

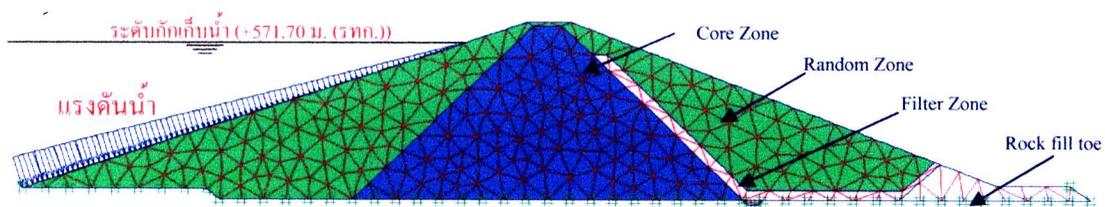
บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์เขื่อนแม่ทะลบลวง

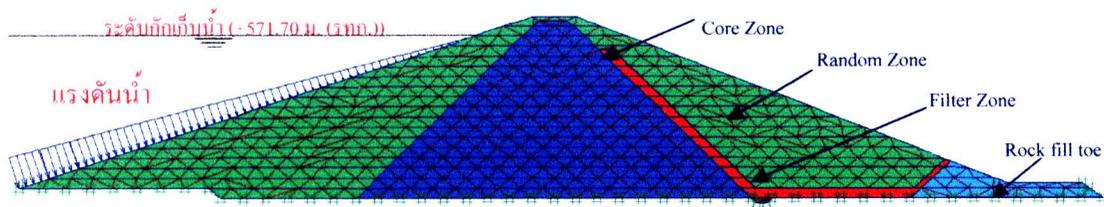
ผลที่ได้จากการวิเคราะห์เขื่อนแม่ทะลบลวงภายใต้แรงสถิตยศาสตร์ และแรงพลศาสตร์ ที่ศึกษาในส่วนนี้คือ ระยะเวลาเคลื่อนตัวของตัวเขื่อนทั้งแนวราบและแนวตั้ง ความเค้น และความเครียดของเขื่อน ความเร่งที่ระดับความสูงต่างๆ ของแกนกลางเขื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Gravity turn-on (ONE-LAYER) และ Incremental (MULTI-LAYER) ในขณะที่มีระดับกักเก็บน้ำสูงสุด (+571.70 ม. รทก.) รวมทั้งเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งสองแบบ และผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

4.1 กรณีภายใต้แรงสถิตยศาสตร์

รูป 4.1 แสดงแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเขื่อนแม่ทะลบลวงที่ใช้วิเคราะห์ทั้งแบบชนิด Gravity turn-on และชนิด Incremental จำนวนชิ้นส่วนแต่ละแบบจำลองมีค่าเท่ากับ 475 และ 903 ชิ้นส่วนตามลำดับ กำหนดให้ฐานรากเขื่อนมีสภาพยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนตัวในแนวราบและแนวตั้ง แรงที่ใช้วิเคราะห์ตัวเขื่อนเป็นแรงค้ำดินและแรงค้ำน้ำ



(ก) แบบจำลอง Gravity turn-on ของเขื่อนแม่ทะลบลวง

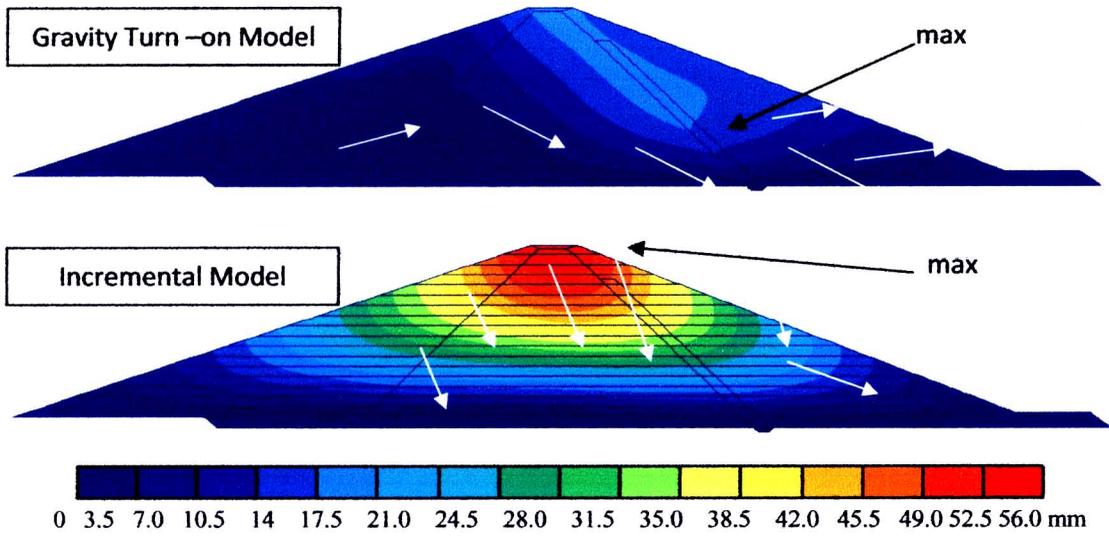


(ข) แบบจำลอง Incremental ของเขื่อนแม่ทะลบลหวง

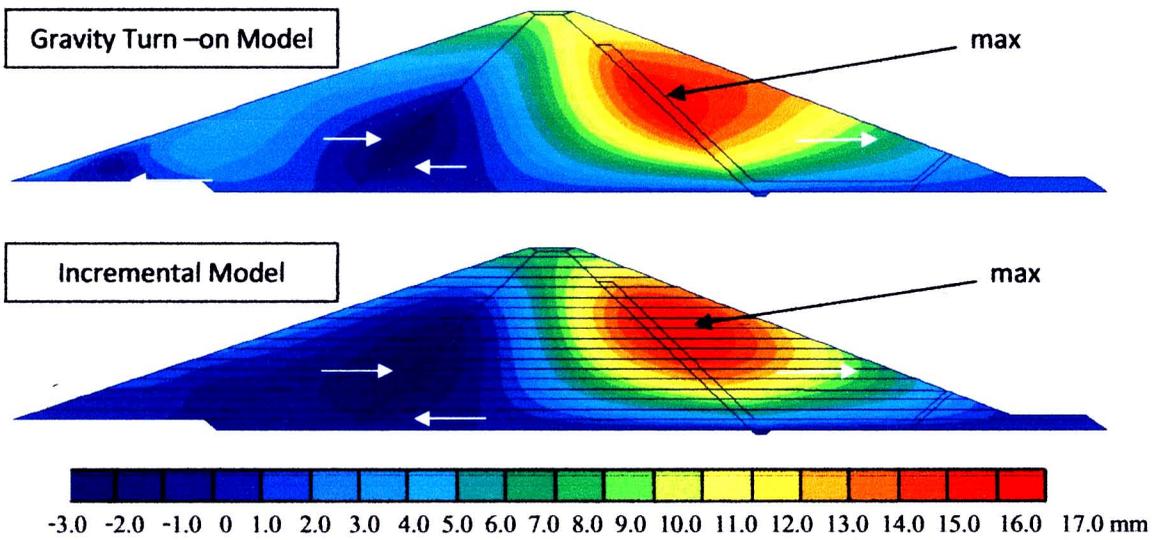
รูป 4.1 แบบจำลองเขื่อนแม่ทะลบลหวงที่ใช้วิเคราะห์ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์

4.1.1 ระยะเคลื่อนตัว

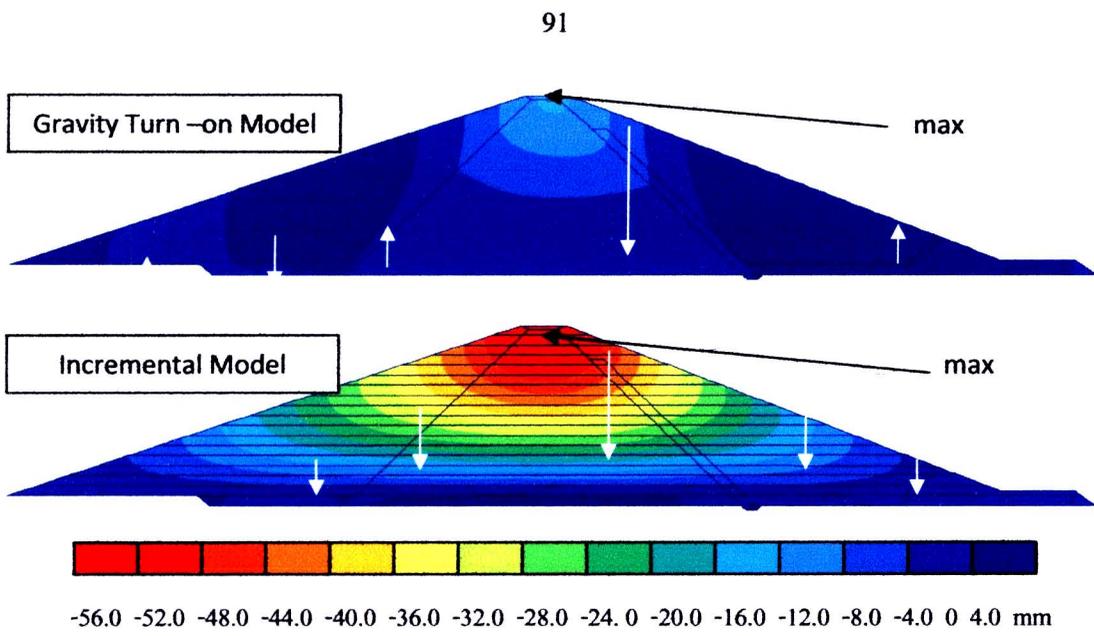
ผลของแรงกระทำที่เป็นแรงดันน้ำและแรงดันดิน ทำให้เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวในทิศทางต่างๆ ซึ่ง สามารถแบ่งเป็น การเคลื่อนตัวในทิศรวม ทิศแนวราบ และทิศแนวตั้ง ดังแสดงในรูป 4.2 โดยภาพรวมผลของแรงกระทำส่งผลให้เขื่อนเกิดการเคลื่อนตัวมากสุดในแนวตั้ง อย่างไรก็ตามแบบจำลองการวิเคราะห์แบบ Gravity turn-on จะแสดงการเคลื่อนที่ที่อยู่ในทิศท้ายเขื่อนด้วย ในขณะที่แบบจำลองชนิด Incremental จะเกิดการเคลื่อนตัวลงในแนวที่ค่อนข้างสมมาตรทั้งด้านหน้าและท้ายเขื่อน จากแบบจำลองทั้งสองพบว่าการทรุดตัวจะเกิดขึ้นมากบริเวณตำแหน่งสันเขื่อน สำหรับการเคลื่อนตัวในแนวราบแสดงดังรูป 4.3 นั้นจะพบว่าทั้งสองแบบจำลองให้ผลที่ใกล้เคียงกัน โดยที่ด้านหน้าเขื่อนจะเคลื่อนที่เข้าหาน้ำ ส่วนด้านท้ายเขื่อนจะเคลื่อนไปตรงกันข้าม ในบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางตามความสูงจะเกิดการเคลื่อนที่แนวราบมากที่สุด โดยสำหรับแบบจำลอง Gravity turn-on และ Incremental มีค่าเท่ากับ 1.5 ซม. และ 1.6 ซม. ตามลำดับ จากรูป 4.4 จะเห็นว่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งบริเวณสันเขื่อนทั้งสองแบบจำลองเกิดค่ามากที่สุด แบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีลักษณะการทรุดตัวบริเวณสันเขื่อน และขยายตัวแนวตั้งบริเวณหน้าเขื่อนหลังเขื่อน ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental จะมีลักษณะการทรุดตัวเป็นลำดับ ลงมาโดยค่าการทรุดตัวจะไล่จากค่าน้อยไปหามาก ตามลำดับความสูงเขื่อน



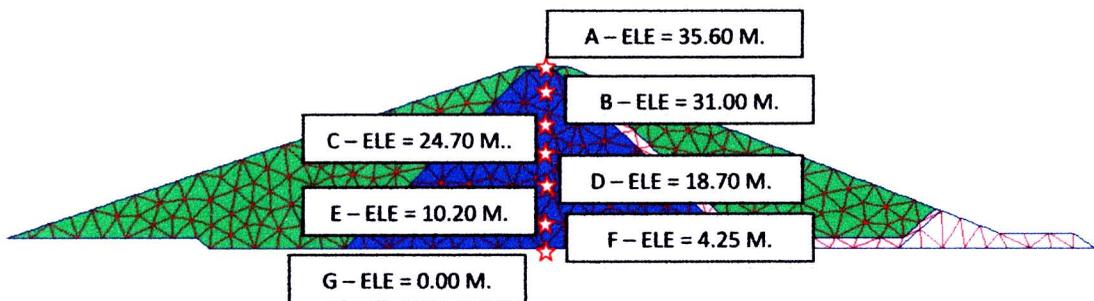
รูป 4.2 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่รวมจากแรงสถิตยศาสตร์



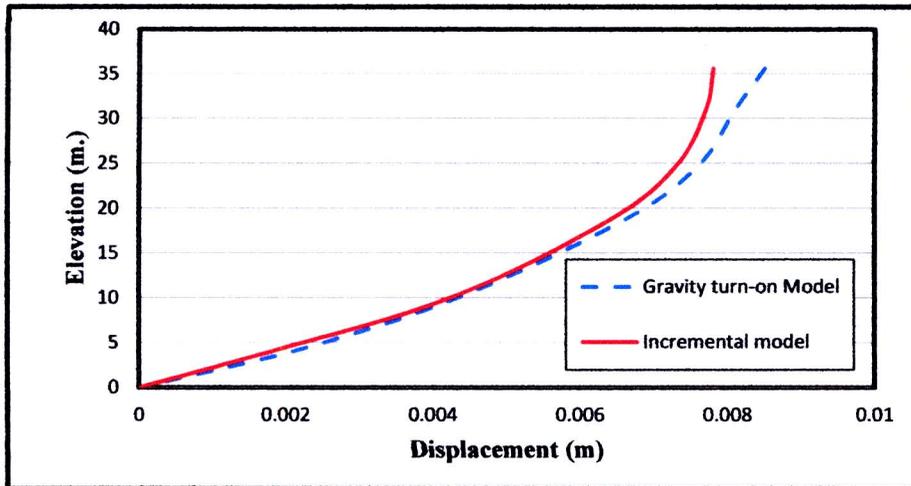
รูป 4.3 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนที่ศแนวราบจากแรงสถิตยศาสตร์



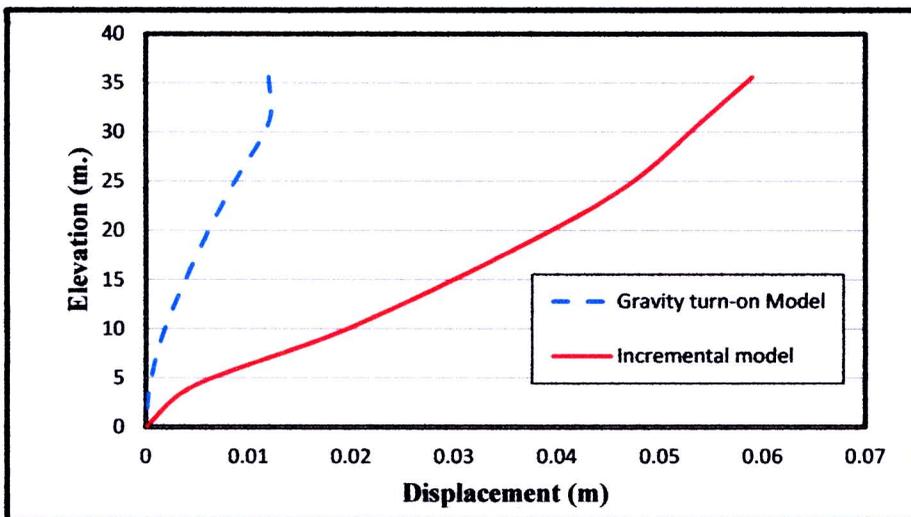
รูป 4.4 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบแนวตั้งจากแรงสถิตยศาสตร์



รูป 4.5 ตำแหน่งจุดระดับอ้างอิงแนวกลางเขื่อนของแบบจำลองทั้งสองชนิด



(ก) ระยะเคลื่อนตัวในแนวราบที่ระดับความสูงต่างๆ ของเขื่อน



(ข) ระยะเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ระดับความสูงต่างๆ ของเขื่อน

รูป 4.6 การเคลื่อนตัวที่ระดับความสูงต่างๆ จากแนวเส้นผ่านศูนย์กลางของเขื่อน

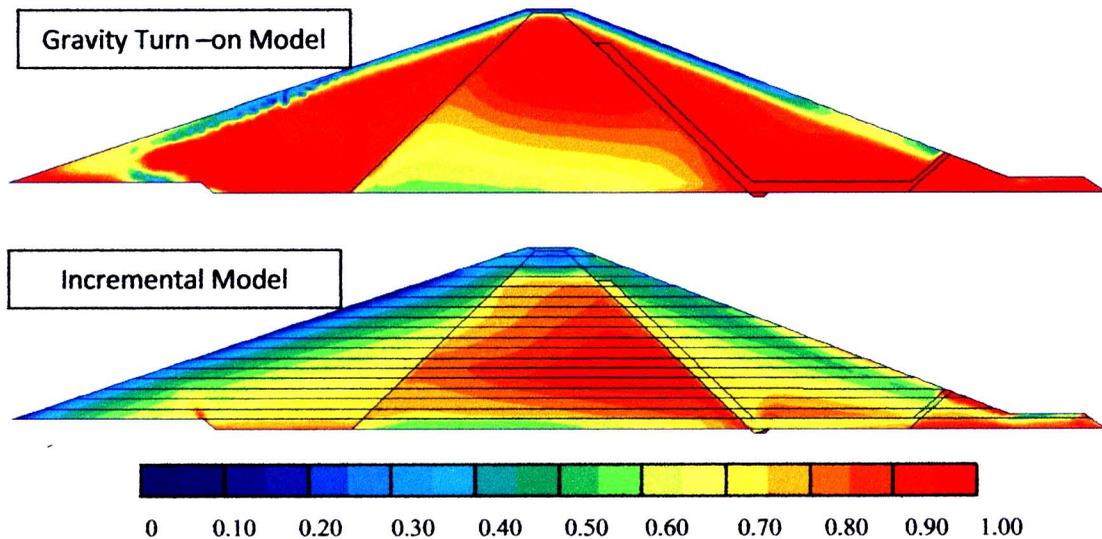
เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ตามแนวรูปตัดแนวดิ่งบริเวณสันเขื่อนที่ระดับความสูงต่างๆ ค่าแสดงในรูป 4.5 เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวระหว่างแบบจำลองทั้งสองชนิดดังแสดงรูป 4.6 การเคลื่อนที่แนวราบไม่มีความแตกต่างกันมาก ส่วนการเคลื่อนตัวทิศแนวดิ่งแบบจำลองชนิด Incremental มีระยะทรุดตัวที่มากกว่าแบบจำลองชนิด Gravity turn-on อย่างชัดเจนแสดงให้เห็นว่า การพิจารณาวัสดุของเขื่อนตามแบบจำลอง Incremental ให้ถูกบดอัดเป็นชั้นๆ ทำให้เกิดระยะทรุด

ตัวสะสมและมีความแน่นมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับระยะทรุดตัวของแบบจำลอง Gravity turn-on ซึ่งเป็นการพิจารณาวัสดุเป็นชั้นเดียวกัน

4.1.2 ความเค้นและความเครียด

ผลการวิเคราะห์ในส่วนความเค้นนี้จะพิจารณา ความเค้นเฉือนสัมพัทธ์ (The relative shear stress $\frac{\tau}{\tau_{max}}$) ความเค้นหลักรวม ($\sigma = \sigma' + u$, ความเค้นหลักรวม = ความเค้นหลักประสิทธิภาพ + แรงค้ำน้ำ) ความเค้นหลักประสิทธิภาพ แรงค้ำน้ำ และร้อยละความเครียดเฉือน

* $\tau = (\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$, σ'_1 และ σ'_3 คือ ค่าสูงสุดและค่าต่ำสุดของความเค้นหลักประสิทธิภาพ ค่าความเค้นสัมพัทธ์เป็น อัตราส่วนระหว่างความเค้นเฉือนของดินขณะนั้นกับค่ากำลังของความเค้นเฉือนของดินจากค่า C และ ϕ ของดินชนิดนั้นๆ โดยที่เมื่อมีค่าเท่ากับ 1 จะแสดงว่าดินจะมีพฤติกรรมเป็นวัสดุพลาสติก (คล้ายดินน้ำมัน โดยไม่มีการเคลื่อนตัวแบบเลื่อน ไถล)

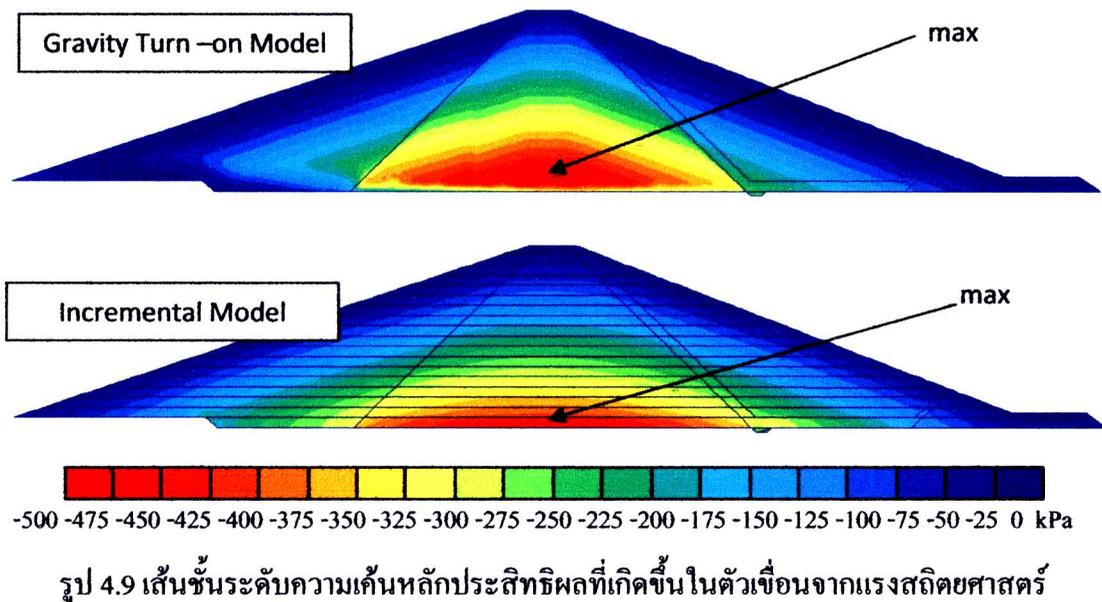
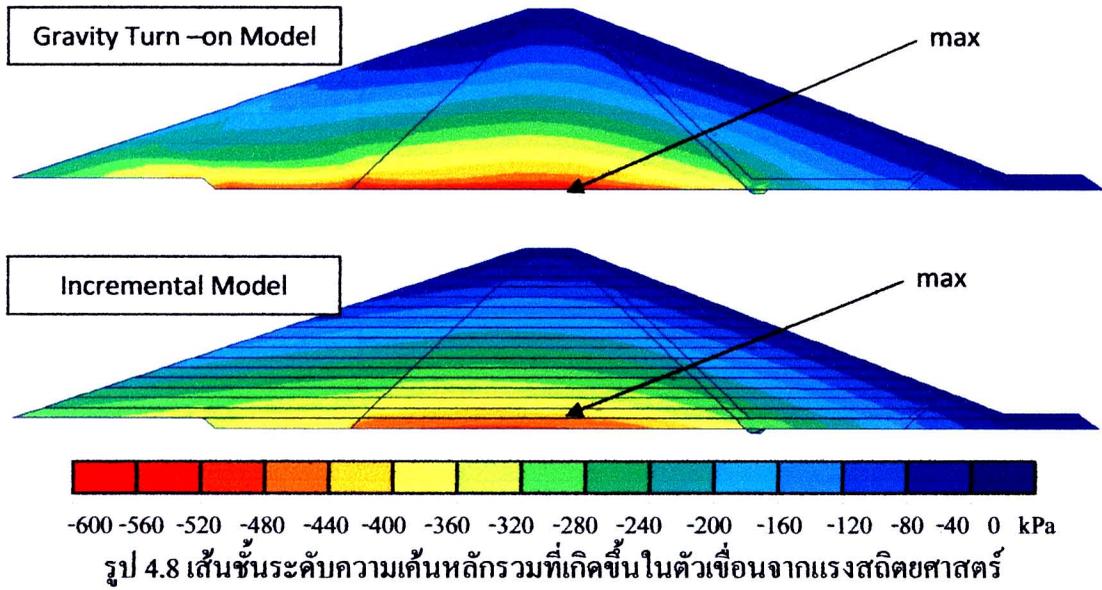


รูป 4.7 เส้นชั้นระดับความเค้นเฉือนสัมพัทธ์ที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์

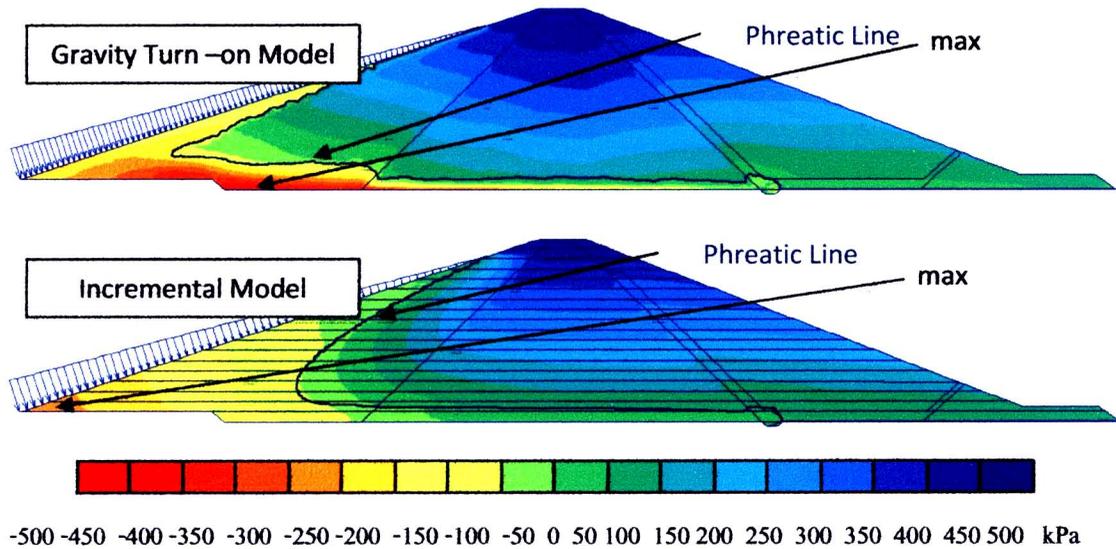
จากรูป 4.7 พบว่าความเค้นสัมพัทธ์สูงสุด จากการวิเคราะห์โดยแบบจำลองชนิด Gravity turn-on บริเวณส่วนมวลกละ (Random Zone) ทั้งหน้าเขื่อนและหลังเขื่อนจนถึงบริเวณหินทิ้งท้ายเขื่อน (Rockfill toe) จะเกิดค่าวิกฤตสุดประมาณ 0.85 ~ 1.00 แสดงให้เห็นว่าดินมวลกละ (Random Zone) มีความแข็งแรงน้อยกว่าวัสดุหินส่วนแกนกลาง (Core Zone) ไม่สอดคล้องกับค่าคุณสมบัติของดินตามตาราง 3.2 ซึ่งวัสดุหินมวลกละ (Random Zone) มีค่า c และ ϕ มากกว่าวัสดุหิน

แกนกลาง (Core Zone) เทียบกับแบบจำลองชนิด Incremental ที่ค่าวิกฤตเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของบริเวณหินทิ้งท้ายเขื่อน (Rock fill toe) และแกนกลาง (Core Zone) ด้านท้ายน้ำ ประมาณ 0.90 ~ 1.00 ในบริเวณส่วนมวลคละ (Random Zone) ความเค้นเฉือนสัมพัทธ์ ประมาณ 0.55 ~ 0.75 แสดงให้เห็นว่าวัสดุคละ (Random Zone) มีความแข็งแรงกว่าวัสดุส่วนแกนกลาง (Core Zone) ซึ่งสอดคล้องกับค่าคุณสมบัติของดินตามตาราง 3.2 ทั้งนี้ เป็นผลมาจากการบังคับที่จำลองในการวิเคราะห์แบบ Incremental ทำให้หน่วยแรงอัดตั้งฉากเพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้กำลังเฉือนของดินเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

ความเค้นหลักรวมและประสิทธิผล ดังแสดงในรูป 4.8 – 4.9 (แรงดึงมีค่าเป็นบวก แรงอัดมีค่าเป็นลบ) พบว่าผลจากแบบจำลองทั้งสองชนิด ตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นหลักรวมสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่บริเวณฐานแกนกลางเขื่อน โดยแบบจำลองชนิด Gravity turn – on มีความเค้นหลักรวมสูงสุดเท่ากับ 580.75 kPa ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental มีความเค้นหลักรวมสูงสุดเท่ากับ 489.05 kPa อย่างไรก็ตามตำแหน่งที่เกิดค่าความเค้นหลักประสิทธิผลสูงสุดต่างกัน โดยแบบจำลองชนิด Gravity turn – on มีความเค้นประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 491.63 kPa เกิดระดับเหนือฐานเขื่อนเล็กน้อยประมาณ 1/6 ของความสูงเขื่อน ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental ที่มีความเค้นประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 467.75 kPa เกิดที่ระดับฐานเขื่อน ลักษณะของความเค้นหลักประสิทธิผลที่ได้จากรูป 4.9 แสดงให้เห็นว่าดินจากแบบจำลองชนิด Incremental มีแรงอัดกระทำมากที่สุดบริเวณฐาน และมีการกระจายของแรงเป็นลักษณะสมมาตรมาจากการพิจารณาวัสดุบดอัดดินเป็นชั้นๆ สอดคล้องกับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามระดับความลึกของเขื่อน ส่วนแบบจำลองชนิด Gravity tum-on มีลักษณะแรงอัดกระทำมากที่สุดอยู่เหนือระดับฐานเขื่อนเล็กน้อย การกระจายของแรงเป็นลักษณะไม่สมมาตร แต่ความเค้นบริเวณหลังเขื่อนคล้ายกับแบบจำลองชนิด Incremental



เมื่อพิจารณาผลแรงค้ำน้ำที่เกิดดังแสดงในรูป 4.10 (แรงค้ำน้ำมีค่าเป็นลบ ส่วนแรงอัดมีค่าเป็นบวก) พบว่าตำแหน่งที่เกิดแรงค้ำน้ำค่าสูงสุดใกล้เคียงกัน โดยอยู่บริเวณฐานส่วนมวลกละ (Random Zone) หน้าเชื่อมจากเส้นระดับน้ำ (Phreatic Line) แบบจำลอง Gravity turn - on มีแรงค้ำสูงสุดเท่ากับ 469.12 kPa มากกว่าแบบจำลอง Incremental ที่มีแรงค้ำสูงสุดเท่ากับ 351.34 kPa เนื่องจากมีน้ำซึมผ่านเข้าตัวแบบจำลองน้อยกว่า ด้วยคินของแบบจำลองชนิด Incremental มีความแน่นมากกว่าจากการทรุดตัวของตัวเชื่อมแต่ละชั้นสะสมกันมา

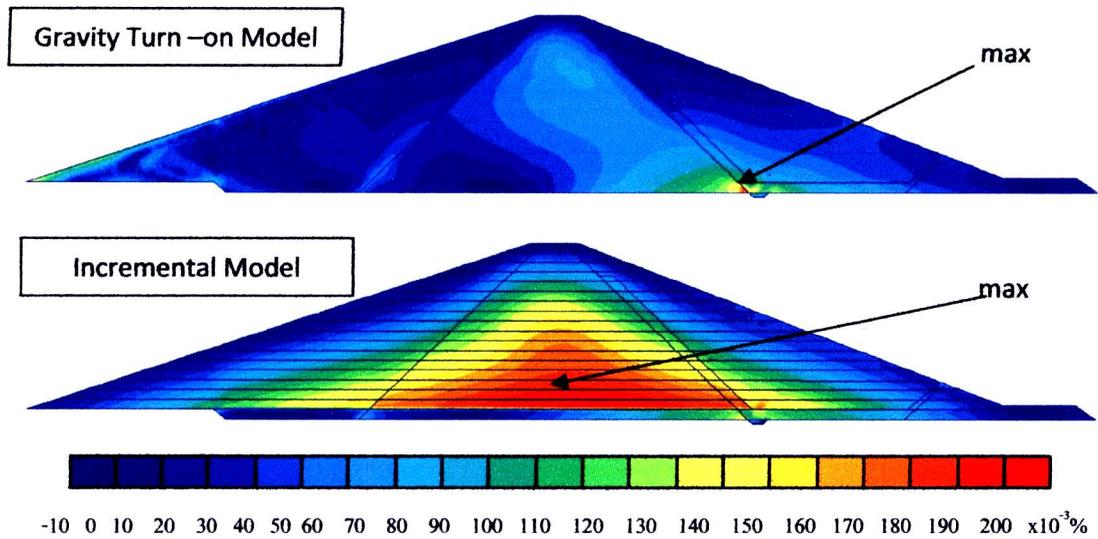


รูป 4.10 เส้นชั้นระดับแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์

จากรูป 4.11 ค่าสูงสุดของร้อยละความเครียดเฉือนของแบบจำลองชนิด Gravity Turn-on และ Incremental มีค่าเท่ากับ 0.179% และ 0.193% ตามลำดับ ลักษณะของเส้นชั้นระดับร้อยละความเครียด แบบจำลองชนิด Incremental มีค่าความเครียดเฉือนสูงสุดที่บริเวณแกนกลาง (Core Zone) ในช่วง 0.10 – 0.20% ส่วนแบบจำลองชนิด Gravity turn-on ค่าความเครียดเฉือนบริเวณแกนกลาง (Core Zone) มีค่า 0.00 – 0.07% ส่วนที่มีค่าร้อยละความเครียดเฉือนสูงสุดของแบบจำลองชนิด Gravity Turn-on อยู่บริเวณระหว่างปลายแกนกลาง (Core Zone) กับชั้นกรองท้ายน้ำ (Filter Zone) มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างจากแรงเฉือนเป็นมุม 0.00179 rad (0.0997°) เทียบกับแนวดิ่ง ส่วนแบบจำลอง Incremental ค่าความเครียดเฉือนที่มากจะกระจายตัวมากกว่า จะอยู่ในบริเวณฐานส่วนแกนเขื่อน มีการเปลี่ยนแปลงระนาบความเครียดจากแรงเฉือนเป็นมุม 0.00193 rad (0.1106°) เทียบกับแนวดิ่ง โดยเกิดแรงดึงบริเวณฐานด้านเหนือน้ำ และเกิดแรงอัดที่บริเวณฐานด้านท้ายน้ำ

4.1.3 อัตราส่วนความปลอดภัย

อัตราส่วนความปลอดภัยจากวิธีลัดกำลังตามที่กล่าวในหัวข้อ 2.6 ของแบบจำลองชนิด Gravity turn-on และ Incremental มีค่าเท่ากับ 1.587 และ 1.941 ตามลำดับ รูป 4.12 แสดงระนาบพิบัติของตัวเขื่อน จากอัตราส่วนความปลอดภัยที่ได้ พบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองชนิด

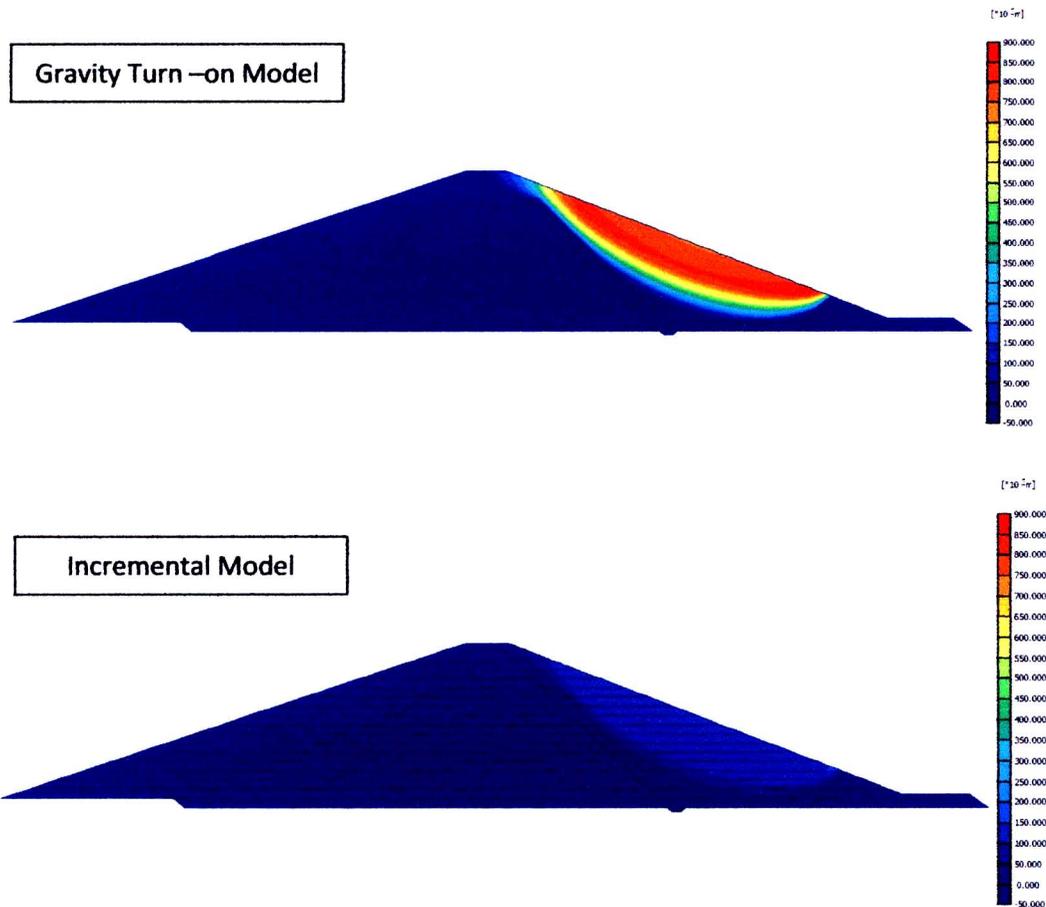


รูป 4.11 เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวเขื่อนจากแรงสถิตยศาสตร์

Incremental มีค่าความปลอดภัยมากกว่า แบบจำลองชนิด Gravity turn-on ลักษณะระนาบพิบัติมีขนาดเท่ากันแต่แบบจำลอง Incremental มีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าเทียบกับระยะการเคลื่อนตัวที่มีขนาดเท่ากัน แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองชนิด Incremental นั้นดินมีกำลังรับแรงเฉือนดีกว่าจากการพิจารณาวัสดุของดินที่บดอัดกันแต่ละชั้นทำให้มีความแน่นมากกว่า ดังตาราง 4.1

ตาราง 4.1 เปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จากแบบจำลองทั้งสองแบบ ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์

| แบบจำลอง | ระยะเคลื่อนตัวสูงสุด (ม.) | | | ความเค้นและความเครียดสูงสุด | | อัตราส่วนความปลอดภัย (FS) |
|-----------------|---------------------------|------------------|-------------------|---------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | รวม (U_x) | แนวราบ (U_x) | แนวตั้ง (U_y) | ความเค้นประสิทธิผล (kN/m^2) | ร้อยละความเครียดเฉือน | |
| Gravity Turn-on | 0.015 | 0.015 | 0.012 | 491.63 | 0.179 | 1.587 |
| Incremental | 0.055 | 0.016 | 0.055 | 467.75 | 0.193 | 1.941 |



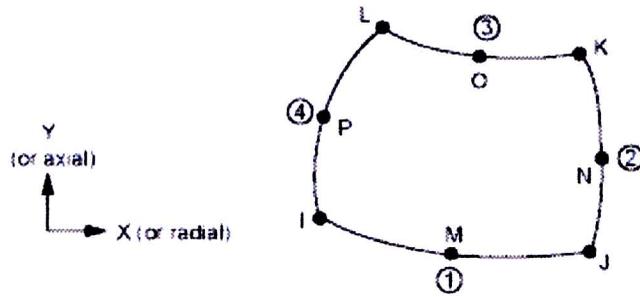
รูป 4.12 ระบายพิบัติของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองแบบภายใต้แรงสถิตยศาสตร์

4.2 กรณีภายใต้แรงพลศาสตร์

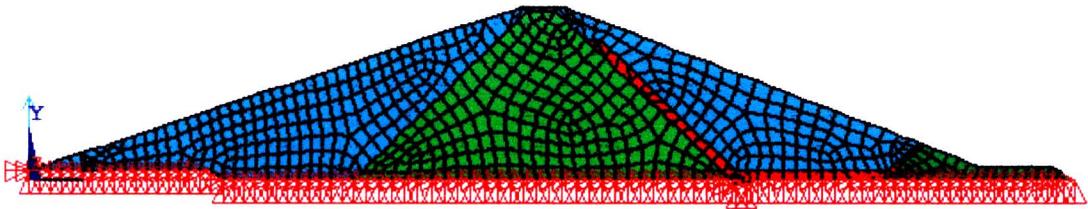
การวิเคราะห์ส่วนนี้ จะเป็นการวิเคราะห์เขื่อนต่อเนื่องเนื่องจากแรงสถิตย์ตามที่ได้กล่าวในหัวข้อ 4.1 อย่างไรก็ตามเพื่อให้ทราบคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของเขื่อนที่วิเคราะห์ จึงได้ทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าความถี่ธรรมชาติก่อน แต่เนื่องจากข้อจำกัดของโปรแกรม PLAXIS ฉะนั้นในการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องใช้โปรแกรมไฟไนท์อีลิเมนต์อื่นแทน

4.2.1 การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ

รูป 4.13 แสดงแบบจำลองไฟไนท์อีลิเมนต์และใช้อีลิเมนต์ทั้งหมด 730 ชิ้น 838 โหนด ซึ่งเป็นอีลิเมนต์ที่ตัดโค้ง 8 โหนด เลือกรูปแบบเป็นรูปสี่เหลี่ยม เหมาะกับปัญหาแบบวัสดุพลาสติก มีการหด-ขยายตัวมาก มีความเค้นและความเครียดมาก



(ก) รูปแบบอีลิเมนต์ที่ตัดโค้ง 8 โหนด ที่ใช้ในการวิเคราะห์แบบรูปสี่เหลี่ยม



(ข) แบบจำลอง FEM ของเขื่อนแม่ทะลบลวง

รูป 4.13 แบบจำลองเขื่อนแม่ทะลบลวงจากโปรแกรมทางไฟไนต์อีลิเมนต์

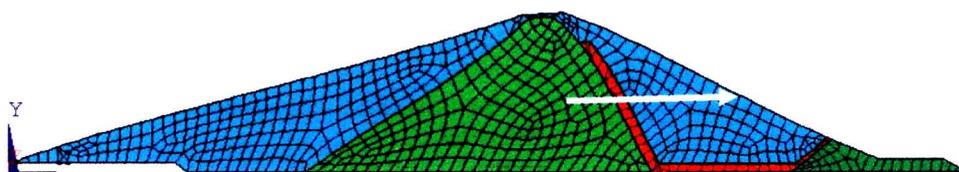
จากแบบจำลองไฟไนต์อีลิเมนต์ของเขื่อนแม่ทะลบลวง รูป 4.13 ใช้วิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติโดยให้ฐานเขื่อนอยู่ในสภาพยึดแน่น ไม่มีการเคลื่อนที่ การวิเคราะห์ความถี่ธรรมชาติของเขื่อนเพื่อที่เปรียบเทียบกับความถี่ของแผ่นดินไหว หากความถี่ของแผ่นดินไหวและความถี่ของเขื่อนเท่ากัน จะทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงเป็นอันตรายต่อโครงสร้างเขื่อน ผลของการวิเคราะห์หาความถี่ธรรมชาติของเขื่อนแม่ทะลบลวง โดยใช้โปรแกรมทางไฟไนต์อีลิเมนต์ (FEM) หาความถี่ในขณะที่เขื่อนไม่มีน้ำกักเก็บอยู่

ผลวิเคราะห์จำนวน 5 โหมด แสดงในรูป 4.14 (ก) โหมดที่ 1 มีค่าความถี่ประมาณ 1.442 Hz เป็นการเคลื่อนตัวในแนวราบ จากรูป 4.14 (ข) โหมดที่ 2 มีค่าความถี่ประมาณ 2.146 Hz เป็นการเคลื่อนตัวในแนวตั้ง จากรูป 4.14 (ค) โหมดที่ 3 มีค่าประมาณ 2.529 Hz เป็นการเคลื่อนตัวแบบม้วนตัวหลังเขื่อน จากรูป 4.14 (ง) โหมดที่ 4 มีค่า 2.727 Hz เป็นการเคลื่อนตัวแบบม้วนตัวหน้าและหลังเขื่อน จากรูป 4.14 (จ) โหมดที่ 5 มีค่า 3.05 Hz เป็นการเคลื่อนตัวแบบม้วนตัวหน้าและหลังเขื่อน จากการศึกษาของ Nityananda (2008) พบว่าค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ของเขื่อนดินที่มีความสูง

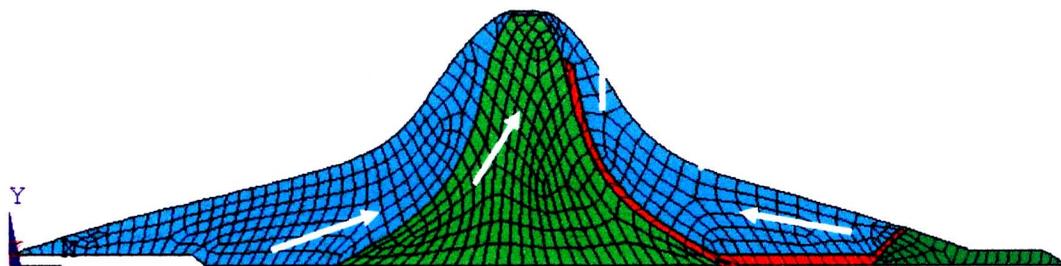
ใกล้เคียงกัน มีค่าความถี่ธรรมชาติโหมดที่ 1 เท่ากับ 1.75 Hz โหมดที่ 2 เท่ากับ 2.68 ดังนั้นแบบจำลองนี้จึงมีความน่าเชื่อถือได้

หลังจากนั้นค่าความถี่ธรรมชาติที่ได้ จะนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถี่จากแผ่นดินไหวซึ่งเท่ากับ 3.12 3.32 และ 3.01 Hz จากแผ่นดินไหว EQ1 EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ โดยค่าความถี่ธรรมชาติของเขื่อนมีค่าไม่เท่ากับค่าความถี่แผ่นดินไหว จึงไม่ทำให้เกิดการสั่นสะเทือนที่รุนแรงต่อโครงสร้างเขื่อน และค่าความถี่ธรรมชาติใช้ในการหาค่า Rayleigh damping โดยกำหนดให้เขื่อนมีค่าเฉลี่ยของ Damping Ratio = 0.05 ซึ่งครอบคลุมในช่วงความถี่ 1.442 – 3.05 Hz ซึ่งจะได้ค่า $\alpha = 0.40$ และ

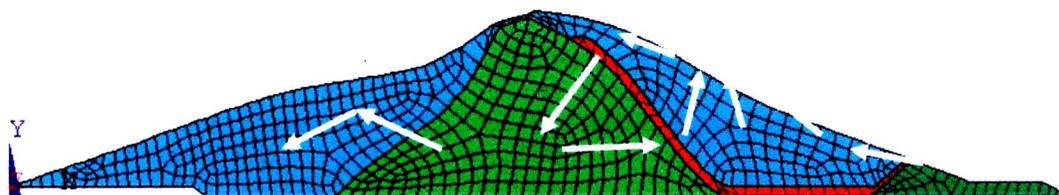
$\beta = 0.004$ เพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์ Time – History ในโปรแกรม PLAXIS ต่อไป



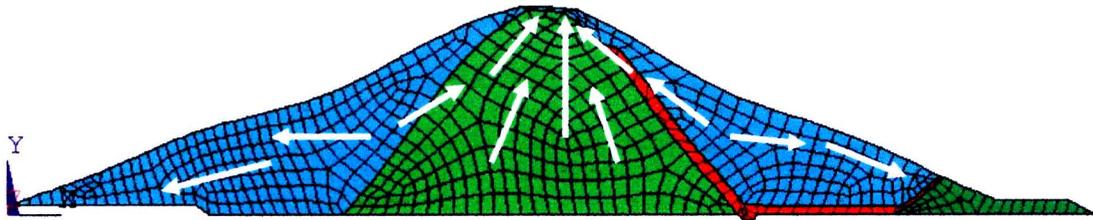
(ก) โหมดที่ 1 การเคลื่อนตัวในแนวราบของเขื่อน $f_n = 1.442$ Hz (ขยาย 20,000 เท่า)



(ข) โหมดที่ 2 การเคลื่อนตัวในแนวตั้งแนวแกนกลางเขื่อน $f_n = 2.146$ Hz (ขยาย 20,000 เท่า)

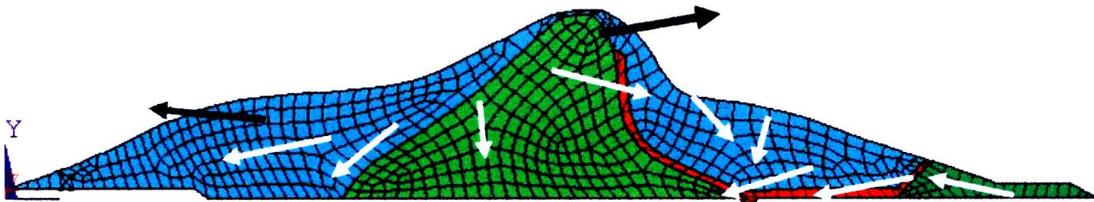


(ค) โหมดที่ 3 การเคลื่อนตัวแบบม้วนตัวไปหน้าเขื่อน $f_n = 2.529$ Hz (ขยาย 5,000 เท่า)



(ง) โหมดที่ 4 การเคลื่อนตัวไปหน้า - หลังเขื่อน และแนวตั้งกลางเขื่อน $f_n = 2.727$ Hz

(ขยาย 10,000 เท่า)



(จ) โหมดที่ 5 การเคลื่อนตัวแบบผสม เขื่อน $f_n = 3.05$ Hz (ขยาย 10,000 เท่า)

รูป 4.14 ห้าโหมดแรกของการเคลื่อนตัวของเขื่อนแม่ทะลบลวง

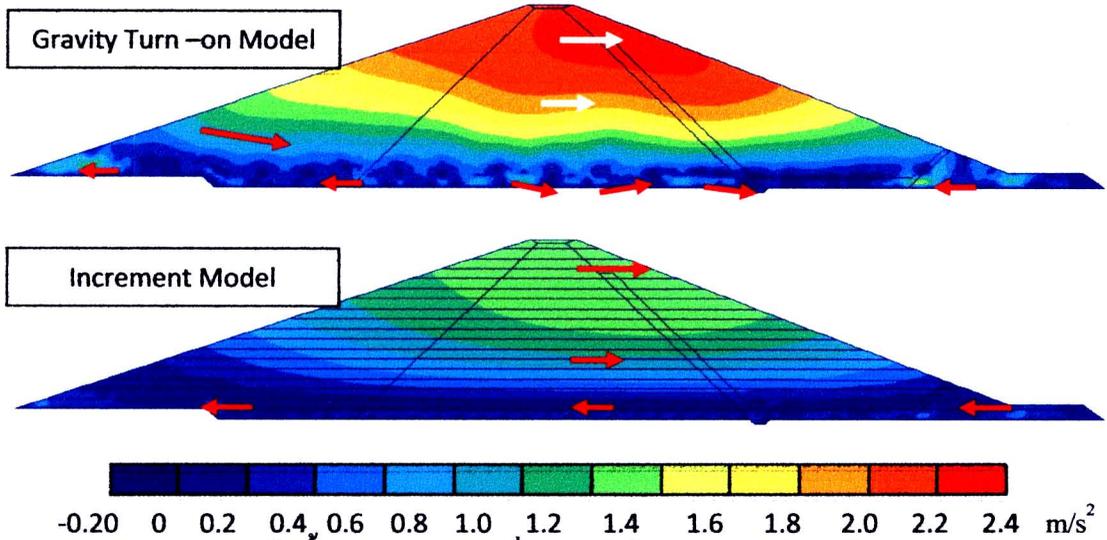
4.2.2 การวิเคราะห์ภัยใต้แรงแผ่นดินไหวตามประวัติเวลา

4.2.2.1 ความเร่ง

แบบจำลองที่ใช้วิเคราะห์มีลักษณะเดียวกับที่ใช้ในการวิเคราะห์กรณีแรงสถิตย์ โดยที่ความเร่งจะกระทำที่ระดับฐานเขื่อนในแนวราบ จากรูป 4.15 – 4.17 พบว่า จากการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองชนิด Gravity turn ค่าความเร่งมากที่สุดที่ตำแหน่งสันเขื่อนมีค่าเท่ากับ 0.235g ที่เวลา 6.84 วินาที, 0.513g ที่เวลา 7.18 วินาที และ 0.933g ที่เวลา 16.55 วินาที จากแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental มีค่าความเร่งมากที่สุดที่สันเขื่อนมีค่าเท่ากับ 0.138g ที่เวลา 6.84 วินาที, 0.311g ที่เวลา 7.18 วินาที และ 0.571g ที่เวลา 16.55 วินาที จากแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ เมื่อพิจารณารูปแบบการกระจายของค่าความเร่งในตัวเขื่อนจากรูป 4.15 – 4.17 ลักษณะการสั่นไหวของเขื่อนขณะที่เกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อนตามแบบจำลองชนิด Gravity turn-on จะเคลื่อนตัวในลักษณะไปทางด้านท้ายเขื่อนคล้ายมวลประกอบด้วยหลายชิ้นส่วนโดยมีการยึดแน่นที่ฐาน ความเร่งแนวราบที่ฐานเขื่อนมีทิศทางสวนทางกับความเร่งแนวราบของตัวเขื่อน (ยกเว้นกรณี EQ3 ความเร่งแนวราบของตัวเขื่อนมีทิศทางเดียวกันทั้งฐานและตัวเขื่อน) เนื่องจากแผ่นดินไหว EQ3 เป็นแผ่นดินไหวลักษณะแรงกระแทกฉับพลัน (มี

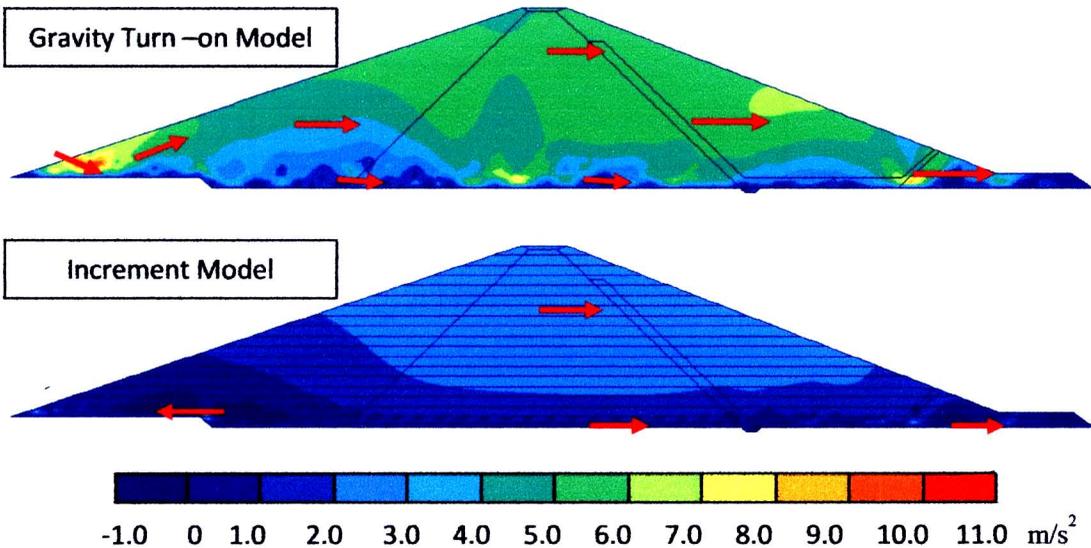
ทั้งฐานและตัวเขื่อน) เนื่องจากแผ่นดินไหว EQ3 เป็นแผ่นดินไหวลักษณะแรงกระแทกฉับพลัน (มีความรุนแรงมากแต่ระยะเวลาสั้น) ทำให้ทิศความเร่งแนวราบของเขื่อนรูป 4.17 ความเร่งที่เกิดบริเวณฐานกับตัวเขื่อนมีทิศทางไปทางเดียวกัน ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental มีการสั่นไหวคล้ายกับมวลก้อนเดียวที่มีลักษณะแข็งเกร็งค่าความเร่งจะกระจายสม่ำเสมอในตำแหน่งต่างๆ ของเขื่อน เนื่องจากการพิจารณาบังคับแน่นของดินแต่ละชั้นทำให้ดินมีความแน่นทำให้มีค่าความเร่งน้อย

เมื่อพิจารณาค่าความเร่ง ตามแนวคัตแนวคั้งบริเวณกลางสันเขื่อนจากรูป 4.18 – 4.19 ค่าความเร่งที่ระดับความสูงเขื่อน 5 ม. จะเป็นขนาดความเร่งของแผ่นดินไหวที่กระทำที่ฐานเขื่อนสูงสุด และกระจายค่าความเร่งตามระดับความสูงต่างๆ โดยนำค่าที่มากที่สุดในช่วงการสั่นไหวมาพิจารณา การกระจายของความเร่งของแผ่นดินไหวมีลักษณะคล้ายกันตามแต่ละแบบจำลอง (รูปร่างความเร่ง EQ1 คล้าย EQ2 และ EQ3 โดยเรียงแผ่นดินไหวที่มีกำลังขยายจากน้อยไปมากได้เป็น EQ1 EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ) สามารถแบ่งได้เป็นส่วนความเร่งขยาย และส่วนความเร่งลด (ยกเว้นกรณีแผ่นดินไหว EQ1 จากแบบจำลองชนิด Incremental ที่มีเฉพาะส่วนความเร่งลดอย่างเดียว) โดยที่ความเร่งส่วนขยายของแบบจำลองทั้งสองอยู่ที่ระดับความสูงประมาณ 0 - 5 ม. เป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับฐานเขื่อนที่อยู่ในระดับความสูงประมาณ 1/7 ของความสูงเขื่อนนับจากฐานเขื่อน เนื่องจากเป็นบริเวณที่อยู่ใกล้กับ C.G. ของเขื่อน (1/3 ของความสูงเขื่อนโดยประมาณ) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีมวลทำให้สลายความเร่งจากแรงแผ่นดินไหวทำให้ความเร่งลดลงเรื่อยๆ จนถึงสันเขื่อน เมื่อเปรียบเทียบจากผลการศึกษาของ สุทธิศักดิ์ และ เกรียง ไกร (2551) และ Mohammad, et al (2006) พบว่าความเร่งที่บริเวณสันเขื่อนจากแรงแผ่นดินไหวจะมีค่ามากที่สุด อย่างไรก็ตามตั้งแต่ความสูงประมาณ 5 - 35 ม. เป็นส่วนที่ความเร่งลดลง ซึ่งมวลของเขื่อนมีค่าลดลงตามความสูงเขื่อน โดยแบบจำลองชนิด Incremental มีค่าความเร่งน้อยกว่าแบบจำลองชนิด Gravity turn-on ทุกกรณี



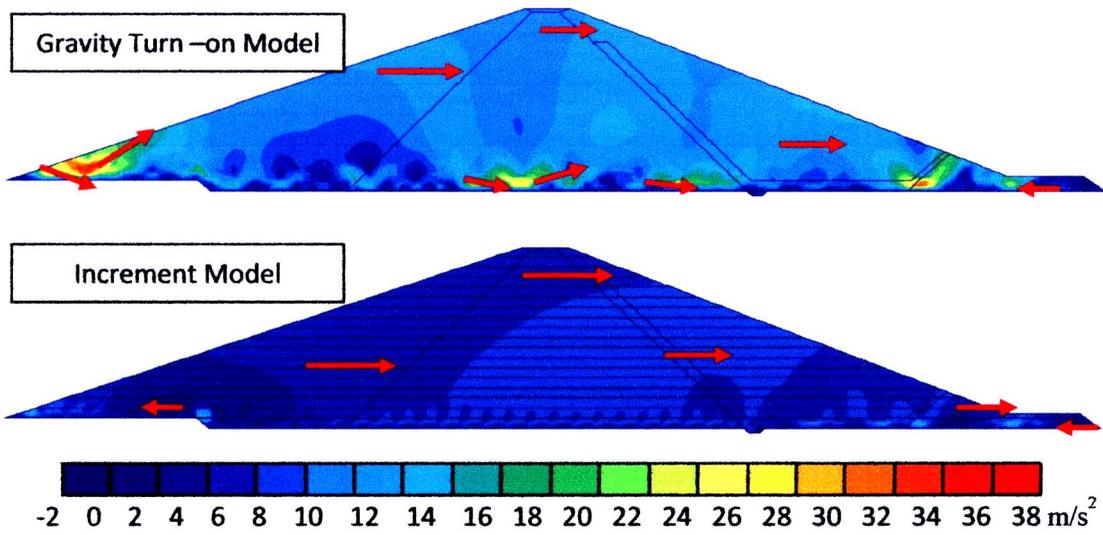
รูป 4.15 เส้นชั้นระดับความเร่งเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1

ขณะเกิดความเร็วแนวราบสูงสุดที่สั้นเขื่อน ที่เวลา 6.84 วินาที

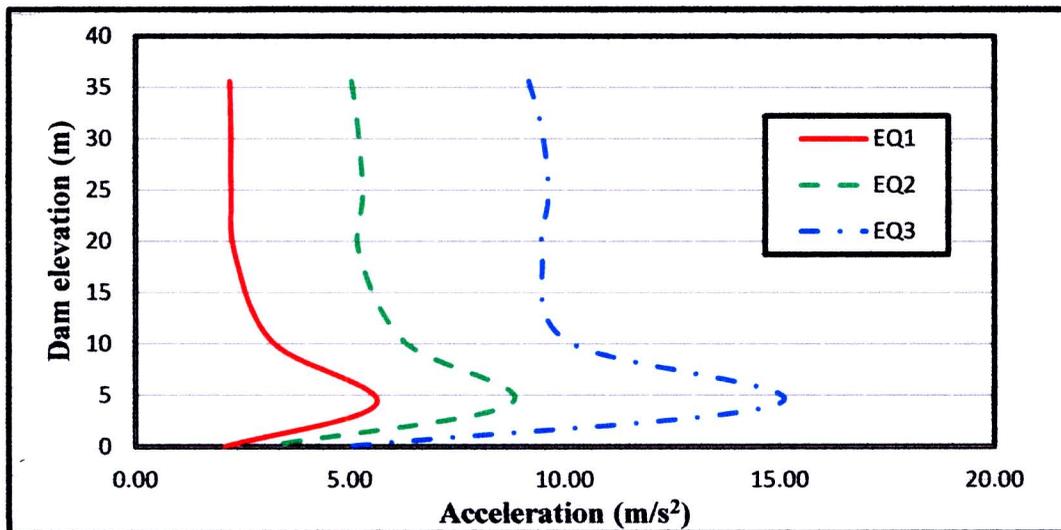


รูป 4.16 เส้นชั้นระดับความเร่งเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2

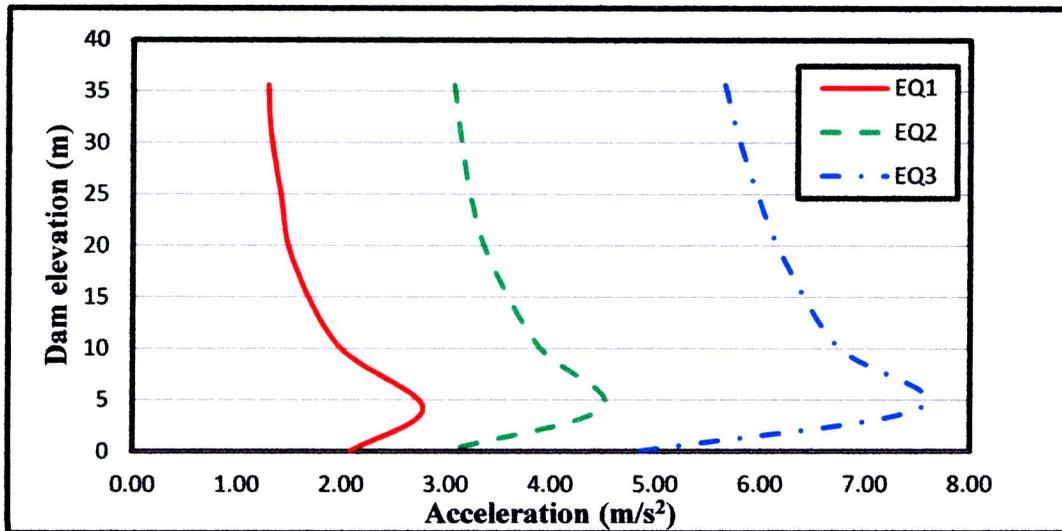
ขณะเกิดความเร็วแนวราบสูงสุดที่สั้นเขื่อน ที่เวลา 7.18 วินาที



รูป 4.17 เส้นชั้นระดับความเร่ง เชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3
 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน ที่เวลา 16.55 วินาที

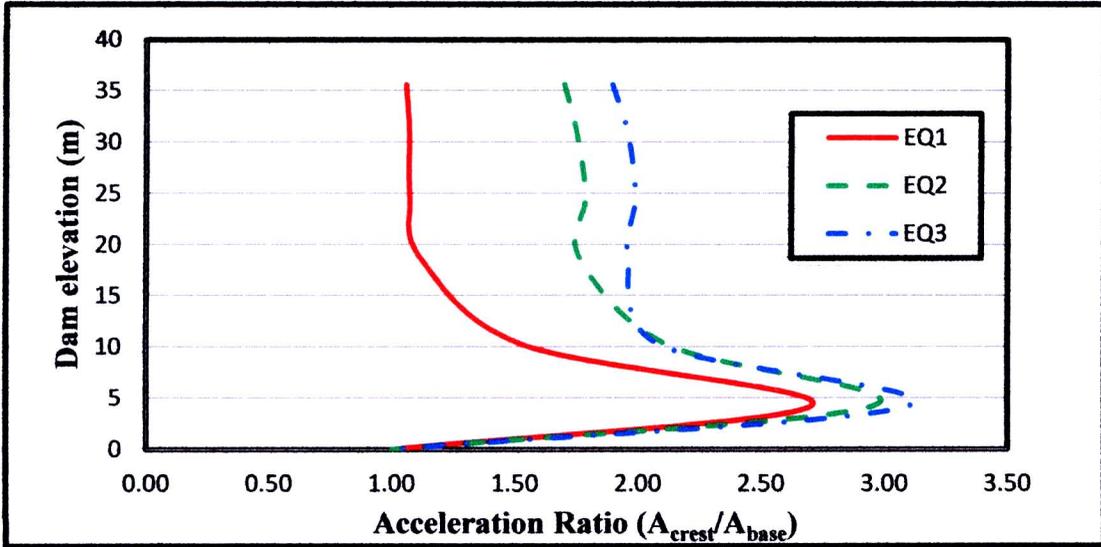


รูป 4.18 ความเร่งสูงสุดของแนวตัดกลางเขื่อนในระหว่างการสั่นไหว
 เทียบกับระดับความสูงเขื่อน ของแบบจำลอง Gravity turn-on

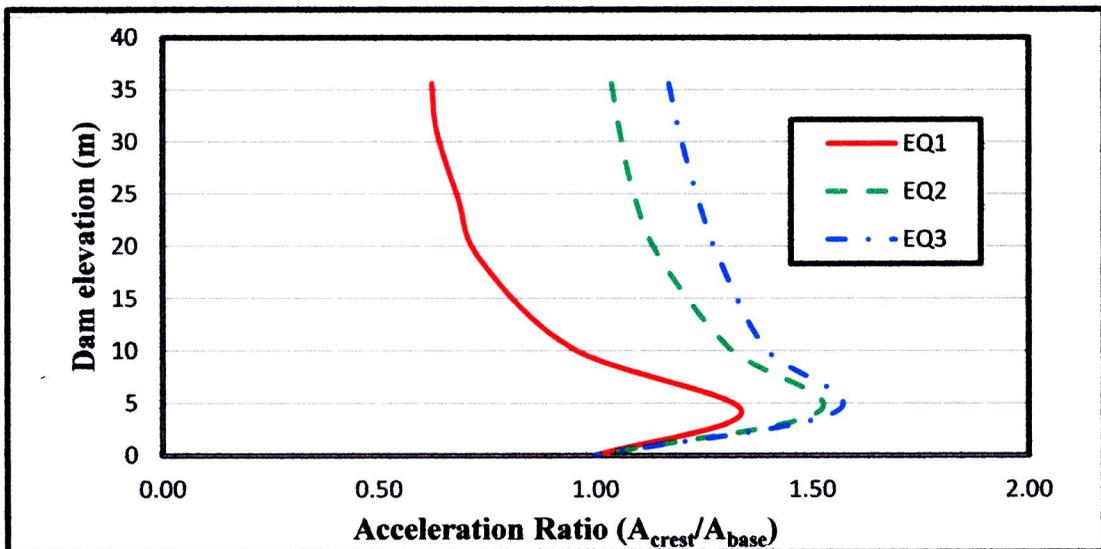


รูป 4.19 ความเร่งสูงสุดของแนวคัตกลางเขื่อนในระหว่างการสั่นไหว
เทียบกับระดับความสูงเขื่อน ของแบบจำลอง Incremental

เพื่อให้เห็นการลดหรือเพิ่มของความเร่งเทียบกับความเร่งพื้นดินจากแผ่นดินไหว รูป 4.20 – 4.21 พิจารณาอัตราส่วนระหว่างความเร่งมากที่สุดของเขื่อนตามแนวคัตแนวตั้งบริเวณกลางสันเขื่อนกับฐานเขื่อน จากกรณีแผ่นดินไหวต่างๆ การวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Gravity turn-on มีค่าอัตราส่วนความเร่งสูงสุดเท่ากับ 2.707, 3.432 และ 3.104 สำหรับกรณีแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Incremental มีค่าเท่ากับ 1.337, 1.518 และ 1.558 จากแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ ส่วนอัตราส่วนความเร่งเทียบกับฐานที่สันเขื่อนจากแบบจำลอง Gravity turn-on มีค่าเท่ากับ 1.057, 1.700 และ 1.895 สำหรับกรณีแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ สำหรับการวิเคราะห์โดยแบบจำลอง Incremental มีค่าเท่ากับ 0.622, 1.037 และ 1.169 จากแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ



รูป 4.20 อัตราส่วนความเร่งสูงสุดตามแนวค้คกลางเข้อนต่ออัตราเร่งสูงสุดที่ฐาน
ที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเข้อนของแบบจำลอง Gravity turn-on



รูป 4.21 อัตราส่วนความเร่งสูงสุดของตามแนวค้คกลางเข้อนต่ออัตราเร่งสูงสุดที่ฐาน
ที่เวลาต่างๆ เทียบกับระดับความสูงเข้อนของแบบจำลอง Incremental

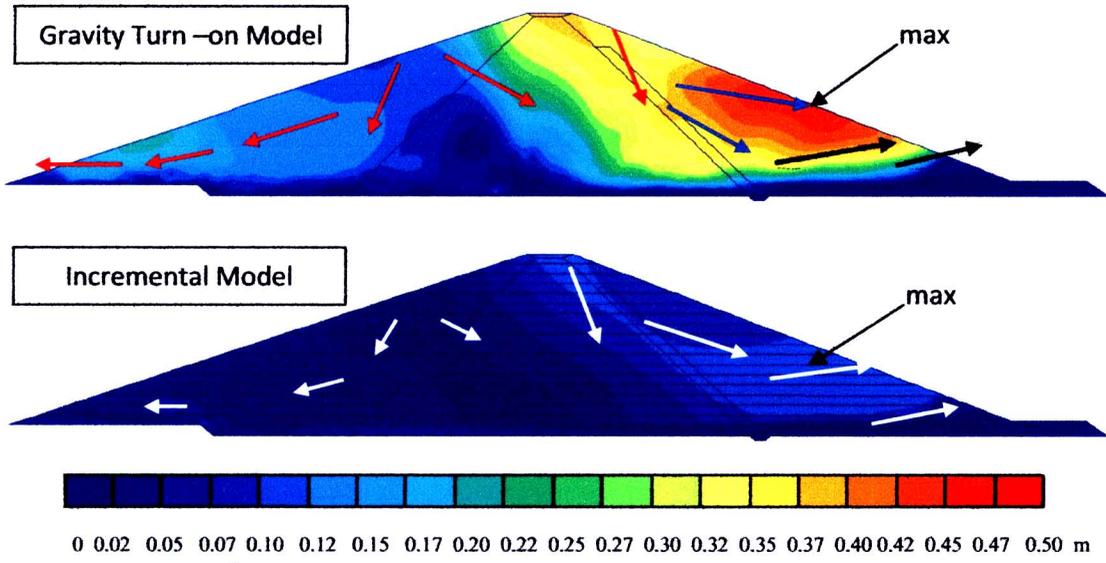


4.2.2.2 ระยะเคลื่อนตัว

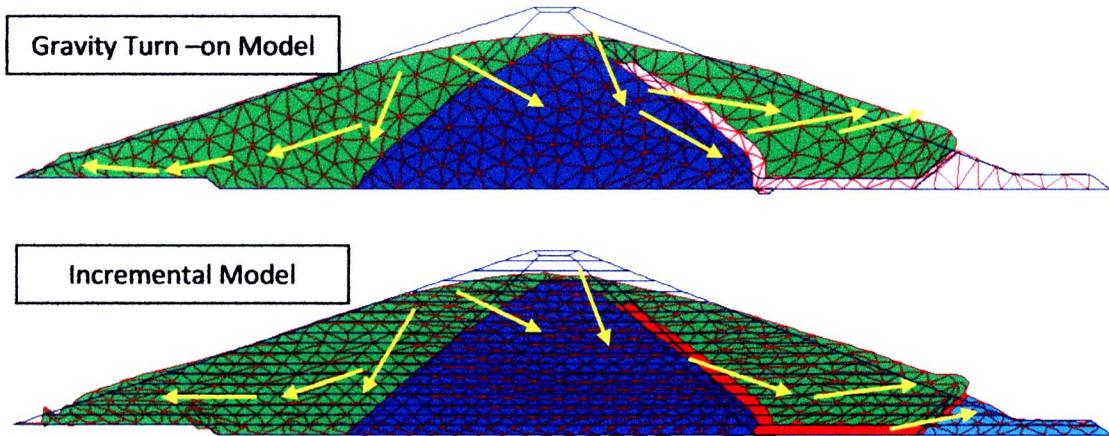
ระยะเคลื่อนตัวหลังจากแผ่นดินไหว ดังแสดงรูป 4.22 - 4.27 พบว่าแบบจำลองทั้งสองชนิด มีรูปเส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวจากแผ่นดินไหวทั้ง 3 แบบมีการเคลื่อนที่รวมคล้ายกับโหมดที่ 5 จาก การวิเคราะห์ค่าความถี่ธรรมชาติ ดังรูป 4.14 (จ) (การเคลื่อนตัวแบบผสมทั้งเคลื่อนตัวแนวราบและ แนวตั้ง บริเวณด้านเหนือน้ำและด้านท้ายน้ำ) เนื่องจากค่าความถี่ธรรมชาติของแผ่นดินไหวมีค่าอยู่ ในช่วง 3.0 – 3.3 Hz มีค่าเท่ากับค่าความถี่ธรรมชาติของเขื่อนใน โหมดที่ 5 (3.05 Hz) โดยบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวมากที่สุดของแบบจำลองจากแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณี ที่อยู่บริเวณหลังเขื่อนที่ระดับ 1/2 ของความสูงเขื่อน โดยมีระนาบการเคลื่อนตัวอยู่ที่บริเวณบนชั้นกรองน้ำ (Filter Zone) และดินเขื่อน ด้านท้ายน้ำ เนื่องจากดินบริเวณดังกล่าวมีพฤติกรรมจากมุมไคเลชัน (ψ) ทำให้ดินมีกำลังรับแรง เตือนมากขึ้นจึงไม่เคลื่อนตัวตามบริเวณมวลถลละ ส่วนบริเวณด้านเหนือน้ำของแบบจำลอง Incremental แถบจะไม่มี การเคลื่อนที่เลย ลักษณะการเคลื่อนตัวของเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on ตัวเขื่อนมีการเคลื่อนตัวทั้งด้านเหนือน้ำ และท้ายน้ำทิศทางชัดเจนกว่าแบบจำลอง ชนิด Incremental ที่มีการเคลื่อนที่เล็กน้อยเป็นผลมาจากการพิจารณาการบดอัดและความแน่น มากกว่าทำให้คล้ายกับวัสดุแข็งแรงแกร็ง โดยระยะเคลื่อนตัวจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีค่า มากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental ประมาณ 3 เท่า ดังแสดงในตาราง 4.2

ตาราง 4.2 เปรียบเทียบผลระยะเคลื่อนตัวจากแบบจำลองทั้งสองแบบ ภายใต้แรงพลศาสตร์

| แบบจำลอง | ระยะเคลื่อนตัวสูงสุด (ม.) | | | | | | | | |
|-----------------|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | EQ1 | | | EQ2 | | | EQ3 | | |
| | Ut | Ux | Uy | Ut | Ux | Uy | Ut | Ux | Uy |
| Gravity Turn-on | 0.462 | 0.462 | 0.357 | 0.243 | 0.222 | 0.116 | 0.187 | 0.187 | 0.140 |
| Incremental | 0.126 | 0.122 | 0.097 | 0.085 | 0.085 | 0.049 | 0.065 | 0.064 | 0.041 |

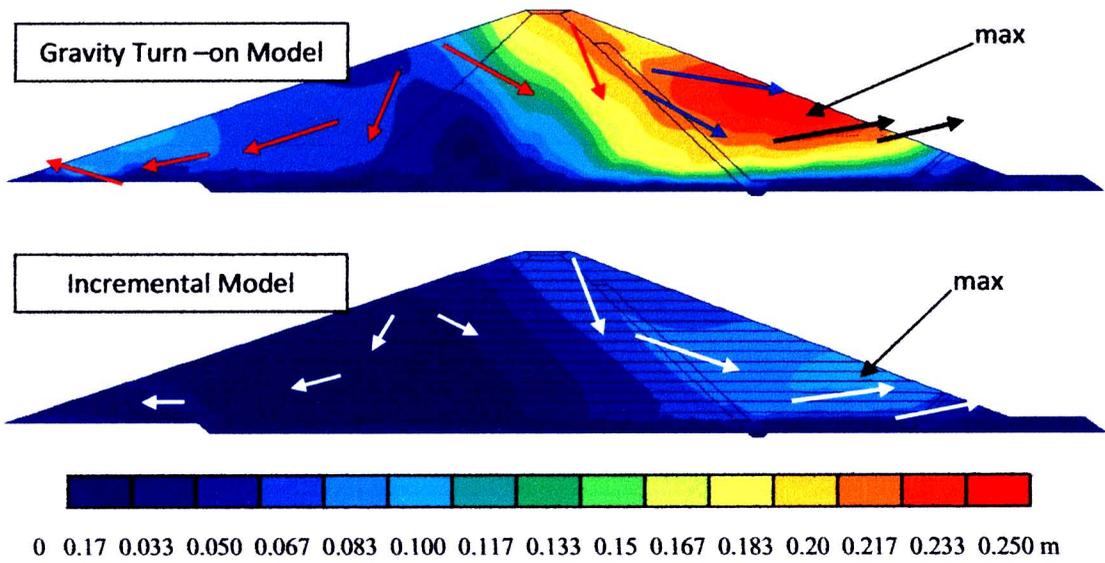


รูป 4.22 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1

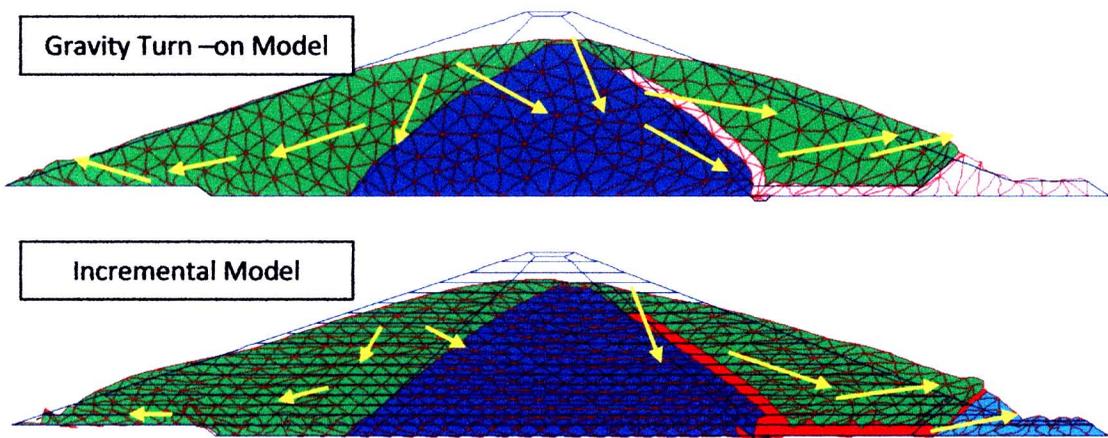


รูป 4.23 รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1

(ขยาย 15 เท่าสำหรับแบบจำลอง Gravity turn-on และ 50 เท่าสำหรับแบบจำลอง Incremental)

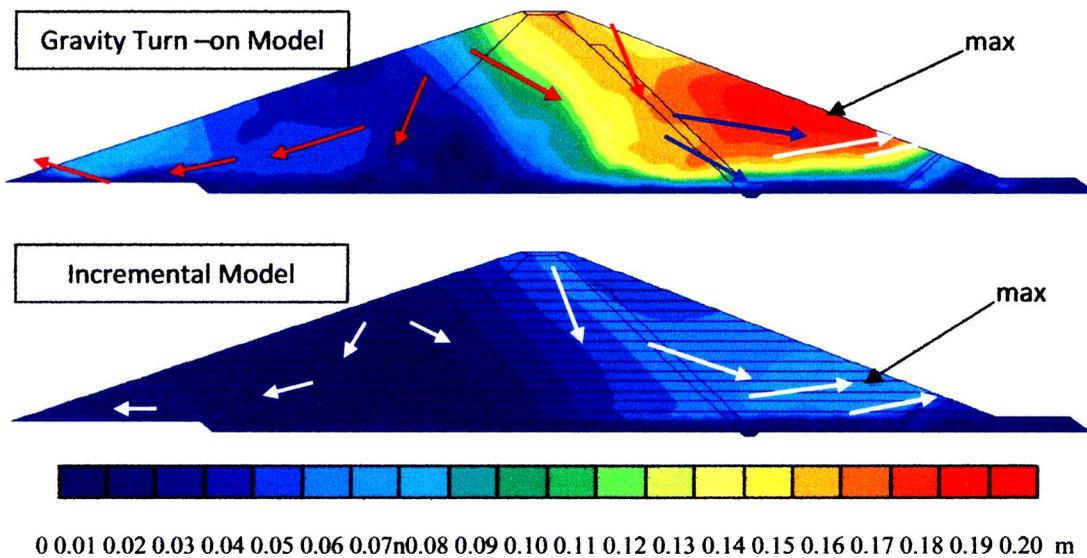


รูป 4.24 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2

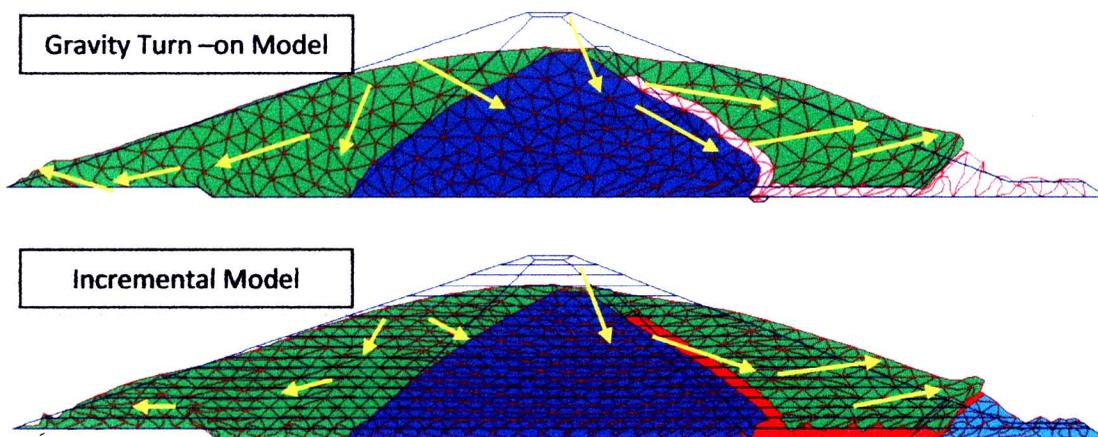


รูป 4.25 รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2

(ขยาย 30 เท่าสำหรับแบบจำลอง Gravity tum-on และ 120 เท่าสำหรับแบบจำลอง Incremental)

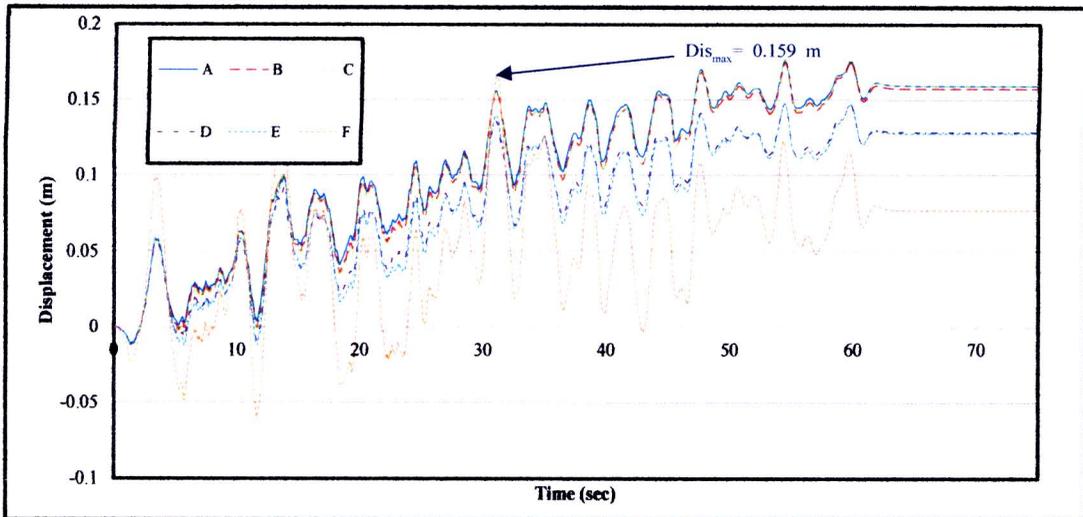


รูป 4.26 เส้นชั้นระยะเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3

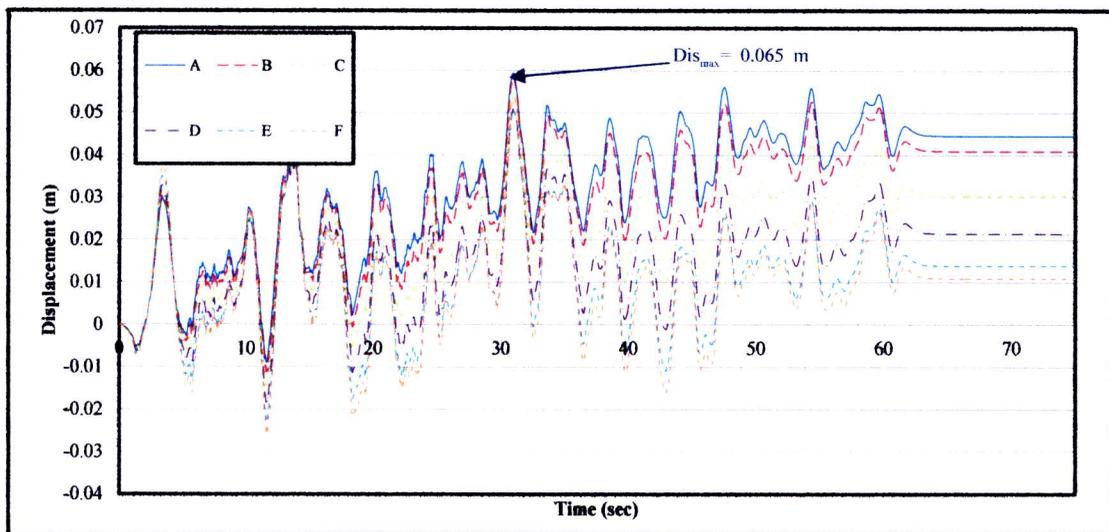


รูป 4.27 รูปร่างการเคลื่อนตัวของเขื่อนทึบรวมหลังจากแรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3
(ขยาย 50 เท่าสำหรับแบบจำลอง Gravity turn-on และ 150 เท่าสำหรับแบบจำลอง Incremental)

การเคลื่อนตัวในแนวราบที่ระยะเวลาต่างๆ ตามตำแหน่งระยะความสูงแนวตัดสั้นเขื่อน (รูป 4.5) แสดงคังรูป 4.28 - 4.30 จุด F ซึ่งมีระยะความสูงประมาณ 4 ม.จากฐานเขื่อน มีการตอบสนองการเคลื่อนตัวแนวราบมากที่สุดเทียบกับตำแหน่งความสูงอื่น และมีลักษณะเช่นเดียวกับการวิเคราะห์กรณีแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณี และทั้งสองแบบจำลอง มีลักษณะการเคลื่อนตัวคล้ายๆ กันระหว่างการวิเคราะห์โดยแบบจำลองแต่ละชนิด ในช่วงแรกของการสั้นเขื่อนจะเคลื่อนที่สลับไป - กลับ รอบแนวสมดุลก่อนเกิดการเคลื่อนตัว (Displacement = 0) แต่ภายหลังการสั้นในช่วงเวลาหนึ่งเขื่อนจะเคลื่อนสลับไป - มา โดยเปลี่ยนตำแหน่งสมดุลใหม่ โดยเฉพาะกรณีการวิเคราะห์โดยแบบจำลองชนิด Gravity turn-on ตำแหน่งสมดุลจะอยู่ที่ค่า Displacement ประมาณ 0.15 เมตร แสดงให้เห็นว่าเขื่อนมีพฤติกรรมของวัสดุเป็นพลาสติก (ไม่มีการคืนตัวของวัสดุได้ 100%) ส่วนแบบจำลองชนิด Incremental มีการเคลื่อนตัวไป - กลับ ในแนวราบมีค่าเฉลี่ยอยู่ใกล้ศูนย์ซึ่งมีพฤติกรรมเป็นวัสดุยืดหยุ่น พบว่าแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีการเคลื่อนตัวมากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental ชัดเจน แสดงว่าแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีการเคลื่อนตัวแนวราบในลักษณะเป็นก้อนมวลเดียวกันตั้งแต่ส่วนเหนือฐานเขื่อนขึ้นไป เนื่องจากไม่ได้คิดการทรุดตัวต่อเนื่องกันระหว่างชั้นเหมือนกับแบบจำลองชนิด Incremental ที่คิดการทรุดตัวของดินเป็นชั้นๆ ต่อกันมาทำให้แบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีการไหวตัวที่มากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental จนทำให้ดินมีพฤติกรรมเป็นวัสดุพลาสติก

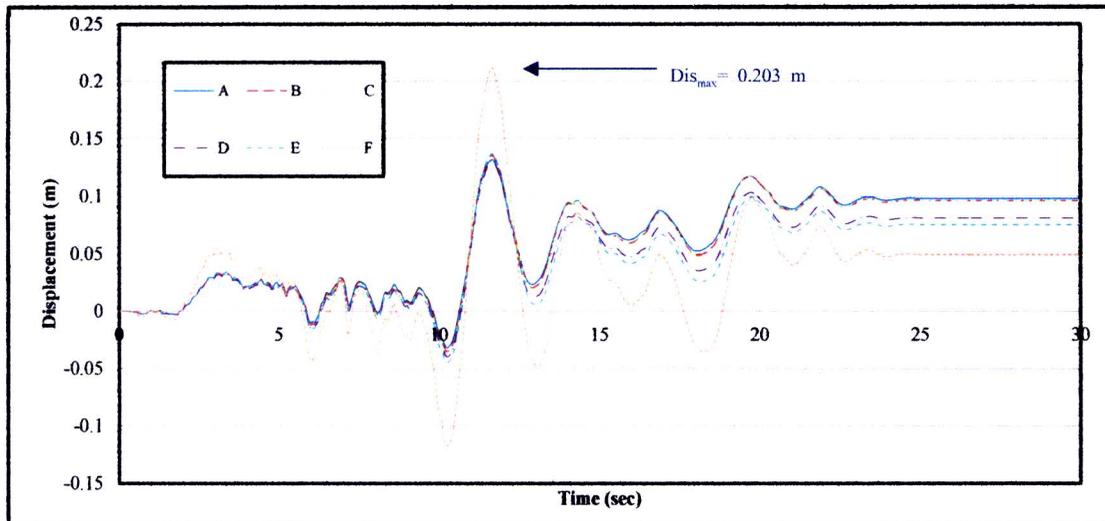


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว

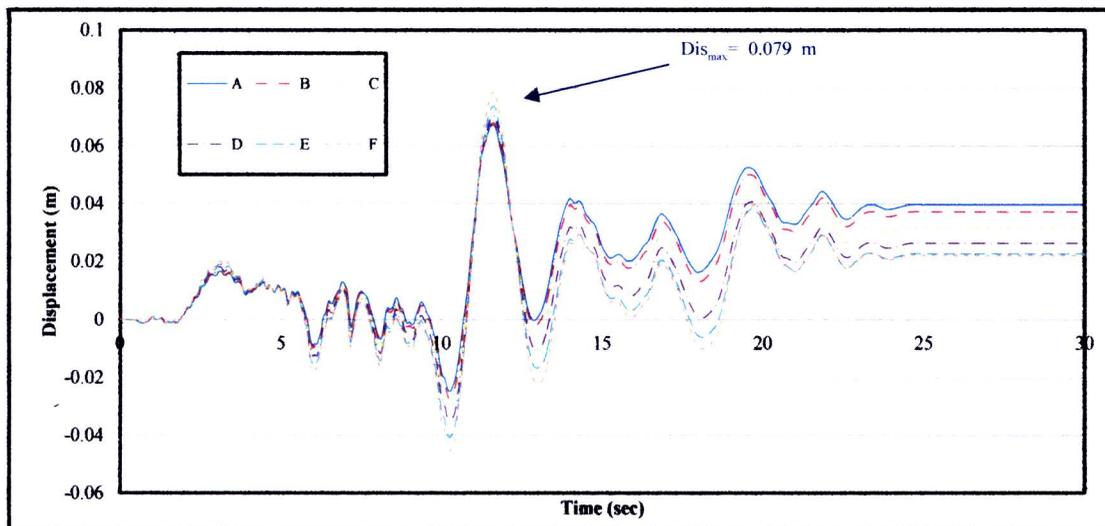


(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1

รูป 4.28 ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1

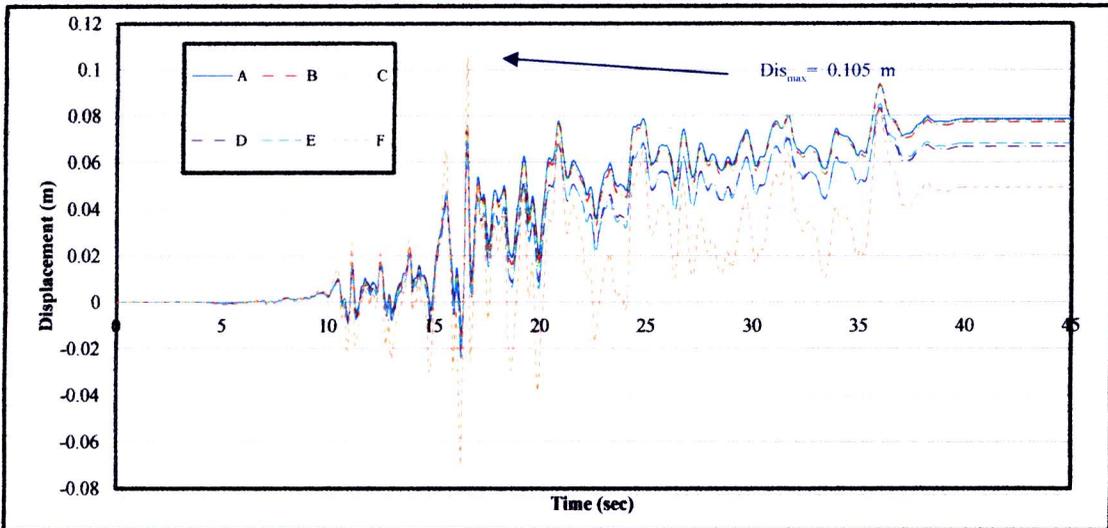


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2

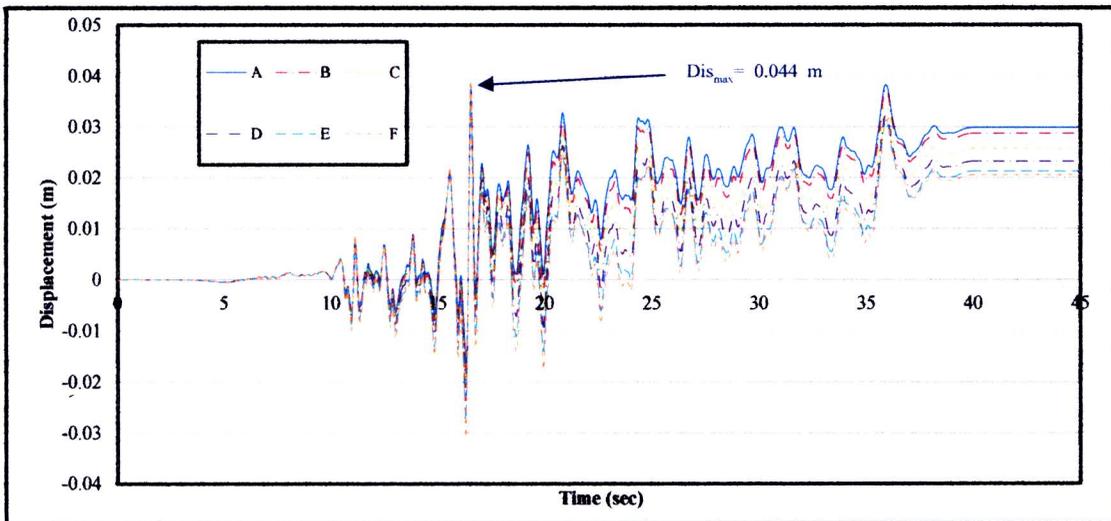


(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2

รูป 4.29 ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2



(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเชื่อมจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

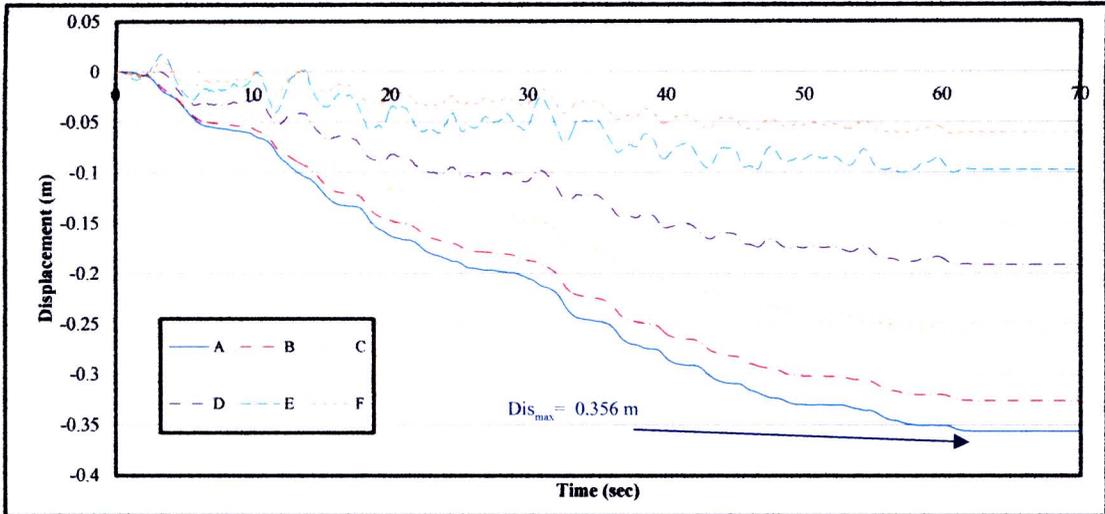


(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเชื่อมจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

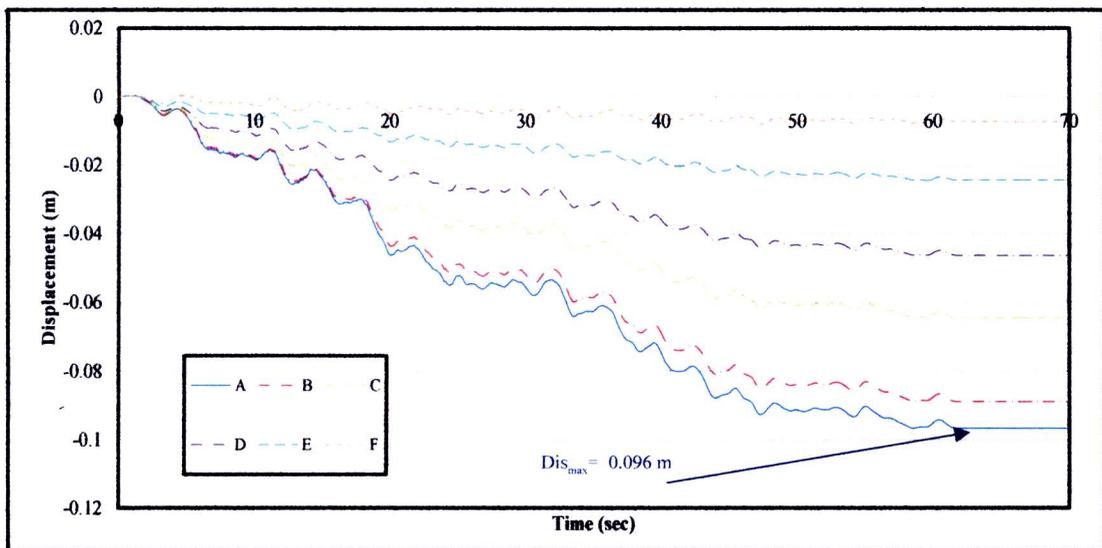
รูป 4.30 ระยะเคลื่อนตัวแนวราบของแนวกลางเชื่อมเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

ผลจากวิเคราะห์การเคลื่อนตัวแนวตั้ง ซึ่งเป็นระดับการทรุดตัวที่ไม่รวมการทรุดตัวจากกรณีการวิเคราะห์แรงสถิตยศาสตร์ ดังรูป 4.31 – 4.33 บริเวณตำแหน่งสันเขื่อนจุด A และใกล้เคียงคือ จุด B (อยู่ตำแหน่งระดับ 31 ม. ต่ำจากสันเขื่อนประมาณ 3 ม. ดังรูป 4.5) มีการตอบสนองการทรุดตัวมากที่สุดจากกรณีแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณี และทั้งสองแบบจำลอง เนื่องจากจุด A และจุด B เป็นจุดที่อยู่บริเวณสันเขื่อนที่มีการทรุดตัวสะสมตามแต่ระดับชั้น มีผลทำให้ส่วนบริเวณสันเขื่อนมีการทรุดตัวมากที่สุด และจุด G เป็นระดับฐานรากเขื่อนมีการตอบสนองการทรุดตัวน้อยที่สุดแถบจะไม่มีเลย การทรุดตัวจุดอื่นของแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะการเคลื่อนตัวคล้ายๆ กันระหว่างแบบจำลองชนิด Gravity turn-on และชนิด Incremental ตามแผ่นดินไหวแต่ละกรณี ซึ่งเป็นเวลาในขณะเดียวกับผลการตอบสนองการเคลื่อนที่แนวราบสูงสุด และพบว่าการวิเคราะห์โดยแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีการทรุดตัว และขยายตัวมากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental แสดงว่าแบบจำลองชนิด Incremental วัสดุคินมีความแน่นจากการบดอัด ต่างกับแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีการทรุดตัวของคินมากกว่าเนื่องจากไม่มีความแน่นมากเท่าแบบจำลองชนิด Incremental ตามหัวข้อ 4.1.1

การเคลื่อนตัวแนวตั้งของเขื่อนจากแบบจำลอง Gravity turn-on มีการขยายตัวของคินช่วงเวลา 3 – 5 วินาทีแรกสำหรับแผ่นดินไหว EQ1 EQ2 และช่วงเวลา 10 - 15 วินาทีสำหรับแผ่นดินไหว EQ3 (ค่าการเคลื่อนตัวแนวตั้ง “ค่าบวก”) ต่างกับแบบจำลองชนิด Incremental ที่มีเฉพาะการทรุดตัว (ค่าการเคลื่อนตัวแนวตั้ง “ค่าลบ”)

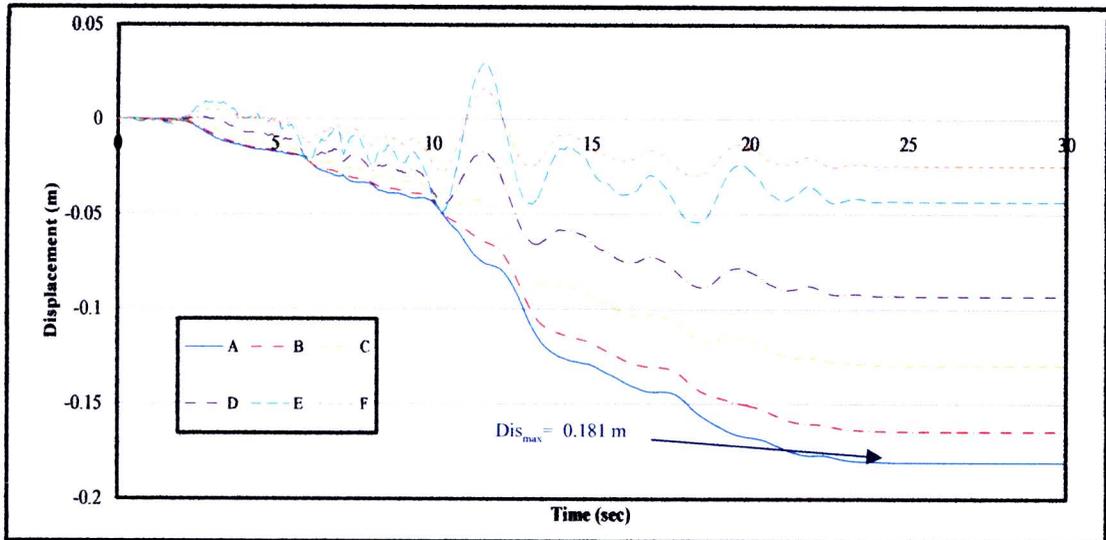


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1

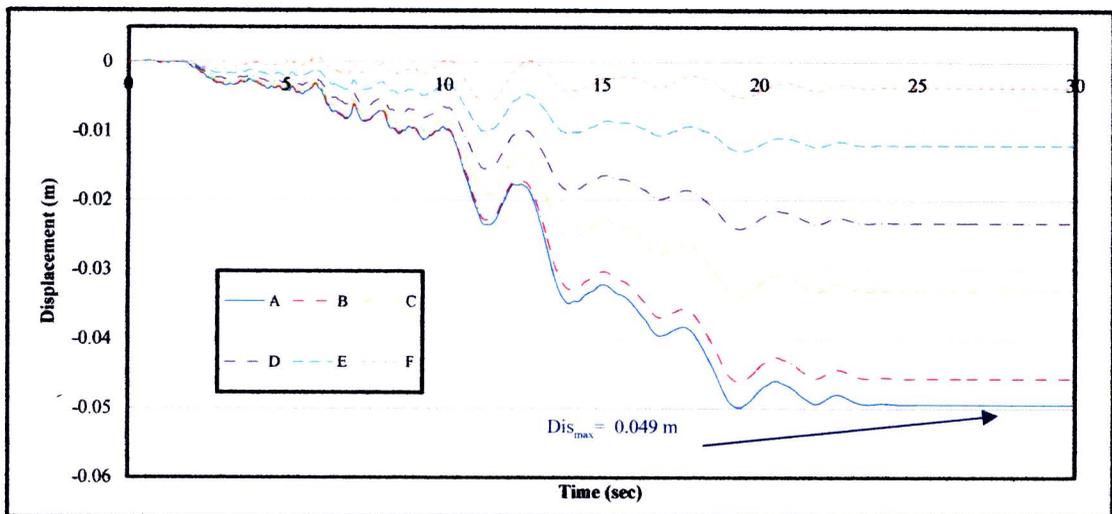


(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1

รูป 4.31 ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1

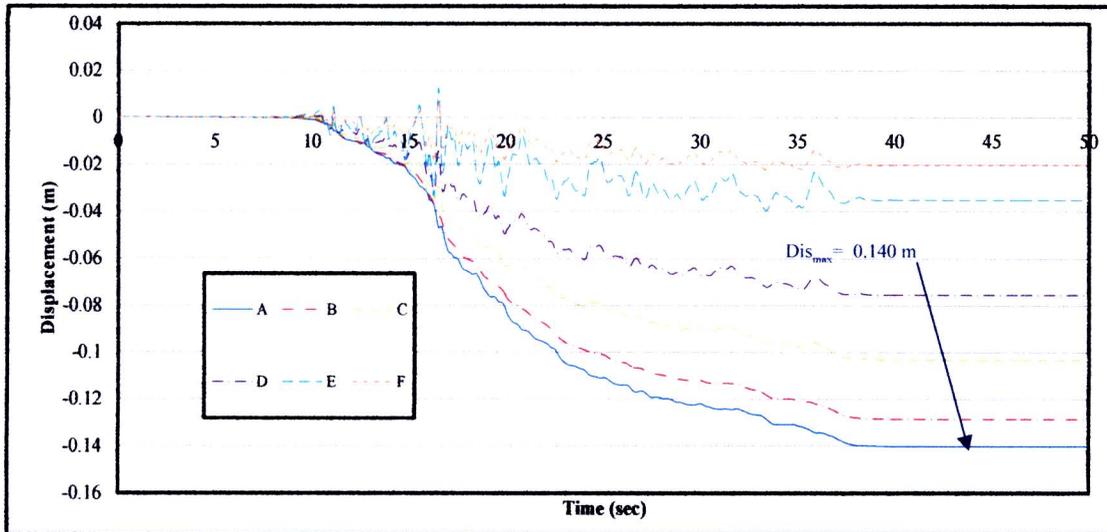


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2

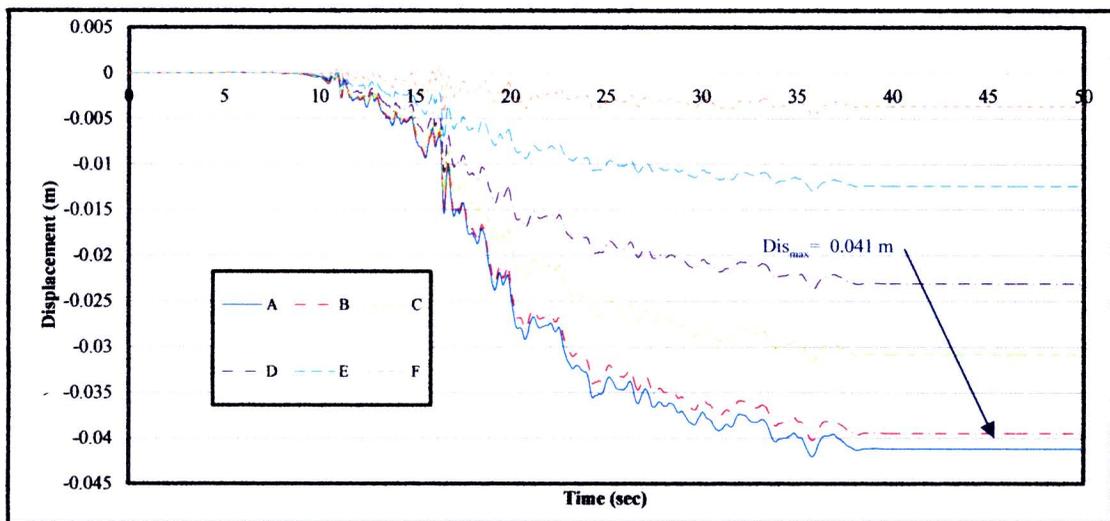


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2

รูป 4.32 ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2



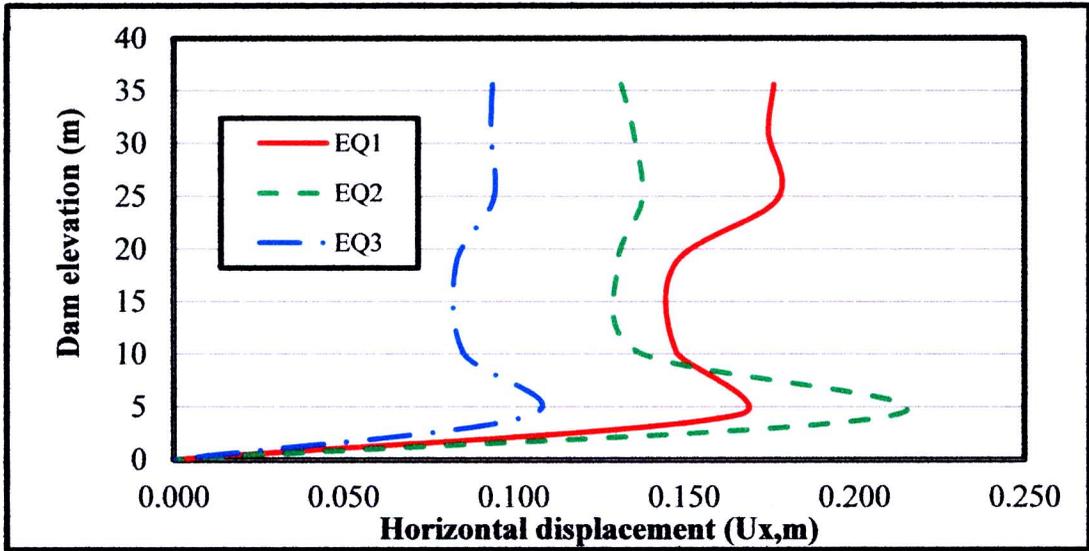
(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Gravity turn-on
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3



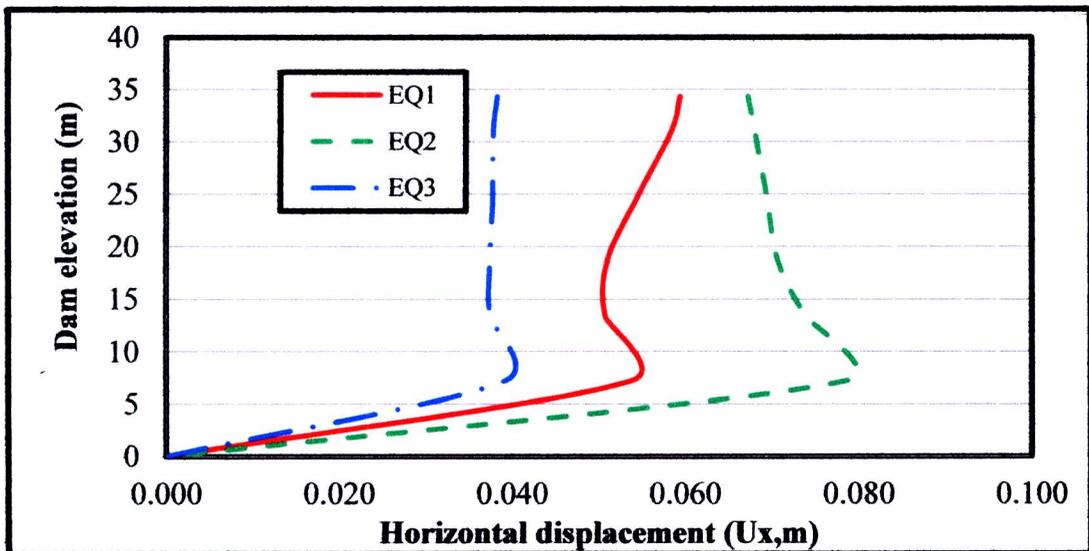
(ข) กราฟระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนจากแบบจำลองชนิด Incremental
เทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

รูป 4.33 ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งของแนวกลางเขื่อนเทียบกับเวลาขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

การเคลื่อนตัวสูงสุดตามระดับความสูงเขื่อนทั้งแนวราบและแนวตั้ง ดังแสดงรูป 4.34 – 4.35 ตามตำแหน่งแนวตัดกลางเขื่อน (รูป 4.5) จากรูป 4.34 - 4.35 พบว่าระยะเคลื่อนตัวแนวราบจากแรงแผ่นดินไหว EQ2 ทำให้เกิดการเคลื่อนตัวมากที่สุดบริเวณเหนือฐานเขื่อนประมาณ 5 เมตร โดยแผ่นดินไหว EQ2 EQ1 และ EQ3 มีผลการตอบสนองจากมากไปน้อยตามลำดับ และการทรุดตัวของแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะแนวโน้มคล้ายกันจากแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณี โดยแผ่นดินไหว EQ1 EQ2 และ EQ3 มีผลการตอบสนองจากมากไปน้อยตามลำดับ และแบบจำลองชนิด Gravity tum-on มีการตอบสนองค่าการเคลื่อนตัวมากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental จากแบบจำลองทั้งสองพบว่า ระยะเคลื่อนตัวแนวราบจะมีค่ามากกว่าบริเวณระดับความสูงประมาณ 1/7 ของความสูงเขื่อนจากฐานเขื่อน ซึ่งบริเวณดังกล่าวอยู่ใกล้กับฐานรากเขื่อนต้านแรงเฉือน (Shear key) ส่วนระยะทรุดตัวเนื่องจากแรงแผ่นดินไหวแบบจำลองทั้งสองมีแนวโน้มคล้ายกันแต่การทรุดตัวของแบบจำลองชนิด Gravity tum-on มีค่ามากกว่า และระดับที่มีการทรุดตัวมากที่สุดของแบบจำลองทั้งสองชนิดอยู่ที่ระดับสันเขื่อน (จุด A สูง 35.6 ม. จากฐานเขื่อน)

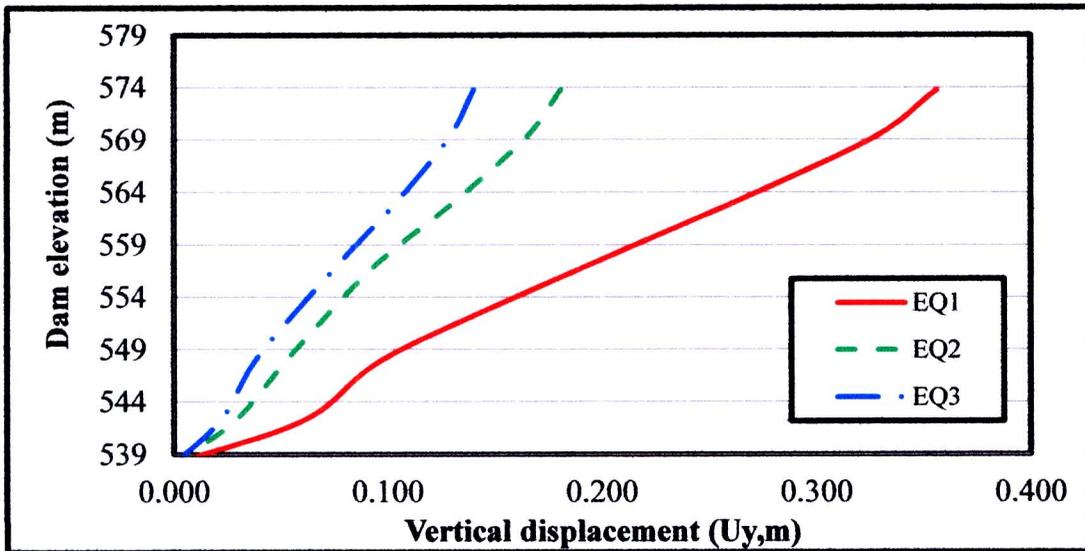


(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบสูงสุดตามระดับความสูงเขื่อนต่างๆ
ของแบบจำลองชนิด Gravity turn on

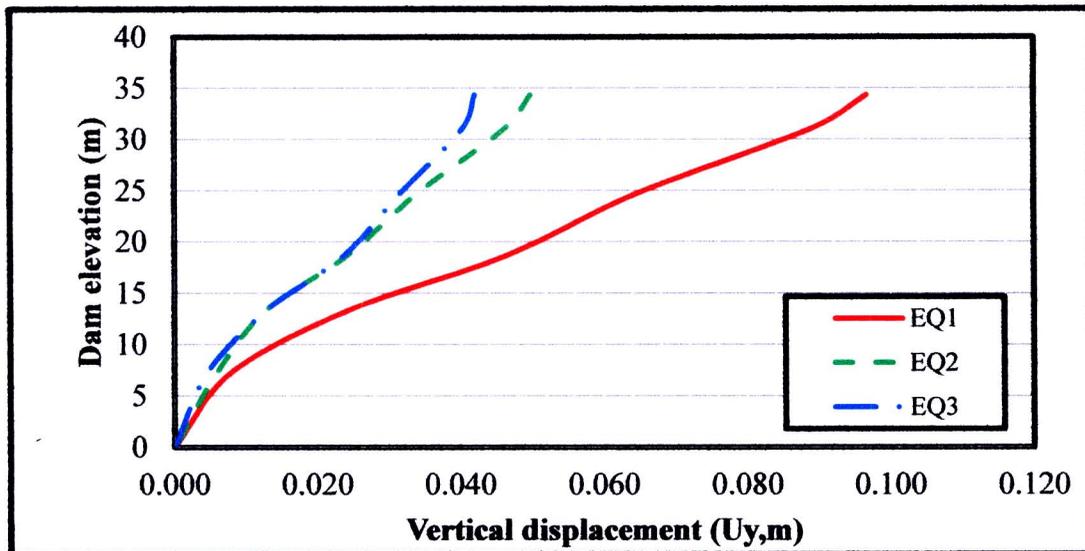


(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวราบสูงสุดตามระดับความสูงเขื่อนต่างๆ ของแบบจำลองชนิด Incremental

รูป 4.34 ระยะเคลื่อนตัวแนวราบที่ระดับความสูงเขื่อนหลังจากแผ่นดินไหว



(ก) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งสูงสุดตามระดับความสูงเขื่อนของแบบจำลองชนิด Gravity turn-on



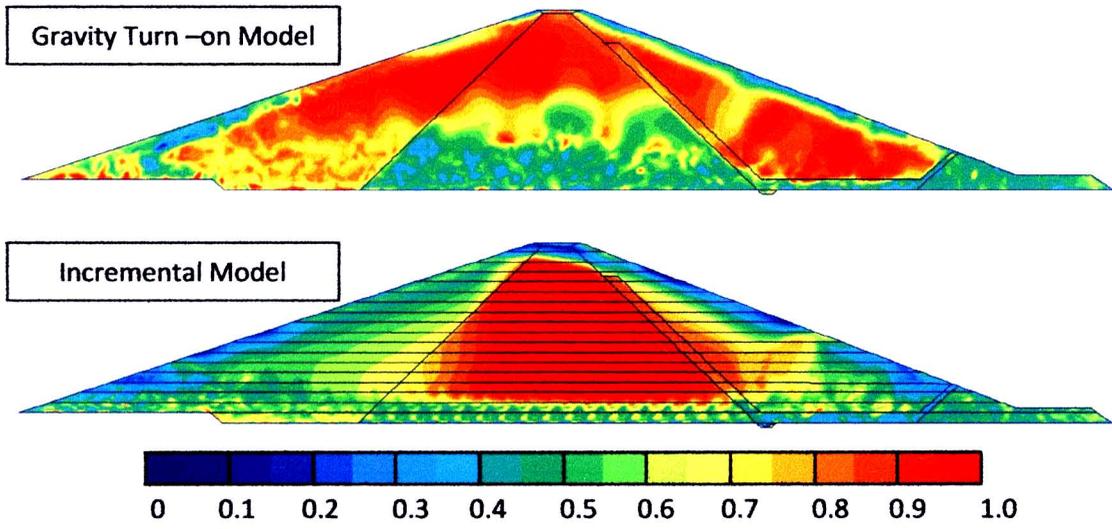
(ข) ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งสูงสุดตามระดับความสูงเขื่อนของแบบจำลองชนิด Incremental

รูป 4.35 ระยะเคลื่อนตัวแนวตั้งที่มากที่สุดตามระดับความสูงเขื่อนหลังจากแผ่นดินไหว

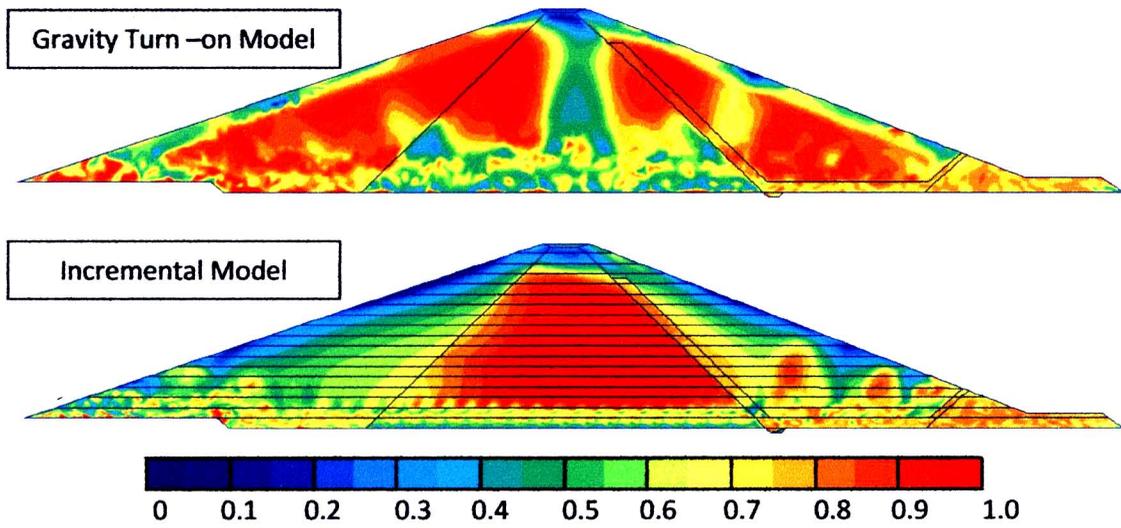
4.2.2.3 ความเค้นและความเครียด

ค่าความเค้นสัมพัทธ์ เป็นค่าใช้อธิบายพฤติกรรมของดินขณะนั้นเข้าใกล้พลาสติกหรือไม่ เมื่อความเค้นสัมพัทธ์เท่ากับ 1 แสดงว่าดินมีพฤติกรรมเป็นพลาสติก (คล้ายดินน้ำมัน) จากการวิเคราะห์แรงแผ่นดินไหวแบบพลศาสตร์ได้แสดงผลค่าความเค้นสัมพัทธ์เป็น 2 เวลา คือ ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สันเขื่อน และหลังแผ่นดินไหวหยุด

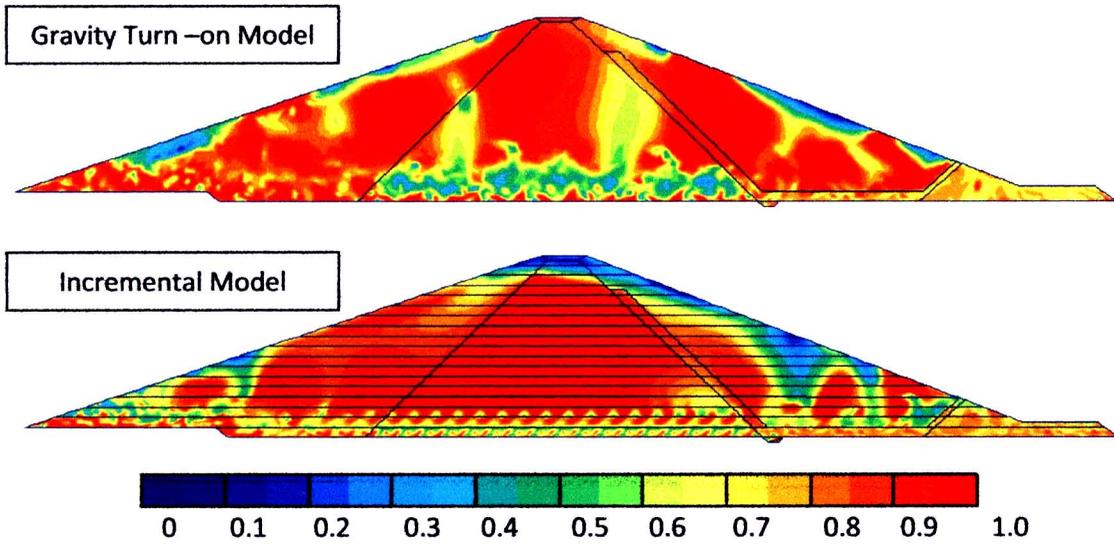
ดังแสดงรูป 4.36 – 4.41 สามารถสรุปได้ว่า แบบจำลอง Gravity turn-on ขณะเกิดแผ่นดินไหวกับหลังแผ่นดินไหว ลักษณะของความเค้นสัมพัทธ์คล้ายคลึงกัน ณ บริเวณที่วัสดุดินเป็นพลาสติก (ส่วนมวลคละ (Random Zone) ทั้งหน้าเขื่อนและหลังเขื่อน และตัวแกนกลางเขื่อนส่วนบน) ขณะเกิดแผ่นดินไหวมีค่าประมาณ 0.85 ~ 1.00 แสดงให้เห็นว่า ดินแกนกลางเขื่อน (Core Zone) ส่วนล่าง มีกำลังรับแรงที่ดีกว่าส่วนมวลคละ (Random Zone) ไม่สอดคล้องกับค่าคุณสมบัติของดินตามตาราง 3.2 สำหรับกรณีความเค้นสัมพัทธ์ขณะเกิดและหยุดแผ่นดินไหวของแบบจำลองชนิด Incremental ค่าวิกฤตเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของบริเวณหินทิ้งท้ายเขื่อน และแกนกลางตัวเขื่อนประมาณ 0.80 ~ 1.00 หากเทียบบริเวณส่วนมวลคละ (Random Zone) และแกนกลางเขื่อน (Core Zone) ส่วนล่าง มีค่าความเค้นประสิทธิผลประมาณ 0.50 ~ 0.70 แสดงให้เห็นว่า วัสดุดินแกนกลาง (Core Zone) เขื่อนมีกำลังรับแรงที่น้อยกว่าส่วนมวลคละ (Random Zone) สอดคล้องกับค่าคุณสมบัติของดินตามตาราง 3.2 คล้ายกับกรณีการวิเคราะห์แบบสถิตยศาสตร์ ความแตกต่างของความเค้นสัมพัทธ์ระหว่างแผ่นดินไหว และหลังหยุดแผ่นดินไหวของแบบจำลองทั้งสองชนิด อยู่ที่บริเวณฐานส่วนมวลคละ (Random Zone) หน้าเขื่อน และแกนกลางเขื่อน (Core Zone) ฐานเขื่อนขณะเกิดแผ่นดินไหวจะเกิดค่าวิกฤตขึ้นทั้งสองบริเวณดังกล่าว และหลังแผ่นดินไหวหยุดค่าความเค้นที่บริเวณดังกล่าวจะมีค่าประมาณ 0.50 – 0.80 แสดงให้เห็นว่าแรงแผ่นดินไหวกระทำ ณ ฐานเขื่อนทำให้ดินบริเวณดังกล่าวต้องรับแรงมากกว่าปกติจนทำให้คุณสมบัติ ขณะนั้นเป็นพลาสติกซึ่งเสี่ยงต่อการพังทลายขณะเกิดแผ่นดินไหว



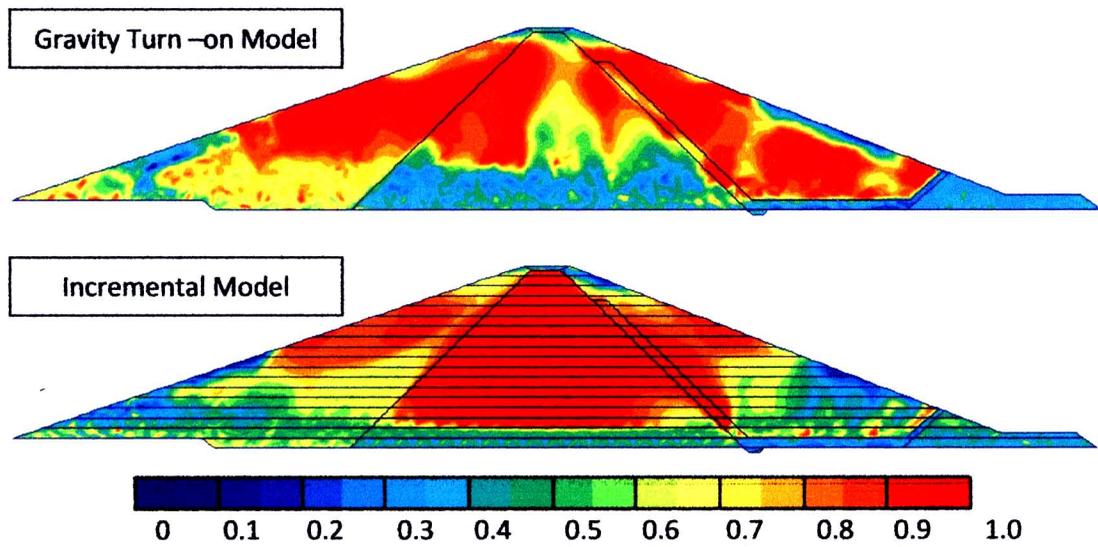
รูป 4.36 เส้นชั้นระดับความเค็มหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1
 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่สั้นเขื่อน ที่เวลา 6.84 วินาที



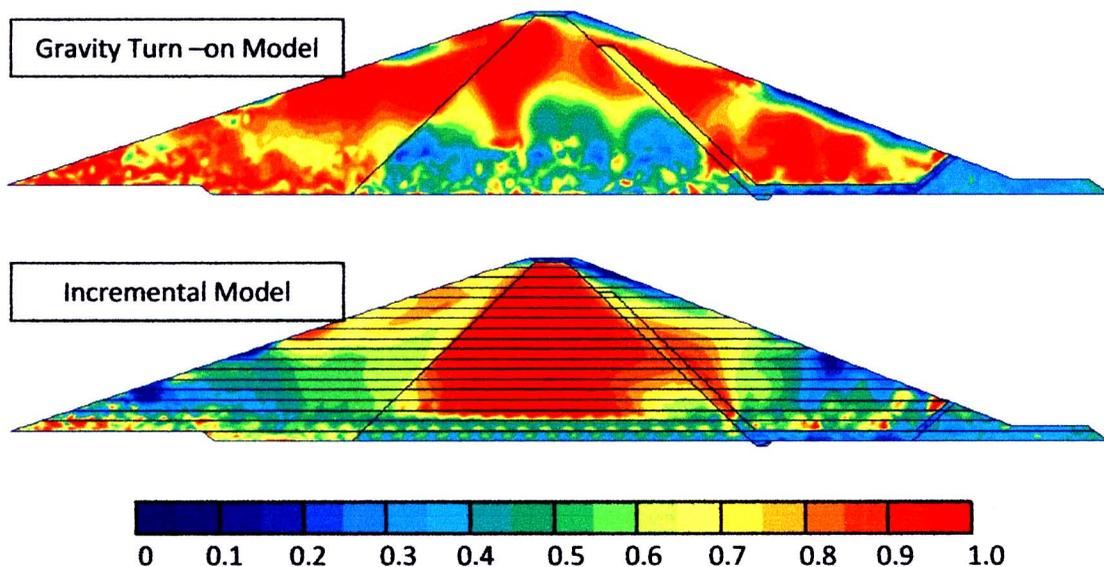
รูป 4.37 เส้นชั้นระดับความเค็มหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2
 ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่ยอดเขื่อน ที่เวลา 7.18 วินาที



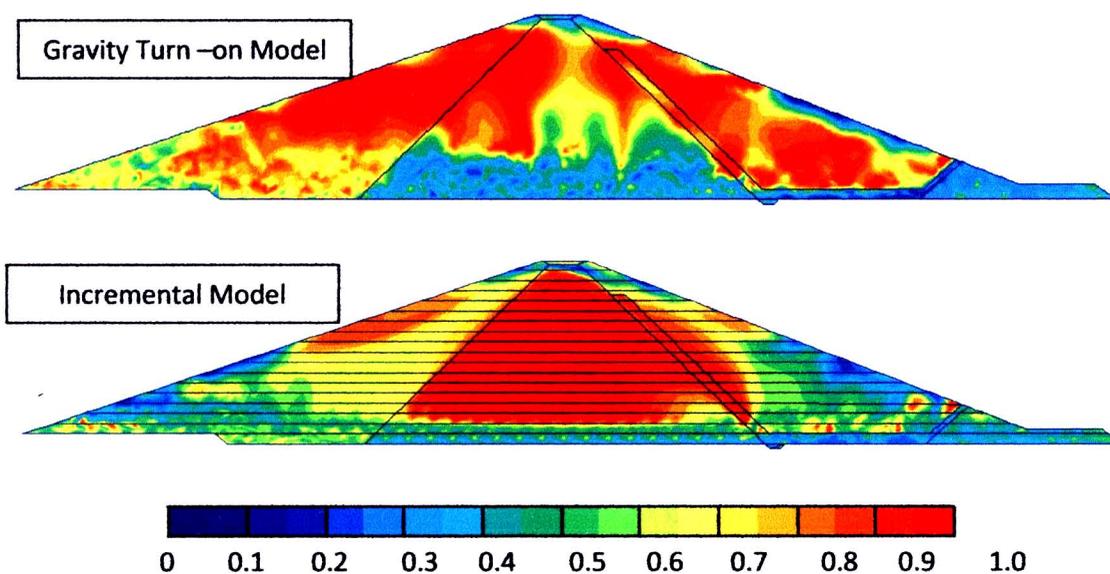
รูป 4.38 เส้นชั้นระดับความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3
ขณะเกิดความเร่งแนวราบสูงสุดที่ยอดเขื่อน ที่เวลา 16.55 วินาที



รูป 4.39 ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหว



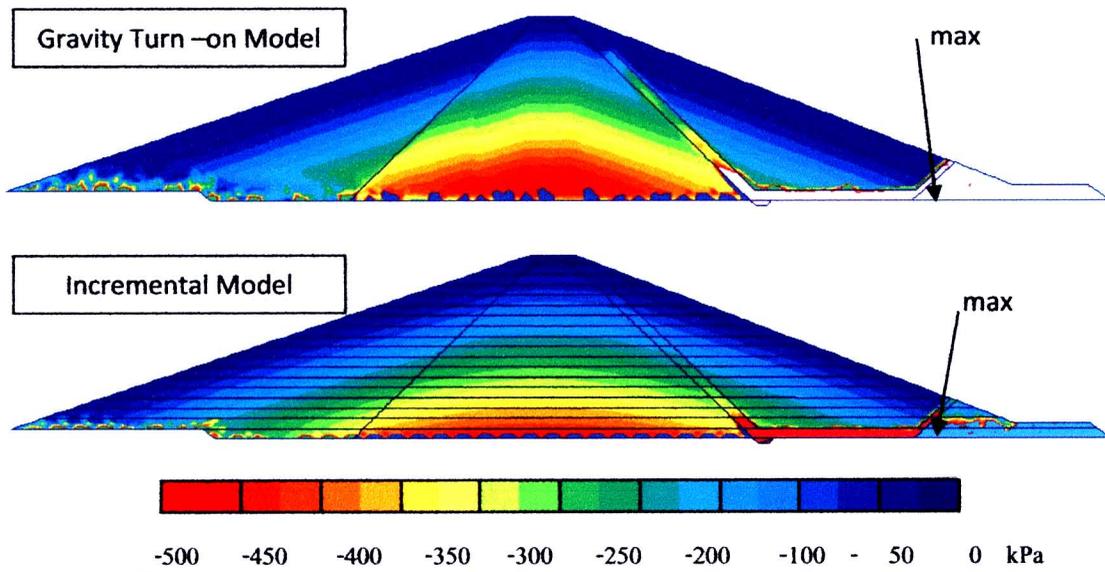
รูป 4.40 ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหว



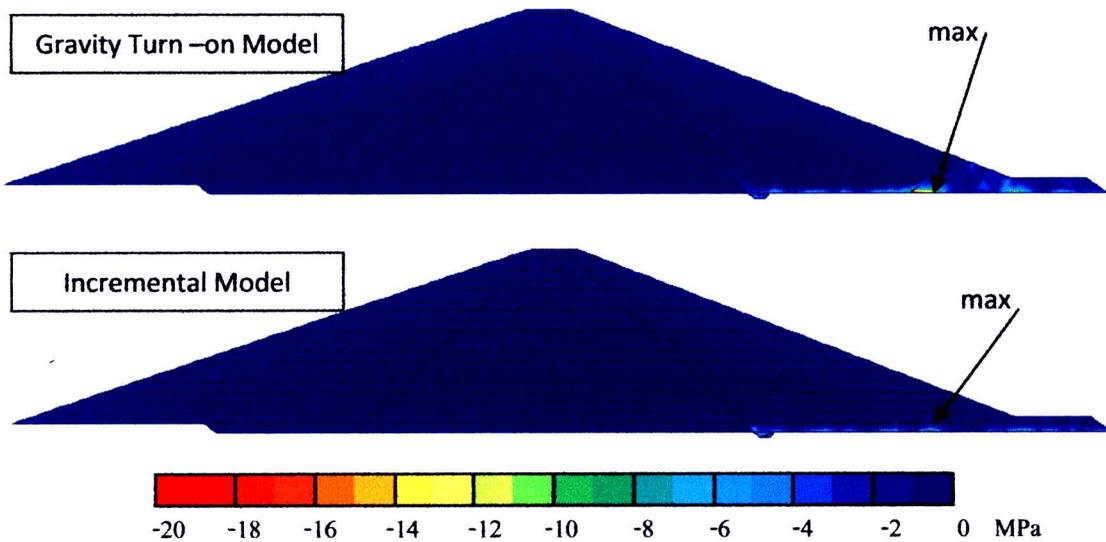
รูป 4.41 ความเค้นหลักประสิทธิผลเชื่อมภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหว

ความเค้นประสิทธิผล เป็นตัวบ่งบอกค่ากำลังของดิน เมื่อเกิดแผ่นดินไหวขึ้นแล้วค่าความเค้นของดินมีค่าเพิ่มขึ้นแสดงว่าดินสามารถรับแรงได้มากขึ้น เป็นผลมาจากการเรียงตัวที่ดีขึ้นของเม็ดดินทำให้มุมไคเลชัน (ψ) มีผลต่อค่า C หรือ ϕ เปลี่ยนไปทำให้ค่าความเค้นประสิทธิผลมีค่ามากขึ้น จากรูป 4.42 – 4.44 พบว่าความเค้นหลักประสิทธิผลหลังแผ่นดินไหวทั้ง 3 แบบ ผลจากแบบจำลองทั้งสองมีลักษณะแนวโน้มรูปร่างเส้นระดับความเค้นประสิทธิผลใกล้เคียงกับการวิเคราะห์ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์ ตำแหน่งที่เกิดค่าสูงสุดใกล้เคียงกันอยู่บริเวณชั้นกรองน้ำติดกับบริเวณดินเขื่อนด้านท้ายน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่ดินมีพฤติกรรมจากมุมไคเลชัน (ψ) สามารถทำให้ดินมีกำลังรับแรงเฉือนได้มากขึ้นจากแรงแผ่นดินไหวที่กระทำบริเวณฐานเขื่อน

โดยแบบจำลอง Gravity turn – on มีความเค้นประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 19,470, 27,520 และ 20,890 kPa และแบบจำลอง Incremental มีความเค้นประสิทธิผลสูงสุดเท่ากับ 11,190, 15,750 และ 11,960 kPa จากแผ่นดินไหว EQ1 EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าดินจากแบบจำลองชนิด Incremental มีแรงอัดกระทำมากที่สุดบริเวณฐาน และมีการกระจายของแรงเป็นลักษณะสมมาตรมาจากการพิจารณาวัสดุบดอัดดินเป็นชั้นๆ สอดคล้องกับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามระดับความลึกของเขื่อน ส่วนแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีลักษณะแรงอัดกระทำมากที่สุดอยู่เหนือระดับฐานเขื่อนเล็กน้อย การกระจายของแรงเป็นลักษณะไม่สมมาตร แต่ความเค้นบริเวณหลังเขื่อนคล้ายกับแบบจำลองชนิด Incremental เหมือนการวิเคราะห์ภายใต้แรงสถิตยศาสตร์ เมื่อเปรียบเทียบกรณีสถิตยศาสตร์กับกรณีพลศาสตร์ผลจากแรงแผ่นดินไหวไม่ได้มีต่อความเค้นประสิทธิผลซึ่งความเค้นประสิทธิผลขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของดิน

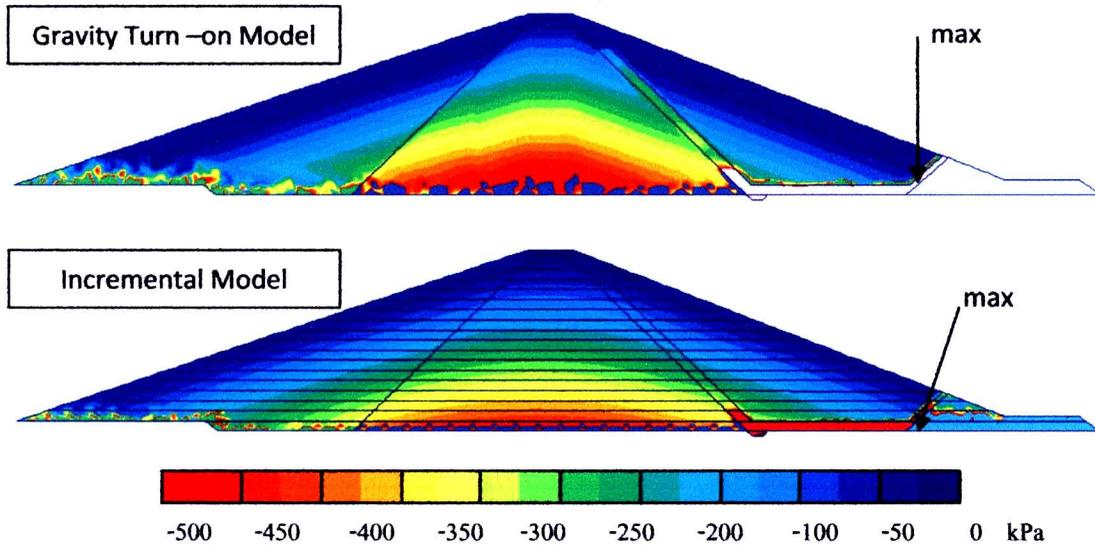


(ก) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหว (เปรียบเทียบกับแรงสถิตยศาสตร์)

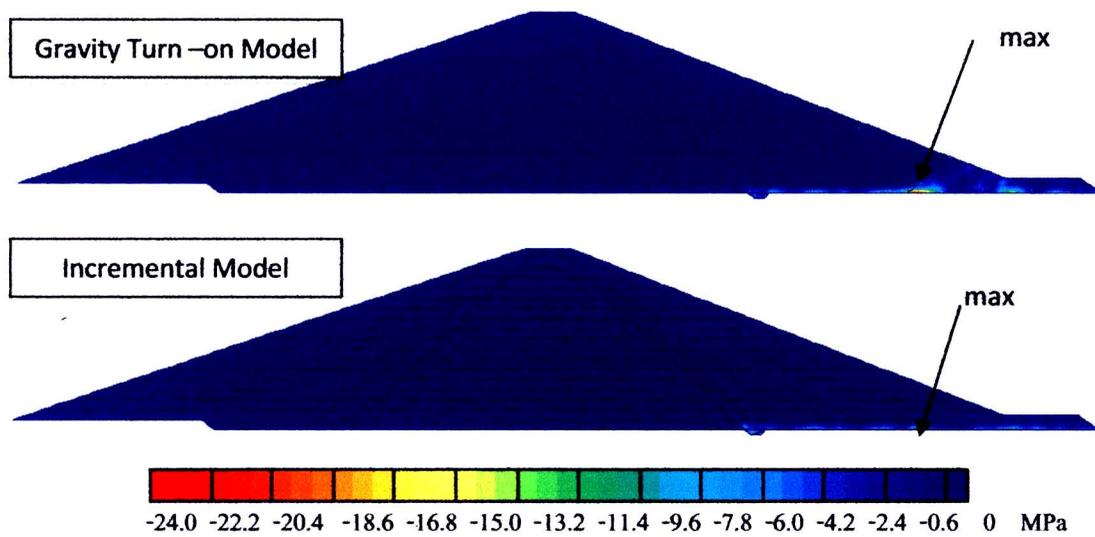


(ข) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหว (ตามขนาดที่เกิดจริง)

รูป 4.42 เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ1 หลังแผ่นดินไหว

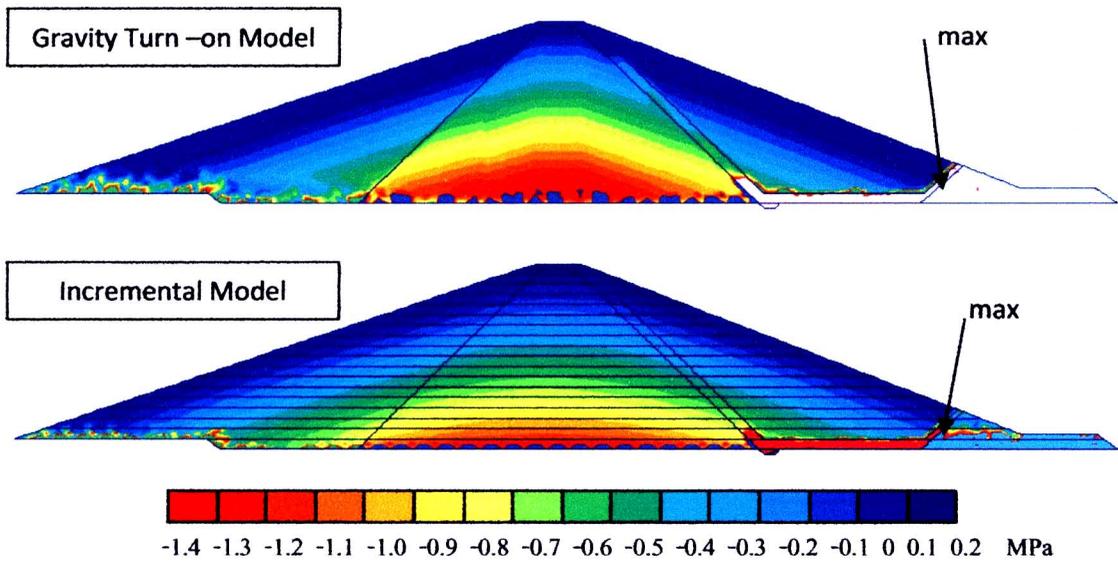


(ก) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิภาพภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหว (เปรียบเทียบกับแรงสถิตยศาสตร์)

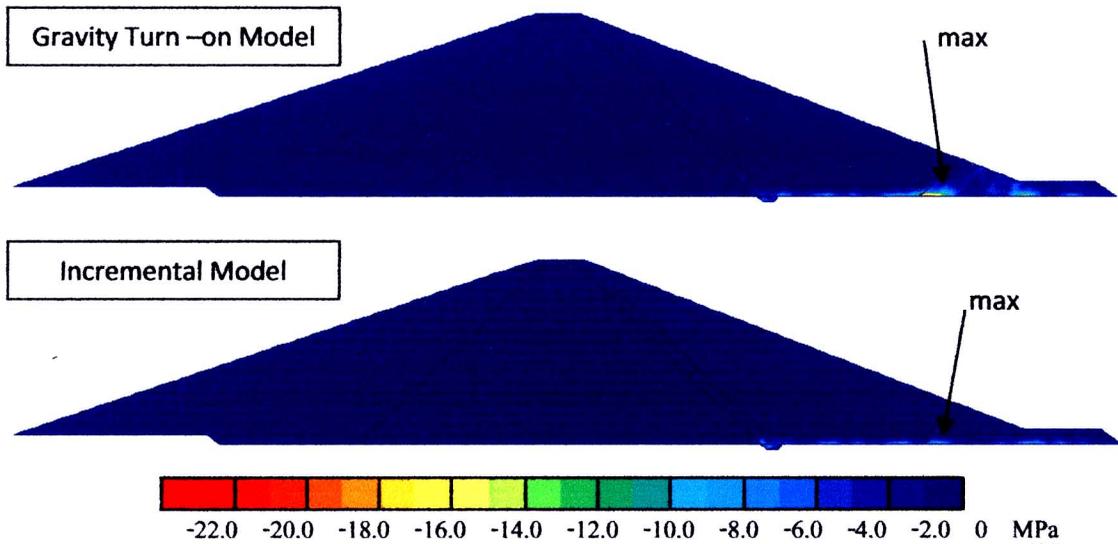


(ข) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิภาพภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหว (ตามขนาดที่เกิดจริง)

รูป 4.43 เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิภาพภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ2 หลังแผ่นดินไหว

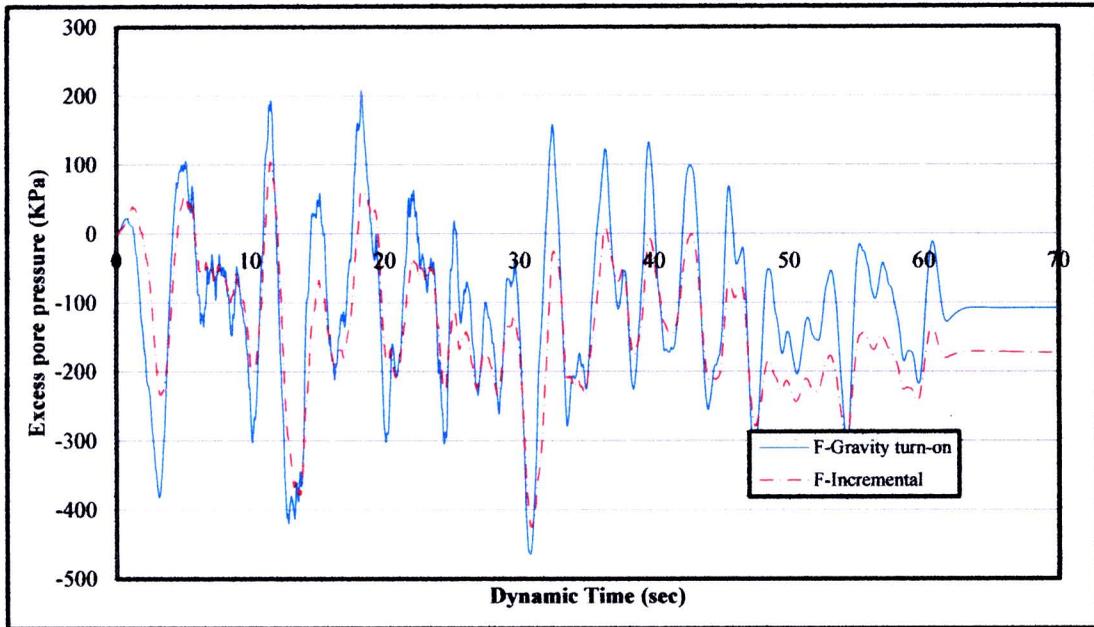


(ก) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหว (เปรียบเทียบกับแรงสถิตยศาสตร์)

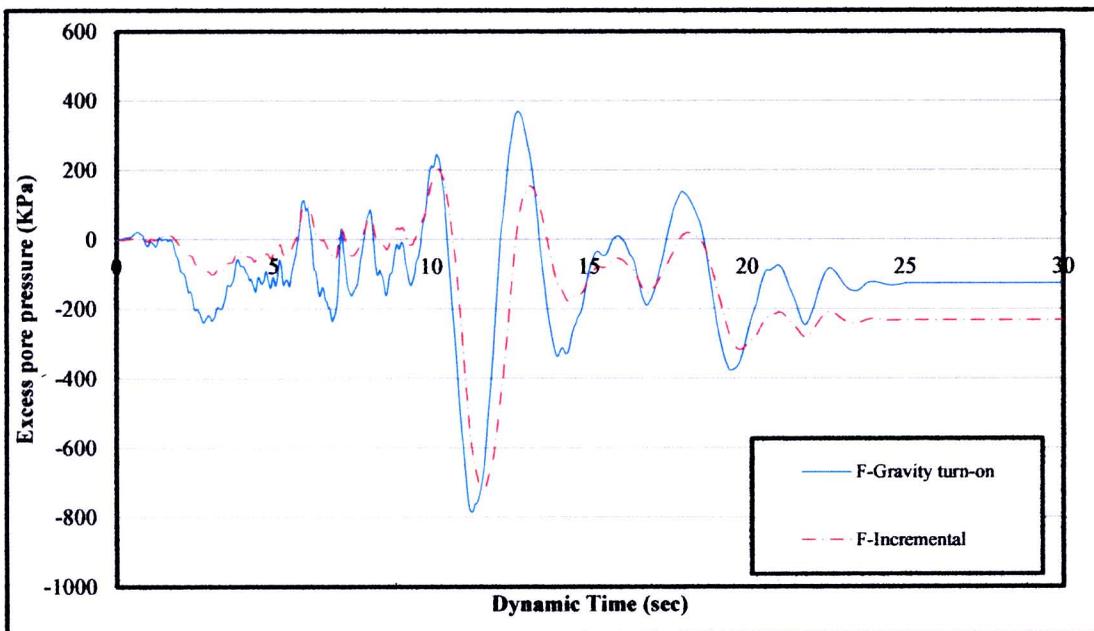


(ข) เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหว (ตามขนาดที่เกิดจริง)

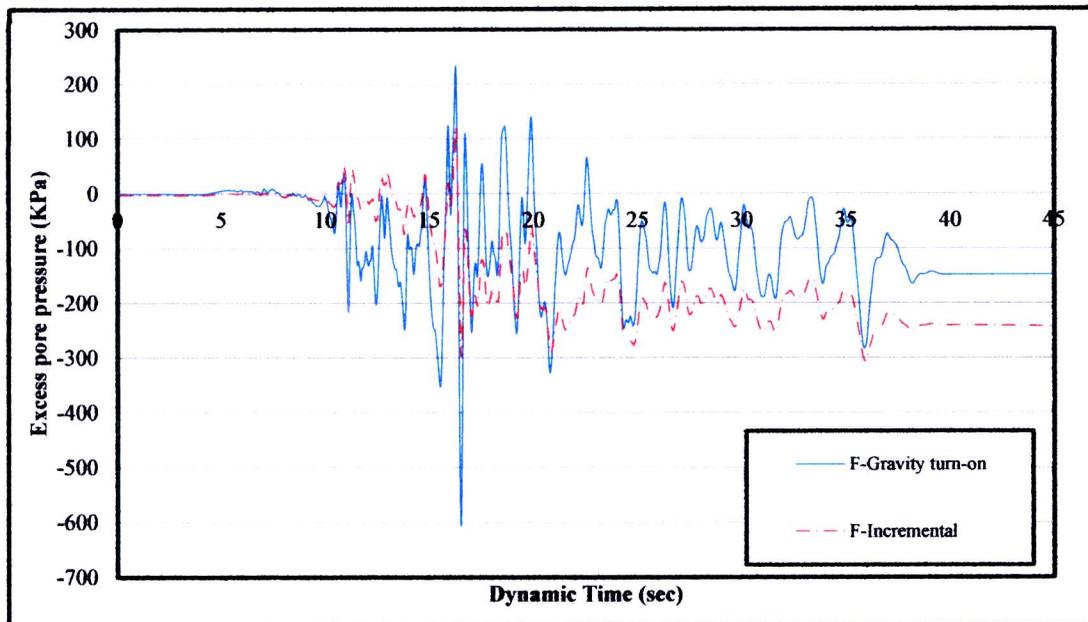
รูป 4.44 เส้นชั้นระดับความเค้นประสิทธิผลภายใต้แรงกระทำแผ่นดินไหว EQ3 หลังแผ่นดินไหว



รูป 4.45 แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ1



รูป 4.46 แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ2

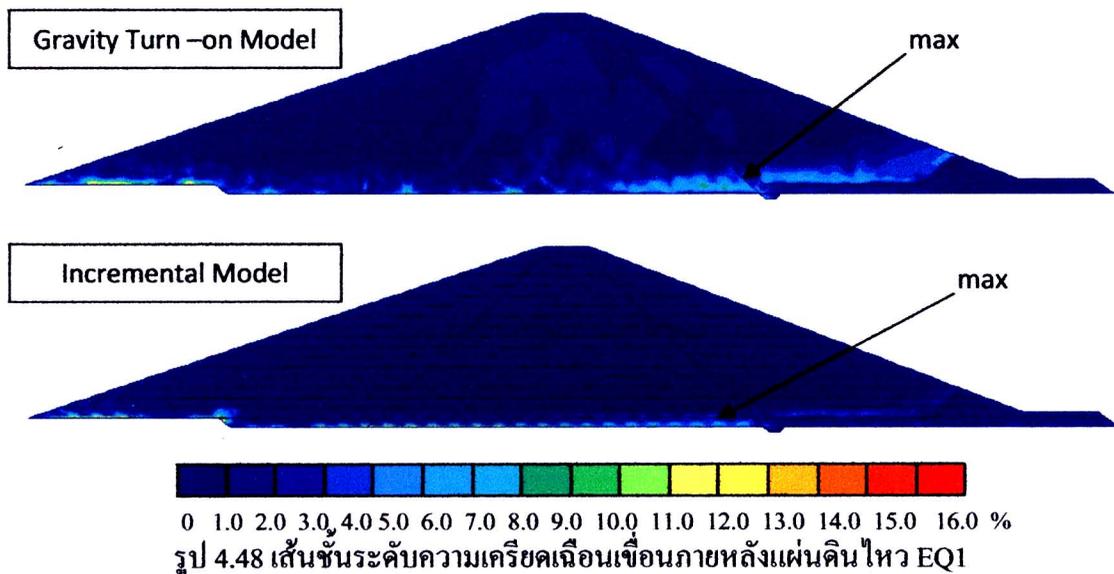


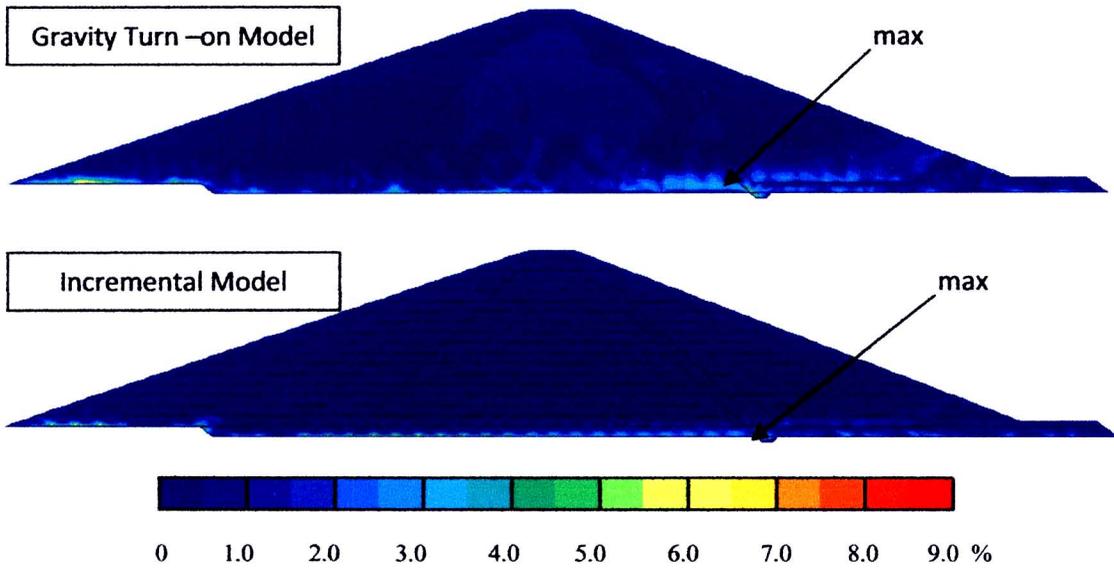
รูป 4.47 แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นที่จุด F ของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองขณะเกิดแผ่นดินไหว EQ3

แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหว จากการศึกษพบว่าบริเวณฐานเขื่อนเป็นจุดที่มีน้ำซึมผ่านตลอดมีความเสี่ยงที่จะเกิดการเหลวตัว (Liquefaction) (กรณีที่เกิดแรงดันน้ำมีค่าสูงขึ้นและค่าความเค้นประสิทธิผลของดินมีค่าเท่ากับศูนย์) จากการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสองแสดงให้เห็นว่า แบบจำลอง Gravity turn - on ค่าแรงดันน้ำขณะเกิดแผ่นดินไหวมีการเปลี่ยนแปลงมากกว่าแบบจำลอง Incremental เนื่องจากแบบจำลอง Gravity turn-on นั้นมีการเคลื่อนไหวขณะเกิดแผ่นดินไหวมากกว่าทำให้มีแรงดันน้ำเปลี่ยนแปลงมากกว่าแต่หลังจากแผ่นดินไหวแล้วกลับมีแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่าแบบจำลอง Incremental แสดงให้เห็นว่าดินของแบบจำลองชนิด Incremental นั้นมีการบดอัดแต่ละชั้นมีความแน่นและแข็งแรง ทำให้น้ำไหลผ่านเข้าตัวเขื่อนได้ยากจึงมีแรงดันน้ำต่ำขณะเกิดแผ่นดินไหวและมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงท้ายแผ่นดินไหวมีลักษณะสม่ำเสมอกว่าแบบจำลอง Gravity turn-on ดังรูป 4.45 -4.47 แรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้น ขณะเกิดแผ่นดินไหว (ค่าแรงดันน้ำตามโปรแกรมมีค่าเป็นลบ) จุดที่แสดงค่าแรงดันน้ำเป็นจุดที่อยู่บริเวณฐานเขื่อน จากแบบจำลอง Gravity turn-on ค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มมากที่สุดที่บริเวณฐาน(จุด F สูงจากฐานประมาณ 5 ม.) เท่ากับ 464.27, 786.02 และ 606.86 kPa โดยแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ ส่วนแบบจำลอง Incremental ค่าแรงดันน้ำที่เพิ่มที่ฐานเท่ากับ 424.94, 722.671 และ 306.23 kPa โดยแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ จากรูปเส้นชั้นความเค้นประสิทธิผล

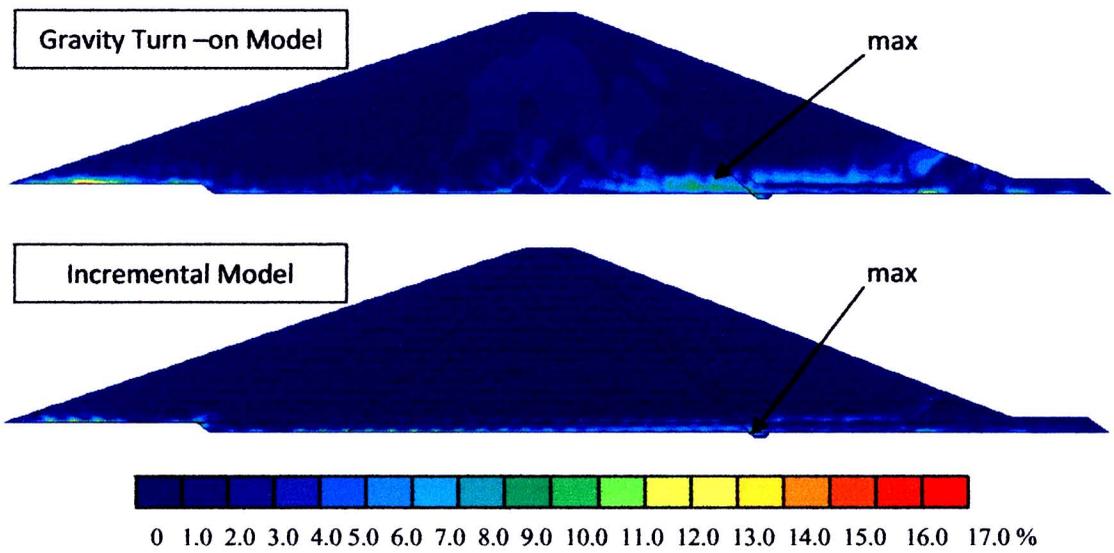
ของเขื่อนหลังแผ่นดินไหวไม่มีบริเวณใดได้ฐานที่มีค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับศูนย์ ดังนั้นจึงไม่เกิดการเหลวตัว (Liquefaction) ภายใต้การวิเคราะห์แบบจำลองนี้

ร้อยละความเครียดเฉือน จากรูป 4.48 – 4.50 พบว่าทั้งสองแบบจำลองมีบริเวณที่เกิดร้อยละความเครียดเฉือนสูงสุดเป็นบริเวณเดียวกันที่บริเวณฐานเขื่อน โดยค่าร้อยละความเครียดเฉือนของแบบจำลองชนิด Gravity turn-on มีค่ามากกว่าแบบจำลองชนิด Incremental ประมาณ 2 เท่า แสดงถึงแบบจำลอง Incremental ดินมีการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่าเนื่องจากการพิจารณาการบดอัดดินทำให้ดินมีความแน่นมากกว่า ค่าสูงสุดของร้อยละความเครียดเฉือนของแบบจำลอง Gravity Turn-on มีค่าเท่ากับ 13.19%, 8.10% และ 5.32% มีการเปลี่ยนแปลงระนาบความเครียดจากแรงเฉือนเป็นมุม 0.1319 rad (7.56°), 0.0810 rad (4.64°) และ 0.0532 rad (3.05°) เทียบกับแนวตั้ง และแบบจำลอง Incremental มีค่าเท่ากับ 15.43%, 7.48% และ 5.34% มีการเปลี่ยนแปลงระนาบความเครียดจากแรงเฉือนเป็นมุม 0.1543 rad (8.84°), 0.0748 rad (4.28°) และ 0.0534 rad (3.06°) เทียบกับแนวตั้ง โดยเกิดแรงดึงบริเวณฐานด้านเหนือน้ำ และเกิดแรงอัดที่บริเวณฐานด้านท้ายน้ำ ส่วนบริเวณจากแผ่นดินไหว EQ1, EQ2 และ EQ3 ตามลำดับ เกิดที่บริเวณฐานรากเชื่อมกับชั้นหินฐานเนื่องจากวัสดุที่อยู่โดยรอบในทั้งสองตำแหน่งเป็น ฐานรากชั้นหินซึ่งมีความแข็งแรงมาก และดินชั้นทรายกรองของเขื่อนซึ่งมีความแน่นมากขึ้นจากอิทธิพลของมุมไคเลขัน (ψ)





รูป 4.49 เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนเชื่อมภายหลังแผ่นดินไหว EQ2



รูป 4.50 เส้นชั้นระดับความเครียดเฉือนเชื่อมภายหลังแผ่นดินไหว EQ3

4.2.2.4 อัตราส่วนความปลอดภัย

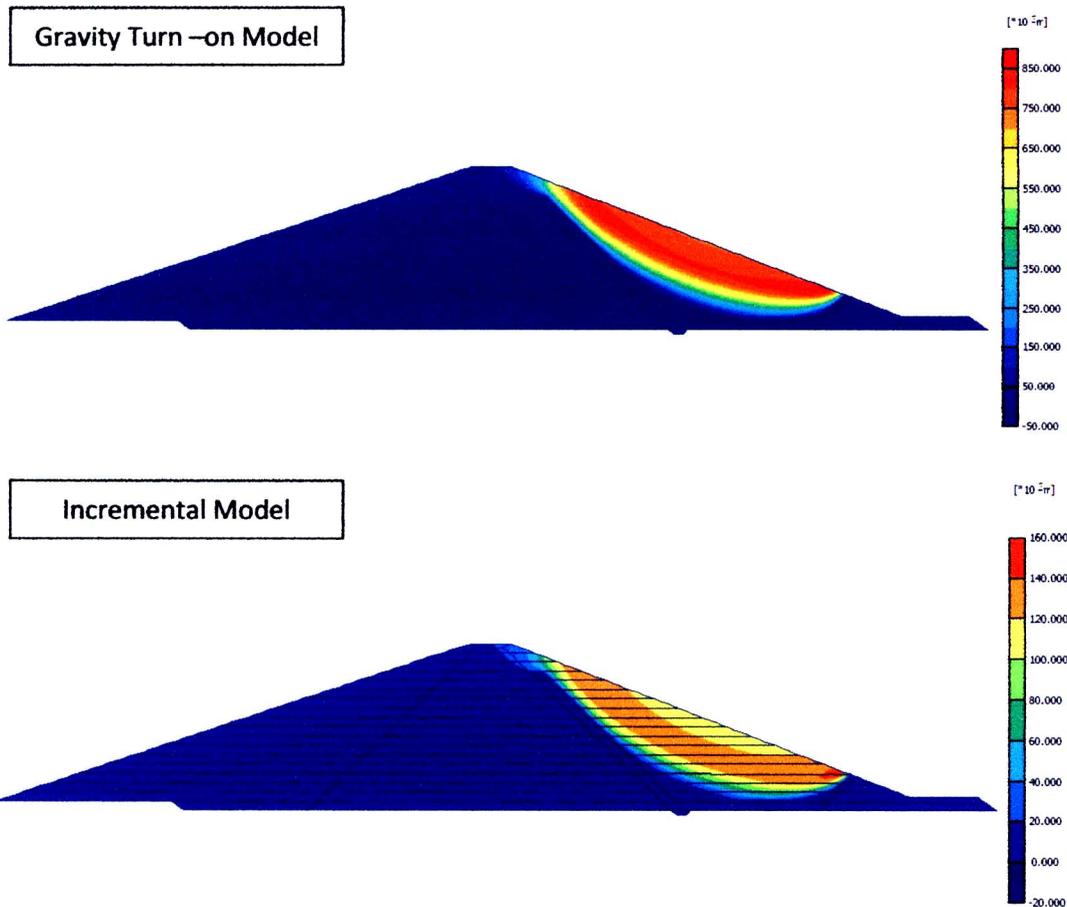
อัตราส่วนความปลอดภัยหลังจากแผ่นดินไหวของทั้งสองแบบจำลอง ดังแสดงในตาราง 4.3 มีค่าลดลงเล็กน้อยเทียบกับกรณีสถิตยศาสตร์ของแบบจำลอง Gravity turn-on ส่วนแบบจำลอง Incremental มีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกรณีสถิตยศาสตร์ โดยที่ลักษณะของระนาบการเคลื่อนตัวของมวลดินทั้งสองแบบจำลอง เกิดที่บริเวณลาดชันทางด้านท้ายน้ำบนชั้นกรองน้ำจากแผ่นดินไหวทั้ง 3 แบบ ดังตัวอย่างรูป 4.51 ผลของอัตราส่วนความปลอดภัยที่มีค่าลดลงมาจากการเรียงตัวที่แย่งของเม็ดดินส่งผลให้ค่า C หรือ ϕ เปลี่ยนไปจากเดิม

ตาราง 4.3 เปรียบเทียบ อัตราส่วนความปลอดภัยจากแบบจำลองทั้งสองแบบ ก่อนและหลังแผ่นดินไหว

| Factor of Safety | Static case | Dynamic case | | | | | |
|------------------|-------------|--------------|--------|-------|--------|-------|--------|
| | | EQ1 | | EQ2 | | EQ3 | |
| Model | F.S. | F.S. | % | F.S. | % | F.S. | % |
| Gravity Turn-on | 1.587 | 1.563 | -1.535 | 1.558 | -1.861 | 1.550 | -2.387 |
| Incremental | 1.940 | 1.938 | -0.103 | 1.932 | -0.414 | 1.929 | -0.570 |

4.3 เปรียบเทียบแบบจำลอง

จากการวิเคราะห์แบบจำลองทั้งสองชนิด กรณีภายใต้แรงสถิตยศาสตร์แบบจำลอง Gravity turn-on มีค่าอัตราส่วนความปลอดภัยน้อยกว่าแบบจำลอง Incremental ส่วนระยะการเคลื่อนตัวของแบบจำลอง Incremental มีค่ามากกว่าแบบจำลอง Gravity turn-on ในทิศแนวตั้ง ส่วนในแนวราบมีระยะการเคลื่อนตัวใกล้เคียง สำหรับการวิเคราะห์กรณีภายใต้แรงพลศาสตร์ ผลการวิเคราะห์จากแบบจำลอง Gravity turn-on ได้แก่ ค่าความเร่ง, ระยะเคลื่อนตัว และแรงดันน้ำ มีค่ามากกว่าแบบจำลอง Incremental เช่นกัน เพราะฉะนั้นในการวิเคราะห์หาความปลอดภัย และระยะเคลื่อนตัวของเขื่อน ดังนั้นกรณีที่มีผลอันตรายสุดเหมาะแก่การนำไปประเมินความปลอดภัย ซึ่งได้แก่แบบจำลอง Gravity turn-on



รูป 4.51 ระบายพิบัติของเขื่อนจากแบบจำลองทั้งสองแบบภายใต้แรงแผ่นดินไหว EQ1

4.4 ผลที่เกิดจากแผ่นดินไหวที่ใช้ในการวิเคราะห์

แผ่นดินไหวที่ใช้ในงานวิจัยมี 3 แบบ คือ แผ่นดินไหวที่มีระยะเวลาสั้นยาวนาน, แผ่นดินไหวที่มีระยะเวลาสั้นสั้น และแผ่นดินไหวที่ลักษณะคลื่นแรงกระแทกฉับพลัน (Impulse load)

ผลต่อความเร่งและระยะการเคลื่อนตัว จากผลการศึกษาพบว่าแผ่นดินไหวที่ให้ค่าความเร่งมากที่สุดเป็นแผ่นดินไหวที่มีลักษณะคลื่นแรงกระแทกฉับพลัน (Impulse load) ส่วนแผ่นดินไหวที่ให้ระยะการเคลื่อนตัวมากที่สุดเป็นแผ่นดินไหวที่มีระยะเวลาการสั้นยาวนาน ถึงแม้ว่าค่าอัตราเร่งสูงสุดแนวราบ (PGA, g) ของแผ่นดินไหวจะน้อยหากมีระยะเวลาการสั้นที่ยาวนานก็สามารถทำให้เกิดระยะเคลื่อนตัวที่มากกว่าแผ่นดินไหวที่มีค่าอัตราเร่งสูงสุดแนวราบ (PGA, g) สูงกว่าได้

ผลต่อแรงดันน้ำ จากผลการศึกษาพบว่าแรงดันน้ำที่เพิ่มขึ้นขณะเกิดแผ่นดินไหวมีค่าเปลี่ยนแปลงตามความรุนแรงของแผ่นดินไหวยิ่งแผ่นดินไหวที่มีค่าการสั่นไหวที่รุนแรง แรงดันน้ำก็จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามความรุนแรงนั้นด้วย ประกอบกับลักษณะรูปร่างของแบบจำลองด้วย โดยที่แบบจำลองชนิด Gravity turn-on จะสามารถต้านแรงดันน้ำได้น้อยกว่าแบบจำลอง Incremental ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำขณะเกิดแผ่นดินไหวมากกว่า เนื่องจากแบบจำลองชนิด Incremental มีการทรุดตัวสะสมลงมาเป็นขั้นๆ ทำให้ดินแน่นกว่าแบบจำลองชนิด Gravity turn-on

ผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัย จากผลการศึกษาค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของเขื่อนทั้งสองแบบจำลองและแผ่นดินไหวทั้ง 3 กรณีพบว่าแผ่นดินไหวไม่มีผลต่ออัตราส่วนความปลอดภัย เนื่องจากค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก