แนวทางการออกแบบเพื่อก่อสร้างถนน และผิวทาง

ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ประเภทของผิวทาง

ผิวทางยืดหยุ่น (Flexible Pavement)

- ผิวทางก่อสร้างด้วยยางมะตอยและวัสดุมวลรวมหยาบ
- โครงสร้างประสานกันด้วยการขบเกี่ยวกัน (Interlock) แรงเสียดทาน (Friction) และแรงยึดเหนี่ยว (Cohesion) เพื่อรักษาเสถียรภาพ และกระจายน้ำหนักลงไปลงสู่ชั้นดินเดิม (subgrade)

ผิวทางแบบคงรูป (Rigid Pavement)

- ผิวทางก่อสร้างด้วยคอนกรีต
- สมมติว่ามีความแข็งแรงดัด (Flexural strength) สูงมากโดยคอนกรีตทำหน้าที่เสมือนคานที่เชื่อมความไม่สม่ำเสมอในชั้นพื้นทางและชั้นดินเดิม

1.1 ข้อควรคำนึงในการออกแบบ

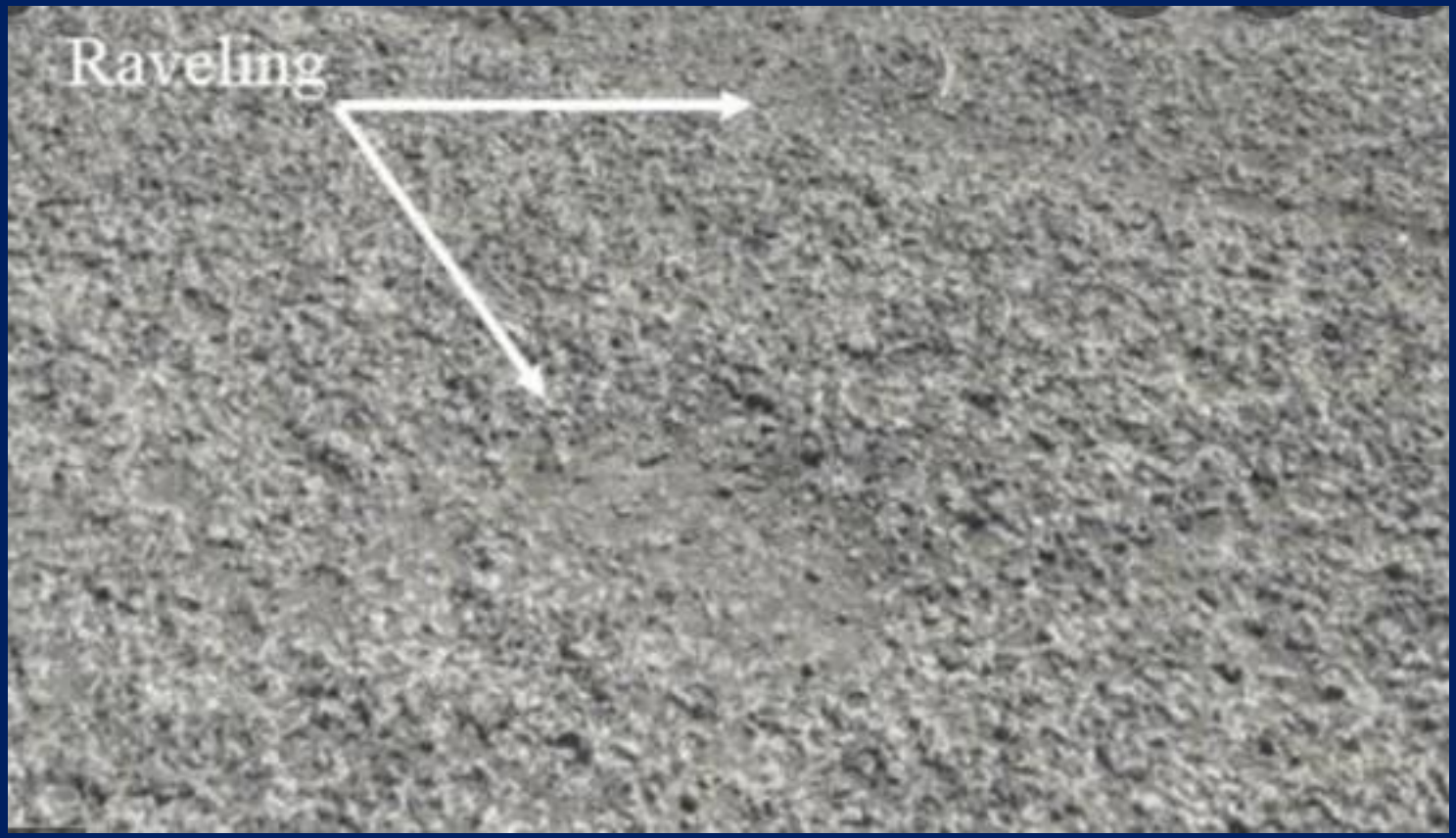
ข้อควรคำนึงในการออกแบบมีดังนี้

- สมรรถนะของผิวทาง
- การจราจร
- ดินคันทาง
- วัสดุก่อสร้างผิวทาง
- สิ่งแวดล้อม
- การระบายน้ำ
- ความน่าเชื่อถือได้
- ค่าใช้จ่ายตลอดอายุการใช้งาน
- การออกแบบไหล่ทาง

1.2 สมรรถนะของผิวทาง

- สมรรถนะเชิงโครงสร้างของผิวทางเกี่ยวข้องกับลักษณะทางกายภาพ ดังเช่นการเกิดรอยแตก (cracking) รอยแยก (faulting) การหลุดร่อน (raveling) หรือเงื่อนไขอื่น ๆ ซึ่งจะส่งผลเสียต่อความสามารถในการรับน้ำหนักของโครงสร้างผิวทางหรือต้องการการบำรุงรักษา
- สมรรถนะเชิงหน้าที่ของผิวทาง เกี่ยวข้องกับการที่ผิวทางสนองตอบต่อผู้ใช้ทางได้ดีเพียงไร ซึ่งหมายถึงความสะดวกสบายหรือคุณภาพในการขับขี่ ในการแสดงค่าความสะดวกสบายในการขับขี่ AASHTO Road Test ได้พัฒนาหลักการ ความสามารถให้บริการได้-สมรรถนะ (serviceability-performance) หลักการนี้ใช้วัดสมรรถนะสำหรับเป็นค่าป้อนลงในสมการที่ใช้ออกแบบ

การหลุดร่อน



Alligator crack

Rutting depth

Expansive pavement

แนวทางการวิเคราะห์ออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

- การออกแบบโครงสร้างชั้นทางต้องสามารถรองรับน้ำหนัก และปริมาณการจราจร ตามอายุการออกแบบ และตามลักษณะการใช้งานของแต่ละพื้นที่
- กำหนดรูปแบบทางเลือก ความหนา และคุณสมบัติของวัสดุ เพื่อให้ได้รูปแบบก่อสร้างเป็นไปตามมาตรฐานเช่น กรมทางหลวง
- วิธีการออกแบบต้องอ้างอิงวิธี American Association of State Highway and Transportation Officials หรือ AASHTO (1993)

ข้อกำหนดการออกแบบ ดังนี้

1) กำหนดจำนวนช่องจราจรในแต่ละทิศทาง
2) กำหนดอายุการออกแบบเช่น 20 ปี สำหรับโครงสร้างชั้นทางแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement)
3) กำหนดอายุการออกแบบเช่น 20 ปี สำหรับโครงสร้างชั้นทางแบบคงรูป (Rigid Pavement)

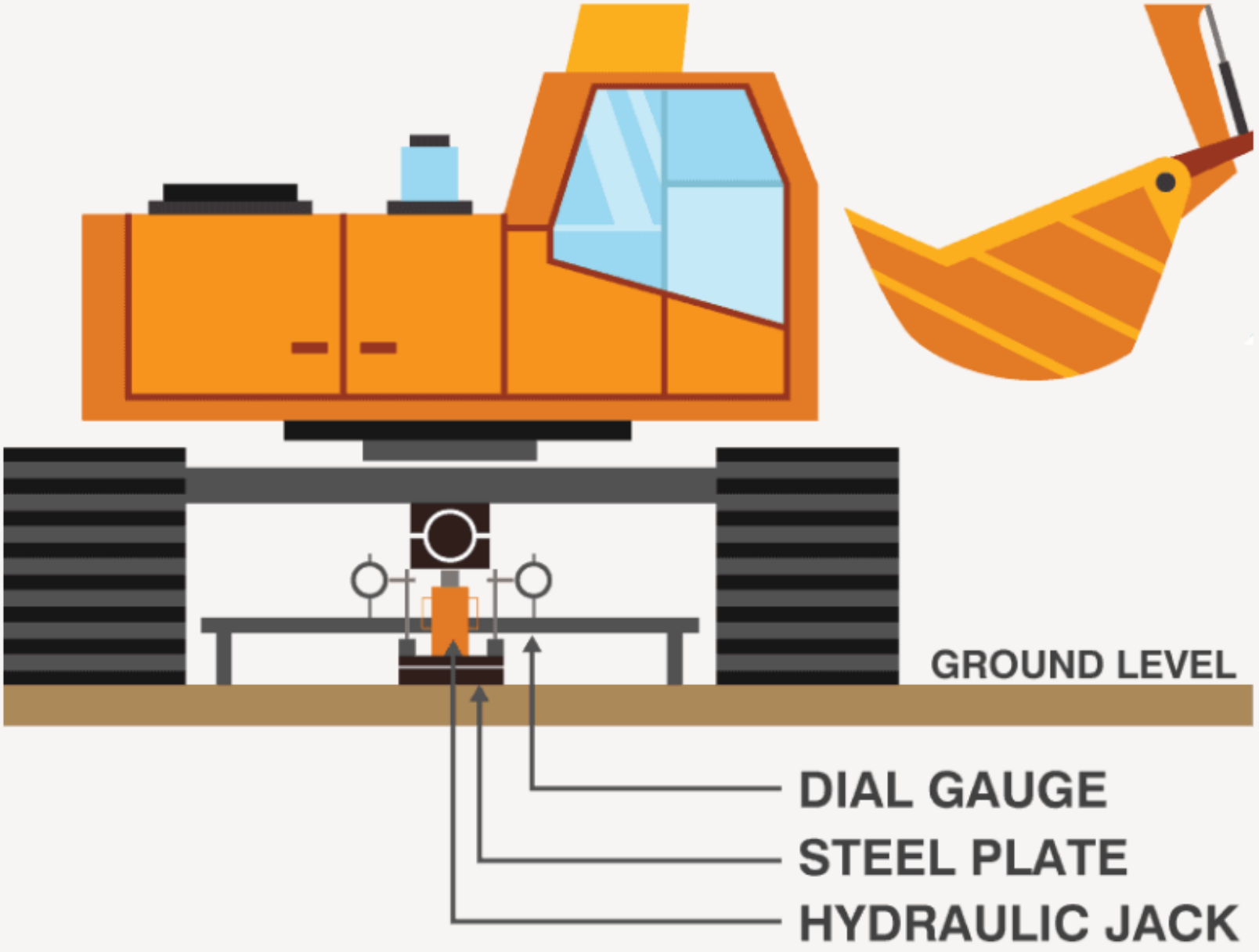
ความแข็งแรงของดินฐานราก

- ความแข็งแรงของดินฐานรากบริเวณพื้นที่โครงการ หรือกำลังรับน้ำหนักของดินคันทางเดิม หรือพื้นทางเดิม คือความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกของดิน
- สามารถทำการทดสอบได้หลายวิธี เช่น Plate Bearing Test, CBR Test หรือ Modulus of Subgrade Reaction
- การออกแบบในประเทศไทยนิยมใช้ค่า CBR มาเป็นค่ากำหนดกำลังรับน้ำหนักของดินคันทางเดิม โดยการเจาะสำรวจดินในสายทางมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการ เพื่อหาค่า CBR ของดินคันทางเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบ

Plate Bearing Test

มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบกำลังรับน้ำหนักของโครงสร้างที่รองรับด้วยพื้นดิน โดยที่ดินไม่เกิดการทรุดตัวหรือการทรุดตัวดังกล่าว ต้องไม่เกินเกณฑ์ที่กำหนดไว้ ตามมาตรฐาน ASTM D 1194 – 94 (Standard Test Method for Bearing Capacity of Soil for Static Load and Spread Footings)

- เครื่องมือทดสอบ
  - รถบรรทุก
  - ชุดแม่แรงไฮดรอลิค ขนาด 10 ตัน ชุดแผ่นเหล็ก ขนาด Ø 0.35 ม.และขนาดสี่เหลี่ยม 0.35×0.35 ม.
  - เครื่องวัดการทรุด จำนวน 4 ชุด มีความละเอียด 0.01 มม.
  - คานเหล็กรูปพรรณ
  - กล้องระดับ


GROUND LEVEL
DIAL GAUGE
STEEL PLATE
HYDRAULIC JACK

การติดตั้งเครื่องมือทดสอบ

- ขุดหลุมทดสอบ ทำการขุดเปิดหลุมทดสอบโดยให้มีความลึกเท่ากับที่กำหนดไว้ เพื่อทำการทดสอบ Plate bearing test. เตรียมพื้นที่ทดสอบบนชั้นดินเดิม ให้เรียบและได้ระดับ
- ติดตั้งแผ่นเหล็กและเครื่องมือวัด วางแผ่นเหล็กทดสอบตรงศูนย์กลางบริเวณที่ต้องการทดสอบและติดตั้งเครื่องมือวัดการทรุดตัว Dial Gauge ไว้บนแผ่นเหล็ก
- ติดตั้งน้ำหนักบรรทุก การถอยรถบรรทุกให้กึ่งกลางเพลาอยู่บนกึ่งกลางแผ่นเหล็กติดตั้งแม่แรงไฮดรอลิคบนแผ่นเหล็กโดยให้แกนอยู่กึ่งกลางเพลารถยนต์พอดี
- การเพิ่มน้ำหนักบรรทุก เพิ่มน้ำหนักบรรทุกทดสอบ โดยทำการบันทึกค่าการทรุดตัวของ Dial Gauge ทุกๆ เวลา ในแต่ละขั้นของการเพิ่มและลดน้ำหนักบรรทุก

การทดสอบ CBR. (California Bearing Ratio)

เป็นการทดสอบเพื่อหาค่าเปรียบเทียบค่าความสามารถในการรับน้ำหนัก (Bearing Value) กับวัสดุหินมาตรฐานเพื่อทดสอบวัสดุมวลรวมดิน (Soil Aggregate) หินคลุกหรือวัสดุอื่นใด เมื่อทำการบดอัดวัสดุนั้นในแบบบดอัด (Mold) โดยใช้ค่าความชื้นที่ให้ค่าความแน่นแห้งสูงสุด (Optimum Moisture Content) เพื่อนำมาใช้ออกแบบโครงสร้างของถนน และเพื่อใช้ควบคุมงาน เมื่อบดอัดให้ได้ความแน่นและความชื้นตามต้องการ

การทดสอบ ซี.บี.อาร์. อาจทำ ได้ 2 วิธี คือ

- วิธี ก. การทดสอบแบบแช่น้ำ (Soaked)
- วิธี ข. การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ (Unsoaked)

การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ

- แบบสำหรับเตรียมตัวอย่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 6.0 นิ้ว สูง 7.0 นิ้ว พร้อมปลอก (Collar) สูงโดยประมาณ (2.0 นิ้ว) และฐานแบบ (Base Plate) สำหรับยึดแบบและปลอก
- ชั่งตัวอย่างแห้งประมาณ 6,000 กรัม สำหรับการทดสอบ 1 ตัวอย่าง ทดสอบ 3 ตัวอย่าง
- กระทุ้งดินอัดแน่นในแบบ จำนวน 3 ชั้น หรือ 5 ชั้น ตามวิธีการทดสอบความแน่นที่ปริมาณความชื้นที่ความแน่นแห้งสูงสุด
- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนัก (Surcharge) จำนวน 2 ชิ้น สำหรับวัสดุพื้นทาง วัสดุรองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก และจำนวน 3 ชิ้น สำหรับวัสดุคันทางทับบนดินตัวอย่างในแบบ

การทดสอบแบบไม่แช่น้ำ

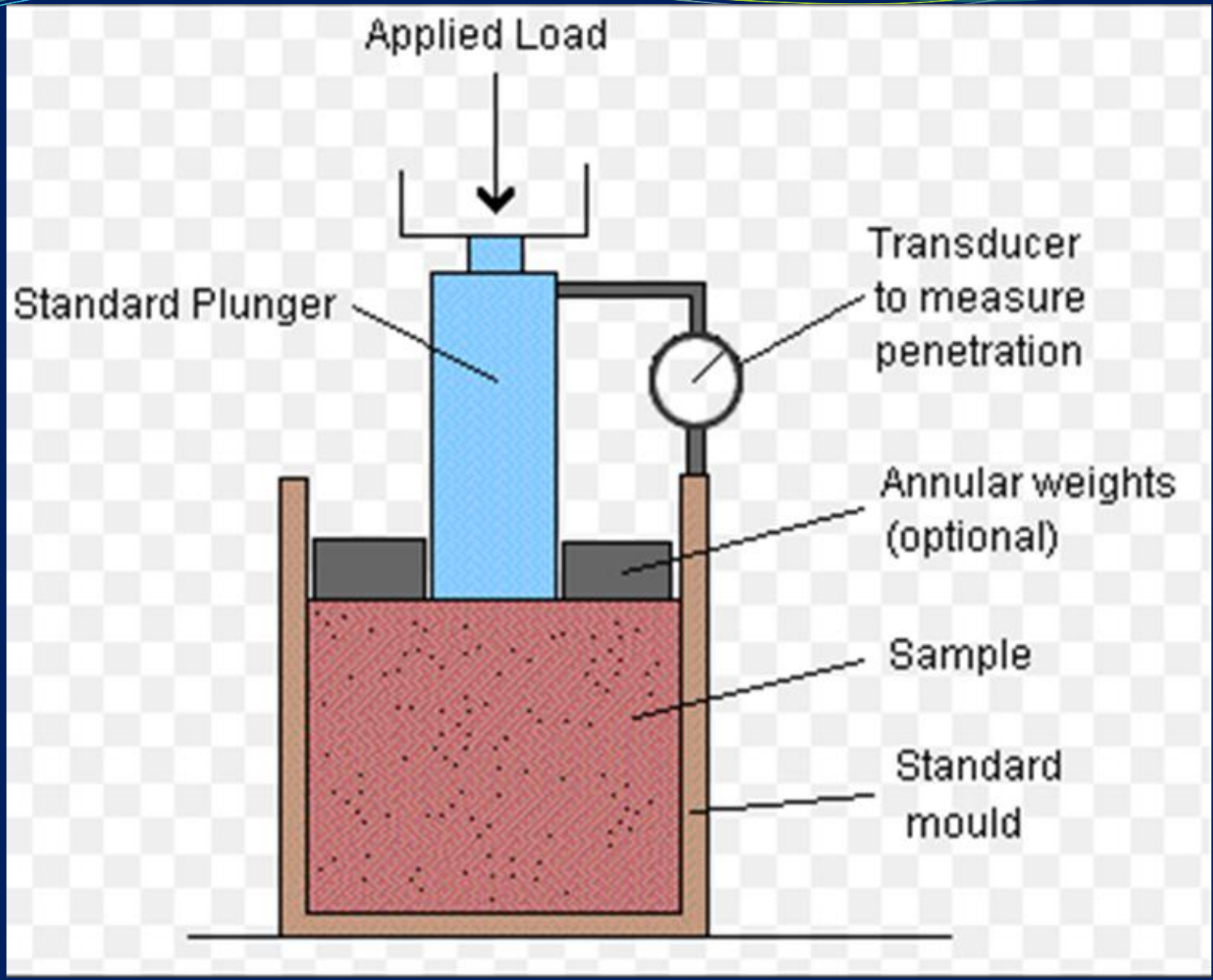
- นำแบบเข้าเครื่องกดทดสอบ ซึ่งมีท่อนกดขนาดพื้นที่หน้าตัด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) ประกอบติดอยู่ จัดให้ผิวหน้าของดินในแบบ แตะสัมผัสกับท่อนกดดังกล่าว จัดเข็มของมาตรวัดที่จะใช้วัดค่าการจมตัว (Penetration) ให้อยู่ที่จุดศูนย์
- กดท่อนกดในอัตรา 0.05 นิ้วต่อนาที พร้อมกับอ่านค่าน้ำหนักที่ตรงกับค่าการจมตัว 0, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100, 0.125, 0.150, 0.175, 0.200, 0.250, 0.300, 0.350, 0.400, 0.450 และ 0.500 นิ้ว
- เสร็จแล้วถอดแบบออกจากเครื่องกดทดสอบ เก็บตัวอย่างดินตรงกลางตามแนวตั้งประมาณ 100 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 4.75 มม.หรือประมาณ 300 กรัม สำหรับขนาดเม็ดใหญ่สุด 19.0 มม. แล้วนำไปหาความชื้น

การทดสอบแบบแช่น้ำ

- วางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักจำนวน 2 ชิ้น สำหรับวัสดุพื้นทาง วัสดุรองพื้นทาง วัสดุคัดเลือก และจำนวน 3 ชิ้น สำหรับวัสดุคันทางลงบนดินตัวอย่าง ใส่แผ่นวัดการพองตัว สำหรับวัดอัตราการบวมของดิน ซึ่งมีด้ามขันเกลียวขึ้นลงได้ติดอยู่กลางแผ่น ก่อนวางแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักลงบนดินตัวอย่าง จะต้องเอากระดาษรองวางคั่นใต้แผ่นนี้เสียก่อน เพื่อป้องกันไม่ให้ดินติดแน่นกับแผ่นเหล็กหลังจากแช่น้ำแล้ว
- แช่แบบที่เตรียมไว้ในภาชนะที่เตรียมไว้ ให้น้ำท่วมแผ่นเหล็กถ่วงน้ำหนักประมาณ 1 นิ้ว ใช้มาตรวัดอ่านได้ละเอียด 0.001 นิ้ว ยึดติดกับสามขา แล้ววางบนปากแบบ จัดให้ปลายของมาตรวัดแตะสัมผัสกับก้านของแผ่นวัดการบวมตัว เพื่อวัดหาค่าการบวมตัวของดิน
- จดค่าการขยายตัวจากมาตรวัดทุกวัน จนครบ 4 วัน (ถ้าหากค่าการบวมตัวคงที่ อาจหยุดอ่านได้ หลังจากแช่น้ำแล้ว 48 ชั่วโมง)

คำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์. ในการคำนวณหาค่า ซี.บี.อาร์. ให้ถือน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load) ดังนี้

ค่าการจมตัว มิลลิเมตร	น้ำหนักมาตรฐาน (Standard Load) กิโลกรัม	ค่าน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load) กิโลกรัมต่อตาราง เซนติเมตร
2.54 (0.1”)	1,360.8 (3,000 lb)	70.3 (1,000 lb/in^2)
5.08 (0.2”)	2,041.2 (4,500 lb)	105.46 (1,500 lb/in^2)
7.62 (0.3”)	2,585.5 (5,700 lb)	133.59 (1,900 lb/in^2)
10.16 (0.4”)	3,129.8 (6,900 lb)	161.71 (2,300 lb/in2)
12.70 (0.5”)	3,538.0 (7,800 lb)	182.81 (2,600 lb/in^2)


Applied Load
Standard Plunger
Transducer
to measure
penetration
Annular weights
(optional)
Sample
Standard
mould

การรายงานผล

- ค่า ซี.บี.อาร์.ที่ได้จากการปรับค่าหรือที่ได้จริงจากการอ่านค่าน้ำหนักมาตรฐาน (True Load Value) ซึ่งคำนวณ จากค่าการจมตัวที่ 2.54 มม. (0.1 นิ้ว) และที่ค่าการจมตัว 5.08 มม. (0.2 นิ้ว) เป็นค่า ซี.บี.อาร์.ที่ใช้รายงาน
- โดยปกติค่าซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 2.54 มม. จะต้องมีค่าสูงกว่าค่า ซี.บี.อาร์. ที่มีค่าการจมตัว 5.08 มม.
- ถ้าหากไม่เป็นดังนั้น คือค่า ซี.บี.อาร์. ที่ 5.08 มม. สูงกว่าที่ 2.54 มม. ให้ทำการเตรียมตัวอย่างเพื่อทำการทดสอบ ใหม่ทั้งหมด แต่ถ้าค่า ซี.บี.อาร์. ที่ได้ยังคงสูงกว่าอีก ให้ใช้ค่า ซี.บี.อาร์. ที่ 5.08 มม

การคำนวณ

พื้นที่หน้าตัดของท่อนกด 1,935.5 ตร.มม. (3 ตร.นิ้ว) คำ นวณค่า ซี.บี.อาร์. จากสูตร

ซี.บี.อาร์. ร้อยละ = 100(x/y)

เมื่อ x = ค่าน้ำหนักที่อ่านได้ต่อหน่วยพื้นที่ของท่อนกด

(สำหรับค่าการจมตัวที่ 2.54 มม.หรือ 0.1 นิ้ว และที่เพิ่มขึ้นอีกทุกๆ 2.54 มม.)

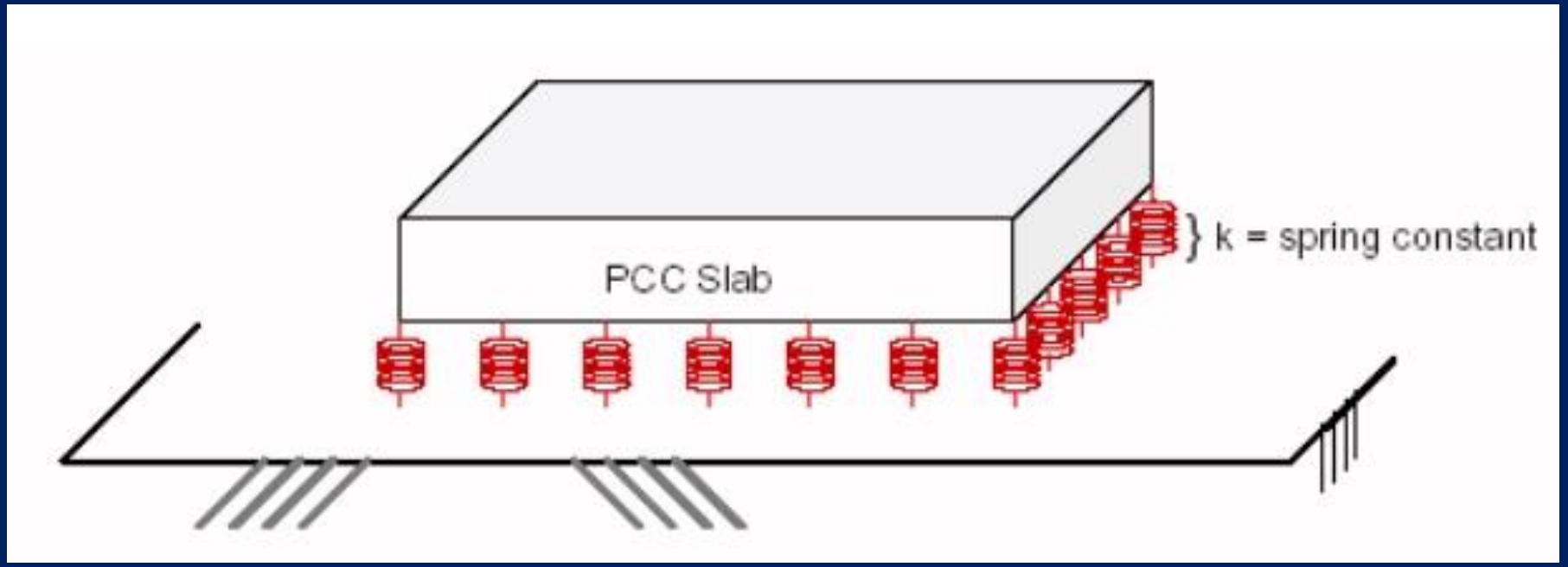
y = ค่าน้ำหนักมาตรฐาน (Standard Unit Load) กก./ตร.ซม.

(อ้างอิงจากตารางข้างต้น)

Modulus of Subgrade Reaction

- The modulus of subgrade reaction (k) is used as a primary input for rigid pavement design. It estimates the support of the layers below a rigid pavement surface course (the PCC slab). The k-value can be determined by field tests or by correlation with other tests. There is no direct laboratory procedure for determining k-value.
- The modulus of subgrade reaction came about because work done by Westergaard during the 1920s developed the k-value as a spring constant to model the support beneath the slab (Figure 1).

Figure 1. Modulus of subgrade reaction (k).



Modulus of subgrade reaction (k)

- The reactive pressure to resist a load is thus proportional to the spring deflection (which is a representation of slab deflection) and k (Figure 2):

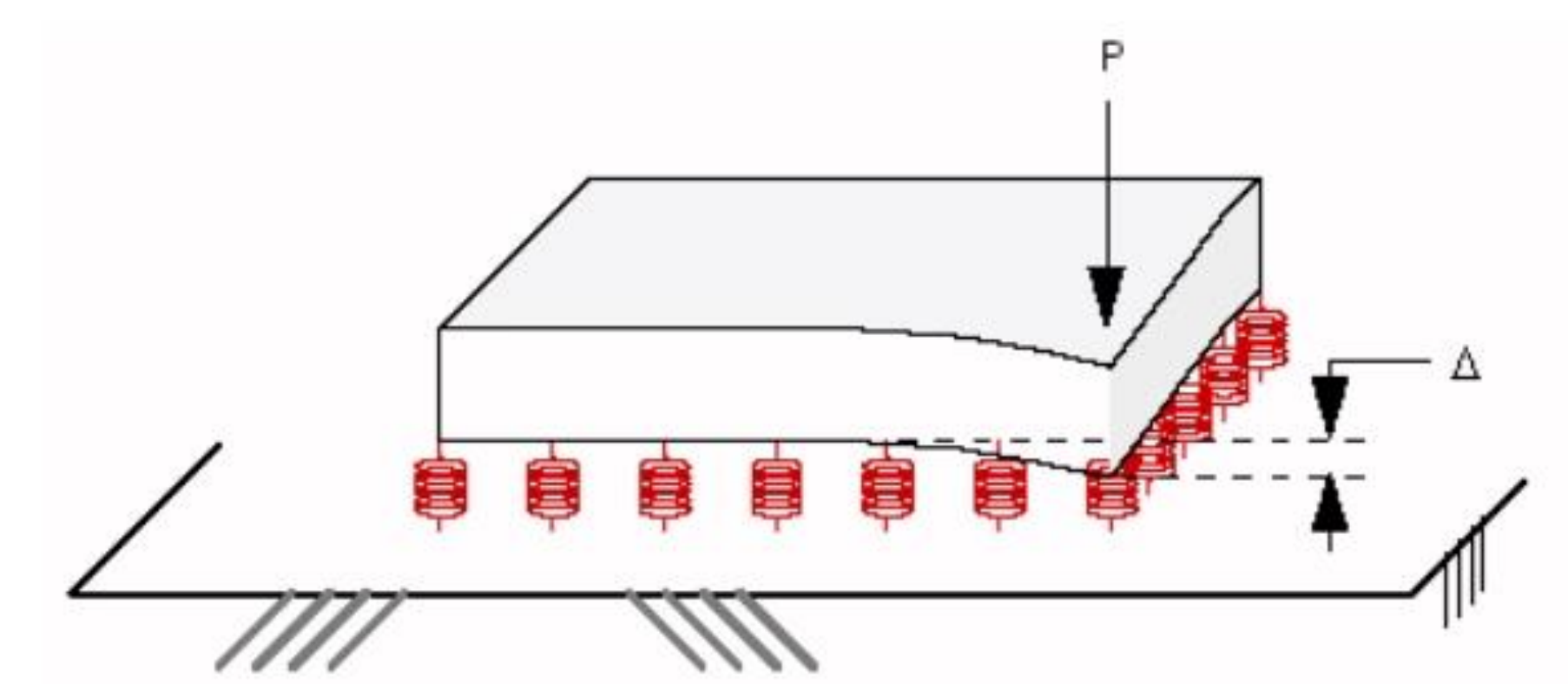
$$P = k\Delta$$

where: P = reactive pressure to support deflected slab

k = spring constant = modulus of subgrade reaction

Δ = slab deflection

Figure 2. Relation of load, deflection and modulus of subgrade reaction (k).



Modulus of subgrade reaction (k)

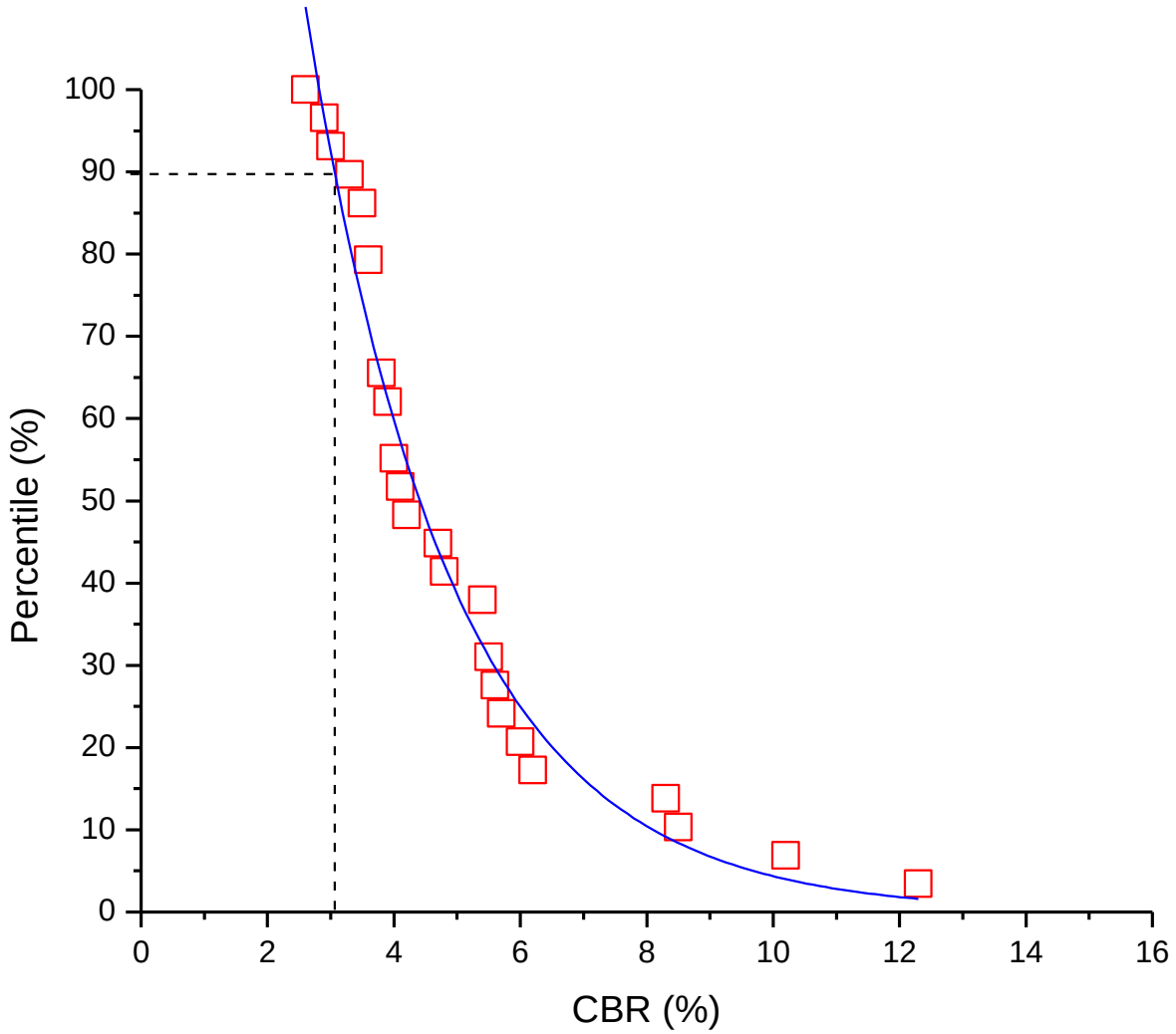
- The k value is in terms of MPa/m (pounds per square inch per inch of deflection, or pounds per cubic inch – pci) and ranges from about 13.5 MPa/m (50 pci) for weak support to over 270 MPa/m (1000 pci) for strong support. Typically, the modulus of subgrade reaction is estimated from other strength/stiffness tests, however, in situ values can be measured using the plate bearing test.
- Related Tests Plate Load Test

ความแข็งแรงของดินฐานราก

- จากผลการทดสอบค่า CBR ของตัวอย่างดินฐานรากตามแนวสายทาง ต้องนำมาหาค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ ที่ร้อยละ 90 ของค่าทั้งหมด
- ดังตัวอย่างจะมีค่า CBR เท่ากับ 3.01 % ซึ่งจะพิจารณาใช้ค่า CBR = 3 % มาใช้ในการออกแบบโครงสร้างชั้นทาง ดังตัวอย่างแสดงใน**ตารางที่ 2-1** และ**รูปที่ 2-1**

ตารางที่ 2-1 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ และค่า CBR ของตัวอย่างดินฐานรากตามแนวสายทาง

Percentile	CBR (%)	Percentile	CBR (%)
100.00	2.6	41.38	4.8
96.55	2.9	37.93	5.4
93.10	3	31.03	5.5
89.66	3.3	27.59	5.6
86.21	3.5	24.14	5.7
79.31	3.6	20.69	6
65.52	3.8	17.24	6.2
62.07	3.9	13.79	8.3
55.17	4	10.34	8.5
51.72	4.1	6.90	10.2
48.28	4.2	3.45	12.3
44.83	4.7		



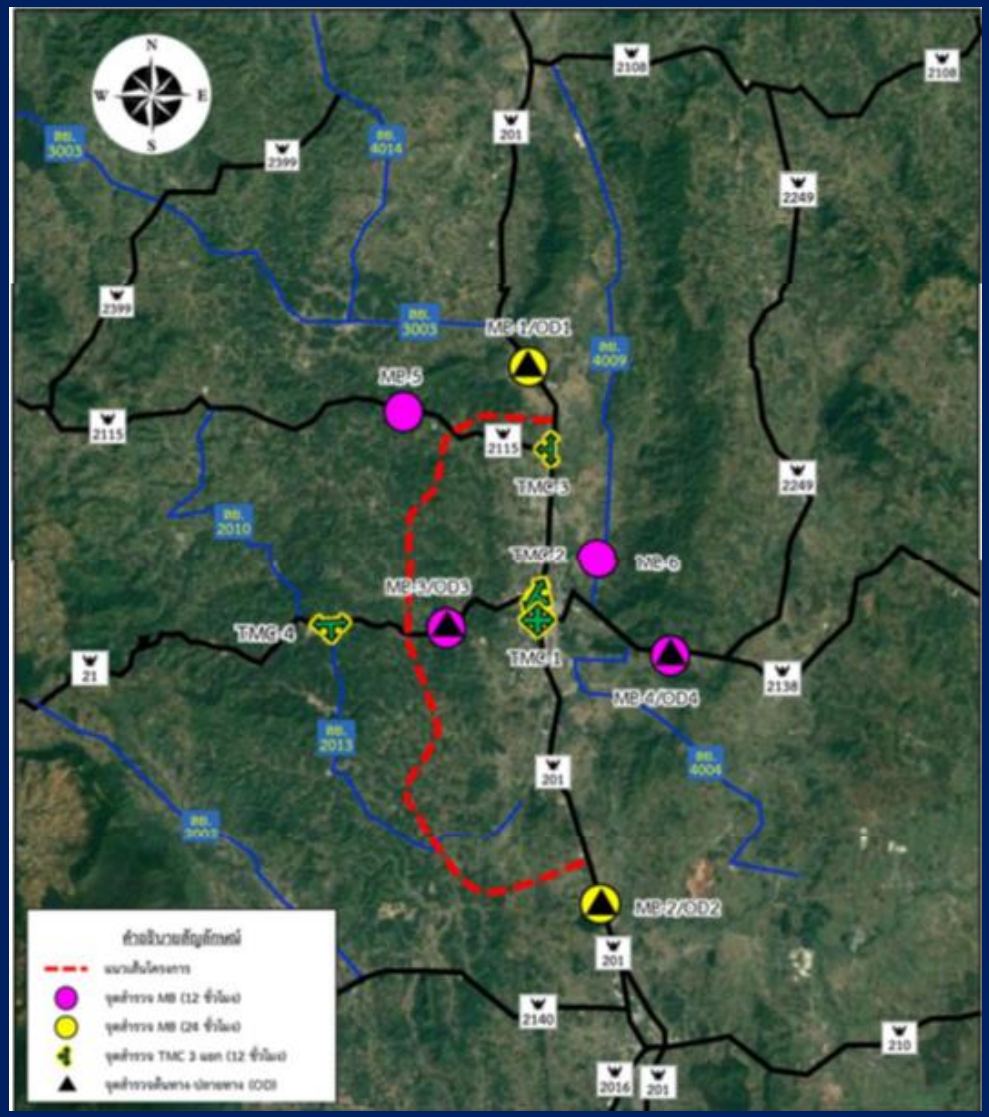
รูปที่ 2-1 ค่าร้อยละ CBR ที่เปอร์เซ็นต์ไทล์ ร้อยละ 90

การวิเคราะห์ปริมาณจราจรออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

2.3.1 การสำรวจและวิเคราะห์ปริมาณการจราจร

- พิจารณาจากรายงานสำรวจและคาดการณ์ปริมาณจราจรและวิเคราะห์ระดับการให้บริการเบื้องต้น ประกอบด้วยปริมาณจราจรของยวดยานทุกประเภท
- นำข้อมูลการสำรวจปริมาณจราจรต่อวัน Average Daily Traffic (ADT) ที่มีปริมาณการจราจรต่อวันสูงสุด (ช่วงที่ 2) ดังตารางที่ 2.2 มาวิเคราะห์ เพื่อจำแนกเฉพาะรถบรรทุกหนักที่มีอำนาจการทำลายผิวทาง อาทิ รถโดยสารขนาดกลาง ขนาดใหญ่ รถบรรทุก 6 ล้อ รถบรรทุก 10 ล้อ รถบรรทุกพ่วง และรถบรรทุกกึ่งพ่วง โดยคาดการณ์ปริมาณจราจรของยานพาหนะหนัก ในปีเปิดใช้งาน สมมติว่าเป็นปี พ.ศ. 2573 สามารถแสดงได้ในตารางที่ 2-3

แผนภาพแสดงจุดตำแหน่งการสำรวจปริมาณจราจร



ตารางที่ 2-2 ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน (ADT) ในปีเปิดใช้งาน

จุดสำรวจ	การวิเคราะห์ปริมาณการจราจรเฉลี่ยต่อวัน (ADT, คัน/วัน)
1	9,930
2	11,090
3	10,818

จุดสำรวจที่ 2 มีปริมาณจราจรสูงสุด จึงนำข้อมูลจากจุดที่ 2 มาวิเคราะห์ปริมาณจราจร แสดงดังตารางที่ 2.3

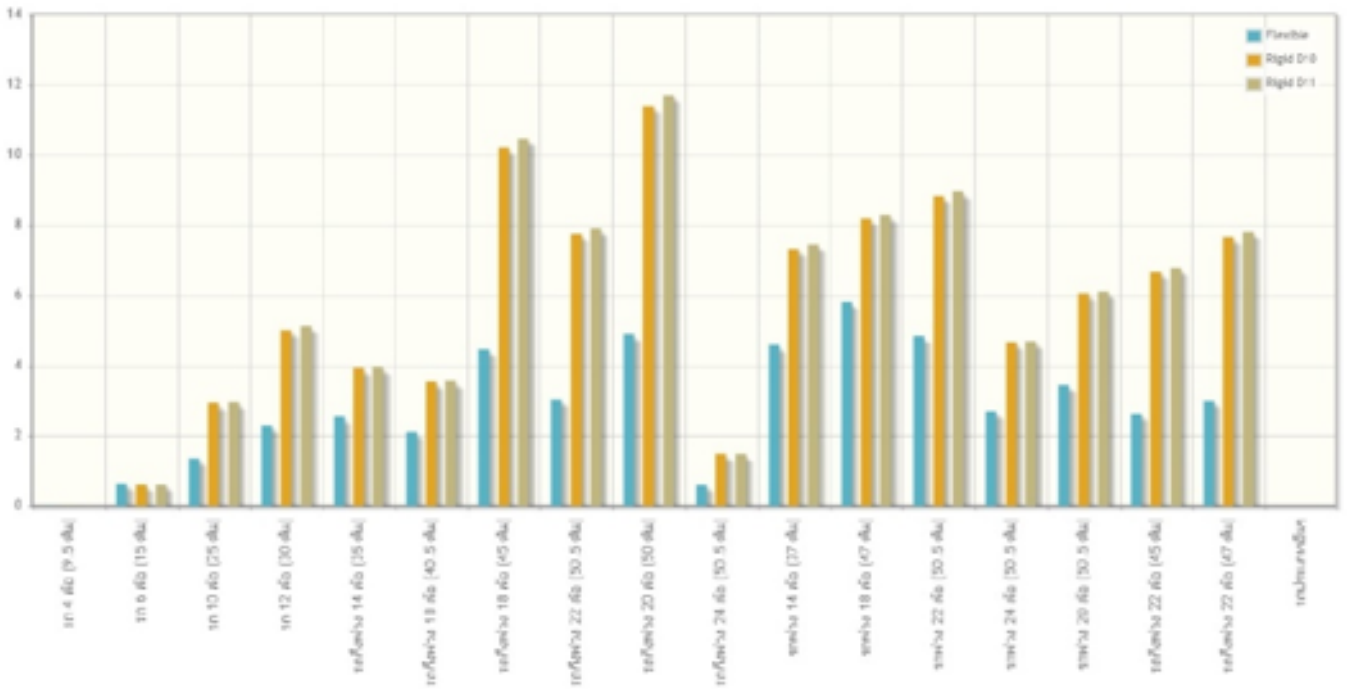
2.3.2 ปริมาณการจราจร

- คำนวณปริมาณเพลาเดี่ยวเทียบเท่า (ESAL) จากผลสำรวจจุดที่มีปริมาณการจราจรเฉพาะรถบรรทุกหนักมากที่สุด ดังตารางที่ 2-3 (จุดสำรวจที่ 2 เท่ากับ 379 คันต่อวัน) ในปีเปิดใช้งาน
- ในการคำนวณ ESAL ต้องใช้ Truck Factor
- ในกรณีสายทางใหม่ใช้ข้อมูลจากสถานีตรวจสอบน้ำหนักที่อยู่ใกล้เคียง สำหรับกรณีขยายสายทางเดิมใช้ข้อมูลจากด่านชั่งน้ำหนักในสายทางนั้น
- ดังแสดงในรูปที่ 2-2 และตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2-3 ปริมาณจราจรของยานพาหนะหนัก ในปีเปิดใช้งาน

จุดสำรวจ	ปริมาณยานพาหนะหนัก (คัน/วัน)						
	รถโดยสาร ขนาดกลาง (MB)	รถโดยสาร ขนาดใหญ่ (HB)	รถบรรทุก 6 ล้อ (MT)	รถบรรทุก 10 ล้อ (HT)	รถบรรทุก พ่วง (TR)	รถบรรทุก กึ่งพ่วง (STR)	รวม
1	5	28	158	55	59	34	339
2	6	31	177	62	65	38	379
3	6	29	166	58	61	36	356

แสดงข้อมูลวันที่ 01 มกราคม 2565 ถึง 31 ธันวาคม 2565 (01 มกราคม 2565 ถึง 31 ธันวาคม 2565)



	จำนวนรถ (คัน)	ผลรวม ESAL	Truck Factor
Flexible pavement	23,307	63,269.84	2.71
Rigid pavement D 10	23,307	124,503.86	5.34
Rigid pavement D 11	23,307	126,541.21	5.43

รูปที่ 2-2 รายงานน้ำหนักลงเพลาเทียบเท่าน้ำหนักมาตรฐาน จากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก

2.3.3 ค่า Truck Factor

- ข้อมูลสำหรับคำนวณหาค่า Truck Factor ได้จาก สถานีตรวจสอบน้ำหนักในช่วงเวลาขณะออกแบบ เช่นข้อมูล (ขาเข้า) ข้อมูลวันที่ 01 มกราคม 2565 ถึง 31 ธันวาคม 2565 โดยกำหนด Structural Number (SN) เท่ากับ 5 และสภาพการให้บริการได้ (Pt) เท่ากับ 2.5
- เป็นข้อมูลในปีที่เก็บข้อมูล

ตัวเลขเชิงโครงสร้าง (SN) คืออะไร

- ในการออกแบบและก่อสร้างผิวทาง บางครั้งเราถือว่าการก่อสร้างผิวทางให้หนาขึ้นจะทำให้ผิวทางแข็งแรงขึ้นด้วย แต่จะต้องหนาเท่าไรจึงจะเพียงพอ คำถามสำคัญประการหนึ่งในการออกแบบโครงสร้างเผิวทางแอสฟัลต์คือโครงสร้างแต่ละชั้นควรมีความหนาเท่าใด

- ในระหว่างการออกแบบ ความหนาเหล่านี้เกี่ยวข้องกับค่า Structural Number (SN) ซึ่งเป็นค่านามธรรมที่แสดงถึงความแข็งแรงเชิงโครงสร้างของผิวทางโดยรวม เราจะตรวจสอบแนวคิดของ Structural Number และบทบาทของแนวคิดนี้ในการออกแบบ

หน้าที่ของตัวเลขเชิงโครงสร้าง

- โดยทั่วไป การออกแบบผิวทางต้องอาศัยการคำนวณทางวิศวกรรมที่อิงจากสมการการออกแบบที่กำหนดไว้ เช่น สมการเชิงประจักษ์ในคู่มือการออกแบบโครงสร้างทางเท้าของ AASHTO ปี 1993
- องค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งของสมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นคือ ตัวเลขเชิงโครงสร้าง (SN) ซึ่งแสดงถึงความต้องการเชิงโครงสร้างโดยรวมที่จำเป็นเพื่อรองรับน้ำหนักการจราจรที่คาดการณ์ไว้ในการออกแบบ
- จำนวนตัวเลขเชิงโครงสร้างที่ต้องการขึ้นอยู่กับการผสมผสานกันระหว่างการรองรับดินที่มีอยู่ (Soil support) ปริมาณการจราจรทั้งหมด ความสามารถในการให้บริการของผิวทาง และสภาวะแวดล้อม

สมการออกแบบผิวทางแบบยืดหยุ่นของ AASHTO ตัวเลขเชิงโครงสร้างคือ SN

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R \times S_o + 9.36 \times \log_{10}(SN+1) - 0.20 + \frac{\log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 \times \log_{10}(M_R) - 8.07$$

สมการออกแบบสามารถใช้ได้หลายแนวทาง ขึ้นอยู่กับค่าป้อนเข้าที่มี โดยนำสมการเหล่านี้มาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าตัวเลขเชิงโครงสร้าง (SN) เมื่อหาตัวเลขเชิงโครงสร้างได้ ก็จะสามารถหาความหนาที่เหมาะสมของผิวทางแต่ละชั้นได้

ความสัมพันธ์กับชั้นทาง

- ตัวเลขเชิงโครงสร้าง (SN) เป็นค่าที่นำมาใช้กับโครงสร้างผิวทางทั้งหมด แต่เพื่อให้การออกแบบเสร็จสมบูรณ์ เรายังต้องคำนวณค่านี้จากความหนาของแต่ละชั้น ซึ่งหาได้จากสูตรดังแสดงด้านล่างนี้:

$$SN = a_1D_1 + a_2D_2M_2 + a_3D_3M_3 + \ldots..$$

- สูตรแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโครงสร้างกับลักษณะของชั้นผิวทาง สูตรนี้สามารถนำไปปรับใช้กับชั้นผิวทางจำนวนเท่าใดก็ได้

ความสัมพันธ์กับชั้นทาง

- เนื่องจากนิพจน์แต่ละนิพจน์ (เช่น $a_2D_2M_2$) ในสูตรจะสอดคล้องกับชั้นทางชั้นเดียว ดังนั้นตัวแปรในนิพจน์จึงสอดคล้องกับลักษณะของชั้นทางนั้น หมายเลขดัชนีที่ใช้ในนิพจน์จะระบุว่าหมายถึงชั้นใด โดยหมายเลขจะเริ่มต้นที่ชั้นบนสุดของโครงสร้างผิวเท้า
- ตัวแปรต่าง ๆ มีความหมายดังนี้ :

  a = ค่าสัมประสิทธิ์ชั้นทางที่แสดงถึงความแข็งแรงสัมพัทธ์ของวัสดุ

  D = ความหนาชั้นทางเป็นนิ้ว

  M = ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำ

ความสัมพันธ์กับชั้นทาง

- สัมประสิทธิ์ของชั้นทาง และสัมประสิทธิ์การระบายน้ำเป็นค่าที่ควรจะสะท้อนถึงลักษณะของวัสดุที่ใช้ในการสร้างชั้นผิวทาง ความหนาของชั้นทางแต่ละชั้นนั้นขึ้นอยู่กับสมการการออกแบบและหมายเลขโครงสร้างที่ใช้ในการคำนวณ
- เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทางแสดงถึงความแข็งแรงของวัสดุ ค่านี้จึงเป็นตัวแปรหลักในการพิจารณาประเภทของวัสดุที่ได้วางแผนที่จะใช้สำหรับชั้นทางแต่ละชั้น

สัมประสิทธิ์ของชั้นทาง

- เพื่อวัตถุประสงค์ในการออกแบบ ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทางจะถูกกำหนดขึ้นโดยอาศัยประสบการณ์จริงโดยอิงตามประสิทธิภาพของวัสดุ หน่วยงานต่างๆ มักกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทางขึ้นเฉพาะสำหรับวัสดุที่ใช้กันทั่วไปเป็นนโยบายการออกแบบมาตรฐาน ค่าสัมประสิทธิ์ของชั้นทั่วไปบางค่าได้แก่:

- แอสฟัลต์ผสมร้อน (Hot mix asphalt) – 0.44
- ผสมบนถนน (เสถียรภาพต่ำ) – 0.20
- พื้นทางมวลรวม – 0.13
- ดินถม – 0.10

สัมประสิทธิ์ของชั้นทาง

- เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ชั้นทางอาจได้รับผลกระทบจากคุณสมบัติของวัสดุ และตำแหน่งของชั้นที่วัสดุจะถูกใช้ ในบางกรณีค่าที่แตกต่างกันอาจเหมาะสมกับสภาพแวดล้อมในท้องถิ่น

สัมประสิทธิ์การระบายน้ำ (Drainage Coefficient)

- ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำคือค่าที่กำหนดให้กับชั้นผิวทางซึ่งแสดงถึงการสูญเสียความแข็งแรงสัมพัทธ์เนื่องจากลักษณะการระบายน้ำและการสัมผัสกับความชื้น
- ชั้นทางที่ระบายน้ำช้าหรืออิ่มตัวบ่อยครั้งจะมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่ต่ำกว่า ในขณะที่ชั้นที่ระบายน้ำได้อย่างรวดเร็วและแทบจะไม่เคยอิ่มตัวเลยจะมีค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำที่สูงกว่า
- สำหรับการออกแบบผิวทางส่วนใหญ่ อาจเป็นวิธีที่ง่ายและดีที่สุดในการกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำให้เท่ากับ 1 ซึ่งระบุลักษณะการระบายน้ำปกติ

ดัชนีการให้บริการได้ปัจจุบัน (Present Serviceability Index)

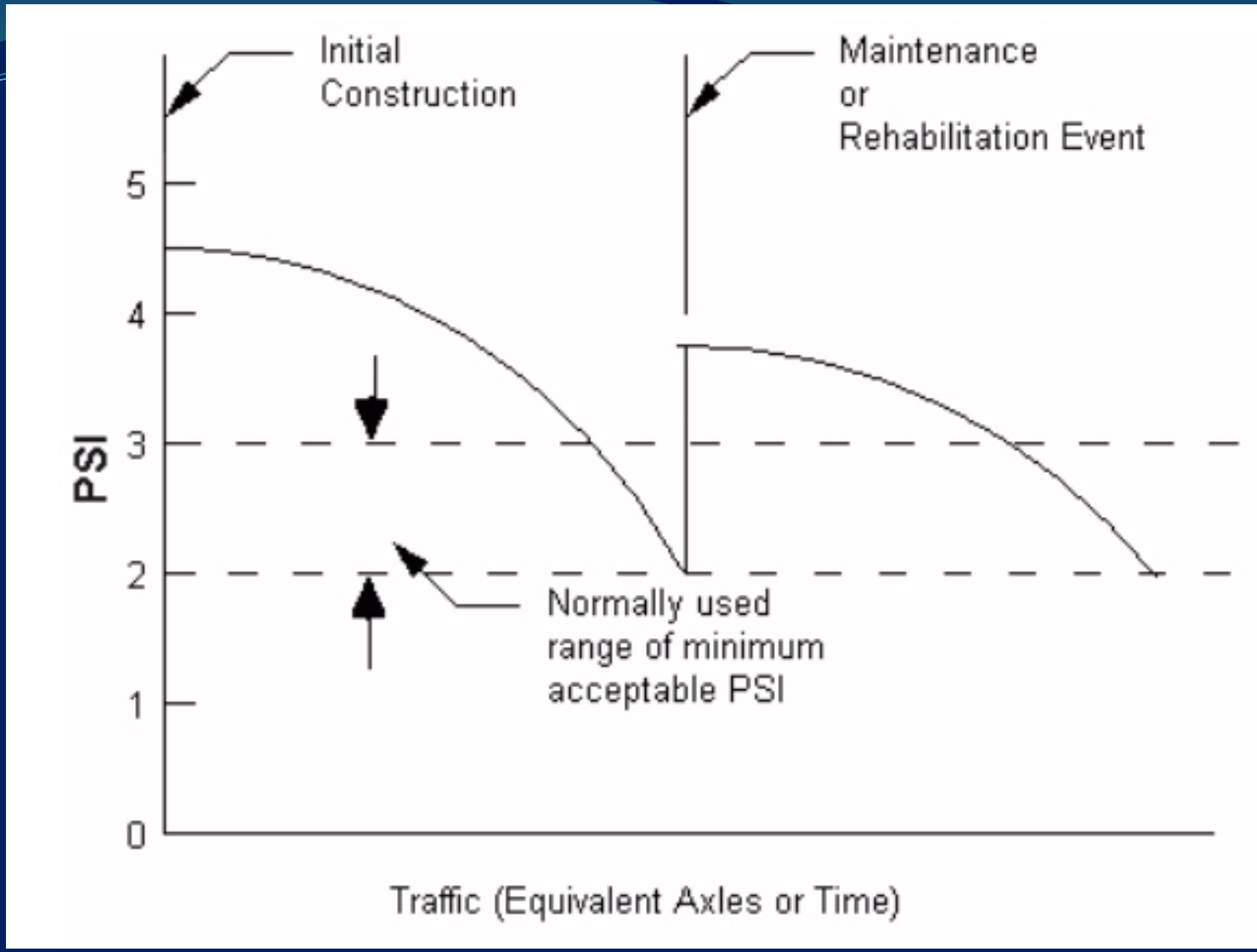
- ดัชนีความสามารถในการให้บริการ (PSI) ในปัจจุบันมีพื้นฐานมาจากดัชนี PSR ของการทดสอบบนถนนของ AASHO ดั้งเดิม PSR เป็นระดับคุณภาพการขับขี่ที่ต้องมีคณะผู้สังเกตการณ์ขับขี่รถยนต์บนถนนลาดยางที่ต้องการทราบระดับการให้บริการ
- เนื่องจากระดับคะแนนประเภทนี้ไม่เหมาะสำหรับเครือข่ายถนนลาดยางขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนไปใช้ระบบที่ไม่ใช้ผู้สังเกตการณ์

ดัชนีการให้บริการได้ปัจจุบัน (Present Serviceability Index)

- ในการเปลี่ยนจากการวัดความสามารถในการให้บริการ PSR (มีผู้ประเมิน) ไปเป็นการวัดความสามารถในการให้บริการ PSI (ไม่มีผู้ประเมิน) ตั้งแต่ปีพ.ศ. 2501 ถึงปีพ.ศ. 2503 คณะผู้ประเมินได้จัดอันดับถนนต่างๆ ในรัฐอิลลินอยส์ มินนิโซตา และอินเดียนาสำหรับ PSR
- จากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำไปเชื่อมโยงกับการวัดผิวทาง (เช่น ความแปรปรวนของความลาดชัน (โปรไฟล์) รอยแตกร้าว เป็นต้น) เพื่อพัฒนาสมการ PSI นอกจากนี้ ผู้ประเมินยังถูกขอให้แสดงความคิดเห็นว่าผิวเท้าเฉพาะที่ประเมินสำหรับ PSR นั้น "ยอมรับได้" หรือ "ยอมรับไม่ได้" ในฐานะทางหลวงหลัก (ดู PSR)

ดัชนีการให้บริการได้ในปัจจุบัน (Present Serviceability Index)

- แม้ว่า PSI จะใช้ระบบการให้คะแนน 5 ระดับเช่นเดียวกับ PSR แต่ก็ไม่ได้เป็นเพียงการประเมินคุณภาพการขับขี่แบบง่ายๆ เท่านั้น โดยผู้ให้คะแนนประมาณครึ่งหนึ่งเห็นว่าค่า PSR 3.0 ถือว่ายอมรับได้ และค่า PSR 2.5 ถือว่ายอมรับไม่ได้
- ข้อมูลดังกล่าวมีประโยชน์ในการเลือกอินพุตการออกแบบความสามารถในการให้บริการ (PSI) "ขั้นสุดท้าย" (หรือถนนเสียหาย) สำหรับสมการการออกแบบโครงสร้างเชิงประจักษ์ ที่น่าสนใจคือ ความคิดเห็นของผู้ประเมินการทดสอบบนถนนของ AASHO ดั้งเดิมนั้นอิงตามพลวัตการขับขี่รถ ไม่ชัดเจนว่าระดับดังกล่าวเป็นที่ยอมรับสำหรับรถบรรทุกหรือไม่
- ประสิทธิภาพของผิวทางสามารถกำหนดได้ดังนี้ "แนวโน้มความสามารถในการให้บริการของ ... (ส่วนของผิวทาง) ที่มีการเพิ่มจำนวนเพลามากขึ้น" (Highway Research Board, 1972[1]) รูปที่ 1 แสดงให้เห็นแนวคิดนี้เพิ่มเติม



รูปที่ 1. แนวคิดพฤติกรรมของผิวทางโดยใช้ดัชนีความสามารถการให้บริการได้ปัจจุบัน (PSI) (Hveem และ Carmany, 1948[2])

ตารางที่ 2-4 ค่า Truck Factor จากสถานีตรวจสอบน้ำหนัก

ชนิดผิวทาง	จำนวนรถ (คัน)	ผลรวม ESAL	Truck Factor
ผิวทางลาดยาง	23,307	63,269.84	2.71
ผิวทางคอนกรีต ความหนา 25 ซม.	23,307	124,503.86	5.34
ผิวทางคอนกรีต ความหนา 28 ซม.	23,307	126,541.21	5.43

สมการคำนวณ ESAL ของด่านชั่งในตาราง 2.4

$$ESAL = \sum_{i=1}^{m} EALF_i$$

Flexible pavement SN=5,Pt=2.5

$$EALF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.79\log(18+1) - 4.79\log(L_x + L_2) + 4.33\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.2 - p_t}{4.2 - 1.5}\right)$$

$$\beta_x = 0.40 + \frac{0.081(L_x + L_2)^{3.23}}{(SN+1)^{5.19} L_2^{3.23}}$$

Rigid pavement D= 10,D= 11, Pt=2.5

$$EALF = \frac{W_{t18}}{W_{tx}}$$

$$\log\left(\frac{W_{tx}}{W_{t18}}\right) = 4.62\log(18+1) - 4.62\log(L_x + L_2) + 3.28\log L_2 + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}}$$

$$G_t = \log\left(\frac{4.5 - p_t}{4.5 - 1.5}\right)$$

$$\beta_x = 1.00 + \frac{3.63(L_x + L_2)^{5.20}}{(D+1)^{8.46} L_2^{3.52}}$$

Truck Factor

- จากรูปที่ 2.4 ได้กำหนดค่า Truck Factor จากสถานีตรวจสอบน้ำหนักในพื้นที่ใกล้เคียงสายทางที่ออกแบบ ดังนี้
- กรณีผิวทางแอสฟัลต์ใช้ค่า Truck Factor = 2.71
- กรณีผิวทางคอนกรีตหนา 25 ซม. (10 นิ้ว) ใช้ค่า Truck Factor = 5.34
- กรณีผิวทางคอนกรีตหนา 28 ซม. (11 นิ้ว) ใช้ค่า Truck Factor = 5.43

* Truck Factor = ผลรวม ESAL/จำนวนรถบรรทุกหนัก

2.3.4 จำนวนเที่ยวของน้ำหนักเพลาเดี่ยวเทียบเท่า (Equivalent Single Axle Load, ESAL or W_{18})

- Equivalent Single Axle Load 18 kips (W_{18}) หรือจำนวนเที่ยวมาตรฐาน หมายถึง ปริมาณการจราจรของรถบรรทุกมาตรฐานที่วิ่งผ่านช่องจราจรออกแบบ (Design Lane) ในช่วงระยะเวลาการออกแบบ (Design Period) โดยสามารถคำนวณจาก สมการที่ 2-1 และ ตารางที่ 2-5 และ 2-6

$$W_{18j} = \left\{ \sum_{i=1}^{6} A_i \right\} \times TF \times L \times D \times 365$$

$$W_{18} = \sum_{j=1}^{k=20} W_{18j} \qquad (2.1)$$

(2-1)

2.3.4 จำนวนเที่ยวของเพลาเดี่ยวมาตรฐาน

โดยที่

W_{18} = ผลรวมปริมาณเพลาเดี่ยวมาตรฐานออกแบบขนาด 18 kip ถึงอายุออกแบบ (k) เท่ากับ 20 ปี

W_{18j} = ผลรวมปริมาณเพลาเดี่ยวมาตรฐานออกแบบขนาด 18 kip ณ ปี ใดๆ (j)

TF = Truck Factor พิจารณาตามข้อมูลด่านชั่งน้ำหนักบริเวณพื้นที่โครงการ หรือใกล้เคียง

A_i = ปริมาณรถบรรทุกประเภทที่ i หน่วย คัน/วัน จากข้อมูลการคาดการณ์ปริมาณจราจรของโครงการ (จากตาราง 2.3)

L = Lane Distribution Factor, expressed as a ratio, that accounts for distribution of traffic when two or more lanes are available in one direction ดังตารางที่ 2-5

D = Directional Distribution Factor, expressed as a ratio, that accounts for the distribution of ESAL units by direction, e.g. east-west, north-south, etc., ดังตารางที่ 2-6

ตารางที่ 2-5 Lane Distribution Factor (AASHTO, 1993, II-9)

Numbers of Lanes (one-way)	Lane Distribution Factor
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4 or more	0.50 – 0.75

ตารางที่ 2-6 Percentage of Total Truck Traffic in Design Lane

ทิศทางการจราจร	เปอร์เซ็นต์รถบรรทุกในช่องจราจรออกแบบ
2	50
4	45 (35 – 48)
6 or more	40 (25 – 48)

2.3.4 จำนวนเที่ยวของเพลาเดี่ยวมาตรฐาน

- นำข้อมูลปริมาณการจราจรของจุดสำรวจที่มากที่สุดในปีที่เปิดใช้งาน มาวิเคราะห์เพื่อหาค่าปริมาณเพลาเดี่ยวเทียบเท่าสำหรับใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบความหนาโครงสร้างชั้นทาง โดยใช้สมการ 2.1 สำหรับผิวทางลาดยางและผิวทางคอนกรีตหนา 25 ซม.
- ดังแสดงในตารางที่ 2-7 และ 2-8 ตามลำดับ

$$W_{18j} = \left\{ \sum_{i=1}^{6} A_i \right\} \times TF \times L \times D \times 365$$

$$W_{18} = \sum_{j=1}^{k=20} W_{18j}$$

ตารางที่ 2-7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเพลาเดี่ยวเทียบเท่า สำหรับออกแบบผิวทางลาดยาง

Year	MB	HB	MT	HT	TR	STR	ESAL	ACC ESAL
2573	6	31	177	62	65	38	168,700	168,700
2574	6	31	179	63	66	39	171,014	339,714
2575	6	32	182	64	67	39	173,329	513,042
2576	6	32	184	64	68	40	175,643	688,686
2578	6	33	189	66	70	41	180,273	868,958
2579	6	34	192	67	71	42	182,943	1,051,902
2580	6	34	194	68	72	42	185,614	1,237,516
2581	7	35	197	69	73	43	188,285	1,425,800
2582	7	35	199	70	74	43	190,955	1,616,756
2583	7	36	202	71	75	44	193,626	1,810,382
2584	7	36	205	72	76	45	196,297	2,006,679
2585	7	37	208	73	77	45	198,968	2,205,646
2586	7	37	211	74	78	46	201,638	2,407,284
2587	7	38	214	75	79	46	204,309	2,611,593
2588	7	38	217	76	80	47	206,980	2,818,573
2589	7	39	220	77	81	48	209,828	3,028,401
2590	7	39	223	78	82	48	212,677	3,241,079
2591	8	40	225	79	84	49	215,526	3,456,604
2592	8	40	228	80	85	49	218,375	3,674,979
2593	8	41	231	81	86	50	221,223	3,896,203

TF = 2.71

ตารางที่ 2-8 ผลการวิเคราะห์ปริมาณเพลาเดี่ยวเทียบเท่า สำหรับออกแบบผิวทางคอนกรีตหนา 25 ซม

Year	MB	HB	MT	HT	TR	STR	ESAL	ACC ESAL
2573	6	31	177	62	65	38	332,419	332,419
2574	6	31	179	63	66	39	336,980	669,399
2575	6	32	182	64	67	39	341,541	1,010,940
2576	6	32	184	64	68	40	346,102	1,357,041
2578	6	33	189	66	70	41	355,223	1,712,265
2579	6	34	192	67	71	42	360,486	2,072,751
2580	6	34	194	68	72	42	365,749	2,438,500
2581	7	35	197	69	73	43	371,011	2,809,511
2582	7	35	199	70	74	43	376,274	3,185,784
2583	7	36	202	71	75	44	381,536	3,567,321
2584	7	36	205	72	76	45	386,799	3,954,120
2585	7	37	208	73	77	45	392,061	4,346,181
2586	7	37	211	74	78	46	397,324	4,743,505
2587	7	38	214	75	79	46	402,587	5,146,092
2588	7	38	217	76	80	47	407,849	5,553,941
2589	7	39	220	77	81	48	413,463	5,967,404
2590	7	39	223	78	82	48	419,076	6,386,480
2591	8	40	225	79	84	49	424,689	6,811,169
2592	8	40	228	80	85	49	430,303	7,241,472
2593	8	41	231	81	86	50	435,916	7,677,388

TF = 5.34

2.4 การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

2.4.1 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางลาดยาง

- การพิจารณาออกแบบผิวทางลาดยางตามวิธีการของ American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 1993 เป็นวิธีการออกแบบเชิงประสบการณ์ที่ได้ข้อมูลจากการทดสอบถนนของ AASHO จะออกแบบชั้นโครงสร้างชั้นทางที่มีค่าตัวเลขเชิงโครงสร้าง Structural Number (SN) ที่เพียงพอสำหรับรองรับปริมาณจราจรออกแบบ โดยค่า SN สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2-2

2.4 การออกแบบโครงสร้างชั้นทาง

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

โดยที่ W_{18} = ปริมาณจราจรของน้ำหนักเพลาเดี่ยวเทียบเท่าที่ประเมิน (ESAL) ในช่วงอายุการออกแบบ ใช้ค่าจากตาราง 2-8 ปีที่ 20 ยอด ESAL สะสม 3,896,203 เที่ยว

S_0 = ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานใรภาพรวม (มีค่าแนะนำอยู่ระหว่าง 0.4 ถึง 0.5)

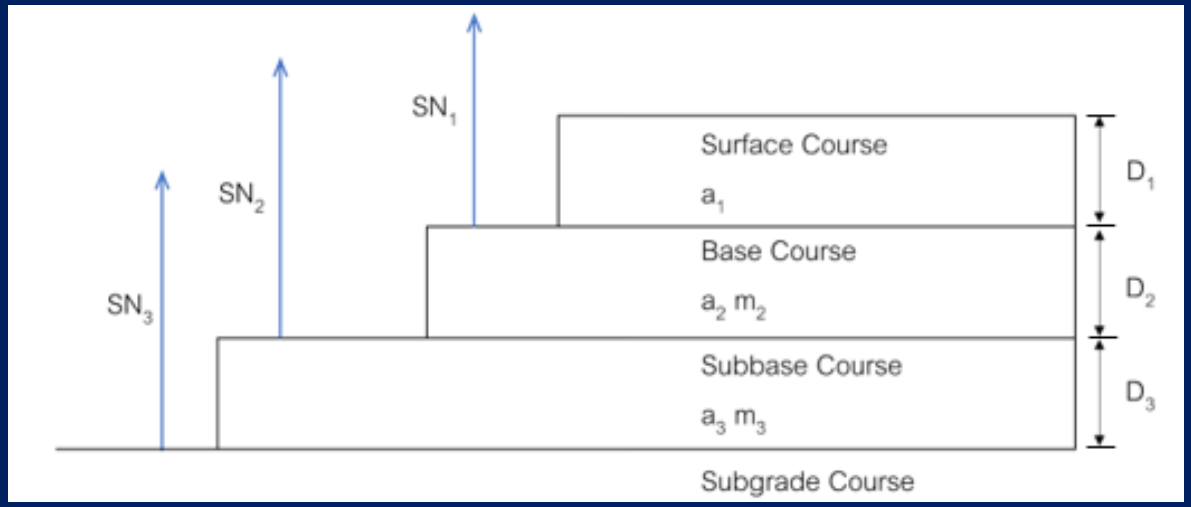
ΔPSI = การสูญเสียความสามารถการให้บริการออกแบบ (Design Serviceability Loss) มีค่าอยู่ระหว่าง 1.7 ถึง 2.2

Z_R = ความเบี่ยงเบนปกติมาตรฐาน (The Standard Normal Deviate)

M_R = มอดุลัสคืนตัวของดินเดิม (Resilient Modulus of subgrade in PSI, M_R= 1500xCBR

SN = ตัวเลขเชิงโครงสร้าง

- การออกแบบความหนาของโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางวิธี AASHTO, 1993 ประกอบด้วยตัวแปรออกแบบ ได้แก่ ตัวเลขเชิงโครงสร้าง (SN), ปริมาณจราจรของน้ำหนักเพลาเดี่ยวเทียบเท่าที่ประเมิน (ESAL) ในช่วงอายุการใช้งาน (W_{18}), มอดุลัสคืนตัว (M_R), สัมประสิทธิชั้นทาง (a_i) และสัมประสิทธิการระบายน้ำ (m_i) โดยจะสมมติให้โครงสร้างชั้นทางมีลักษณะดังรูปที่ 2-4



รูปที่ 2-4 การออกแบบความหนาของโครงสร้างชั้นทางถนนลาดยางวิธี AASHTO (1993)

การวิเคราะห์หาความหนาของชั้นวัสดุ

- พิจารณาความหนาชั้น D_1 โดยนำค่ามอดุลัสยืดหยุ่น E_2 เพื่อหาค่า SN_1 ดังสมการที่ 2-3

$$D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1} \qquad (2\text{-}3)$$

- พิจารณาความหนาชั้น D_2 โดยนำค่ามอดุลัสยืดหยุ่น E_3 เพื่อหาค่า SN_2 ดังสมการที่ 2-4

$$D_2 \geq \frac{SN_2 - a_1 D_1}{a_2 m_2} \qquad (2\text{-}4)$$

$$D_i \geq \frac{SN_i - a_1 D_1 - a_2 m_2 D_2 - a_3 m_3 D_3}{a_i m_i}$$

การวิเคราะห์หาความหนาของชั้นวัสดุ

- พิจารณาความหนาชั้น D_3 โดยนำค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของดินเดิม เพื่อหาค่า SN_3 ดังสมการที่ 2-5

$$D_3 \geq \frac{SN_3 - a_1 D_1 - a_2 D_2 m_2}{a_3 m_3} \qquad (2.5)$$

- พิจารณาความหนาชั้น D_i โดยนำค่ามอดุลัสยืดหยุ่นของชั้นรองรับ เพื่อหาค่า SN_i ดังสมการที่ 2-6

$$D_i \geq \frac{SN_i - a_1 D_1 - a_2 m_2 D_2 - a_3 m_3 D_3}{a_i m_i} \qquad (2.6)$$

การวิเคราะห์หาความหนาของชั้นวัสดุ

โดยที่

a_i	=	สัมประสิทธิของวัสดุชั้นทาง
m_i	=	และสัมประสิทธิการระบายน้ำของวัสดุ
D_i	=	ความหนาของชั้นวัสดุ

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของวัสดุ (m) ซึ่ง AASHTO ได้แบ่งระดับการระบายน้ำได้ไว้ 5 ระดับคือ ไม่ระบายน้ำ ระบายน้ำไม่ดี ระบายน้ำพอใช้ ระบายน้ำดี และระบายน้ำได้ดีมาก AASHTO ได้แนะนำค่าดังกล่าวไว้ ดังแสดงในตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของวัสดุ m แนะนำโดย AASHTO

Quality of drainage	Water removed within	Per cent of the time, pavement structures are exposed to moisture levels approaching saturation.			
		Less than 1%	1-5%	5-25%	Greater than 25%
Excellent	2 hours	1.40-1.35	1.35-1.30	1.30-1.20	1.20
Good	1 day	1.35-1.25	1.25-1.15	1.15-1.00	1.00
Fair	1 week	1.25-1.15	1.15-1.05	1.00-0.80	0.80
Poor	1 month	1.15-1.05	1.05-0.80	0.80-0.60	0.60
Very poor	(Water will not drain)	1.05-0.95	0.95-0.75	0.75-0.40	0.40

ตารางที่ 2-10 คุณสมบัติวัสดุโครงสร้างชั้นทางสำหรับออกแบบผิวทางลาดยาง ที่ใช้ในการออกแบบ

วัสดุโครงสร้างชั้นทาง	CBR (%)	Resilient Modulus		Layer Coefficient	Drainage Coefficient
		M_R (psi)	M_R (MPa)	a_i	m_i
ผิวทางแอสฟัลต์ซีเมนต์	-	360,000	2,500	0.40	1.0
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์	-	123,000	850	0.15	1.0
พื้นทางหินคลุก	80	50,750	350	0.13	1.0
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม	25	21,750	150	0.10	1.0
ดินถมคันทาง	3	4,500	30	-	-

ตารางที่ 2-11 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบผิวทางลาดยาง

พารามิเตอร์สำหรับออกแบบ	ค่าที่ใช้	อ้างอิง
Initial Serviceability, P_i	4.2	AASHTO 1993 หน้า II-10
Terminal Serviceability, P_t	2.5	AASHTO 1993 หน้า II-10
$\Delta PSI = P_i - P_t$	1.7	-
Reliability, R	85%	AASHTO 1993 หน้า II-9
Overall Standard Deviation, S_0	0.45	AASHTO 1993 หน้า II-9
Standard Normal Deviate, Z_R	-1.037	AASHTO 1993 หน้า I-62

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

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

เมื่อ

W_{18}	=	3,896,500.00 ESAL
ระดับความเชื่อมั่น (Ro,%)	=	85
Z_R	=	-1.037
S_0	=	0.45
Pi	=	4.2
Pt	=	2.5
ΔPSI	=	1.7
$Z_R S_0$	=	-0.46665
log(ΔPSI/(4.2-1.5))	=	-0.200914843

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

วัสดุชั้นทาง	ค่า สปส. สำหรับออกแบบ		Soil Resilient Modulus (MR)	
	a	m	MR (psi)	MR (MPa)
ผิวทางลาดยาง AC	0.40	1	362,500	2,500
ผิวทางลาดยาง PMA	0.40	1	536,500	3,700
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์ UCS 24.5 ksc. (min)	0.15	1	123,250	850
พื้นทางหินคลุก CBR 80%	0.13	1	50,750	350
พื้นทางดินซีเมนต์	0.20	1	101,500	700
พื้นทางวัสดุหมุนเวียน (Recycling)	0.15	1	123,250	850
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม CBR 25%	0.10	1	21,750	150
วัสดุคัดเลือก ก	0.08	1	11,020	76
ดินถมคันทาง/ดินเดิม			4,495	31

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

ความหนาวัสดุชั้นทาง (D)

ผิวทาง

ผิวทางลาดยาง (AC)

จากสมการออกแบบ คำนวณค่า SN_1 = 1.39

Layer Cofficient (a_1) 0.4

Drain Cofficient (m_1) 1

คำนวณความหนาผิวทาง (D_1) $D_1 \geq \frac{SN_1}{a_1}$ 3.48 นิ้ว

เลือกใช้ความหนาผิวทาง (D_{design}) 5.91 นิ้ว OK

หรือ 15 เซนติเมตร

ดังนั้น SN_{design} 2.36 OK

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

เลือกชนิดวัสดุพื้นทาง					
พื้นทางหินคลุกผสมซีเมนต์		จากสมการออกแบบ	SN_2 =	2.78	
M_R (psi)	123250				
Layer Cofficient (a_2)	0.15				
Drain Cofficient (m_2)	1				
คำนวณความหนาผิวทาง (D_2)	$D_2 \geq \frac{SN_2 - a_1 D_1}{a_2 m_2}$			2.79 นิ้ว	
		เลือกใช้ความหนาผิวทาง (D_{design})		9.84 นิ้ว	OK
			หรือ	25 เซนติเมตร	
		ดังนั้น	SN_{design}	3.84	OK

เนื่องจากเปลี่ยน M_R ต้อง Trial ค่า SN ใหม่

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

เลือกชนิดวัสดุรองพื้นทาง 1						
รองพื้นทางวัสดุมวลรวม		จากสมการออกแบบ	SN_3 =	4.96		
M_R (psi)	21750					
Layer Cofficient (a_3)	0.10					
Drain Cofficient (m_3)	1					
คำนวณความหนาผิวทาง (D_3)	$D_3 \geq \frac{SN_3 - a_1D_1 - a_2D_2m_2}{a_3m_3}$			11.21	นิ้ว	
		เลือกใช้ความหนาผิวทาง (D_{design})		13.78	นิ้ว	OK
				35	เซนติเมตร	
		ดังนั้น	SN_{design}	5.22		OK

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

เลือกชนิดวัสดุรองพื้นทาง 2					
ไม่ใช้วัสดุคัดเลือก (ใช้ดินทางดิ		จากสมการออกแบบ	SN =	4.96	
M_R (psi)	4495				
Layer Cofficient (a_4)	-				
Drain Cofficient (m_4)	-				
คำนวณความหนาผิวทาง (D_2)	$D_i \geq \frac{SN_i - a_1D_1 - a_2m_2D_2 - a_3m_3D_3}{a_im_i}$			-	นิ้ว
		เลือกใช้ความหนาผิวทาง (D_{design})		-	นิ้ว -
				0	เซนติเมตร
		ดังนั้น	SN_{design}	-	-

รายการคำนวณโครงสร้างชั้นทาง ผิวทางลาดยาง

เลือกชนิดวัสดุคันทาง

ดินถมคันทาง / ดินเดิม CBR 39 ▼ Soil Resilient Modulus (M_R)

M_R (psi)	M_R (MPa)
4495	31

ตรวจสอบ W_{18} Design 5,617,689.70 > W18 ==> ok 30.6%

$M_R = 1500\ CBR$

2.4.2 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต แบบ JPCP และ CRCP

- สมการที่ใช้ในการออกแบบสำหรับสายทางตัวอย่าง ใช้ตามวิธีของ AASHTO 1993 สามารถแสดงสมการเพื่อคำนวณหาความหนาของผิวจราจรคอนกรีตได้จากสมการที่ 2-7

$$\log W_{18} = Z_R S_0 + 7.35\log(D+1) - 0.06 + \frac{\log[\Delta PSI/(4.5-1.5)]}{1+1.624\times10^{7}/(D+1)^{8.46}}$$
$$+(4.22-0.32p_t)\log\left\{\frac{S_c C_d (D^{0.75}-1.132)}{215.63J\left[D^{0.75}-18.42/\left(E_c/k\right)^{0.25}\right]}\right\} \qquad (2\text{-}7)$$

2.4.2 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต แบบ JPCP และ CRCP

โดยที่

W_{18}	=	Estimated Traffic ESAL for the Performance Period
S_0	=	Overall Standard Deviation (มีค่าเท่ากับ 0.35)
ΔPSI	=	Design Serviceability Loss (มีค่าอยู่ระหว่าง 2.0 ถึง 2.5)
Z_R	=	The Standard Normal Deviate
D	=	Slab Thickness in inches
p_t	=	The Serviceability at Time t
E_c	=	Elastic Modulus of Concrete in PSI
k	=	Modulus of Subgrade Reaction in PSI
J	=	Load Transfer Coefficient
C_d	=	Drainage Coefficient

2.4.2 การออกแบบโครงสร้างชั้นทางผิวทางคอนกรีต แบบ JPCP และ CRCP

- ค่า Overall Standard Deviation, S_0; อ้างอิงตาม AASHTO 1993 หน้าที่ II-9 แนะนำค่าเท่ากับ 0.35 สำหรับผิวทางคอนกรีต
- ค่า Joint load transfer coefficient, J; อ้างอิงตาม AASHTO 1993 หน้าที่ II-26 พิจารณา Pavement type กรณี JPCP ใช้ J=2.8 และกรณีใช้ CRCP ใช้ = 2.5
- แสดงดังตารางที่ 2-12 และ ตารางที่ 2-13

ตารางที่ 2-12 พารามิเตอร์สำหรับออกแบบผิวทางคอนกรีตแบบ JPCP

พารามิเตอร์สำหรับออกแบบ	ค่าที่ใช้	อ้างอิง
Initial Serviceability, P_i	4.5	AASHTO 1993 หน้า II-10
Terminal Serviceability, P_t	2.5	AASHTO 1993 หน้า II-10
$\Delta PSI = P_i - P_t$	2.0	-
Reliability, R	85%	AASHTO 1993 หน้า II-9
Overall Standard Deviation, S_0	0.35	AASHTO 1993 หน้า II-9
Standard Normal Deviate, Z_R	-1.037	AASHTO 1993 หน้า I-62
Joint load transfer coefficient J (JRCR, JPCP)	2.8	AASHTO 1993 หน้า II-26
Joint load transfer coefficient J (CRCP)	2.5	AASHTO 1993 หน้า II-26
Drained Coefficient, *Cd*	1.0	

ตารางที่ 2-13 ค่าพารามิเตอร์ Joint load transfer coefficient, J กรณีมีไหล่ทาง

Shoulder	Asphalt		Tied P.C.C.	
Load Transfer Devices	Yes	No	Yes	No
Pavement Type				
1. Plain jointed and jointed reinforced	3.2	3.8–4.4	2.5–3.1	3.6–4.2
2. CRCP	2.9–3 2	N/A	2.3-2.9	N/A

ค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของวัสดุ (m)

- สำหรับค่าสัมประสิทธิ์การระบายน้ำของวัสดุ (m) ซึ่ง AASHTO ได้แบ่งระดับการระบายน้ำได้ไว้ 5 ระดับคือ ไม่ระบายน้ำ ระบายน้ำไม่ดี ระบายน้ำพอใช้ ระบายน้ำดี และระบายน้ำได้ดีมาก AASHTO ได้แนะนำค่าดังกล่าวไว้ ดังแสดงใน**ตารางที่ 2-14**

ตารางที่ 2-14 Drainage Coefficient สำหรับผิวทางคอนกรีต

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1.25-1.20	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10
Good	1.20-1.15	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00
Fair	1.15-1.10	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90
Poor	1.10-1.00	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80
Very poor	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70

ตัวอย่างการคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

เลือกวัสดุรองผิวทาง

-

รองพื้นทางหินคลุกรองใต้ผิวทางคอนกรีต

รองพื้นทางวัสดุมวลรวม

รวมความหนาวัสดุรองพื้นทาง

มอดุลัสของชั้นรองพื้นทาง ($E_{eq/comp_sb}$) psi

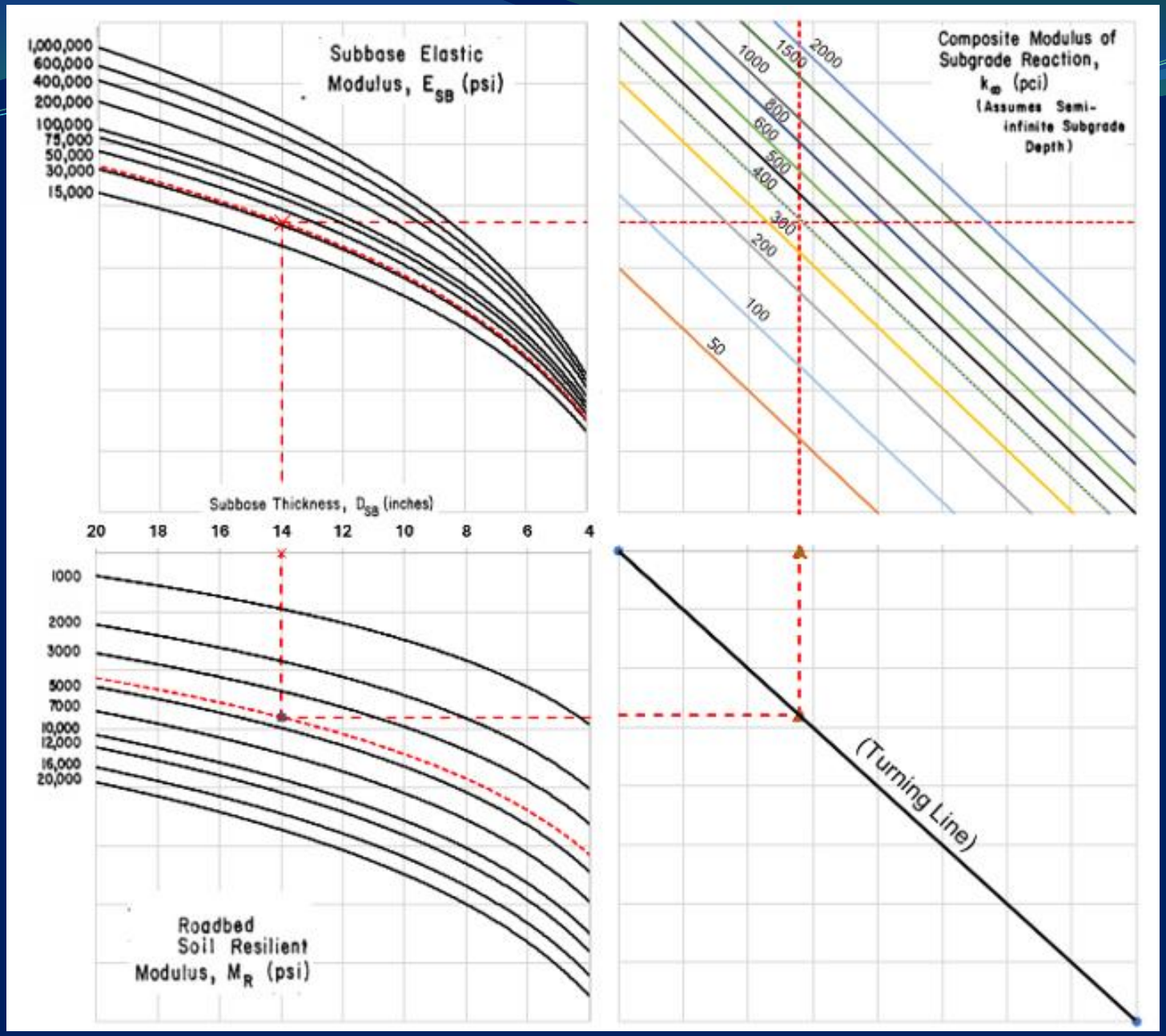
วัสดุดินถมคันทาง (Subgrade/Roadbed)

ดินคันทาง CBR 3%

เลือกความหนา (cm)	E (MPa)
0	-
15	350
20	150
35	หรือ 14 นิ้ว
32230	

$$E_{eq} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} h_i \sqrt[3]{E_i}}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \right]^3$$

ผิวทางชนิด CRCP



รูปที่ 2-5 ค่า Composite Modulus of Subgrade Reaction

ตัวอย่างการคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

ESAL / W18	**=**	**7,680,000**
ระดับความเชื่อมั่น, R (%)	=	85
Z_R	=	-1.037
S_0	=	0.35
Pi	=	4.5
Pt	=	2.5
Δ_{PSI}	=	2
Modulus of Rupture, Sc (psi)	=	600
สปส. การระบายน้ำ, Cd	=	1.00
f'c (psi) .... (35.0 MPa)	=	4,978
Modulus of elasticity (concrete), Ec (psi)	=	3,723,370
Composite modulus of subgrade reaction, k (pci)	=	390
Loss of Support, LS	=	2
K (pci) (Corrected)	=	**36**
Joint load tranfer coefficient, J	=	2.5
%CBR ของชั้นดินเดิม	=	3
M_R (psi) ของชั้นรองพื้นทาง (E_{SB})	=	32,230
M_R (psi) ของชั้นคันทาง (Roadbed)	=	4,300

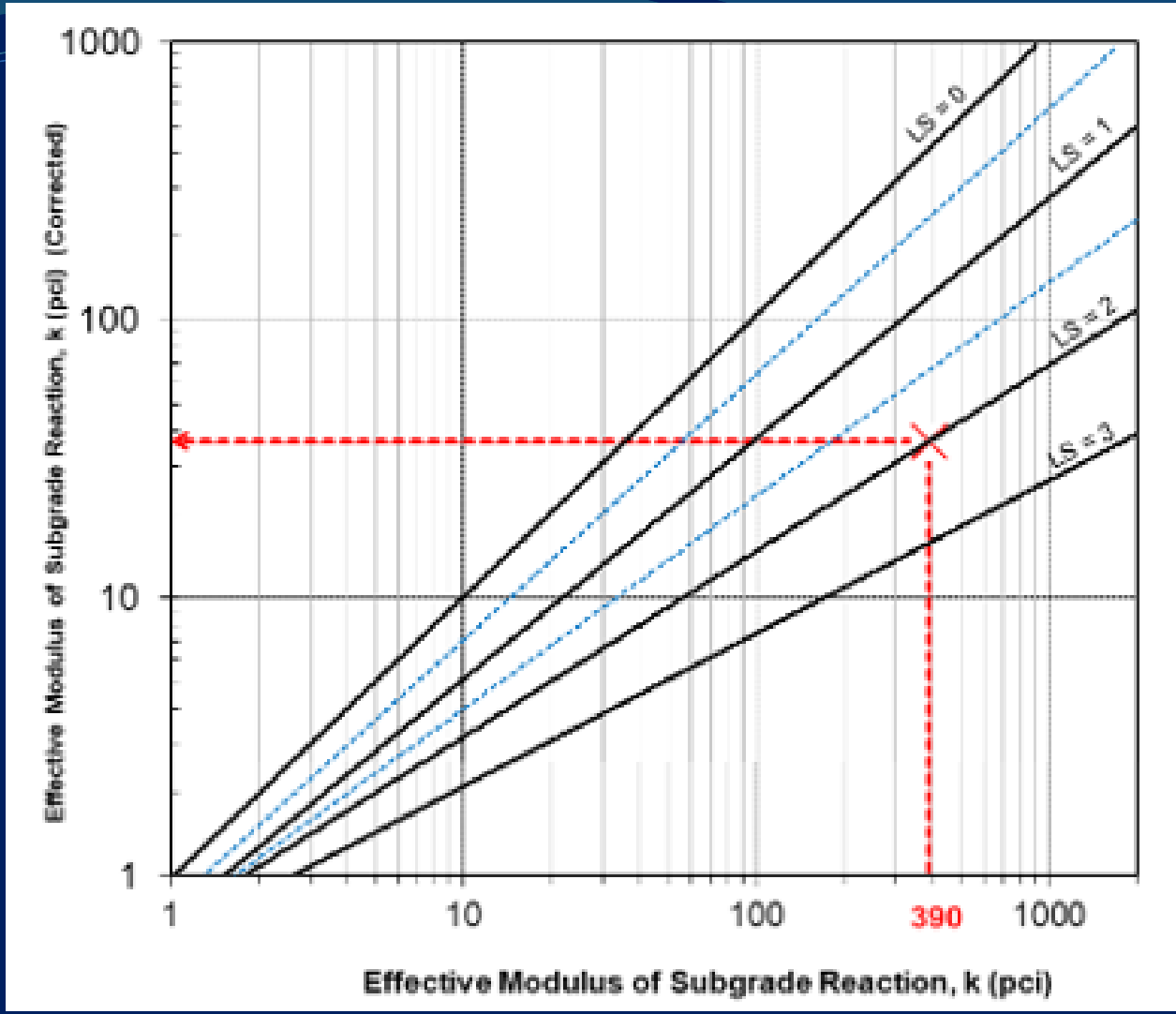
Loss of support (LS) เพื่อหาค่า k

- แฟตเตอร์นี้ , LS, รวมอยู่ในการออกแบบผิวทางแบบคงรูปเพื่ออธิบายแนวโน้มการสูญเสียการรับน้ำหนักที่เกิดจากการกัดเซาะชั้นรองพื้นทางและ/หรือการเคลื่อนตัวของดินในแนวดิ่งที่แตกต่างกัน
- การเคลื่อนตัวของดินในแนวดิ่งที่แตกต่างกันอาจส่งผลต่อช่องว่างใต้ผิวทาง
- ดังนั้นถึงแม้ว่าใช้ชั้นรองพื้นทางที่ไม่สึกกร่อน แต่ช่องว่างยังอาจเกิดขึ้นทำให้อายุการใช้งานของผิวทางลดลง
- โดยทั่วไป สำหรับดินเหนียวที่ไวต่อการบวมตัว หรือการปูดขึ้นเนื่องจากความเย็นเยือกแข็ง ค่า LS มีค่าระหว่าง 2 ถึง 3

Table 2.7. Typical Ranges of Loss of Support (LS) Factors for Various Types of Materials (*6*)

Type of Material	Loss of Support (LS)
Cement Treated Granular Base (E = 1,000,000 to 2,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Cement Aggregate Mixtures (E = 500,000 to 1,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Asphalt Treated Base (E = 350,000 to 1,000,000 psi)	0 0 to 1 0
Bituminous Stabilized Mixtures (E = 40,000 to 300,000 psi)	0 0 to 1 0
Lime Stabilized (E = 20,000 to 70,000 psi)	1 0 to 3 0
Unbound Granular Materials (E = 15,000 to 45,000 psi)	1 0 to 3 0
Fine Grained or Natural Subgrade Materials (E = 3,000 to 40,000 psi)	2 0 to 3 0

NOTE: E in this table refers to the general symbol for elastic or resilient modulus of the material



รูปที่ 2-6 การปรับแก้ค่า Modulus of Subgrade Reaction ประสิทธิผล เนื่องจากการสูญเสียฐานรองรับ

ตัวอย่างการคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

D (จากการคำนวณ, นิ้ว)	=	9.01
เลือกใช้ความหนาผิวทางคอนกรีต D1 (นิ้ว)	=	10.00
เลือกใช้ความหนาผิวทางคอนกรีต D1 (cm)	=	**25**

ตรวจสอบ W_{18} ออกแบบ	
15,336,941 > W18 ==> ok	
	49.92%

ตัวอย่างการคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

- จากข้อมูลในการทดสอบความแข็งแรงของดินเดิมในสนาม (Roadbed) เลือกใช้ค่า CBR เท่ากับ 3% สำหรับการคำนวณ โดยใช้แผนภาพ AASHTO
- เมื่อกำหนดให้ค่า Subbase Elastic Modulus เท่ากับ 32,230 psi สามารถหาค่า Composite Modulus of Subgrade ได้เท่ากับ 390 pci และค่า Effective modulus of subgrade เท่ากับ 36 pci สำหรับในไปใช้ในการคำนวณผิวทางคอนกรีต ชนิด CRCP ดังแสดงใน **รูปที่ 2-5** และ **รูปที่ 2-6** ตามลำดับ

การคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

เลือกวัสดุรองผิวทาง

-

รองพื้นทางหินคลุกรองใต้ผิวทางคอนกรีต

รองพื้นทางวัสดุมวลรวม

รวมความหนาวัสดุรองพื้นทาง

มอดุลัสของชั้นรองพื้นทาง ($E_{eq/comp_sb}$) psi

วัสดุดินถมคันทาง (Subgrade/Roadbed)

ดินคันทาง CBR 3%

เลือกความหนา (cm)	E (MPa)
0	-
15	350
20	150
35	หรือ 14 นิ้ว
32230	

$$E_{eq} = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} h_i \sqrt[3]{E_i}}{\sum_{i=1}^{n} h_i} \right]^3$$

ผิวทางชนิด JPCP

การคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

ESAL / W18	=	**7,680,000**
ระดับความเชื่อมั่น, R (%)	=	85
Z_R	=	-1.037
S_0	=	0.35
Pi	=	4.5
Pt	=	2.5
Δ_{PSI}	=	2
Modulus of Rupture, Sc (psi)	=	600
สปส. การระบายน้ำ, Cd	=	1.00
f'c (psi) .... (35.0 MPa)	=	4,978
Modulus of elasticity (concrete), Ec (psi)	=	3,723,370
Composite modulus of subgrade reaction, k (pci)	=	**390**
Loss of Support, LS	=	2
K (pci) (Corrected)	=	**36**
Joint load tranfer coefficient, J	=	2.8
%CBR ของชั้นดินเดิม	=	3
M_R (psi) ของชั้นรองพื้นทาง (E_{SB})	=	32,230
M_R (psi) ของชั้นดันทาง (Roadbed)	=	4,300

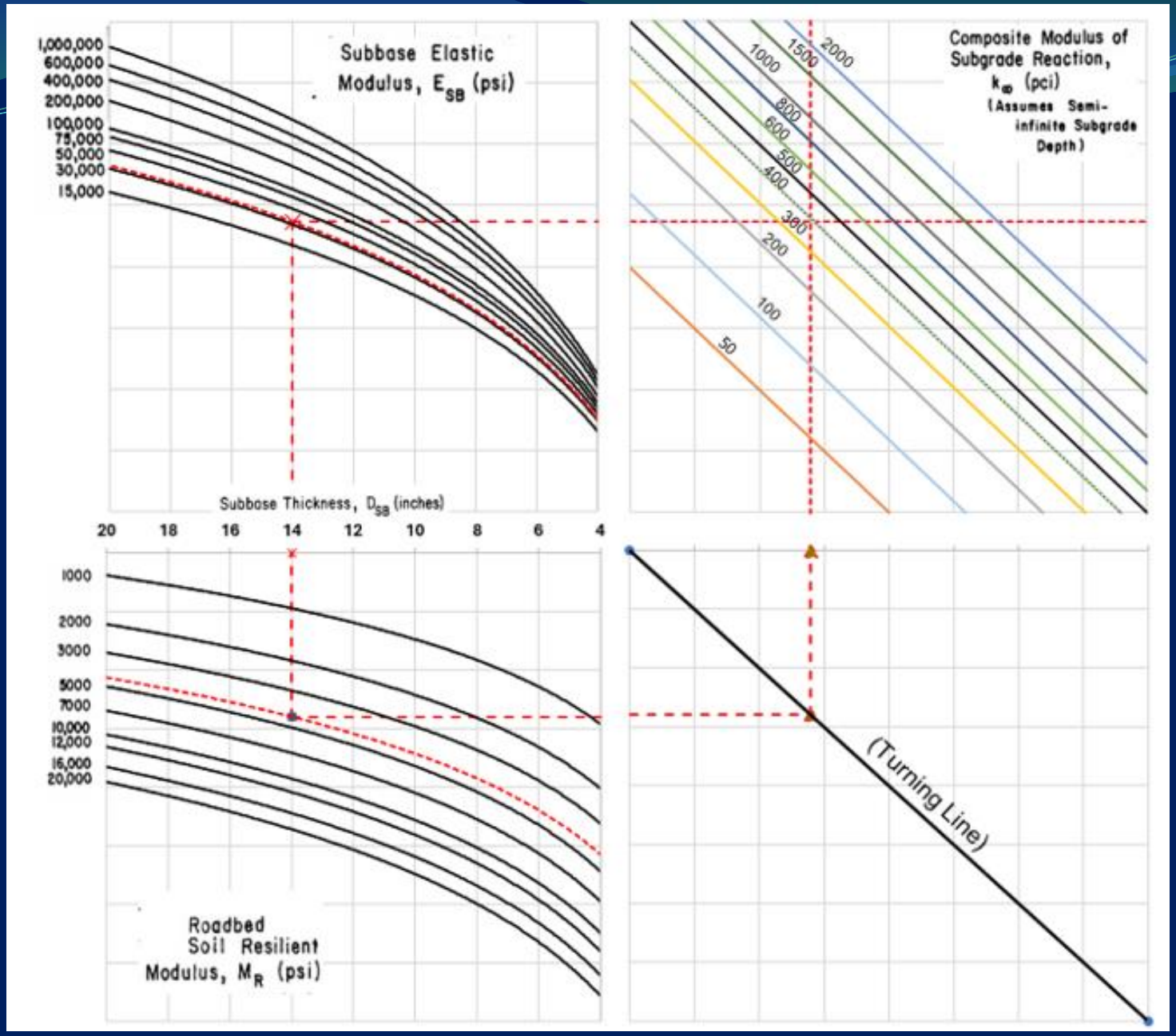
การคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

D (จากการคำนวณ, นิ้ว)	=	9.56
เลือกใช้ความหนาผิวทางคอนกรีต D1 (นิ้ว)	=	10.00
เลือกใช้ความหนาผิวทางคอนกรีต D1 (cm)	=	**25**

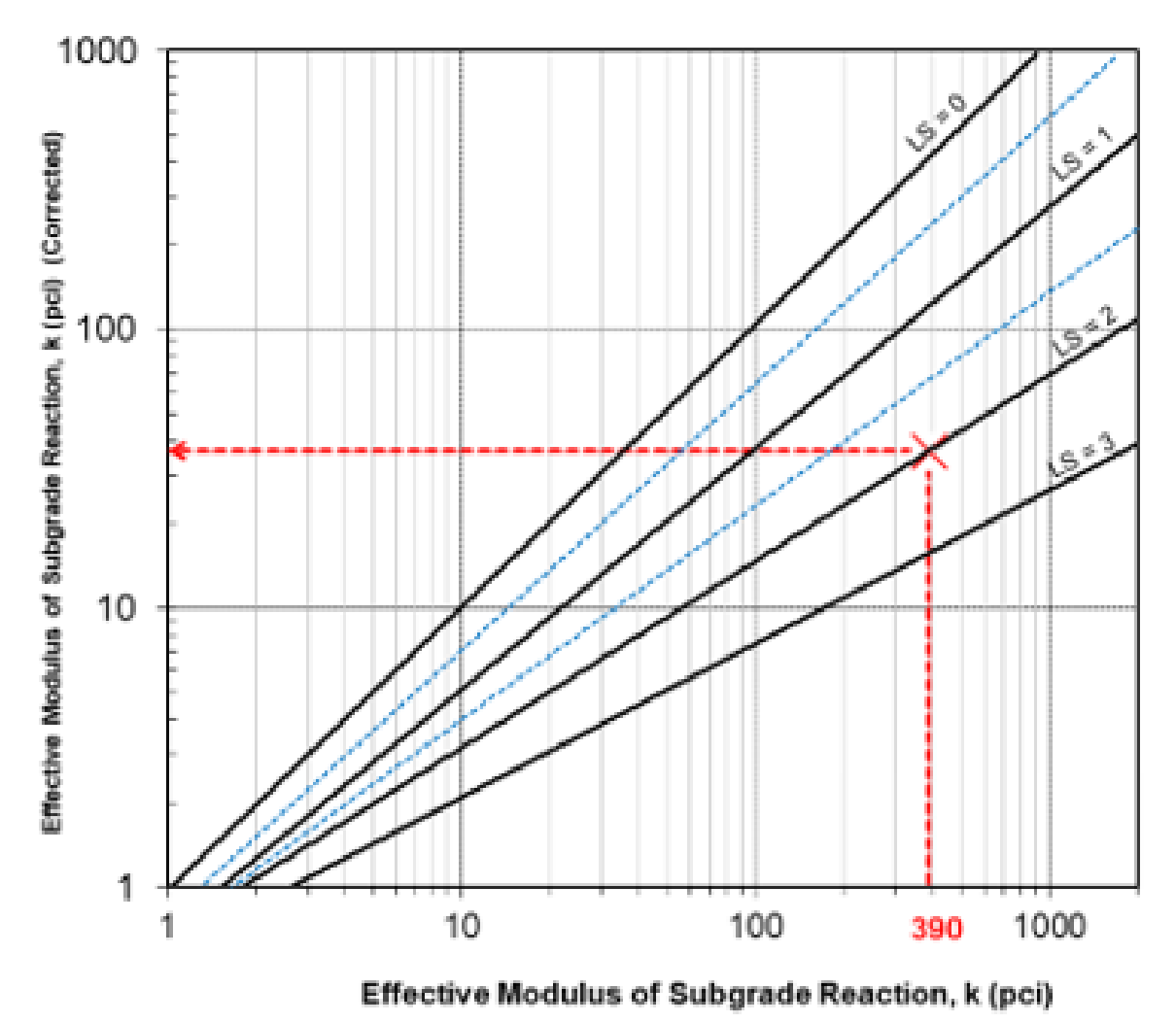
ตรวจสอบ W_{18} ออกแบบ	
10,380,102 > W18 ==> ok	
	26.01%

การคำนวณความหนาผิวทางคอนกรีต

- จากข้อมูลในการทดสอบความแข็งแรงของดินเดิมในสนาม (Roadbed) เลือกใช้ค่า CBR เท่ากับ 3% สำหรับการคำนวณ
- โดยใช้แผนภาพ AASHTO เมื่อกำหนดให้ค่า Subbase Elastic Modulus เท่ากับ 32,230 psi สามารถหาค่า Composite Modulus of Subgrade ได้เท่ากับ 390 pci และค่า Effective modulus of subgrade เท่ากับ 36 pci
- สำหรับในไปใช้ในการคำนวณผิวทางคอนกรีต ชนิด JPCP ดังแสดงใน **รูป 2-7** และ**รูปที่ 2-8** ตามลำดับ



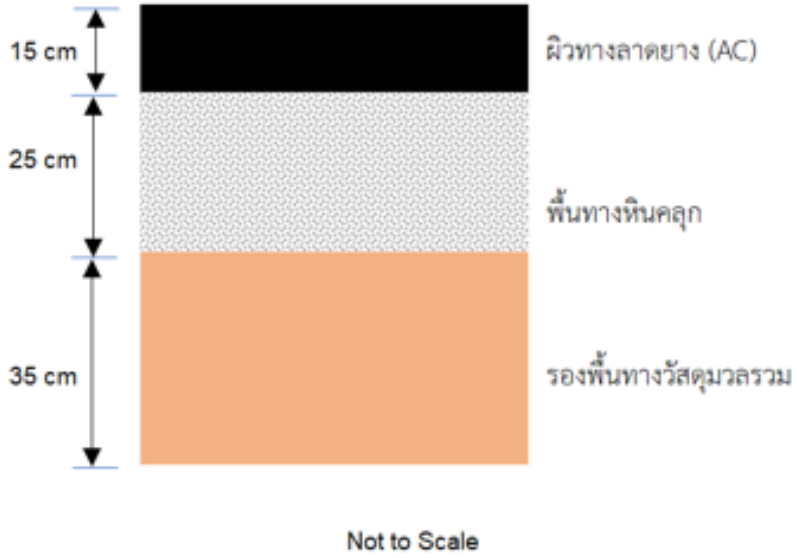
รูปที่ 2-7 ค่า Composite Modulus of Subgrade Reaction



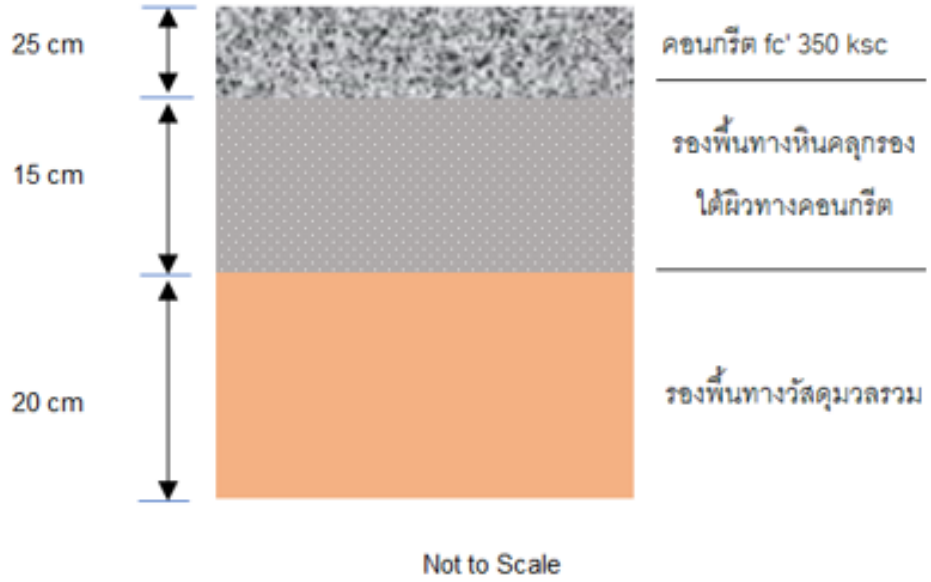
รูปที่ 2-8 การปรับแก้ค่า Modulus of Subgrade Reaction ประสิทธิผล เนื่องจากการสูญเสียฐานรองรับ

2.4.3 สรุปโครงสร้างชั้นทางที่ออกแบบด้วยวิธี AASHTO 1993

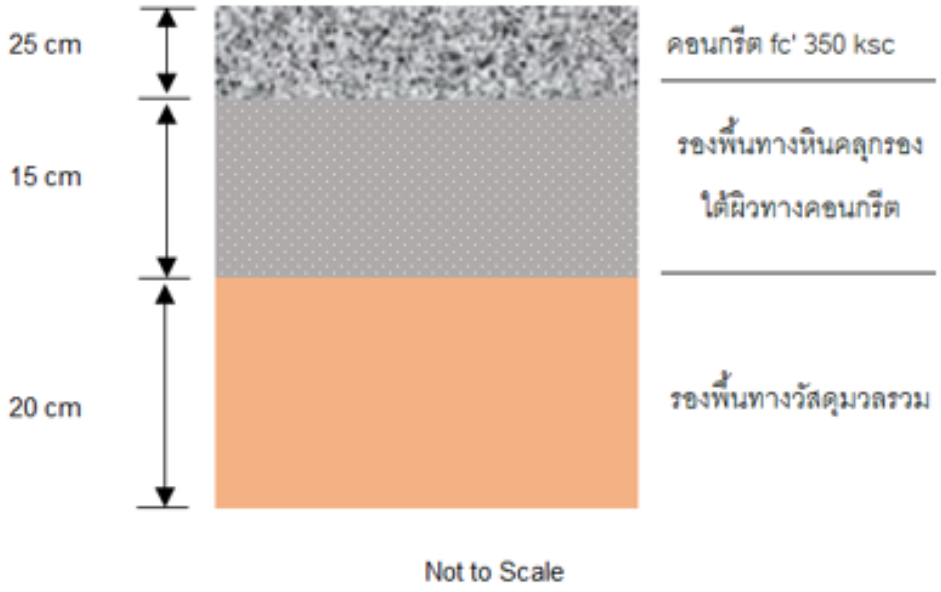
- จากการคำนวณตามวิธีของ AASHTO 1993 สำหรับการออกแบบผิวทางลาดยาง (Asphalt Concrete) และผิวทางคอนกรีต (Concrete Pavement)
- สามารถสรุปรูปแบบของโครงสร้างชั้นทาง ได้ 3 รูปแบบ ดังแสดงใน**รูปที่ 2-9 ถึง รูปที่ 2-11**

รายละเอียด	หนา (ซม.)	ชนิด
	7	Wearing Course
	8	Binder Course
	-	Base Course
	25	พื้นทางหินคลุก
	35	รองพื้นทางวัสดุมวลรวม
	Existing	Earth Embankment, CBR≥3% or Subgrade, CBR≥3%

รูปที่ 2-9 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 1 ผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

รายละเอียด	หนา (ซม.)	ชนิด
	25	350 ksc (Cube)
	15	พื้นทางหินคลุกรองใต้ผิวทางคอนกรีต
	20	รองพื้นทางวัสดุมวลรวม
	Existing	Earth Embankment, CBR≥3% or Subgrade, CBR≥3%

รูปที่ 2-10 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 2 ผิวทางคอนกรีต แบบ CRCP

รายละเอียด	หนา (ซม.)	ชนิด
	25	350 ksc (Cube)
	15	พื้นทางหินคลุกรองใต้ผิวทางคอนกรีต
	20	รองพื้นทางวัสดุมวลรวม
	Existing	Earth Embankment, CBR≥3% or Subgrade, CBR≥3%

รูปที่ 2-11 โครงสร้างชั้นทางรูปแบบที่ 3 ผิวทางคอนกรีต แบบ JPCP

รายการโยธาน่ารู้กับลุงพานิช

โยธาน่ารู้กับลุงพานิช
4.15K subscribers

SUBSCRIBED

HOME VIDEOS PLAYLISTS COMMUNITY CHANNELS ABOUT

Uploads ▶ PLAY ALL

โยธาน่ารู้ EP 53 จบโยธาจาก มหาวิทยาลัยมหิดล

811 views • 2 days ago

โยธาน่ารู้ EP 52 วิศวกรโยธา จาก ม.รังสิต

516 views • 1 week ago

โยธาน่ารู้ EP 51การบริหาร จัดการน้ำภาคกลางตอนล่าง

401 views • 2 weeks ago

โยธาน่ารู้ EP 50 ภาษาอังกฤษ สำหรับวิศวกร (โยธา)

851 views • 3 weeks ago

โยธาน่ารู้ EP 49 เขื่อนแตก?

780 views • 4 weeks ago

Activate Windows
Go to Settings to activate Windows.