บทที่ 3

การออกแบบโครงสร้างทาง

3.1 คำนำ

โดยปกติการออกแบบถนนรถผ่านน้อยให้สำเร็จสอดคล้องกับหลักการทางด้านวิศวกรรมทำได้ยากกว่าการออกแบบถนนที่มีรถผ่านมาก เหตุผลที่สำคัญคือ ถนนรถผ่านน้อยจะเป็นถนนคุณภาพต่ำด้วย สิ่งที่ติดตามมาก็คือ ความเสี่ยงของผลตอบแทนทางเศรษฐกิจ การบำรุงรักษา และข้อจำกัดการก่อสร้าง

ส่วนใหญ่แล้วนักออกแบบพบว่า ความสำเร็จทางด้านเศรษฐกิจจะเป็นไปได้ยาก ถ้าหากมีการกำหนดคุณสมบัติ ลักษณะของวัสดุที่จะใช้ก่อสร้างถนนรถผ่านน้อย หรือวิธีควบคุมการก่อสร้าง เช่นเดียวกับถนนชั้นดี ผู้ออกแบบไม่สามารถจะออกแบบถนนให้มีอายุบริการตามต้องการได้เหมือนถนนชั้นดี การพิจารณาออกแบบอายุบริการของถนนชนิดนี้เป็นไปแบบง่าย ๆ

ถ้าหากไม่คำนึงถึงข้อจำกัดต่าง ๆ แล้ว เป็นหน้าที่ของผู้ออกแบบที่จะต้องหาทางทำให้ความจำเป็นที่จะต้องทำการบำรุงรักษาถนนเกิดขึ้นน้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ และจะต้องทำให้ถนนมีอายุบริการยาวนานที่สุด โดยนำเอาหลักการทางด้านวิศวกรรมมาประยุกต์ใช้

วิศวกรควรที่จะพิจารณาออกแบบโครงสร้างทางซึ่งเป็นขั้นตอนหนึ่งในกระบวนการที่เริ่มต้นด้วยการพิจารณาแฟคเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบ และสุดท้ายก็จะเป็นการก่อสร้าง หรือการปรับปรุงถนนใหม่ ณ เวลาสิ้นสุดอายุออกแบบของถนน

3.2 แนวความคิดการวิบัติของถนนชนิดไม่ลาดผิว

ลักษณะการวิบัติของถนนชนิดไม่ลาดผิวเกิดขึ้นมาจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้ คือ

ก. Pumping Action การบรรทุกน้ำหนักจากยวดยานที่สัญจรไปมาหลาย ๆ ครั้ง เป็นสาเหตุให้เกิด pumping action คือ น้ำข้างล่างลอยขึ้นมาข้างบนและพาเอาวัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติกขึ้นมายังชั้นโครงสร้างส่วนบนของถนนซึ่งมีความแข็งแรงกว่าชั้นล่าง ดังนั้นช่องว่างของชั้นวัสดุโครงสร้างส่วนบนจึงถูกบรรจุด้วยวัสดุที่อยู่ในสภาวะพลาสติก ซึ่งทำให้แรงยึดเกาะระหว่างเม็ดดินลดลง ผลที่ตามมาคือ โครงสร้างโดยรวมอ่อนตัวลง

ข. ความชื้นสมดุลย์ (Equilibrium moisture content) ขึ้นกับสภาพแวดล้อม วัสดุมวลละเอียดทำหน้าที่เป็นตัวเชื่อมประสานวัสดุมวลหยาบ คือผิวหน้าของเม็ดกรวด หิน จะถูกเชื่อมประสานให้เกาะติดกันโดยวัสดุมวลละเอียดผสมน้ำซึ่งมีความเหนียว แต่ปริมาณความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเกิดภาวะวิกฤติภายใต้ภาวะที่อัตราการระเหยของน้ำเท่ากับ capillary rise ถ้ามีตัวหนึ่งตัวใดเปลี่ยนแปลงในลักษณะที่เป็นผลทำให้อัตราการระเหยของน้ำมากกว่า capillary rise ผิวหน้าถนนจะแห้ง ยวดยานที่วิ่งไปมาก็จะทำให้เม็ดวัสดุโครงสร้างถนนเกิดการหลุดร่อนขึ้นได้ ถนนชำรุดเสียหาย ถ้าอัตราการระเหยน้อยกว่า capillary rise ความชื้นก็จะสูง และถ้ามากพออาจทำให้วัสดุโครงสร้างอ่อนตัวลง กรณีของชั้น subgrade ก็จะเกิดขึ้นในลักษณะเดียวกัน

ค. Frost action เป็นปรากฏการณ์ที่น้ำในช่องว่างเม็ดดินกลายเป็นน้ำแข็ง ซึ่งอาจจะเกิดขึ้นทั่ว ๆ ไปตลอดทั้งสายหรือเกิดเป็นบางจุด แล้วมีผลทำให้ถนนเกิดรอยแตกร้าว ในการศึกษานี้อิทธิพลของแฟคเตอร์ตัวนี้ถือว่าไม่มี

ง. Shearing or Rupture เมื่อรถวิ่งผ่านไปบนถนนจะทำให้เกิดแรงกระทำบนชั้นโครงสร้างของถนน ปฏิกิริยาของชั้นโครงสร้างถนนก็จะเกิดแรง shearing มาต้านแรงกระทำที่เกิดขึ้นจากรถที่วิ่งผ่าน ซึ่งเป็นแรงที่ต้านทานไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของถนนจะขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งที่รถวิ่งผ่าน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดการลื่นไถลหรือเกิด shearing ขึ้นระหว่างเม็ดดินที่อยู่ติดกัน ถ้าการวิบัติเนื่องจาก shearing เกิดขึ้นในชั้นผิวทางลักษณะความเสียหายที่ปรากฏเป็นร่องล้อจะมีขนาดเท่ากับความกว้างของล้อรถ แต่ถ้าการวิบัติเนื่องจาก shearing เกิดขึ้นในชั้นล่าง ๆ ผลจะปรากฏว่าความกว้างของร่องที่ปรากฏให้เห็นบนผิวทางจะมีขนาดกว้างกว่าความกว้างของล้อ

จ. ความเครียดสะสมแบบไม่ยืดหยุ่น (Accumulated small Inelastic strains) จุดใด ๆ บนถนนจะเปลี่ยนแปลงรูปร่างไปจากเดิมในระดับหนึ่งเนื่องจากแรงกระทำจากรถและจะกลับคืนสู่สภาพเดิมได้โดยสมบูรณ์หรือเพียงบางส่วนหลังจากรถได้วิ่งผ่านไปแล้ว การเปลี่ยนแปลงในลักษณะเช่นนี้เมื่อเกิดขึ้นบ่อยครั้งจะเป็นสาเหตุให้เกิดการสะสมความเครียดแบบไม่ยืดหยุ่นมากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งถึงสภาวะหนึ่งถนนจะไม่สามารถรับน้ำหนักจากรถได้

3.2.1 ความหมายของคำว่า "การวิบัติเชิงโครงสร้างทาง" และ "การวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งาน" (Structural versus functional failure)

คำว่า "ออกแบบ" ตามทัศนะของวิศกรโดยปกติจะหมายถึง การวิเคราะห์สภาพสภาวะที่จะนำไปสู่การวิบัติของโครงสร้าง การวิเคราะห์จะต้องพิจารณาถึงความเสียหายจากการวิบัติ และค่าใช้จ่ายในการซ่อมบำรุงทาง เมื่อกำลังทำการออกแบบโครงสร้าง เช่น สะพาน เขื่อน และอาคารสูงหลายชั้น ความเสียหายจะสูงมาก ถ้าโครงสร้างเหล่านี้เกิดการวิบัติ ในอดีตที่ผ่านมาวิธีการปฏิบัติของวิศวกรก็คือ พยายามที่จะออกแบบโครงสร้างเหล่านี้ไม่ให้เกิดการวิบัติได้ ซึ่งกระทำโดยการใช้ค่าแฟคเตอร์ความปลอดภัยค่อนข้างสูง

เมื่อเปรียบเทียบกับการวิบัติของถนนหรือทางหลวงมักไม่ค่อยจะเกิดความเสียหายของชีวิตและทรัพย์สินมากมายเหมือนเช่นโครงสร้างอื่น จากเหตุผลนี้การออกแบบโครงสร้างถนนจะเกี่ยวข้องกับช่วงอายุออกแบบที่เหมาะสมของถนนที่ทำให้การลงทุนในการก่อสร้างถนนคุ้มค่าที่สุด และเป็นที่เข้าใจกันโดยทั่วไปว่าการวิบัติของถนนจะเกิดขึ้นที่จุดสิ้นสุดอายุออกแบบถนน การออกแบบโครงสร้างทางที่ดีจะต้องเป็นการออกแบบที่การวิบัติเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สอดคล้องกับที่วิศวกรออกแบบไว้ ดังนั้นโครงสร้างที่ถึงจุดวิบัติแล้วไม่ได้บ่งบอกถึงความล้มเหลวหรือการออกแบบที่ผิดพลาด เว้นเสียแต่กรณีที่การวิบัติเกิดขึ้นก่อนที่จะถึงช่วงเวลาที่ออกแบบไว้เป็นเวลานาน ๆ ถ้าถนนมีอายุยาวนานกว่าที่ออกแบบไว้แล้วแสดงว่าออกแบบโครงสร้างถนนแข็งแรงเกินไปเมื่อเทียบกับอายุออกแบบและอาจจะเป็นโครงสร้างที่ไม่ประหยัดสำหรับการบริการที่ต้องการ

ถึงแม้ว่าจะได้มีการออกแบบโครงสร้างถนนและทำการก่อสร้างถนนมาเป็นเวลาหลายปีแล้วก็ตาม วิศวกรยังคงเข้าใจความหมายของการวิบัติแตกต่างกัน ในปัจจุบันโดยทั่ว ๆ ไป การวิบัติของโครงสร้างถนนมี 2 แบบ

การวิบัติของโครงสร้างทาง (Structural failure) : ถูกจำกัดความว่าหมายถึง การพังทลายหรือการแตกสลายขององค์ประกอบส่วนใดส่วนหนึ่งโครงสร้างทางอันเนื่องมาจากการจราจรและทำให้โครงสร้างนั้นไม่สามารรับน้ำหนักจากการจราจรได้

สำหรับ flexible pavements น้ำหนัก การเปลี่ยนรูปถาวร (การเกิดร่องล้อ) เป็นสิ่งสำคัญที่แสดงถึงการวิบัติของโครงสร้าง เมื่อโครงสร้างเป็นผิวบิทูมินัส (โดยไม่พิจารณาชนิดและความหนา) จะต้องพิจารณาเรื่องแตกร้าวด้วย สำหรับกรณีที่มีรถมาก (high-volume traffic conditions) บนทางหลวงสายหลัก กำหนดสภาพการวิบัติไว้ว่าหมายถึงสภาพที่มีร่องล้อเกิดขึ้นลึกเฉลี่ย 0.5 นิ้ว (ประมาณ 10-20 มม.) อย่างไรก็ตามสำหรับถนนรถผ่านน้อย low-volume granular roads ที่ผิวทางไม่เป็น

บิทูมินัสทางประเภทนี้ส่วนใหญ่ออกแบบโดยถือว่าเกิดการวิบัติขึ้นเมื่อเกิดร่องล้อลึก 2-3 นิ้ว (50-80 มม.)

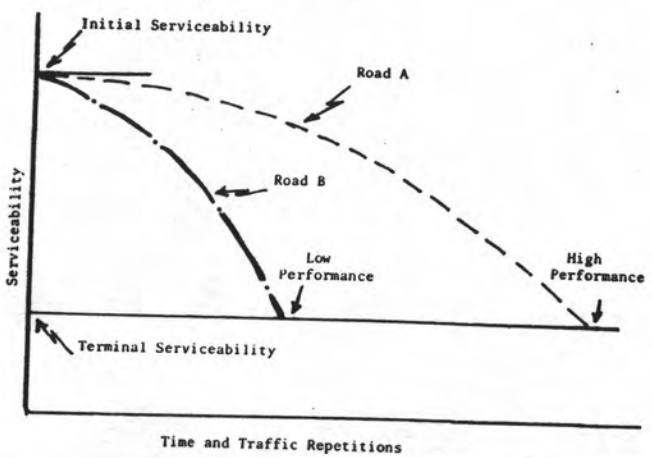
ในกระบวนการออกแบบโครงสร้างทางจะเกี่ยวข้องกับการเปรียบเทียบ stress กับกำลังของวัสดุโครงสร้างทาง จากเหตุผลนี้จึงกล่าวถึงทฤษฎีของ stress ที่สัมพันธ์กับการออกแบบโครงสร้างทาง

การใช้แนวคิดการวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งาน (Functional failure concepts) สำหรับการออกแบบ pavement เกิดขึ้นจาก the American Association of State Highway Officials (AASHTO) Road Test ซึ่งกระทำในประเทศสหรัฐอเมริกาในช่วงระหว่างปี 1956-1961 หน้าที่พื้นฐานของถนนก็คือ การช่วยให้ยวดยานสามารถเดินทางจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งได้โดยปลอดภัย และยวดยานสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างราบเรียบที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ การวิบัติตามลักษณะหน้าที่ใช้งานนี้จะเกิดขึ้นเมื่อถนนมีความขรุขระและไม่ปลอดภัยต่อยวดยานที่สัญจรไปมา ดังนั้นสิ่งสำคัญที่แสดงถึงการวิบัติตามลักษณะใช้งานก็คือ ความขรุขระของถนน

เทอม "serviceability" ถูกใช้แสดงถึงความสามารถของโครงสร้างทางที่ใช้เป็นตัวกำหนดลักษณะใช้งานที่เวลาใด ๆ ถนนที่เพิ่งจะก่อสร้างใหม่ ๆ ควรที่จะมีความราบเรียบสูง ดังนั้นจึงควรที่จะมีค่า serviceability สูงด้วย เมื่อเวลาผ่านไปและมีรถยนต์แล่นผ่านถนน ความขรุขระของถนนโดยปกติก็จะเพิ่มมากขึ้น และค่า serviceability ก็จะลดลง

การวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งานเกิดขึ้นเมื่อค่า serviceability ลดลงต่ำกว่าค่าที่วิศวกรได้กำหนดไว้ ซึ่งเรียกว่า terminal serviceability

Performance หมายถึงประวัติของค่า serviceability ของถนนเมื่อเวลาและการจราจรสะสมเพิ่มขึ้น รูปที่ 3.1 แสดงถึง the hypothetical serviceability histories ของถนนสองตอนที่มีลักษณะแตกต่างกัน โดยอาศัยรูปนี้ สามารถให้คำจำกัดความของคำว่า performance ได้ว่าคือช่วงเวลา หรือการจราจรสะสม ซึ่งค่า serviceability มีค่ามากกว่าค่า terminal serviceability (ค่าที่เป็นจุดวิบัติ) ดังนั้นถนน A ในรูปที่ 3.1 อาจจะ performed ได้เป็น 2 เท่าของถนน B



รูปที่ 3.1 Serviceability performance concepts

ลักษณะที่สำคัญอย่างหนึ่งของแนวคิดการวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งานคือ ถนนอาจจะวิบัติทางโครงสร้างหรือไม่ก็ได้ เช่น สิ่งแวดล้อมเป็นตัวการที่ทำให้ถนนขรุขระ การออกแบบอาจจะใช้แนวคิดการวิบัติแบบใดแบบหนึ่ง สิ่งที่จำเป็นสำหรับวิศวกรผู้ออกแบบก็คือ จะต้องมีความเข้าใจถึงสภาพและลักษณะการวิบัติชนิดใดชนิดหนึ่งที่จะใช้ในการออกแบบ

3.2.2 กลไกการวิบัติ (Distress mechanisms)

Distress Factors ที่นำไปสู่ภาวะการวิบัติเชิงโครงสร้างหรือการวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งาน แสดงในตารางที่ 3.1 สำหรับถนนชนิดไม่ลาดผิว (granular surfaced) และถนนลาดยางแบบ surface treatment

ถนน granular surface มีตัวที่แสดง distress มากกว่าถนน surface treatment ผิว single surface treatment ไม่ได้ทำให้ structural rigidity ของถนนเพิ่มขึ้นมากนัก เพราะความหนาของผิวทางชนิดนี้ค่อนข้างบาง (0.5-1.0 นิ้ว) และเพราะก่อสร้างในพื้นที่ ดังนั้นผิว surface treatment จึงถือว่าไม่ได้เพิ่มความแข็งแรง แต่มีประโยชน์ในด้าน

ก. ในการป้องกันน้ำซึมลงสู่ชั้นโครงสร้างด้านล่าง กำลังรับน้ำหนักของถนนโดยโดยเฉพาะอย่างยิ่งชั้นที่เป็นดินละเอียดจะขึ้นอยู่กับความชื้นของดินนั้น

ข. ปกป้อง unbound granular base/subbase material จากการวิบัติซึ่งเกิดจากการจราจรและภาวะแวดล้อม

ตารางที่ 3.1 Major distress types of low-volume roads

Distress Factor	Effect On . . .	Applicability for	
		Granular Surface	Surface Treatment
1. Dusting	Safety, environment	Yes	-
2. Surface looseness	Safety, roughness	Yes	-
3. Gravel loss	Structural deformation, roughness	Yes	-
4. Surface deformations	Structural deformation, roughness	Yes	Yes
a. shear displacement			
b. layer material densification			
c. layer material intrusion			
5. Surface heaving	Roughness[a]	Yes	Yes
a. frost heave			
b. expansive clays			
6. Corrugations (washboarding)	Roughness	Yes	Possibly
7. Surface erosion (gulleying)	Roughness	Yes	-
8. Potholes	Roughness	Yes	Only if cracked area not maintained
9. Surface cracking	Structural deformation, roughness	-	Yes

[a]Greatly increased if surface profile changes are highly variable in the longitudinal direction.

ข้อดีที่สำคัญอย่างหนึ่งของผิว surface treatment คือ ลดความจำเป็นในการบำรุงรักษาตามช่วงเวลา และการปาดผิว อย่างไรก็ตามผิว surface treatment จะเป็นส่วนของค่าใช้จ่ายที่เพิ่มขึ้นมานอกเหนือไปจากค่าใช้ในการก่อสร้าง puvement structure และถึงยังไงก็ยังต้องมีการบำรุงรักษาอยู่ ถ้าหากก่อสร้างเป็นผิว surface treatment ในการซ่อมบำรุงตามปกติจะต้องซ่อมผิวทางส่วนที่แตกร้าวให้อยู่ในภาพที่ดี

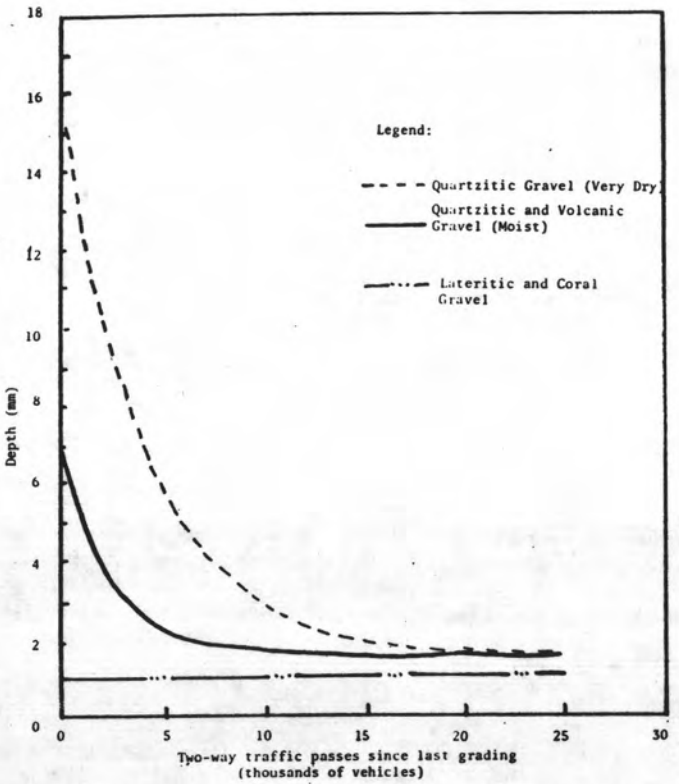
สำหรับถนนแบบ granular-surfaced การวิบัติเชิงโครงสร้างถือว่าเกิดขึ้นเมื่อ permanent deformation 2-3 นิ้ว สำหรับถนนแบบ surface treatment ความรุนแรงจะน้อยกว่านี้ ดังนั้นสำหรับถนนแบบ surface treatment จึงกำหนดคุณภาพของชั้นพื้นทางสูงกว่าปกติ การควบคุมการก่อสร้างที่เป็นไปด้วยความเคร่งครัด และมาตรฐานออกแบบก็สูงกว่าปกติ

สำหรับถนน granular-surfaced ตารางที่ 3.1 ชี้ให้เห็นว่า distress factor หลาย ๆ ตัว อาจจะกระทำต่อถนนชนิดนี้ เพื่อทำให้ความขรุขระเพิ่มขึ้นจนถึงระดับของการวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งาน ดังนั้นปรัชญาในการออกแบบคือ จะต้องป้องกันการเกิดร่องล้ออันเนื่องมาจาก shear displacements ไม่ให้มากเกินไป วัสดุที่จะนำมาใช้เป็นชั้นโครงสร้างทางควรที่จะทำการคัดเลือกเสียก่อน และควรที่จะมีแผนการบำรุงทางที่แน่นอนเพื่อแก้ไข distress แบบอื่น ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นได้เพื่อให้สภาพทางดีดังเดิม สำหรับถนน surface treatment จะต้องออกแบบโครงสร้างทางให้มีความแข็งแรงเพียงพอ และเพื่อมั่นใจได้ว่าสามารถควบคุมการเสียรูปได้ การบำรุงรักษาด้วยการฉาบปะผิวทางที่เป็นหลุมบ่อเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งเพื่อควบคุมความขรุขระ และคุณภาพการบริการของถนน

ฝุ่นของถนนกรวดเกิดจากการสูญเสียวัสดุมวลละเอียดที่เกิดขึ้นจากอิทธิพลของการบดทับของการจราจร การเกิดฝุ่นทำให้เกิดผลกระทบด้านสภาพแวดล้อมต่อพื้นที่ข้างทาง นอกจากนั้นเมื่อรถวิ่งผ่านเกิดฝุ่นที่ฟุ้งกระจายเป็นบริเวณกว้าง อาจจะเป็นสาเหตุทำให้เกิดอุบัติเหตุขึ้นได้ ฝุ่นจะเกิดขึ้นมากเมื่ออากาศแห้ง มวลรวมมีความอ่อนและผุกร่อนง่าย ขนาดคละเลว และความหนาแน่นของการจราจรสูง

มวลดินที่ถูกรถบดทับจะแตกออกเป็นวัสดุที่มีขนาดเล็กลง ทำให้ดินค่อย ๆ หลุดแยกตัวออกจากกัน เกิดเป็นฝุ่นที่ผิวบนของถนน จากการศึกษาในประเทศเคนยาได้ชี้ให้เห็นว่าทั้งความหนาของดินหลวม และความชื้นในมวลดินมีผลต่อความปลอดภัยในการเดินทางและอัตราการเผาผลาญน้ำมันเชื้อเพลิง และพบว่า เมื่อความชื้นในมวลดินเพิ่มขึ้น 10% จะมีผลทำให้ความเร็วของรถลดลงประมาณ 1.5-3.0 กม./ชม.

จากการศึกษาในประเทศเคนยาได้สร้างสมการสำหรับทำนายหาความหนาของฝุ่นบนถนนกรวด โดยชนิดของดินเป็นลูกรัง โครอล (coral) คอรทไซติก (quartzitic) และ volcanic gravels กราฟแสดงสมการเหล่านี้อยู่ในรูปที่ 3.2



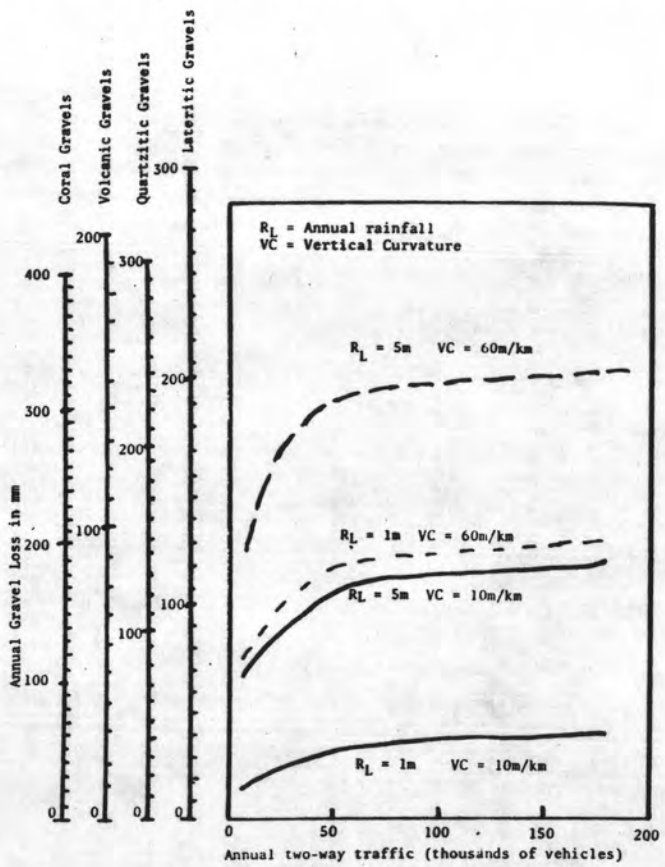
รูปที่ 3.2 Depth of loose material for granular surface roads in Kenya

จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่า ความหนาของดินหลวมเกิดขึ้นมากในระยะเริ่มแรกหลังจากที่ทำการปาดคลื่น หลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงจนถึงระดับหนึ่งจะค่อนข้างคงที่ สำหรับถนนผิวลูกรัง และผิว coral gravel ในประเทศเคนยา เกือบ 95% ของค่าที่วัดได้จะมีค่าความหนาของดินส่วนที่หลวมตัวต่ำกว่า 1 มม. หลังจากที่ปริมาณจราจรเป็น 200 คัน/วัน ถึงแม้ว่าที่เวลาหลังจากทำการปาดคลื่นเสร็จใหม่ ๆ มีค่าถึง 9 มม. จากการศึกษาในประเทศบราซิลได้แสดงให้เห็นว่า ความหนาของดินส่วนที่หลวมตัวภายในช่วง 2 เมตร จากขอบทางจะมากกว่าบริเวณอื่น ๆ ตามแนวตัดขวางของถนน

การสูญหายของกรวด เป็น distress ที่สำคัญอย่างหนึ่งของถนน granular-surfaced ความจำเป็นที่จะต้องทำการเสริมผิวด้วยกรวด ลูกรัง อาจจะมองได้ว่า

เหมือนกันความจำเป็นของถนนคุณภาพสูงที่จะต้องเสริมผิวลาดยางใหม่ การสูญหายของกรวดเป็นสิ่งที่สำคัญเพราะว่าจะทำให้ถนนมีอายุใช้งานน้อยลง หรือเร่งให้การวิบัติของถนนเกิดเร็วขึ้น การสูญหายของกรวด จะทำให้ความหนาประสิทธิผลของถนนน้อยลง ดังนั้น stress ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างทางจึงเพิ่มขึ้นเกิดการวิบัติ การที่ความหนาลดลงเช่นนี้จะนำไปสู่สภาพที่ถนนมีอายุใช้งานน้อยกว่าที่สมมุติไว้

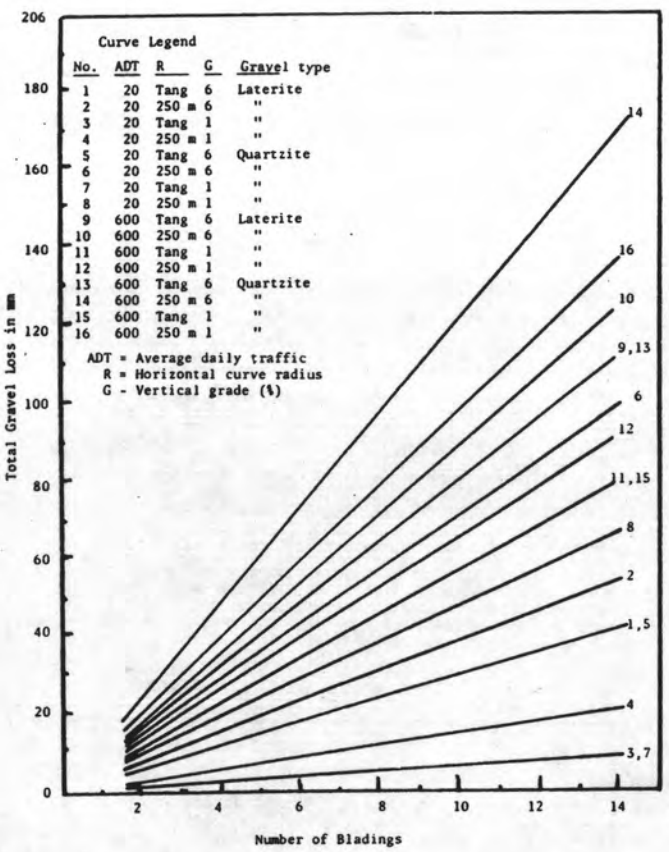
จากงานวิจัยในเรื่องถนน granular-surfaced ในประเทศเคนยาได้สร้างสมการทำนายการสูญหายของกรวดสำหรับวัสดุที่แตกต่างกัน จะขึ้นกับปริมาณจราจรรายปี ปริมาณน้ำฝนรายปี (R_L) และโค้งดิ่ง (VC) ดังแสดงในรูปที่ 3.3 เช่น สำหรับ volcanic gravel คาดว่าจะมีการสูญหายของกรวด 95 มม. เมื่อปริมาณจราจรเป็น 400 คัน/วัน หรือ 146,000 คัน/ปี ปริมาณฝน 1 ม./ปี และโค้งดิ่ง 6% หรือ 60 ม./กม.



รูปที่ 3.3 Gravel loss relationships for Kenya conditions

รูปที่ 3.3 ชี้ให้เห็นว่าปริมาณฝน ชนิดของวัสดุ และโค้งดิ่งเป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญซึ่งมีผลต่อการสูญหายของกรวด โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรณีที่ปริมาณจราจรต่อวัน (ADT) มากกว่า 150 คัน/วัน หรือ 50,000 คัน/ปี

จากการศึกษาของประเทศบราซิลได้สร้างสมการทำนายการสูญหายของกรวดสำหรับดิน 2 ประเภท (ลูกรัง และ quartzitic gravels) โดยอัตราการสูญหายของกรวดขึ้นอยู่กับปริมาณจราจร โค้งราบ ความลาดชันตามยาว และจำนวนครั้งของการปาดคลื่นต่อปี ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.4 จะเห็นว่า อัตราการสูญหายของกรวดบางกรณีคล้ายคลึงกับที่ผลการศึกษาในประเทศเคนยา เช่น ที่จำนวนครั้งของการปาดคลื่น 6-12 ครั้งต่อปี (ปริมาณฝนตกโดยเฉลี่ยในประเทศเคนยาเป็น 1,100 มม./ปี)



รูปที่ 3.4 Gravel loss relationships for Brazilian conditions

จากการศึกษาทั้งสองแสดงให้เห็นว่า ชนิดของวัสดุ ปริมาณจราจร และโค้งดิ่งเป็นแฟคเตอร์ร่วมที่มีผลต่ออัตราการสูญหายของกรวด อย่างไรก็ตาม สมการของบราซิลไม่มีเทอมปริมาณฝนเหมือนกับสมการของเคนยา สมการของบราซิลมีทั้ง จำนวนครั้งของการปาดคลื่นและโค้งราบ

การเสียรูปของผิวทางสามารถเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ แต่สาเหตุที่สำคัญคือการเสียรูปของโครงสร้าง อันเนื่องมาจากแรง shear การเสียรูปของผิวทางอาจจะเกิดจากสาเหตุของน้ำหนักกระทำซ้ำของยวดยาน และดินโครงสร้างเคลื่อนตัวลงไปในดิน subgrade

ความแตกต่างทางด้านคุณสมบัติวัสดุและเทคนิคในการก่อสร้าง จะทำให้การเสียรูปของถนนที่จุดต่าง ๆ ไม่สม่ำเสมอ ซึ่งเป็นผลให้ระดับของผิวทางเปลี่ยนแปลง ดังนั้นความสม่ำเสมอทางด้านคุณสมบัติของวัสดุ และการก่อสร้างเป็นแฟคเตอร์โดยตรงที่มีผลต่อความขรุขระของถนน

ลูกคลื่นบนถนนเป็นแฟคเตอร์ของความขรุขระที่สำคัญสำหรับถนน granular-surfaced ลูกคลื่นจะเกิดขึ้นมากถ้าความลาดชันตามยาวมากขึ้น

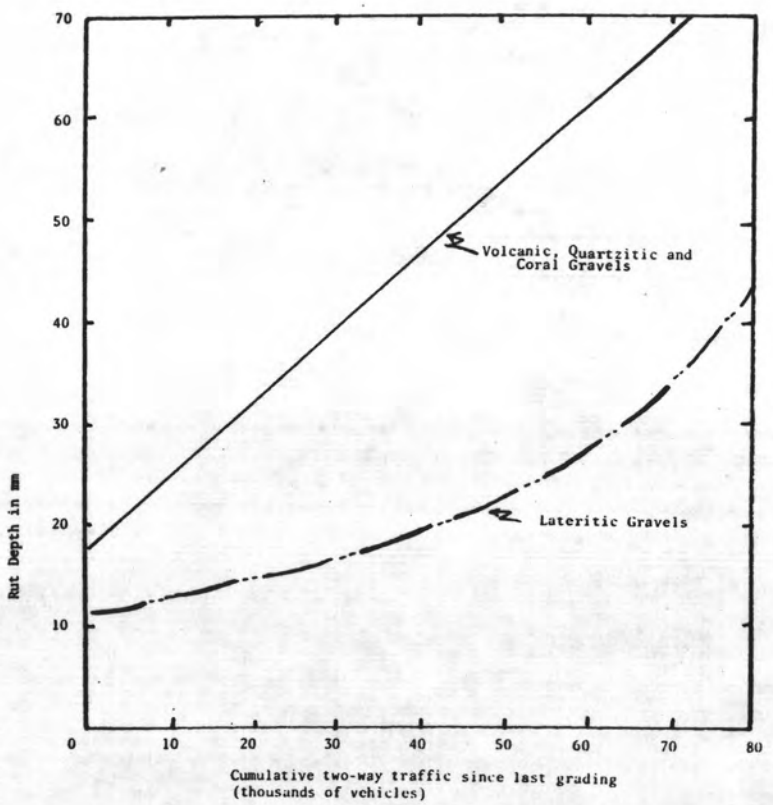
การสึกกร่อนของดินผิวทางโดยปกติเกิดขึ้นเมื่อมีการสูญเสียดินประสาน และเมื่อฝนตกมาก การให้ความสนใจในเรื่องความลาดเอียงตามขวาง และการระบายน้ำออกจากถนนเป็นสิ่งที่จำเป็นมาก เพื่อที่จะทำให้การควบคุมความเสียหายจากการสึกกร่อนกระทำได้ดีที่สุด

การเกิดขึ้นของหลุมในถนนก็คือ ลักษณะของการสึกกร่อนแบบหนึ่งซึ่งเกิดขึ้นเป็นหย่อม ๆ เมื่อยวดยานแล่นผ่านมากขึ้น ดินส่วนที่หลวมตัวจะปลิวหลุดไป พื้นที่และความลึกของหลุมจึงขยายเพิ่มมากขึ้น หากปราศจากการบำรุงรักษาที่เหมาะสมแล้ว ความเสียหายลักษณะนี้อาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดอันตรายอย่างมากต่อยวดยานที่ผ่านไปมาได้

การเกิดรอยแตกร้าวในชั้นผิวทางเป็นสภาพแสดงถึงการวิบัติเพราะว่าวัสดุโครงสร้างทางนี้ไม่สามารถรองรับน้ำหนักจากยวดยานได้แล้ว น้ำผิวทางจะซึมลงไปข้างล่างตามรอยแตกร้าว และเร่งให้เกิดการเสียรูปขึ้นในบริเวณข้างเคียงจุดแตกร้าว ถ้าไม่มีการลาดยางรอยแตกร้าวก็จะขยายใหญ่ขึ้น เชื่อมต่อกับรอยแตกข้างเคียงกลายเป็นหลุม ถ้าถึงจุดนี้ควรที่จะทำการถมปิดหลุมเหล่านี้เสีย

แบบจำลองสำหรับทำนายการเกิดร่องตามแนวรอยล้อรถได้สร้างขึ้นมาจากการศึกษาถนน granular-surfaced ในประเทศเคนยาและบราซิล โดยทั่ว ๆ ไปตามแนวรอยของล้อรถด้านนอกบริเวณใกล้ ๆ กับไหล่ทางจะเกิดเป็นร่องลึกกว่าตามแนวรอยล้อรถด้านใน จากการศึกษาในประเทศบราซิลพบว่า ความลึกร่องล้อเฉลี่ยตามแนวรอยล้อรถด้านนอกมีค่ามากกว่าด้านในประมาณ 9 เปอร์เซนต์ ความลึกของร่องล้อที่อ้างถึงโดยปกติมักจะ

หมายถึงร่องล้อตามแนวรอยล้อรถด้านนอก การศึกษาในประเทศเคนยาได้สร้างสมการคำนวณหาความลึกร่องล้อ สำหรับ granular-surface 2 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 Rut-depth prediction for gravel-surface roads in Kenya

การศึกษาในประเทศบราซิล ใช้ 4-ff straightedge วัดความลึกร่องล้อของถนนลูกรัง และถนน quartzitic gravel-surfaced สมการทำนายค่าความลึกร่องล้อที่สร้างขึ้นมาพบว่า ความลึกร่องล้อจะขึ้นอยู่กับชนิดของกรวด สภาพอากาศ (เปียกชื้น หรือแห้ง) โค้งดิ่งและโค้งราบ ปริมาณจราจรต่อวัน และปริมาณจราจรสะสมนับตั้งแต่วันที่ได้มีการปาดคลื่นถนน ตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นถึงการทำนายค่าความลึกร่องล้อสำหรับสภาพแวดล้อมในบราซิลบางแห่ง

3.3 การให้บริการและพฤติภาพของถนน (Serviceability and Performance Concepts)

ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว serviceability และ performance ของถนน ถูกใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการให้คำจำกัดความของการวิบัติเชิงหน้าที่ใช้งาน นอกจากนี้แล้ว servicea bility ที่ตรวจวัดได้สามารถใช้เป็นเครื่องมือในการควบคุมคุณภาพในการก่อสร้าง ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการประเมิน performance ของถนนในช่วงที่ถนนยังมีอายุไม่ถึงอายุออกแบบใช้เป็นพื้นฐานในการจัดลำดับความสำคัญของการบำรุงรักษาถนน

วิธีการที่ใช้ประเมินหาค่า serviceability มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ ๆ คือ วิธีที่หนึ่ง อาศัยหลักการของ Present Serviceability Ratings (PSR) ซึ่งการใช้คนกลุ่มหนึ่งไปตรวจสอบสภาพของถนนแล้วให้คะแนน เมื่อสังเกตุสภาพของถนนด้วยตา พร้อมทั้งขับรถแล่นผ่านถนนที่ต้องการตรวจสภาพ ผู้สำรวจแต่ละคนจะให้คะแนนถนนแต่ละสายเป็นค่า serviceability ซึ่งโดยทั่ว ๆ ไป มีค่าตั้งแต่ 0 ไปจนถึง 5 ถ้า serviceability มีค่าเท่ากับ 1 หรือต่ำกว่า แสดงว่าถนนสายนั้นถึงจุดวิบัติแล้ว ถ้า serviceability มีค่าตั้งแต่ 4-5 แสดงว่าถนนสายนั้นค่อนข้างจะดี มีผิวทางเรียบ และปลอดภัยสำหรับใช้งาน ค่า PSR สำหรับถนนใด ๆ ได้จาก การเอาคะแนนของผู้สำรวจทุกคนในทีมสำรวจมาหาค่าเฉลี่ยจะได้เป็นค่า PSR

วิธีที่สอง ในการหาค่า serviceability ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันทั่วไป อาศัยหลักการ Present Serviceability Index (PSI) ซึ่งคำนวณได้จากตัวเลขที่ได้จากการตรวจวัดในสนาม คือค่าความขรุขระ การแตกร้าว และร่องล้อ โดยสร้างสูตรคำนวณขึ้นมาเพื่อเปลี่ยนค่าความขรุขระ การแตกร้าว และร่องล้อ ให้เป็นค่า PSI สูตรคำนวณหาค่า PSI มีหลายสูตร ซึ่งทุกสูตรจะมีลักษณะเหมือนกันอยู่อย่างหนึ่งคือ 90% ของค่า PSI มาจากค่าความขรุขระ ดังนั้นในทางปฏิบัติทั่ว ๆ ไปจึงถือว่าค่า PSI แปรผกผันกับค่าความขรุขระ กล่าวคือ ถ้าถนนมีความขรุขระน้อยจะมีค่า serviceability สูง ถนนที่มีความขรุขระมากจะมีค่า serviceability ต่ำ

สิ่งที่เป็นตัวชี้ค่าความขรุขระของถนนตามแนวความคิดของผู้ใช้ทางคือ profile ของผิวทาง ความเร็ว และลักษณะของรถ แฟคเตอร์เหล่านี้ที่สำคัญคือ profile ของถนนและความเร็ว profile ของถนนจะขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงตามยาว การเปลี่ยนแปลงตามขวาง และแนวทางราบของถนน ในจำนวนทั้งสามอย่างนี้ตัวที่มีความสำคัญคือ การเปลี่ยนแปลงตามยาว และอิทธิพลต่อการทำให้ถนนเกิดความขรุขระ

ตารางที่ 3.2 Predicted rut depth (mm.) in outer wheel paths for Brazilian conditions

Type Season	Vertical Curvature (%)	Lane	Horizontal Curvature (%)	Lateritic Wearing Course						Quartzitic Wearing Course					
				20 ADT			600 ADT			20 ADT			600 ADT		
				Cumulative Traffic			Cumulative Traffic			Cumulative Traffic			Cumulative Traffic		
				0	2000	4000	0	30 000	60 000	0	2000	4000	0	30 000	60 000
Dry	6	Downhill	Tangent	4	7	12	10	18	31	9	15	24	22	26	32
			250	7	9	11	10	15	23	9	11	14	13	14	16
		Uphill	Tangent	4	7	12	10	18	31	9	19	41	22	30	43
			250	7	9	11	10	15	23	9	15	24	13	17	20
	1	Downhill	Tangent	4	7	12	10	18	31	9	15	24	22	26	32
			250	7	9	11	10	15	23	9	11	14	13	14	16
		Uphill	Tangent	4	7	12	10	18	31	9	19	41	22	30	43
			250	7	9	11	10	15	23	9	15	24	13	17	20
Wet	6	Downhill	Tangent	7	14		28	51		8	55		32	79	
			250	11	2		26	16		8	6		20	16	
		Uphill	Tangent	7	14		28	51		8	72		32	90	
			250	11	2		26	16		8			20	19	
	1	Downhill	Tangent	11	2		43	27		13	10		49	41	
			250	18	0		41	8		13	1		31	8	
		Uphill	Tangent	11	2		43	27		13	13		49	47	
			250	18	0		41	8		13	1		31	10	

จากตารางที่ 3.2 แสดงให้เห็นว่า ในช่วงฤดูร้อนร่องล้อเกิดขึ้นในอัตราค่อนข้างต่ำ อย่างไรก็ตาม ในช่วงฤดูฝนจะพบว่า ร่องล้อเกิดขึ้นมาก ทั้งนี้อาจจะเนื่องมาจากอิทธิพลของความชื้นที่มีผลต่อความแข็งแรงของวัสดุโครงสร้างทาง วิศวกรที่ทำการศึกษาเรื่องร่องล้อได้กล่าวว่า ยังมีแฟคเตอร์ที่สำคัญอีก 2 แฟคเตอร์ ที่มีอิทธิพลต่อการเกิดร่องล้อ แต่ไม่ได้รวมไว้ในสมการทำนายที่กล่าวมาแล้ว คือ ชนิดของดิน subgrade และชนิดของรถ ถ้าจะให้สมการทำนายค่าความลึกร่องล้อ มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ควรที่จะรวมแฟคเตอร์ทั้งสองนี้เข้าไปในสมการด้วย

อุปกรณ์และเครื่องมือหลายอย่าง และขบวนการสำหรับตรวจวัดค่าความขรุขระของถนน

1. Rod และการสำรวจระดับ
2. Profilograph (rolling straightedge)
3. Profilometers (slope and CHLOE)
4. BPR roughmeter และ TRRL bump integrator
5. Surface Dynamics (SD) และ General Motors profilometer
6. Car road meters (PCA และ Mays Meter)

จากการศึกษาเมื่อเร็ว ๆ นี้ ในประเทศโบลิเวีย เคนยา และบราซิล ซึ่งทำการทดลองบนโครงการใหญ่ ชี้ให้เห็นว่า ค่าความขรุขระสำหรับถนนรถน้อย ตารางที่ 3.3 แสดงค่าความขรุขระที่อ่านได้จากเครื่องวัดความขรุขระชื่อ Mays meter (a portable car road meter) ซึ่งวัดได้จากถนน surface-treated และถนนกรวดในประเทศโบลิเวีย ค่าที่วัดได้มีหน่วยเป็น มิลลิเมตรของความขรุขระต่อกิโลเมตร (หรือนิ้วต่อไมล์) ที่สำคัญคือค่านี้แสดงค่าความขรุขระที่สรุปแล้ว (ซึ่งเบี่ยงเบนไปจากระนาบราบจริง) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของถนน

จะเห็นได้ว่า สำหรับ surface-treated roads ค่าความขรุขระ (R) แปรเปลี่ยนอยู่ระหว่าง 800-3,000 มม./กม. สำหรับถนนกรวดอยู่ระหว่าง 4,400-16,000 มม./กม. ผลการศึกษาในโบลิเวีย ค่า R สูงสุดของ granular-surfaced section ประมาณ 22,000 มม./กม. ผลการศึกษาในเคนยา การวัดค่าความขรุขระใช้เครื่องมือของ TRRL ซึ่งคล้ายคลึงกับ BPR roughometer สำหรับถนนกรวดพบว่า ค่าความขรุขระอยู่ระหว่าง 2,200-20,600 มม./กม. จึงสรุปได้ว่า ถนนกรวดที่มีคุณภาพอยู่ในขั้นดีมีค่าความขรุขระประมาณ 5.000 มม./กม. ในขณะที่ถนนกรวดที่มีคุณภาพเลวมีค่าความขรุขระตั้งแต่ 10,000 มม./กม. ขึ้นไป

ตารางที่ 3.3 Typical road roughness values for Bolivian roads

R(mm./km.)*		R(mm./km.)*	
Surface-Treated Roads	Gravel-Surfaced Roads	Surface-Treated Roads	Gravel Surfaced Roads
927	8776	2997	8179
1029	12751	1245	8001
813	9855	1067	10820
1803	12649		4394
2718	14986		15596

* Mays meter roughness values

สำหรับถนนกรวดในช่วงที่เป็นฤดูฝนและฤดูร้อนจะวัดค่าความขรุขระแตกต่างกันมาก ผลการศึกษาในประเทศโบลิเวียตามตารางที่ 3.4 แสดงให้เห็นชัดเจนว่า ความขรุขระของถนนในฤดูร้อนสูงกว่าในฤดูฝน ดังนั้นเมื่อจะทำการวัดค่าความขรุขระของถนนถึงควรพิจารณาถึงอิทธิพลของสภาพอากาศด้วย (ปริมาณฝนตก)

ตารางที่ 3.4 Seasonal climatic influence on roughness

Dry Season R* (mm./km.)	Wet Season R* (mm./km.)	Roughness change(%)
8776	5837	-33
7500	3795	-49
12751	4621	-64
7140	3385	-53
9855	7184	-27
14986	5866	-61
8179	7164	-12
7990	5811	-27
5610	5662	+ 1

ตารางที่ 3.4 (ต่อ)

Dry Season R* (mm./km.)	Wet Season R* (mm./km.)	Roughness change(%)
10820	6201	-43
4394	3774	-14

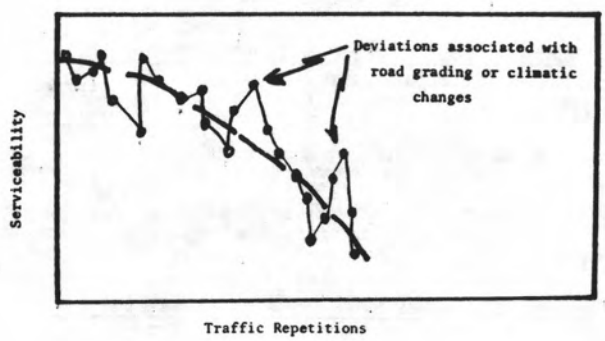
* May meter roughness values

การปาดผิวเป็นงานหลักของการบำรุงปกติ สำหรับถนนกรวดผลของการปาดผิวต่อความขรุขระปกติมีผลค่อนข้างมาก จากการศึกษาต่าง ๆ ชี้ให้เห็นว่า ถนนชนิดไม่ลาดผิวจะมีค่าความขรุขระเท่ากับเมื่อก่อนที่จะทำการปาดผิวภายในเวลา 2-3 สัปดาห์ ตารางที่ 3.5 แสดงผลของการปาดผิว

ตารางที่ 3.5 Effect of grading on roughness

Section	May Meter Roughness (mm./km.)		Time
	Before Grading	After grading	
1	17272	8306	same day
		9627	24 h
		8255	48 h
		18288	20 days
2	4318	2540	same day
		3962	24 h
		10262	20 days
3	13843	8839	same day
		12929	20 days

ผลของการปาดผิวและฤดูกาลต่อค่าความขรุขระ หรือ serviceability สามารถทำให้เกิดการเบี่ยงเบนได้อย่างมาก (ค่าเฉลี่ยของเส้น serviceability traffic relationship เบี่ยงเบนไป) ดังแสดงในรูปที่ 3.6

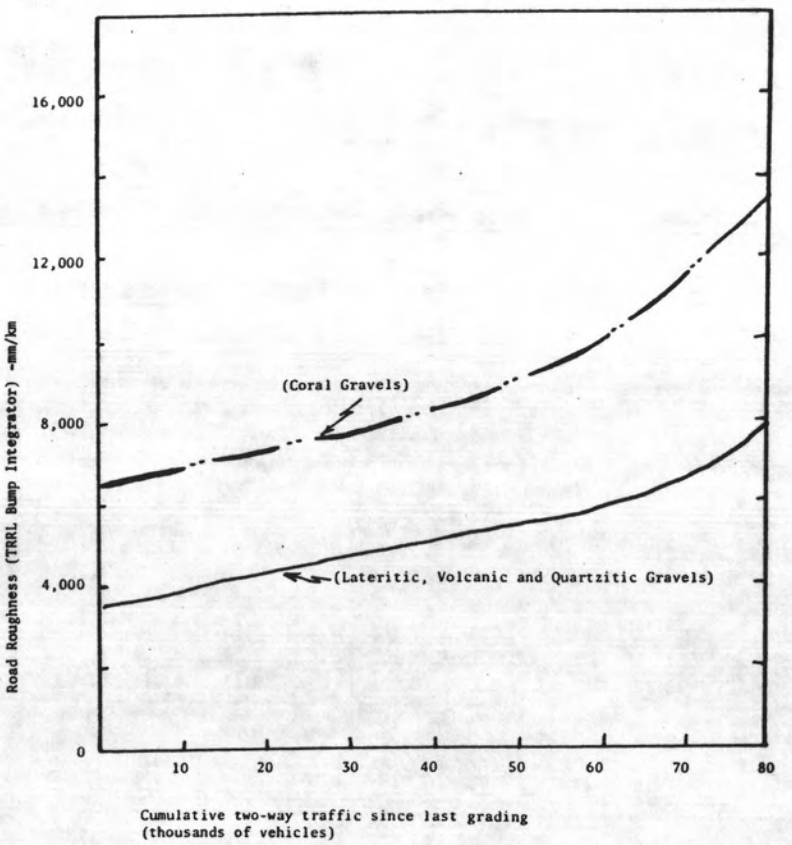


รูปที่ 3.6 Variations on low volume road serviceability

การทำนายค่าความขรุขระถนน
(Prediction of Road Roughness)

จากการศึกษาทั้งในประเทศเคนยาและประเทศบราซิลได้พัฒนาสมการสำหรับทำนายค่าความขรุขระของถนน การศึกษาในประเทศเคนยาได้ใช้เครื่องมือที่เรียกว่า TRRL bump integrator device ส่วนการศึกษาในประเทศบราซิลใช้เครื่องมือที่เรียกว่า General Motors profilometer

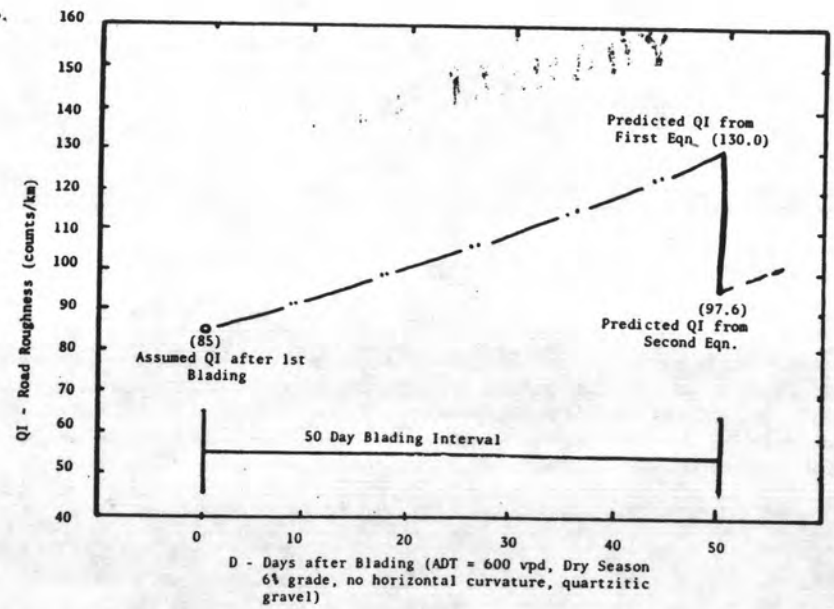
การศึกษาในประเทศเคนยาสร้างสมการแยกกันสำหรับถนนที่ดินผิวทางแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 Road roughness relationship with traffic for Kenya conditions

การศึกษาในประเทศบราซิลอาศัยข้อมูลที่ได้จากการวัดโดย General Motors Profilometer วัดค่าออกมาต่อระยะทาง 1 กิโลเมตร ซึ่งมีหน่วยเป็น quarter-car index (QI) การเปรียบเทียบของ QI โดยทั่ว ๆ ไป สำหรับถนนแอสฟัลติกคอนกรีต

ผิวเรียบที่สุดเพิ่งก่อสร้างเสร็จใหม่ ค่า QI น้อยกว่า 30 count/km. ได้มีการสร้างสมการถดถอยขึ้นมา 2 สมการแตกต่างกัน สมการที่หนึ่งทำนายค่าความขรุขระของถนนว่าเป็นฟังก์ชั่นกับเวลาในช่วงทำการปาดคลื่น ได้เป็นค่าความขรุขระ ณ เวลาที่ทำการปาดคลื่นเสร็จ ส่วนสมการที่สองทำนายค่าความขรุขระหลังการปาดคลื่น ลักษณะทั่ว ๆ ไปของสมการทั้งสองแสดงดังในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 Predicted change in roughness with time

ความแตกต่างที่สำคัญระหว่างการศึกษาในประเทศเคนยา และประเทศบราซิล เป็นเรื่องของจำนวนแฟคเตอร์ที่มีผลต่อค่าความขรุขระของถนน สมการที่ได้จากการศึกษาในประเทศบราซิลทำนายว่า การเพิ่มขึ้นของความขรุขระตามระยะเวลาในช่วงฤดูร้อนจะสูงกว่าการเพิ่มขึ้นในช่วงฤดูฝน ส่วนการศึกษาในประเทศเคนยาพบว่า ปริมาณฝนตกไม่มีอิทธิพล เช่นผลการศึกษาในประเทศบราซิล (ถึงแม้ว่าปริมาณฝนตกจะน้อยกว่า 400 มม.) โดยทั่ว ๆ ไป แฟคเตอร์สำคัญที่มีอิทธิพลต่อความขรุขระของถนนคือ ชนิดของกรวด ปริมาณจราจร แนวทาง สิ่งแวดล้อม และวิธีการบำรุงรักษา

3.4 แนวความคิดในการออกแบบความหนาถนน

สำหรับถนนชนิดลาดผิว (Paved Road หรือ Surfaced Road) ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่ ผิวทาง (Wearing Surface) พื้นทาง (Base Course) และ Subgrade ชั้น

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผิวทางจะต้องมีคุณสมบัติในการต้านทานต่อการสึกกร่อนจากล้อรถและต้องมีเสถียรภาพเพียงพอไม่เลื่อนไถลเมื่อมีแรงกระทำจากยวดยานต่าง ๆ ส่วนชั้นพื้นทางนั้นทำหน้าที่เป็นตัวกระจายน้ำหนักจากล้อรถแล้วถ่ายลง Subgrade ซึ่ง Stress ที่เกิดขึ้นนี้จะต้องไม่ทำให้เกิด excessive deformation ในชั้นฐานรองรับ (Foundation layer) ชั้นรองพื้นทางจะใช้กับถนนในบริเวณที่มี Frost Action รุนแรงหรือกรณี subgrade เป็นดินอ่อน subgrade ถือเป็นชั้นฐานรองรับของถนนซึ่งจะเป็นตัวรับน้ำหนักที่ถ่ายจากถนนทั้งหมด หลักการพื้นฐานของ flexible pavement ความหนาของวัสดุโครงสร้างทางชั้นต่าง ๆ คือ รองพื้นทาง พื้นทาง และผิวทาง รวมกันจะต้องมากพอที่จะทำให้ stress ที่เกิดขึ้นใน subgrade ลดต่ำลงจนไม่ทำให้เกิด excessive deformation หรือ excessive displacement ขึ้นใน subgrade กรณีของถนนชนิดไม่ลาดผิวก็ยึดหลักแนวความคิดดังกล่าวเช่นเดียวกัน โดยชั้นพื้นทางจะทำหน้าที่เป็นทั้งผิว พื้นทาง และรองพื้นทาง

องค์ประกอบ สำคัญต่าง ๆ ที่ใช้ประกอบพิจารณาออกแบบความหนาถนน ได้แก่ น้ำหนักรถ จำนวนครั้งของการกระทำซ้ำของรถ สภาพแวดล้อม คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการก่อสร้างและวิธีการก่อสร้าง

3.4.1 น้ำหนักล้อรถ ระดับความรุนแรงของการทำลายจากยวดยานพาหนะที่มีต่อถนนขึ้นอยู่กับ ขนาดของน้ำหนักรถที่ถ่ายลงล้อแต่ละล้อ และจำนวนครั้งของการกระทำซ้ำ ระดับความรุนแรงของการทำลายจากน้ำหนักรถที่ถ่ายลงล้อที่มีขนาดแตกต่างกันจะมีผลแตกต่างกันอย่างไรค่อนข้างเป็นเรื่องซับซ้อนมาก หลายหน่วยงานนิยมใช้ equivalent factor ซึ่งได้มาจากการทำ AASHTO Road Test

3.4.2 สภาพแวดล้อม ที่มีผลต่อการออกแบบความหนาถนน เช่น ความชื้น อุณหภูมิ เป็นต้น

3.4.2.1 ความชื้น - วัดเป็น moisture content หรือ degree of saturation ผลของความชื้นต่อถนนคือ ทำให้คุณสมบัติของวัสดุโครงสร้างทางเปลี่ยนแปลงไป เช่น เมื่อความชื้นเพิ่มขึ้น ความสามารถในการต้านทานการเกิด deformation จะลดลง ในดินบางชนิด

ถ้าความชื้นเปลี่ยนแปลงอาจทำให้ปริมาตร
ของมวลดินเปลี่ยนแปลงไปด้วย

3.4.2.2 อุณหภูมิ - มีผลต่อการเกิด frost action

3.4.3 การก่อสร้าง วิธีการก่อสร้างเช่น การบดอัดดินจะช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ถนน ระบบการระบายน้ำของถนนจะช่วยในการควบคุมความชื้น

3.5 การกระจาย stress (Fundamentals of stress distribution)

ในอดีต วิธีการออกแบบ flexible pavement ส่วนใหญ่พัฒนาจากแนวความคิดที่ว่าถนนประกอบตัวเป็นโครงสร้าง ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบโครงสร้างทางเพื่อให้สามารถควบคุม stresses อันเกิดจากยวดยานมิให้มีค่าสูงกว่าความแข็งแรงของชั้นต่าง ๆ ของถนน

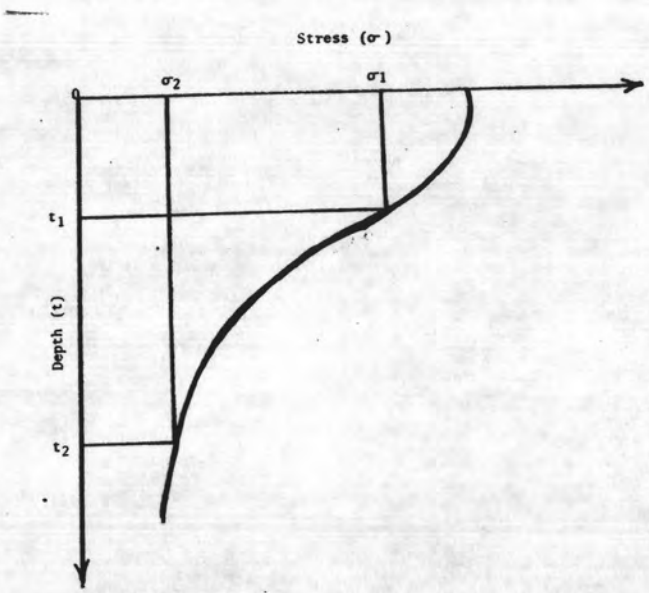
วัสดุแต่ละอย่าง เช่น ดิน ไม้ คอนกรีต หรือเหล็ก มีคุณสมบัติทางกายภาพของมันเองค่าหนึ่ง และสามารถรองรับ stress ที่เกิดขึ้นแต่ละแบบได้แตกต่างกันไป ยกตัวอย่างเช่น เหล็กสามารถรับ tensile stress ก่อนที่จะวิบัติได้สูงกว่าคอนกรีต ดินส่วนใหญ่มีค่ากำลังรับแรงดึงต่ำหรือไม่มีเลย นอกเหนือจากนี้แล้ววัสดุบางอย่างอาจจะเกิดการวิบัติเมื่อค่า tensile stress มีค่ามากกว่าค่า tensile strength เมื่อ compressive stress มีค่ามากกว่า compressive strength หรือเมื่อ shear stress มีค่ามากกว่า shear strength ของมัน

สำหรับดิน subgrade และ unbound granular subbase และ base materials ซึ่งประกอบกันเป็นโครงสร้างทางของถนน flexible pavement โดยปกติการวิบัติจะเป็นแบบ shear failure ซึ่งโครงสร้างทางพังเพราะเกิดการเลื่อนไถลของดิน เหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นเพราะ shear stress ที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าค่า shear strength ของดิน

การเคลื่อนตัวของส่วนที่เกิดการวิบัติจะเคลื่อนตัวต่ำลงหรือออกด้านข้าง และทำให้เกิดการเปลี่ยนรูป หรือร่องล้อขึ้นที่ผิวของวัสดุโครงสร้างทาง ยวดยานแต่ละคันสามารถทำให้ร่องล้อ หรือการเคลื่อนตัวของผิวทางเกิดเพิ่มขึ้นได้ ดังนั้นควรที่จะพิจารณาทั้งชนิดของยวดยาน และจำนวนครั้งของการแล่นผ่านที่เป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้เกิด rutting failure การเกิดร่องล้อของถนนในบางครั้งเรียกว่า repetitive shear failure ซึ่ง

เป็นแฟคเตอร์พื้นฐานในการออกแบบโครงสร้างทาง ท้ายที่สุดเนื่องจากการก่อสร้างถนนอาจจะก่อสร้างโดยใช้วัสดุแตกต่างกันหลาย ๆ ชั้น การวิบัติจึงอาจจะเกิดขึ้นในชั้นใด ๆ ก็ได้

ความสัมพันธ์ทั่วไประหว่าง stress และความลึกภายใต้ถนน flexible pavement แสดงดังรูปที่ 3.9 Stress อันเกิดจากยวดยานมีค่ามากที่สุดที่จุดใกล้ ๆ กับผิวทาง และลดลงอย่างรวดเร็วตามความลึก ที่ความลึก t_1 ค่า stress จากยวดยานเกิดขึ้น σ_1 และที่ความลึก t_2 ค่า stress เป็น σ_2 ถ้ามีการก่อสร้างถนนบนดิน subgrade ที่แข็งแรงมากโดยมีค่าความแข็งแรงมากกว่าหรือเท่ากับ σ_1 แล้ว ความหนาของวัสดุโครงสร้างทางรวมที่ต้องการคือ ควรจะเป็น t_1 หรือกล่าวอีกแบบหนึ่งก็คือที่ความหนาของวัสดุโครงสร้างทางเป็น t_1 หรือมากกว่า ค่า stress ในดิน subgrade มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับกำลังความแข็งแรงของดิน subgrade ในทำนองเดียวกัน ถ้าดิน



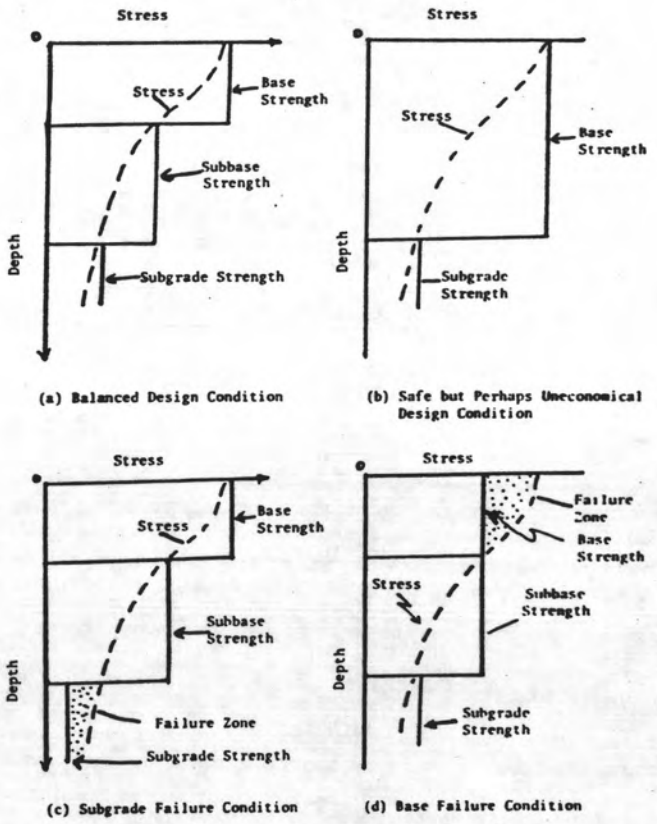
รูปที่ 3.9 Typical distribution of stress with depth for flexible pavement structures

subgrade เป็นดินอ่อนที่มีกำลังความแข็งแรงเป็น σ_2 ความหนาของวัสดุโครงสร้างทางอย่างน้อยที่สุดที่จะต้านทานการเกิด shear failure ใน subgrade ได้ควรจะเป็น t_2 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า ความหนารวมของถนนขึ้นอยู่กับกำลังความแข็งแรงของดิน subgrade ในบริเวณที่จะก่อสร้าง

โดยทั่ว ๆ ไปแล้ว กำลังความแข็งแรงของดิน subgrade เป็นแฟคเตอร์ที่สำคัญมากที่มีผลต่อความหนาของวัสดุโครงสร้างทางสำหรับถนนแบบ flexible pavement

เนื่องจาก stress มีค่าลดลงตามความลึก ดังนั้นวัสดุคุณภาพดีที่สุดควรที่จะอยู่ส่วนบนของชั้นโครงสร้างทางใกล้ ๆ กับผิวทางวัสดุที่มีคุณภาพต่ำควรที่จะอยู่ส่วนล่างใกล้ ๆ กับดิน subgrade

จากแนวความคิดพื้นฐานนี้ ควรที่จะออกแบบชั้นโครงสร้างทางให้มีวัสดุต่าง ๆ วางทับกันจากชั้น subgrade มาถึงผิวทาง โดยที่วัสดุที่อยู่ข้างบนจะมีความแข็งแรงหรือคุณภาพสูงกว่าวัสดุที่อยู่ข้างล่าง ซึ่งแสดงให้เห็นดังในรูปที่ 3.10 (a) ในกรณีความหนาของถนนเหนือดิน subgrade ค่อนข้างมาก จะเป็นการประหยัดกว่า ถ้าหากใช้วัสดุคุณภาพต่ำกว่า (วัสดุรองพื้นทาง) วางทับบนดิน subgrade แล้วมีวัสดุคุณภาพสูงอยู่ข้างบน วัสดุคุณภาพสูงคือ วัสดุพื้นทางสำหรับถนนลาดยาง และใช้เป็นผิวทางของถนนที่ผิวทางแบบ granular การใช้วัสดุคุณภาพสูงทั้งหมดเป็นวัสดุโครงสร้างทางจะไม่ประหยัด ดังแสดงในรูปที่ 3.10 (b), 3.10 (c) และรูปที่ 3.10 (d) แสดงการวิบัติของ subgrade และชั้นพื้นทางตามลำดับ



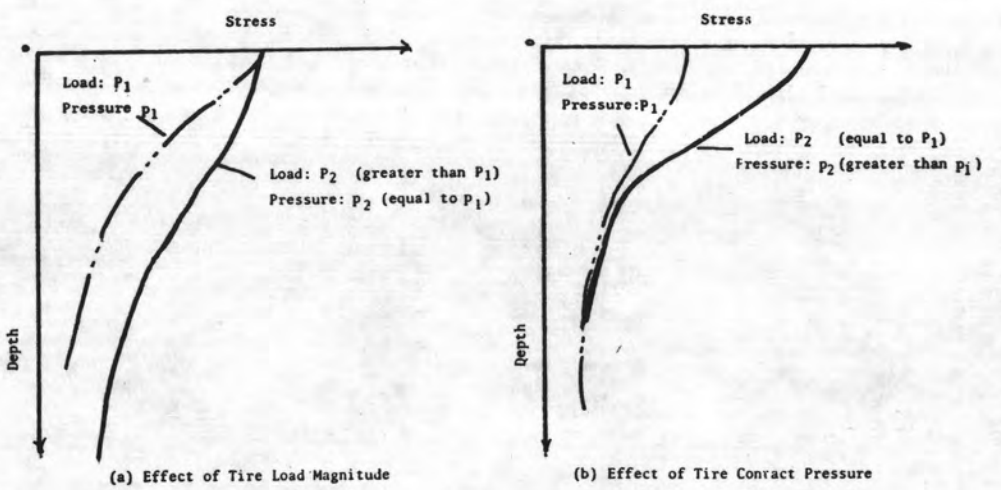
รูปที่ 3.10 Flexible pavements stress-strength considerations

การกระจายของ stress เป็นผลโดยตรงจากลักษณะเฉพาะของน้ำหนักล้อรถ ตามทฤษฎีของ stress ทั้งน้ำหนักรวม (p) และความดันสัมผัส (p) มีอิทธิพลโดยตรงต่อรูปแบบการกระจายของ stress

ในรูปที่ 3.11 แสดงถึงอิทธิพลของพารามิเตอร์ทั้งสองอย่างนี้ที่มีต่อค่า stress รูปที่ 3.11 (a) แสดง stress ที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักล้อรถที่มีขนาดแตกต่างกัน แต่มีความดันลมเท่ากัน ส่วนในรูปที่ 3.11 (b) น้ำหนักของล้อรถเท่ากัน แต่ความดันลมต่างกัน ในรูปที่กล่าวมานี้แสดงให้เห็นถึง

1) อิทธิพลของขนาดน้ำหนักล้อรถต่อโครงสร้างทางชั้นล่าง ดังนั้นการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักล้อรถปกติจะส่งผลให้จำเป็นต้องใช้โครงสร้างทางหนามากขึ้น และบางที่วัสดุชั้นรองพื้นทางจำเป็นต้องใช้วัสดุคุณภาพดีแทน

2) อิทธิพลของขนาดความดันลมซึ่งมีอิทธิพลสูงมากต่อโครงสร้างชั้นบน ดังนั้นถ้าความดันลมของรถเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้จำเป็นต้องใช้วัสดุคุณภาพดีเป็นโครงสร้างชั้นบนติดกับผิวถนน

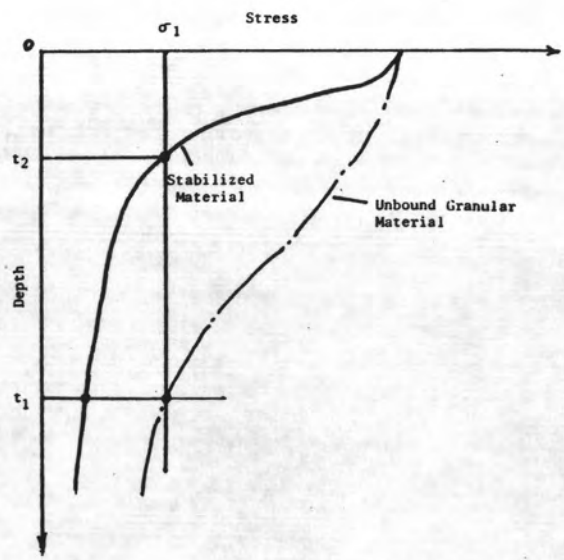


รูปที่ 3.11 Effect of tire Load and Pressure on stress distribution

ดินตามธรรมชาติ และ unbound granular material ที่ใช้เป็นชั้นรองพื้นทางหรือชั้นพื้นทาง สามารถทำให้แข็งแรงยิ่งขึ้นโดยวิธีหนึ่งวิธีใดในจำนวน 2 วิธีหลัก ต่อไปนี้คือ โดยการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธีกายภาพ เช่น การบดอัดให้แน่น หรือโดยวิธีทางเคมี ด้วยการผสมกับปูนขาว ซีเมนต์ หรือบิทูเมน เป็นที่ยอมรับกันว่าการปรับปรุงคุณภาพด้วยวิธี

ทางเคมีจะแพงกว่าวิธีทางกายภาพ และอาจจะไม่เหมาะสมทางเศรษฐกิจ

โดยทั่ว ๆ ไป การผสมวัสดุดังที่กล่าวมาข้างต้นอย่างเหมาะสมจะทำให้ค่า rigidity และกำลังความแข็งแรงของดินเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของค่า rigidity มีแนวโน้มที่จะทำให้ stress ที่ความลึกต่าง ๆ ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 3.12 เช่น ที่ความลึก t_1 ค่า stress ของดินที่ปรับปรุงคุณภาพจะน้อยกว่ากรณี unbound granular material ดังนั้นสามารถคาดหวังได้ว่า ดินที่มีการปรับปรุงคุณภาพจะมีพฤติกรรม และอายุยาวนานกว่ากรณีที่ไม่มีการปรับปรุงคุณภาพ



รูปที่ 3.12 Effect of Stabilization on Stress Distribution

การพิจารณารูปที่ 3.12 อาจดูได้อีกลักษณะหนึ่งคือที่ stress เดียวกัน เช่น o_1 จากรูปแสดงให้เห็นว่า กรณีปรับปรุงคุณภาพจะใช้ความหนา (t_2) น้อยกว่ากรณีไม่ปรับปรุงคุณภาพ (t_1) เมื่อวัสดุทั้งสองเกิด stress ขึ้นเท่ากัน ข้อเท็จจริงนี้ช่วยในการพิจารณาความเหมาะสมของการปรับปรุงคุณภาพดิน

3.6 วิธีการออกแบบความหนาถนนชนิดไม่ลาดผิว

3.6.1 วิธี Precident อาศัยประสบการณ์การก่อสร้างในอดีตมาช่วยในการก่อสร้าง

3.6.2 วิธีจำแนกประเภทของดิน วิธีนี้อาศัยประสบการณ์และวิจารณญานในการออกแบบความหนาและการคัดเลือกวัสดุสำหรับใช้ในการก่อสร้าง

3.6.3 วิธี CBR (California Bearing Ratio) เป็นวิธี empirical ซึ่งจำเป็นต้องทำการทดสอบความแข็งแรงของดินและวัสดุที่จะนำมาใช้ในห้องทดลอง วิธีการทดสอบนี้จะกำหนด crushed rock เป็นวัสดุมาตรฐานและถูกบดอัดภายใต้สภาพแวดล้อมที่กำหนด วัสดุอื่นจะถูกบดอัดภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกับ crushed rock นำค่ากำลังรับแรงกด (bearing power) ของวัสดุเหล่านี้เปรียบเทียบกับค่ามาตรฐานจะได้เป็นค่า CBR สำหรับวัสดุนั้น ๆ

3.6.4 วิธีของ AASHTO เป็นวิธีการที่มีการตรวจวัดความสามารถในการรองรับการจราจรในรูปของ pavement serviceability

ในการศึกษาวิจัยดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้นจะเน้นวิธี CBR เนื่องจากการออกแบบความหนาถนนในเมืองไทยนิยมใช้ ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงเน้นหนักวิธี CBR

3.7 วิวัฒนาการการออกแบบถนนลาดยางในประเทศไทย

การออกแบบและควบคุมการก่อสร้างทางหลวงในประเทศไทยถือได้ว่า ปี พ.ศ. 2498 เป็นจุดเริ่มต้นสำหรับกรมทางหลวงที่ได้มีการปฏิบัติดังเช่นในอารยประเทศ โดยมีวิวัฒนาการเรื่อยมาเป็นระยะดังนี้

3.7.1 พ.ศ. 2498 รัฐบาลของสหรัฐอเมริกาได้ตกลงให้ความช่วยเหลือแก่รัฐบาลไทยในการก่อสร้างทางหลวงแผ่นดินหมายเลข 2 ตอนสระบุรี - นครราชสีมา ซึ่งมีระยะทางตลอดโครงการรวม 163 กิโลเมตร เริ่มก่อสร้างเมื่อวันที่ 27 พฤษภาคม พ.ศ. 2498 ในโครงการนี้รัฐบาลสหรัฐอเมริกาได้ส่งที่ปรึกษามาช่วยดำเนินงาน พร้อมทั้งจัดสรรงบประมาณมาช่วยเหลือด้วย การก่อสร้างดำเนินการโดยวิธีจ้างเหมา

ข้อกำหนดในเรื่องวิธีการก่อสร้างและวัสดุสร้างทางยึดถือมาตรฐานต่าง ๆ ของ AASHTO (The American Association of State Highway and Transportation Officials) หรือ AASHO ในสมัยนั้น มีดังนี้

- Manual of Highway Construction Practices and Methods
- Specifications for Construction Bituminous Surfacing
- Standard Specifications for Highway Bridge

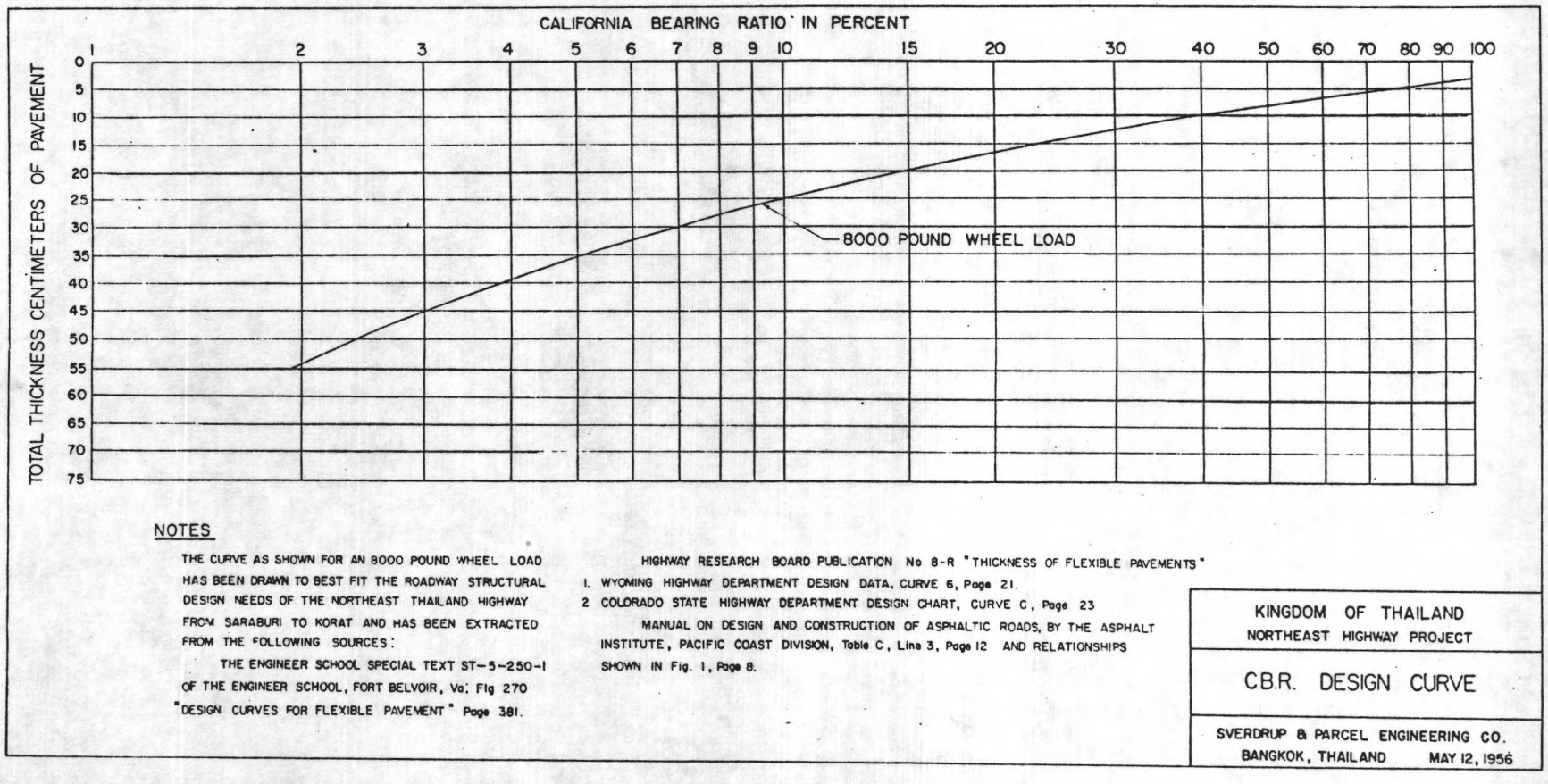
ทางหลวงแผ่นดินสายนี้ได้ออกแบบเป็นผิวลาดยาง (Flexible Pavement) ใช้ค่าตัวแปร 2 ค่าคือ ค่า CBR ของดินคันทาง กับค่าน้ำหนักล้อ (Wheel Load) 8,000 ปอนด์ (ประมาณ 3,600 กิโลกรัม) ซึ่งบริษัทที่ปรึกษาที่ออกแบบนำมาจากวิธีการจากเอกสารต่าง ๆ ดังระบุไว้ในหมายเหตุของรูปที่ 3.13

วิธีการในการออกแบบคือ ทราบค่า CBR ของวัสดุชั้นทางแต่ละชั้น อ่านค่าความหนารวมของวัสดุที่อยู่เหนือชั้นที่ทราบค่า CBR ทำเช่นนี้จะได้ความหนาของวัสดุแต่ละชั้นได้โดยหาผลต่างของความหนารวมที่ได้ในแต่ละครั้ง

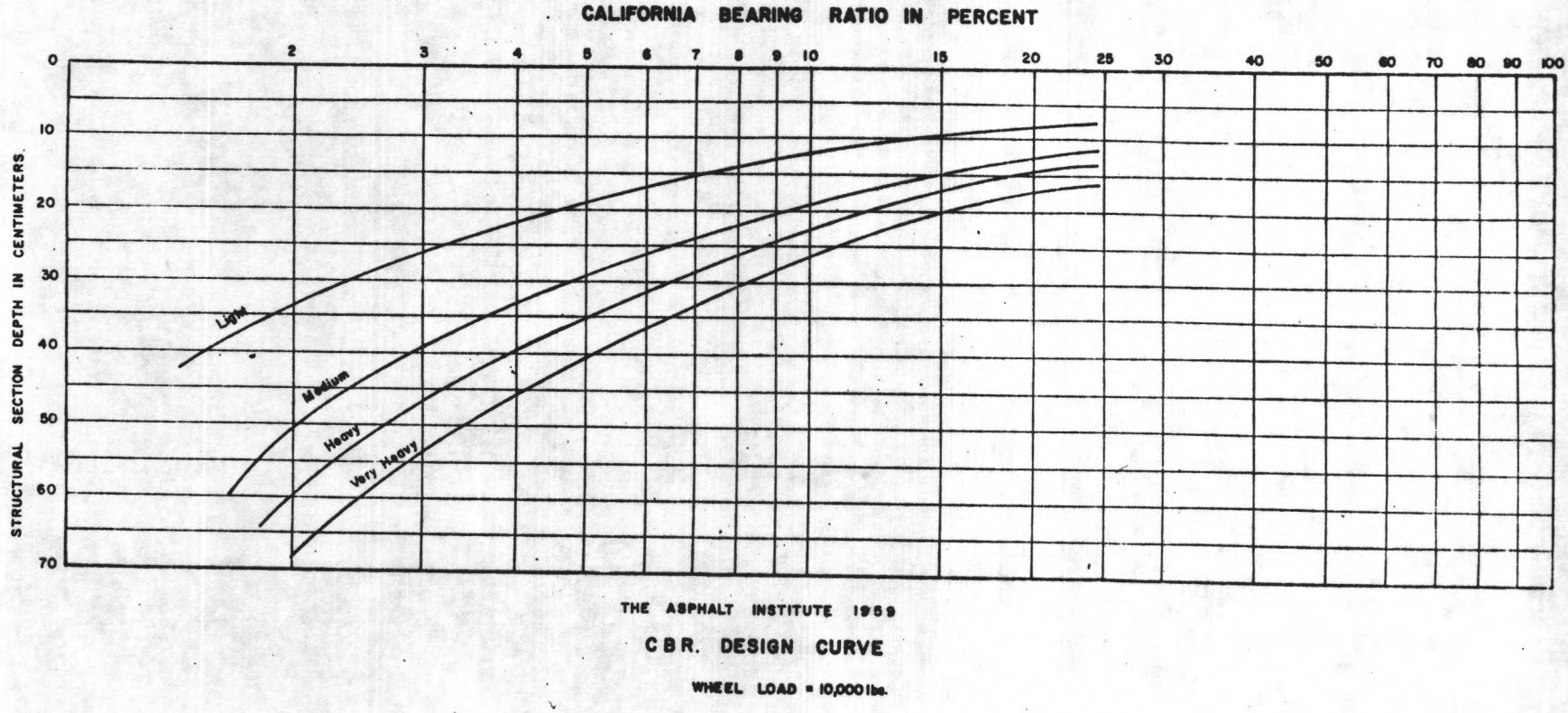
ได้มีการนำวิธีการออกแบบความหนาของชั้นทางวิธีนี้ไปใช้กับทางสายพิษณุโลก - หล่มสัก ในปีต่อมา และกรมทางหลวงได้ใช้วิธีนี้ในการออกแบบสายทางต่าง ๆ จึงมีการเปลี่ยนแปลงในปี พ.ศ. 2502

3.7.2 พ.ศ. 2502 The Asphalt Institute แห่งสหรัฐอเมริกาได้เสนอวิธีการออกแบบความหนาของชั้นทางขึ้นมาใหม่ โดยได้เพิ่มตัวแปรขึ้นมาอีกตัวหนึ่ง นอกเหนือไปจากที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.7.1 ตัวแปรนี้คือ ปริมาณจราจร ซึ่งกรมทางหลวงได้ศึกษาแล้วเห็นว่ามีความเหมาะสมมากกว่าวิธีออกแบบในหัวข้อที่ 3.7.1 จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ โดยกำหนดน้ำหนักลงล้อที่ 10,000 ปอนด์ (4.5 ตัน) แล้วเขียนกราฟขึ้นมาใหม่ดังแสดงในรูปที่ 3.14 กำหนดความหนาของผิวทางเมื่อเป็นแบบแอสฟัลติกคอนกรีต หรือแบบเพนนิเตรชันแมคคาดัม ที่ปริมาณจราจรต่างกัน กำหนดความหนาเปรียบเทียบเมื่อต้องการเปลี่ยนชั้นผิวทางแอสฟัลติกคอนกรีต ให้เป็นชั้นหินคลุกหรือชั้นรองพื้นทาง พร้อมทั้งได้กำหนดการจำแนกระดับของปริมาณจราจรเป็น 4 ระดับ คือ การจราจรน้อย (Light) ปานกลาง (Medium) หนาแน่น (Heavy) และหนาแน่นที่สุด (Very Heavy) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3.6 และ 3.7 ตามลำดับ

ในการออกแบบความหนาของโครงสร้างทางหลวงแบบนี้ไม่ได้ออกแบบให้ได้ความหนาของชั้นทางตามอายุการใช้งานของทางหลวงอย่างเต็มที่ (Design Life)



รูปที่ 3.13 CBR DESIGN CURVE ที่ใช้ในทางสายมิตรภาพ



รูปที่ 3.14 CBR DESIGN CURVE ที่กรมทางหลวงใช้ในปี 2502 [15]

ตารางที่ 3.6 MINIMUM THICKNESS REQUIREMENT OF SURFACE AND BASE COURSES - CM.

TRAFFIC CLASSIFICATION	TOTAL MIN. THICKNESS OF ASPH. CONC., SURFACE AND GRANULAR BASE COURSE.	EQUIVALENT THICKNESS OF VARIOUS TYPE OF SURFACE COURSES	
		ASPHALT CONCRETE	PENETRATION MACADAM
LIGHT	12	3	5
MEDIUM	15	4	6
HEAVY	20	5	7
VERY HEAVY	25	7	-

NOTES: 1 CM. ASPHALTIC CONCRETE = 2 CM. GRANULAR CRUSHED ROCK = 3 CM. GRANULAR SUBBASE (OR GRANULAR SELECTED MATERIAL)

ตารางที่ 3.7 CLASSIFICATION OF TRAFFIC.

TRAFFIC CLASSIFICATION	TRAFFIC DENSITY, MAXIMUM, PER LANE, PER DAY.	
	DAILY VOLUME OF PASSENGER CARS AND LIGHT TRUCKS	DAILY VALUME COMMERCIAL TRUCKS AND BUSES
LIGHT	25	5
MEDIUM	500	25
HEAVY	UNLIMITED	250
VERY HEAVY	UNLIMITED	UNLIMITED

เช่น 20 ปี เพราะต้องลงทุนสูง ดังนั้นจึงมีการออกแบบให้มีอายุเพียง 7-10 ปี (Design Period) เท่านั้น แล้วจึงทำการออกแบบเสริมผิวทางขึ้นในภายหลัง (Stage Construction)

3.7.3 พ.ศ. 2513 The Asphalt Institute ได้เสนอวิธีการออกแบบความหนาของชั้นทางที่เรียกว่า THICKNESS DESIGN, Full-Depth Asphalt Pavement Structures for Highways and Streets ขึ้นมาใหม่ กรมทางหลวงจึงได้นำวิธีการออกแบบดังกล่าวมาดัดแปลงให้เหมาะสมกับการใช้งานในประเทศไทย

วิธีการออกแบบดังกล่าวนี้คำนึงถึง

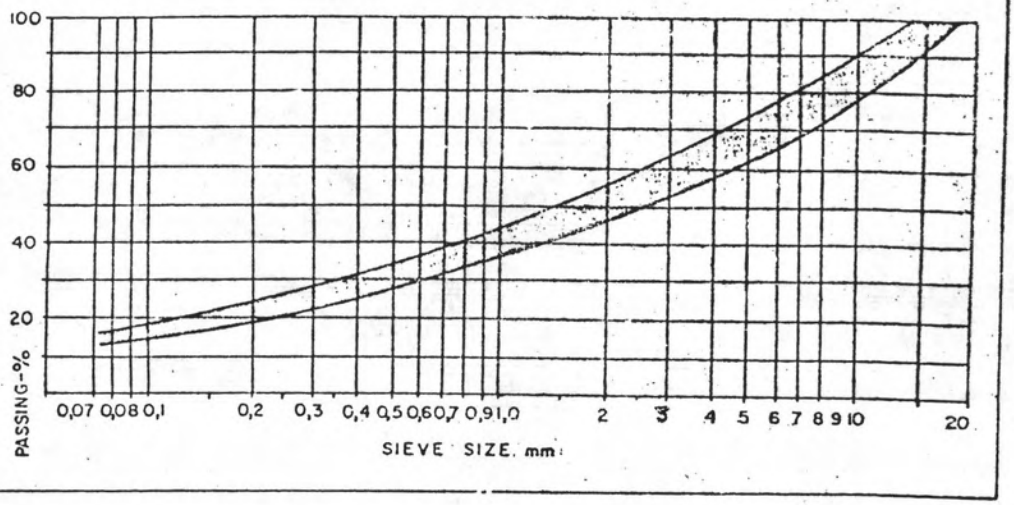
- ช่องจราจรที่คาดว่าจะมีปริมาณของ Equivalent 18,000 pound single axle load มากที่สุด (Design Lane)
- อายุการใช้งานก่อนการเสริมความแข็งแรง (Design Period) ซึ่งเป็นระยะเวลาตั้งแต่เปิดให้มีการสัญจรไปจนถึงการทำการเพิ่มความแข็งแรงครั้งใหม่แก่ทางหลวงสายนั้น
- ค่าเฉลี่ยของปริมาณ Equivalent 18,000 pound single-axle load (DTN หรือ Design Traffic Number)
- จำนวนยานพาหนะที่คาดว่าจะใช้ถนนที่ออกแบบโดยเฉลี่ยต่อวัน (ทั้งสองทิศทาง) ที่ปีแรกที่เปิดการจราจร (IDT)
- และค่าเฉลี่ยต่อวันของ Equivalent 18,000-pound single axle load ซึ่งคาดว่าจะมีใน Design Lane ที่ปีแรกที่เปิดการจราจร (ITN หรือ Initial Traffic Number)

3.8 <u>ถนนชนิดไม่ลาดผิว</u>

The Roads and Waterways Administration of Finland (RWA) ได้ทำการค้นคว้าหาวัสดุที่มีความทนทานต่อการสึกกร่อนอันเนื่องมาจากการเสียดสีของวัสดุเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก และได้ข้อสรุปถึงคุณลักษณะของวัสดุที่ต้องการไว้ดังนี้

- มีวัสดุมวลรวมละเอียดที่มีคุณภาพดี โดยผ่านตะแกรงเบอร์ 200 (ตะแกรงขนาด 0.074 มิลลิเมตร) ซึ่งเป็น Silt และ Clay จำนวน 12-16% ของวัสดุมวลรวมทั้งหมด
- มี Gradation curve อยู่ในช่องที่แสดงไว้รูปที่ 3.15
- สำหรับการปรับแต่งและทำระดับถนน ขนาดของมวลรวมใหญ่ที่สุดต้องไม่เกิน 16 มม.

SIEVE SIZE mm	0.074	0.125	1	2	4	8	12	16	20
PASSING-%	13	15	36	46	57	72	84	85	100
	16	19	44	56	69	86	95	100	100



รูปที่ 3.15 Recommended gradation curve area for gravel road surface material