

บทที่ 2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

การหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธีตรวจวัดสภาพการสั่นไหวของอาคารนั้นสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมปฏิบัติ คือ การตรวจวัดการสั่นไหวโยกตัวของอาคารในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากแรงกระทำหรือการกระตุ้นจากสิ่งแวดล้อมที่มีอยู่รอบๆอาคารและภายในอาคาร เช่น แรงแลม การสั่นสะเทือนของพื้นดินเนื่องจากการจราจร กิจกรรมของผู้คนในอาคาร ฯลฯ โดยทั่วไปแล้ว การสั่นไหวในลักษณะนี้จะมีระดับที่ต่ำจนผู้คนทั่วไปในอาคารไม่สามารถรู้สึกได้แต่สามารถตรวจวัดได้ด้วยอุปกรณ์วัดการสั่นสะเทือนที่มีความไวสูง

การตรวจหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจาก Ambient Vibration ได้เริ่มขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1964 โดย Crawford และ Ward (1964) ได้นำอุปกรณ์วัดคลื่นแผ่นดินไหว (Seismometer) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดความเร็วของการสั่นสะเทือน (Velocity Transducer) ในระดับต่ำได้มาใช้ การบันทึกสัญญาณวัดและวิเคราะห์ผลทำในระบบอนาล็อก ซึ่งค่อนข้างยุ่งยากไม่สะดวกในทางปฏิบัติ ต่อมาในปี ค.ศ. 1970 Trifunac (1970) ได้ปรับปรุงระบบการบันทึกสัญญาณวัดและวิเคราะห์ผลให้เป็นระบบดิจิทัล และได้นำเทคนิคที่เรียกว่า Fast Fourier Transform (FFT) มาใช้แปลงสัญญาณวัดให้เป็น Fourier Amplitude Spectrum ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนผสมของคลื่นความถี่ต่างๆในสัญญาณวัดได้อย่างชัดเจน เส้นกราฟ Spectrum นี้จะปรากฏมียอดแหลมที่ทุกๆตำแหน่งที่ตรงกับความถี่ธรรมชาติของอาคาร (อาคารแต่ละหลังมีการสั่นไหวหลายรูปแบบ โดยแต่ละรูปแบบจะมีความถี่ธรรมชาติ 1 ค่า และอัตราความหน่วง 1 ค่า) ทำให้สามารถตรวจหาค่าความถี่ธรรมชาติได้โดยง่าย ค่าอัตราส่วนความหน่วงหาได้จากความกว้างของยอดแหลมด้วยวิธีที่เรียกว่า Half-power Bandwidth ส่วนรูปแบบการสั่นไหว (Vibration Mode Shape) สามารถคำนวณได้จาก สัดส่วนความสูงของยอดแหลมของ spectrum ที่ได้จากการวัดการสั่นสะเทือนของอาคารในหลายตำแหน่งพร้อมกัน (Fourier Spectral Ratio)

วิธีของ Trifunac เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย และเป็นที่ยอมรับกันว่า วิธีนี้สามารถนำไปใช้หาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆได้เป็นอย่างดีในกรณีที่ความถี่ธรรมชาติของการสั่นไหวรูปแบบต่างๆ มีค่าที่กระจายตัวแยกห่างออกจากกัน ซึ่งอาคารส่วนใหญ่มักจะเป็นเช่นนี้ แต่ในบางกรณีที่อาคารมีค่าความถี่ธรรมชาติบางค่าใกล้เคียงกันมาก วิธีของ Trifunac อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น จึงได้มีการพัฒนาวิธีใหม่ๆขึ้นมาอีกหลายวิธีเพื่อแก้ปัญหาในกรณีเช่นนี้ ตัวอย่างเช่น วิธี Curve-fitting ของ Meyyappa (1981) วิธี Rational Fraction Polynomial ของ Richardson (1982) เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการใหม่ๆในการวิเคราะห์สัญญาณวัดเพื่อหาค่าอัตราส่วนความหน่วง เช่น วิธี Auto Correlation โดย Taoka (1975) วิธี Random Decrement โดย Cole (1973) วิธี Ibrahim Time Domain โดย Ibrahim และ Pappa

(1981) วิธี Natural Excitation Technique/ Eigensystem Realization Algorithm (NExT/ERA) โดย Juang (1994) เป็นต้น วิธีต่างๆเหล่านี้มีจุดเด่นและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน การนำมาประยุกต์ใช้จึงจำเป็นต้องพิจารณาเลือกวิธีที่เหมาะสมกับสถานการณ์

ในปี ค.ศ. 2000 สมจิต (2000) ได้เริ่มนำวิธีของ Trifunac มาตรวจหาคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของโครงสร้างต่างๆในประเทศไทย ได้แก่ สะพานคนเดินเท้า (Pedestrian Bridge) พื้นอาคารขนาดใหญ่ของโรงยิมเนเซียม และอาคารสูง อุปกรณ์วัดที่นำมาใช้เป็นเครื่องวัดความเร่งของการสั่นสะเทือน (Accelerometer) ที่มีความไวสูง มี resolution ในระดับ micro-g (g คือ ค่าความเร่งของสนามโน้มถ่วงโลก = 9.81 m/s^2) และสามารถเก็บบันทึกสัญญาณดิจิทัลได้ด้วยเครื่องบันทึกแบบพกพา (Portable Seismic Recorder) ต่อมาในปี ค.ศ. 2001 ชีรพล (2001) ได้ทำการปรับปรุงเทคนิควิธีของ Trifunac ให้สามารถตรวจวัดรูปแบบการสั่นไหวของอาคารที่มีส่วนผสมของการโยกตัว (Lateral Deformation) และบิดตัว (Torsion) ได้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น นอกจากนี้ ยังได้ทดลองนำกลุ่มคนมาช่วยเขย่าอาคารด้วยการให้ทุกคนเหวี่ยงตัวพร้อมกันไปบนยอดอาคารตามเครื่องให้จังหวะ (Metronorm) ซึ่งกำหนดให้มีจังหวะใกล้เคียงกับความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวที่ต้องการตรวจวัด ด้วยวิธีดังกล่าวนี้ ชีรพลสามารถกระตุ้นให้สภาพการสั่นไหวของอาคารในรูปแบบที่สนใจมีความชัดเจนดีขึ้นมาก ส่งผลให้คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ตรวจวัดได้มีความถูกต้องแม่นยำขึ้น และต่อมาได้มีการตรวจวัดอาคารในกรุงเทพมหานครอย่างต่อเนื่อง (ชาคร, 2002; ประยุทธ์, 2545; มานะ, 2546) จนสามารถได้ฐานข้อมูลด้านคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจำนวน 50 หลัง และมีการศึกษาด้านเทคนิคในการหาค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์จากผลการตรวจวัดที่ให้ผลที่ถูกต้องและเหมาะสมในการใช้งานมากขึ้น (วีระศักดิ์, 2546)

2.2 การประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร

แนวทางในการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารสามารถแบ่งได้เป็น 2 แนวทางหลัก คือ การคำนวณด้วยสูตรประมาณค่า (Empirical Approach) และการวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคาร (Numerical Analysis Approach)

แนวทางแรก คือ การคำนวณด้วยสูตรประมาณค่า เป็นแนวทางที่นิยมใช้ในทางปฏิบัติ เนื่องจากง่ายและสะดวก สูตรประมาณค่าที่ใช้มักเป็นสูตร Empirical แสดงความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยระหว่างความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐาน (Fundamental Mode) ของอาคาร กับคุณสมบัติบางอย่างของอาคารที่สามารถประเมินได้ง่ายๆ เช่น ขนาดความกว้าง ยาว สูง ของอาคาร ประเภทของวัสดุและโครงสร้างของอาคาร พื้นที่หน้าตัดและความยาวของกำแพงคอนกรีตรับแรงเฉือนของอาคาร เป็นต้น สูตร Empirical เหล่านี้ได้ถูกสร้างขึ้นมาจากข้อมูลคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารเป็นจำนวนมากที่ได้จากการตรวจวัดจริง (Goel, 1997) ดังนั้นจึงแสดงความสัมพันธ์โดยเฉลี่ยที่ถูกต้อง

อย่างไรก็ดี แนวทางนี้มีข้อจำกัดอยู่หลายประการ ที่สำคัญ คือ (1) ความถี่ธรรมชาติของอาคารจริงแต่ละหลังอาจมีค่าแตกต่างจากค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากสูตรได้มาก เนื่องจากสูตรประมาณค่าเหล่านี้ยังไม่ได้ครอบคลุมถึงปัจจัยอีกหลายประการที่อาจส่งผลกระทบต่อค่าความถี่ธรรมชาติของอาคาร (2) สูตร Empirical ที่กำหนดไว้ในมาตรฐานการออกแบบอาคารต้านทานแผ่นดินไหวในหลายๆ ประเทศมีความแตกต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากแนวทางปฏิบัติในการออกแบบก่อสร้างอาคารนั้นแตกต่างกัน (Seed, 1989) ด้วยเหตุนี้ การนำสูตร Empirical เหล่านี้มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยโดยมิได้ทำการตรวจสอบก่อนก็อาจทำให้การประมาณค่ามีความคลาดเคลื่อนสูง (3) สูตร Empirical เหล่านี้มักใช้ประมาณค่าความถี่ธรรมชาติของรูปแบบการสั่นไหวพื้นฐานเท่านั้น ไม่ได้ครอบคลุมถึง คุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ในรูปแบบอื่นๆ

แนวทางที่ 2 ในการประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร คือ การวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอาคาร ซึ่งมีก้อยู่ในรูปแบบจำลอง Finite Element แบบจำลองในลักษณะนี้จะช่วยให้สามารถจำลองพฤติกรรมความยืดหยุ่นของอาคารในรูปแบบของ Stiffness Matrix และจำลองลักษณะการกระจายตัวของมวลในอาคารในรูปแบบของ Mass Matrix เมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 แบบไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Eigen Analysis จะทำให้สามารถคำนวณค่าความถี่ธรรมชาติ และรูปแบบการสั่นไหวของอาคารได้ (Clough, 1993; Chopra, 1995)

โดยปกติในขั้นตอนการออกแบบอาคาร วิศวกรจำเป็นต้องสร้างแบบจำลอง Finite Element ของอาคารเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมของโครงสร้างเมื่อรับน้ำหนักหรือแรงกระทำแบบจำลองเหล่านี้มักเป็นแบบจำลองแบบง่าย (Simplified Model) ที่ไม่ได้คำนึงถึงส่วนผลเนื่องจากส่วนประกอบของอาคารที่ไม่ใช่โครงสร้าง (Non-Structure Components) และสร้างขึ้นบนพื้นฐานของข้อสมมุติฐานหลายข้อที่ไม่สมจริง เช่น สมมุติว่าฐานรากของอาคารไม่มีการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนรูป (Rigid Foundation) เป็นต้น แบบจำลองเหล่านี้หากนำไปใช้วิเคราะห์เพื่อประมาณค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ก็อาจให้ผลที่คลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้มาก เพราะไม่สามารถจำลองพฤติกรรมทางพลศาสตร์ของอาคารได้อย่างถูกต้อง

ตัวอย่างเช่น Meyyapa et.al. (1981) และ Torkamani et.al. (1988) ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารด้วยวิธี Ambient Vibration ในระหว่างการก่อสร้าง พบว่าการเพิ่มส่วนประกอบของอาคารที่ไม่ใช่ส่วนของโครงสร้างเช่น ผนังกำแพงอิฐก่อ (Masonry Infill Wall) มีผลต่อการเพิ่มค่าความถี่ธรรมชาติของอาคารอย่างชัดเจน ต่อมาในปี ค.ศ. 1999 Chaker (1999) ได้ทำการตรวจวัดคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคาร 3 ชั้น 2 หลัง อาคารหลังที่ 1 มีโครงสร้างเป็น Frame คอนกรีตเสริมเหล็ก (ค.ส.ล.) และไม่มีผนังกำแพงอิฐก่อ ส่วนอาคารหลังที่ 2 มีโครงสร้างเหมือนอาคารหลังที่ 1 แต่มีผนังกำแพงอิฐก่อ ผลการตรวจวัดชี้ว่าอาคารหลังที่ 2 มีความถี่ธรรมชาติสูงถึงประมาณ 2 เท่าตัวของอาคารหลังที่ 1

ในประเด็นที่เกี่ยวกับฐานราก Bouwkamp และคณะ (1980) ในปี ค.ศ. 1980 ได้ทดลองสร้างแบบจำลอง Finite Element ของอาคาร 12 ชั้นขึ้นมา 2 แบบ โดยที่แบบแรกกำหนดให้ฐานรากของอาคารยึดแน่นไม่มีการเคลื่อนตัวหรือเปลี่ยนรูป ส่วนแบบที่ 2 จำลองฐานรากให้มีความยืด

หยุ่นไกล่เคียงสภาพจริง Bouwkamp ได้ทำการคำนวณคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบ และนำไปเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการตรวจวัดอาคารจริง พบว่าแบบจำลองที่ 2 ให้ผลที่สอดคล้องกับความเป็นจริง

Muria-Vila และคณะ (2000) ในปี ค.ศ. 2000 ได้ทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ของอาคารในกรุงเม็กซิโกซิตี ปัจจัยเหล่านี้ได้แก่ ความแปรปรวนของค่า Modulus of Elasticity ของวัสดุ ความคลาดเคลื่อนของขนาดรูปตัดขวางขององค์อาคาร การแตกร้าวขององค์อาคารคอนกรีตเสริมเหล็กเมื่อแบกรับน้ำหนักบรรทุกตามปกติ ผนังกำแพงอิฐก่อ ความยืดหยุ่นของฐานราก ผลของ Rigid Zone ในบริเวณจุดต่อขององค์อาคาร ฯลฯ ดังนั้นการสร้างแบบจำลอง Finite element ของอาคารจำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยเหล่านี้ มิฉะนั้นคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่คำนวณได้จากแบบจำลองอาจมีความคลาดเคลื่อนได้มาก

2.3 การศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดินโดยการตรวจวัด Microtremor

ในการศึกษาพฤติกรรมเชิงพลศาสตร์ของชั้นดิน อาจทำได้โดยการเจาะสำรวจภาคสนามเช่น การทดสอบในหลุมเจาะแบบดาวน์โฮล โดยมีหลักการทดสอบโดยทำให้เกิดคลื่นความเค้น (Stress wave) บริเวณผิวดิน เช่นกระแทกด้วยตุ้มน้ำหนัก แล้วตรวจจับคลื่นความเค้นที่วิ่งผ่านชั้นดินในหลุมเจาะที่ระดับความลึกต่างๆ แล้วคำนวณเป็นค่าความเร็วคลื่นเฉือนตามระดับความลึก วิธีนี้ถือว่ามีค่าคุณสมบัติเชิงพลศาสตร์ที่ค่อนข้างแม่นยำสูง อย่างไรก็ตามวิธีนี้มีค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติสูงมากและใช้เวลานาน จึงไม่สามารถทำการเจาะสำรวจหลาย ๆ ตำแหน่งได้ การศึกษาอีกวิธีที่สามารถทำได้คือ ใช้การตรวจวัดการสั่นสะเทือนของผิวดินในระดับต่ำที่มีอยู่ตลอดเวลาในธรรมชาติ (Ambient Vibration) ซึ่งเกิดจากการกระตุ้นจากแรงที่เกิดตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น การเคลื่อนตัวของชั้นดินเอง หรือจากแรงต่างๆบนผิวดิน เป็นต้น การตรวจวัดนี้ต้องใช้เครื่องมือวัดที่มีความละเอียดในระดับ Micron และสามารถใช้ศึกษาได้ดีแม้ในบริเวณที่มีการเคลื่อนตัวของชั้นดินด้วยค่าต่ำ ๆ วิธีนี้เรียกว่า Microtremor ซึ่งเสนอโดย Kannai และ Tanaka (ตั้งในเอกสารอ้างอิงของ Tokimatsu, 1997) โดยมีแนวคิดที่ว่า แรงต่าง ๆ ที่กระทำต่อชั้นดินมีลักษณะแบบสุ่ม และ ชั้นดินมีคุณสมบัติทางพลศาสตร์เฉพาะตัว ดังนั้นเมื่อตรวจวัดผลการสั่นสะเทือนโดยแรงดังกล่าวแล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธี Fast Fourier Transform (FFT) เพื่อแปลงสัญญาณวัดให้อยู่ในรูปของการผสมกันของความถี่หลาย ๆ ค่า เรียกว่า Fourier Amplitude Spectrum และกราฟความสัมพันธ์ของ Fourier Amplitude กับความถี่ จะพบเป็นยอดแหลมที่ตำแหน่งต่างๆ ซึ่งแสดงถึง ความถี่หลักในการสั่นหรือ Predominant Frequency ของชั้นดินนั่นเอง เนื่องจากความสะดวกในการปฏิบัติงานเพื่อใช้ศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดิน จึงได้มีการศึกษาวิจัยด้านต่างๆ ของวิธี Microtremor อย่างต่อเนื่อง Nakamura (1989) ได้แก้ไขข้อขัดแย้งของวิธีนี้ที่ว่า การตรวจวัดการสั่นสะเทือนในแนวราบนั้นจะแทนคุณลักษณะของดินบริเวณแหล่งกำเนิดแผ่นดินไหวไม่ใช้คุณลักษณะของดินที่บริเวณตรวจวัด เขาจึงได้เสนอวิธีชื่อ H/V method โดยทำการลดผลของคุณลักษณะของดิน

บริเวณแหล่งกำเนิดด้วยตัวการหารค่า Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวราบด้วย Spectra ของการสั่นสะเทือนในแนวตั้ง และวิธีนี้ก็ได้รับการปรับปรุงและประยุกต์ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของชั้นดินมาตามลำดับ (Lermo et al, 1994; Tokimatsu, 1997; Konno และ Ohmachi, 1998)

Tokimatsu (1997) เสนอวิธีการใช้ Microtremor ที่ใช้อุปกรณ์ตรวจวัดมากกว่าสองตัววัดพร้อม ๆ กัน เพื่อศึกษาคุณสมบัติการกระจายตัว (Dispersion Characteristic) ของคลื่นแผ่นดินไหวตัวหนึ่ง ที่ชื่อ Rayleigh Wave โดยเป็นคลื่นที่บริเวณผิวดิน จากคุณสมบัติการกระจายตัวนี้ ทำให้สามารถได้การเปลี่ยนแปลงค่าความเร็วในแนวตั้งของ Shear Wave ซึ่งเป็นองค์ประกอบของคลื่นแผ่นดินไหวที่สำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างบนดิน การตรวจวัดโดยใช้อุปกรณ์วัดมากกว่าหนึ่งสถานีนี้เรียกว่า Array Measurement โดย Ansary et.al (1996) ได้ศึกษาวิธีนี้และพบว่า การขยายตัวของความเร็วคลื่นที่ได้จากการวิเคราะห์ Frequency-Wave Number Spectrum ของการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ได้จาก Microtremor นั้นสอดคล้องกับ Phase Velocity ของ Rayleigh Wave อย่างไรก็ตาม การตรวจวัดแบบ Array Measurement มีข้อจำกัดคือต้องใช้เครื่องมือวัดพร้อมกันไม่น้อยกว่า 4 ชุด ซึ่ง Almasani ได้รายงานผลการประยุกต์ใช้การวัดแบบใช้หัววัดพร้อมกัน 2 ชุด ซึ่งสามารถประเมินค่า Shear wave velocity ที่เป็นค่าสำคัญในการประมาณระดับการขยายผลจากคลื่นแผ่นดินไหวของดินที่ตั้งได้ นอกเหนือจากค่าคาบอิทธิพลหลักที่ได้จากการวัดตรวจวัดด้วยเครื่องมือเพียงชุดเดียว และเสนอแนวทางการตรวจวัดที่สะดวกในทางปฏิบัติ

Nakamura (1989) ได้ปรับปรุงการตรวจวัดการตรวจวัดการสั่นของคลื่นผิวดิน (Microtremor) โดยการเสนอเทคนิคใหม่ คือวิธี H/V Method ในเทคนิคนี้โดยการใช้ Horizontal Spectra Amplitude และ Vertical Spectra Amplitude วิธีนี้ทำให้มีสมมติฐาน คือ

1. Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลักคือ Shear Wave
2. การสั่นสะเทือนในแนวตั้ง (Vertical Component) จะไม่มีการขยายในชั้นดินอ่อน โดยจะมีเพียง การสั่นสะเทือนในแนวราบ (Horizontal component) เท่านั้นที่มีการขยาย
3. ไม่มีการขยายคลื่นในทุก ทิศทางในชั้นหิน
4. Rayleigh Wave ถูกสมมุติฐานเป็นคลื่นรบกวน

Nakamura แสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio เกือบจะเท่ากับ S-Wave Transfer Function ระหว่างพื้นดินและชั้นหินด้านล่าง ซึ่งกล่าวคือ H/V Peak Period คือคาบธรรมชาติของที่ตั้งและค่าตอบสนองสูงสุดคือ ค่าการขยายคลื่น(Amplification Factor) ซึ่งวิธีนี้ไม่จำเป็นต้องใช้การเจาะสำรวจดิน วิธีนี้จึงสะดวกและประหยัดในการใช้งาน วิธีนี้มีการใช้อย่างกว้างขวางแม้จะขาดทฤษฎีสนับสนุนก็ตาม

หลังจากปี ค.ศ.1989 ที่ Nakamura เสนอวิธี H/V Method ก็ยังมีข้อโต้แย้งกันอยู่เกี่ยวกับธรรมชาติ ของ Microtremor นักวิจัยบางคน ยืนยันว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นพื้นฐานคือ Rayleigh Wave ซึ่งขัดแย้งกับสมมุติฐานของ Nakamura แต่อย่างไรก็ตามเทคนิคของ Nakamura ได้นำไปใช้และเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางจนถึงปัจจุบัน ตัวอย่างเช่น

Ohmachi (1991) ได้แปลผลที่ได้จากการตรวจวัด Microtremor ในพื้นที่ของซานฟรานซิสโก รวมทั้งในปี ค.ศ.1992 Lermo (1992) ได้ใช้วิธี H/V Method ทำการวิเคราะห์บันทึกข้อมูลของ Microtremor ใน 4 เมืองที่ต่าง ๆ ของเม็กซิโกและผลที่ได้ก็สอดคล้องกับ Spectrum Ratio โดยวิธีการวัดความเร็วแผ่นดินไหวที่มีการบันทึกไว้

Lermo และ Chavez-Garcia (1994) แสดงให้เห็นว่า H/V Method ของ Nakamura เป็นวิธีการทำนายผลที่เกิดกับสถานที่ที่เกิดแผ่นดินไหว (Site Effect) แต่อย่างไรก็ตาม มันเป็นจริงเพียง Fundamental Resonance Peak ของ Transfer Function จากเหตุผลนี้เป็นการสนับสนุนแนวคิดที่ว่าเทคนิคของ Nakamura ว่ามีประสิทธิภาพในการหาผลที่เกิดกับสถานที่ที่เกิดแผ่นดินไหว

Konno และ Ohmachi (1998) เสนอว่า Microtremor ประกอบด้วยคลื่นหลัก คือ Surface Wave อย่างไรก็ตามพวกเขาก็ยืนยันว่า H/V Spectrum Ratio ที่เสนอโดย Nakamura ยังเป็นตัวแทนของลักษณะของสถานที่ได้ โดยการเปรียบเทียบสเปกตรัมของ Microtremor กับสเปกตรัมของคลื่นหลัก Rayleigh Wave และวิธีเจาะสำรวจดิน (Downhole Method) ซึ่งผลของทั้ง 3 วิธีสามารถเทียบเคียงกันได้

Tuladhar R. (2002) ได้สร้าง Seismic Microzonation Map ของกรุงเทพฯ โดยทำการตรวจวัด Microtremor วัดแบบ 1 จุด ซึ่งทำการวัด 150 ตำแหน่งในกรุงเทพฯ และใช้วิธี H/V Spectrum Ratio สำหรับการหาคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้และมีการเปรียบเทียบ Transfer Function จากวิธี H/V Spectrum Ratio และ โปรแกรม SHAKE 91ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

Srisoros W. (2003) ได้สร้าง Seismic Microzonation Map ของจังหวัดเชียงใหม่โดยทำการตรวจวัด Microtremor วัดแบบ 1 จุด โดยใช้วิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura สำหรับการหาคาบอิทธิพลหลัก (Predominant Period) ของการสั่นที่พื้นดินในแต่ละตำแหน่งที่ได้และมีการเปรียบเทียบ Transfer Function จากวิธี H/V Spectrum Ratio และ โปรแกรม SHAKE 91ซึ่งผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน

จากงานวิจัยดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธี H/V Spectrum Ratio ของ Nakamura มีความสามารถในการหาค่าคาบธรรมชาติของสถานที่ได้ รวมทั้งวิธีดังกล่าวยังเป็นที่ยอมรับกันอย่างกว้างขวางในปัจจุบัน

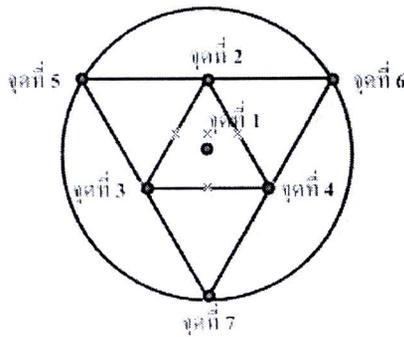
2.4 การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation)

การหาค่าความเร็วคลื่นเฉือนด้วยการตรวจวัด Microtremor แบบหลายจุดพร้อมกัน (Array Microtremor Observation) มีเทคนิคที่ได้พัฒนาและใช้อยู่ 2 วิธีหลัก คือ Frequency-wavenumber spectral method (F-K method) และ Spatial autocorrelation method (SPAC) โดยทั้งสองวิธีมี

พื้นฐานของสมมติฐานที่ว่า ถ้าคลื่นผิวดินมีลักษณะคงตัว ทั้งด้านตำแหน่งและเวลา ซึ่งในการศึกษานี้จะใช้ วิธี 2-site Spatial Autocorrelation ซึ่งอาศัยหลักการเดียวกับวิธี SPAC

วิธี F-K มีรูปแบบการวัด (Array) ที่ไม่แน่นอนจึงต้องใช้จุดที่ทำการตรวจวัดอย่างน้อย 7 จุดพร้อมกัน ซึ่งใช้สำหรับการตรวจวัดการเคลื่อนที่ในแนวตั้งที่เกิด Rayleigh Wave โดยผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Capon (1969) ในปี 1969 และ Lacos (1969) ในปี 1969 เช่นกัน

วิธี SPAC ผู้ที่เสนอวิธีนี้คือ Aki (1957) ในปี 1957 โดยวิธีนี้ต้องทำการวัดพร้อมกัน 4 ถึง 7 จุดถึงจะมีได้ค่าที่ถูกต้องโดยมีรูปแบบการวัดเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าดังรูปที่ 2.1 ซึ่งทั้งสองวิธีต้องใช้การเครื่องมือและจำนวนคนมากในการทำการตรวจวัดแต่ละครั้ง



รูปที่ 2.1 รูปแบบการวัดโดยวิธี SPAC

Hiroshi Arai และ Fumio Yamazaki (2002) ได้หาค่าความเร็วคลื่นเฉือนโดยวิธี F-K Method และ H/V Method ของกรุงเทพและปริมณฑลจำนวน 4 จุด ผลที่ได้เมื่อเปรียบเทียบผลทดสอบดินมีค่าที่สอดคล้องกัน

Tsuno และ Kudo (2004) ได้ทำการหาความเร็วคลื่นเฉือนโดยใช้วิธี SPAC ที่เมืองคันโตะ ประเทศญี่ปุ่น ผลที่ได้มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะประมาณค่าความถี่สูงสุดและค่าแอมพลิจูดของแต่ละสถานที่ได้

Hitoshi Morikawa (2004) ได้ทำการเสนอวิธี 2sSPAC ซึ่งมีพื้นฐานมาจากวิธี SPAC โดยใช้วิธีการตรวจวัดพร้อมกันครั้งละ 2 จุดพร้อมกันโดยกำหนดจุดคงที่ไว้จุดหนึ่งแล้วทำการเปลี่ยนจุดวัดจนครบทุกตำแหน่งซึ่งจะประหยัดทั้งเครื่องมือและจำนวนคนที่ทำการตรวจวัดและการตรวจวัดใช้คาบยาวอยู่ระหว่าง 1-10 วินาที ผลการศึกษาของ Morikawa ผลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Phase Velocity กับ ความถี่(Dispersion Curve) ของวิธี 2sSPAC เปรียบเทียบกับวิธี SPAC และวิธี F-K มีค่าที่สอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพของวิธี 2sSPAC ที่ใช้วัด Phase Velocity ที่เกิดจาก Rayleigh Wave

Abdullah M. Alsamani M. (2004) ได้ใช้วิธี SPAC และ 2sSPAC ทำการประมาณค่าความเร็วคลื่นเฉือนที่เมืองซีกูบะ ประเทศญี่ปุ่น โดยความเร็วคลื่นเฉือนที่ได้จากการวัด

Microtremor มีค่าสอดคล้องกับวิธีเจาะสำรวจดิน (PS Logging) และเมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้จากวิธี SPAC และวิธี 2sSPAC มีค่าสอดคล้องกัน

2.5 การหาความเร็วคลื่นเฉือนในประเทศไทย

Ashford et al. (1997, 2000) สำรวจวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนบริเวณกรุงเทพ โดยวิธี วิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล (Downhole method) 4 แห่งคือสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (รังสิต) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และลาดกระบัง

Shibuya S. และ Tamrakar S.B. (2003) ทำการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ รวมทั้งคุณสมบัติทางพลศาสตร์ โดยการวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือน โดยวิธี Seismic Penetration Test (SCPT) ของดินบริเวณกรุงเทพ พบว่าดินเหนียวอ่อนด้านบนมีความเร็วคลื่นเฉือนต่ำกว่า 100 ม./วินาที และความเร็วคลื่นเฉือนจะเพิ่มขึ้นจนถึงชั้นดินเหนียวมีค่าอยู่ระหว่าง 180 ม./วินาที ถึง 210 ม./วินาที สำหรับชั้นทรายแรกวัดค่าความเร็วคลื่นเฉือนอยู่ในช่วง 250 ม./วินาที

ประภาพร จันทะมาศ (2007) ทำการเปรียบเทียบความเร็วคลื่นเฉือนของชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้จากวิธีการวิเคราะห์คลื่นผิวดินแบบหลายช่องทางรับสัญญาณ (Multi-channel analysis of surface wave –MASW) กับวิธีวัดจากหลุมเจาะ ของพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล จำนวน 4 แห่งคือสถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีสิรินธรและสนามบินสุวรรณภูมิ สามารถจำแนกดินตามข้อกำหนดของ NERHP 2003 ได้ดังนี้ สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นดินชนิด E

จิตติ ปาลศรีและอาณัติ เรืองรัตมี (2009) ใช้วิธีวัดโดยตรงแบบดาวน์โฮล (Downhole method) ของดินในกรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่และเชียงราย และ ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วคลื่นเฉือน ค่า N สำหรับการตอกกระบอกผ่าทดสอบ และกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่คายน้ำของดินในกรุงเทพมหานคร, เชียงใหม่และเชียงราย สามารถนำมาหาความสัมพันธ์กับกำลังรับแรงเฉือนแบบอัดตัวไม่คายน้ำ (S_u) และจำนวนครั้งในการตอกกระบอกผ่าให้จมลงไปดิน 1 ฟุต (N) ของดินในกรุงเทพมหานครและบริเวณภาคเหนือของประเทศไทย