

บทที่ 2

การวิเคราะห์การเสียรูปของผิวทางจากการทดสอบการแอ่นตัวแบบตกกระแทกเพื่อ
ประเมินสภาพผิวทาง

ชื่อโครงการวิจัย การพัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกเพื่อใช้ประเมินสภาพของผิวทาง

Development of falling weight deflectometer for evaluation of pavement condition

ได้รับเงินอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2554 จำนวนเงิน 1,144,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 13 กันยายน 2554 ถึง 13 กันยายน 2555

หัวหน้าโครงการ

ผศ.ดร.วรัช ก้องกิจกุล

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โทรศัพท์ 02-470-9144 โทรสาร 02-427-9063

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 1

ผศ.ดร.สมโพธิ อยู่ไว ภาควิชาวิศวกรรมโยธา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

โทรศัพท์ 02-470-9141 โทรสาร 02-427-9063

ผู้ร่วมวิจัยคนที่ 2

ดร.ชาครีย์ บำรุงวงศ์

สำนักแผน กรมทางหลวงชนบท

โทรศัพท์ 0-2551-5268 โทรสาร 0-2972-9319

บทคัดย่อ

ในการซ่อมบำรุงรักษาทางตามปกติจะต้องประเมินสภาพโครงสร้างทางด้วยเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกซึ่งจะต้องนำเข้าจากต่างประเทศในราคาสูง จึงไม่เพียงพอต่อการใช้งานในปัจจุบัน โครงการวิจัยนี้จึงได้พัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกขึ้นมาใหม่ มีหลักการทำงานโดยการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกกระแทกลงบนผิวทางแล้วทำการวัดการแอ่นตัวที่เกิดขึ้น จากนั้นจึงได้ทดสอบร่วมกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกของกรมทางหลวงชนบทเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านน้ำหนักตกกระแทก ค่าการแอ่นตัว และลักษณะแอ่งการยุบตัว แล้วจึงวิเคราะห์หาค่าร้อยละความผิดพลาด จากผลการทดสอบพบว่า เครื่องที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับเครื่องที่นำเข้ามาจากต่างประเทศมาก

Abstract

For evaluations of the pavement structure conditions, it is necessary to perform the Falling Weight Deflectometer (FWD) tests. In Thailand, this FWD must be imported from foreign countries, and therefore, very expensive. As a result, the number of FWD to be used in the road maintenance work is not sufficient. In this research, a prototype FWD was newly developed based on the basic mechanisms in which the deflections were measured upon the impact of the strike hammer. Then, validation tests were performed together with the FWD owned by the Department of Rural Roads (DRR) by which the followings were compared: 1) impact load; 2) deflections measured on the pavement; and 3) deflection basin. Further, the error in each concern was determined. It was found that the newly-developed FWD provided similar test results when compared to the ones by the DRR's FWD.

2.1 บทนำ

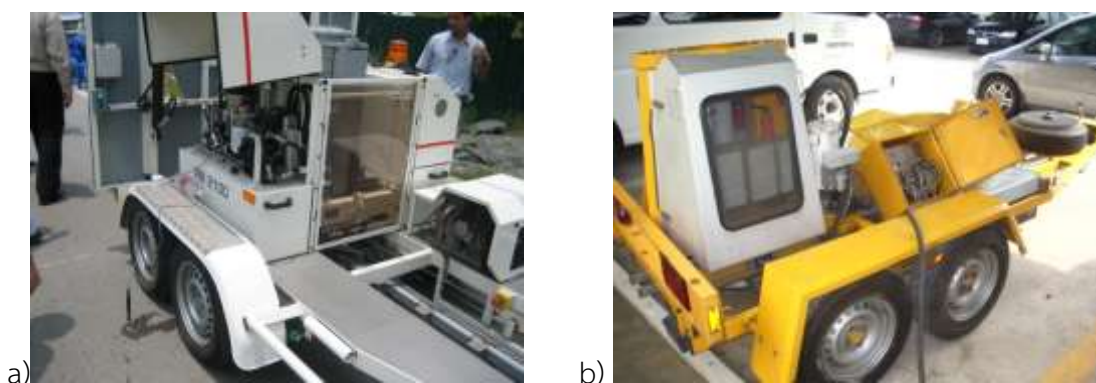
2.1.1. ความสำคัญ

การบำรุงรักษาถนนให้มีสภาพผิวทางที่ดี และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้มีความสำคัญเป็นอย่างมาก ดังนั้น สภาพของผิวทางจราจรรวมไปถึงโครงสร้างของถนนเองจะต้องถูกตรวจสอบอย่างสม่ำเสมอ เพื่อจะได้ระบุตำแหน่งและวิธีการซ่อมแซมที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการที่เป็นที่นิยมในการตรวจสอบสภาพผิวทาง มักจะประเมินจากค่าความแข็งแรงหรือค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางเมื่อน้ำหนักมากระทำ อาทิเช่น ในปัจจุบันการตรวจสอบสภาพผิวทางของถนนในความรับผิดชอบของกรมทางหลวงชนบทนิยมใช้ การทดสอบ Benkelman Beam ซึ่งวัดการแอ่นตัวที่ผิวทางยืดหยุ่นเมื่อน้ำหนักจรจากเพลาล้อรถบรรทุก การทดสอบด้วยวิธีนี้ แม้ว่าจะให้ผลการทดสอบที่มีความน่าเชื่อถือ แต่จะต้องใช้เวลานานมาก ซึ่งไม่สอดคล้องกันกับปริมาณผิวทางจราจรที่เพิ่มมากขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้น เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกจึงได้ถูกพัฒนาขึ้นมาในต่างประเทศ เพื่อวัดการแอ่นตัวจากการทิ้งน้ำหนักกระแทกลงบนผิวทาง การทดสอบด้วยวิธีนี้มีความรวดเร็วเป็นอย่างมาก เนื่องจากการทดสอบแบบพลศาสตร์ แต่กระนั้น ในปัจจุบัน เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกดังกล่าวมีราคาแพงมาก (มากกว่า 10 ล้านบาทต่อเครื่อง) จึงทำให้หน่วยงานราชการที่ต้องรับผิดชอบบำรุงรักษาดูแลมีเครื่องดังกล่าวในจำนวนที่ไม่พอใช้ อีกทั้ง เมื่อเกิดปัญหาทางเทคนิคกับเครื่องที่ได้ซื้อมาจากต่างประเทศ ก็ไม่สามารถที่จะซ่อมแซมด้วยตนเองได้ โดยที่ส่วนใหญ่แล้วจะต้องถูกส่งกลับไปซ่อมแซมที่ต่างประเทศ ที่จริงแล้ว เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทก มีหลักการทำงานและการเก็บบันทึกข้อมูลที่ไม่ได้สลับซับซ้อนมากมายนักและไม่มีลิขสิทธิ์ ประกอบกับ เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกขนาดเล็กและขนาดที่ใช้งานจริงในสนามที่คณะผู้วิจัยได้พัฒนามาก่อนหน้านี้ ให้ผลการทดสอบที่ถูกต้องและแม่นยำ แต่ยังคงต้องปรับปรุงรายละเอียดทางเทคนิคบางประการ เพื่อให้มีความสะดวกสบายต่อผู้ใช้อย่างยิ่ง ดังนั้น จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยเฉพาะหน่วยงานที่รับผิดชอบดูแลรักษาสภาพถนน ที่จะต้องพัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบที่มีประสิทธิภาพเทียบเท่าหรือดีกว่าเครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศ โดยอาศัยความรู้และประสบการณ์จากเครื่องต้นแบบที่ได้พัฒนามาก่อนหน้าโดยคณะผู้วิจัย เพื่อให้สามารถที่จะผลิตออกมาใช้งานจำนวนมากต่อไป

2.1.2 ที่มาของปัญหา

ในปัจจุบัน หน่วยงานของรัฐได้นำเข้าเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกจากต่างประเทศ (รูปที่ 1) เข้ามาใช้ในการประเมินสภาพผิวทางยืดหยุ่น เครื่องมือดังกล่าวล้วนมีหลักการทำงานที่คล้ายคลึงกัน (Bush and Baladi, 1989; Ping et al., 2002; George, 2003; Loizos et al., 2003) กล่าวคือ ใช้การยกตุ้มน้ำหนักมายังความสูงที่ต้องการแล้วปล่อยให้ตกลงอย่างอิสระ เพื่อสร้างแรงกระแทกลงสู่ผิวทางผ่านทางแผ่นหน้าสัมผัส โดยที่แรงกระแทกจะวัดได้จากโหลดเซลล์ที่ติดตั้งกับแผ่นหน้าสัมผัสและการทรุดตัวของผิวทางที่จุดศูนย์กลางของแผ่นหน้าสัมผัสและที่ระยะห่างออกไป จะวัดจากอุปกรณ์จำพวกจีโอโฟนหรือเครื่องมือวัดความเร่ง จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยหาค่าแรงกระแทกที่มากที่สุด และการทรุดตัวที่ตำแหน่งที่มากที่สุดที่ตำแหน่งต่างๆ แล้วนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวของผิวทางและระยะทางจากจุดศูนย์กลางของแผ่น

หน้าสัมผัส เสร็จแล้วจึงนำผลที่ได้ไปวิเคราะห์เพื่อประเมินสภาพของผิวทางต่อไปด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์ ดังนั้น เครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบที่จะพัฒนาขึ้นมาจากงานวิจัยนี้ จะอาศัยหลักการทำงานและวิธีการวัดค่าทางกายภาพที่เหมือนกันกับเครื่องที่ได้นำเข้ามาจากต่างประเทศ และอาศัยความรู้และประสบการณ์ของคณะผู้วิจัยที่ได้พัฒนาเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกขนาดเล็กมาก่อนหน้า เพื่อให้เครื่องที่จะพัฒนาในงานวิจัยนี้ มีขนาดที่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานจริงในสนาม และมีความสะดวกสบายต่อผู้ใช้



รูปที่ 2.1-1 เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่นำเข้าจากต่างประเทศโดยหน่วยงานของรัฐ: a) กรมทางหลวงชนบท และ b) กรมทางหลวง

2.1.3 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- พัฒนาเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบขนาดเท่าของจริงเพื่อใช้ทดสอบในสนาม
- ทำการทดสอบด้วยเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบกับผิวทางจริงในสนาม
- เปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบที่ได้พัฒนาขึ้นมา

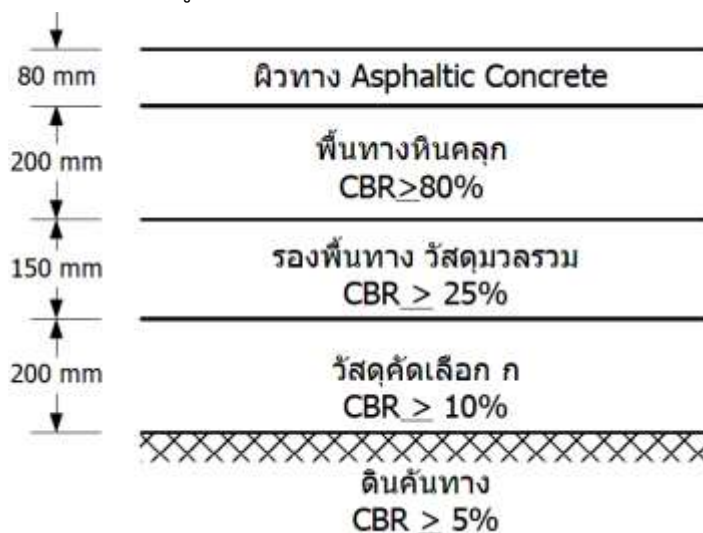
2.1.4 ขอบเขตของการวิจัย

- การพัฒนาเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบต้องสามารถให้แรงกระแทกที่เทียบเท่ากับเครื่องที่ซื้อมาจากต่างประเทศ
- การทดสอบกับผิวทางจริงในสนามเป็นผิวทางแบบยึดหยุ่นที่ลาดด้วยยางมะตอย
- เก็บและบันทึกข้อมูลดิบแบบอัตโนมัติเพื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยวิธีทางคอมพิวเตอร์ต่อไป

2.2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 รูปแบบของโครงสร้างชั้นทางถนนแบบยึดหยุ่นในประเทศไทย

โดยทั่วไปถนนแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavements) จะมีโครงสร้างชั้นทางเป็นแบบมาตรฐาน ซึ่งประกอบด้วยชั้นผิวทางเป็นแอสฟัลต์คอนกรีต ชั้นพื้นทางเป็นหินคลุก ชั้นรองพื้นทางเป็นพวกดินมวลเม็ดที่มีคุณภาพดี ชั้นวัสดุคัดเลือกเป็นพวกดินมวลเม็ดที่มีคุณภาพต่ำลงมา โดยมีความแข็งแรงมากกว่าชั้นคันทางไม่มากนัก และสุดท้ายคันทาง(ดินเดิม) (รูปที่ 2.1)



รูปที่ 2.2-1 รูปตัดแสดงความหนาชั้นทางของถนนแบบยืดหยุ่น
(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง)

ตารางที่ 2.2-1 ค่า E-Modulus และ ค่า CBR ของวัสดุโครงสร้างชั้นทาง

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	E-Modulus (MPa)	CBR (%)
พื้นทางหินคลุก	300-400	80
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม	150-200	25
ชั้นวัสดุคัดเลือก ก	80-110	10
ชั้นวัสดุคัดเลือก ข	40-70	6
ทรายถมคันทาง	10 x CBR(%)	10
ดินถมคันทาง	10 x CBR(%)	2-5

(ที่มา: ดร. ยงยุทธ แท้ศิริ, สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ, กรมทางหลวง)

ตารางที่ 2.2-2 ค่าโมดูลัสคืนตัวของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่อุณหภูมิต่างๆ

อุณหภูมิ ° C	ค่าโมดูลัสคืนตัว (MPa)		
	เกรด 60/70	เกรด 40/50	PMA
5	14,936	20,060	16,472
20	6,611	8,803	7,658
35	1,462	2,311	1,985
50	266	401	445
60	175	225	303

(ที่มา: ดร. ธันวิน สวัสดิ์ศานต์ และนายกฤษณะ จันทโรชิต, สำนักวิจัยและพัฒนาทาง, กรมทางหลวง)

2.2.2. วิธีการออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavements)

วิธีการออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่นแบ่งออกได้เป็นสองวิธีคือ

2.2.2.1 การออกแบบด้วยวิธี Empirical Design

การออกแบบด้วยวิธี Empirical Design เป็นการออกแบบโดยใช้วิธีการสร้างถนนจริงขึ้นมา แล้วทำการศึกษาพฤติกรรมต่างๆ ที่เกิดขึ้นร่วมกับการทดสอบคุณสมบัติของวัสดุในสนามและในห้องปฏิบัติการ ตลอดจนตัวแปรอื่นๆ ที่ใช้ในการออกแบบ เช่น การทดสอบหาค่า CBR และ Plate Bearing Test เป็นต้น

โดยทั่วไปวิธี Empirical Design เป็นวิธีต้องอาศัยประสบการณ์เดิมที่ผ่านมาและการสร้างถนนจริง (Full-scale Road Test) ให้จริงแล้วทำการศึกษาพฤติกรรมของถนนนั้นจนกระทั่งวิบัติ ทดลองเช่นนี้หลายๆ ครั้ง ทำให้สามารถสรุปเป็นข้อมูลต่างๆ ออกมาในรูปกราฟ ตาราง สมการ และค่าสัมประสิทธิ์ของวัสดุแต่ละชนิด ทำให้ทราบพฤติกรรมของถนนในขณะวิบัติว่าเป็นอย่างไร

วิธี Empirical Design จะได้ผลลัพธ์ที่ถูกต้องแน่นอน ต่อเมื่อข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบ เช่น ปริมาณการจราจร น้ำหนักรถ คุณสมบัติวัสดุ และสภาพแวดล้อมไม่ต่างจากประสบการณ์ และสมมติฐานที่กำหนดไว้

วิธีการออกแบบด้วยวิธี Empirical Design มีอยู่หลายวิธีได้แก่วิธีของ California Bearing Ratio (CBR), วิธีของ State of California, วิธีของ Asphalt Institute (AI), วิธีของ Nation Crushed Stone Association (NCSA) และวิธีของ AASHTO

กรมทางหลวงได้ยึดเอาวิธีของ Asphalt Institute มาใช้ออกแบบจนถึงปัจจุบัน โดยการออกแบบใช้ค่า CBR ของดิน Subgrade และปริมาณการจราจรในรูปแบบของจำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลามาตรฐาน (Equivalent Standard Axle Loads; ESALs) ขนาด 18,000 ปอนด์ (8,200 กก) เป็นพารามิเตอร์ในการออกแบบ ความหนาของชั้นทางที่ออกแบบได้เป็นความหนาของชั้นแอสฟัลท์คอนกรีตทั้งหมดที่วางอยู่บนชั้นดินเดิม AI เรียกชั้นทางนี้ว่า Full-Depth Pavement ซึ่งมีความหนาเท่ากับ TA อย่างไรก็ตามเราอาจจะเปลี่ยน Full-Depth Pavement ซึ่งมีความหนาเท่ากับ TA ให้เป็นชั้นทางแบบธรรมดาทั่วไปที่ประกอบด้วย ผิวทาง พื้นทาง และรองพื้นทาง โดยใช้วัสดุอื่นเช่น หินคลุก ดินลูกรัง แตนแอสฟัลท์คอนกรีต ซึ่ง AI กำหนดอัตราส่วนไว้ดังนี้

Hot Mix Sand Asphalt Base	=	1.3 : 1
Liquid Emulsified Asphalt Base	=	1.4 : 1
Untreated Granular Base	=	2 : 1
Untreated Granular Subbase	=	2.7 : 1

2.2.2.2 การออกแบบด้วยวิธี Analytic Design

การออกแบบด้วยวิธี Analytic Design เป็นการออกแบบโดยใช้ทฤษฎีและรูปแบบทางคณิตศาสตร์มาช่วยในการแก้ปัญหา โดยการแบ่งโครงสร้างถนนออกเป็นชั้นๆ และใช้วัสดุที่ต่างกัน จากนั้นจึงวิเคราะห์หาค่าความเค้น ความเครียดและการยุบตัวที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นแล้วตรวจสอบความสามารถของวัสดุแต่ละชั้นว่าสามารถต้านทานได้หรือไม่ ถ้าไม่ได้ก็ให้เปลี่ยนความหนาหรือเปลี่ยนชนิดของวัสดุ ซึ่งสามารถเปรียบเทียบได้กับการออกแบบโครงสร้างอาคาร โดยต้องเปลี่ยนรูปโครงสร้างจริงให้เป็นโครงสร้างคณิตศาสตร์ แล้วจึงวิเคราะห์หาหน่วยแรงต่างๆที่เกิดขึ้นในแต่ละชั้นส่วนของโครงสร้างโดยวิธีทางคณิตศาสตร์ จากนั้นนำผลการวิเคราะห์ไปออกแบบให้โครงสร้างแต่ละชั้นให้สามารถรับหน่วยแรงต่างๆ ที่เกิดขึ้นได้ปลอดภัย แล้วจึงนำเอาผลที่ได้จากการออกแบบไปก่อสร้างจริง

การออกแบบชั้นทางแบบยืดหยุ่นสมัยใหม่ สำหรับการใช้งานนาน 20 ปี หรือมากกว่าจะต้องออกแบบให้สามารถรองรับปริมาณการจราจรได้จำนวนมากกว่า 50 ล้านคันตลอดช่วงอายุการใช้งาน เกณฑ์ที่ใช้กำหนดการวิบัติคือ การเปลี่ยนรูปร่างสูงสุดที่เกิดขึ้นบนผิวทางในลักษณะความลึกของร่องล้อ (Rut Depth) มีค่าเท่ากับ 25 มม. ซึ่งหมายความว่าเกิดการผิดรูปร่างอย่างถาวร โดยเฉลี่ยแล้วค่าความลึกของร่องล้อจากยวดยานแต่ละคันต้องน้อยกว่า 0.5×10^{-6} มม. จากการที่พฤติกรรมของชั้นทางมีความใกล้เคียงกับคุณสมบัติความเป็นอีลาสติกของวัสดุประกอบชั้นทาง และชั้นฐานรากเนื่องจากน้ำหนักกดของล้อยวดยาน จึงสามารถประเมินได้อย่างใกล้เคียงโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอีลาสติกของชั้นวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นทางทั้งหมดซึ่งหมายความว่าเกิดการผิดรูปร่างอย่างถาวร โดยเฉลี่ยแล้วค่าความลึกของร่องล้อจากยวดยานแต่ละคันต้องน้อยกว่า 0.5×10^{-6} มม. จากการที่พฤติกรรมของชั้นทางมีความใกล้เคียงกับคุณสมบัติความเป็นอีลาสติกของวัสดุประกอบชั้นทาง และชั้นฐานรากเนื่องจากน้ำหนักกดของล้อยวดยาน จึงสามารถประเมินได้อย่างใกล้เคียงโดยใช้ทฤษฎีอีลาสติก แต่ทั้งนี้จำเป็นต้องทราบคุณสมบัติอีลาสติกของชั้นวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นทางทั้งหมด

การหานายคุณสมบัติที่เหมาะสมของชั้นทาง ภายใต้น้ำหนักการจราจรในเทอมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างและการแตกร้าวนั้น สิ่งแรกที่ต้องทราบคือ ประวัติการเกิดความเค้นในแต่ละชั้นของวัสดุที่ประกอบเป็นชั้นทาง ซึ่งสามารถประเมินได้จากทฤษฎีอีลาสติก ถ้ารู้น้ำหนักของล้อที่กระทำและรู้ปริมาณการจราจร ซึ่งแสดงอยู่ในรูปของจำนวนยานพาหนะสมมูล หรือตรวจสอบจากการที่คุณสมบัติอีลาสติกของวัสดุ แต่ละชั้นแปรผันตามอุณหภูมิ หรือแปรผันตามสภาพความชื้น จึงจำเป็นต้องพิจารณาถึงสภาพแวดล้อมซึ่งย่อมมีผลต่อความเค้นที่เกิดขึ้นในชั้นทางโดยรวม เมื่อทราบความเค้นที่มีอยู่ในชั้นทางแล้ว ก็จะพิจารณาถึงส่วนประกอบชั้นทางที่เหมาะสม โดยพิจารณาอยู่ในเทอมของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดขึ้นอย่างถาวร ซึ่งมักจะเกิดขึ้นระหว่างอายุการใช้งาน และรอยแตกที่อาจจะเกิดขึ้นจากความล้าภายใต้ความเค้นที่เกิดขึ้นอย่างซ้ำซากจากนั้นรวมผลที่เกิดขึ้นเนื่องจากความล้าว่าอยู่ในพิสัยที่กำหนดโดยเกณฑ์การวิบัติหรือไม่

2.2.3 ความเสียหายของผิวทางถนนแบบยืดหยุ่น

ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีข้อจำกัดในเรื่องของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงจะอ่อนตัวขณะที่อุณหภูมิต่ำจะแตกเปราะ อีกทั้งปริมาณการจราจรและน้ำหนักบรรทุกที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดปัญหาชำรุดเสียหายเร็วกว่าปกติ ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการซ่อมแซมและบำรุงรักษาสูงมากขึ้น ลักษณะความเสียหายที่พบมีดังนี้

2.2.3.1 ผิวทางเยิ้ม (Bleeding)

เป็นปรากฏการณ์ที่วัสดุแอสฟัลต์ในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตไหลขึ้นมา รวมกันที่ผิวหน้าเมื่ออุณหภูมิสูงหลังจากได้รับน้ำหนักบรรทุก โดยแอสฟัลต์จะไหลเยิ้ม ทำให้ผิวทางลื่น เกิดจากแอสฟัลต์มีค่าความหนืดต่ำ (Low viscosity) และมีค่าความว่องไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Temperature susceptibility) สูงมาก หรือปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt content) ที่ได้จากการออกแบบส่วนผสมไม่ถูกต้องอาจมีปริมาณมากเกินไป นอกจากนี้ อาจมีสาเหตุมาจากวัสดุแอสฟัลต์มีจุดอ่อนตัว (Softening point) ต่ำทำให้แอสฟัลต์อ่อนตัวง่าย ก่อให้เกิดร่องล้อ (Rutting) ที่ผิวทางขึ้นได้

2.2.3.2 ผิวทางเกิดการยุบตัวถาวร (Permanent deformation)

การยุบตัวถาวรเป็นลักษณะของการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชั้นผิวทางหรือชั้น โครงสร้างทางอย่างถาวร โดยทั่วไปมักเกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกที่แล่นผ่านหรือบริเวณที่มีการหยุดของรถบรรทุกหนัก การยุบตัวถาวรสามารถเกิดขึ้นเฉพาะที่ชั้นผิวทางหรือเฉพาะที่ชั้นโครงสร้างทางหรือทั้งชั้นผิวทางและชั้นโครงสร้างทางได้ ซึ่งอาจเกิดขึ้นโดยการที่ชั้นทางนั้นใช้วัสดุในการก่อสร้างที่ไม่มีเสถียรภาพที่ดีพอ ทำให้เกิดการยุบตัวเนื่องจากการทับถมหรือเกิดการไหลตัวของชั้นทางนั้นอย่างถาวร อาจเกิดหลังจากที่ผิวทางมีการไหลเยิ้ม (Bleeding) ก็ได้

โดยทั่วไปการยุบตัวถาวรจะมีอยู่ 2 ชนิดได้แก่ การยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวร่องล้อของน้ำหนักบรรทุกขนานกับทิศทางการจราจรที่เรียกว่า ร่องล้อ (Rutting) และการยุบตัวถาวรที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับแนวทิศทางการจราจรและมักจะเกิดบริเวณที่มีการจราจรหยุดหรือเคลื่อนตัวช้าที่เรียกว่า Shoving ส่วนมากตามถนนในพื้นที่นอกเมืองจะพบการยุบตัวถาวรชนิด Rutting มากกว่าเพราะการจราจรเคลื่อนตัวด้วยความเร็วสูงกว่า ส่วนพื้นที่ในเมืองนั้นมักพบทั้ง Rutting และ Shoving โดยเฉพาะบริเวณตามทางแยกที่มีสัญญาณไฟจราจร ป้ายรถประจำทางหรือบริเวณที่มีการจราจรติดขัดเป็นประจำ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการหยุดจอดบ่อยครั้งของการจราจรที่มีน้ำหนักบรรทุกมาก ทำให้เกิด Shoving ได้ง่าย ซึ่งคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์นั้นก็มีส่วนสำคัญเช่นกันที่จะส่งผลต่อการยุบตัวอย่างถาวรของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

2.2.3.3 ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ (Thermal cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น สาเหตุเกิดมาจากแรงเค้นดึงที่เกิดขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิที่เย็นจัด (ต่ำกว่าจุดเยือกแข็ง) อย่างรวดเร็ว เมื่อแรงเค้นดึงนี้มีค่ามากเกินไป

กว่าค่ากำลังรับแรงดึงของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถรับได้ก็จะทำให้เกิดการแตกร้าวขึ้น ลักษณะของรอยแตกร้าวจะเป็นรอยแตกตามแนวขวางกับทิศทาง สำหรับการแตกร้าวเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตจะเป็นผลโดยตรงมาจากคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์ที่อุณหภูมิต่ำมากๆ เนื่องจากวัสดุแอสฟัลต์จะมีลักษณะแข็งและเปราะ ง่ายต่อการแตกร้าว วัสดุแอสฟัลต์แต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับเกรด แหล่งน้ำมันดิบ อายุ และอัตราการเกิดความเครียดของวัสดุแอสฟัลต์ จากการสังเกตพบว่า วัสดุแอสฟัลต์ที่มีความว่องไวต่อการเปลี่ยนของอุณหภูมิสูงจะมีแนวโน้มที่จะเกิดการแตกร้าวสูงเช่นกัน

2.2.3.4 ผิวทางแตกร้าวเนื่องจากความล้า (Fatigue cracking)

การแตกร้าวเนื่องจากความล้าจากการรับน้ำหนักบรรทุกบนผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต เกิดจากการที่ผิวทางต้องรับน้ำหนักจากการจราจรเข้าไปเข้ามาเป็นระยะเวลานานจนเกิดความล้า ปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากการรับน้ำหนักในลักษณะซ้ำซาก ได้แก่

- การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง
- คุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณของวัสดุแอสฟัลต์
- ปริมาณช่องว่างระหว่างวัสดุรวมในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต
- คุณภาพในสนามของวัสดุชั้นทาง
- อุณหภูมิ
- ปริมาณการจราจร

2.2.3.5 การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้น (Moisture damage)

การทำลายความแข็งแรงเนื่องจากความชื้นนั้นไม่ใช่ความเสียหายของถนน แต่เป็นผลกระทบหลักที่จะก่อให้เกิดความเสียหายขึ้น เนื่องจากความชื้นจะทำลายการยึดเกาะระหว่างผิวของวัสดุรวมรวมกับวัสดุแอสฟัลต์ ทำให้เกิดการหลุดลอกของวัสดุรวมรวมจากผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่เรียกว่า Raveling เป็นปรากฏการณ์ที่ผิวทางสึกกร่อน เนื่องจากวัสดุส่วนละเอียดที่ผิวหน้าของวัสดุแอสฟัลต์ ถูกแรงเฉือนจากล้อรถตะกุกจนหลุดออก ทำให้ผิวทางมีลักษณะหยาบขรุขระ มีลักษณะเป็นหน้าข้าวตัง มีหินใหญ่โผล่ ความเสียหายดังกล่าวนี้จะทำให้โครงสร้างชั้นทางมีกำลังลดลง นำไปสู่การแตกร้าวหรือการยุบตัวอย่างถาวรในแนวร่องล้อต่อไป

2.2.3.6 การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น (Aging)

การเปลี่ยนคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้นนี้ก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่ไม่ได้ก่อความเสียหายโดยตรงแก่ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตแต่เป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดความเสียหายได้ใน

ระยะเวลาดำเนินการ เพราะแอสฟัลต์จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตเนื่องจากอายุการใช้งานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้เกิดการแข็งเปราะ แม้ว่าการแข็งขึ้นของแอสฟัลต์ดังกล่าวจะเป็นผลดีต่อการต้านทานการยุบตัวอย่างถาวร แต่หากเกิดการแข็งตัวมากเกินไปจนเปราะแล้ว จะทำให้เกิดการแตกร้าวและนำไปสู่การหลุดลอกได้ (Stripping) ภาวการณ์เกิด Aging นี้อาจเกิดขึ้นได้ทั้งในระหว่างขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์กับมวลรวมเป็นส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต และในระหว่างการใช้งานในสนาม

2.2.4 การทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) ด้วยเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD)

เป็นการทดสอบโดยการศึกษาจากการแอ่นตัวของผิวทางอันเนื่องมาจากน้ำหนักกระทำกับผิวทาง โดยเริ่มต้นใช้ในปี 1960 โดยใช้ค้อนตกกระทบ เรียกว่า "Falling weight deflectometer" ในการที่จะประเมินสภาพของผิวทางได้มีวิธีการที่ใช้หลายแบบโดยอาศัยการเลือกรูปที่จุดต่างๆ ในระหว่างที่มีการทิ้งค้อน (Wang et al., 1978)

ค่าการแอ่น หรือทรุดตัวจะสัมพันธ์โดยตรงกับการจราจรที่วิ่งผ่านบนถนนหรือผิวทางนั้น ดังนั้น จึงสามารถ ทำนายอายุของถนนว่าจะมีความแข็งแรงต่อไปอีกเท่าใดในรูปจำนวนเที่ยวของการจราจรที่วิ่งผ่าน นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่น ที่มียุทธศาสตร์ หรือสัมพันธ์กับค่าการแอ่น หรือทรุดตัว อาทิเช่น อุณหภูมิ และค่าความชื้นของวัสดุคันทาง ค่าการแอ่นหรือทรุดตัว ใช้ประโยชน์ในงานทางได้หลายด้าน อาทิ เช่น

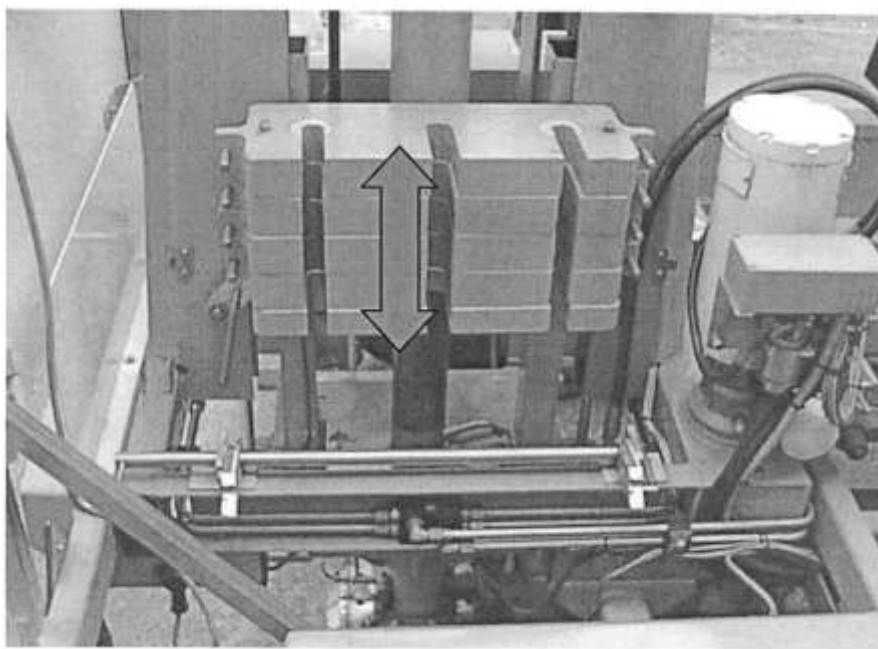
- ใช้คาดคะเน หรือทำนายได้ว่า ทางสายนั้นจะใช้งานต่อไปได้อีกนานเท่าใดโดยไม่ชำรุดเสียหาย
- ใช้ตรวจสอบเพื่อวางแผนซ่อมแซมถนนที่เริ่มชำรุดเสียหาย โดยควรจะซ่อมแซมในส่วนใดก่อนนั้น

จะพิจารณาจากค่าการทรุดตัว

- ใช้พิจารณาในการคำนวณออกแบบเพิ่มความแข็งแรงของสายทางเดิมที่หมดอายุ ให้ใช้งานได้อีกต่อไป ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ผิวทางเดิมเป็นส่วนหนึ่งของผิวทางใหม่ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดค่าการทรุดตัวที่เพิ่มสูงขึ้น ให้อยู่ในระดับต่ำกว่าค่าการทรุดตัวที่ยอมให้ (Allowable deflection) และใช้ประโยชน์จากผิวทางเดิมซึ่งคงความแข็งแรงอยู่บ้าง ทำให้สามารถรับน้ำหนักการจราจรต่อไปได้ประหยัดค่าวัสดุสำหรับทำผิวจราจรใหม่

เครื่องมือ FWD ที่ใช้ในงานในปัจจุบันของกรมทางหลวงในประเทศไทยเป็นเครื่องมือ FWD รุ่น Dynatest 8000 ซึ่งมีลักษณะเป็นรถพ่วงที่สามารถใช้รถตู้หรือรถตรวจการณ์ขับเคลื่อน 4 ล้อลากไปในขณะปฏิบัติงาน ในส่วนของเครื่องมือจะมีแท่นรองรับก้อนน้ำหนักที่สามารถเพิ่มหรือลดจำนวนลงได้โดยมีแกนปล่อยน้ำหนักที่ตั้งฉากกับผิวถนนอีกทั้งระยะความสูงในการปล่อยน้ำหนักก็สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามความเหมาะสมกับสภาพถนนที่ต้องการตรวจสอบ ส่วนประกอบของเครื่องที่ ได้แก่ ก้อนน้ำหนัก แกนปล่อยน้ำหนัก แผ่นรองรับก้อนน้ำหนักและแผ่นยางกันกระแทกที่ทำหน้าที่คล้ายสปริงรวมทั้งตัวรับสัญญาณ Geophones (รูปที่ 2.2) สำหรับกลไกควบคุมการยกและปล่อยก้อนน้ำหนักบนแผ่นรองรับน้ำหนักนั้นเป็นระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่เชื่อมต่อเชื่อมควบคุมโดยระบบคอมพิวเตอร์ทำให้ผู้ควบคุมสามารถจัดรูปแบบการให้น้ำหนักเพื่อให้เกิดแรงที่

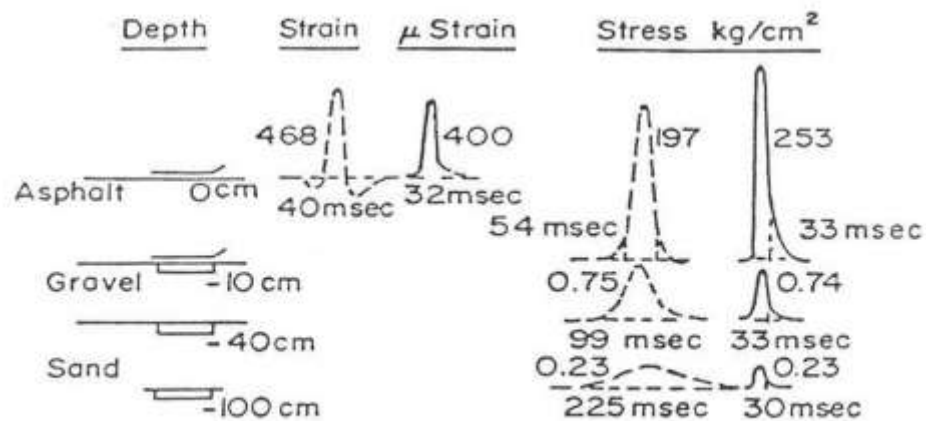
กระทำต่อโครงสร้างถนนตามที่ต้องการได้จากคีย์บอร์ดของเครื่องคอมพิวเตอร์เท่านั้นแต่บางครั้งเมื่อหากมีข้อผิดพลาดเกิดขึ้นเนื่องจากขั้นตอนในการปฏิบัติการของเครื่องมือขัดข้องหรือเกิดการขัดข้องเนื่องจากอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถสั่งการต่อเครื่อง FWD ได้ ก็สามารถทำการควบคุมการทำงานของเครื่อง FWD ได้โดยใช้อุปกรณ์แบบ Manual นอกจากนี้ในระหว่างการทดสอบระบบจะสามารถตรวจวัดแรงที่กระทำดังกล่าวกับแผ่นรองน้ำหนักได้อย่างถูกต้องโดยโปรแกรมคอมพิวเตอร์



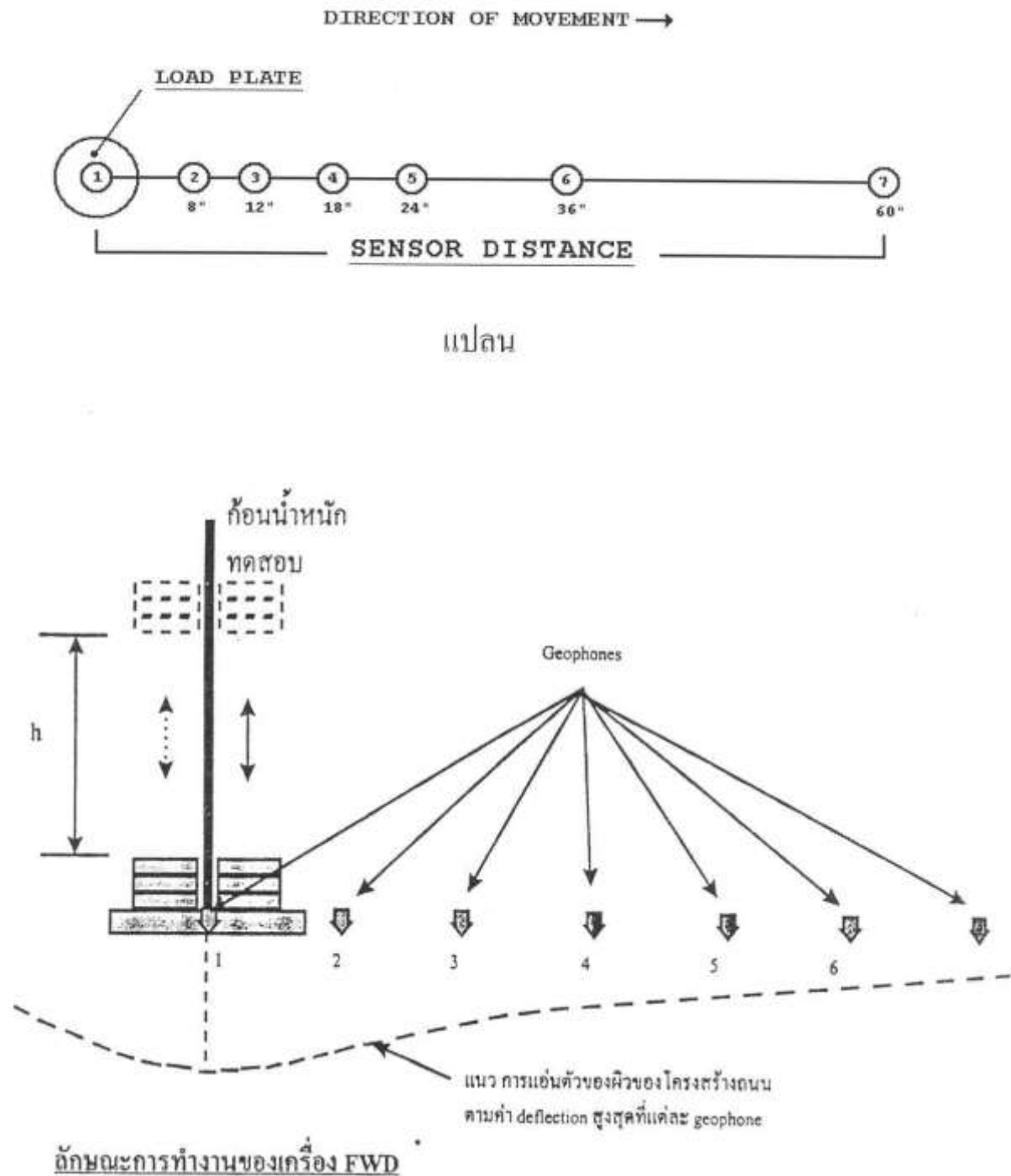
รูปที่ 2.2-3 แสดงก่อนน้ำหนักและโครงสร้างของเครื่องมือ FWD
(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวง 2543)

ภายหลังจากการปล่อยน้ำหนักทดสอบให้เกิดแรงกระทำต่อโครงสร้างถนนเพื่อส่งสัญญาณคลื่นรูป Half Sine Wave ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ออกไปแล้ว ขณะเดียวกันระบบสามารถทำการตรวจวัดค่าการแอ่นตัวที่เป็นผลจากแรงที่กระทำโดยใช้ Geophones อย่างน้อย 7 ตัวและอย่างมาก 9 ตัว ทำงานร่วมกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 โดยมี Geophone หนึ่งตัวทำหน้าที่วัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนที่ตำแหน่งกึ่งกลางใต้จุดที่แรงทดสอบกระทำขณะที่ Geophones อีก 6 ตัวที่เหลื่อกระจายตัวเรียงกันบนแนวทั้งหน้าหรือหลัง Geophone ตัวแรกขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดสอบก่อนการทดสอบต้องตรวจให้แน่ใจด้วยว่าผิวส่วนรับสัญญาณของ Geophones สัมผัสกับผิวถนนได้เป็นอย่างดี หลังจากระบบได้รับสัญญาณที่อ่านได้จาก Geophone แล้วสัญญาณของค่าการแอ่นตัวที่วัดได้จะได้รับการบันทึกโดยระบบเก็บข้อมูลคอมพิวเตอร์ที่ต่ออยู่กับ Geophones สำหรับ Geophone ตัวแรกจะติดตั้ง Load Cell ไว้ด้วยเพื่อวัดน้ำหนักที่กระทำต่อผิวจราจร

--- Moving Wheel Load, 5 tons (10,000 lb) at
38.3 km/h (23.8 mph)
— Falling Weight Deflectometer (150 kg mass
at a drop height of 40 cm)
1 cm = 0.394 in.
1 kg = 2.20 lb



รูปที่ 2.2-4 สัญญาณคลื่น Half Sine Wave จากการทดสอบ FWD
(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2543)



รูปที่ 2.2-5 ตำแหน่ง Sensor และการทำงานของเครื่องมือ FWD

(ที่มา: สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง 2543)

ในการทดสอบนั้นเครื่อง FWD จะปล่อยก้อนน้ำหนักมาตรฐานเพื่อให้เกิดแรงทดสอบกระทำไปบนโครงสร้างถนนโดยการปล่อยน้ำหนักทดสอบที่ทราบขนาดจากระดับความสูงที่กำหนดไว้ในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถทำการเปลี่ยนแปลงค่าระดับความสูงได้ตามวัตถุประสงค์ ก้อนน้ำหนักทดสอบจะตกกระทบบนแผ่นรองรับที่ติดอยู่กับแผ่นฐานที่มีแผ่นยางช่วยรับทำหน้าที่คล้ายสปริง ซึ่งทั้งรูปแบบของการให้

น้ำหนักทดสอบและสปริงต้องได้รับการออกแบบให้เหมาะสมเพราะเป็นส่วนสำคัญที่จะทำให้ได้ลักษณะแรงที่กระทำต่อโครงสร้างถนนที่สะท้อนเป็นสัญญาณคลื่นของแรงกระทำที่มีขนาด รูปร่างและช่วงเวลาของแรงกระทำที่เหมาะสมคล้ายคลึงกับสัญญาณคลื่นของแรงกระทำที่เกิดขึ้นเมื่อล้อรถบรรทุกหนักกระทำต่อโครงสร้างถนนขณะวิ่งผ่าน ซึ่งค่าของแรงดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$P = (2ghmk)^{0.5} \quad (2.2-1)$$

โดยที่

P	=	จุดสูงสุดของแรง, ปอนด์
g	=	ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก, ฟุตต่อวินาที ²
h	=	ระยะความสูงของการปล่อยน้ำหนัก, ฟุต
m	=	มวลของก้อนน้ำหนักทดสอบ, ปอนด์
k	=	ค่าคงที่ของสปริง

การทำงานทดสอบโดยใช้เครื่อง FWD ค่าสูงสุดของแรง (P) จะได้รับการวัดและบันทึกโดยตัวควบคุมการให้น้ำหนักของเครื่อง จากนั้นข้อมูลค่าการแอ่นตัวที่ได้จากเครื่อง FWD สามารถนำไปเป็นข้อมูลในการคำนวณย้อนกลับ เพื่อหาคุณสมบัติทางวิศวกรรม เช่น ค่า Elastic Modulus ของวัสดุในโครงสร้างถนนแต่ละชั้น ตามหลักในการวิเคราะห์ห่ออกแบบโครงสร้างถนนลาดยางโดยใช้ Layered Elastic Theory ซึ่งผสมผสานกันระหว่างสมการของ Boussinesq และสมมติฐานของ Odemark ดังที่อธิบายไว้โดย Ullitz (1987) นั้นเป็นที่ทราบกันว่า เมื่อโครงสร้างถนนที่ทราบความหนาในแต่ละชั้นได้รับแรงกระทำจากน้ำหนักบรรทุกที่กำหนดขึ้นในการพิจารณาออกแบบแล้วค่า Stress , Strain และการแอ่นตัวที่เกิดขึ้นที่ตำแหน่งใดๆ ในโครงสร้างถนนอันเป็นผลจากแรงกระทำดังกล่าวสามารถคำนวณหาได้โดยตรง โดยอาศัยหลักการของ Layered Elastic Theory โดยมีข้อแม้ว่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุในโครงสร้างถนนแต่ละชั้นซึ่งได้แก่ค่า Elastic Modulus และค่า Poisson's Ratio จะต้องสามารถตรวจสอบหาค่าจนเป็นข้อมูลที่ทราบได้เพื่อใช้ในการคำนวณดังกล่าว ในการประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่มีการใช้งานมาแล้วโดยใช้เครื่อง FWD นั้น จะเป็นขบวนการที่ย้อนกลับโดยที่ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุโครงสร้างถนนเช่นค่า Elastic Modulus ของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนนที่ต้องการตรวจสอบนั้นเป็นข้อมูลที่ยังไม่ทราบและต้องการที่จะทราบเพื่อบอกถึงสภาพความแข็งแรงของชั้นต่างๆ ในโครงสร้างถนนในขณะนั้น ซึ่งเครื่อง FWD จะสามารถวัดค่าการแอ่นตัวในการที่ต้องการตรวจสอบนั้นแล้วจึงอาศัยกระบวนการย้อนกลับ เพื่อประมาณค่า Elastic Modulus ของวัสดุโครงสร้างถนนในแต่ละชั้น ในขั้นตอนของการคำนวณย้อนกลับนี้จะกระทำโดยอาศัยหลักการป้อนข้อมูลต่างๆ ที่ทราบไม่ว่าจะเป็นความหนาของแต่ละชั้นในโครงสร้างถนน น้ำหนักหรือแรงกระทำที่ใช้ในการทดสอบค่า Poisson's Ratio ของวัสดุในแต่ละชั้นของโครงสร้างถนน จากนั้นจึงสมมติค่า Elastic Modulus ของวัสดุโครงสร้างถนนในแต่ละชั้นเข้ากับสมการคำนวณค่า Deflection ตามหลักการ Layered Elastic Theory และเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวที่คำนวณได้กับค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการวัดด้วยเครื่อง FWD

ทำเช่นนี้ครั้งแล้วครั้งเล่าจนกว่าจะได้กลุ่มค่าการแอ่นตัวที่คำนวณได้สอดคล้องกับกลุ่มค่าการแอ่นตัวที่วัดจากเครื่อง FWD จึงจะถือว่าค่า Elastic Modulus นั้นเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการคำนวณต่อไป จะเห็นว่าวิธีการคำนวณในลักษณะดังกล่าวเหมาะสมและสะดวกอย่างยิ่งที่จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณให้ได้ผลที่ถูกต้องรวดเร็ว ในปัจจุบันโปรแกรมคอมพิวเตอร์ในลักษณะดังกล่าวมีอยู่ด้วยกันหลายโปรแกรม แต่โปรแกรม ELMOD (Evaluation of Layer Module and Overlay Design) เป็นโปรแกรมที่ใช้งานกันอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ โปรแกรม ELMOD ยังสามารถคำนวณประมาณอายุการใช้งานที่เหลืออยู่ของถนนสายนั้นๆ ตลอดจนค่าความหนาเสริมผิวที่ถนนสายนั้นต้องการอีกด้วย

2.2.5 การศึกษาและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

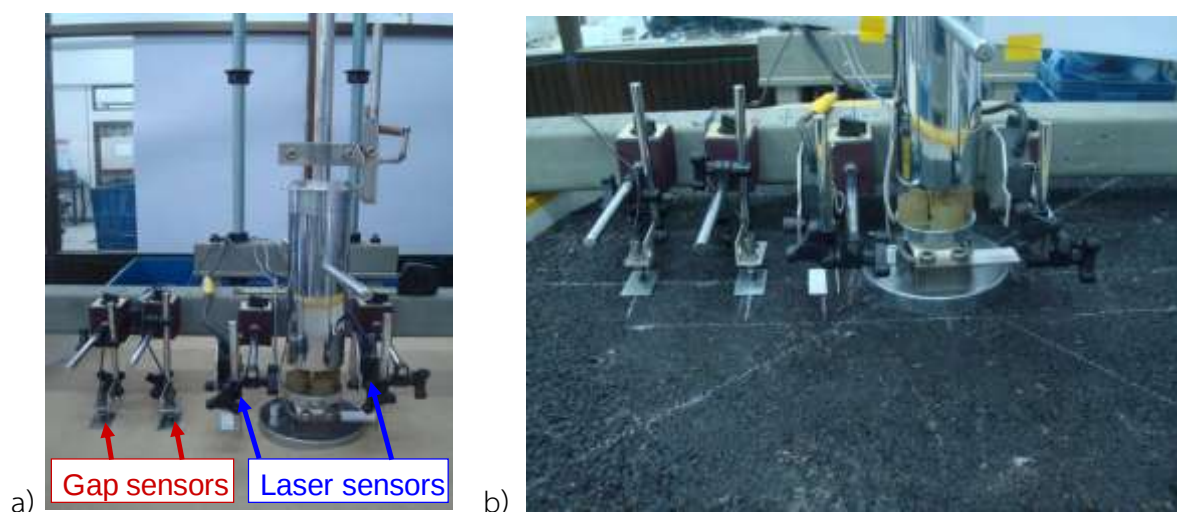
นายประเสริฐ บุญรักษาและ นายไพบุลย์ รัตวิริยะพงศ์ ส่วนสำรวจและประเมินสภาพทาง สำนักวิเคราะห์และตรวจสอบ กรมทางหลวงได้ทำการวิเคราะห์หาความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง โดยการนำข้อมูลการแอ่นตัวของถนนที่ทดสอบได้จากเครื่องมือ Falling Weight Deflectometer (FWD) มาทำการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Evaluation of Layer Moduli and Overlay Design (ELMOD) เพื่อหาอายุการใช้งานที่คงเหลือ (Remaining Life) และ วิเคราะห์หาความหนาเสริมความแข็งแรง (Overlay Design) ตามอายุการใช้งานที่ออกแบบ จากการใช้ ELMOD พบว่าโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เมื่อถนนก่อสร้าง ได้ตรงตามเงื่อนไข และ ข้อจำกัดของการใช้ทฤษฎีเชิงวิเคราะห์ กล่าวคือ วัสดุต้องมีความสม่ำเสมอตลอด มีคุณสมบัติเหมือนกันในทุกทิศทาง มีคุณสมบัติยืดหยุ่น ผิวทางต้องมีความหนามากกว่า 80 มิลลิเมตร วัสดุชั้นบนกว่าต้องมีความแข็งแรงมากกว่าวัสดุในชั้นถัดลงไป บางครั้งในการวิเคราะห์ให้ผลถูกต้องไม่มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากผลกระทบของวัสดุชั้นบนกว่า มีความแข็งแรงน้อยกว่าชั้นถัดลงไป ผลกระทบของความแข็งแรงวัสดุดินคันทาง ไม่เท่ากันตลอดความลึก และ ผลกระทบของชั้นดินแข็งที่อยู่ใต้วัสดุดินคันทาง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม โปรแกรม ELMOD ได้พิจารณาคำนวณ nonlinearity ของวัสดุดินคันทาง และ เทคนิคอื่น ๆ เช่น การรวมความหนาของชั้นวัสดุที่มีความแข็งแรงน้อยกว่าเข้ากับความหนาของชั้นวัสดุถัดไปที่มีความแข็งแรงมากกว่า หรือ การกำหนดค่าอีลาสติคโมดูลัสของชั้นผิวทางที่บางกว่า 80 มิลลิเมตร ทำให้ผลกระทบที่สำคัญต่าง ๆ ลดน้อยลง ซึ่งจากการวิเคราะห์หาอายุการใช้งานที่เหลือ หรือ ค่าความหนาเสริมความแข็งแรงให้ผลออกมาไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อมีการพิจารณาอย่างละเอียดของผลกระทบต่าง ๆ เหล่านี้ การวิเคราะห์โดยโปรแกรม ELMOD ต้องใช้ข้อมูลเป็นจำนวนมาก และ จากหลายด้าน ผู้ทำการวิเคราะห์ต้องใช้ความรู้ในทฤษฎีต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวอ้างถึง ต้องใช้ประสบการณ์ในการวิเคราะห์โครงสร้างชั้นทาง ใช้เวลาในการตรวจสอบข้อผิดพลาดบางอย่างที่เกิดขึ้น ผลที่ได้จึงนำไปใช้ได้ในระดับโครงการ (Project Level) คือใช้ในการวิเคราะห์ และ ออกแบบ เฉพาะสำหรับสายทาง หรือ ในงานศึกษาวิจัย

นาย ธนศักดิ์ ใฝ่กระโทก และนายสมิคร สุนทอง ศูนย์วิจัยและพัฒนาทาง กรมทางหลวงได้วิจัยหาค่าคุณสมบัติวัสดุของแอสฟัลต์คอนกรีตในสนาม โดยเฉพาะค่าอีลาสติคโมดูลัส ซึ่งพบว่าค่าอีลาสติคโมดูลัสในสนามเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนค่าอีลาสติคก็จะมีเปลี่ยนแปลงด้วย ดังนั้นการวัดค่าอีลาสติคโมดูลัสในอุณหภูมิ

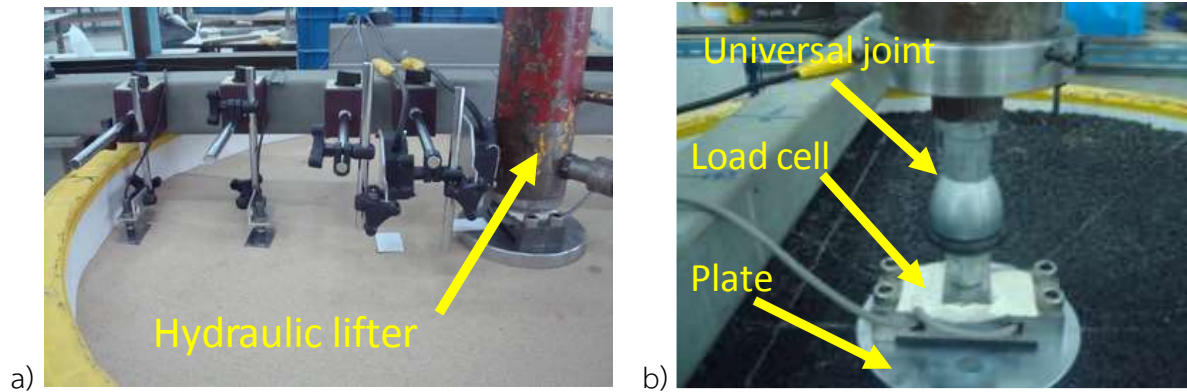
ต่างๆจึงจำเป็นต้องปรับแก้ค่าอีลาสติคโมดูลัสเนื่องจากอุณหภูมิที่ทำการทดสอบในสนามให้เป็นค่าอุณหภูมิตามมาตรฐานที่กำหนด แล้วจึงใช้ค่าที่ปรับแก้แล้วนั้นในการประเมินอายุการใช้งานและการออกแบบความหนาการเสริมผิวทาง

คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบขนาดเล็ก โดยพัฒนาขึ้นมาจากเครื่องต้นแบบจากประเทศญี่ปุ่นโดย Hirakawa et al. (2008) และ Masuda (2007) เพื่อทำการทดสอบ Falling Weight Deflectometer (FWD) ในห้องปฏิบัติการ และทำการเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ได้จากการทดสอบ FWD กับวิธีทางสถิตยศาสตร์ (Static Plate Load Test)

วิธีดำเนินการวิจัย เริ่มจากการพัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกต้นแบบขนาดเล็กขึ้นมาใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เพื่อใช้ในการทดสอบความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทางสามประเภทที่ได้จำลองขึ้นมาในห้องปฏิบัติการ กล่าวคือ (1) โครงสร้างทางไม่มีผิวทาง, (2) โครงสร้างทางผิวกรวด และ (3) โครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ติกคอนกรีต จากนั้นจึงทำการทดสอบ Falling Weight Deflectometer และ Static Plate Load Test (รูปที่ 2.6) แล้วทำการวิเคราะห์ผลการทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ Falling Weight Deflectometer ที่ระยะตกระแทกต่างๆ จากนั้นจึงกำหนดพารามิเตอร์บ่งชี้สำหรับความแข็งแรงของชั้นทางในรูปของ Modulus of Subgrade Reaction แล้วจึงเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีดังกล่าว

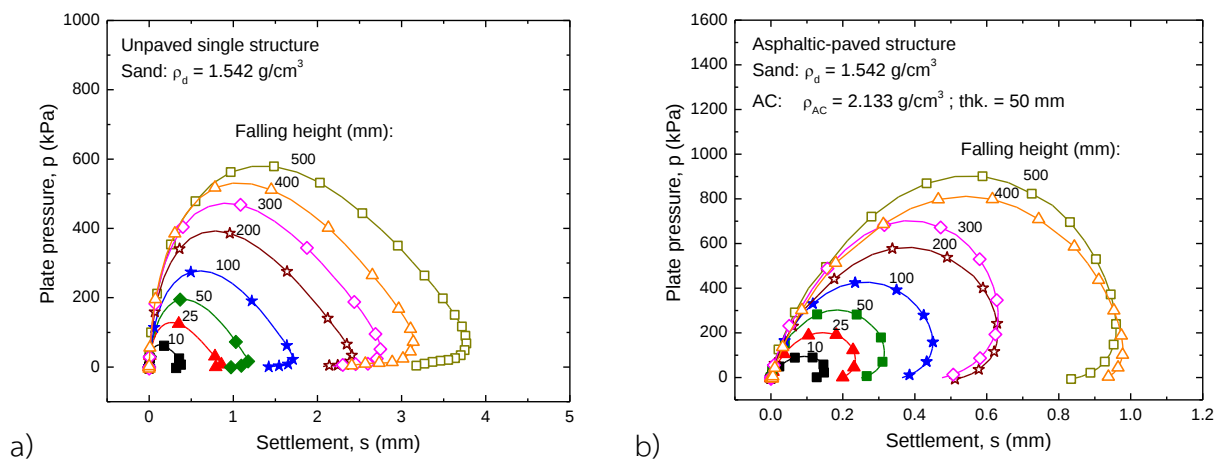


รูปที่ 2.2-6 การทดสอบ FWD ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่กับโครงสร้างชั้นทางประเภทต่างๆ: a) โครงสร้างทางไม่มีผิวทาง และ b) โครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ติกคอนกรีต



รูปที่ 2.2-7 การทดสอบ Static Plate Load Test ในห้องปฏิบัติการกับโครงสร้างชั้นทางประเภทต่างๆ:

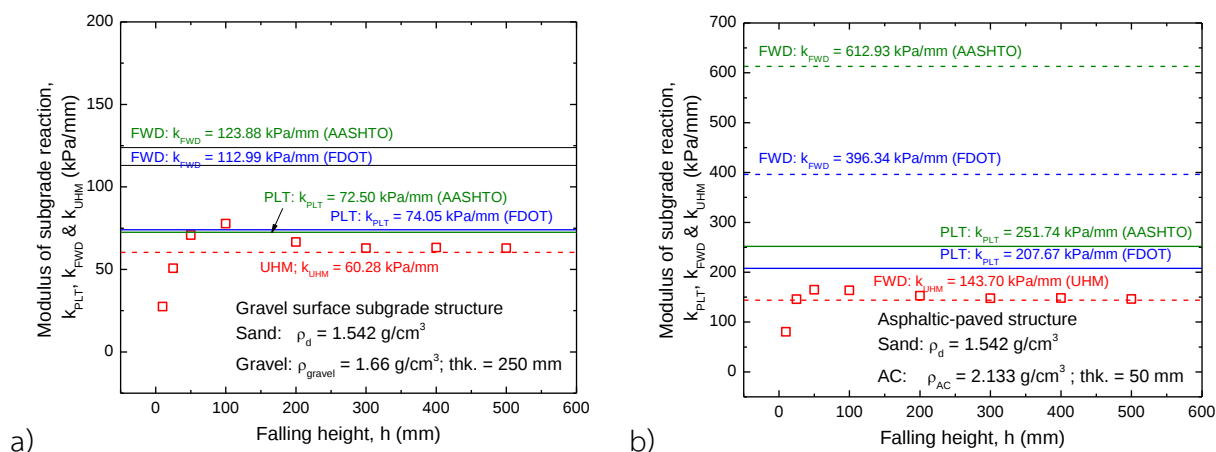
a) โครงสร้างทางไม่มีผิวทาง และ b) โครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ติกคอนกรีต



รูปที่ 2.2-8 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับการทรุดตัวที่ได้จากการทดสอบ FWD กับโครงสร้างชั้นทาง

ประเภทต่างๆ: a) โครงสร้างทางไม่มีผิวทาง และ b) โครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ติกคอนกรีต

จากผลการทดสอบพบว่า ค่าความแข็งแรงที่วัดได้จากการทดสอบ Falling Weight Deflectometer และ Static Plate Load Test สำหรับแต่ละประเภทของโครงสร้างทางมีความใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 (เปรียบเทียบค่า ที่ได้จากเครื่องมือการแอ่นตัวแบบตกระแทกขนาดเล็กที่ได้พัฒนาขึ้น กับค่า ที่ได้จาก Static Plate Load Test) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเครื่องมือ FWD ที่ได้พัฒนาขึ้นมาและวิธีการวิเคราะห์ผลเพื่อประเมินค่าความแข็งแรง มีความแม่นยำและมีประสิทธิภาพ (สราวุธและคณะ, 2552; ฐิติกรและคณะ, 2553; Kongkitkul et al., 2010)



รูปที่ 2.2-9 การเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงที่ผิวทางระหว่างการทดสอบ Falling Weight

Deflectometer และ Static Plate Load Test: a) โครงสร้างทางผิวกรวด และ b)

โครงสร้างทางผิวแอสฟัลต์ติกคอนกรีต

ดังนั้น ในการพัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกขนาดเท่าของจริง สามารถทำได้โดยการ และปล่อยตุ้มน้ำหนัก โดยขยายมิติของเครื่องมือทดสอบ และพัฒนาระบบการยกที่ยังคงหลักการทำงาน เช่นเดิม

Posribink et al., (2012b) ได้พัฒนาเครื่องวัดค่าการแอ่นตัวแบบตกกระแทกขนาดเล็ก (Light Weight Deflectometer) ที่ใช้ในท้องปฏิบัติการ มาปรับใช้กับงานในสนามในการประเมินการวัดสติเฟนสของ ผิวทางต่างกันได้แก่ พื้นผิวดินเดิม หินคลุก และ ผิวทางแอสฟัลต์ ซึ่งให้ได้ค่าที่ใกล้เคียงกับวิธีมาตรฐาน (PLT) Posribink et al., (2011a) ยังทำการวิเคราะห์หาผลกระทบของขนาดแผ่นงานที่มีผลต่อค่าสติเฟนสของผิว ทาง ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า ค่าสติเฟนสของผิวทางขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นงานที่ใช้ทดสอบโดยเมื่อแผ่นงานมี ขนาดใหญ่ ค่าสติเฟนสของผิวทางมีแนวโน้มจะลดลง

2.3 ระเบียบวิธีการดำเนินวิจัย

ปัจจุบัน ประเทศไทยได้นำเข้าเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทก (Falling Weight Deflectometer, FWD) จากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง ดังนั้นหากสามารถสร้างเครื่องมือทดแทนที่ประกอบ จากวัสดุภายในประเทศเป็นหลัก และมีประสิทธิภาพในการทดสอบที่ยอมรับได้ ก็จะเป็นการลดต้นทุนการซ่อม บำรุงเป็นอย่างมาก นอกไปจากนี้ การวิเคราะห์ข้อมูลตามอย่าง FWD ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศจำเป็นต้องใช้ ซอฟต์แวร์ลิขสิทธิ์ซึ่งมีราคาแพง

2.3.1 งานพัฒนาเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทก

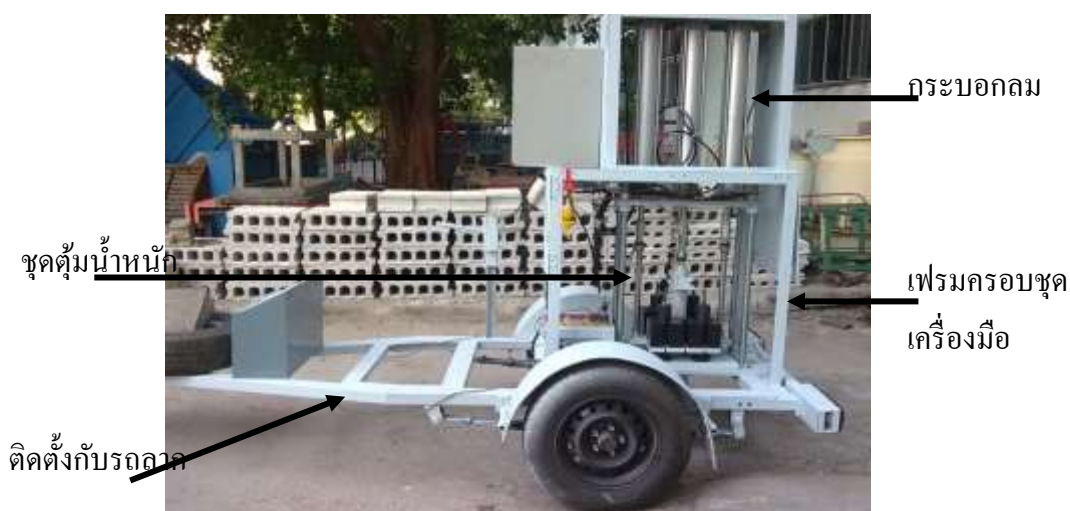
2.3.1.1 หลักการทำงาน

เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกที่พัฒนาเป็นแบบติดตั้งกับรถลาก (รูปที่ 3.1) ใช้ระบบการยก ด้วยกระบอกลม โดยกระบอกลมด้านซ้ายและขวาจะทำหน้าที่ในการลดระดับแผ่นหน้าสัมผัสให้สัมผัสกับผิว ทางเมื่อจะเริ่มทดสอบ ในขณะที่กระบอกลมตรงกลางจะยกชุดตุ้มน้ำหนักไปยังความสูงที่ต้องการทดสอบ เมื่อ

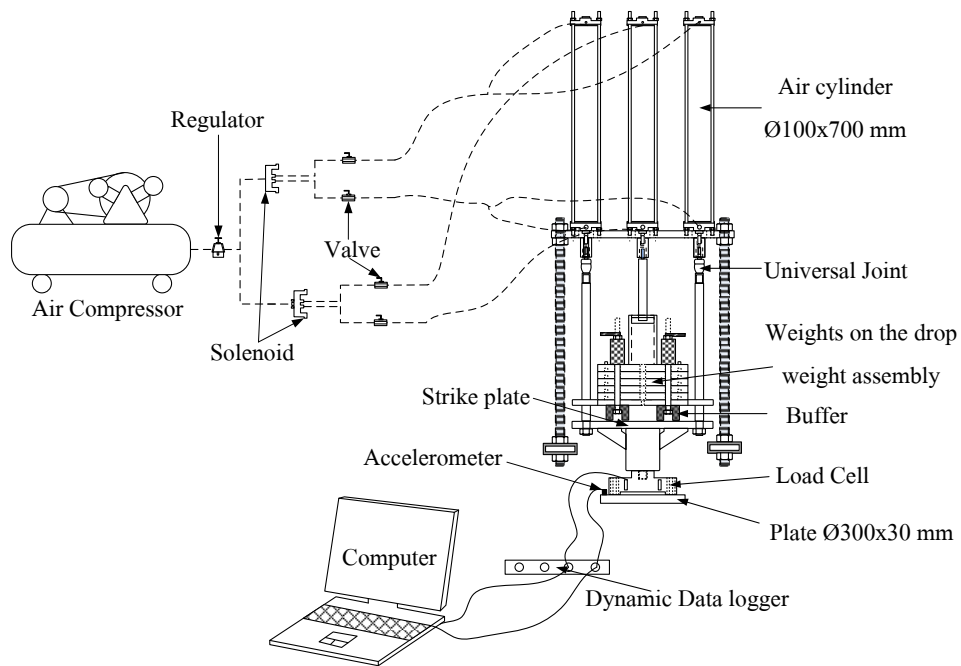
ยกตุ้มน้ำหนักไปยังความสูงที่ต้องการแล้ว จึงปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกกระทกลงบนแผ่นหน้าสัมผัสผ่านทางตัวลดแรงกระแทก เพื่อสร้างแรงกระแทกต่อผิวทางและทำการวัดค่าแรงกระแทกและค่าการทรุดตัวของผิวทาง น้ำหนักตกกระแทกในการทดสอบอยู่ที่ กิโลนิวตัน ตามมาตรฐาน 50ASTM D 4694: Standard Test Method for Deflections with a Falling-Weight-Type Impulse Load Device รูปที่ 3.2 แสดงถึงระบบการทำงานของ เครื่องวัดการแอ่นตัวที่พัฒนาขึ้น โดยที่ส่วนประกอบหลักของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นมานั้นจะแสดงดังรูปที่ 3.3

2.3.1.2 กลไกควบคุมการทดสอบ

การพัฒนาระบบยกตุ้มน้ำหนักจะใช้กระบอกลมดังที่กล่าวไว้ข้างต้น เพราะสามารถดูแลรักษาได้ง่าย เมื่อเทียบกับระบบอื่น กระบอกลมมีหน้าที่ยกตุ้มน้ำหนักขึ้น เพื่อให้เกิดแรงกระแทกเมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักลง อย่างอิสระ น้ำหนักตกกระแทกในการทดสอบอยู่ที่ 50 กิโลนิวตัน ดังนั้นการทดสอบต้องทำการทิ้งน้ำหนักให้ กระแทกจำนวน 3 ครั้ง ครั้งแรกจะเป็นการทิ้งน้ำหนักลงกระแทกเพื่อหาค่าอ้างอิง ครั้งที่สองเป็นการทิ้งน้ำหนัก ลงไปกระแทก โดยนำค่าของการกระแทกในครั้งแรกมาพัฒนาเพื่อปรับระยะการยกน้ำหนักให้ได้ค่าแรง กระแทกอ้างอิงตามมาตรฐานน้ำหนักตกกระแทกมาตรฐานที่ 50 kN จากนั้น ในครั้งที่สาม จะเป็นการปล่อยตก กระแทกเพื่อเก็บผลการทดสอบ ระบบยกตุ้มน้ำหนักที่จะพัฒนาจะสามารถอ่านค่าความสูงของการยกตุ้ม น้ำหนักอัตโนมัติผ่านทาง Extensometer (รูปที่ 3.4) ซึ่งส่งสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ เพื่อใช้อ่านและบันทึกค่า ระยะยกตุ้มน้ำหนัก



รูปที่ 2.3-1 เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทกที่พัฒนาขึ้นเป็นแบบติดตั้งบนรถลาก



รูปที่ 2.3-2 ระบบการทำงานของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น



รูปที่ 2.3-3 ส่วนประกอบของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกกระแทก



รูปที่ 2.3-4 ลักษณะของ Extensometer ที่จะใช้วัดความสูงของการยกตม้น้ำหนัก

ระบบที่ใช้ในการยกตม้น้ำหนักด้วยกระบอกลมตรงกลางประกอบด้วยวงจรมดแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งจะสามารถควบคุมการยกขึ้น และปรับระดับขึ้น ลงก่อนการปล่อยกระแทกได้ด้วย Solenoid Value ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ดังนั้น ในการยกตม้น้ำหนักครั้งแรกจะกระทำที่ความสูงระดับอ้างอิงเสมอและวัดความสูงก่อนการปล่อยด้วย Extensometer จากนั้นจึงนำค่าแรงกระแทกที่ได้มาพัฒนาเพื่อกำหนดความสูงของการปล่อยในครั้งที่ 2 แล้วจึงนำค่าแรงกระแทกจากการปล่อยทั้งสองครั้งจากค่าความสูงของการปล่อยที่แตกต่างกันสองค่า มาพัฒนาหาค่าความสูงที่เหมาะสมในการปล่อยครั้งที่สามเพื่อให้ได้แรงกระแทกมาตรฐานที่ 50 kN ในการยกตม้น้ำหนักขึ้นและปรับระดับละเอียดความสูงของตม้น้ำหนักจะกระทำผ่าน Solenoid Value จนกระทั่งค่าความสูงที่อ่านได้จาก Extensometer ตรงตามค่าที่ต้องการ

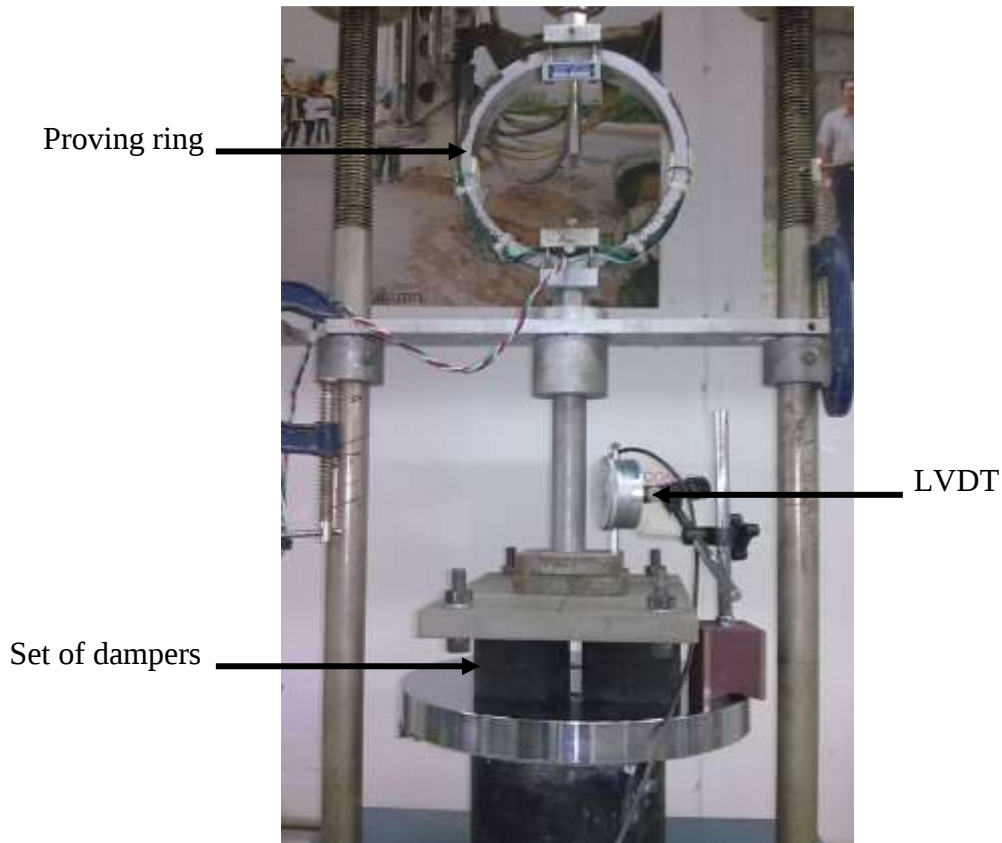


รูปที่ 2.3-5 Solenoid Value ที่จะใช้ควบคุมการยกและปรับระดับขึ้น/ลงของกระบอกลม

ในการปล่อยน้ำหนักลงกระแทก จะต้องรองรับด้วยตัวลดแรงกระแทก (Cushion) เพื่อยืดระยะเวลาที่แรงกระแทกที่กระทำต่อผิวทาง และลดการกระดอนกลับของตุ้มน้ำหนัก จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่าเมื่อระยะเวลาที่แรงกระแทกกระทำต่อผิวทางยาวนานมากขึ้น ข้อมูลที่วัดได้จะมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ระบบยกตุ้มน้ำหนักที่จะพัฒนาจะใช้ก้อนยางที่มีความแข็งแรง (รูปที่ 3.6) เพื่อรองรับแรงกระแทก ในงานวิจัยนี้จะใช้ยางรองกระแทกจำนวน 4 ชิ้น ซึ่งได้ทำการทดสอบหาค่าความแข็งแรงด้วยวิธี Unconfined Compression Test ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 2.3-6 ยางที่ใช้ในการรองรับแรงกระแทก



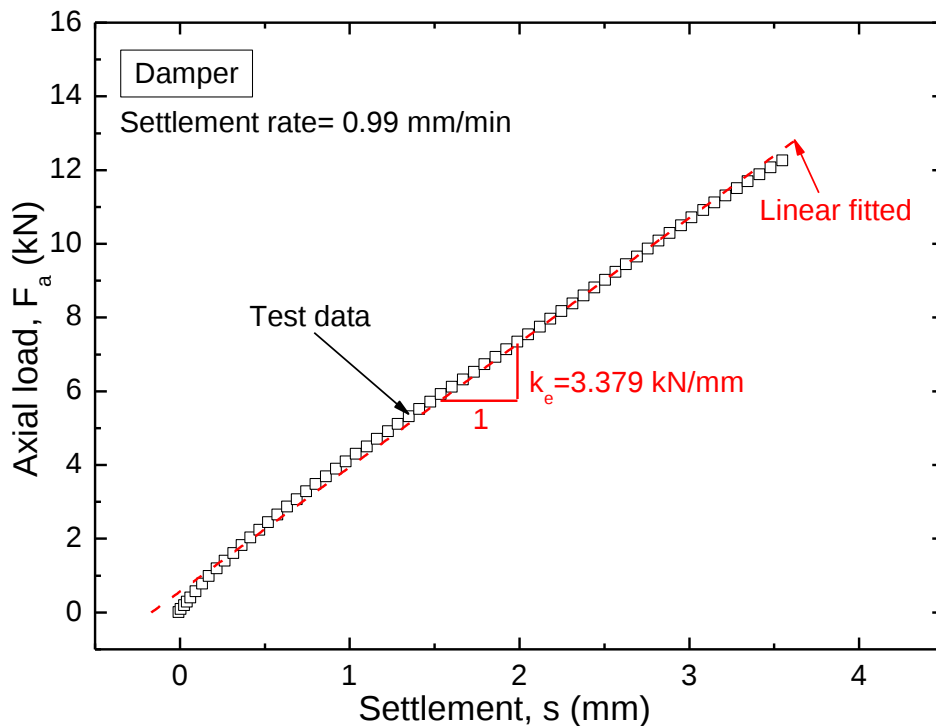
รูปที่ 2.3-7 การทดสอบหาค่าความแข็งแรงของชุดยางรองกระแทกที่ใช้

การหาค่าสติฟเนสของยางรองกระแทก ทำได้โดยการทดสอบยางรองกระแทกด้วยการทดสอบแรงอัดแบบทิศทางเดียว (Unconfined Compression Test) (รูปที่ 2.3-7) ทดสอบทั้งหมด 4 ชั้น เพื่อจำลองการกระแทกของยางรองกระแทกขณะได้รับการทดสอบ ระยะการเสียรูปในแนวตั้งสามารถวัดได้โดยใช้เครื่องมือวัด LVDT (Linear Variable Differential Transformer) และใช้เครื่องมือวัดแรง (Load cell) ในการหาแรงที่กระทำต่อยาง

$$k_e = \frac{F_a}{\Delta} \quad (2.3-1)$$

โดยที่

- k_e = ค่าสติฟเนสของยางรองกระแทก (kN/mm),
- F_a = แรงในแนวแกนที่กระทำต่อยาง (kN), and
- Δ = ระยะการเสียรูปของยางในแนวตั้ง (mm).



รูปที่ 2.3-8 ผลการทดสอบหาค่าความแข็งแรงของยางรองกระแทก

จากรูปที่ 2.3-8 แสดงผลการทดสอบหาแรงอัดในแนวแกนของยางรองกระแทก 4 ชิ้น จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดในแนวแกนกับค่าการทรุดตัวพบว่าค่าสตีเฟนสมีค่าเท่ากับ 3.379 kN/mm

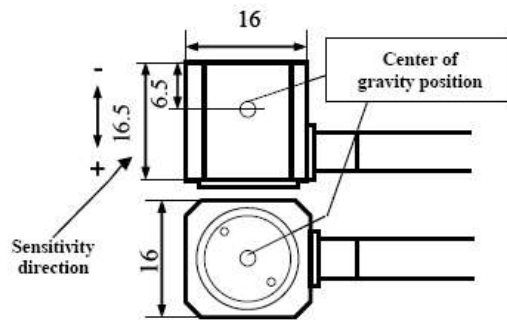
2.3.2. เครื่องมือวัด

1) เซลล์วัดแรง (Load cell) เครื่องมือวัดแรงกระแทกจะพัฒนาขึ้นโดยการสร้างเซลล์วัดแรงแบบไฟฟ้าขึ้น (รูปที่ 2.6) โดยจะมีขีดความสามารถในการอ่านค่าน้ำหนักกระแทกได้ถึง 100 kN เพื่อรองรับน้ำหนักตกกระแทกมาตรฐานที่ 50 kN การพัฒนาจะสร้างจาก Machine โครงสร้างของเซลล์วัดแรงขึ้นมาก่อนแล้วจึงทำการติดตั้งสเตรนเกจเพื่อการวัดแรงที่กระทำที่โครงสร้างของเซลล์วัดแรงต่อไป ทั้งนี้ ก่อนการนำมาใช้จะต้องทำการปรับเทียบเพื่อให้ค่าแรงกระแทกที่อ่านได้มีความถูกต้องและแม่นยำ

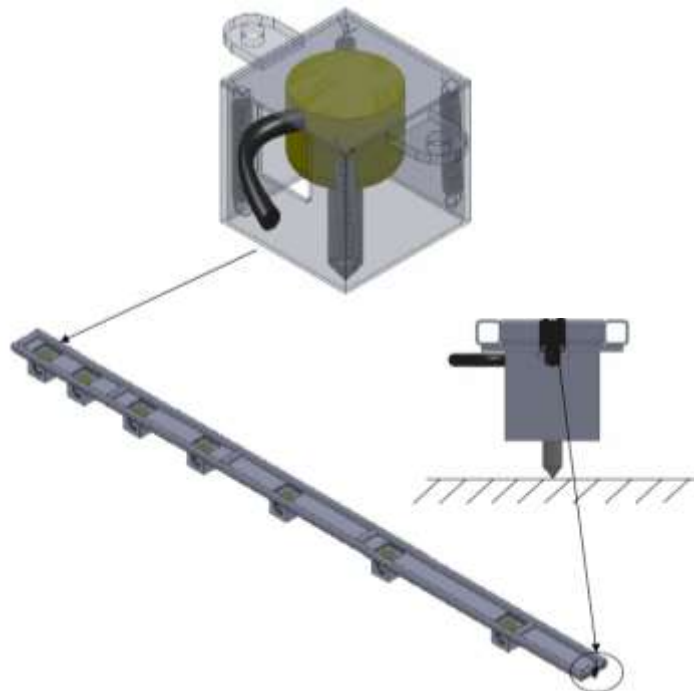


รูปที่ 2.3-9 Load cell ที่ใช้ในการทดสอบมีความสามารถในการรับแรงกระแทกถึง 15 ตัน

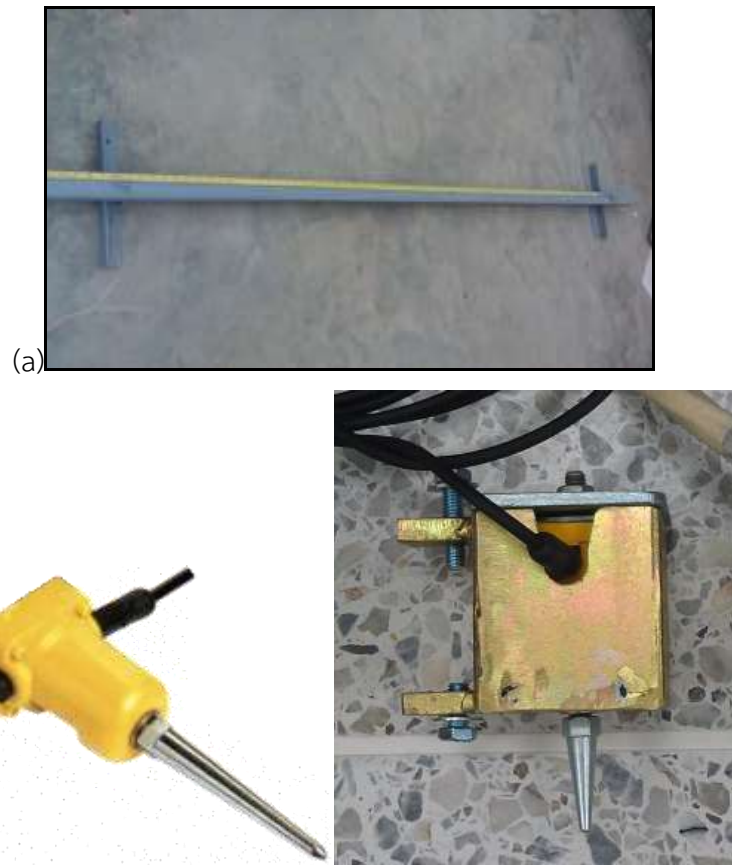
2) Accelerometer (รูปที่ 2.3-10) จะถูกติดตั้งที่บริเวณกึ่งกลางแผ่นหน้าสัมผัส เพื่อวัดการทรุดตัวของแผ่นหน้าสัมผัส สำหรับการวัดค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางที่ระยะห่างออกจากจุดศูนย์กลางตามแนวรัศมีออกมาเป็นระยะทางเท่ากับ 30, 60, 90 และ 150 เซนติเมตร จะใช้ Geophone (รูปที่ 2.3-11) ติดตั้งกับคานเพื่อให้สามารถให้สัมผัสกับผิวทางได้ เซลล์วัดแรง ,Extensometer ,Accelerometer และ Geophone ที่เลือกใช้จะสามารถต่อเข้ากับชุดบันทึกข้อมูลแบบไดนามิกได้ ทั้งนี้ชุดเครื่องมือวัด Geophone ได้ทำมาเสร็จแล้วดังแสดงในรูปที่ 2.3-12



รูปที่ 2.3-10 Accelerometer outline.

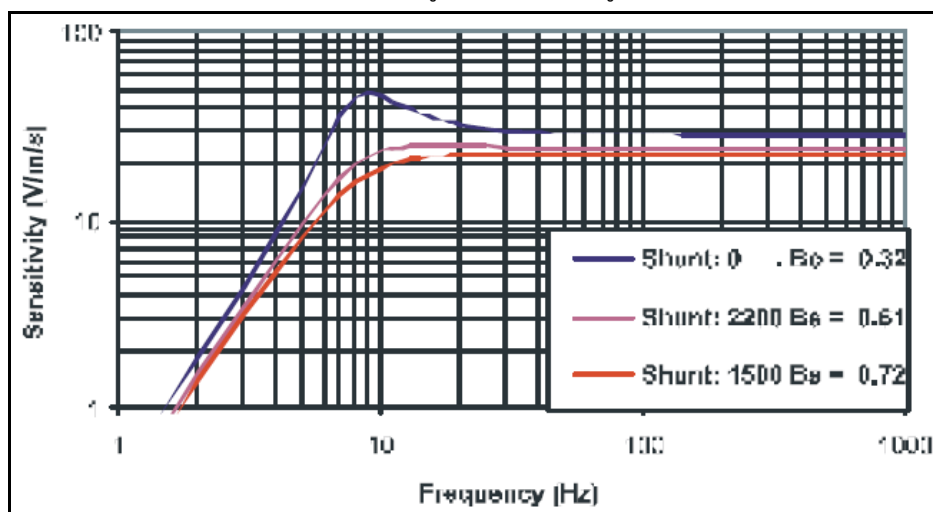


รูปที่ 2.3-11 Geophone และคานกดให้ปลายสัมผัสกับผิวทางที่จะทดสอบเพื่อวัดค่าการแอ่นตัว

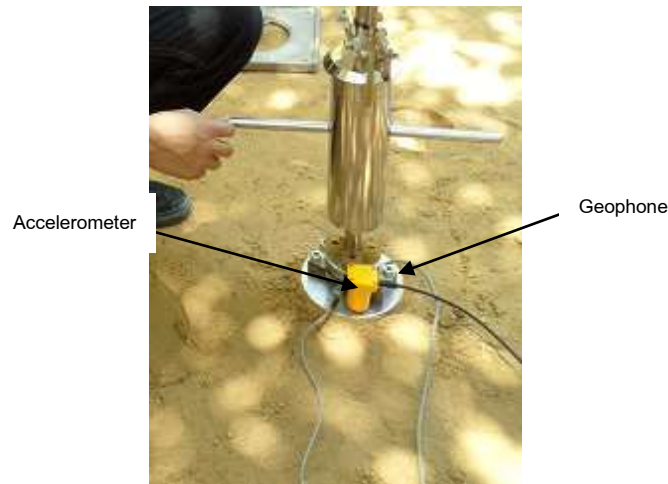


รูปที่ 2.3-12 ชุด Geophone a) คานติดตั้ง Geophone; b) Geophone และ โครงครอบ

3) Geophone ที่ใช้ในโครงการนั้นเป็น รุ่น SM-6 ซึ่งสามารถตอบสนองการสั่นของผิวทางอยู่มากกว่า 150Hz โดยก่อนที่จะนำมาใช้เพื่อการทดสอบ ได้มีการสอบเทียบกับเครื่องมือเดิมที่เคยใช้คือ Accelerometer ว่ามีการวัดที่ต่างกันหรือไม่ การสอบเทียบสามารถทำได้โดยใช้ค้อนกระแทกลงบนแผ่น plate บนชั้นทรายในแปลงทดสอบดังรูปที่ 2.3-12 แล้วคำนวณหาค่าการทรุดตัวของแผ่น plate และเปรียบเทียบผลจากเครื่องมือทั้ง 2 ชนิด ค่าปรับเทียบของ geophone สามารถดูได้จากกราฟในรูปที่ 2.3-13 มีค่าประมาณ 20 (V/m/s)

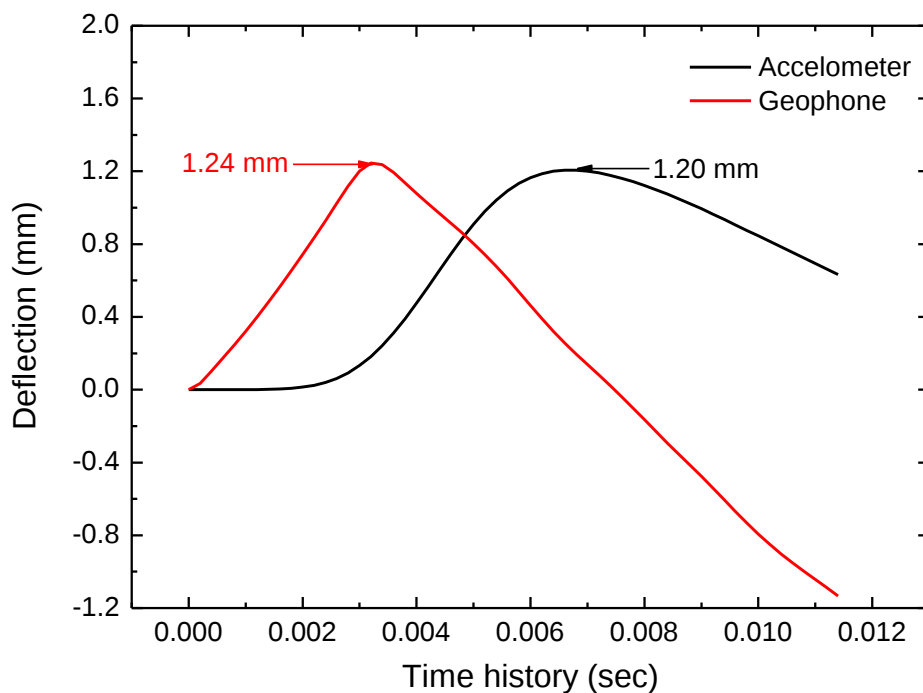


รูปที่ 2.3-13 Geophone response curve



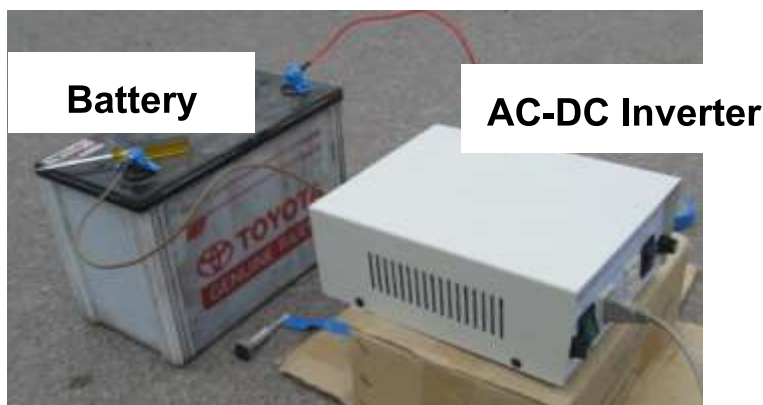
รูปที่ 2.3-14 การสอบเทียบเครื่องมือวัด

รูปที่ 2.3-15 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการทรุดตัวและเวลา เส้นสีแดงคือผลจากการใช้ Geophone เส้นสีดำคือผลที่ได้จากการใช้ Accelerometer ค่าการทรุดตัวสูงสุดคือ 1.24mm และ 1.20 mm ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าค่าที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองมีค่าความคลาดเคลื่อนต่างกันน้อยมากคือไม่ถึง $\pm 5\%$



รูปที่ 2.3-15 การเปรียบเทียบการวัดค่าการทรุดตัวของแผ่น plate ระหว่าง Accelerometer และ Geophone

4) แหล่งกำเนิดไฟฟ้าที่ใช้ในระบบ แหล่งจ่ายไฟฟ้าของระบบเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ 220V ซึ่งได้จากการแปลงกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ 12 V ผ่านเครื่องแปลงไฟฟ้าจากกระแสตรง 12V เป็นกระแสสลับ 220V (รูปที่ 2.3-16) ใช้ในควบคุมโซลินอยด์ (Solenoid) ในการยกขึ้น-ลงกระบอกลม



รูปที่ 2.3-16 แหล่งไฟฟ้าที่ใช้ในงานระบบ

2.3.3 การพัฒนาระบบเก็บและบันทึกข้อมูล

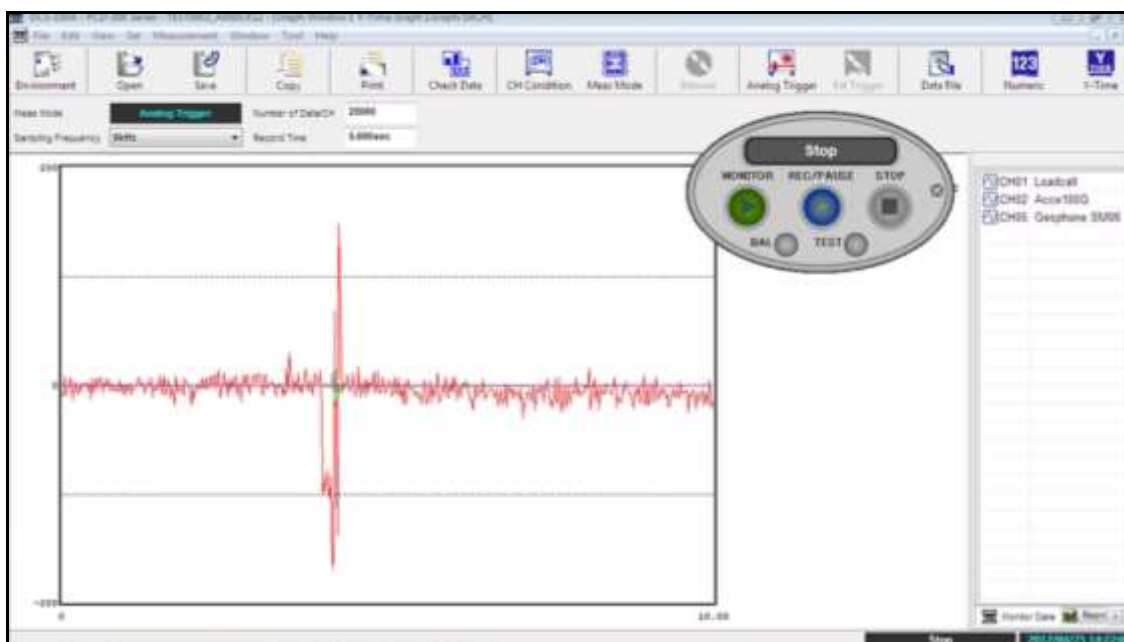
การทดสอบด้วยเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกเป็นการทดสอบแบบพลศาสตร์ ในการปล่อยตุ้มน้ำหนักให้ตกกระทบบนผิวทางและวัดการทรุดตัวที่ผิวทางจะใช้เวลาทั้งหมดน้อยมาก (น้อยกว่า 0.2 วินาที) ดังนั้นในการพัฒนาระบบเก็บและบันทึกข้อมูล จะต้องใช้ Dynamic Data Logger (รูปที่ 2.3-17) เพื่อเก็บข้อมูลที่มีความถี่เท่ากับ 5 kHz เป็นอย่างน้อย ซึ่ง Dynamic Data Logger ที่จะใช้มีลักษณะเป็น Slot หนึ่ง Slot สามารถต่อพ่วงกับเครื่องมือวัดได้ 4 ช่อง ดังนั้น จึงต้องต่อพ่วง Slot แบบ Parallel เข้าด้วยกันเพื่อให้มีจำนวนช่องเพียงพอต่อจำนวนเครื่องมือวัดที่จะใช้งาน



รูปที่ 2.3-17 Dynamic Data Logger และรูปแบบการต่อพ่วงแบบ Parallel

นอกจากนี้ จะต้องมียระบบสายนำสัญญาณที่เหมาะสมกับสภาพการใช้งานจริงในสนามโดยจะต้องห่อหุ้มด้วยท่อป้องกันแดดและฝน การบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์ จะทำผ่าน Interface ที่สื่อสารระหว่าง Dynamic Data Logger กับ คอมพิวเตอร์ ดังนั้น ในการศึกษาจะพัฒนาให้ระบบสายนำสัญญาณและการต่อพ่วงทั้งหมด มีลักษณะปกคลุมมิดชิดเพื่อความสะดวกและทนทานต่อการใช้งานในสนาม

ในการแสดงผลการทดสอบ จะสามารถดูได้แบบreal-time บน Interface ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ (รูปที่ 2.3-18) เป็นกราฟการตอบสนองของการทดสอบแบบคร่าวๆ ซึ่งสามารถดูได้ทั้ง แรงที่ตกกระทบบ และค่าการแอ่นตัว ณ จุดต่างๆ เปรียบเทียบกับเวลา ก่อนบันทึกข้อมูลลงคอมพิวเตอร์

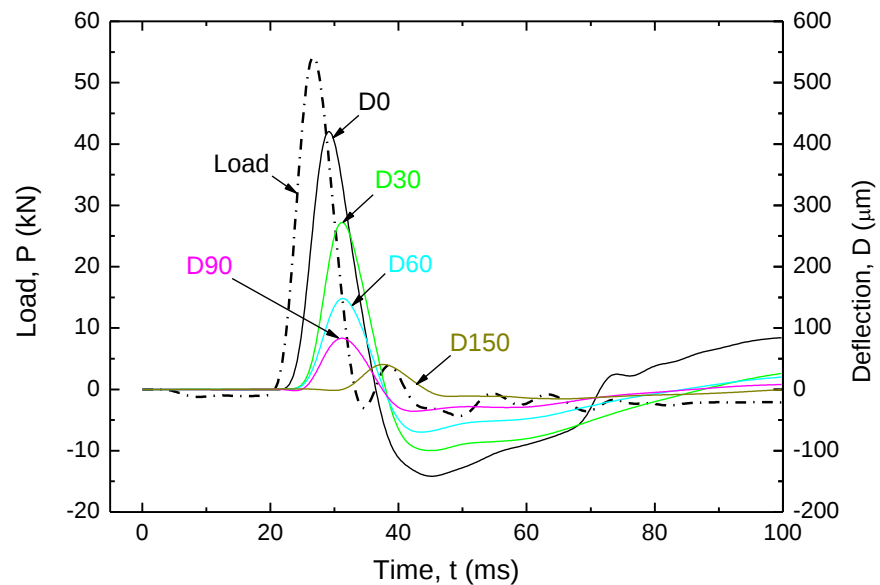


รูปที่ 2.3-18 การแสดงผล Interface ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์

2.3.4. ลักษณะและประเภทของข้อมูลที่จะจัดเก็บ

จากการทดสอบวัดแอ่นตัวของโครงสร้างทางด้วยเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นใหม่ร่วมกับเครื่อง FWD ของกรมฯ จะจัดเก็บข้อมูลต่างๆ ตามลักษณะดังต่อไปนี้

- 1) แรงกระแทกในรูปความสัมพันธ์กับเวลา ตามลักษณะดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3-19 การทดสอบจะปล่อยน้ำหนักตกระแทกให้เกิดแรงกระแทกสูงสุดใกล้เคียงกับน้ำหนักมาตรฐานที่ 50 kN
- 2) ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่วัดได้บริเวณผิวทางที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางแรงกระแทกในรูปความสัมพันธ์กับเวลา ตามลักษณะดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 2.3-19 การวัดค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่วัดได้บริเวณผิวทางโดยที่จุดศูนย์กลางจะวัดโดยเครื่องมือวัดความเร่ง ตำแหน่งอื่นๆจะวัดด้วยจีโอโฟน ซึ่งมีตำแหน่งของการวัดอยู่ที่ระยะตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางแรงกระแทกเท่ากับ 30, 60, 90, และ 150 เซนติเมตร



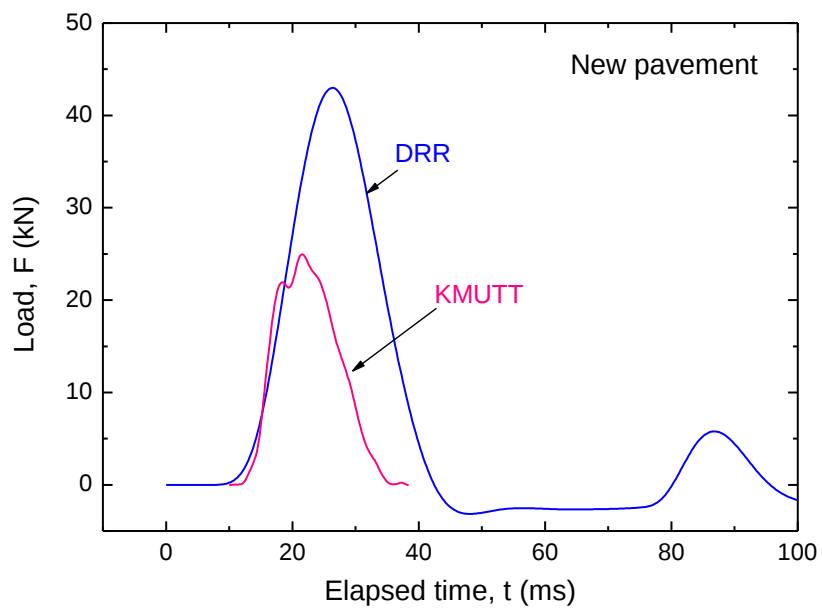
รูปที่ 2.3-19 ตัวอย่างประวัติเวลาแรงกระแทกและค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีวัดจากศูนย์กลางแรงกระแทก

2.3.5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทก

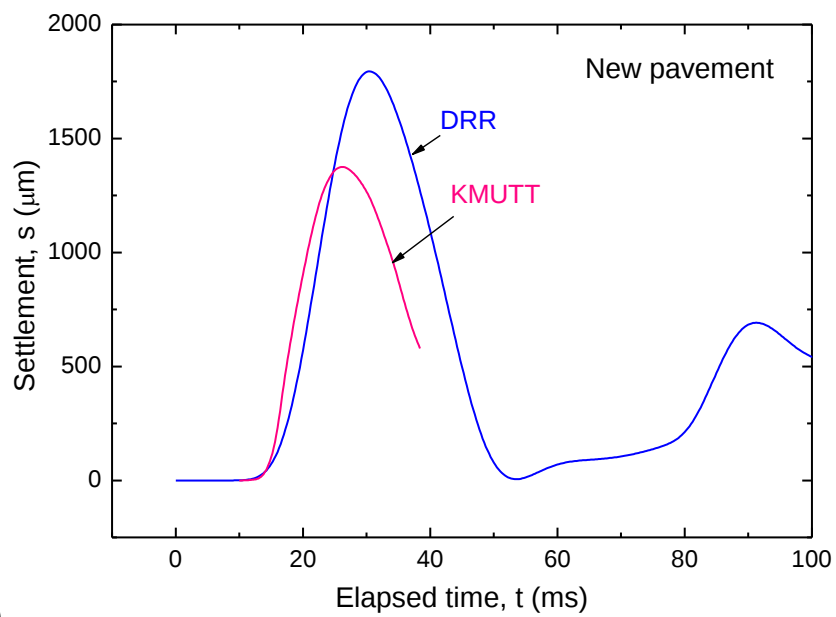
การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้น จะทำการทดสอบร่วมกับเครื่อง Falling Weight Deflectometer (FWD) ของกรมทางหลวงชนบท การทดสอบดังกล่าวจะดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมที่ใกล้เคียงกันมากที่สุด กล่าวคือ จะต้องทดสอบบนผิวทางที่ตำแหน่งและสภาพอากาศที่ใกล้เคียงกัน จากนั้นจึงนำข้อมูลแรงกระแทกและค่าการแอ่นตัวที่ผิวทางมาเปรียบเทียบกันต่อไป

เมื่อได้ทดสอบร่วมกับเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทแล้ว จะเปรียบเทียบผลการทดสอบดังต่อไปนี้ เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนา

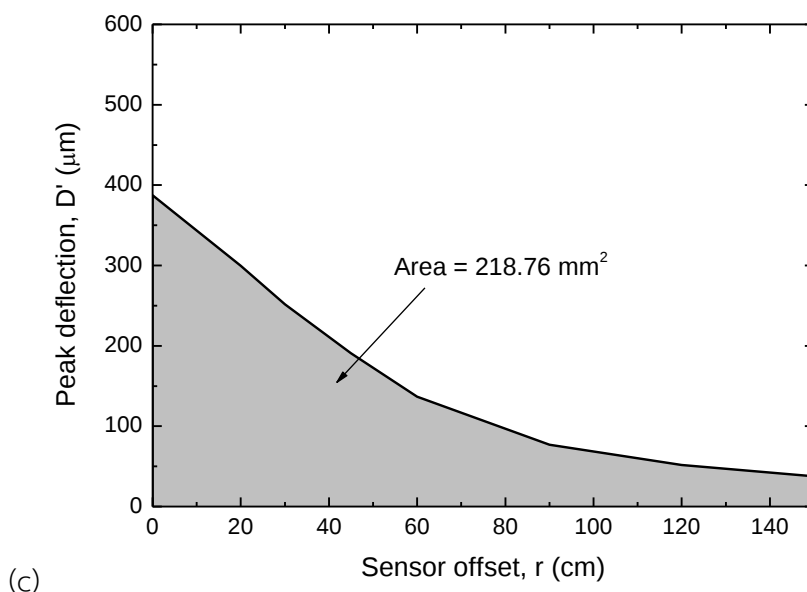
- ลักษณะของน้ำหนักตกระแทกที่วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ (รูปที่ 2.3-20a)
- ลักษณะของการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางที่วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ (รูปที่ 2.3-20b)
- ลักษณะของการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่มากที่สุดที่ระยะต่างๆ ในแนวรัศมีจากศูนย์กลาง (Deflection Basin) (รูปที่ 2.3-20c)



(a)



(b)



รูปที่ 2.3-20 (a) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระแทกกับเวลา (b) ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการแอ่นตัวกับเวลา และ (c) Deflection Basin

2.3.6 แนวทางการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทก

เมื่อได้ทดสอบร่วมกับเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทแล้ว เพื่อประเมินประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำและถูกต้องของแรงกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นกับเครื่อง FWD ของกรมฯ จะเปรียบเทียบผลการทดสอบด้วยพารามิเตอร์สามอย่างดังนี้

1) น้ำหนักตกระแทกที่วัดได้

น้ำหนักตกระแทกที่วัดได้ที่ระยะเวลาต่างๆ โดยเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นจะต้องสามารถสร้างแรงตกระแทกจากการปล่อยตุ้มน้ำหนักตกระแทก ได้ใกล้เคียงกันกับน้ำหนักมาตรฐานที่ 50 kN ภายใน 3 ความผิดพลาดของครั้งที่ใกล้เคียงที่สุดโดยมีได้ไม่เกินร้อยละ 15 ดัง สมการที่ 2.3-2

$$Error1 = \frac{|P_{max} - 50|}{50} \times 100(\%) \leq 15\% \quad (2.3-2)$$

โดยที่ P_{max} คือแรงตกระแทกสูงสุดที่วัดได้, kN

2.) การแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ

การแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะเท่ากับ 0, 30, 60, 90, และ 150 เซนติเมตรตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางเมื่อปล่อยน้ำหนักตกระแทกจะสามารถวัดได้ด้วยจีโอโฟน ดังตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งแสดงประวัติเวลาการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมี จากนั้นจึงหาค่าการแอ่นตัวสูงสุด D_0 ,

D30, D60, D90, และ D150 ที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีเพื่อการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกทั้งสอง ในที่นี้ จะต้องทำการปรับแก้ผลกระทบเนื่องจากแรงตกระแทกที่ไม่เท่ากับค่ามาตรฐานที่ 50 kN พอดี ด้วยสมการที่ 3-2.3

$$D' = D \times \frac{50 \text{ kN}}{\text{Measured Load (kN)}} \quad (2.3-3)$$

เมื่อ D' คือค่าการแอ่นตัวที่ระยะต่างๆ ที่ปรับแก้แล้ว, D คือค่าการแอ่นตัวก่อนการปรับแก้ และ $\text{Measured Load (kN)}$ คือค่าแรงตกระแทกสูงสุดที่วัดได้ การเปรียบเทียบจะวัดจากความแตกต่างของค่าการแอ่นตัวที่สูงที่สุดที่วัดได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นและปรับแก้แล้วกับค่าที่วัดได้จากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทที่ได้ปรับแก้แล้ว ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 3.4

$$\text{Error2} = \frac{|D'_{\text{max,New FWD}} - D'_{\text{max,DRR FWD}}|}{D'_{\text{max,DRR FWD}}} \times 100\% \quad (2.3-4)$$

เมื่อ $D'_{\text{max,New FWD}}$ และ $D'_{\text{max,DRR FWD}}$ คือ ค่าแอ่นตัวที่สูงที่สุดที่ได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นและปรับแก้แล้วและเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทที่ได้ปรับแก้แล้ว ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดดังกล่าวต้องไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับตำแหน่งกึ่งกลางกลาง และ ร้อยละ 30 สำหรับตำแหน่งอื่นๆ

2.3.7 สถานที่ทดสอบ

การทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำและถูกต้องของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกของกรมทางหลวงชนบททดสอบบนสามสายทาง สายสองสายแรกคือ สป. 1011 และ นบ. 3030 โครงสร้างผิวทางมีลักษณะเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่เพิ่งได้เสริมความหนามาได้ไม่นานนัก ความหนาของชั้นผิวทางน่าจะอยู่ที่ประมาณ 15 เซนติเมตร และสายทางที่สาม นบ.3004 ผิวทางมีลักษณะเก่าที่ยังไม่ได้รับการบูรณะ

2.4 ผลการทดสอบ และ การวิเคราะห์

การทดสอบประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำและถูกต้องของค่าแรงกระแทกและค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง ในบทความนี้จะทำโดยเปรียบเทียบผลการทดสอบระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นใหม่ (รูปที่ 2.4-1) ร่วมกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกของกรมฯ (รูปที่ 2.4-2) โดยจะจัดเก็บข้อมูลต่างๆ เพื่อนำมาวิเคราะห์ ตามลักษณะดังต่อไปนี้ 1. แรงตกระแทกในรูปความสัมพันธ์กับเวลา และ 2. ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่วัดได้บริเวณผิวทางที่ตำแหน่งต่างๆ ในแนวรัศมีจากศูนย์กลางแรงกระแทกในรูปความสัมพันธ์กับเวลาการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางด้านความแม่นยำและ

ถูกต้องของเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกของกรมทางหลวงชนบททดสอบบนสามสายทาง สายทางแรกคือ สป. 1011 โครงสร้างผิวทางมีลักษณะเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่เพิ่งก่อสร้าง สายที่สองคือ นบ. 3030 ผิวทางมีลักษณะเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตและได้เสริมความหนามาได้ไม่นานนัก ความหนาของชั้นผิวทางน่าจะอยู่ที่ประมาณ 15 เซนติเมตร สายที่สามคือ นบ. 3004 ผิวทางมีลักษณะเก่าที่ยังไม่ได้รับการบูรณะ



รูปที่ 2.4-1 เครื่องวัดการแอ่นตัวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่



รูปที่ 2.4-2 FWD ของกรมทางหลวงชนบท รุ่น PRI 2100

2.4-1 การทดสอบบนสายทาง สป 1011

ถนนสาย สป. 1011 ผิวทางมีลักษณะเป็นแอสฟัลต์ซึ่งได้รับการก่อสร้างมาได้ไม่นานนัก (รูปที่ 2.4-3) การทดสอบนั้นจะทำการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบแรงตกกระแทกและค่าการแอ่นตัวของผิวทาง เนื่องด้วยการทดสอบบริเวณสายทางนี้เป็น การทดสอบภาคสนามครั้งแรก ทางผู้ทดสอบยังไม่ได้มีความเชี่ยวชาญมากนัก จึงใช้เวลาในการทดสอบที่ค่อนข้างนานต่อจุดและเกิดอุปสรรคเกี่ยวกับระบบลมที่ใช้ในการยกขึ้นลงตุ้มน้ำหนัก ทำให้ได้ผลการทดสอบเพียงจุดเดียว อีกทั้งการทดสอบครั้งนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือในการวัดว่าสามารถนำมาคำนวณหาค่าความแข็งแรงได้หรือไม่ การทดสอบครั้งนี้จะวัดการแอ่นตัวของกึ่งกลางแผ่นรองกระแทกเพียงจุดเดียว

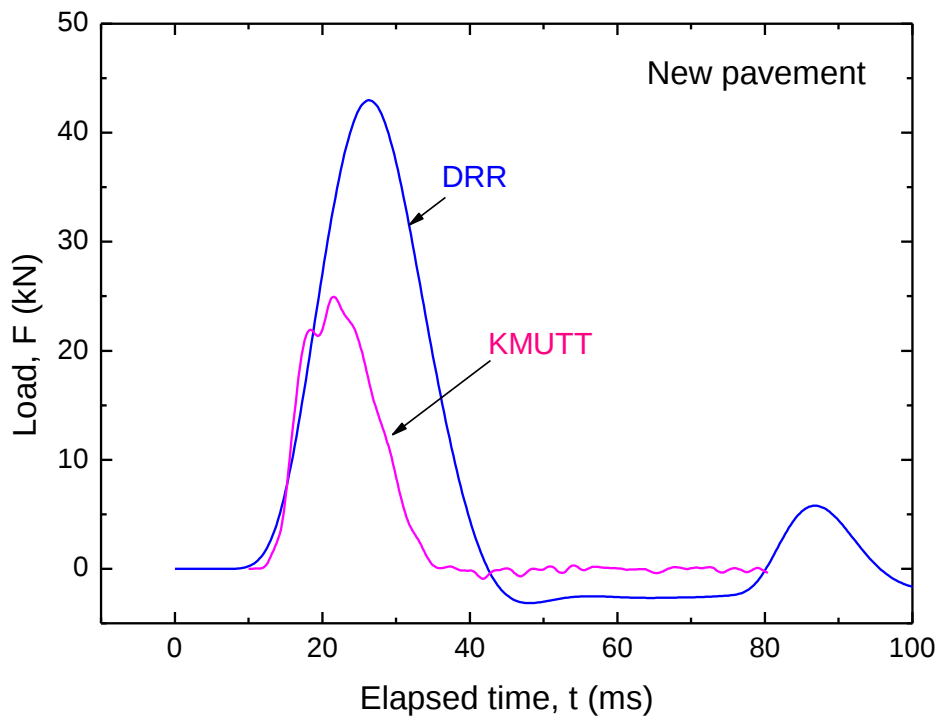


รูปที่ 2.4-3 เครื่องวัดการแอ่นตัวที่พัฒนาขึ้นมาใหม่ขณะทำการทดสอบบนถนนของกรมทางหลวงชนบท

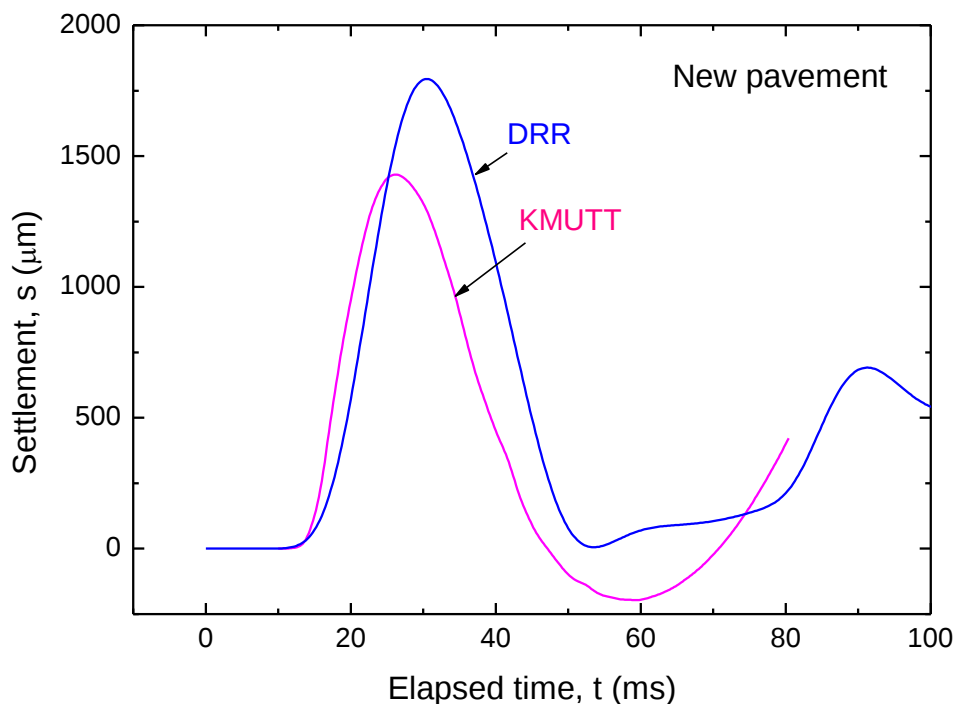
2.4-2 ผลการทดสอบบนสายทาง สป. 1011

รูปที่ 2.4-4 แสดงการเปรียบเทียบประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกของการทดสอบบนถนนสาย สป. 1011 ระหว่างเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้น กับ FWD ของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งจะเห็นได้ว่าช่วงเวลาที่ตกกระแทกที่ค่าใกล้เคียงกันอย่างน้อยยี่สิบสามคือประมาณ (30 ms) แต่การตกกระแทกยังไม่อาจให้แรงที่เทียบเท่ามาตรฐานได้ เนื่องจากการโคลงของรถลากเมื่อปล่อยตุ้มน้ำหนักสูงมากๆ แรงที่ตกกระแทกจากการทดสอบด้วย FWD ที่พัฒนาขึ้นมีค่าประมาณ 25 kN โดยที่ FWD ของกรมทางหลวงชนบทให้ค่าแรงตกกระแทกประมาณ

45 kN รูปที่ 2.4-5 แสดงการเปรียบเทียบประวัติเวลาของการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะศูนย์กลางของแรงกระแทกของการทดสอบบนถนนสาย สป. 1011 ระหว่างเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้น กับ FWD ของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าการแอ่นตัวที่ได้จากการทดสอบของเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้นมีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบของเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท โดยสอดคล้องกับแรงตกระแทกที่น้อยกว่าของเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้นทำให้ได้ค่าการแอ่นตัวที่น้อย



รูปที่ 2.4-4 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกของการทดสอบบนถนนสาย สป. 1011 ระหว่างเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้น กับ FWD ของกรมทางหลวงชนบท



รูปที่ 2.4-5 ประวัติเวลาของการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะศูนย์กลางของแรงกระทำของการทดสอบบนถนนสาย สป. 1011 ระหว่างเครื่อง FWD ที่พัฒนาขึ้น กับ FWD ของกรมทางหลวงชนบท

จากผลการทดสอบ ค่าที่ได้ยังไม่เป็นที่พอใจเนื่องจากค่าที่ได้ยังห่างจากเครื่องมือต้นแบบของกรมทางหลวงชนบท และอีกทั้งยังมีอุปสรรคในขณะทำการทดสอบ ไม่ว่าจะเป็นการโคลงของรถลากหรือจะเป็นสภาพมีอากาศ ทางผู้วิจัยจึงได้นำเครื่องมือ FWD ที่พัฒนาขึ้นนำกลับไปแก้ไข เพื่อสามารถทดสอบให้ได้ค่าน้ำหนักบรรทุกและค่าการแอ่นตัวที่ใกล้เคียงกับเครื่องต้นแบบมากยิ่งขึ้น

2.4-3 การทดสอบบนสายทาง นบ. 3030 และ นบ. 3004

การทดสอบกับถนนสาย นบ. 3030 ดำเนินการในช่วงเช้า ผิวทางมีลักษณะเป็นแอสฟัลต์คอนกรีตที่เพิ่งได้เสริมความหนามาได้ไม่นานนัก ความหนาของชั้นผิวทางน่าจะอยู่ที่ประมาณ 15 เซนติเมตร ช่วงกิโลเมตรที่ทำการทดสอบมีระยะทางสั้นๆ โดยทดสอบทั้งฝั่งขาออกและฝั่งขาเข้าของถนน ส่วนการทดสอบกับถนนสาย นบ. 3004 ดำเนินการในช่วงบ่าย ถนนมีสองช่องจราจรสวนกัน ผิวทางมีลักษณะเก่าที่ยังไม่ได้รับการบูรณะ ในระหว่างการทดสอบมีรถบรรทุกผ่านบริเวณที่ทดสอบจำนวนมากและมีฝนตก

การทดสอบครั้งนี้ทางผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องมือมาอีกครั้งโดยการเพิ่มความแข็งแรงของโครงสร้างและเพิ่มชุดราง Geophone เพื่อวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ คือ ที่ 30, 60, 90, 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.4-6



รูปที่ 2.4-6 การวัดค่าการแอ่นตัวโดยใช้ Geophone ที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางของแรงกระแทก

รูปที่ 2.4-7 แสดงการทดสอบด้วยเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท ซึ่งเมื่อทดสอบแล้วเสร็จ ผู้ปฏิบัติงานจะได้ทำการพ่นสีสเปรย์ลงบนผิวทางเพื่อระบุตำแหน่งไว้ให้เครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่ทดสอบซ้ำตรงบริเวณเดิม



รูปที่ 2.4-7 การทดสอบด้วยเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท

2.4-4 ผลการทดสอบบนสายทาง นบ. 3030 และ นบ. 3004

การทดสอบได้ดำเนินการทั้งหมดกับถนนสาย นบ. 3030 จำนวน 13 จุด และถนนสาย นบ. 3004 อีกจำนวน 3 จุด รวมเป็นทั้งหมด 16 จุดทดสอบ รูปที่ 2.4-8 ถึง 2.4-20 แสดงประวัติเวลาของน้ำหนักตกกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางของแรงกระแทกสำหรับ

การทดสอบกับถนนสาย นบ. 3030 ด้วยเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท รูปที่ 2.4-21 ถึง 2.4-23 แสดงประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่าง ๆ ตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางของแรงกระแทกสำหรับการทดสอบกับถนนสาย นบ. 3004 ด้วยเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท รูปที่ 2.4-24 ถึง 2.4-36 และ 2.4-37 ถึง 2.4-39 แสดงประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวที่วัดได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่กับถนนสาย นบ. 3030 และ นบ. 3004 ตามลำดับ จากรูปทั้งหมดดังกล่าวจะเห็นได้ว่าลักษณะของประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ได้จากเครื่องมือทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกัน

รูปที่ 2.4-40 ถึง 2.4-55 แสดงการเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่วัดได้ระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นใหม่ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีลักษณะใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 2.4-1 และ 2.4-2 แสดง น้ำหนักตกระแทกสูงสุด และการแอ่นตัวของโครงสร้างทางสูงสุดที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางแรงกระแทก จากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทเมื่อทดสอบกับถนนสาย นบ. 3030 และ นบ. 3004 ตามลำดับ ตารางที่ 2.4-3 และ 2.4-4 แสดงผลการทดสอบในทำนองเดียวกันที่ได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่

ตารางที่ 2.4-1 ผลการทดสอบสำหรับเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับถนนสาย นบ. 3030

จุดที่	นบ. (kN)	ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (mm)				
		D0	D30	D60	D90	D150
1	50.40	457.0	291.7	155.5	92.7	52.5
2	50.10	436.5	287.6	157.3	93.1	51.0
3	49.66	385.6	263.0	150.0	88.3	46.6
4	50.28	396.6	267.5	152.4-6	92.5	46.1
5	50.18	432.4-5	285.8	159.7	98.5	55.9
6	50.14	332.4-6	206.5	115.9	81.4	56.8
7	49.83	422.1	261.3	130.5	72.7	39.2
8	50.08	360.0	239.7	137.4	83.0	46.4
9	49.56	400.0	256.8	133.8	72.4-7	40.4
10	49.97	369.3	232.4-4	118.7	66.9	36.9
11	49.59	286.7	186.3	105.3	62.8	35.8
12	49.71	423.9	279.7	155.0	93.5	48.3
13	48.98	368.4	245.7	133.7	76.5	40.1

ตารางที่ 2.4-2 ผลการทดสอบสำหรับเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับถนนสาย นบ. 3004

จุดที่	นน. (kN)	ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (mm)				
		D0	D30	D60	D90	D150
1	50.66	651.4	391.2	180.8	109.8	69.5
2	50.88	698.3	408.0	172.4-0	106.5	67.0
3	50.01	676.6	430.8	213.2	121.9	73.9

ตารางที่ 2.4-3 ผลการทดสอบสำหรับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่กับถนนสาย นบ.

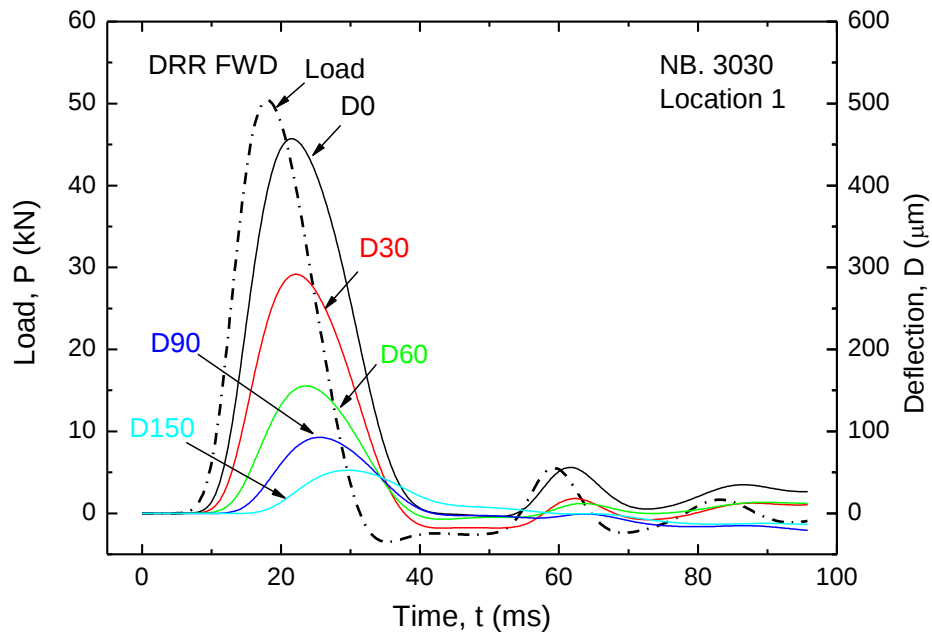
3030

จุดที่	นน. (kN)	ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (mm)				
		D0	D30	D60	D90	D150
1	48.22	470.8	280.6	156.7	85.7	52.4
2	51.72	490.9	300.4	172.4-0	95.2	58.4
3	42.4-93	406.7	231.2	131.3	76.6	32.4-8
4	46.36	400.4	247.6	141.3	80.2	39.7
5	49.75	475.6	293.0	146.0	89.1	52.4
6	42.4-70	341.9	175.5	87.5	66.7	47.1
7	42.4-34	407.2	237.1	113.3	65.2	32.4-6
8	52.62	402.6	262.6	141.6	81.0	52.0
9	45.70	420.0	228.7	112.4-2	67.0	36.7
10	47.49	382.4-5	218.1	111.6	62.4-1	38.8
11	52.46	322.4-3	201.4	116.4	67.2	37.0
12	47.24	440.4	269.6	151.3	85.3	48.4
13	52.4-15	419.6	272.3	148.1	83.4	40.6

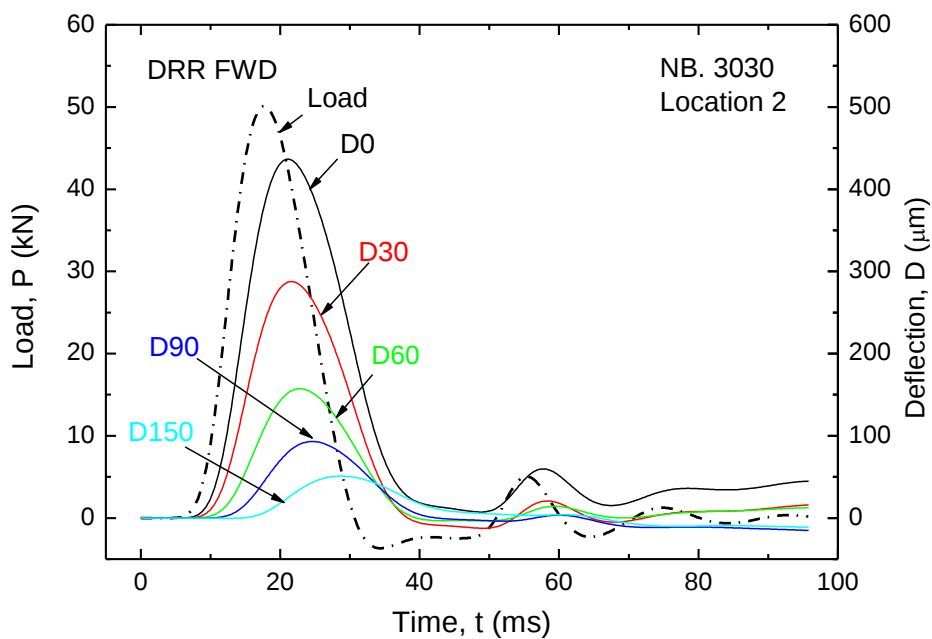
ตารางที่ 2.4-4 ผลการทดสอบสำหรับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นใหม่กับถนนสาย นบ.

3004

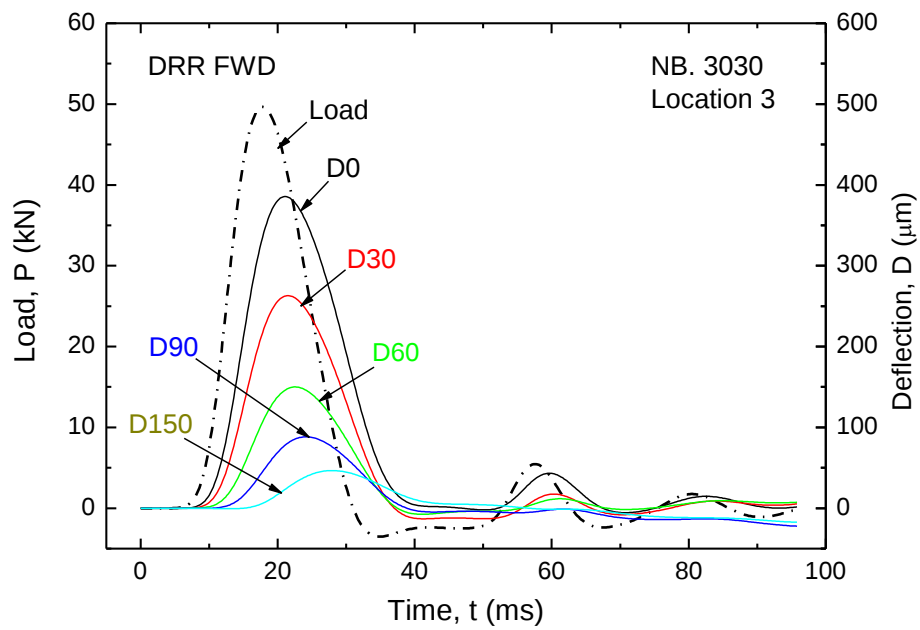
จุดที่	นน. (kN)	ค่าการแอ่นตัวสูงสุด (mm)				
		D0	D30	D60	D90	D150
1	50.61	672.4-2	382.4-8	191.1	108.7	72.3
2	47.03	722.4-8	366.5	183.9	101.8	70.9
3	42.4-09	652.4-9	372.4-5	183.0	103.9	62.3



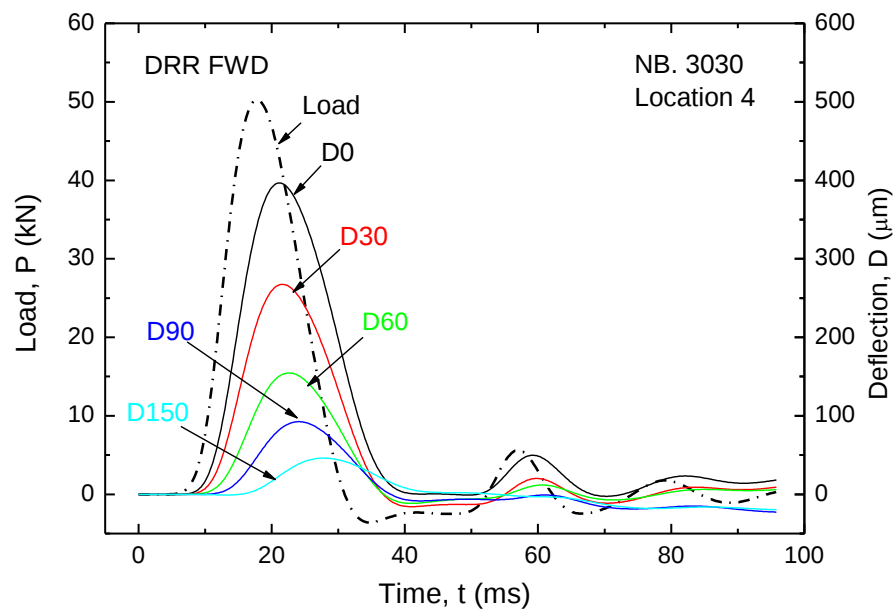
รูปที่ 2.4-8 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 1



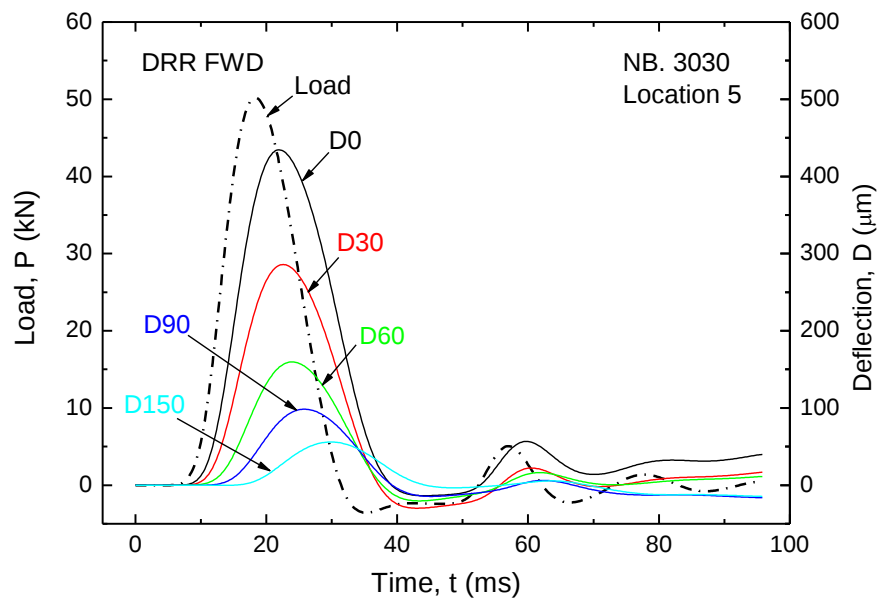
รูปที่ 2.4-9 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 2



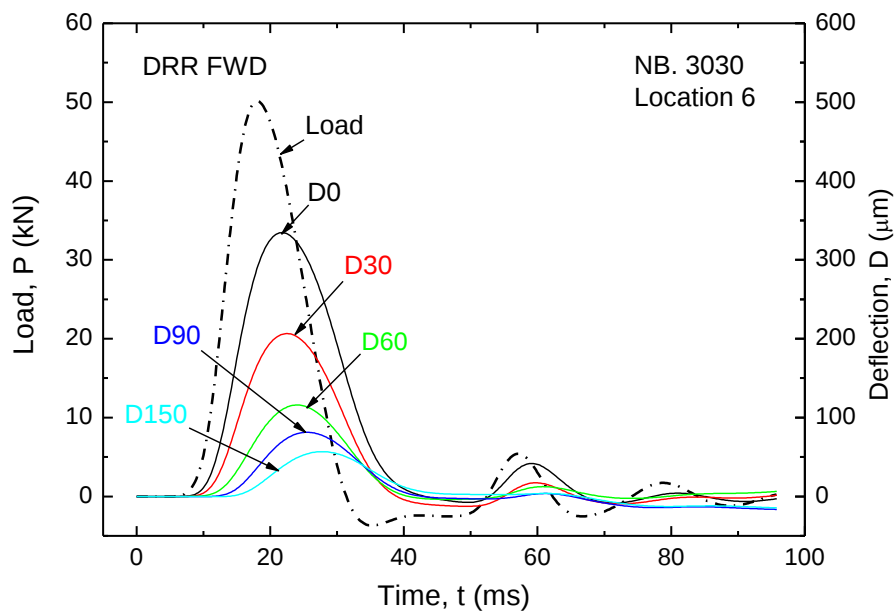
รูปที่ 2.4-10 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 3



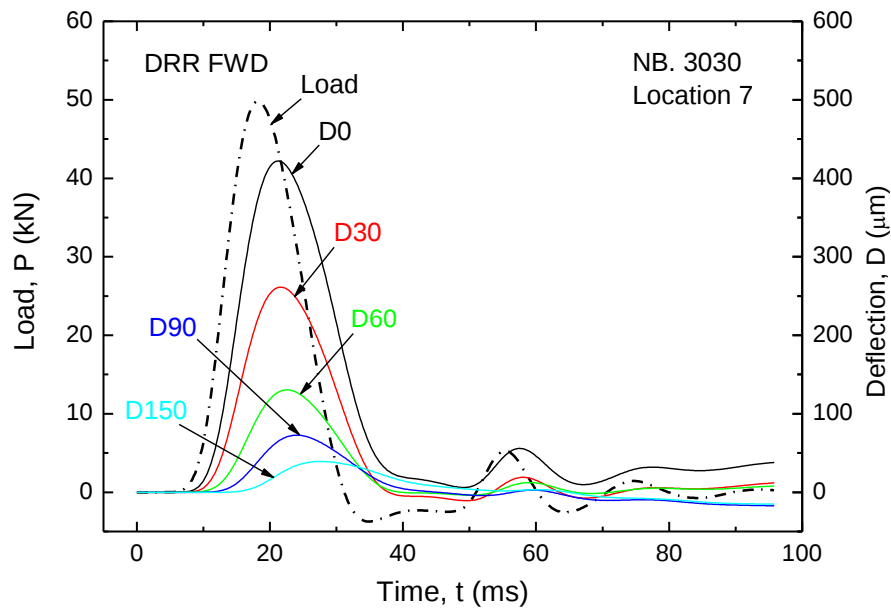
รูปที่ 2.4-11 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 4



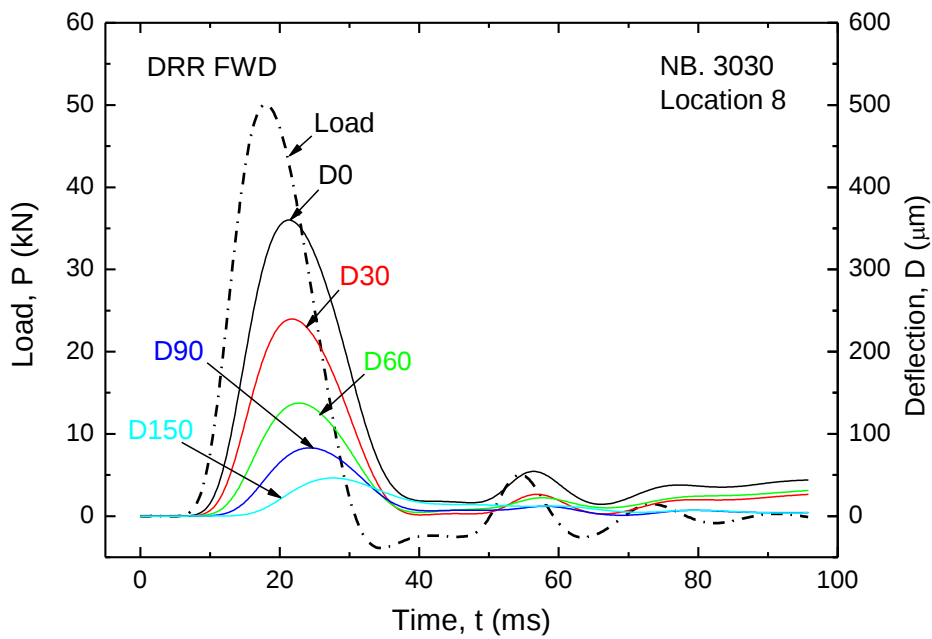
รูปที่ 2.4-12 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 6



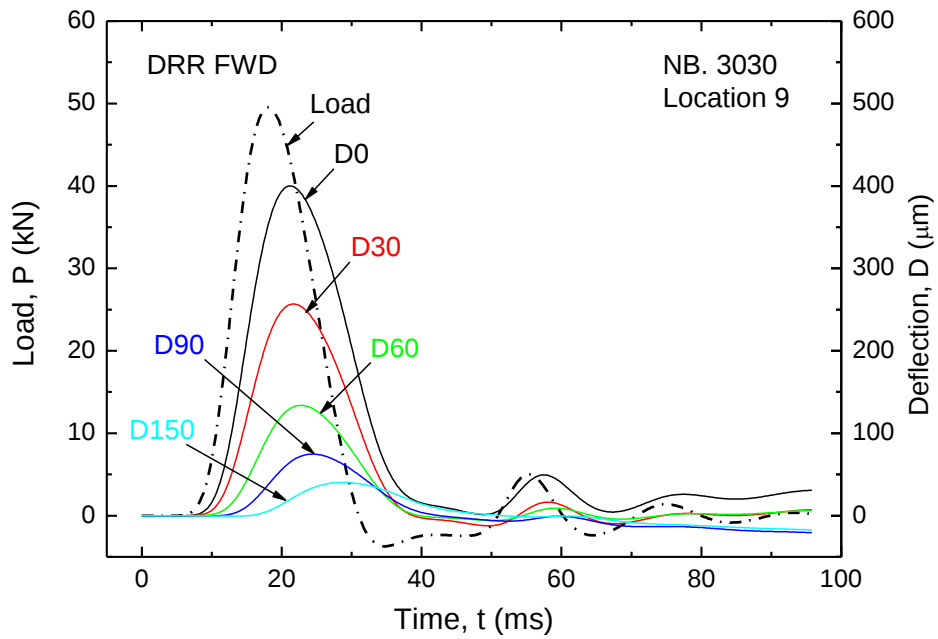
รูปที่ 2.4-13 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 6



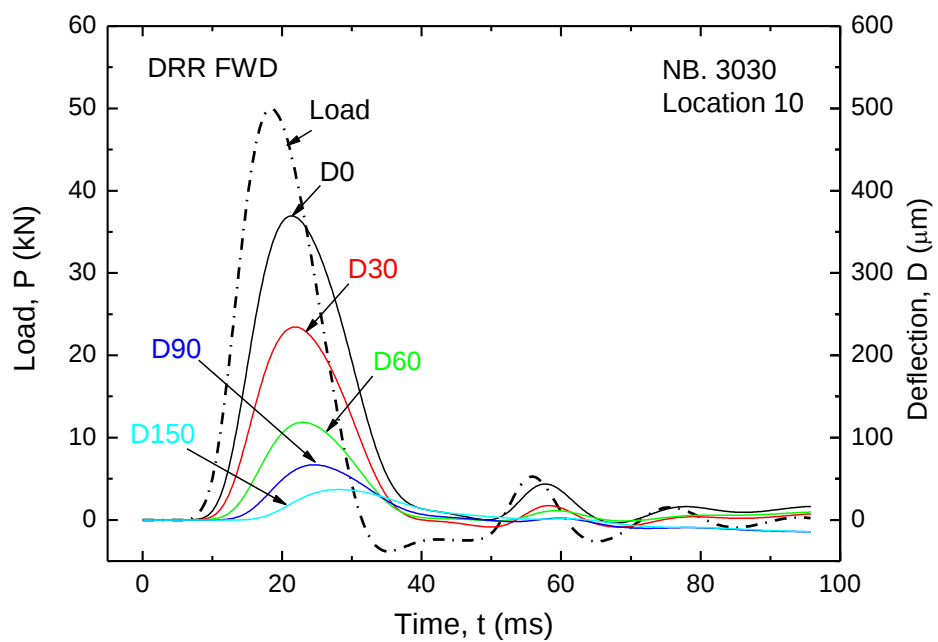
รูปที่ 2.4-14 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 7



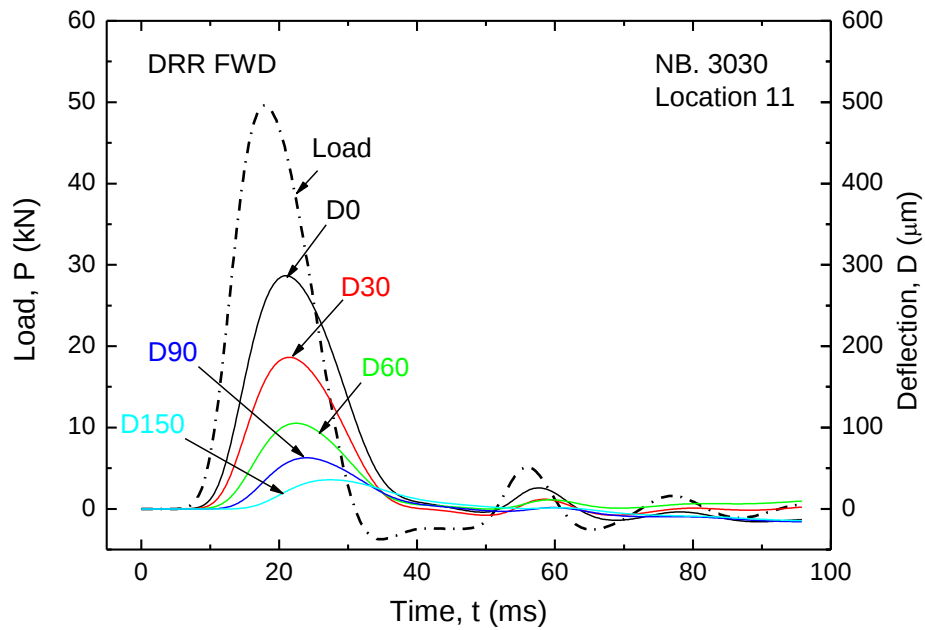
รูปที่ 2.4-15 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 8



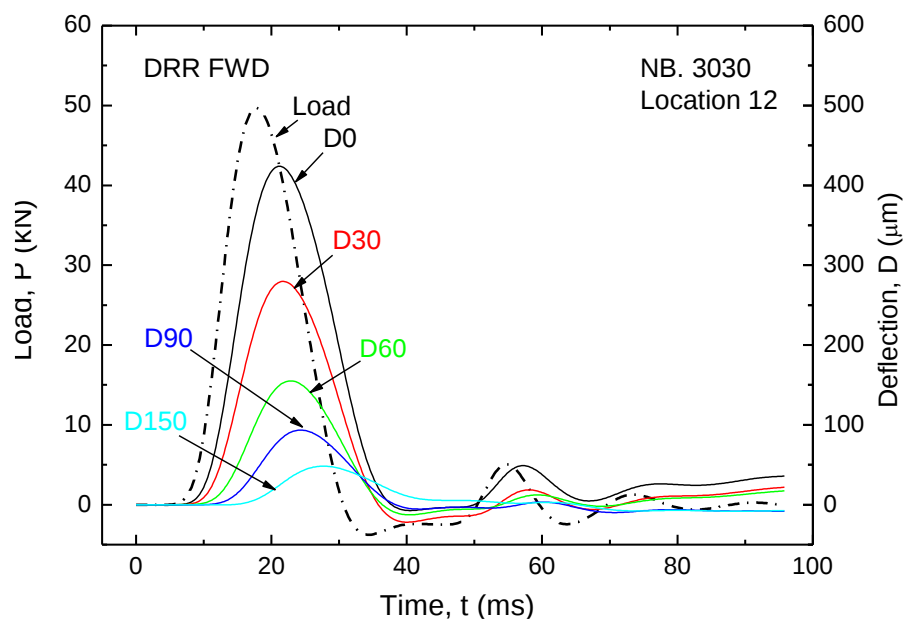
รูปที่ 2.4-16 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 9



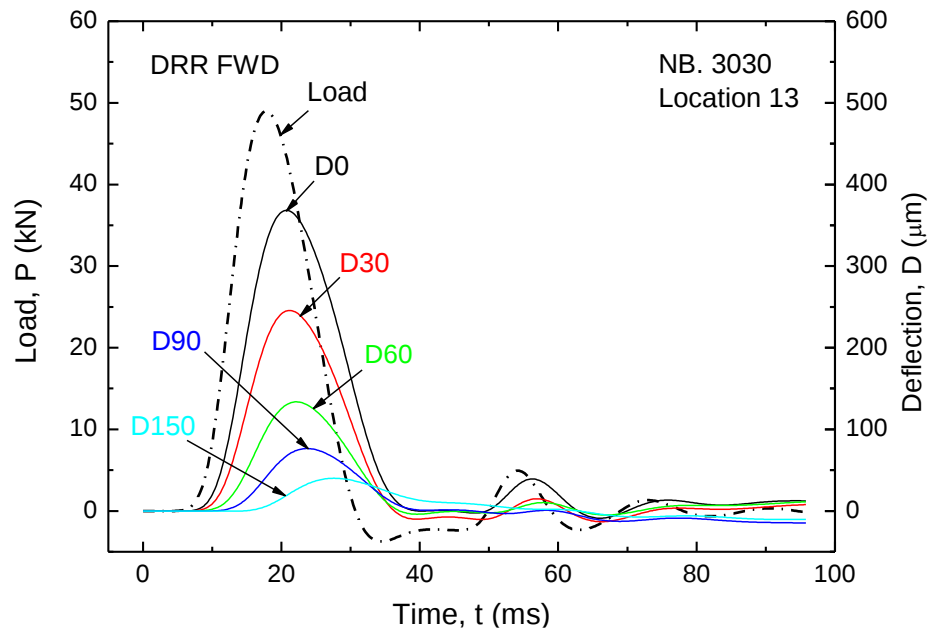
รูปที่ 2.4-17 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 10



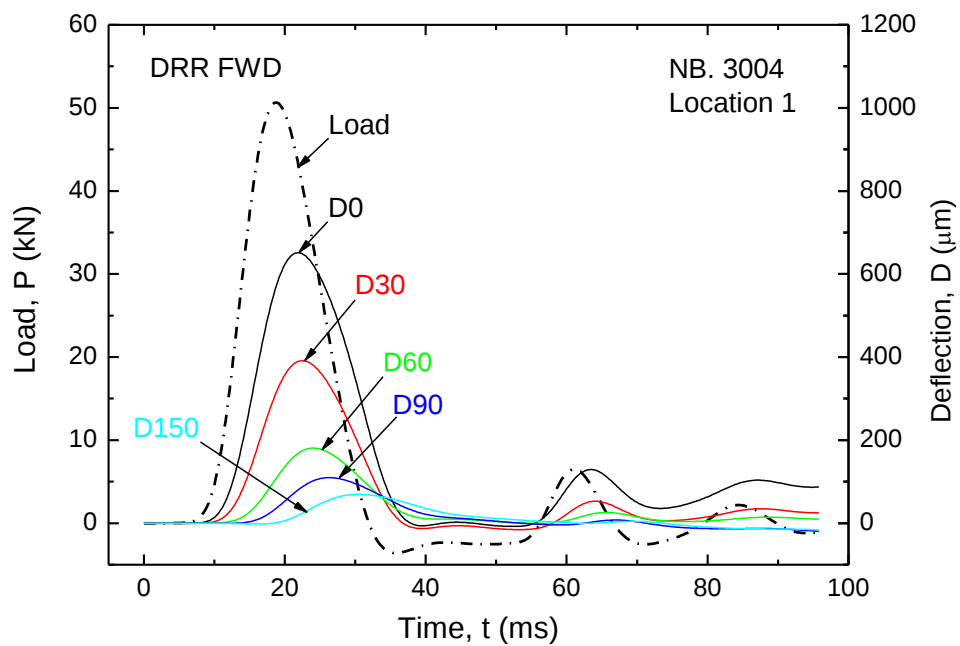
รูปที่ 2.4-18 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 11



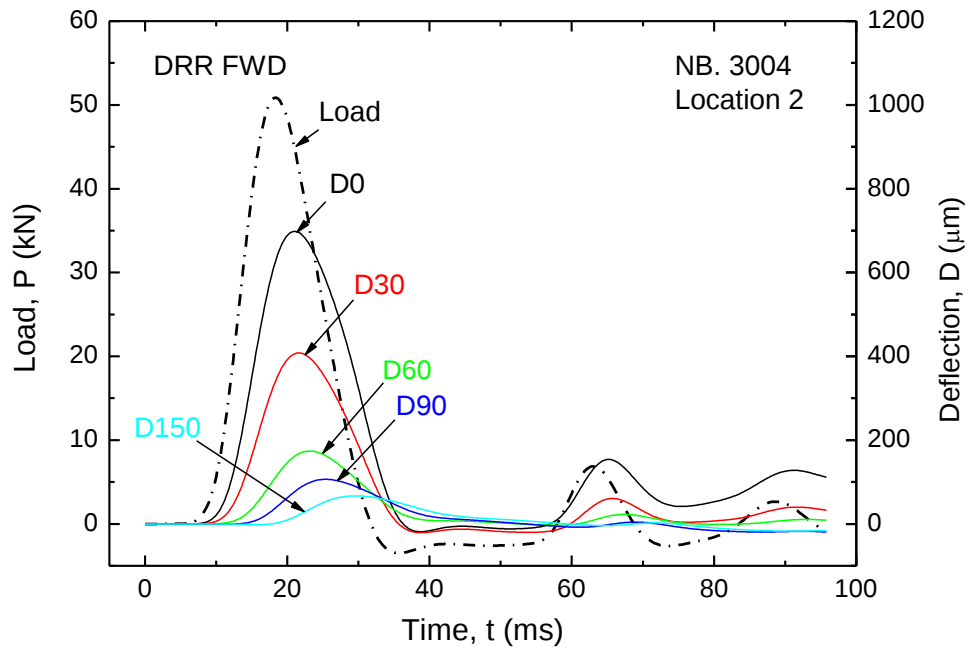
รูปที่ 2.4-19 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 12



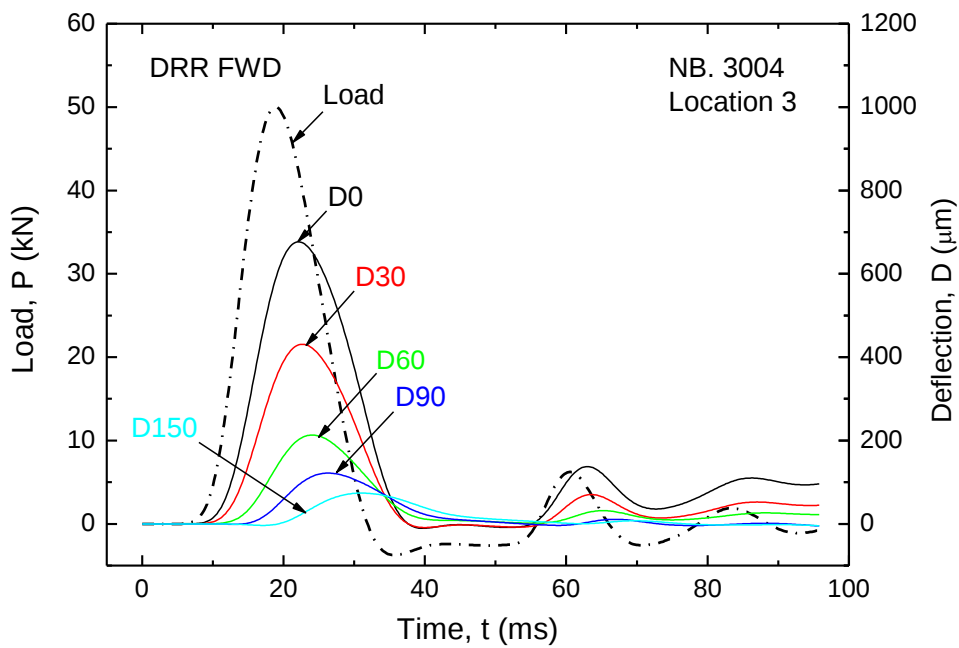
รูปที่ 2.4-20 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 13



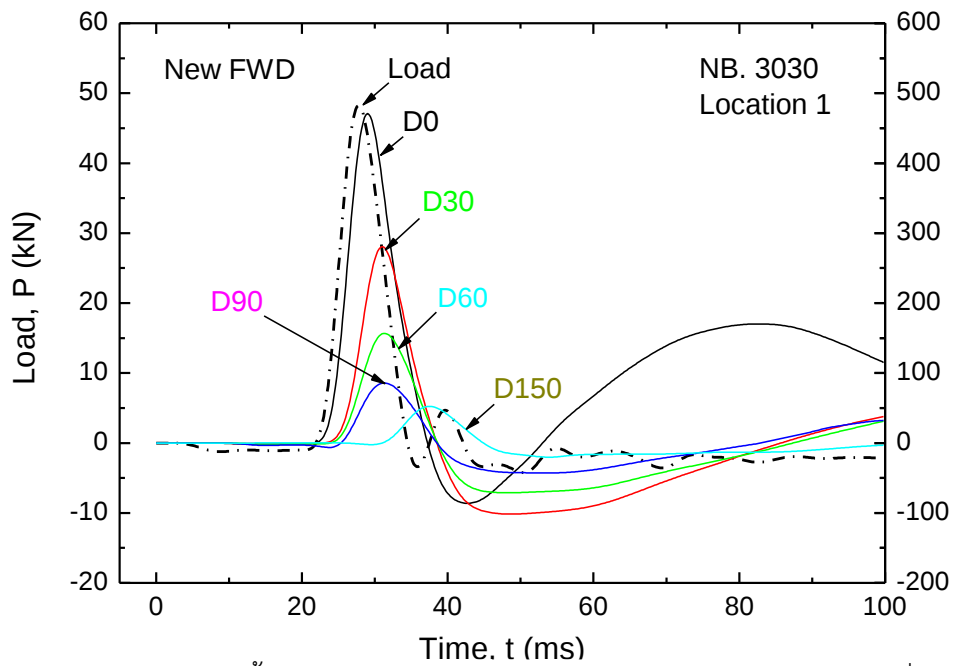
รูปที่ 2.4-21 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 1



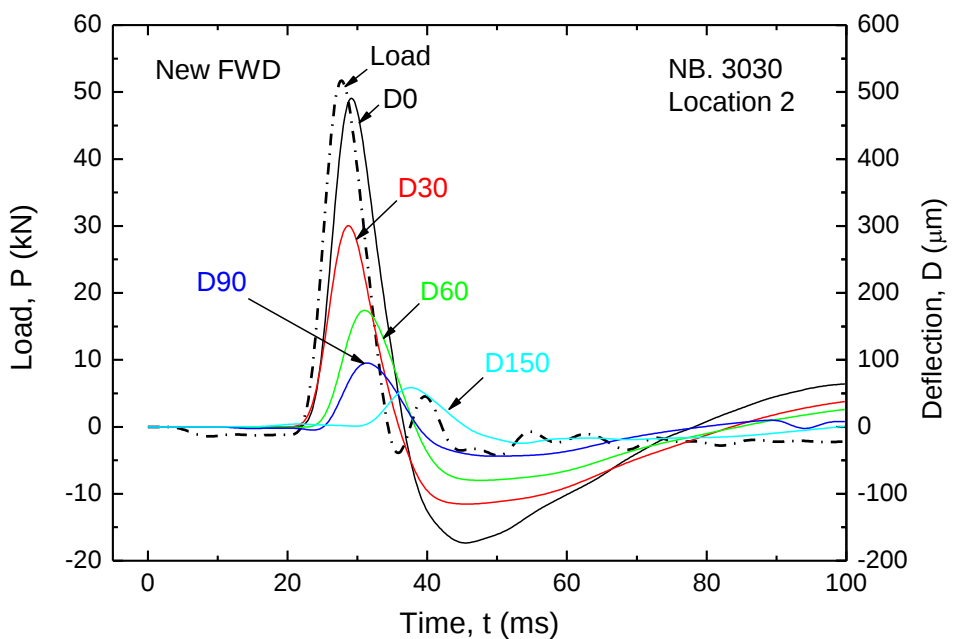
รูปที่ 2.4-22 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 2



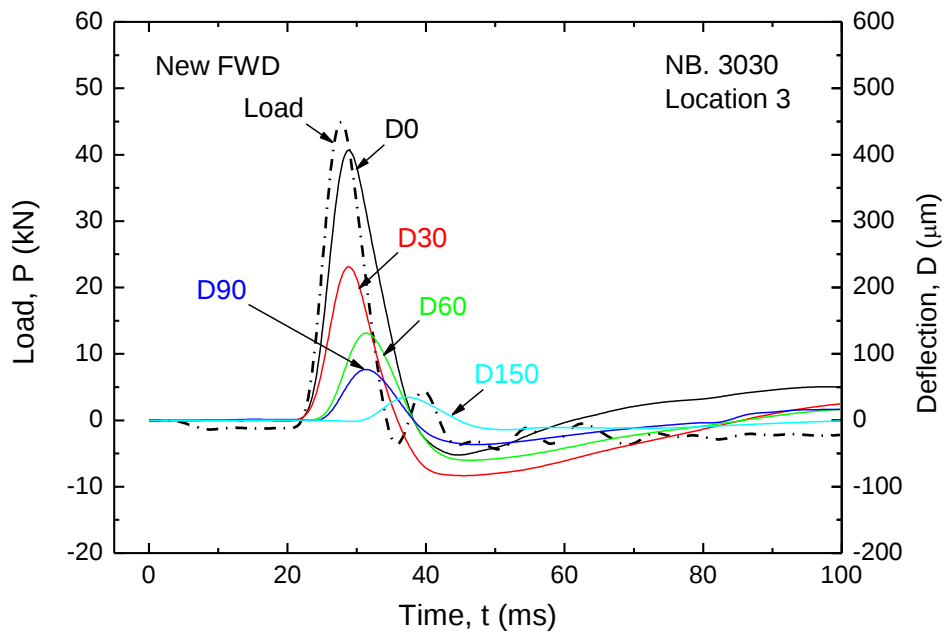
รูปที่ 2.4-23 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบท; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 3



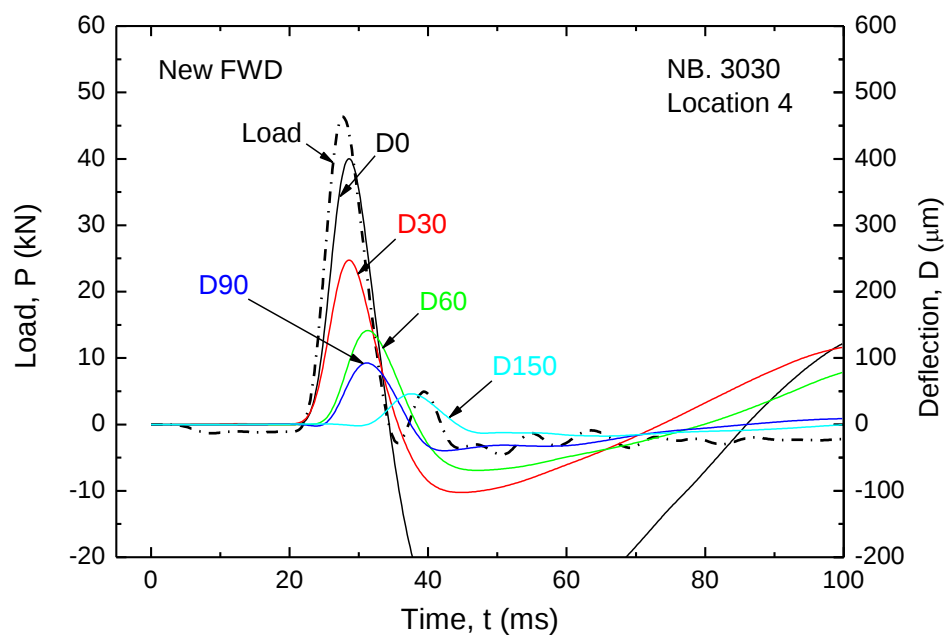
รูปที่ 2.4-24 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 1



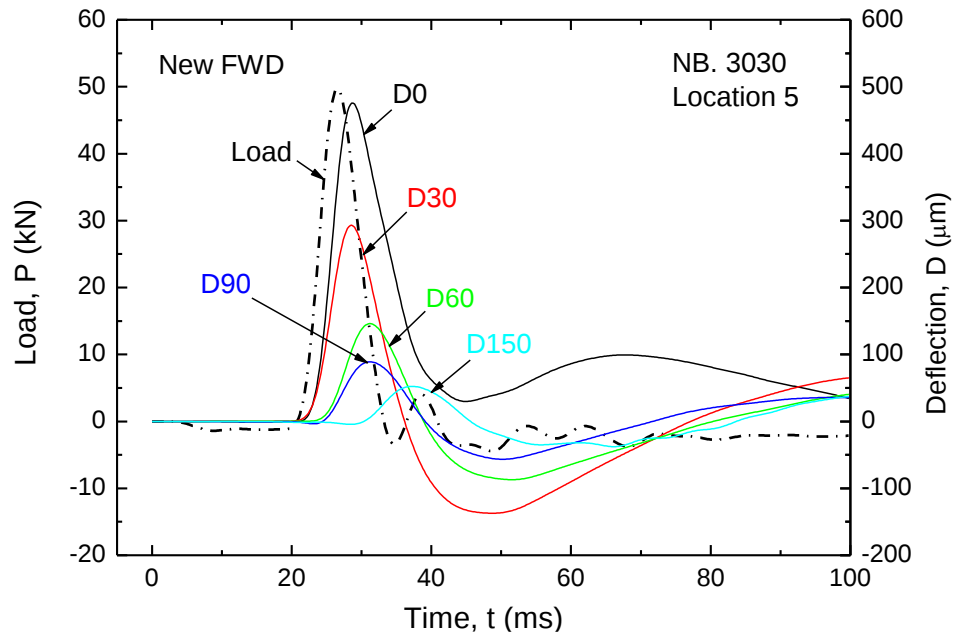
รูปที่ 2.4-25 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 2



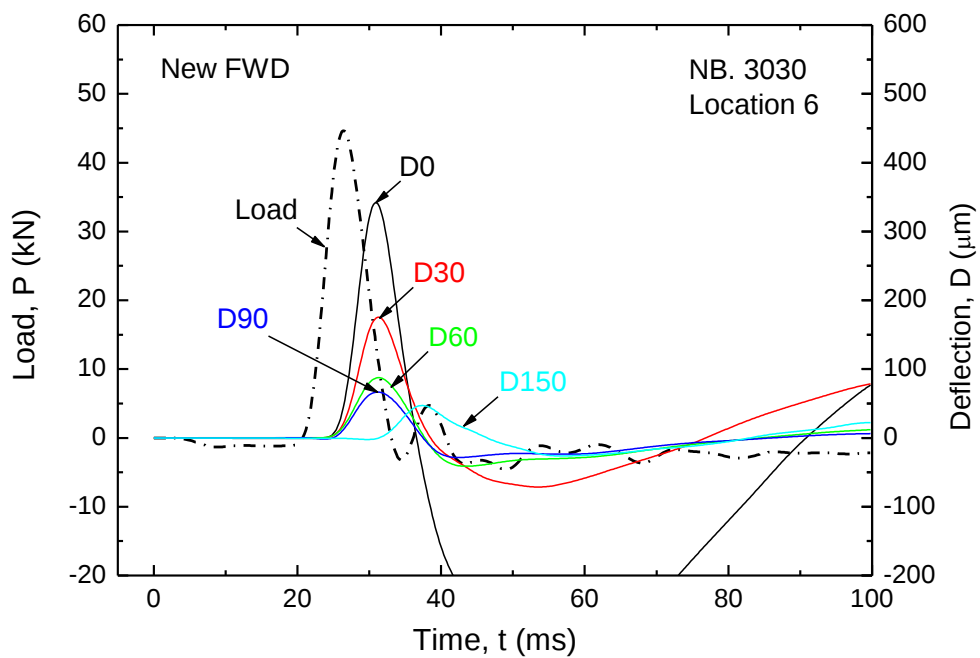
รูปที่ 2.4-26 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 3



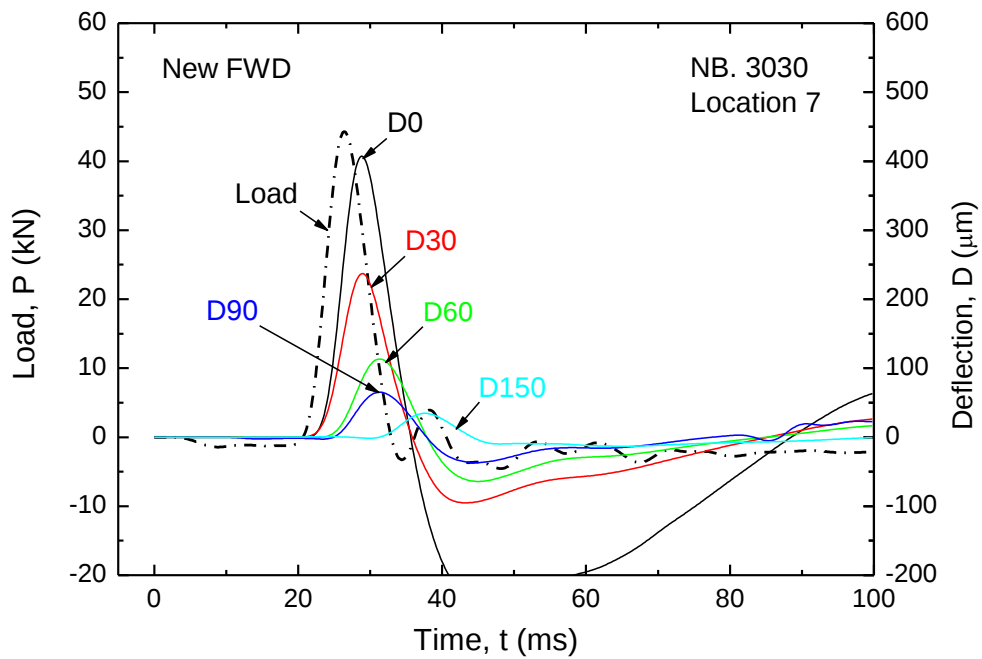
รูปที่ 2.4-27 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 4



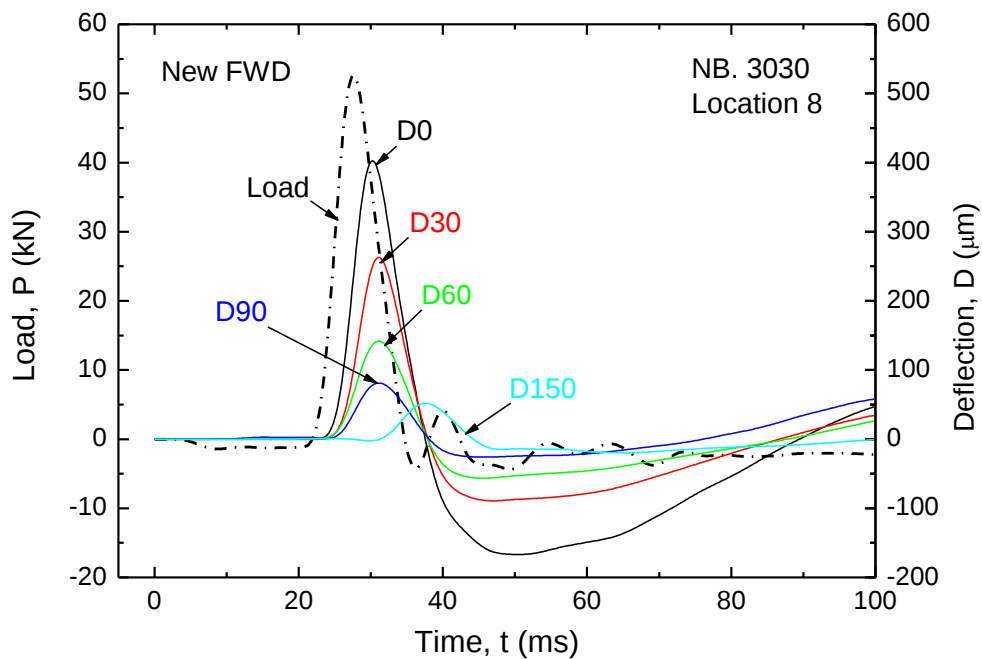
รูปที่ 2.4-28 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 5



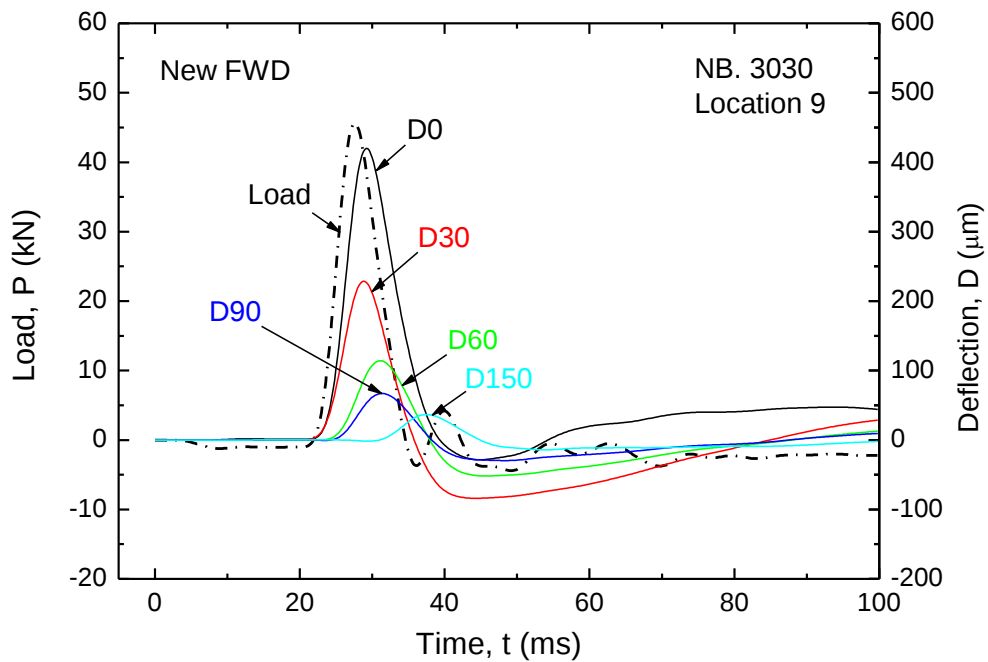
รูปที่ 2.4-29 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 6



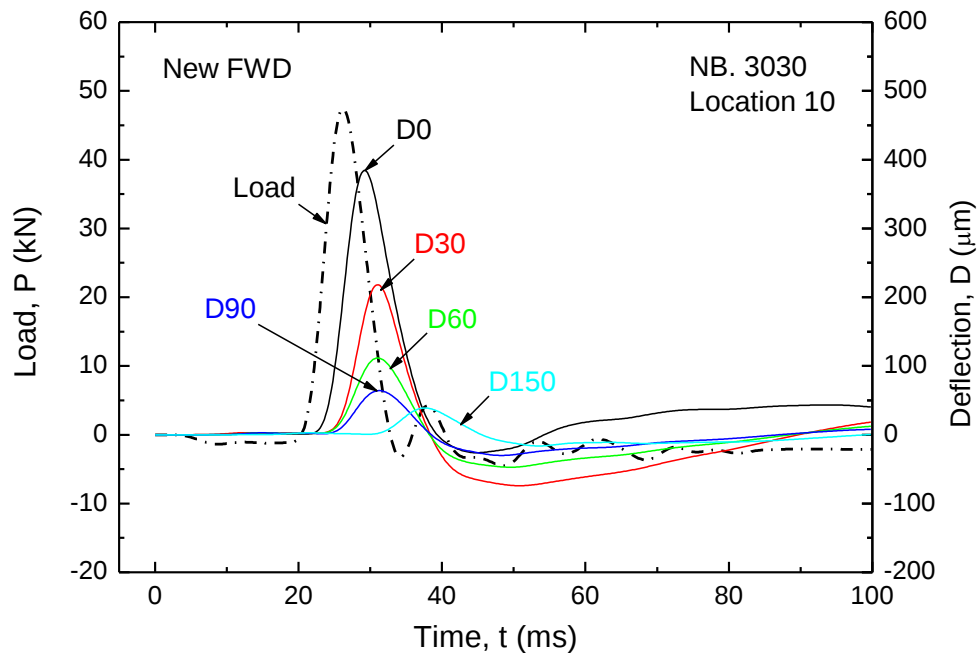
รูปที่ 2.4-30 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 7



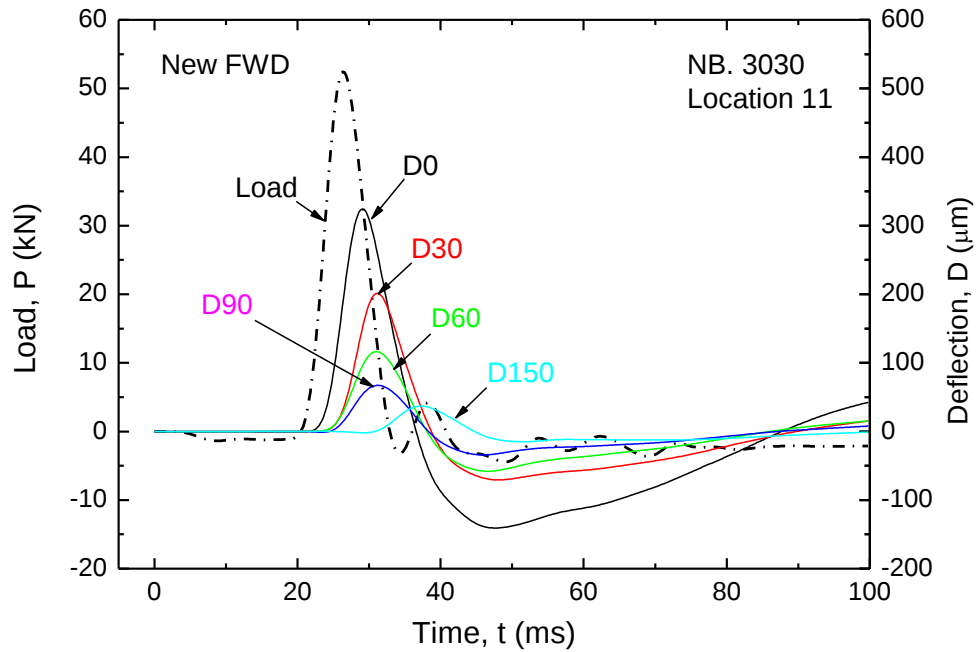
รูปที่ 2.4-31 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 8



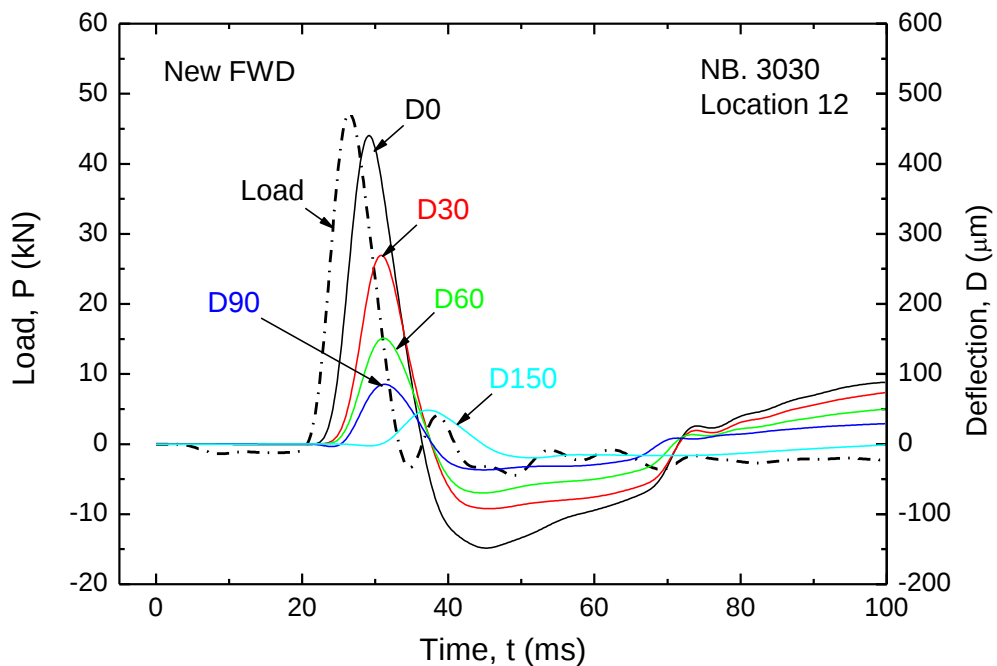
รูปที่ 2.4-32 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 9



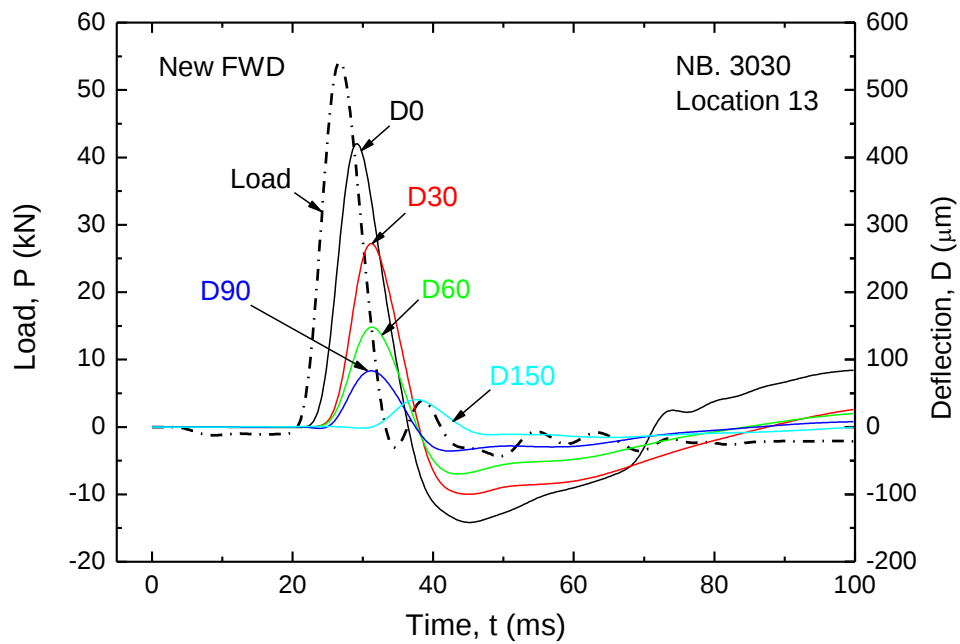
รูปที่ 2.4-33 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 10



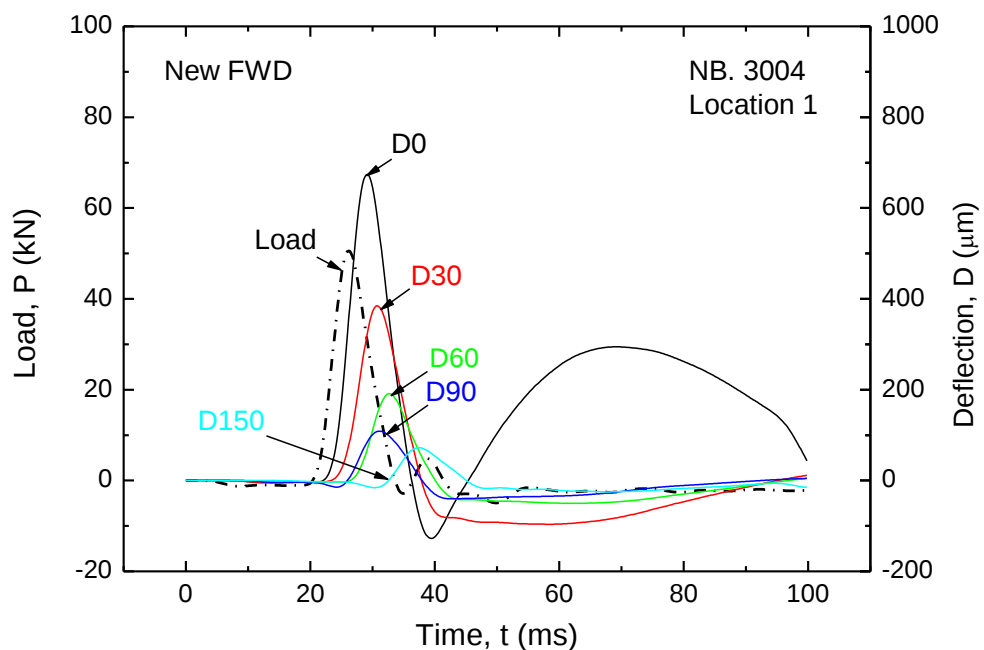
รูปที่ 2.4-34 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 11



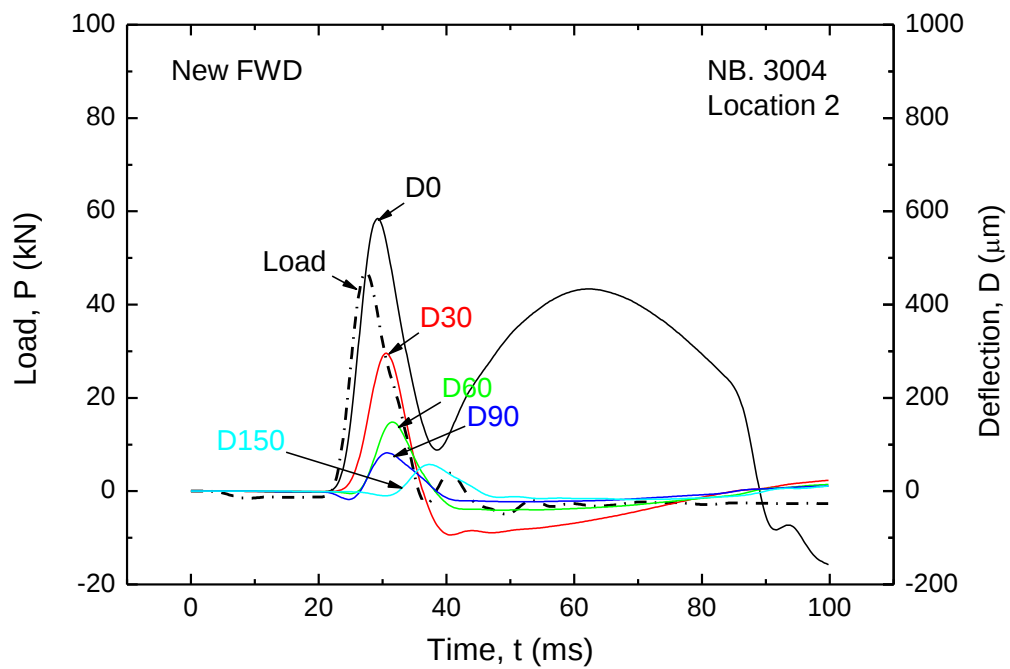
รูปที่ 2.4-35 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 12



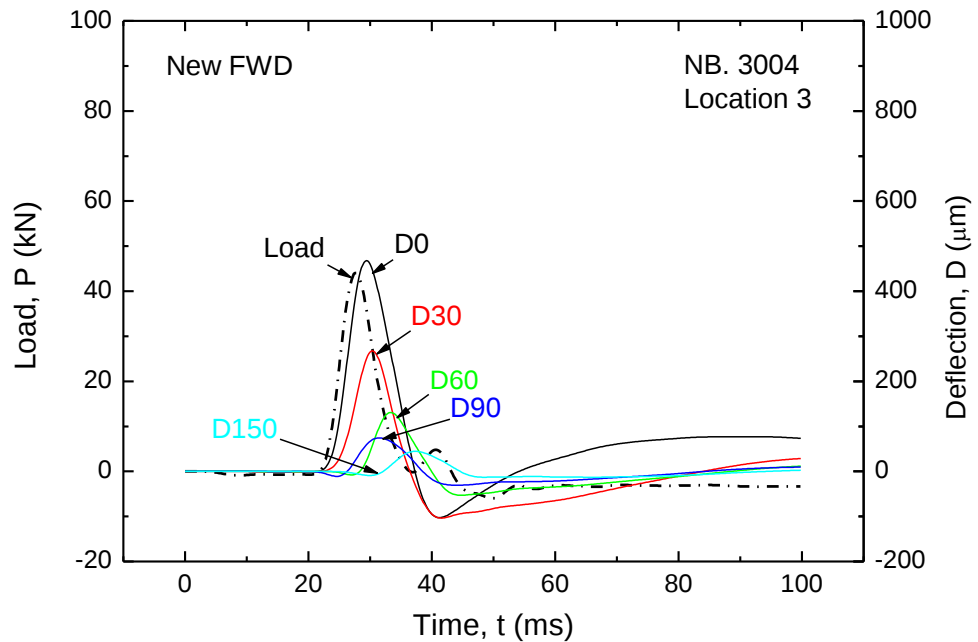
รูปที่ 2.4-36 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 13



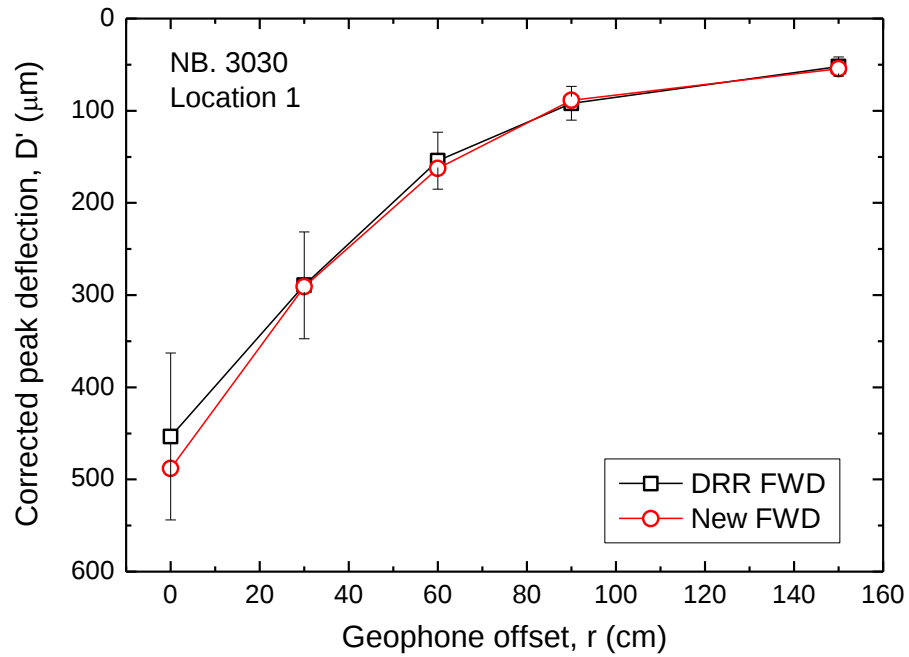
รูปที่ 2.4-37 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 1



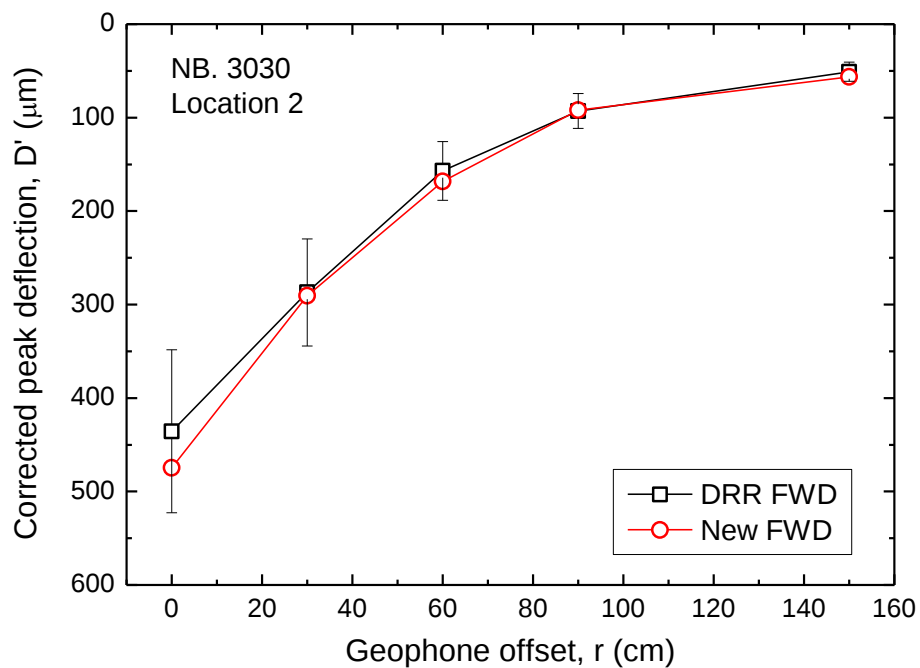
รูปที่ 2.4-38 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 2



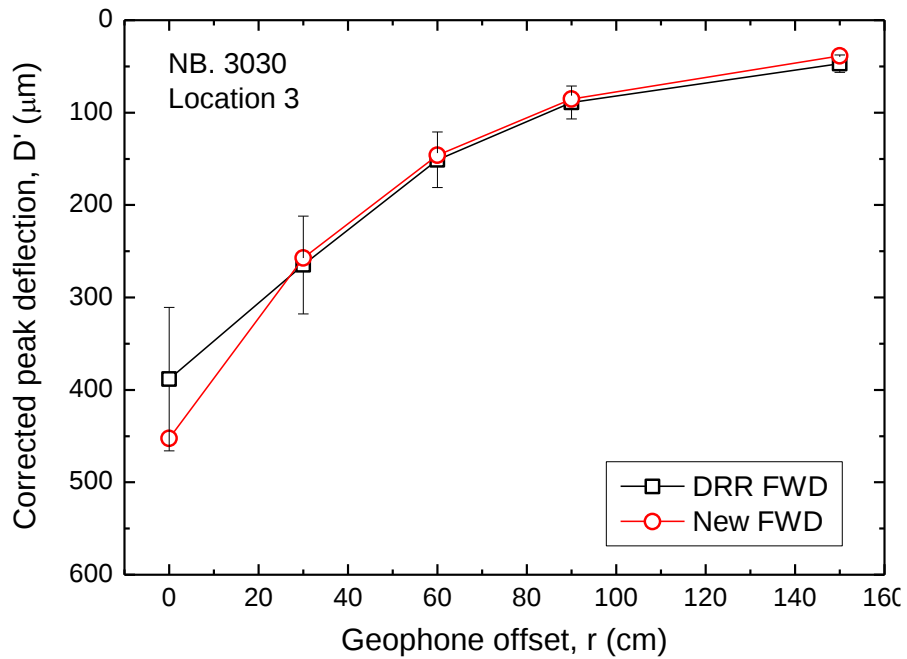
รูปที่ 2.4-39 ประวัติเวลาของน้ำหนักตกระแทกและการแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 3



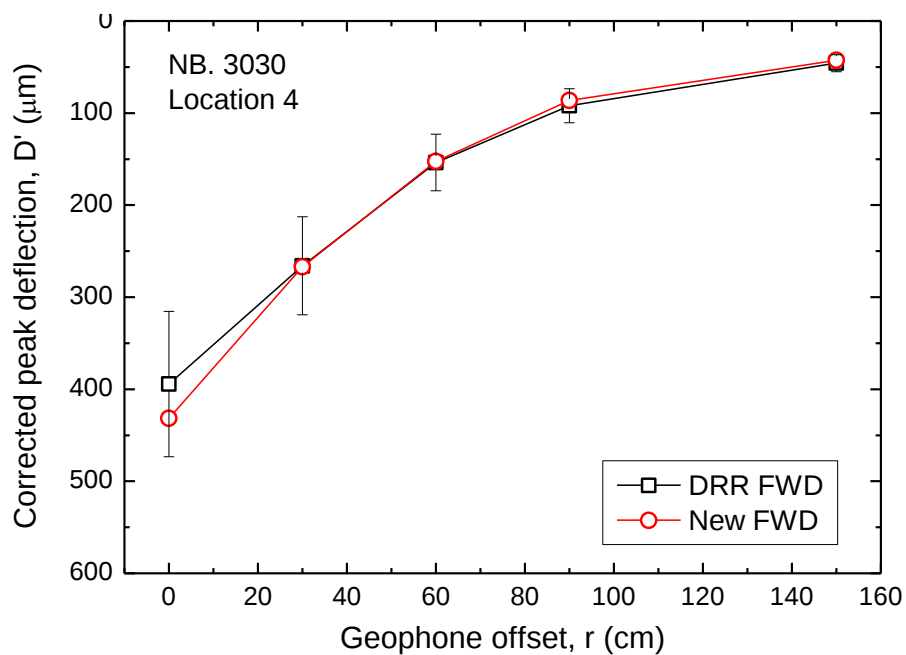
รูปที่ 2.4-40 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 1



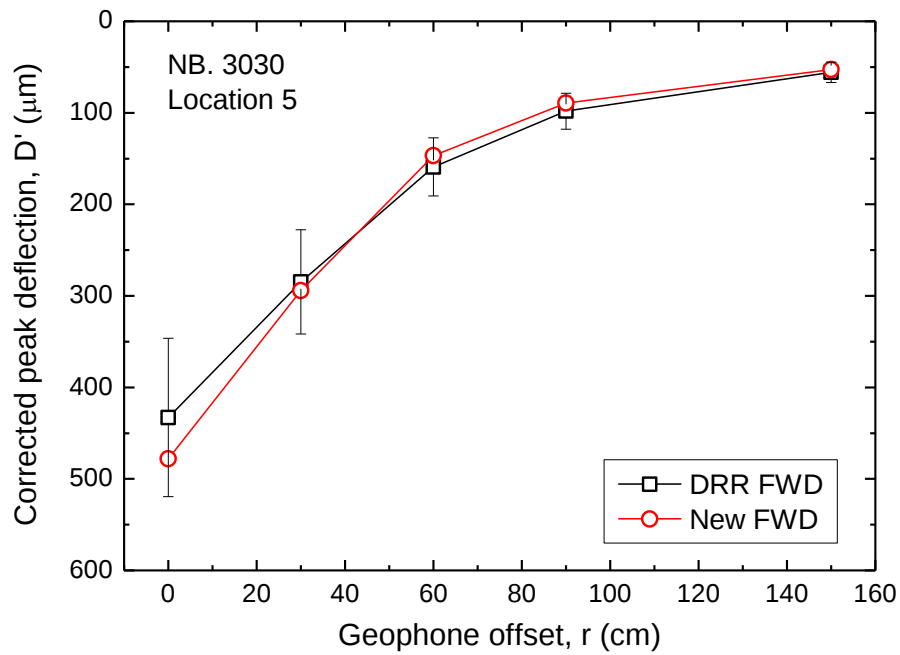
รูปที่ 2.4-41 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 2



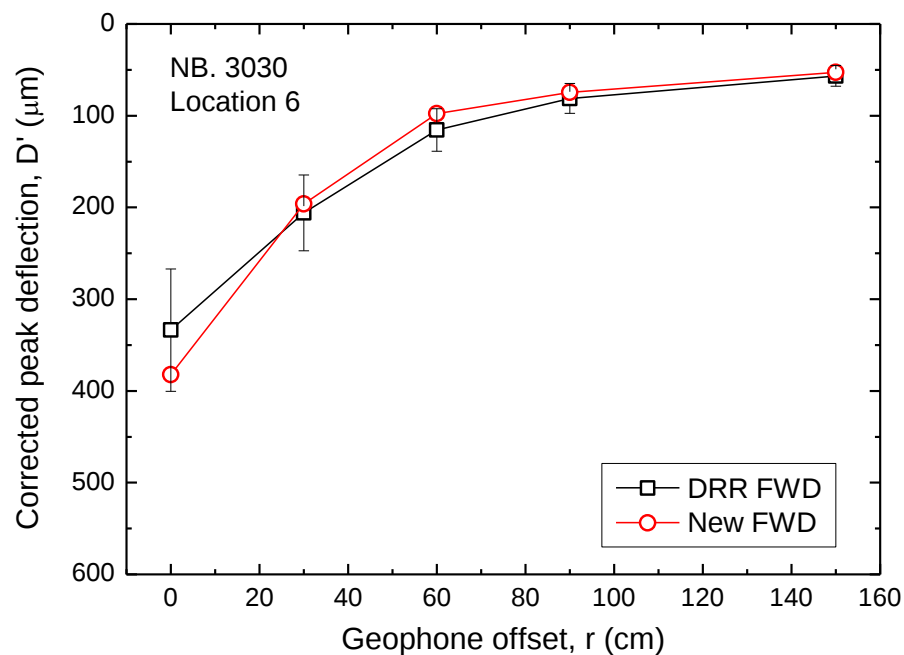
รูปที่ 2.4-42 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 3



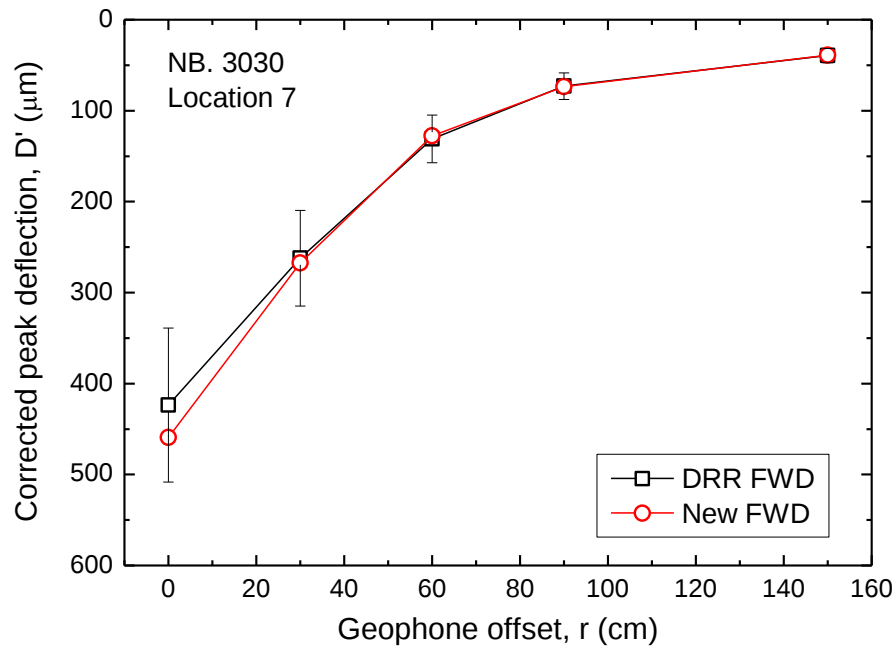
รูปที่ 2.4-43 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 4



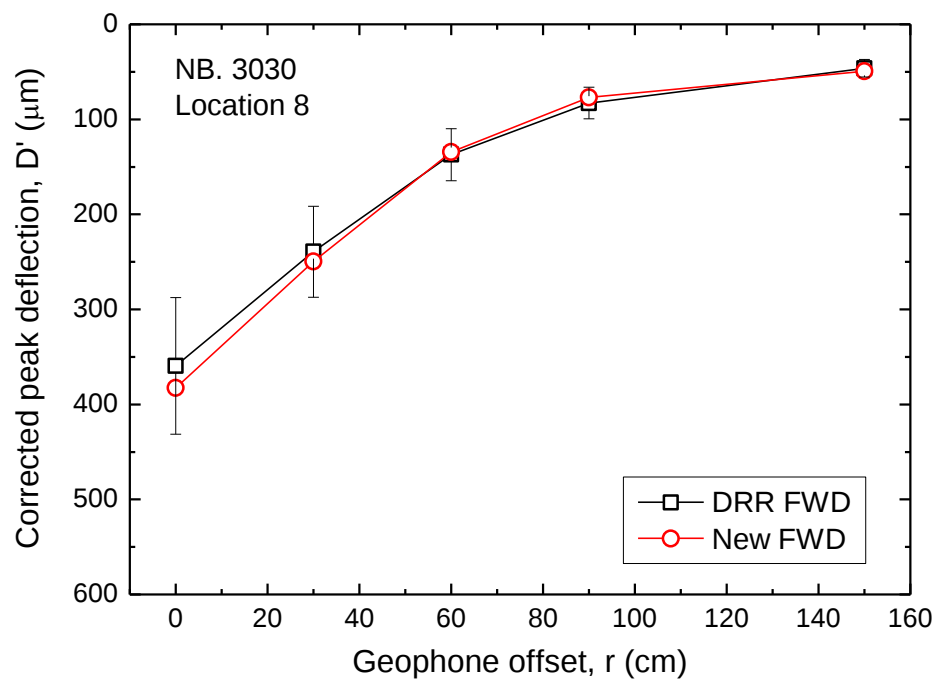
รูปที่ 2.4-44 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 5



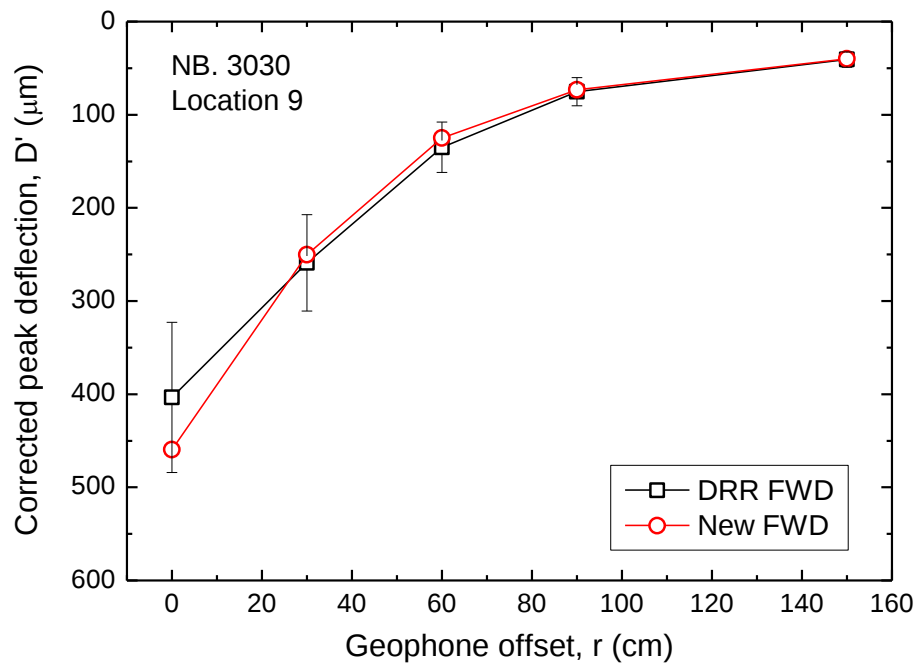
รูปที่ 2.4-45 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 6



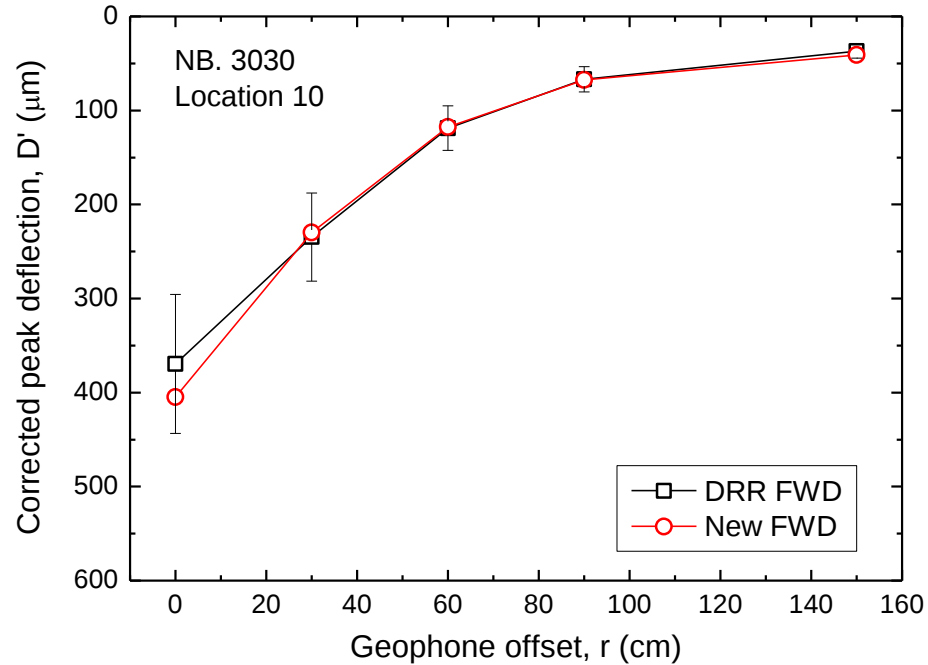
รูปที่ 2.4-46 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 7



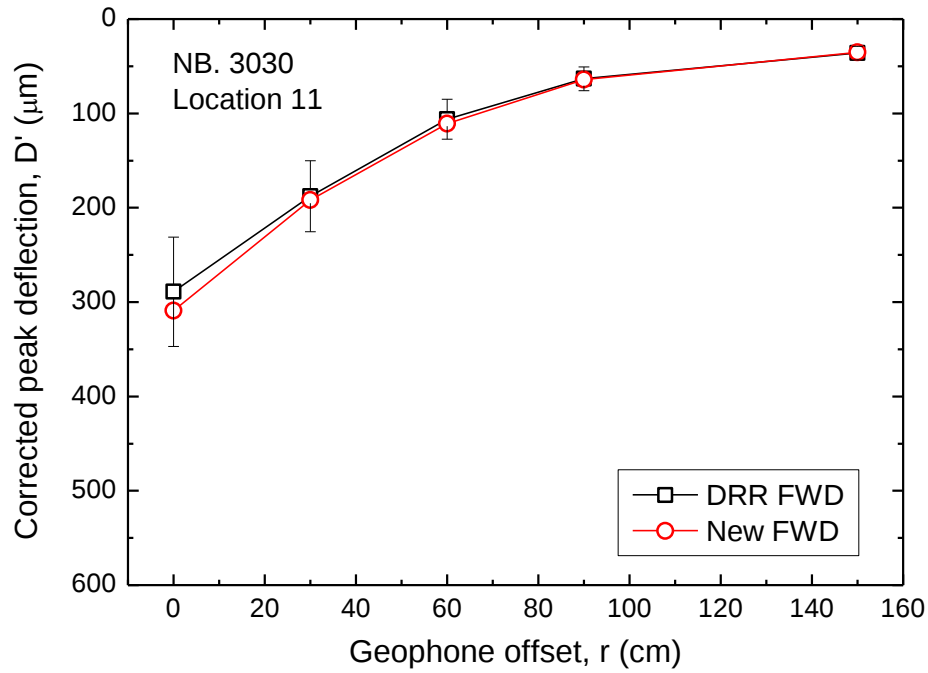
รูปที่ 2.4-47 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 8



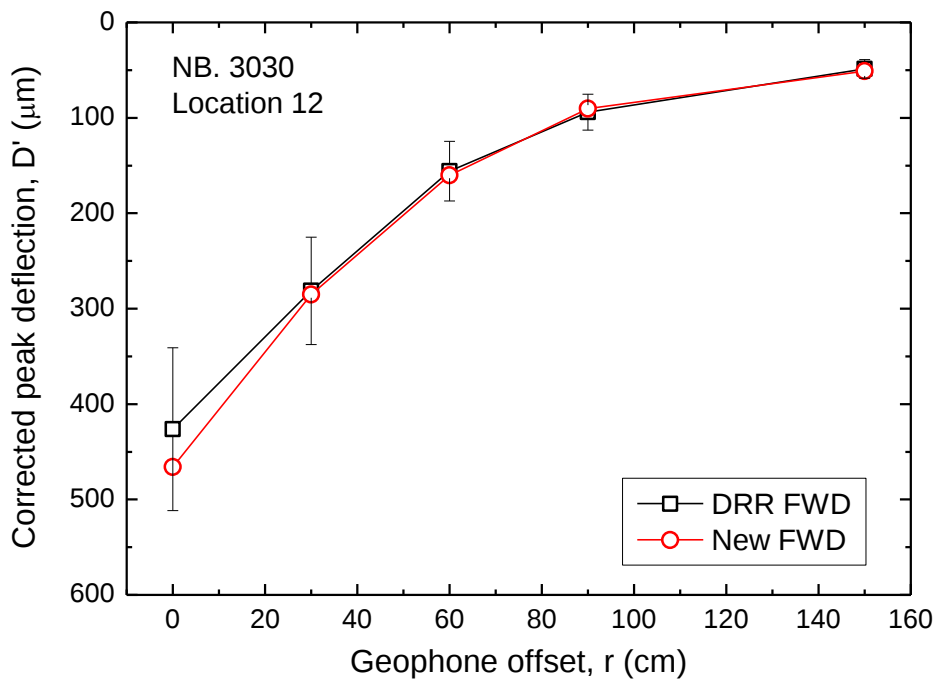
รูปที่ 2.4-48 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 9



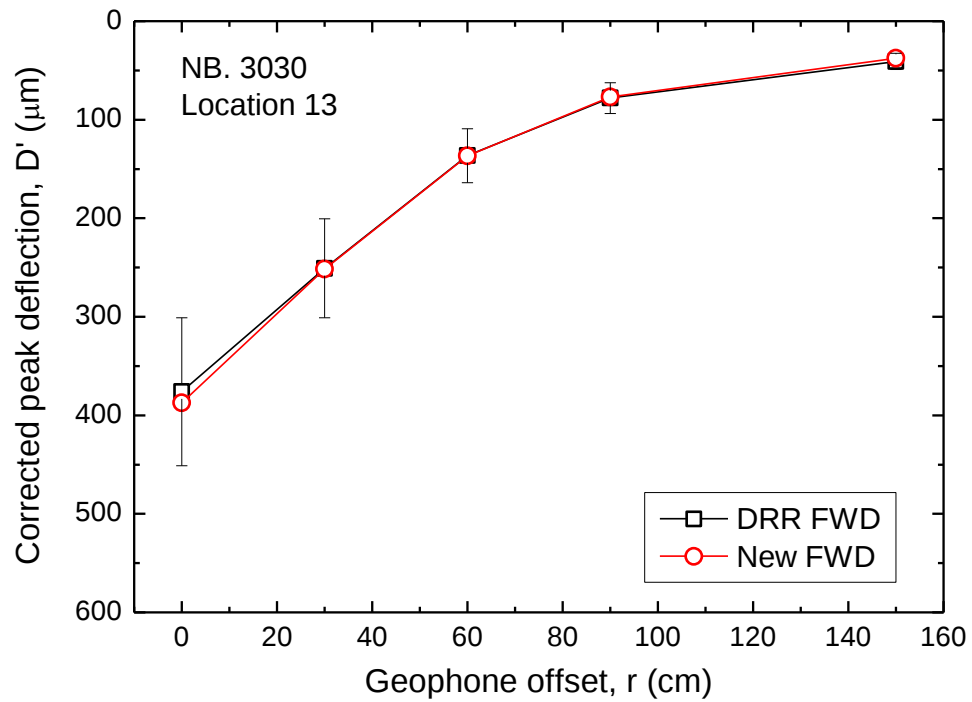
รูปที่ 2.4-49 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 10



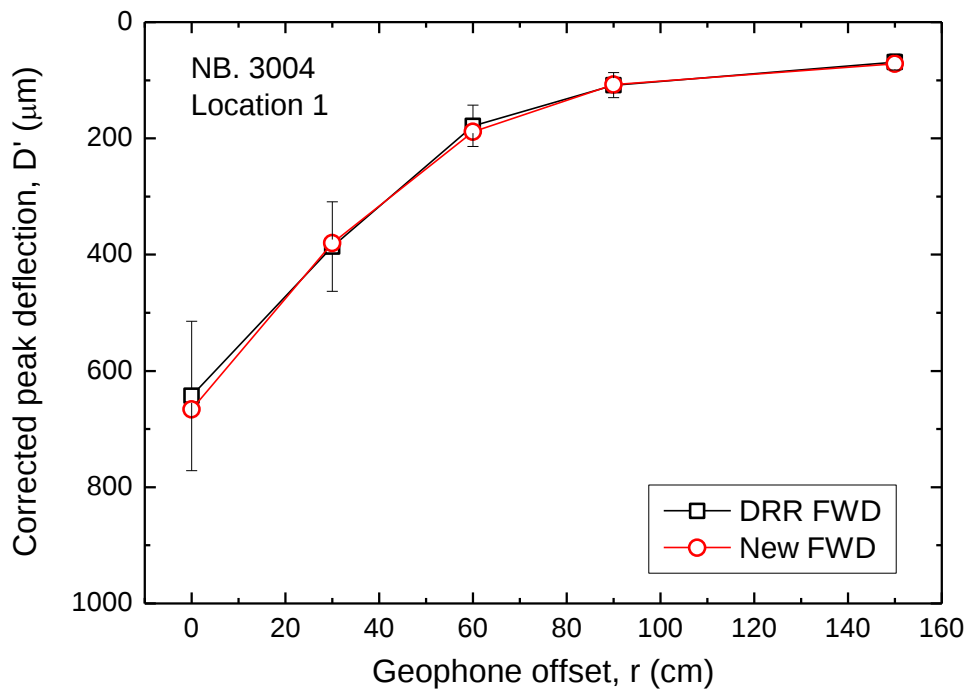
รูปที่ 2.4-50 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 11



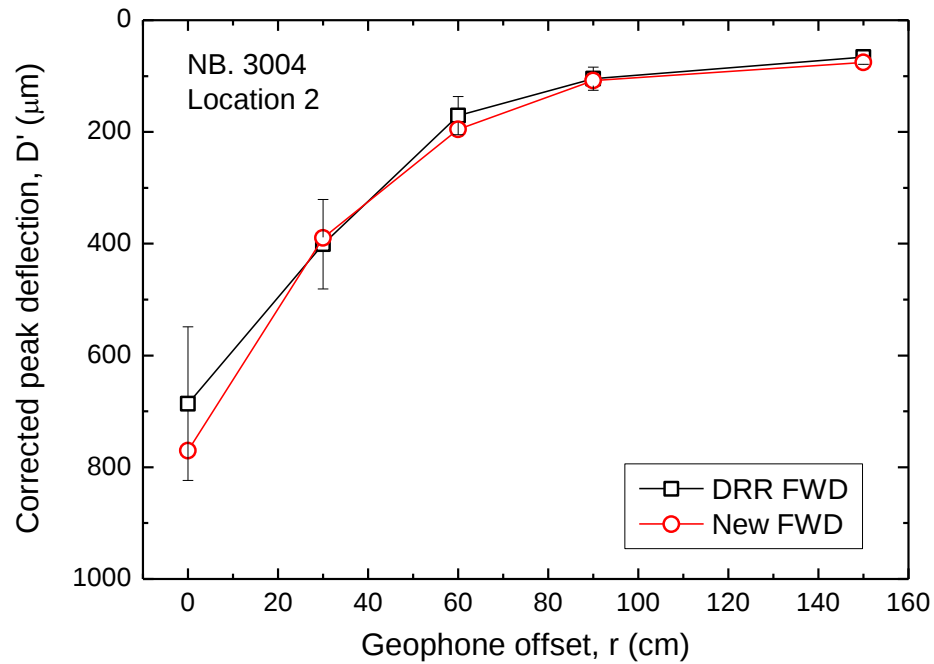
รูปที่ 2.4-51 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 12



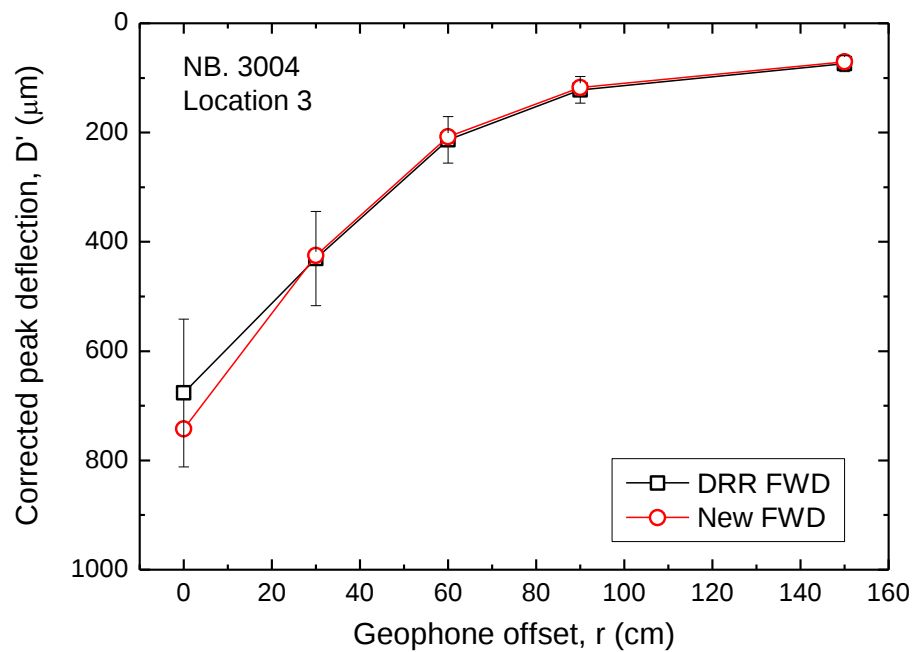
รูปที่ 2.4-52 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3030, ตำแหน่งที่ 13



รูปที่ 2.4-53 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 1



รูปที่ 2.4-54 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 2



รูปที่ 2.4-55 การเปรียบเทียบลักษณะการแอ่นตัวของโครงสร้างทางระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องที่พัฒนาขึ้นใหม่; ถนนสาย นบ. 3004, ตำแหน่งที่ 3

2.4-5 การประเมินผลการทดสอบ

1. น้ำหนักตกระแทกที่วัดได้

เมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักตกระแทกสูงสุดที่วัดได้ระหว่างเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทกับเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ จะสามารถคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนจากน้ำหนักตกระแทกมาตรฐานที่ 50 kN ออกมาเป็นร้อยละตามสมการที่ 2.4-2 ได้ดังแสดงในตารางที่ 2.4-5 และ 2.4-6 สำหรับถนนสาย นบ. 3030 และ นบ. 3004 ตามลำดับ จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าน้ำหนักตกระแทกสูงสุดที่วัดได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่มีค่าแตกต่างจากค่าน้ำหนักมาตรฐานที่ 50 kN น้อยกว่าร้อยละ 15 ซึ่งถือว่าผ่านเกณฑ์การเปรียบเทียบในประเด็นนี้

2. การแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ตามแนวรัศมีจากศูนย์กลางของแรงกระแทกที่ทำการปรับแก้ผลกระทบจากความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักตกระแทกเพื่อให้เป็นค่าที่สอดคล้องกับน้ำหนักตกระแทกมาตรฐาน (50 kN) ตามสมการที่ 2.3-3 แล้ว จะสามารถคำนวณร้อยละความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่ได้พัฒนาขึ้นมาใหม่ที่แตกต่างจากค่าที่วัดได้จากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทได้ตามสมการที่ 2.3-4 ดังค่าที่แสดงในตารางที่ 2.4-7 และ 2.4-8 สำหรับถนนสาย นบ. 3030 และนบ. 3004 ตามลำดับ จากตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการแอ่นตัวที่ตรงศูนย์กลางแรงกระแทก (D'0) ที่วัดได้จากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกแตกต่างจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทไม่เกินร้อยละ 20 และที่ตำแหน่งอื่นๆ ไม่เกินร้อยละ 30 จึงถือว่าผ่านเกณฑ์สำหรับการเปรียบเทียบในประเด็นนี้

ตารางที่ 2.4-5 การเปรียบเทียบน้ำหนักตกระแทกที่วัดได้ระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างทางทั้งสองสำหรับถนนสาย นบ. 3030

จุดที่	DRR FWD		KMUTT FWD	
	Max. measured load (kN)	Error (%)	Max. measured load (kN)	Error (%)
1	50.40	0.80	48.22	3.56
2	50.10	0.20	51.72	3.43
3	49.66	0.68	42.4-93	10.15
4	50.28	0.56	46.36	7.29
5	50.18	0.36	49.75	0.50
6	50.14	0.28	42.4-70	10.60
7	49.83	0.34	42.4-34	11.33
8	50.08	0.16	52.62	5.24

9	49.56	0.88	45.70	8.59
10	49.97	0.06	47.49	5.03
11	49.59	0.82	52.46	2.4-91
12	49.71	0.58	47.24	5.52
13	48.98	2.04	52.4-15	8.29

ตารางที่ 2.4-6 การเปรียบเทียบน้ำหนักตกระแทกที่วัดได้ระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างทางทั้งสองสำหรับถนนสาย นบ. 3004

จุดที่	DRR FWD		KMUTT FWD	
	Max. measured load (kN)	Error (%)	Max. measured load (kN)	Error (%)
1	50.66	1.32	50.61	1.21
2	50.88	1.76	47.03	5.95
3	50.01	0.02	42.4-09	11.82

ตารางที่ 2.4-7 การเปรียบเทียบการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ที่วัดได้ระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างทางทั้งสองสำหรับถนนสาย นบ. 3030

จุดที่	D'0			D'30			D'60			D'90			D'150		
	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error
1	453.4	488.2	7.7	289.4	290.9	0.5	154.3	162.5	5.3	92.0	88.8	3.4	52.1	54.3	4.2
2	435.6	474.6	8.9	287.0	290.5	1.2	157.0	168.2	7.1	92.9	92.0	1.0	50.9	56.5	11.0
3	388.2	452.6	16.6	264.8	257.3	2.9	151.0	146.1	3.3	88.9	85.2	4.1	46.9	38.8	17.4
4	394.4	431.9	9.5	266.0	267.0	0.4	153.7	152.4	0.9	92.0	86.5	6.0	45.8	42.8	6.7
5	432.9	478.0	10.4	284.8	294.4	3.4	159.1	146.8	7.8	98.1	89.5	8.8	55.7	52.6	5.5
6	333.7	382.4	14.6	205.9	196.3	4.7	115.6	97.8	15.3	81.2	74.6	8.1	56.6	52.6	7.1
7	423.5	459.2	8.4	262.2	267.4	2.0	130.9	127.8	2.4	72.9	73.5	0.7	39.3	39.1	0.7
8	359.4	382.5	6.4	239.3	249.5	4.3	137.2	134.5	1.9	82.9	77.0	7.1	46.3	49.4	6.6
9	403.6	459.5	13.9	259.1	250.2	3.4	135.0	124.9	7.5	75.4	73.3	2.7	40.8	40.1	1.6
10	369.5	404.8	9.6	234.5	229.7	2.1	118.8	117.5	1.1	66.9	67.5	0.9	36.9	40.9	10.7
11	289.1	309.1	6.9	187.8	191.9	2.2	106.2	110.9	4.5	63.3	64.1	1.2	36.1	35.2	2.4
12	426.4	466.1	9.3	281.3	285.4	1.4	155.9	160.2	2.7	94.0	90.3	4.0	48.6	51.2	5.4
13	376.1	387.5	3.0	250.8	251.5	0.3	136.5	136.7	0.2	78.1	77.0	1.4	40.9	37.5	8.4

ตารางที่ 2.4-8 การเปรียบเทียบการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ที่วัดได้ระหว่างเครื่องวัดการแอ่นตัวของโครงสร้างทางทั้งสองสำหรับถนนสาย นบ. 3004

จุดที่	D'0			D'30			D'60			D'90			D'150		
	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error	DRR	New	Error
1	642.9	666.2	3.6	386.1	380.2	1.5	178.4	188.8	5.8	108.4	107.4	0.9	68.6	71.4	4.1
2	686.2	770.7	12.3	400.9	389.7	2.8	171.0	195.5	14.4	104.7	108.2	3.4	65.8	75.3	14.4
3	676.5	742.7	9.8	430.7	424.7	1.4	213.2	207.5	2.6	121.9	117.8	3.3	73.9	70.7	4.3

2.5 สรุปผล

2.5.1 บทนำ

จากผลการทดสอบดังที่ได้แสดงไว้ในบทที่ 4 ซึ่งได้ทำการทดสอบบนถนน 3 สายทาง แต่ทว่าค่าการทดสอบที่ได้จากการทดสอบที่ สป. 1011 เป็นการทดสอบครั้งแรก ไม่ได้ทำการวัดค่าการแอ่นตัวด้านข้าง และน้ำหนักที่ตกระแทกก็แตกต่างกันมาก ดังนั้นจึงทำการเปรียบเทียบเฉพาะการทดสอบครั้งที่สองบนสายทาง นบ. 3030 และ นบ. 3004 เพราะเครื่องมือวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกได้รับพัฒนาให้ดีขึ้น และแก้ไขจุดบกพร่องจากการทดสอบครั้งแรก โดยสามารถที่จะทำการวิเคราะห์และประมวลเพื่อเปรียบเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ 2 อย่าง กล่าวคือ 1) น้ำหนักตกระแทกที่วัดได้ และ 2) การแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ได้ดังที่จะได้สรุปไว้ในบทที่ 5 นี้

2.5.2 สรุปผลร้อยละความคลาดเคลื่อน

จากตารางที่ 2.5.1 ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักตกระแทกแตกต่างจากค่ามาตรฐานที่ 50 kN ไม่เกินร้อยละ 15 จากตารางที่ 2.5.2 การแอ่นตัวของโครงสร้างทางจากเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาใหม่คลาดเคลื่อนไปจากเครื่อง FWD ของกรมทางหลวงชนบทไม่เกินร้อยละ 20 สำหรับตำแหน่งกึ่งกลางแรงกระแทกและไม่เกินร้อยละ 30 สำหรับตำแหน่งอื่นๆ

2.5 การเปรียบเทียบเครื่องมือต้นแบบกับเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น

การเปรียบเทียบเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นใหม่กับเครื่องต้นแบบแสดงในตารางที่ 2.5 โดยยังไม่ได้พิจารณาถึงความคงทนและราคาจากการบำรุงรักษาเครื่องมือ และห้กราคารดู้ที่ใช้ลากเครื่องมือต้นแบบออกจากราคาที่นำเสนอ

ตารางที่ 2.5-1 การเปรียบเทียบเครื่องมือต้นแบบกับเครื่องมือที่พัฒนาขึ้นใหม่

หัวข้อ	เครื่องต้นแบบ	เครื่องมือที่พัฒนาขึ้นใหม่
ระบบการยกค้อน	ระบบยกแบบไฮดรอลิก เซลล์วัดแรงแบบไฮดรอลิก ใช้ Potentiometer วัดระยะยก ตัวลดแรงกระแทก	ระบบยกแบบนิวมาติก เซลล์วัดแรงแบบกลศาสตร์ ใช้ Extensiometer วัดระยะยก ตัวลดแรงกระแทก
เวลาในการทดสอบแต่ละจุด	5 นาที	10 นาที
ราคา	18 ล้านบาท	1.5 ล้านบาท

การบำรุงรักษา	ส่งต่างประเทศ	อะไหล่ในประเทศ

หมายเหตุ การเปรียบเทียบไม่ได้เปรียบเทียบในแง่ความคงทน

2.6 สรุปผล

จากการวิเคราะห์และประมวลผลการทดสอบที่แสดงไปดังกล่าวข้างต้น จะได้ว่าเครื่องวัดการแอ่นตัวแบบตกระแทกที่พัฒนาขึ้นใหม่สามารถนำมาใช้เพื่อประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างทางได้ เพราะสามารถให้ผลการทดสอบที่ใกล้เคียงกับเครื่อง FWD ต้นแบบ พารามิเตอร์ดังกล่าวได้แก่ 1) น้ำหนักตกระแทกที่วัดได้, 2) การแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ

ตารางที่ 2.5.1 แสดงความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักตกระแทกเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักมาตรฐาน

รหัส/สายทาง	จุดที่	DRR FWD		New FWD	
		Max. load (kN)	Error (%)	Max. load (kN)	Error (%)
นบ. 3030	1	50.40	0.80	48.22	3.56
	2	50.10	0.20	51.72	3.43
	3	49.66	0.68	44.93	10.15
	4	50.28	0.56	46.36	7.29
	5	50.18	0.36	49.75	0.50
	6	50.14	0.28	44.70	10.60
	7	49.83	0.34	44.34	11.33
	8	50.08	0.16	52.62	5.24
	9	49.56	0.88	45.70	8.59
	10	49.97	0.06	47.49	5.03
	11	49.59	0.82	52.46	4.91
	12	49.71	0.58	47.24	5.52
	13	48.98	2.04	54.15	8.29

นบ. 3004	1	50.66	1.32	50.61	1.21
	2	50.88	1.76	47.03	5.95
	3	50.01	0.02	44.09	11.82

ตารางที่ 2.5.2 แสดงความคลาดเคลื่อนของการแอ่นตัวของโครงสร้างทางที่ระยะต่างๆ ที่ได้จากการทดสอบ FWD ของที่พัฒนามาใหม่กับ FWD ของกรมทางหลวงชนบท

รหัสสายทาง/	จุดที่	Error (%)				
		D'0	D'30	D'60	D'90	D'150
นบ .3030	1	7.7	0.5	5.3	3.4	4.2
	2	8.9	1.2	7.1	1.0	11.0
	3	16.6	2.9	3.3	4.1	17.4
	4	9.5	0.4	0.9	6.0	6.7
	5	10.4	3.4	7.8	8.8	5.5
	6	14.6	4.7	15.3	8.1	7.1
	7	8.4	2.0	2.4	0.7	0.7
	8	6.4	4.3	1.9	7.1	6.6
	9	13.9	3.4	7.5	2.7	1.6
	10	9.6	2.1	1.1	0.9	10.7
	11	6.9	2.2	4.5	1.2	2.4
	12	9.3	1.4	2.7	4.0	5.4
	13	3.0	0.3	0.2	1.4	8.4
นบ .3004	1	3.6	1.5	5.8	0.9	4.1
	2	12.3	2.8	14.4	3.4	14.4
	3	9.8	1.4	2.6	3.3	4.3

2.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

- ลดการนำเข้าจากต่างประเทศ มีจำนวนเครื่องทดสอบเพิ่มมากขึ้นในงบประมาณเท่าเดิม

- การพัฒนาขึ้นเองจะสามารถทำให้เหมาะสมต่อลักษณะการใช้งานในประเทศ เช่น การออกแบบอุปกรณ์แต่ละตัว จะคำนึงถึงความเหมาะสมของการติดตั้ง อะไหล่ที่หาได้ในประเทศ และการถอดเข้าออกได้โดยบุคลากรที่มีอยู่แล้ว
- การพัฒนาขึ้นเองจะทำให้ทราบถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นระหว่างการทดสอบและแนวทางการแก้ไข การใช้งานจริงสามารถที่จะจัดเทรนนิ่งคอร์สเริ่มต้นก่อนการใช้งาน ดังนั้นเมื่อเกิดปัญหาขึ้น ก็สามารถที่จะแก้ไขให้เครื่องสามารถนำกลับมาใช้งานได้ในระยะเวลาอันสั้น ในขณะที่เครื่องที่นำเข้าจากต่างประเทศจะต้องรออะไหล่หรือส่งกลับไปซ่อมยังประเทศผู้ผลิต