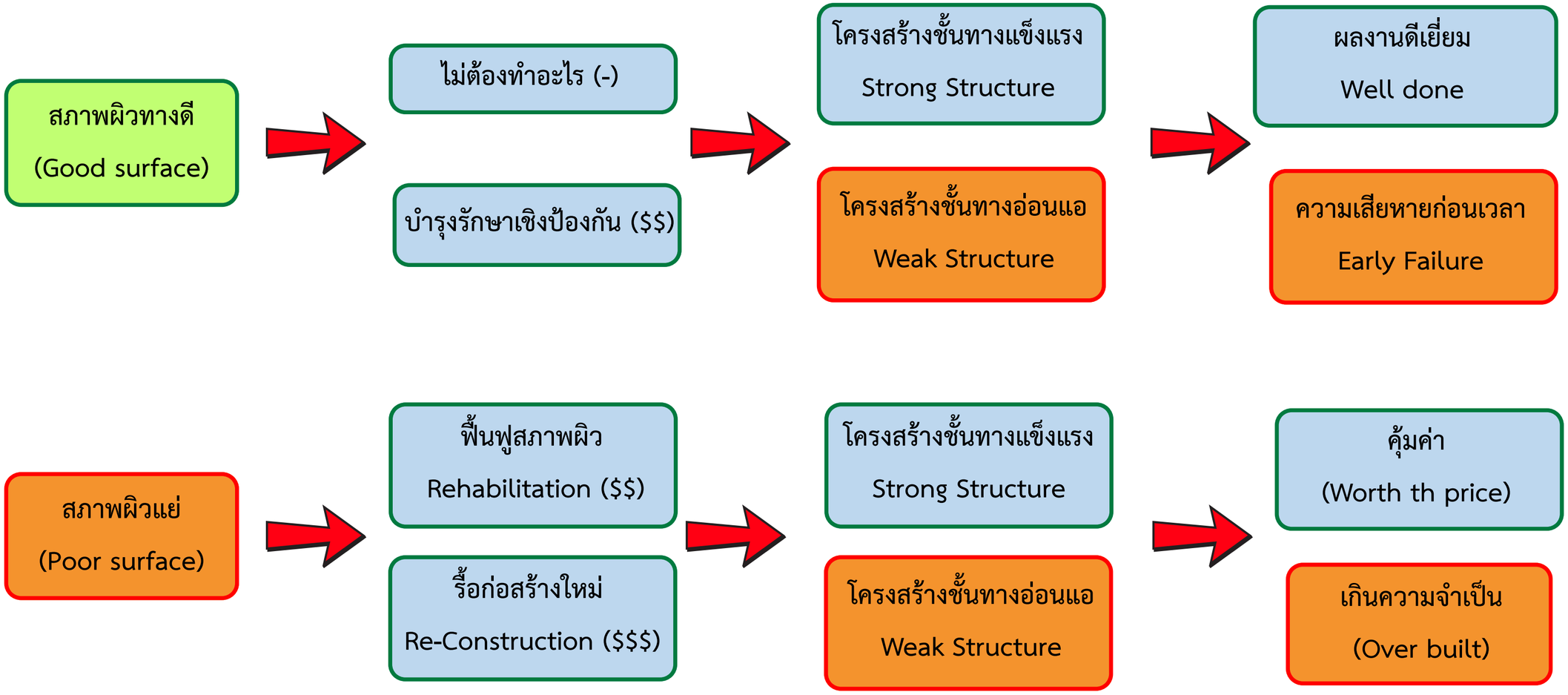
คู่มือเชิงปฏิบัติการสำหรับงานวิเคราะห์ออกแบบ ตรวจสอบคุณภาพ และติดตามประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง เล่มที่ 1

สำนักวิจัยและพัฒนางานทาง กรมทางหลวง



แนวคิดความคุ้มค่า



วัตถุประสงค์

บทความนี้นำเสนอเกณฑ์ความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยางเฉพาะงานติดตามประเมินผลภายหลังก่อสร้าง ซึ่งเป็นเนื้อหาเพียงบางส่วนของคู่มือฯดังกล่าว โดยใช้วิธีการตรวจสอบและประเมินค่าการแอ่นตัวของผิวทางด้วยเครื่องมือ FWD เพื่อให้วิศวกรและเจ้าหน้าที่ฝ่ายปฏิบัติงานของกรมทางหลวง มีความรู้ ความเข้าใจเกี่ยวกับแนวทางการนำดัชนีชี้วัดความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง ไปใช้บำรุงรักษาและบูรณะปรับปรุงทางหลวง ในระดับโครงการและระดับโครงข่ายทางหลวงอย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่ากับงบประมาณของประเทศ

ขั้นตอนการดำเนินงาน

การสำรวจด้วยเครื่องมือ FWD



- เก็บค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างทาง
  - ใช้ load 50 kN (3 drop)
  - Plate 30 cm (diameter)

การเก็บข้อมูลอุณหภูมิ



- เก็บค่าอุณหภูมิของผิวทางทุกชั่วโมงตั้งแต่เริ่มทำการทดสอบเก็บค่าความแอ่นตัว

ข้อมูลความหนาชั้นทาง



- เจาะสำรวจเก็บตัวอย่างความหนาชั้นผิวทาง
- แบบก่อสร้าง

สำรวจสภาพผิวทางปัจจุบัน



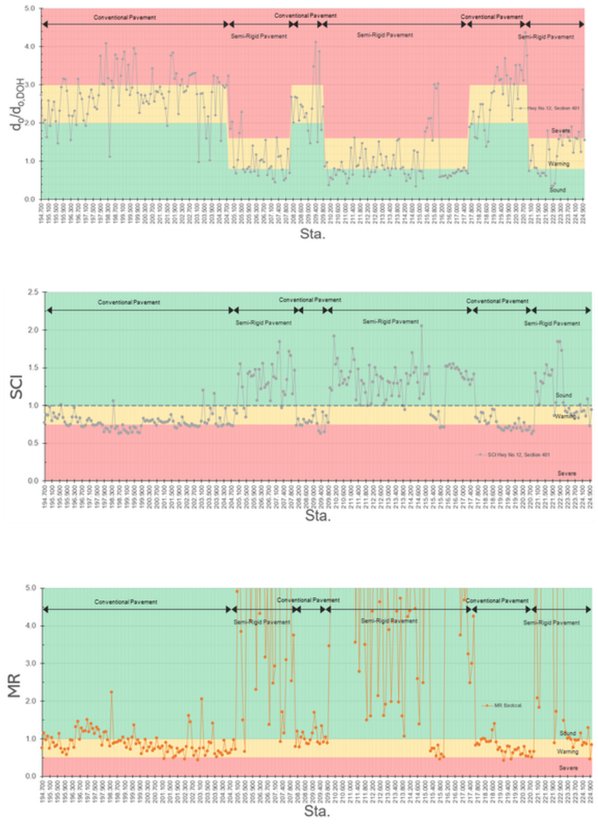
- เก็บข้อมูลความเสียหายของผิวทาง
  - รอยแตกร้าว
  - หลุมบ่อ
  - ร่องล้อ
  - อื่นๆ

ขั้นตอนการดำเนินงาน (ต่อ)

ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง

- ค่าดัชนีการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยาง
  - d_o
  - RoC
  - BLI
  - MLI
  - LLI
- อัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio, MR)
- ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Condition Index, SCI)
- ดัชนีค่าการเสริมผิวทาง (Overlay, D_{ol})

Monitoring

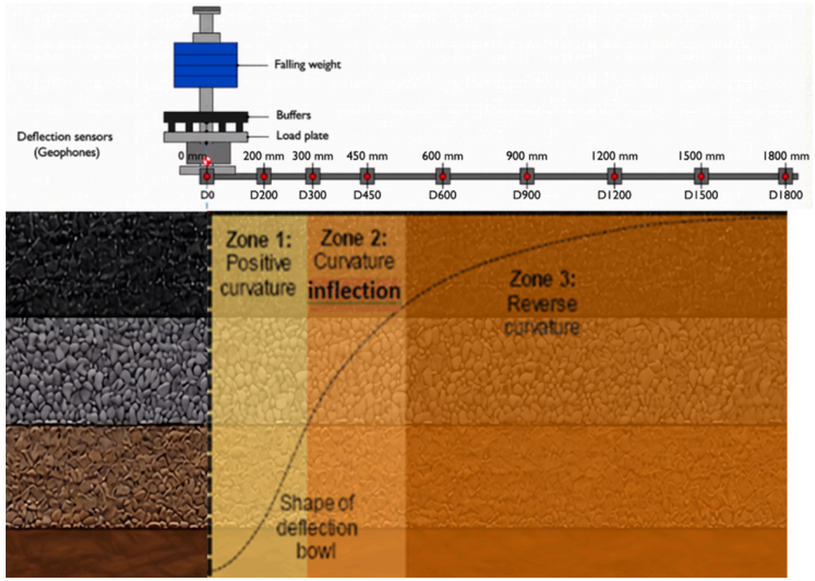


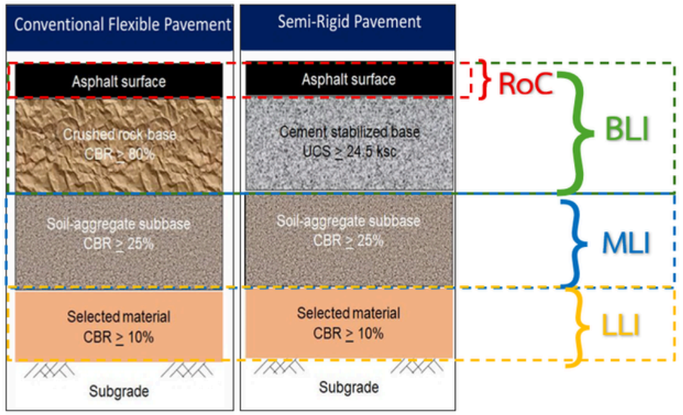
ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง (Deflection)

ค่าการแอ่นตัวบอกอะไร ?

สะท้อนพฤติกรรมการรับน้ำหนักบรรทุกของวัสดุโครงสร้างทาง (ขณะทดสอบ)

- ช่วงก่อนก่อสร้าง (งานออกแบบ)
- ช่วงระหว่างก่อสร้าง (งานควบคุมคุณภาพงานก่อสร้าง)
- ช่วงภายหลังงานก่อสร้าง (งานบำรุงรักษา)





Horak E. (2008), "Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters," Journal of the South African Institute of Civil Engineering, 50(2), 2–9.

$$RoC = \frac{L^2}{2D_0[(D_0/D_{200}) - 1]} \qquad BLI = d_0 - d_{300} \qquad MLI = d_{300} - d_{600} \qquad LLI = d_{600} - d_{900}$$

d_o = ค่าการแอ่นตัวสูงสุด ณ ตำแหน่งศูนย์กลางใต้จุดตกกระแทกของเครื่องมือ FWD

d_n = ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ n มิลลิเมตร จากจุดตกกระแทกของเครื่องมือ FWD

RoC = ดัชนีความโค้งของผิวทาง ใช้ประเมินความแข็งแรงของผิวทาง (Surface Layer)

BLI = ดัชนีการแอ่นตัวของชั้นพื้นทาง ใช้ประเมินความแข็งแรงของชั้นพื้นทาง (Base Layer)

MLI = ดัชนีการแอ่นตัวของชั้นรองพื้นทาง ใช้ประเมินความแข็งแรงของชั้นรองพื้นทาง (Subbase Layer)

LLI = ดัชนีค่าการแอ่นตัวของชั้นวัสดุคัดเลือก ใช้ประเมินความแข็งแรงของชั้นวัสดุคัดเลือก (Selected Material)

การวิเคราะห์ผล (ต่อ)

ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง (Deflection)

Horak (2008) เสนอเกณฑ์สำหรับใช้ประเมินสภาพโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้น้ำหนักทดสอบที่ 40 kN

Type	Rating	do (microns)	RoC (m)	BLI (microns)	MLI (microns)	LLI (microns)
Granular Base	Sound	< 500	> 100	< 200	< 100	< 50
	Warning	500 – 750	50 – 100	200 – 400	100 – 200	50 – 100
	Severe	> 750	< 50	> 400	> 200	> 100
Cementitious base	Sound	< 200	> 150	< 100	< 50	< 40
	Warning	200 – 400	80 – 150	100 – 300	50 – 100	40 – 80
	Severe	> 400	< 80	> 300	> 100	> 80

Horak E. (2008), "Benchmarking the structural condition of flexible pavements with deflection bowl parameters," Journal of the South African Institute of Civil Engineering, 50(2), 2–9.

Horak (2015) เสนอเกณฑ์สำหรับใช้ประเมินสภาพโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้น้ำหนักทดสอบที่ 50 kN

Type	Rating	do (microns)	RoC (m)	BLI (microns)	MLI (microns)	LLI (microns)
Granular Base	Sound	< 625	> 90	< 250	< 115	< 65
	Warning	625 – 925	42 – 90	250 – 475	115 – 225	65 – 120
	Severe	> 925	< 42	> 475	> 225	> 120

Horak, E., Emery, S. and Maina, J. (2015), "Review of falling weight deflectometer deflection benchmark analysis on roads and airfields," 11th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA15), Sun City, South Africa, 16-19.

การวิเคราะห์ผล (ต่อ)

ดัชนีค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทาง (Normalized Deflection)

หลักการของ Normalized Deflection ที่ 50 kN

ชั้นทางรูปแบบใดๆ



ชั้นทางมาตรฐานของกรมทางหลวง



$$\frac{d_o}{d_{o,DOH}} = \frac{\text{maximum surface deflection}}{\text{maximum surface deflection determined from typical DOH pavement section}}$$

เสนอเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางใดๆกับค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างชั้นทางมาตรฐานของกรมทางหลวง เพื่อตัดข้อกังวนเรื่องความแตกต่างของเครื่องมือที่ทดสอบ เสมือนเปรียบเทียบค่าการแอ่นตัวในหน่วยฐานเดียวกัน

คณะผู้ศึกษา เสนอหลักเกณฑ์ค่าการแอ่นตัวของโครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้ค่า Normalize Deflection ที่ 50 kN โดยพัฒนาจากหลักเกณฑ์ของ Horak (2008) เนื่องจากเป็นเกณฑ์ที่มีความครบถ้วนทั้ง Granular Base และ Cementitious base ปลอดภัยมากกว่า หลักเกณฑ์ของ Horak (2015)

คณะผู้ศึกษา เสนอเกณฑ์ประเมินความแข็งแรงของโครงสร้างถนนลาดยาง อาศัยค่า Normalized Deflection Parameters

Type	Rating	do/do,DOH (micron)	RoC/RoC ,DOH (m)	BLI/BLI ,DOH (micron)	MLI/MLI ,DOH (micron)	LLI/LLI ,DOH (micron)
Granular Base	Sound	< 2.00	> 0.15	< 3.35	< 2.40	< 1.40
	Warning	2.00 – 3.00	0.08 – 0.15	1.70 – 6.70	2.40 – 4.80	1.40 – 2.70
	Severe	> 3.00	< 0.08	> 6.70	> 4.80	> 2.70
Cementitious base	Sound	< 0.80	> 0.23	< 1.70	< 1.20	< 1.10
	Warning	0.80 – 1.60	0.12 – 0.23	1.70 – 5.00	1.20 – 2.40	1.10 – 2.20
	Severe	> 1.60	< 0.12	> 5.00	> 2.40	> 2.20

การวิเคราะห์ผล (ต่อ)

ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Condition Index, SCI)

SN_{req} SN_{req} = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนที่ต้องการ (Required Structural Number) ตามปริมาณจราจร ESALS

$$\log(W_{18}) = Z_R S_0 + 9.36\log(SN+1) - 0.20 + \frac{\log\left[\Delta PSI/(4.2-1.5)\right]}{0.4 + 1094/(SN+1)^{5.19}} + 2.32\log(E_{SG}) - 8.07 \quad (1)$$

For Design $$E_{SG} = C\left(\frac{0.24P}{d_r r}\right) \quad (2)$$

$$= 1{,}500 \times (CBR) \text{ หรือใช้ค่าจากห้องปฏิบัติการ} \quad (3)$$

: ค่าการแอ่นตัวหาได้จาก FWD หรือ โปรแกรมจำลอง

: d_r คือตำแหน่งที่ 1800 มิลลิเมตร (72 นิ้ว)

SN_{req} Back Calculate จากสมการ (1)

W_{18} = จำนวนรอบที่เพลาเดี่ยวมาตรฐาน 18,000 ปอนด์ หรือประมาน 80 kN กระทำต่อถนน

E_P = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนทั้งหมดเหนือดินเดิม Subgrade

E_{SG} = ค่าโมดูลัสของวัสดุชั้นดินเดิม Subgrade

d_r = ค่าการแอ่นตัวที่ระยะ r

C = สัมประสิทธิ์คูณปรับแก้ค่าโมดูลัสเพื่อใช้ออกแบบ (C = 0.33)

P = น้ำหนักตกกระแทก (Applied Load) หน่วยเป็น ปอนด์

D = ความหนารวมของโครงสร้างถนน (Total Pavement Thickness) หน่วยเป็น นิ้ว

a = รัศมีของแผ่นจานโลหะทดสอบ FWD หน่วยเป็น นิ้ว

d_o, d_7 = ค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 1 (ตำแหน่งที่น้ำหนักตกกระแทก) และค่าการแอ่นตัวของ Sensor ตัวที่ 7

(ห่างจาก Sensor ตัวที่ 1 เป็นระยะทาง 72 นิ้ว) ตามลำดับ หน่วยเป็น นิ้ว

ดัชนีความแข็งแรงของโครงสร้างชั้นทาง (Structural Condition Index, SCI)

SN_{eff}

- SN_{eff} = ค่าความแข็งแรงของโครงสร้างถนนในสภาพปัจจุบัน (Effective Structural Number)

For Effective $E_{SG} = \left(\frac{0.24P}{d_r r}\right)$ (4) : d_r คือตำแหน่งที่ 1800 มิลลิเมตร (72 นิ้ว)

$$d_o = 1.5*P*a*\left(\frac{1}{E_{SG}*\sqrt{1+\left((D/a)*\sqrt[3]{\frac{E_p}{E_{SG}}}\right)^2}}+\frac{\left(1-\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{D}{a}\right)^2}}\right)}{E_p}\right) \quad (5)$$

คำนวนหาค่า E_P

นำค่า E_{SG} จาก (5) แทนค่าในสมการ (6) Back Calculate จากค่าการแอ่นตัวสูงสุด d_o (ค่า d_o จาก FWD ต้องปรับแก้อุณหภูมิก่อนที่ 20 องศาเซลเซียส)

นำค่า E_p หาได้จากการ Back Calculate จากค่าการแอ่นตัวสูงสุด d_o แทนค่าใน (7)

$$SN_{eff} = 0.0045*D*E_p^{0.333} \quad (7)$$

เกณฑ์ STRUCTURAL CONDITION INDEX, SCI

$$SCI = SN_{eff} / SN_{design}$$

ดัชนีสภาพโครงสร้าง (Structural Condition Index) เทียบกำลังรับน้ำหนักปัจจุบันกับที่ออกแบบ

Structural condition rating	Structural Condition Index (SCI)
Sound	> 1.0
Warning	0.75 to 1.0
Severe	< 0.75

Horak, E., Emery, S. and Maina, J. (2015), "Review of falling weight deflectometer deflection benchmark analysis on roads and airfields," 11th Conference on Asphalt Pavements for Southern Africa (CAPSA15), Sun City, South Africa, 16-19.

การวิเคราะห์ผล (ต่อ)

ค่าการเสริมผิวทาง (Overlay Thickness, D_{ol})

$$SN_{ol} = a_{ol} * D_{ol} = SN_f - SN_{eff}$$

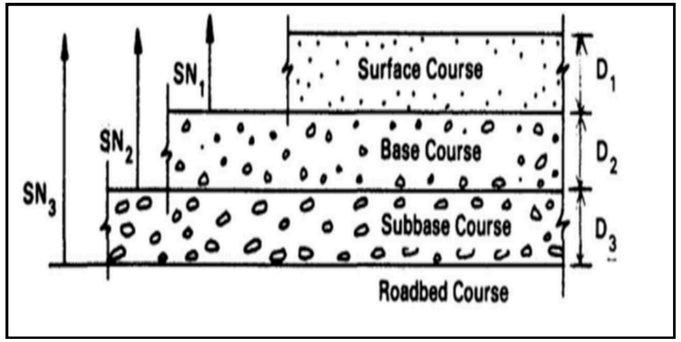
SN_{ol} = ค่าตัวเลขโครงสร้างชั้นทางที่ต้องการสำหรับการเสริมผิวทาง (Required Overlay Structural Number)

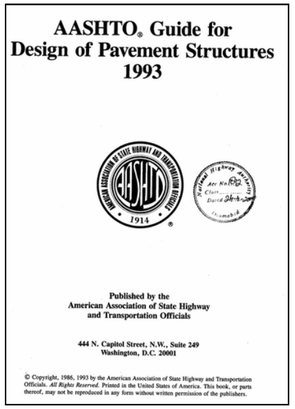
SN_f = ค่าตัวเลขโครงสร้างชั้นทางที่ต้องการสำหรับรองรับปริมาณจราจรในอนาคต (Required Structural Number for Future Traffic)

SN_{eff} = ค่าตัวเลขโครงสร้างชั้นทางประสิทธิผลในสภาพปัจจุบันของถนนเดิม (Effective Structural Number of Existing Pavement)

a_{ol} = สัมประสิทธิ์โครงสร้างของวัสดุชั้นเสริมผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Structural Coefficient for Asphalt Concrete Overlay)

D_{ol} = ความหนาการเสริมผิวทางที่ต้องการ (Required Overlay Thickness)หน่วยเป็น นิ้ว หรือ มิลลิเมตร





ผลต่างที่ได้จะมีความหายดังนี้

- ถ้าเป็นบวก คือ SN_f มีค่า มากกว่า SN_{eff} หมายถึง ถนนที่เดิม ณ ปัจจุบันมีความแข็งแรงไม่เพียงพอที่จะรองรับปริมานจราจรตามที่ออกแบบไว้ได้
- ถ้าเป็นลบ คือ SN_f มีค่า น้อยกว่า SN_{eff} หมายถึง ถนนที่เดิม ณ ปัจจุบันมีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรองรับปริมานจราจรตามที่ออกแบบไว้ได้

โดยผลต่างดังกล่าวนำมาพิจารณาในรูปแบบการเสริมวัสดุชั้นผิวทางเพื่อให้สามารถรองรับปริมาณจราจรที่ออกแบบไว้ได้ ตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้

เกณฑ์ค่า OVERLAY

$$SN_{ol} = SN_f - SN_{eff}$$

คำนวณความหนาเสริมผิวทาง (Overlay) จากความแตกต่างระหว่างกำลังรับน้ำหนักที่ต้องการ (SN_f)

และที่เหลืออยู่จริง (SN_{eff})

ปริมาณจราจรสูง	
Rating	**Overlay Thicness (mm)**
Sound	**< 30**
Warning	**30 – 50**
Severe	**> 50**
ปริมาณจราจรปานกลาง - ต่ำ	
Rating	**Overlay Thicness (mm)**
Sound	**< 50**
Warning	
Severe	**> 50**

ชญาดา รวิวรรณ, ปรนิก จิตต์อารีกุล และพีรยุทธ คำหงษา,การทดสอบการแอ่นตัวของถนนที่ก่อสร้างใหม่, บทความทางวิชาการ, http://km.doh.go.th/km-web/public/kbs/dGpvUEdcux

การวิเคราะห์ผล (ต่อ)

ค่าอัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio,MR)

$$MR = \frac{E_p}{E_{design}}$$

- E_p = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนลาดยางทดสอบในสนาม ณ ช่วงเวลาต่างๆ (Existing Pavement Modulus)
- E_{design} = ค่าโมดูลัสของโครงสร้างถนนลาดยางที่ใช้ในการออกแบบ (Design Modulus)
  = $(E_{AC}H_{AC} + E_{BS}H_{BS} + E_{SB}H_{SB} + E_{SL}H_{SL}) / H_{Total}$
- H_{AC} = ความหนาของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete)
- H_{BS} = ความหนาของพื้นทาง (Base)
- H_{SB} = ความหนาของรองพื้นทาง (Subbase)
- H_{SL} = ความหนาของวัสดุคัดเลือก (Selected Material)
- H_{Total} = ความหนารวมของโครงสร้างถนน = $H_{AC} + H_{BS} + H_{SB} + H_{SL}$

ชนิดของวัสดุชั้นทาง	Elastic Modulus (MPa)
PMA	4,500
AC60/70	2,500
Cement Modifiled Crush rock	850
Crush rock	350
Subbase	150
Selected	100
Embankment	10 x CBR

เกณฑ์ Modulus Ratio (MR)

$$MR = E_p / E_{design}$$

อัตราส่วนโมดูลัส (Modulus Ratio) เทียบค่าโมดูลัสยืดหยุ่นที่คำนวณย้อนกลับได้

ในสนาม กับค่าโมดูลัสมาตรฐานของแบบ

Structural condition rating	Modolus ratio (MR)
Sound	> 1.00
Warning	0.50 – 1.00
Severe	< 0.50

Reference: Zhang, Z. et al. (2003), “Development of a new methodology for characterizing pavement structural condition for network-level applications,” Report No. FHWA/TX-04/0-4322-1, Texas Department of Transportation, Austin, TX

เกณฑ์ OVERLAY, SCI และ MR

SCI

$$SCI = SN_{eff} / SN_{design}$$

Structural condition rating	Structural Condition Index (SCI)
Sound	> 1.0
Warning	0.75 to 1.0
Severe	< 0.75

OVERLAY

$$SN_{ol} = SN_f - SN_{eff}$$

ปริมาณจราจรสูง	
Rating	Overlay Thicness (mm)
Sound	< 30
Warning	30 – 50
Severe	> 50

ปริมาณจราจรปานกลาง - ต่ำ	
Rating	Overlay Thicness (mm)
Sound	< 50
Warning	
Severe	> 50

MR

$$MR = E_p / E_{design}$$

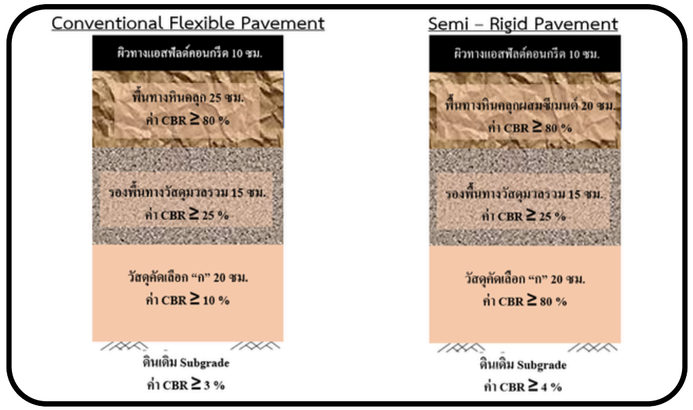
Structural condition rating	Modolus ratio (MR)
Sound	> 1.00
Warning	0.50 – 1.00
Severe	< 0.50

ตัวอย่างที่ 1

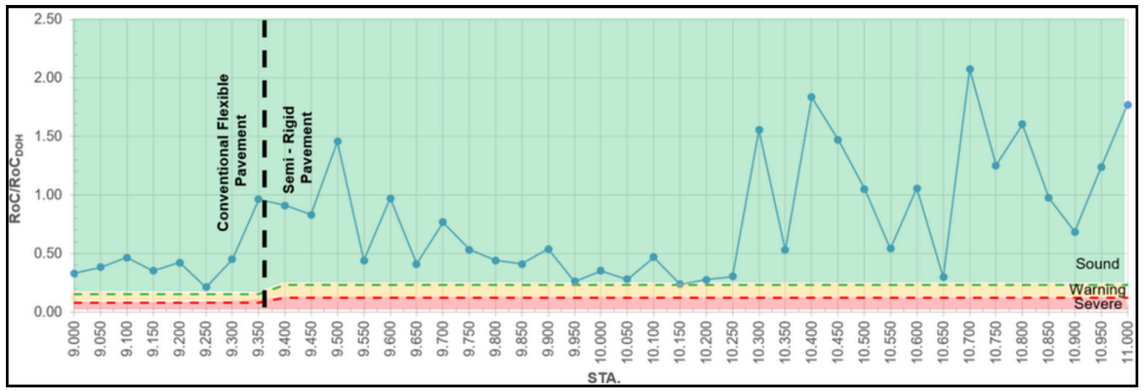
ทางหลวงหมายเลข 1275 มะขามสูง – พญาแมน

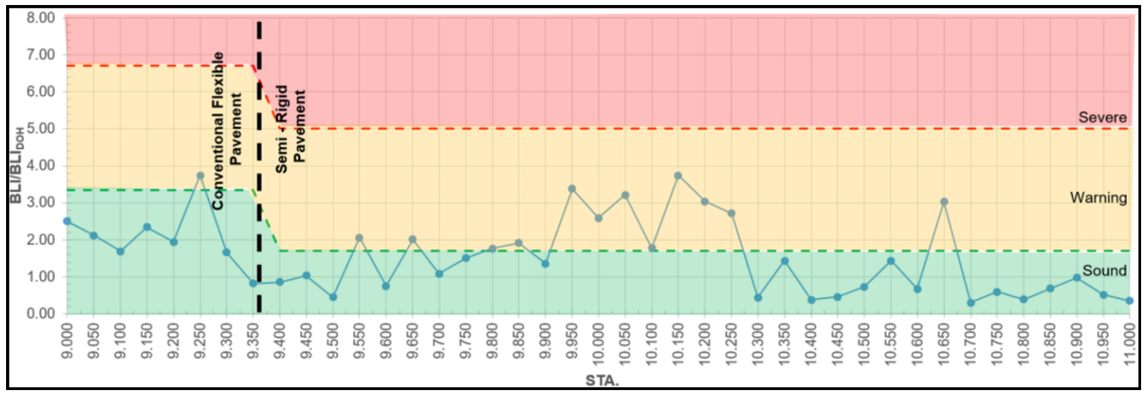
- ช่วงกม. 9+000 ถึง 9+350 มีโครงสร้างชั้นทางแบบ Conventional Flexible Pavement ที่คล้ายกับ Typical Section
- ช่วงกม. 9+350 ถึง 11+000 มีโครงสร้างชั้นทางแบบ Semi-Rigid Pavement

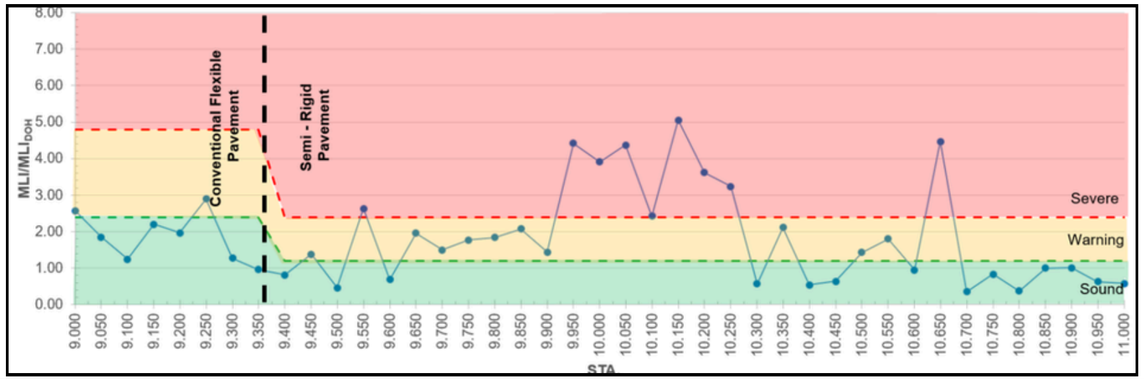
Structural condition rating
Sound
Warning
Severe

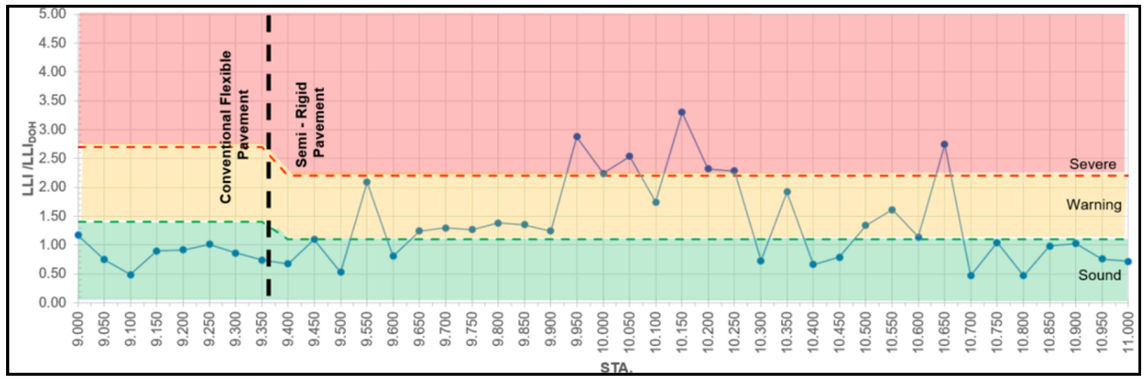


ดัชนีค่าการแอ่นตัว









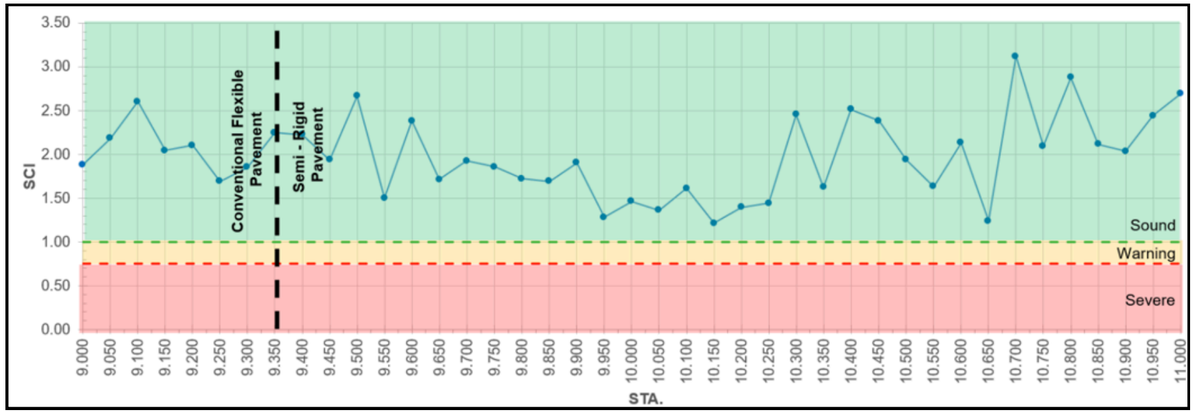
ตัวอย่างที่ 1 (ต่อ)

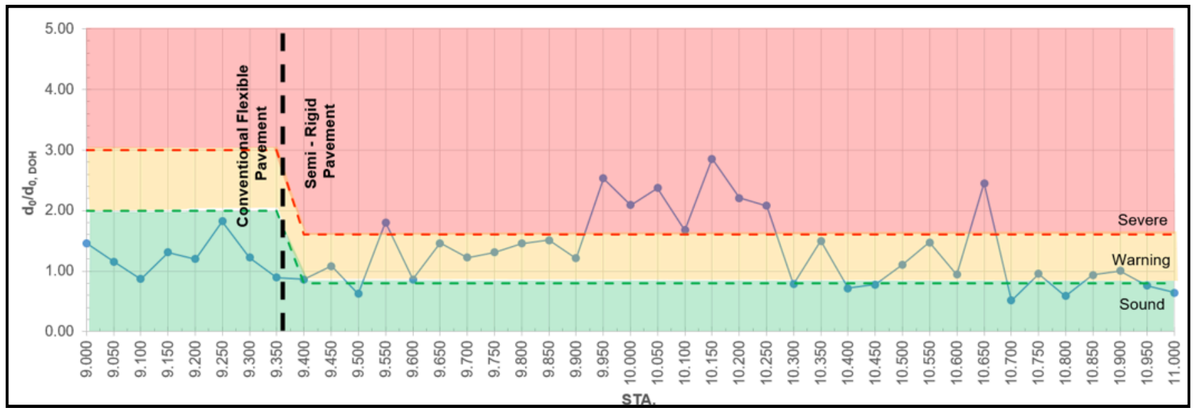
หมายเหตุ

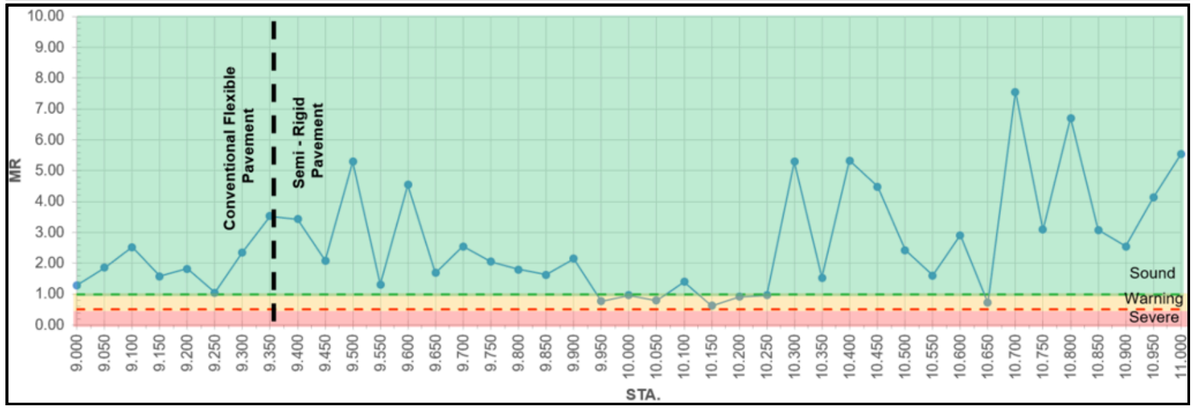
1.ค่า Overlay = 0 ตลอดทั้งสายทาง

2.ค่าปริมานจราจรที่ใช้ในการคำนวนเกณฑ์ต่างๆ จะใช้ค่าปริมานจราจรปัจจุบัน

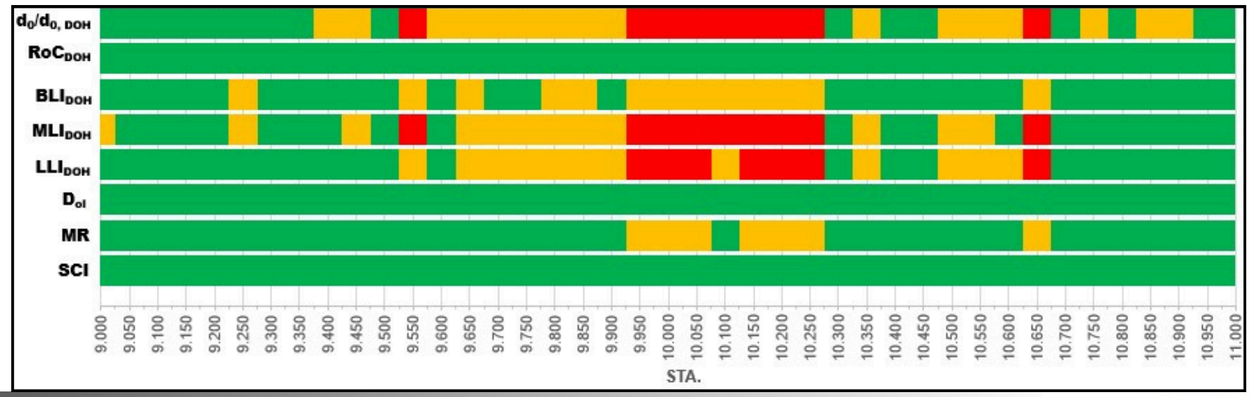
3.การประเมินสภาพโครงสร้างชั้นทางนี้เป็นการประเมินช่วงภายหลังการก่อสร้าง (งานบำรุงทาง)







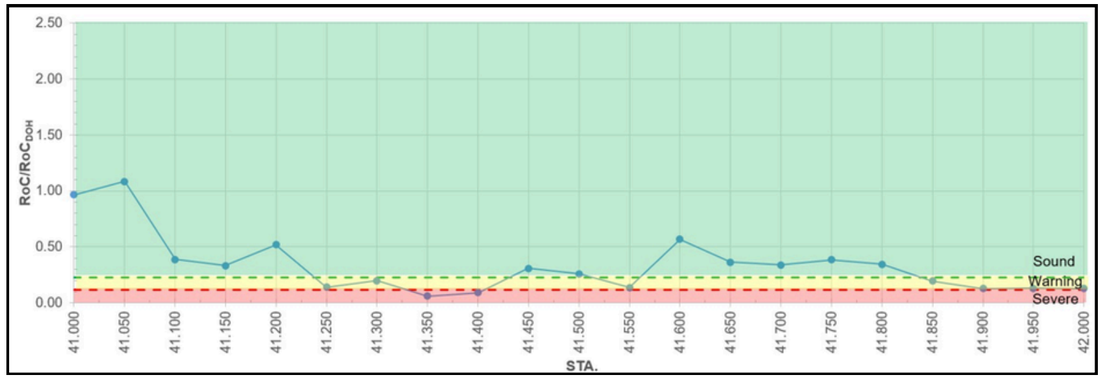
Structural condition rating
Sound
Warning
Severe

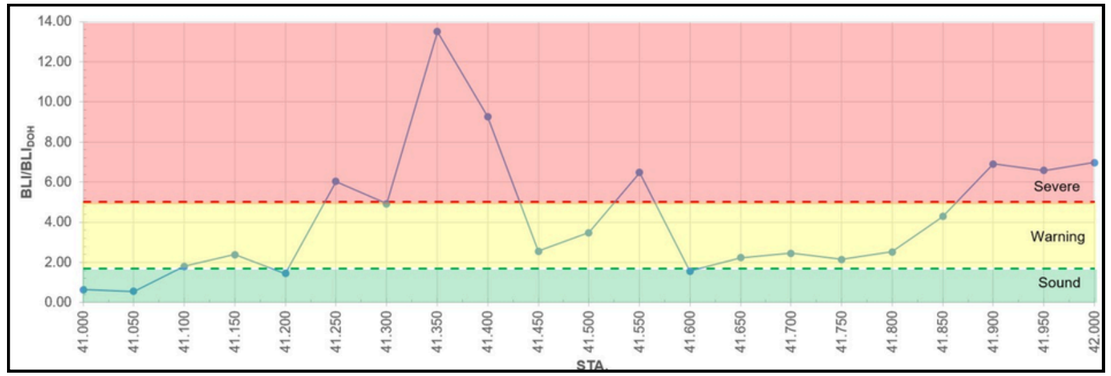


ตัวอย่างที่ 2

ทางหลวงหมายเลข 359 ตอนที่ 0200 เขามะกา – เขาหินซ้อน

- ช่วงกม. 41+000 ถึง 42+000 มีโครงสร้างชั้นทางแบบ Semi-Rigid Pavement





Structural condition rating

- Sound
- Warning
- Severe





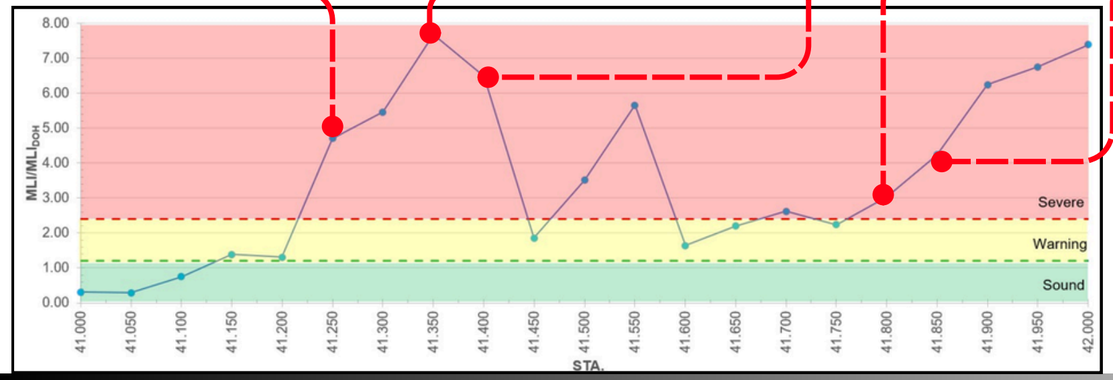


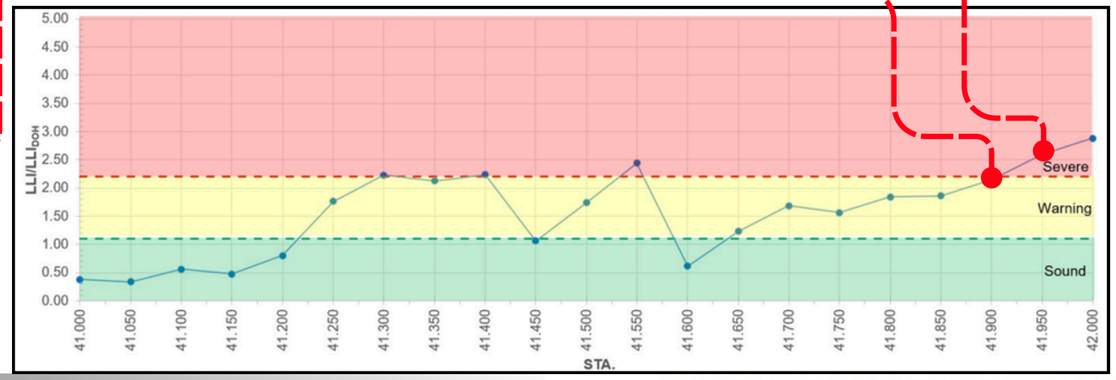


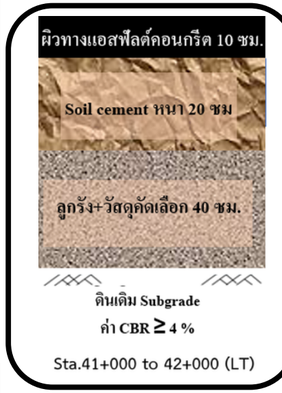




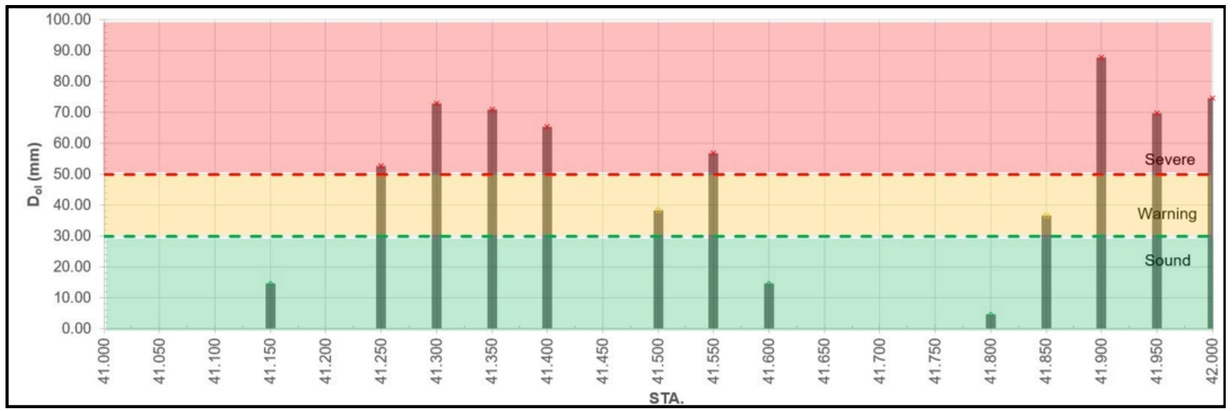


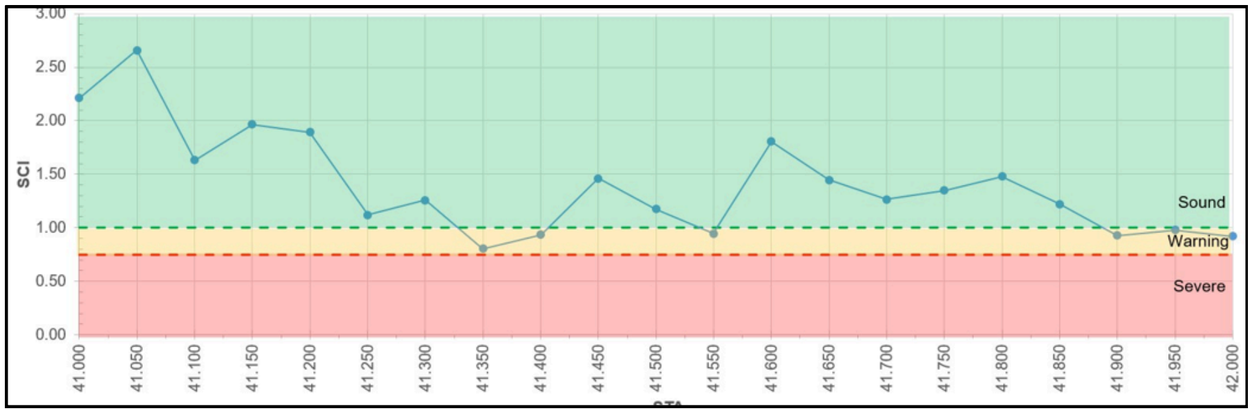


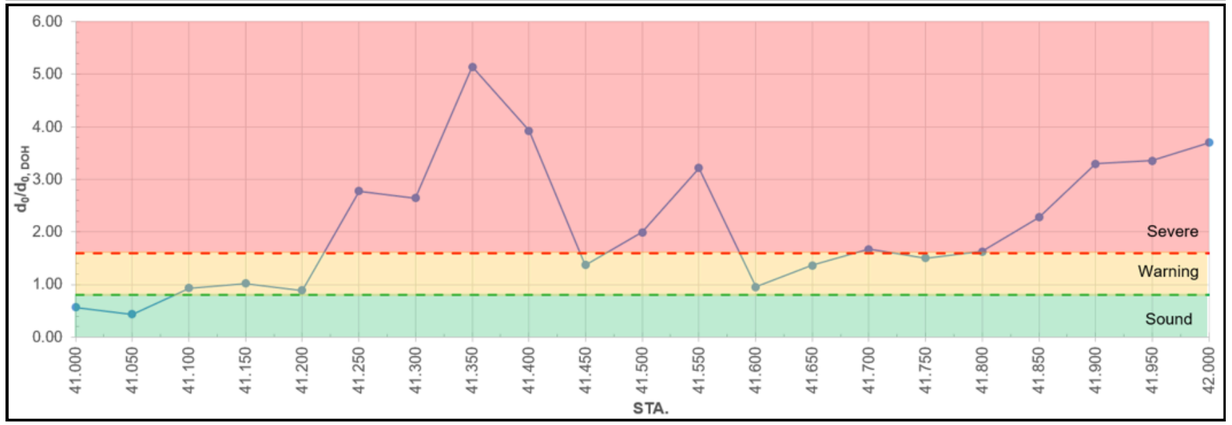


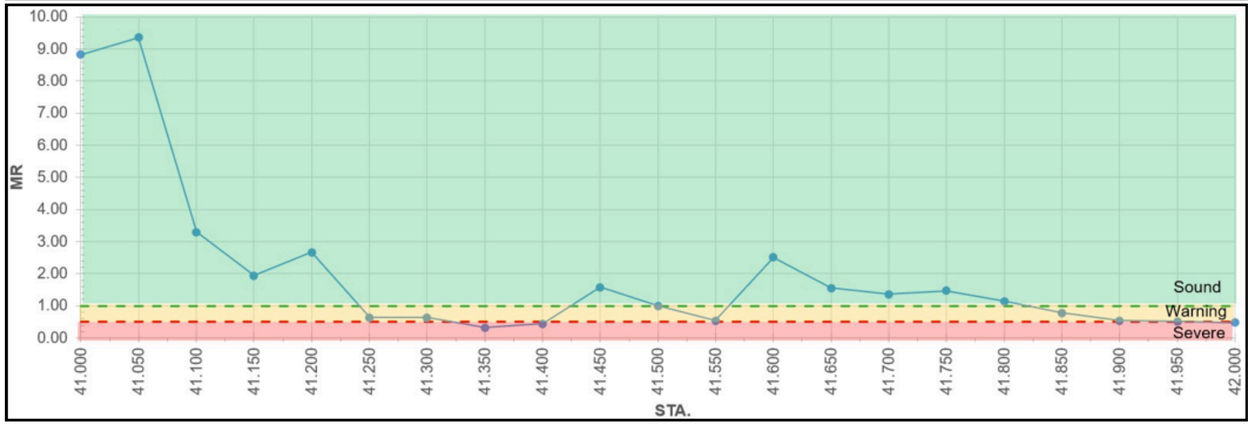


ตัวอย่างที่ 2 (ต่อ)

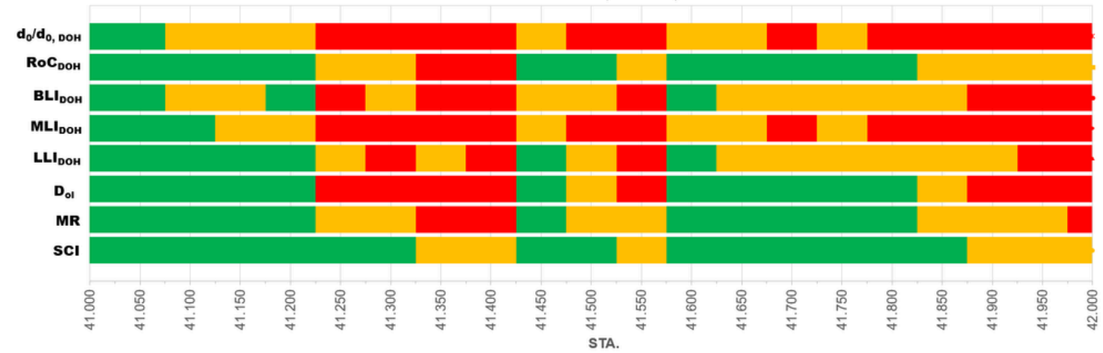








Structural condition rating
Sound
Warning
Severe



เกณฑ์ตรวจรับผลงานของต่างประเทศ

เกณฑ์ประกันผลงานภายในระยะเวลา 2 ปี ของต่างประเทศ (โปรเจคทางหลวงขนาดใหญ่ของประเทศ แม็กซิโก)

- IRI ≤ 1.0 m/km
- Rut depth ≤ 2 mm
- Surface deflection ≤ 200 micron
- Marcrotexture ≥ 1.15 mm
- Friction coefficient ระหว่าง 0.70 ถึง 0.90
- ไม่มีความเสียหายที่ผิวทาง





ขอบคุณครับ