements, the horizontal coordinates obtained from the latest campaign in 2010 were compared with the horizontal coordinates obtained from the campaign in 2004 (just before the Earthquake occurred). Then, the horizontal post-seismic displacements at each station due to the Earthquake were obtained by removing the long-term rigid plate tectonic motions (Simons et al., 2007) and the co-seismic deformations at these locations (Vigny et al., 2005). The direction and magnitude of the

horizontal post-seismic displacements at the RTSD sites are shown in Fig. 1.

Regarding possibly associated vertical post-seismic displacements, the vertical motions at 6 CGPS stations in and near Thailand are plotted in Fig. 2. Neglecting the seasonal variation in the vertical component, a simple linear trend fitting was chosen to fit the vertical motion. The best-fit linear trend and vertical subsidence values are shown in Fig. 2. The vertical solutions as shown in Fig. 2 are available to the reader from the GEO2TECDI-SONG's web site (<http://www.sv.eng.chula.ac.th/index.php/GEO2TECDI-SONG>).

4. Geophysical modelling

The previous section showed that subsidence, at centimetre per year levels, was recorded following the Sumatra–Andaman Earthquake in Thailand. Is this subsidence really related to the Earthquake or does it result from other hydrological or meteorological phenomena occurring by chance at the same time as the Sumatra–Andaman Earth-

quake? 2D (Trubienko et al., submitted for publication, Figs. 3, 5 and 9) or 3D (Pollitz et al., 2006, Fig 10) computations show that such a subsidence is indeed expected if there is viscous relaxation in the asthenosphere after a large subduction type earthquake. According to these publications, it should amount to about 1/4 and 1/3 of the horizontal velocity perturbations induced by viscous relaxation at distances of respectively 600 and 1000 km from the trench (the ratio of horizontal to vertical velocities is unaffected by the absolute value of the viscosity as both velocities are proportional to $1/\text{viscosity}$). As a horizontal velocity perturbation of several cm/yr after the Earthquake is well demonstrated in southwest Thailand (Satirapod et al., 2007, 2011a), vertical subsidence at centimetre level is then also expected to occur there.

In order to quantify more accurately the role of asthenospheric relaxation for both the horizontal and vertical post-seismic deformations observed after the Earthquake, we have used a 3D finite element method (Fleitout et al., 2011). A detailed description of this 3D model and the numerous trials for the asthenosphere and the low-viscosity

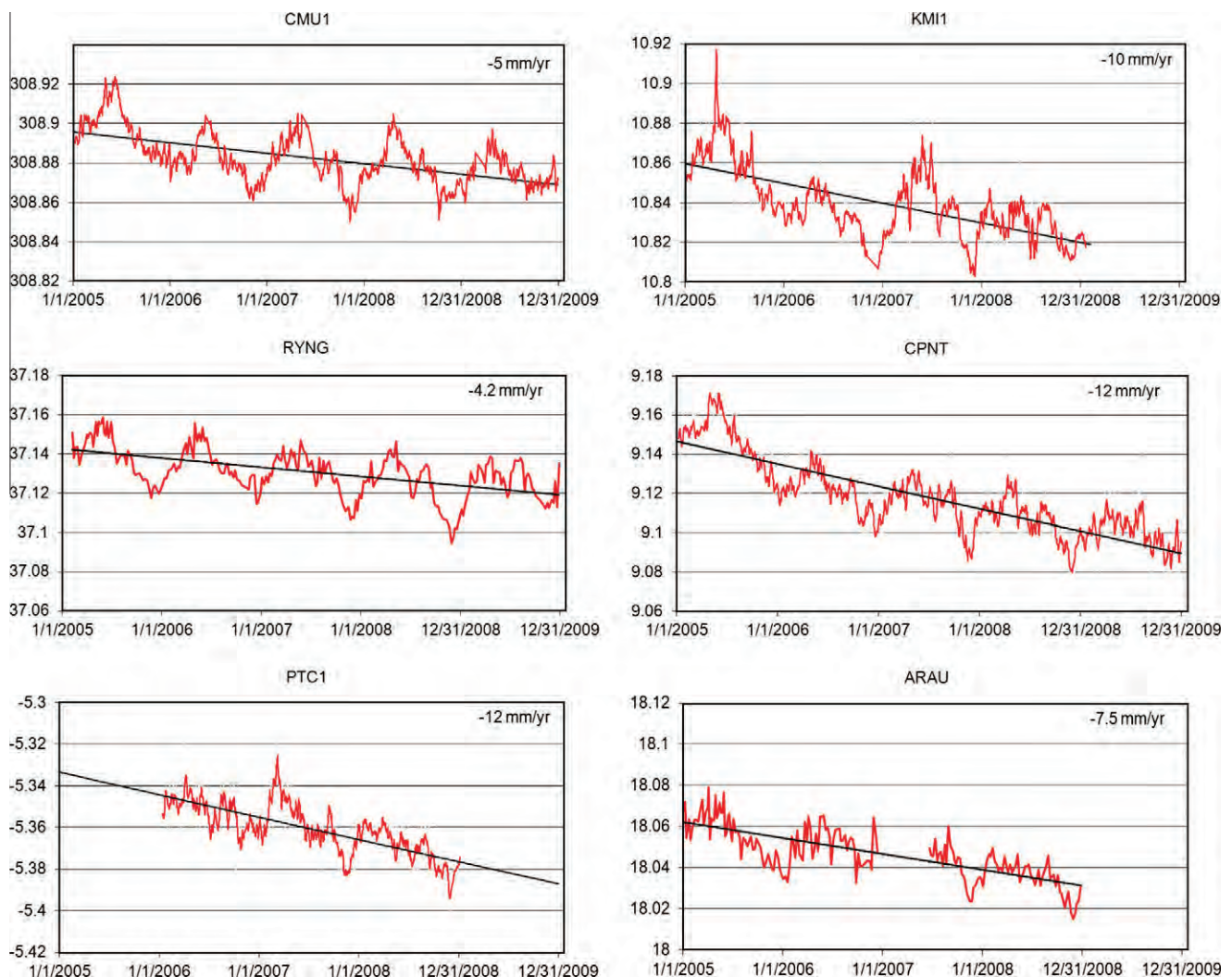


Fig. 2. Vertical motion after the Sumatra–Andaman at 6 CGPS stations.

wedge rheology is beyond the scope of the present paper aimed towards geodetic applications and will be detailed in a separate publication. However, we describe here briefly this 3D model and compare the results obtained from our currently preferred set of rheological parameters with the observed subsidence.

4.1. A 3D finite element model for fitting the post-seismic data

We use the finite element code Zset/Z'ebulon (Ecole des Mines, ONERA, Northwest numerics and modelling, <http://www.zset-software.com/>). We choose a finite element technique rather than an approach based on dislocations in a layered medium (Pollitz, 1997) since the mechanical properties in a subduction zone area are indeed not layered. Also the lateral viscosity variations associated both with the presence of the slab at depth and with a low viscosity wedge can considerably modify the deformations during the seismic cycle (Suito and Hirahara, 1999; Pollitz and Banerjee, 2008; Trubienko et al., submitted for publication). We constructed a 3D mesh that models a region around the subduction zone corresponding to a portion of a spherical shell extending over more than 40° in latitude and longitude and from the core-mantle boundary to the Earth's surface (an early version of this mesh is described in Garaud et al., 2009). In the present study, the sliding is imposed using a classical slipping node technique. We introduce elastic properties varying as a function of depth and region (oceans, continents, accretionary prism). The elastic parameters are derived from the Preliminary Reference Earth Model (PREM) (Dziewonski and Anderson, 1981) except for the introduction of an accretionary prism and a 30 km continental crust over the Sundaland block which affects the predicted vertical motions very little. Gravity is taken into account in our model. We include a visco-elastic mantle (Maxwell or Burger models) and a visco-elastic low viscosity wedge. First, using the co-seismic deformation registered by GPS, we invert for the co-seismic sliding on the fault plane using the elastic response of our finite element model. We notice that it is important for this co-seismic slip determination to use a realistic 3D elastic structure and to do the co-seismic inversion using the exact geometry and elastic properties which will be used afterwards for the visco-elastic computations. In our computations, we also take into account the 2005 Nias and 2007 Bengkulu Earthquakes (i.e., we also invert for the co-seismic displacements and include them in the visco-elastic computation at the appropriate time). Then, we compute the surface deformation induced by the visco-elastic relaxation in the low viscosity regions of our model. The observed GPS horizontal and vertical post-seismic displacements are interpreted as a consequence of sliding on the subduction plane and relaxation in the asthenosphere and low viscosity wedge.

We find that post-seismic slip on the subduction interface is necessary in order to fit the near-field GPS data

(SuGAR stations on the islands south of Sumatra or Andaman stations). The relaxation in the asthenosphere produces very small motion at these stations close to the trench but a sizable post-seismic velocity perturbation, decreasing strongly as function of time, is observed there. We impose then a slip function of time, proportional to the co-seismic slip which yields an adequate fit to the horizontal displacements of the near-field GPS stations. Subsequently, we choose the mechanical properties of the asthenosphere such that the horizontal velocities for the GPS station in Phuket (PHUK) are fit. We then check that the horizontal deformations for all the other Thai and Malaysian stations are well fit by this model, which involves both slip on the subduction interface and asthenospheric relaxation. The present paper provides the comparison between the predicted and the observed vertical motions. Only the relaxation in the asthenosphere significantly affects the far field vertical motions. Slip on the interface does not induce any significant far-field vertical motions (this is why there were only small vertical co-seismic displacements). The observation of vertical subsidence reported here is therefore a strong argument in favour of asthenospheric relaxation. A less direct argument in favour of asthenospheric relaxation is based on the ratio of far-field versus near and middle field horizontal motions. A low viscosity wedge permits the displacements in the 'middle-field' (south coast of Sumatra) to be fit well, but does not affect the horizontal post-seismic displacements in the far-field.

The parameters that influence the amplitude of far-field subsidence are essentially the rheological parameters of the asthenosphere, from 80 km depth to 200 km depth, characterized, in the model, by a generalized Burgers visco-elastic rheology. Below 200 km depth, the rheology is characterized as Maxwell visco-elastic with the log of the viscosity increasing linearly from 3×10^{19} Pas at 200 km depth to 10^{21} Pas at 670 km depth. The viscosity is set to 10^{21} Pas in the lower mantle. Over a 5 year period, only material with viscosity lower than 3×10^{19} Pas deforms plastically in a significant way and the exact viscosity that we put in the mantle deeper than 200 km plays almost no role on the modelling results presented here. It is essentially the asthenospheric rheology (more exactly the transient component of this rheology) which matters for explaining the observed subsidence. The generalized Burgers rheology for the asthenosphere which provides a good fit for the horizontal post-seismic deformations in the Sundaland block is characterized by a long-term viscosity and two Kelvin Voigt elements which characterize the transient creep. The short-term one ($\mu_2 = 2.5 \mu_1$, $\eta_2 = 3.5 \times 10^{17}$ Pas, with μ_1 the elastic shear modulus deduced from the seismological model PREM and μ_2 and η_2 the shear modulus and viscosity of the Kelvin–Voigt element) has been set to fit some characteristics of the horizontal motion in the months following the Earthquake but is of minor importance here. The longer term one ($\mu_2 = \mu_1/2.8$, $\eta_2 = 3.5 \times 10^{18}$ Pas) is the element that imposes most of the deformation over

the 4 year period that we study here. The long-term viscosity has been set to $\eta_1 = 3 \times 10^{19}$ Pas. This value is deduced from convective estimates of heat transport to the base of the lithosphere (Dumoulin et al., 1999) but is not well constrained by the post-seismic data as it induces a rather small deformation over the 5 year period considered.

4.2. The fit to the vertical GPS data

Fig. 3 presents the observed and predicted vertical subsidence following the earthquake for three selected CGPS stations (RYNG, CPNT and ARAU). We have selected these three stations because they are located in stable areas where there is no evidence of significant local subsidence. The ‘data’ curves on Fig. 3 are deduced from the corresponding curves plotted in Fig. 2 but a seasonally variable signal (1-year period) was first estimated and removed. The model involves slip on the interface. This slip on the interface is necessary to explain near-field horizontal motion and it contributes to some of the far-field horizontal motion especially in the months following the Earthquake. However, it plays almost no role in the predicted vertical motion. The low viscosity wedge, which has been introduced to fit the middle-field data, also plays little role in the far-field subsidence and the subsidence rate depends essentially upon the rheology of the asthenosphere.

Fig. 3 shows that, using rheological properties of the asthenosphere that were carefully chosen in order to fit the horizontal displacements of Phuket (PHUK), the predicted vertical displacements are equally well fit for the three CGPS stations (RYNG, CPNT and ARAU) that are located at different far-field distances from the Earthquake epicentre.

4.3. Future subsidence prediction scenarios

In order to predict the future vertical post-seismic displacements, it is important to model the whole seismic cycle. In particular, the ‘inter-seismic phase’ has to be included. This is the phase in between subsequent earthquakes where the horizontal and vertical displacements go in a direction opposite to that of the co-seismic and

post-seismic phases so that the displacements throughout the seismic cycle (referenced to the overriding plate) average out to zero. Therefore, we use a new method, which permits computation of deformation through the seismic cycle, once the recurrence of the earthquakes is known (see Appendix A1 in Trubienko et al., submitted for publication). This method is equivalent to the application of back slip to compensate the co-seismic slip of the earthquake during the seismic cycle (similar to the widely used elastic backslip model, but using a mantle with visco-elastic properties).

Two recurrence periods are chosen, 170 years from (Natawidjaja et al., 2006; Sieh et al., 2008) and 500 years from dating of tsunami-carried sediment deposit in near-field Monecke et al. (2008) and far-field Jankaew et al. (2008) locations. Fig. 4 shows the predicted subsidence through the seismic cycle for two selected locations (RYNG and CPNT). RYNG is representative of the central part of Thailand and located far from the Greater Bangkok area, while CPNT is representative of the southern part. It should be noted that the model curves in Fig. 3 do not include any seismic cycle correction. However, over a 5 year period, the correction for the 170 and 500 yr seismic cycle curves is only 2 and 0.5 mm respectively. We show here that for the parameters that yield a good fit to the data available between 2004 and 2009, the total subsidence due to the Earthquake should be less than 10 cm. There might be some uncertainties linked to the limited time range used to compute the rheological parameters of our asthenosphere. However, an upper bound would be obtained for a Maxwell rheology that fits the initial slope of the observed displacement curves, with a viscosity $\eta = 3 \times 10^{18}$ Pas. Even then, the maximum subsidence would not exceed 15 cm. The western part of the Sundaland platelet is now in the subsiding phase of the seismic cycle. The magnitudes of maximal total subsidence predicted by our model are less than 10 cm for both the chosen recurrence periods of 170 and 500 years.

5. Conclusion and discussion

The Sumatra–Andaman Earthquake is identified as the strongest contributor to the observed present-day post-seismic subsidence in Thailand. It is important to incorporate it in all studies trying to understand the causes of present-day relative sea-level rise in South-East Asia. A similar subsidence is predicted as a consequence of the Maule, Chile (Mw 8.8) and Tohoku, Japan (Mw 9.0) Earthquakes. However, unlike other sources of sea-level rise, the component of post-seismic subsidence linked to post-seismic relaxation should be relatively short-lived and should not lead to a very large additional relative sea-level rise increase in Thailand. However, at the order of cm/year the rates of post-seismic subsidence make it difficult to identify many other geophysical signals, such as sea level rise. The global average is around 1.8 mm/yr (Douglas, 1997; Church and White 2006; Church et al., 2004) or 3.1 mm/yr for the last

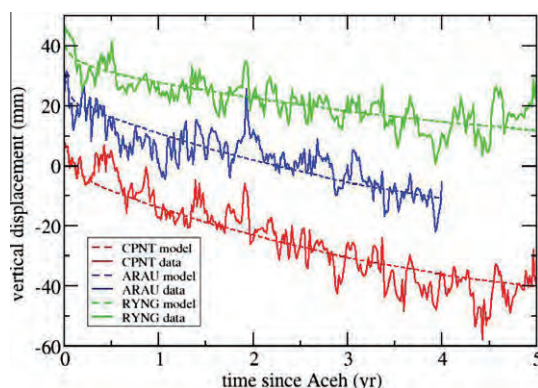


Fig. 3. Predicted and observed vertical subsidence for three CGPS stations.

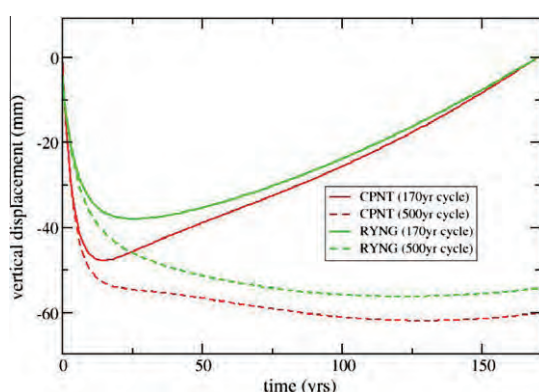


Fig. 4. Predictions for future vertical subsidence for periods of the seismic cycle equal to 170 and 500 years.

20 years (Cazenave and Llovel, 2010) but with considerable regional variations. A reliable estimate of vertical land motion is thus critical to any sea level change study in the region that involves in-situ data. As tidal stations are attached to land, tectonic-driven vertical movements are also registered into the readings. Obtaining the rate of climate-driven sea level change thus requires a reliable estimate of vertical motion. This needs to be taken into consideration, particularly when pre- and post-2004 data are combined as the two different eras of the seismic cycle exhibit very different rates and characteristics for the vertical motion.

In addition to scientific studies, plate motion also affects practical engineering work. While the 50–60 mm total post-seismic subsidence seems small, it could intensify the land subsidence phenomenon that has occurred from groundwater extraction, the InSAR-determined rates of which vary from a few mm/yr to more than 20 mm/yr (Aobpaet et al., 2009). Sea level rise, reported to be around 3–4 mm/yr (Trisirisatayawong et al., 2011) in the Gulf of Thailand will appear to rise faster. Considering that the surface heights of the coastal region of Bangkok are only around 0.8–1.0 meter above sea-level, the post-seismic subsidence worsens the already worrisome situation of the region, particularly if there is a very long subsidence period of more than a century. In this regard, both the total subsidence and recurrence period of Sumatra–Andaman Earthquake are important parameters that planners, coastal engineers and all stakeholders seeking solutions for flood/coastal protection need to know. This paper has demonstrated the use of GPS observations (being one component of Modern Geodesy) for geoscientific research. As stated in Rizos and Satirapod (2011), the importance of Earth observations should be seen in the context of not only scientific understanding of the Earth system, but also in support of fundamental societal activities.

Acknowledgements

This research is supported by the Thailand Research Fund (TRF) and Thailand National Electronics and Computer Technology Center (NECTEC) under

RDG5330029 project and by the GEO2TECDI-SONG project under the Thailand-EC Cooperation Facility Phase II (TEC-2) funding scheme. The authors would like to thank to the Royal Thai Survey Department (RTSD), the NICT of Japan and the SEAMERGES, GEO2TECDI and GEO2TECDI-SONG Project participants for sharing their valuable GPS data. Furthermore we sincerely thank the Department of Survey and Mapping Malaysia (DSMM) for operating the MyRTK network in Malaysia and providing CGPS solutions through the University Teknologi Malaysia (UTM) in the GEO2TECDI Projects. The ongoing GPS research activities in SE Asia are also supported by a Grant from the NWO User Support Programme Space Research in the Netherlands. The authors would also like to thank the scientists and technicians of the Tectonics Observatory, LIPI and SOPAC, who established, maintain and operate the Sumatran GPS Array (SuGAR) network in Indonesia. Our special thanks go to Dr. Anond Snidvongs, an executive director of Geo-Informatics and Space Technology Development (GISTDA) for his valuable suggestions and support. The ‘modelling’ authors would like to thank the CINES for computer time during the development of the 3D finite element software and ANR ‘Risques Naturels’ for its financial support. Lastly, we would also like to thank Dr. Andy Hooper and anonymous reviewers for many suggestions and their constructive comments, which helped improving this paper.

References

- Altamimi, Z., Collilieux, X., Legrand, J. et al. ITRF2005: A new release of the International Terrestrial Reference Frame based on time series of station positions and Earth Orientation Parameters, *J. Geophys. Res.*, 112 (B9), Art. B09401, 19p. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JB004949>, 2007.
- Aobpaet, A., Cuenca, M.C., Hooper, A. et al. Land subsidence evaluation using InSAR time series analysis in Bangkok metropolitan area. In *Proceeding of FRINGE09 workshop*, Frascati, Italy, 7p. 30 November–4 December 2009.
- Cazenave, A., Llovel, W. Contemporary sea level rise. *Ann. Rev. Marine Sci.* 2 (1), 145–173, 2010.
- Church, J.A., White, N.J. A 20th century acceleration in global sea-level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L01602, 4p. <http://dx.doi.org/10.1029/2005GL024826>, 2006.
- Church, J.A., White, N.J., Coleman, R., et al. Estimate of the regional distribution of sea level rise over the 1950–2000 period. *J. Climate* 17, 2609–2625, 2004.
- Douglas, B.C. Global sea rise: a redetermination. *Surveys Geophys.* 18, 279–292, 1997.
- Dumoulin, C., Doin, M.P., Fleitout, L. Heat transport in stagnant lid convection with temperature- and pressure-dependent Newtonian or non-Newtonian rheology. *J. Geophys. Res.* 104 (B6), 12759–12777, 1999.
- Dziewonski, A.M., Anderson, D.L. Preliminary reference Earth model. *Phys. Earth Planetary Interiors* 25, 297–356, 1981.
- Fleitout, L., Garaud, J.D., Cailletaud, G. et al. Modeling the postseismic deformation of the Aceh, Nias and Benkulu Earthquakes, *Geophysical Research abstracts*, pp. EGU2011-6503, 2011.
- Garaud, J.D., Fleitout, L., Cailletaud, G. Simulation parallèle de la relaxation post-sismique dans la région de Sumatra (Parallel simulation of post-sismic relaxation in Sumatra area). In *Proceeding of 2009*

- Neuvième colloque en calcul des structures, Giens, France, 29 June 2009 (In French), 2009.
- Jankaew, K., Atwater, B.F., Sawai, Y., et al. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature* 455, 1228–1231, <http://dx.doi.org/10.1038/nature07373>, 2008.
- Monecke, K., Finger, W., Klarer, D. et al. A 1000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra, *Nature*, 455 (30), 1232–1234. <http://dx.doi.org/10.1038/nature07374>, 2008.
- Natawidjaja, D. H., Sieh, K., Chlieh, M. et al. Source parameters of the great Sumatran megathrust Earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls, *J. Geophys. Res.*, 111, Art. B06403, 37p. <http://dx.doi.org/10.1029/2005JB004025>, 2006.
- Panumastrakul, E., Simons, W.J.F., Satirapod, C. Modeling Post-seismic Displacements in Thai Geodetic Network due to the Sumatra–Andaman and Nias Earthquakes using GPS Observations. *Survey Rev.* 44 (324), 72–77, 2012.
- Pollitz, F.F. Gravitational viscoelastic postseismic relaxation on a layered spherical Earth. *J. Geophys. Res.* 102 (B8), 17921–17941, 1997.
- Pollitz, F., Burgmann, R., Banerjee, P. Post-seismic relaxation following the great 2004 Sumatra–Andaman Earthquake on a compressible self-gravitating Earth. *Geophys. J. Int.* 167, 397–420, 2006.
- Pollitz, F., Banerjee, P., Grijalva, et al. Effect of 3-D viscoelastic structure on post-seismic relaxation from the 2004 $M=9.2$ Sumatra Earthquake. *Geophys. J. Int.* 173, 189–204, 2008.
- Rizos, C., Satirapod, C. Contribution of GNSS CORS infrastructure to the mission of modern geodesy and status of GNSS CORS in Thailand. *Eng. J.* 15 (1), 25–42, 2011.
- Satirapod, C., Simons, W.J.F., Promthong, C., et al. Deformation of Thailand as detected by GPS measurements due to the December 26th, 2004 mega-thrust Earthquake. *Survey Rev.* 39 (304), 109–115, 2007.
- Satirapod, C., Simons, W.J.F., Promthong, C. Monitoring deformation of Thai geodetic network due to the 2004 Sumatra–Andaman and 2005 Nias Earthquakes by GPS. *J. Surveying Eng. (ASCE)* 134 (3), 83–88, 2008.
- Satirapod, C., Simons, W.J.F., Panumastrakul, E., et al. Updating Thai reference frame to ITRF2005 using GPS: Diversion between ITRF2000 and ITRF2005 in Southeast Asia. *Survey Rev.* 43 (319), 45–53, 2011a.
- Satirapod, C., Trisirisatayawong, I., Fleitout, L. Vertical Motions in Thailand after the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake from GPS Observations and Its Geophysical Modelling, IUGG2011, Melbourne, Australia, 28 June–8 July, 2011b.
- Sieh, K., Natawidjaja, D.H., Meltzner, A.J., et al. Earthquake supercycles inferred from sea-level changes recorded in the corals of west Sumatra. *Science* 322, 1674–1678, 2008.
- Simons, W.J.F., Socquet, A., Vigny, C., et al. A decade of GPS in Southeast Asia: Resolving Sundaland motion and boundaries. *J. Geophys. Res.* 112 (B6), 1–20, 2007.
- Stein, S., Okal, E.A. Seismology: Speed and size of the Sumatra Earthquake. *Nature* 434, 581–582, 2005.
- Suito, H., Hirahara, K. Simulation of postseismic deformations caused by the 1896 Riku-u Earthquake, northeast Japan: Re-evaluation of the viscosity in the upper mantle. *Geophys. Res. Lett.* 26 (16), 2561–2564, <http://dx.doi.org/10.1029/1999GL900551>, 1999.
- Trisirisatayawong, I., Naeije, M., Simons, W.J.F., et al. Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multisatellite altimetry. *Global Planet. Change* 76 (3–4), 137–151, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.12.010>, 2011.
- Trubienko, C., Fleitout, L., Garaud, J.D. et al. Interpretation of interseismic deformations and the seismic cycle associated with large subduction Earthquakes, submitted for publication.
- Vigny, C., Simons, W.J.F., Abu, S., et al. Insight into the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake from GPS measurements in southeast Asia. *Nature* 436, 201–206, 2005.
- Zumberge, J., Heflin, M.B., Jefferson, D.C., et al. Precise Point Positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J. Geophys. Res.* 102 (B3), 5005–5017, 1997.

การลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2004

Post-seismic Plate Downlift in Thailand after 2004 Sumatra-Andaman Earthquake

บทคัดย่อ

นับตั้งแต่เหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่สุมาตรา-อันดามันขนาด $M_w 9.2$ เมื่อเดือนธันวาคม 2547 อนุกรมเวลาของพิคตความเที่ยงตรงสูงที่คำนวณด้วยวิธี Precise Point Positioning (PPP) จากข้อมูลของสถานีรังวัดจีพีเอสต่อเนื่อง (Continuous GPS Station, CGPS) ในจังหวัดชุมพร กรุงเทพมหานคร และเชียงใหม่ บ่งชี้อย่างสอดคล้องกันว่าแผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยได้มีการลดระดับลงอย่างรวดเร็ว งานวิจัยนี้อาศัยฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสามผนวกกับฟังก์ชันชานน์และโคไซน์เพื่อจำลองอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่ง อัตราหน่วงของการเคลื่อนตัวทางดิ่ง การเปลี่ยนแปลงของอัตราหน่วง และการเคลื่อนที่ตามวงจรถูกนำมาใช้ในการจำลองการเคลื่อนตัวสุทธิที่ได้จากข้อมูลอนุกรมเวลา การวิเคราะห์แบบจำลองชี้ให้เห็นว่าอัตราการเคลื่อนตัวทางดิ่งที่ชุมพร กรุงเทพมหานคร และเชียงใหม่ประเมินเมื่อสิ้นเดือนมิถุนายน 2005 (พ.ศ.2548) มีค่าเป็น -27.3, -30.1 และ -13.3 มม/ปี ตามลำดับ สาเหตุที่อัตราการระดับของกรุงเทพมหานครมากกว่าที่ชุมพรซึ่งอยู่ใกล้ศูนย์กลางแผ่นดินไหวมากกว่าอาจเป็นผลจากการทรุดตัวของชั้นทรายที่รองรับอาคารที่ตั้งสถานีรังวัดจีพีเอสต่อเนื่อง ในขณะที่เมื่อสิ้นเดือนมิถุนายน 2010 (พ.ศ.2553) ที่ชุมพรอัตราการลดระดับอยู่ที่ -10.6 และที่เชียงใหม่แนวโน้มการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกเปลี่ยนทิศเป็นการยกตัวขึ้นด้วยอัตรา +1.4 มม/ปี โดยยังไม่สามารถประเมินที่กรุงเทพมหานครได้เนื่องจากมีข้อมูลถึงเพียงสิ้นปี 2551 แบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงให้เห็นว่าการลดระดับที่เชียงใหม่ได้หยุดลงในเดือนตุลาคม 2551 และเปลือกโลกลดระดับลงทั้งสิ้น 25.9 มม ผลจากแบบจำลองสอดคล้องกับคำอธิบายทางธรณีฟิสิกส์ที่ว่าบริเวณที่อยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นดินไหวมากกว่าจะได้รับผลกระทบที่น้อยและสั้นกว่า คำรังวัดจากจีพีเอสในช่วงเวลา 3-4 ปีข้างหน้าเป็นสิ่งจำเป็นในการปรับปรุงแบบจำลองเพื่อคำนวณหาเวลาที่การลดระดับจะยุติลงและขนาดการทรุดตัวทั้งหมดของเปลือกโลกในตำแหน่งอื่น ๆ ของประเทศไทยก่อนที่จะเริ่มยกตัวขึ้นใหม่ตามวงจรแผ่นดินไหว ข้อมูลการเคลื่อนตัวของเปลือกโลกที่ไม่เคยตระหนักมาก่อนเหล่านี้เมื่อผนวกกับการทรุดตัวของชั้นดิน/ทรายและการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเล จะทำให้การประเมินผลกระทบจากน้ำท่วมในบริเวณพื้นที่ราบลุ่มต่ำชายฝั่งทะเลอย่างเช่น กรุงเทพมหานครและจังหวัดใกล้เคียงมีความถูกต้องสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น

ABSTRACT

Since the $M_w 9.2$ Sumatra-Andaman mega-earthquake in December 2004, time series of highly accurate coordinates resulted from Precise Point Positioning (PPP) of continuous GPS (CGPS) data at stations in Chumphon, Bangkok and Chiangmai consistently indicates rapid plate downlifts. The vertical post-seismic motion is characterized by linear velocity, acceleration/deceleration, changes in acceleration/deceleration and seasonal cycles and is modeled by a combination of 3rd degree polynomial and sin/cosine functions in this research. At the end of June 2005, the constructed model estimates the vertical velocity at Chumphon, Bangkok and Chiangmai to be -27.3, -30.1 and -13.3 mm/yr respectively. Faster downward motion at Bangkok, despite being farther away from the earthquake's epicenter than Chumphon, is explained by sand layer subsidence at the CGPS station. At the end of June 2010, the estimated downward velocities at Chumphon slowed down to -10.6 mm/yr while at Chiangmai the trend was reversed to an uplift of +1.4 mm/yr. The rate at Bangkok cannot be determined because the data is only available until the end of 2008. The model shows that plate downlift at Chiangmai ceased in October 2008, amounting to a total height change of 25.9 mm. The result is consistent with geophysical explanation predicting that location further away from earthquake epicenter will have weaker and shorter post-seismic effect. GPS measurements in the next 3-4 years will be critical for improving and constraining the model to determine the end of the downlift and the plate subsidence magnitude in other locations before the commencement of the uplift that follows as a new era in seismic cycle. Together with subsidence of sediment layers and sea level rise, this previously-unaware information more-truly depicts the on-going physical changes and therefore is essential in more accurate assessments of flood impact in coastal low-lying areas, particularly Bangkok and its surrounding provinces.

คำสำคัญ: Post-seismic Motion, CGPS, Precise Point Positioning, Sumatra-Andaman Earthquake, Thailand.

1. ที่มาของการศึกษา

ภัยธรรมชาติที่คุกคามกรุงเทพมหานคร จังหวัดปริมณฑลตลอดจนพื้นที่ราบลุ่มชายฝั่งทางตอนเหนือของอ่าวไทยคือน้ำท่วมซึ่งเกิดขึ้นเป็นประจำช่วงปลายปีตั้งแต่ประมาณเดือนกันยายนถึงเดือนธันวาคม ช่วงเวลาดังกล่าวเป็นช่วงเวลาปลายฤดูฝนที่น้ำเหนือไหลบ่าและน้ำทะเลในอ่าวไทยมีระดับสูงสุดในรอบปี สภาพแผ่นดินทรุดอันเป็นผลจากปัจจัยหลายประการ เช่น การสูบน้ำบาดาลมาใช้ น้ำหนักของอาคารสิ่งปลูกสร้างที่กดทับลงบนชั้นทรายที่รองรับฐานราก เป็นต้น ทำให้ปัญหาน้ำท่วมทวีความรุนแรงขึ้น การลดระดับอันเนื่องมาจากแผ่นดินทรุดไม่เพียงแต่ทำให้โครงสร้างระบบป้องกันน้ำท่วมและระบบระบายน้ำ เช่น ท่อระบายน้ำ คันป้องกันน้ำท่วมด้อยประสิทธิภาพลง แต่อัตราการเกิดแผ่นดินทรุดที่แตกต่างกันไปในแต่ละพื้นที่ยังทำให้สภาพภูมิประเทศเปลี่ยนไป เกิดภาวะเป็นแอ่งหรือเนินที่ผิดไปจากสภาพเดิมในอดีตส่งผลให้การระบายน้ำผิวดินมีความซับซ้อนและยากลำบากมากขึ้นเรื่อย ๆ

*

การทรุดตัวของแผ่นดินเป็นสิ่งที่ปรากฏให้เห็นได้ชัดโดยทั่วไปและเป็นที่ทราบกันเป็นอย่างดีหน่วยงานที่เกี่ยวข้องได้มีการติดตามการทรุดตัวด้วยเทคนิคงานระดับชั้นที่ 1 เป็นเวลายาวนานกว่า 30 ปีตั้งแต่ปี 1978 (พ.ศ.2521) ทำให้มีข้อมูลต่อเนื่องที่สามารถใช้ประเมินวิเคราะห์อัตราการทรุดตัวบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลได้ดีพอสมควร อย่างไรก็ตาม ค่าระดับอ้างอิงที่ใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแผ่นเปลือกโลก (Tectonic Plate) ที่เป็นชั้นหินที่รองรับชั้นตะกอนดิน/ทรายที่ทับถมอยู่ข้างบนมีเสถียรภาพและไม่มีการเคลื่อนตัวทางดิ่ง อย่างไรก็ตาม ในระยะเวลาประมาณ 4-5 ปีที่ผ่านมา ข้อมูลจากงานรังวัดยี่ห้อเจดิกซึ่งเป็นข้อมูลที่มีความเที่ยงตรงสูงจากหลายแหล่งบ่งชี้อย่างสอดคล้องกันว่า สมมติฐานดังกล่าวไม่สอดคล้องกับความจริง แผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยและภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้มีพลวัตมีรูปแบบและทิศทางเปลี่ยนไปจากเดิมหลังจากเหตุการณ์แผ่นดินไหวครั้งใหญ่เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2004 (พ.ศ.2547) ขนาด $M_w 9.2$ ในร่องลึกบาดาลใกล้เกาะสุมาตรา แผ่นดินไหวใหญ่นี้ซึ่งทำให้เกิดคลื่นสึนามิที่สร้างความเสียหายให้กับประเทศต่าง ๆ รอบมหาสมุทรอินเดียรวมทั้งประเทศไทย ปัจจุบันเป็นที่รู้จักกันในชื่อแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามัน ปี 2004 แผ่นดินไหวนี้ทำให้เกิดการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกซุนดาซึ่งการศึกษาอัตราเร็วและปริมาณการลดระดับเป็นสิ่งที่จะนำเสนอในส่วนถัดไปของบทความนี้

2. บทความปริทัศน์และทฤษฎีพื้นฐาน

ประเทศไทยและส่วนใหญ่ของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้อยู่บนแผ่นเปลือกโลกย่อยที่ปัจจุบันเรียกกันว่าซุนดา (Sunda Plate) ซึ่งมีการเคลื่อนตัวทางราบและการหมุนที่เป็นอิสระจากแผ่นเปลือกโลกยูเรเชีย (Simons et al, 2007) บริเวณขอบแผ่นเปลือกโลกซุนดากับแผ่นเปลือกโลกอินเดีย-ออสเตรเลีย เป็นหนึ่งในร่องลึกบาดาล (Trench) ขนาดใหญ่ของโลก ที่เกิดจากแผ่นเปลือกโลกอินเดีย-ออสเตรเลียมุดและดันเข้ามาหาแผ่นเปลือกโลกซุนดา ทำให้บริเวณภูมิภาคตะวันออกเฉียงใต้ยกตัวขึ้นอย่างช้า ๆ หลักฐานการยกตัวของแผ่นเปลือกโลกซุนดาปรากฏให้เห็นชัดเจนในรูปเกาะปะการังขนาดเล็ก (Coral Microatolls) จำนวนมากตามแนวชายฝั่งตะวันตกของเกาะสุมาตราที่เกิดจากปะการังที่ตายเนื่องจากถูกยกตัวขึ้นเหนือระดับน้ำทะเล (Sieh et al, 1999) นอกจากนี้ ข้อมูลจากงานรังวัดด้วยสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสความเที่ยงตรงสูงในบริเวณจังหวัดชุมพรและชลบุรี ในช่วงก่อนเกิดแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2004 ก็แสดงให้เห็นการยกตัวด้วยความเร็ว 2.2 และ 3.8 มม/ปี ตามลำดับ (Trisirisatayawong et al, 2010)

ตามทฤษฎี Elastic-rebound ณ ขณะเหตุการณ์แผ่นดินไหว (Co-seismic) ที่เกิดในร่องลึกบาดาลแผ่นเปลือกโลกที่ถูกดันจากอีกแผ่นหนึ่งจะบิดตัวกลับไปหาบริเวณศูนย์กลางแผ่นดินไหว การบิดตัวกลับของแผ่นเปลือกโลก ณ ขณะเกิดแผ่นดินไหวปรากฏเป็นการเคลื่อนตัวทางราบที่สามารถตรวจวัดได้หากทราบค่าพิคัดของตำแหน่งต่าง ๆ ก่อนและหลังการเกิดแผ่นดินไหว งานวิจัยของ Vigny et al

* ผู้ติดต่อหลัก (Corresponding Author)

(2005) แสดงให้เห็นการเคลื่อนตัวของทางราบ ณ ขณะเหตุการณ์แผ่นดินไหวในบริเวณประเทศมาเลเซีย ไทย และอินโดนีเซียอย่างชัดเจน สำหรับทางตั้ง ทิศทางการเคลื่อนตัวจะเปลี่ยนจากการยกตัวก่อนแผ่นดินไหวมาเป็นการลดระดับลงหลังจากแผ่นดินไหว งานศึกษาการเคลื่อนตัวของแผ่นดินหลังแผ่นดินไหวในบริเวณร่องลึกบาดาลอื่น ๆ เช่น ร่องลึกบาดาล Nankai ทางตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศญี่ปุ่น แสดงให้เห็นการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนตัวของทางตั้งนี้เช่นกัน (Savage and Thatcher, 1992; Tabei et al, 2005) การลดระดับนี้จะไปอย่างรวดเร็วและไม่คงที่ในช่วงแรก ๆ ก่อนที่จะค่อย ๆ ซาลงและหยุดลงเข้าสู่ช่วงเวลาระหว่างแผ่นดินไหว (Inter-seismic Period) ซึ่งแผ่นเปลือกโลกที่ถูกดัน (ในกรณีภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้คือแผ่นเปลือกโลกซุนดา) จะเปลี่ยนเป็นการยกตัวขึ้นอย่างช้า ๆ และค่อนข้างคงที่อีกครั้งหนึ่งก่อนที่จะเกิดแผ่นดินไหวในที่สุด และเป็นการครบรอบของวงจรแผ่นดินไหว (Seismic Cycle)

3. วิธีการศึกษา

การศึกษาการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยอาศัยข้อมูลอนุกรมเวลาของค่าพิกัดทางตั้งที่รังวัดและคำนวณโดยวิธีจุดเดียวความเที่ยงตรงสูง (Precise Point Positioning, PPP) ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่องหลายแห่งที่กระจายอยู่ในบริเวณต่าง ๆ ของประเทศ รายละเอียดของวิธีการประมวลผลแบบจุดเดียวความเที่ยงตรงสูงซึ่งให้ความถูกต้องเชิงตำแหน่ง (ในรูปของ Daily Repeatability) ทางราบในระดับ 2-3 มม และทางตั้งในระดับ 10 มม แสดงไว้ใน Zumberg et al (1997) อย่างไรก็ตาม ข้อมูลจากหลายสถานี เช่น สัตหีบ เกาะมัตโพน (จ.ชุมพร) ไม่สามารถนำมาใช้ในการศึกษาได้เนื่องจากอนุกรมเวลายาวเพียง 1 – 2 ปีซึ่งสั้นเกินกว่าที่จะนำมาประเมินให้ได้ค่าการเคลื่อนตัวของทางตั้งที่มีความน่าเชื่อถือ สถานีจีพีเอสต่อเนื่องที่มีอนุกรมเวลายาวตั้งแต่ 3 ปีขึ้นไปนำมาใช้ในโครงการนี้ประกอบด้วย สถานี PTC1 (ภูเก็ต), CPN1 (ชุมพร), KMI1 (กรุงเทพมหานคร) และ CMU1 (เชียงใหม่)

ที่แต่ละสถานี ค่าพิกัดทางตั้งอ้างอิงกับผิวทรงรีที่คำนวณได้ ณ แต่ละขณะเวลานำมาเฉลี่ยราย 24 ชั่วโมงเพื่อหาค่าพิกัดรายวัน (Daily Solution) เพื่อขจัดความแปรปรวนที่เกิดจากปรากฏการณ์ที่เป็นคาบรายวันออกไป จากนั้นค่าพิกัดรายวันจะนำมาเฉลี่ยราย 7 วันเพื่อหาค่าเฉลี่ยรายสัปดาห์ (Weekly Solution) ซึ่งจะเป็นค่าที่นิยมใช้กันในงานทางด้านธรณีฟิสิกส์สำหรับการวิเคราะห์เพื่อหาแนวโน้มการเคลื่อนตัวต่อไป

อนุกรมเวลาของค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่องทุกสถานีในรูปที่ 1 แสดงให้เห็นแนวโน้มการลดระดับลงของแผ่นดินควบคู่ไปกับกระเพื่อมขึ้นลงของแผ่นดินและปรากฏให้เห็นเป็นวงจรรายปี (Annual Cycle) อย่างชัดเจน วงจรรายปีนี้ยังไม่แน่ชัดว่าเกิดจากสาเหตุอะไรและมีความเป็นไปได้หลายประการ เช่น จากการแปรเปลี่ยนตามฤดูกาลของสภาพอากาศซึ่งหนักในฤดูหนาวและกดทับแผ่นดินมากกว่าอากาศที่เบากว่าในฤดูร้อนและฝน นอกจากวงจรรายปีแล้วการวิเคราะห์แบบฟูเรียร์ยังแสดงให้เห็นวงจรทางธรรมชาติที่มีคาบต่าง ๆ กันอีกหลายคาบ อย่างไรก็ตามพบว่า เฉพาะ

คาบรายครึ่งปีเท่านั้นที่มีขนาดใหญ่พอสมควรที่จะนำมาพิจารณาด้วย ผลรวมของแนวโน้มการลดระดับ (ที่ไม่คงที่และแปรเปลี่ยนตามเวลา) ผนวกกับวงจรรายปี/ครึ่งปี ถูกจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยฟังก์ชันลูกผสมระหว่างโพลีโนเมียลกำลังสามและฟังก์ชันไซน์/โคไซน์ดังแสดงตามสมการที่ (1) ต่อไปนี้

$$h_t = at + bt + ct^2 + dt^3 + A_1 \cos\left(2\pi \frac{t}{52}\right) + A_2 \sin\left(2\pi \frac{t}{52}\right) + A_3 \cos\left(4\pi \frac{t}{52}\right) + A_4 \sin\left(4\pi \frac{t}{52}\right) \quad (1)$$

โดยที่ t คือ หมายเลขสัปดาห์ เริ่มต้น 1 ในสัปดาห์แรกของเดือนมกราคม 2005
 h_t คือ ค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์
 a, b, c, d คือ สัมประสิทธิ์ของฟังก์ชันโพลีโนเมียลกำลังสาม
 A_1, A_2, A_3, A_4 คือ แอมพลิจูดของคาบรายปีและรายครึ่งปีของปรากฏการณ์ธรรมชาติ

พารามิเตอร์ทั้ง 8 ตัวของสมการที่ 1 $[a, b, c, d, A_1, A_2, A_3, A_4]$ คำนวณโดยวิธีการ Robust Fit (Holland and Welsh, 1997) ซึ่งในแต่ละรอบของการวนซ้ำเพื่อหาคำตอบ จะทำการปรับน้ำหนักหรืออิทธิพลที่เหมาะสมของค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์แต่ละค่าที่มีต่อค่าพารามิเตอร์จากปริมาณเศษคงเหลือ (Residual) ของค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์

เมื่อการคำนวณซ้ำลู่เข้าหาคำตอบของค่าพารามิเตอร์ทั้ง 8 ตัวแล้ว การหาอัตราเร็ว/เร่งของการลดระดับทำได้โดยการพิจารณาเฉพาะฟังก์ชันโพลีโนเมียล H_t ซึ่งแสดงเฉพาะแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงระดับของเปลือกโลกโดยไม่มีผลจากวงจรรายปี/ครึ่งปีซึ่งจะไม่นำเข้ามาเกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ภายใต้สมมติฐานว่าแอมพลิจูดของวงจรรายปี/ครึ่งปีของปรากฏการณ์ธรรมชาติยังเหมือนเดิมทั้งก่อนและหลังการเกิดแผ่นดินไหว

$$H_t = at + bt + ct^2 + dt^3 \quad (2)$$

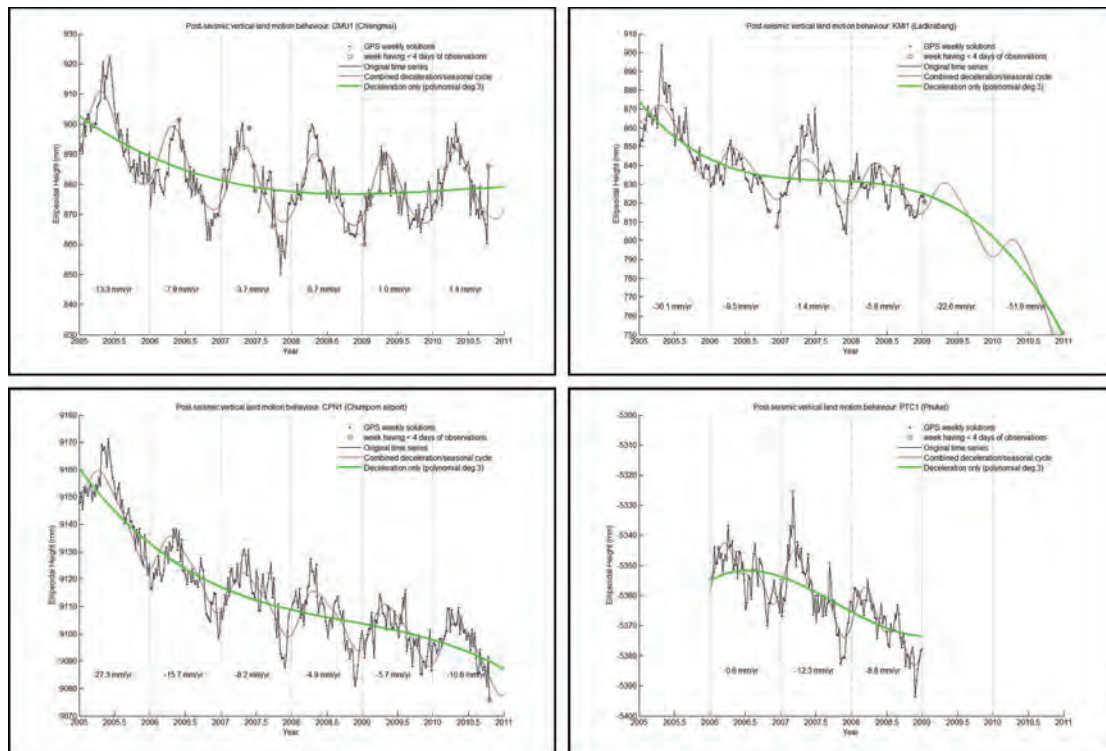
อัตราเร็วของการเคลื่อนตัวทางดิ่งของแต่ละสัปดาห์ทำได้โดยการมาหาอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน H_t ตามสมการที่ (2) สำหรับความเร่งและการเปลี่ยนแปลงความเร่งทำได้โดยการหาอนุพันธ์ลำดับที่สองและสามของฟังก์ชัน H_t ตามลำดับ

4. ผลการศึกษา

จากค่าอนุพันธ์ลำดับที่หนึ่งของฟังก์ชัน H_t ทำให้สามารถประเมินหาอัตราการลดระดับของแผ่นเปลือกโลก ณ แต่ละสัปดาห์ได้ ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นกราฟของค่าเฉลี่ยความสูงรายสัปดาห์พร้อมกับส่วนโค้งของฟังก์ชัน h_t และ H_t ตามสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ ส่วนโค้งของฟังก์ชัน H_t แสดงให้เห็นว่าบริเวณจังหวัดเชียงใหม่การลดระดับของเปลือกโลกได้หยุดลงแล้ว และเข้าสู่ช่วงใหม่

ของวงจรแผ่นดินไหวที่เรียกว่าช่วงระหว่างแผ่นดินไหว (Interseismic Period) สำหรับบริเวณอื่น ๆ การลดระดับยังไม่ยุติลง ในบริเวณกรุงเทพมหานคร แบบจำลองแสดงให้เห็นว่า ณ กลางปี 2008 (พ.ศ.2551) ยังมีการเคลื่อนตัวลงด้วยอัตรา 5.8 มม/ปี เนื่องจากในระหว่างการศึกษาที่คณะผู้ศึกษา ยังไม่ได้รับข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสของปี 2009 (พ.ศ.2552) และ 2010 (พ.ศ.2553) ของสถานี KMI1 จึงทำการประมาณนอกช่วงขณะกลางปีทั้งสองได้อัตราการลดระดับเป็น 22.6 มม/ปี และ 55.9 มม/ปี ตามลำดับ อย่างไรก็ตามค่าทั้งสองน่าจะสูงเกินจริงด้วยเหตุผลสองประการ ประการแรก แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์เพียงอย่างเดียวโดยไม่คิดถึงโครงสร้างทางธรณีวิทยาของร่องลึกบาดาลและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นในชั้นหินและ Mantle ของเปลือกโลกหลังแผ่นดินไหวไม่เหมาะที่จะนำมาใช้ในการประมาณนอกช่วง (Extrapolation) นอกจากนี้ในบริเวณกรุงเทพมหานคร เนื่องจากฐานรากของอาคารที่ติดตั้งสถานีจีพีเอสต่อเนื่องอยู่บนชั้นทราย ไม่ได้อยู่บนชั้นหินดังเช่นสถานีอื่น ๆ อัตราการลดระดับที่คำนวณได้ของสถานี KMIT1 จึงถูกขยายให้มากเกินไปจริงด้วยอัตราการทรุดตัวของชั้นดิน/ทรายที่เกิดขึ้นทั่วไปในกรุงเทพมหานคร

สำหรับบริเวณภาคใต้ซึ่งอยู่ใกล้ศูนย์กลางแผ่นดินไหวมากกว่า การลดระดับตั้งแต่เกิดแผ่นดินไหวเป็นต้นมายังเป็นไปอย่างต่อเนื่อง บริเวณสถานี CPN1 ในจังหวัดชุมพรแสดงให้เห็นว่าในขณะที่อัตราการลดระดับมากที่สุดในปี 2005 และค่อย ๆ ช้าลงในปี 2006 – 2008 แต่การลดระดับกลับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในระยะหลัง บริเวณสถานี PTC1 ในจังหวัดภูเก็ตอัตราการเพิ่มระดับเล็กน้อยขนาด 0.6 มม/ปี ณ กลางปี 2006 ไม่น่าจะเป็นตัวเลขที่สะท้อนความเป็นจริง แต่น่าจะเกิดจากการที่ไม่มีข้อมูลในปี 2005 ซึ่งเป็นปีแรกหลังแผ่นดินไหวและเป็นช่วงเวลาที่การลดระดับเป็นอย่างรวดเร็วดังเช่นที่ปรากฏให้เห็นในสถานีอื่น ๆ ทุกสถานี



ภาพที่ 1 จากซ้ายบนตามเข็มนาฬิกา อนุกรมเวลาของค่าความสูงเฉลี่ยรายสัปดาห์ และเส้นโค้งแสดงฟังก์ชัน h_t และ H_t ของสถานีจีพีเอสต่อเนื่องในจังหวัดเชียงใหม่ กรุงเทพมหานคร ภูเก็ต และชุมพร ตามลำดับ ตัวเลขแสดงอัตราเร็วของการเปลี่ยนแปลงระดับด้านล่างของแต่ละสถานีเป็นค่าที่คำนวณ ณ สิ้นสุดเดือนมิถุนายนของแต่ละปี

ในส่วนของการลดระดับสุทธิของเปลือกโลกนับตั้งแต่เหตุแผ่นดินไหวสามารถประเมินได้โดยการหาความสูง ณ แต่ละช่วงเวลาโดยตรงจากฟังก์ชัน H_t แล้วทำการหาผลต่างความสูงแต่ละช่วงเวลากับเวลาอ้างอิง ซึ่งในงานศึกษานี้กำหนดเป็นวันที่ 1 มกราคม 2005 ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ขนาดการลดระดับสะสมนับตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2005 ของแผ่นเปลือกโลก ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในประเทศไทยในช่วงปี 2005 – 2010 ประเมิน ณ สิ้นเดือนมิถุนายนของทุกปี สำหรับสถานี PTC1 (ภูเก็ต) ไม่แสดง ณ ที่นี้เนื่องจากไม่มีข้อมูลในช่วงแรกหลังเกิดแผ่นดินไหวและช่วงตั้งแต่ปี 2009 เป็นต้นมา *ปี 2009 และ 2010 เป็นการประมาณนอกช่วง

สถานี	การลดระดับสุทธิ (มม) ของแผ่นเปลือกโลกนับจากวันที่ 1 มกราคม 2005					
	2005.5	2006.5	2007.5	2008.5	2009.5	2010.5
CPN1 (ชุมพร)	15.5	36.6	48.2	54.5	59.4	67.2
KMI1 (กทม.)	18.6	37.4	41.8	44.3	57.4*	93.7*
CMU1 (เชียงใหม่)	7.5	18.0	23.7	58.8	25.6	24.2

5. สรุปผลการศึกษา

งานศึกษาชิ้นนี้แสดงให้เห็นว่าการเคลื่อนตัวหลังแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2004 ทำให้แผ่นเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยและประเทศใกล้เคียงกำลังลดระดับลงด้วยอัตราที่ค่อนข้างเร็วและมั่นคงที่ แม้ว่าการลดระดับนี้เป็นสิ่งที่เป็นไปได้ตามธรรมชาติและถูกคาดการณ์อยู่แล้วตามวงจรแผ่นดินไหวที่เกิดในร่องลึกบาดาล แต่การลดระดับที่เกิดขึ้นมีอัตราที่ค่อนข้างเร็วจะไปขยายผลของการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำทะเลเฉลี่ยในอ่าวไทยและการทรุดตัวของแผ่นดิน (ที่เกิดจากสาเหตุอื่น เช่น การสูบน้ำบาดาลมาใช้) ที่เกิดขึ้นในบริเวณกรุงเทพมหานครและปริมณฑลให้ทวีความรุนแรงขึ้นก่อให้เกิดผลกระทบทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมหลายประการตามมาในบริเวณพื้นที่ชายฝั่ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณที่เป็นเมืองใหญ่ปากแม่น้ำอย่างเช่นกรุงเทพมหานคร ซึ่งมีค่าระดับผิวดินใกล้เคียงกับระดับน้ำทะเลเฉลี่ยเพียงประมาณ 1 เมตรเหนือระดับน้ำทะเลปานกลาง

สำหรับการวางแผนเพื่อป้องกันและบรรเทาปัญหาที่จะเกิดตามมา มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องคาดการณ์ให้ได้ว่า 1) การลดระดับของเปลือกโลกในบริเวณประเทศไทยจะสิ้นสุดเมื่อไรก่อนที่จะเริ่มยกตัวขึ้นใหม่ตามวงจรแผ่นดินไหว และ 2) ขนาดของการลดระดับทั้งหมดเป็นเท่าไร ประเด็นหลังนี้มีความสำคัญต่อการประเมินผลกระทบทางกายภาพและสิ่งแวดล้อมของพื้นที่ราบลุ่มต่ำชายฝั่งทะเลทั้งหมดของภูมิภาคนี้ เนื่องจากคาบอุบัติซ้ำ (Recurrence Period) ที่ยาวนานมากของแผ่นดินไหวสุมาตรา-อันดามันปี 2004 ซึ่งงานวิจัยในระยะหลังบ่งชี้ว่าอยู่ที่ประมาณ 550-700 ปี (Jankaew et al, 2008; Monecke et al, 2008) ทำให้มีความเป็นไปได้ว่าช่วงการลดระดับหลังแผ่นดินไหวอาจกินเวลาหลายทศวรรษจนกระทั่งทำให้ค่าระดับผิวดินของพื้นที่ชายฝั่งลงไปอยู่ที่ระดับใกล้เคียงหรือแม้แต่ต่ำกว่าระดับน้ำทะเลปานกลาง

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าผลการศึกษาชิ้นนี้จะแสดงให้เห็นความเร็วและการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกชุดา ณ บริเวณต่างของประเทศไทยในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้เป็นอย่างดี แต่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นในงานวิจัยนี้ยังไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการประมาณนอกช่วง (Extrapolation) เพื่อคาดการณ์เหตุการณ์ลดระดับของเปลือกโลกในอนาคตระยะยาว เนื่องจากแบบจำลองนี้ยังไม่ได้มีการนำเอาลักษณะโครงสร้างทางธรณีวิทยาของแนวร่องลึกบาดาล แนวรอยเลื่อนขนาดใหญ่ต่าง ๆ ในบริเวณภูมิภาคนี้ ตลอดจนการปรับตัวของชั้นหินภายหลังแผ่นดินไหวมาร่วมในการสร้างและบังคับแบบจำลอง ประเด็นวิจัยที่สำคัญยิ่งในระยะการศึกษาต่อไปคือการปรับปรุงแบบจำลองนี้หรือสร้างแบบจำลองทางธรณีฟิสิกส์ที่มีความบูรณยิ่งขึ้นเพื่อให้สามารถการคาดการณ์เหตุการณ์ลดระดับในอนาคตได้ดีขึ้นและสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวางแผนป้องกันและบรรเทาปัญหาต่าง ๆ ที่จะเกิดขึ้นจากการลดระดับของแผ่นเปลือกโลกชุดาที่กำลังเกิดขึ้นและจะยังคงต่อเนื่องไปอีกยาวนานในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

บทความนี้แสดงผลการศึกษาขั้นต้นของโครงการวิจัย “การติดตามการเคลื่อนตัวทางดิ่งของเปลือกโลก หลังแผ่นดินไหวสุมาตราอันดามันในบริเวณที่ราบลุ่มปากแม่น้ำเจ้าพระยา-ท่าจีน” ซึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายสวัสดิการสาธารณะ ข้อมูลสัญญาณดาวเทียมจีพีเอสจากสถานีจีพีเอสต่อเนื่องทั้ง 4 สถานีได้รับความอนุเคราะห์จาก NICT ประเทศญี่ปุ่น ซอฟต์แวร์ประมวลผลจุดเดียวความเที่ยงตรงสูงที่ใช้ในโครงการนี้พัฒนาโดย JPL, NASA ผู้เขียนบทความขอขอบคุณทุกหน่วยงานที่กล่าวมาสำหรับการสนับสนุนในด้านต่าง ๆ ผลลัพธ์ของการศึกษาและความคิดเห็นทั้งหลายทั้งปวงที่ปรากฏในบทความนี้เป็นของผู้เขียนเท่านั้น โดยหน่วยงานทั้งหมดที่กล่าวถึงไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

บรรณานุกรม

- Holland, P.W., Welsch, R.E., 1977. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics – Theory and Methods* 6 (9), 813-827.
- Jankaew, K., Atwater, B.F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat T., Martin, M.E., Prendergast A., 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature* 455, 1228-1231. doi:10.1038/nature07373.
- Monecke K., Finger W., Klarer D., Kongko W., McAdoo, B., Moore, A.L., Sudrajat, S.U., 2008. A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature* 455 (30). doi:10.1038/nature07374.
- Savage, J.C., Thatcher, W., 1992. Interseismic deformation at the Nankai trough, Japan, subduction zone. *Journal of Geophysical Research*, 97 (B7), 11,117-11,135.
- Simons, W.J.F., Socquet, A., Vigny, A., Ambrosius, B.A.C., Abu, S.H., Promthong, C., Subarya, C., Sarsito, D.A., Matheussen, S., Morgan, P., Spakman, W., 2007. A decade of GPS in Southeast Asia: resolving Sundaland motion and boundaries. *Journal of Geophysical Research* 112 (B06420) doi:10.1029/2005JB003868.
- Sieh, K., Ward, S.N., Natawidjaja, D., Suwargadi, B.W., 1999. Crustal deformation at the Sumatran subduction zone revealed by coral rings. *Geophysical Research Letters*. 26 (2), 3141-3144.

Tabei, T., Adachi, M., Miyazaki, S., Watanabe, T., Kato, S., 2007. Interseismic deformation of the Nankai subduction zone, southwest Japan, inferred from three-dimensional crustal velocity fields. Earth Planet Space 59, 1073-1082.

Trisirisatayawong, I., Naeije M., Simons, W.J.F., and Fenoglio-Marc, L., 2011. Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multisatellite altimetry, Global and Planetary Change, doi:[10.1016/j.gloplacha.2010.12.010](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.12.010)

Vigny, C., Simons, W.J.F., Abu, S., Bamphenyu, R., Satirapod, C., Choosakul, N., Subarya, C., Socquet, A., Omar, K., Abidin, H.Z., Ambrosius, B.A.C., 2005. Insight into the 2004 Sumatra-Andaman earthquake from GPS Measurements in Southeast Asia. Nature, 436 (14). doi:10.1038/nature03937.

Zumberge, J., Heflin, M. B., Jefferson, D. C., Watkins, M., and Webb, F.H. _1997_. "Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks." Journal of Geophysical Research, 102_B3_, 5005–5017

Assessment of Flooded Area from Sea Level Rise in the Upper Coastal Area of Gulf of Thailand

Itthi Trisirisatayawong¹ and Pannee Cheewinsiriwat²
¹Department of Survey Engineering, ²Department of Geography
Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand
E-mail: ¹ itthi.t@eng.chula.ac.th, ² pannee.ch@chula.ac.th

Abstract

This research simulates inundated locations from sea level rise over the coastal area east of Chao Phraya River. The model to predict flood extent and depth is developed in three stages. The first stage fuses the heights of flood barrier dykes and water gates with the surface height measured by LIDAR, resulting in present topography of the study area. The second part determines future topography by deducting present height with effect of land subsidence (rates from InSAR analysis of 2005-2010 Radarsat-1 vary with locations from -2 to -28 mm/yr, assumed constant over time) and that from Sundaland plate downthrow that has been occurring since the M_w 9.2 Sumatra-Andaman earthquake in December 2004 (constant rate over the area, varies with time from -1.9 mm/yr in 2010 and progressively slow down to -0.2 mm/yr in 2060 under 500-yr recurrence period assumption). The third part models sea level in the upper Gulf of Thailand with annual and half-annual cycle from 62-yr time series data of Ko Sichang tidal station and forecast future sea level by including rising rate (+5 mm/yr over this upper coast). Our model shows that in the next 50 years nearly entire Samutprakarn coast is flooded by more than 0.5 m during the high-sea season. Simulation result also demonstrates most of these areas can be protected by raising the dykes by 0.75 m, indicating that a simple protection alternative is raising current flood barriers coupled with proper measures to control land subsidence which is the largest factor causing sea flood.

Keywords: sea level rise, land subsidence, Sundaland plate downthrow, upper Gulf of Thailand, Samutprakarn

1. Introduction

Bangkok and surrounding provinces (Samutprakarn, Nonthaburi, Pathumthani and Samutsakorn) are situated in the central flood plain of Thailand, at the northern end of the Gulf of Thailand. The natural surface height of this heavily-populated area is only around 1-2 m above mean sea level, making it vulnerable to the rise of sea level. Attempts have been made to determine the rising rate in the Gulf of Thailand from tidal data but results are conflicted (Vongvisessomjai, 2006) because plate vertical motion which is also registered into the tidal readings had not been determined and removed. In Trisirisatayawong et al (2011), precise GPS measurements are used to derive the plate uplift, resulting in long-term (1940-2004) absolute sea level rise around 4.5 mm/yr. Measurements from multi-satellite altimetry during 1993-2009 are also processed and yield comparable rates at around 5.0 mm/yr in the northern Gulf of Thailand.

While sea level rise poses a threat to Greater Bangkok, the situation is worsened by the fact that despite being so close to sea level, the area has been experiencing land subsidence, a phenomenon happening in many major cities around the world. Subsidence monitoring by differential leveling for the last 30 years and recently by InSAR has clearly revealed the magnitude and extent of the phenomena. Rates of up to 25mm per year have been determined for certain areas and total subsidence amount to 1.3 m or greater have been found in eastern Bangkok. As a result, surface heights in these areas are already below mean sea level. Subsidence occurring in Greater Bangkok is mainly driven by the overextraction of groundwater. Monitoring data reveals the phenomenon characteristics as fast varying in both time and space. Due to complexity of sediment layers and their great depths varying from a few hundred meters to nearly 2,000 m, it is not certain how much further subsidence can continue. Brand and Balasubramaniam (1976) predicts an ultimate subsidence of 4 m, mostly from the compression of hard clays or aquitard layers, if pressure in

aquifers drop by 60 m. However, studies in other parts of the world, for example San Joaquin valley California by USGS shows a total subsidence of more than 9m in 50 years (Poland, 1975). Land subsidence is therefore a great threat to the area.

The studies of land subsidence in Greater Bangkok area have been based on an implicit assumption that there is no vertical motion of the earth crust. High-precision height measurements resulted from the analysis of GPS signal by PPP (Precise Point Positioning) method proves that the assumption is not valid. Height time series since December 2004 when the Mw9.2 Sumatra-Andaman earthquake occurred clearly show rapid subsidence of the Sundaland plate in Thailand while analysis on 1994-2004 GPS time series data reveals uplift. The change in vertical motion from uplift during interseismic period to downthrow during postseismic or the period after the Sumatra-Andaman earthquake is consistent with pattern reported by studies in other subduction zones such as Nankai trough, Japan (Tabei et al, 2007). The movement pattern indicates that vertical motion of the plate in Thailand is driven by the accumulation/relaxation of stress happening according to seismic cycle in Sunda trench. The postseismic downward motion in Thailand that has been occurring since the earthquake is thus amplifying the effect of land subsidence by further reducing surface elevation.

Rapid industrialization and modernization of Greater Bangkok during the last few decades has transformed this once agricultural area to economic power house of the country. However, urbanization and industrialization mean that the once welcomed sedimentation and fertilization flood is now regarded as natural hazard. Business and daily lives are seriously affected by flood and as a result flood protection system including dikes, water gates, and pump stations have been built. Rising of sea level and the combined effect of land/plate subsidence will make it more difficult for the flood to reach the sea. In the coastal area of Greater Bangkok erosion is now clearly evident. In some places such as Khun Samut Jin in Samutprakarn the erosion is more than 1 kilometer for the last twenty years. While consensus still cannot be reached for what is the main cause of the erosion, land subsidence and sea level rise have often been raised as possible causes in conjunction with other man-made induced change such as clearance of mangrove forest and land use change. Further, the reduction of surface elevation also induces sea-flood to the coastal area.

It now becomes clear that a great physical threat of Greater Bangkok lies ahead. Protection and/or alleviation measures need to be further improved and developed. Before appropriate measures are devised, there is a need for a clearer picture of 'what' lies ahead. This research is an attempt to provide likely future scenarios of coastal sea flood in Samutprakarn, a province south-eastern of Bangkok. The scenarios are generated from a GIS-based model that is based on the rates and magnitudes of geophysical processes governing height change of the area. Details and results are provided in subsequent sections.

2. Development of GIS-based simulation model

Results of sea flood scenarios along Gulf of Thailand coast are reported in World Bank (2009) and MONRE (2009) and certain limitations of these studies are addressed here. First, the sea level rise used in MONRE (2009) is simply assumed to be 1, 2, and 4 m value with no specific time for each event while in World Bank (2009) the sea level rise rate is adopted from a chosen IPCC emission scenario. However, IPCC rate is global average value generated from circulation model which may differ significantly from local value. Numerous studies, e.g. Cazenave and Nerem (2004), Jevrejeva et al (2008) have shown that the rates of sea level change vary in different parts of the oceans and are even falling in certain places. Global rate employed in the mentioned studies is therefore not best suited for local study. Second, the DEM used is 90 m resolution SRTM. The original specification states absolute vertical error of SRTM DEM at 16 m while verification with satellite laser altimetry reported in Bhang et al (2007) reveals a much smaller error of 3-5 m depending on surface type if localized bias is removed. Nevertheless, this error range is still larger than the elevation range of Greater Bangkok topography and thus would cause large uncertainties of simulated flood results. Third, land subsidence rate is not taken into account in MONRE (2009) and only a value based on a level benchmark is employed in World Bank (2009). Fourth, no consideration is given to the effect of vertical plate motion. Lastly, both studies do not incorporate flood protection system that has already been in place. Low areas may not be flooded if situated inside a dike higher than predicted sea level

so neglecting dikes or flood protection mechanism from the analysis would generate a more pessimistic scenario.

Our study improves on modeling future scenario by incorporating time and spatial characteristics of the related local geophysical processes. For sea level rise, we adopt a rate of 5 mm/yr of the upper Gulf of Thailand based on study of Trisirisatayawong et al (2011) instead of global average value 2.4 mm/yr (A1T emission scenario) or 4.0 mm/yr (A1F1 emission scenario) as predicted by IPCC for the 21st century. For the time frame of this study (2010 - 2060) we assume constant rising rate with no acceleration.

In case of land subsidence rates, we adopt InSAR-derived values as reported by Aobpaet et al (2013). Over the study area, the InSAR-determined subsidence rates of 2005-2011 Radarsat-1 images are found to be in the range of -2 to -28 mm/yr. For each location, we assume the rates to be constant. In fact, subsidence shown by multi-decade level measurements tends to exhibit an exponential decay form, consistent with compression mechanics of clay material. However, there is no long-term benchmark in the study area of Samutprakarn where high-resolution DEM is available, making the interpolated rates unrealistic as subsidence varies rapidly from place to place.

Finally, to determine future plate vertical velocities we adopt a time-height curve of postseismic downward motion of Sundaland plate in Thailand that has been occurring since the Mw9.2 Sumatra-Andaman earthquake in December 2004. The time-varying curve is shown in Satirapod et al (2012). A detail of the finite-element visco-elastic physical model that is used to generate vertical motion curve is reported in Truebienko et al (2013). The time span during which the plate moves downward depends on the recurrence period of the earthquake. Two values of recurrence period for Sumatra-Andaman earthquake are used in the geophysical model, the 170 year reported by Natawidjaja (2006) and 500 years reported in Jankaew et al (2008) and Monecke et al (2008).

3. Processing Steps

We employ a 1-m resolution DEM generated from LIDAR survey over Samutprakarn province in 2009 in our analysis. The stated vertical accuracy is 0.3 m. Because Samutprakarn is an urban/industrial area, a lot of artifacts exist in the DEM. In order to reduce the processing time and to generate a more visually pleasant view of the topography without eliminating too much actual terrain variation, we downsample the original DEM to a 10-m resolution. With this downsampled DEM, the process to generate sea flooded map of the study area can be divided into three main stages described subsequently below.

In the first stage, we fuse the dike and water gate heights into the DEM, resulting as present topography being shown in figure 1a. In this study area, an eastern highway (Sukhumvit rd.) serves as flood protection dike and when passes over canals flowing to the sea, water gates are constructed to regulate water flow. Both the dikes and water gates foundations are on sand layer so consequently they also subside with the same rates as nearby areas.

The second step constructs future topography by deducting present height with effect of land subsidence (rates from InSAR analysis of 2005-2010 Radarsat-1 vary with locations from -2 to -28 mm/yr, assumed constant over time) and that from Sunda plate dowthrow that has been occurring since the M_w9.2 Sumatra-Andaman earthquake in December 2004 (constant rate over the area, varies with time from -1.9 mm/yr in 2010 and progressively slow down to -0.2 mm/y in 2060 under 500-yr recurrence period assumption).

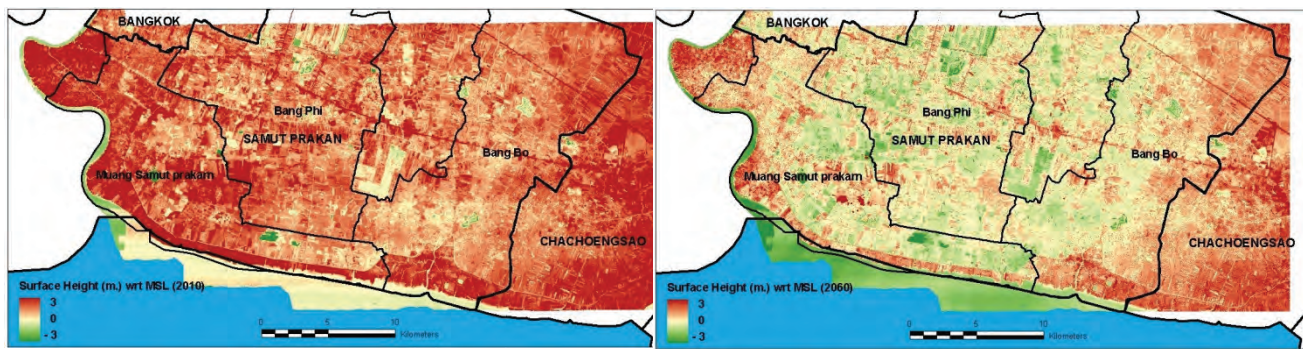


Fig.1 a) Left, image depicting current topography of Samutprakarn province south-east of Bangkok. b) Right, modeled surface elevation in January 2060 as a result of land subsidence and plate motion. It can be clearly seen that most areas are below sea level.

The third stage in the simulation process is the prediction of future sea level in the upper Gulf of Thailand. Tidal data shows that sea level of shorter time scale such as diurnal tide tend to have larger amplitude than long time-scale variations such as annual cycle, interannual variation and interdecadal trend. Therefore, the more realistic flood prediction needs to take into account both long-term trend and variations having as short period as possible. Unfortunately the high frequency data are not available to us. Consequently we opt for monthly average data from Ko Sichang tidal station which is the closest rock-base station to our study area. The 1940-2002 time series is shown in figure 2. Fourier analysis of the monthly observations reveals that most energy is contained in annual and half-annual cycle. We then model the sea level variations as a combination of half-annual cycle, annual cycle and a linear trend and solve for these parameters with iteratively-reweighted least square (IRLS) regression technique (Holland and Welsh, 1977). The linear trend is the sum of plate motion and actual long-trend occurring in the sea, as described in Trisirisatayawong et al (2011). The linear trend is decoupled. Assuming that these cycles remain the same, we then compute future sea level by adding 5 mm/yr to the modeled height of annual and semi-annual cycle.

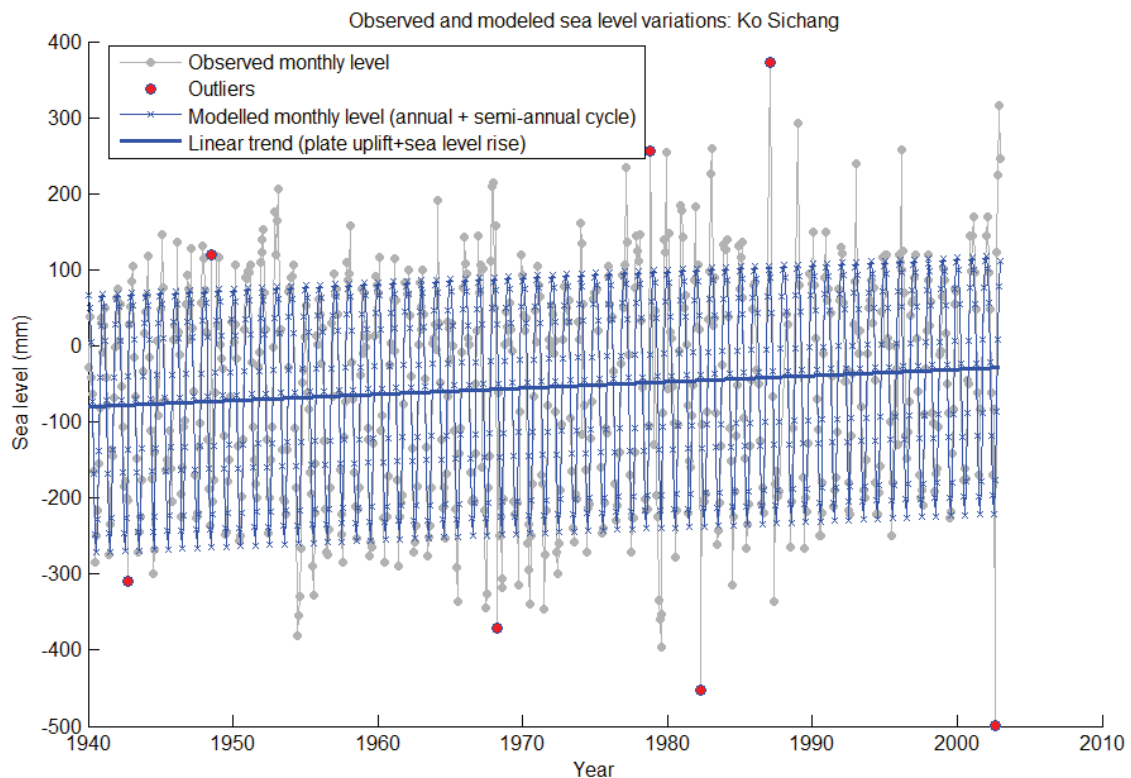


Fig.2 Observed and modeled sea level variations of Ko Sichang, Thailand. Ko Sichang is the closest tidal station having foundation on bed rock and thus is not affected by subsidence of sediment layers as other river mouth stations in the upper Gulf of Thailand.

Tidal observation at this station terminated in 2002.

4. Sea flood scenario in 2060

To produce flood scenarios, we compare future topography against sea level. DEM cells having elevation lower than sea level are potentially flooded. However, local topography such as low area surrounding by high ground and man-made structures play an important role in determining if an area would be flooded. We analyze flood scenario by beginning with coastal DEM cells or those adjacent to water bodies that flow into the Gulf. DEM cells lower than sea level is marked as flooded, with depth being assigned as the difference between sea level and the cell height. Neighbors of the flooded cell are then checked and the process continues until every DEM cell is marked. The model is coded in Python script with ArcGIS 10.

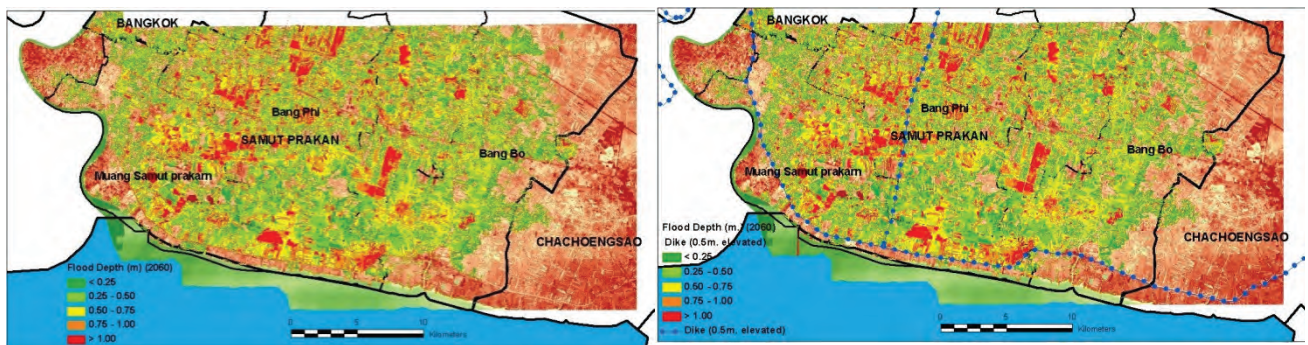


Fig.3 a) Left, color-shaded map showing flooded area according to flood depth in January 2060. b) Right, showing the case in which flood dike (shown in blue lines) is elevated by 0.5 m. Similarity of both figures demonstrating that raising the dike by 0.5 m cannot prevent sea water to cross the dike, resulting in in-land flooding.

The above stages can be repeated if flood scenarios at different time are required. Our simulation reveals that for the next 25 years the flooded areas remain limited. Further into the future flooded areas start to expand and by about 2065 most of Samutprakarn would be inundated (fig.3a) during the high-sea season that spans from November to February. As an alternative to the do-nothing scenario, we simulate flooding in January 2065 in case the dike is raised by 0.50 m from its current elevation and the result is shown in fig.3b. It can be clearly seen in comparison of fig.3a and fig.3b that the raising is not sufficient. Further elevation by another 0.25 m to 0.75 m shown in fig.4 demonstrates that most areas are effectively protected. The exemplified what-if scenarios demonstrate the value of the model as a decision-support system. Variations of rates of geophysical processes i.e. sea level rise, land subsidence and plate motion can be also made.



Fig.4 A sub-area enlarged here demonstrating that area behind dike (right of blue solid-dotted line) is effectively protected if the dike is elevated by 0.75 m.

5. Conclusion

As Greater Bangkok situates in a coastal low-lying plain, it is highly vulnerable to sea level rise. Anthropogenic land subsidence and the downward motion of the plate worsen the situation significantly. We have developed a GIS-based model that incorporates these flood-induced phenomena with high-resolution DEM into the analysis of future sea flooding. The generated scenarios reveal that for the next 25 years, the coastal province of Samutprakarn can be safeguarded by the protection system currently in place. However, by the year 2060 most of the province would be inundated in high-sea months if defensive mechanism is not enhanced. The model has demonstrated that a simple alternative such as raising the dike by 0.75 m can prevent most areas from flood.

Sea level rise is the response of the ocean to global warming. Even if atmospheric composition were fixed today, global-mean temperature and sea level rise would continue for centuries due to oceanic thermal inertia (Wigley, 2005). There is little we can do to stop sea level rise. Similarly, we do not have any control on plate motion. But it is known that at certain time after the great earthquake in the trench, the continental plate will start to uplift although in case of Sundaland when it would begin is still uncertain. However, the other non-climatic component of coastal flooding i.e. land subsidence is mostly man-made. Monitoring data has shown that in the area that groundwater pumping is prohibited, the subsidence quickly slow down and eventually stop. Subsidence is the largest contributor to flooding. Therefore, the success or failure to properly manage groundwater extraction will play an ultimate role in the magnitude/complexities and the cost of flood defensive structure that needs to be upgraded in the future.

Acknowledgments

The authors would like to thank IRIACC (International Research Initiative on Adaptation to Climate Change) for the financial support of CCAR (Coastal Cities At Risk) project, of which the development of the flood simulation model is a part. The rate of sea level rise and land subsidence are results of GEO2TECDI project, a collaborative research supported by the EU Delegation to Thailand through TEC (Thailand-EU Cooperation Facility) funding scheme. We thank TRF (Thailand Research Fund) for funding a research project that makes available the postseismic plate motion in Thailand. The provision of high-resolution LIDAR DEM used in this research by DMR (Department of Mineral Resources), Thailand is gratefully acknowledged here.

References

- Aobpaet, A., Cuenca, M. C., Hooper, A., & Trisirisatayawong, I., 2013. InSAR time-series analysis of land subsidence in Bangkok, Thailand. *International Journal of Remote Sensing*, 34(8), 2969-2982.
- Bhang, K. J., Schwartz, F. W., & Braun, A., 2007. Verification of the vertical error in C-band SRTM DEM using ICESat and Landsat-7, Otter Tail County, MN. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 45(1), 36-44.
- Brand, E.W., and Balasubramaniam A.S., 1976, Publication no. 121 of the International Association of Hydrological Sciences, Proceedings of the Anaheim Symposium, December 1976.
- Cazenave, A., Nerem, R.S., 2004. Present-day sea level change: observations and causes. *Reviews of Geophysics* 42, RG3001.
- Holland, P.W., Welsch, R.E., 1977. Robust regression using iteratively reweighted least-squares. *Communications in Statistics – Theory and Methods* 6 (9), 813-827.
- Jankaew, K., Atwater, B. F., Sawai, Y., Choowong, M., Charoentitirat, T., Martin, M. E., & Prendergast, A. 2008. Medieval forewarning of the 2004 Indian Ocean tsunami in Thailand. *Nature*, 455(7217), 1228-1231.
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., Grinsted, A., Woodworth, P.L., 2008. Recent global sea level acceleration started over 200 years ago? *Geophysical Research Letters* 35, L08715, doi:10.1029/2008GL033611.
- Monecke K., Finger W., Klarer D., Kongko W., McAdoo, B., Moore, A.L., Sudrajat, S.U., 2008. A 1,000-year sediment record of tsunami recurrence in northern Sumatra. *Nature* 455 (30). doi:10.1038/nature07374
- MONRE (Ministry of Natural Resource and Environment), 2009, Final report, Impact Study of Sea Level Rise on Thailand Coastal Land Use, (in Thai).
- Natawidjaja, D.H., Sieh, K., Chlieh, M., Galetzka, J., Suwargadi, B.W., Cheng, H., Edwards, R.L., Avouac, J. and Ward, S.N. 2006. Source parameters of the great Sumatran megathrust earthquakes of 1797 and 1833 inferred from coral microatolls. *Journal of Geophysical Research* 111: doi: 10.1029/2005JB004025. issn: 0148-0227.
- Phien-wej, N., Giao, P.H., Nutalaya, P., 2006. Land subsidence in Bangkok, Thailand., *Engineering Geology* 82, 187–201.
- Poland, J. F., Lofgren, B. E., Ireland, R. L., & Pugh, R. G. 1975. Land subsidence in the San Joaquin Valley, California, as of 1972.
- Satirapod, C., Trisirisatayawong, I., Fleitout, L., Garau, J., Simons, W., 2012. Vertical motions in Thailand after the 2004 Sumatra–Andaman Earthquake from GPS observations and its geophysical modelling. *Advances in Space Research* <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.030>.
- Tabei, T., Adachi, M., Miyazaki, S., Watanabe, T., Kato, S., 2007. Interseismic deformation of the Nankai subduction zone, southwest Japan, inferred from three-dimensional crustal velocity fields. *Earth Planet Space* 59, 1073–1082.
- Trisirisatayawong, I., Naeije, M., Simons, W.J.F., Fenoglio-Marc, L., 2011. Sea level change in the Gulf of Thailand from GPS-corrected tide gauge data and multisatellite altimetry. *Global Planet. Change* 76 (3–4), 137–151, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2010.12.010>.
- Truebienko, O., Fleitout, L., Garau, J-D., Vigny C., 2013. Interpretation of interseismic deformations and the seismic cycle associated with large subduction earthquakes. *Tectonophysics* 589, 126-14. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2012.12.027>
- Vongvisessomjai, S., 2006. Will sea-level really fall in the Gulf of Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology* 28 (2), 227–248.
- Wigley, T. M., 2005. The climate change commitment. *Science*, 307(5716), 1766-1769.

World Bank, 2009. Final Report of Climate Change Impact and Adaptation Study of Bangkok Metropolitan Region. <http://siteresources.worldbank.org/INTTHAILAND/Resources/333200-1177475763598/3714275-1234408023295/5826366-1248255995902/chapter2.pdf>, pp. 2–4.