



## บทที่ 2

### การศึกษาปัญหาการทรุดตัวของคอสะพานในอดีต

#### การศึกษาปัญหาการทรุดตัวของคอสะพานในอดีต

การก่อสร้างถนนที่ผ่านบริเวณที่มีดินอ่อน ปัญหาที่สำคัญอันหนึ่งดังได้กล่าวไว้แล้ว คือ การทรุดตัวของถนน ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอราบเรียบโดยเฉพาะอย่างยิ่งที่บริเวณคอสะพานกับสะพานเอง ทั้งนี้เนื่องมาจากสะพาน ซึ่งเป็นโครงสร้างอิฐระมีเสาช่อมที่ยังไปถึงชั้นดินแข็ง หรือชั้นทราย มีการทรุดตัวเกิดขึ้นน้อยกว่าบริเวณดินถมคอสะพาน ซึ่งถ่ายน้ำหนักโดยตรงให้กับ ดินเดิม หรือแม้จะมีเสาช่อมก็จะมีขนาดที่เล็กกว่ายังอยู่ในชั้นดินที่ตื้นกว่า ส่งผลให้เกิดการทรุดตัวที่แตกต่างกันขึ้นในบริเวณดังกล่าว สร้างความไม่สะดวกและรำคาญใจ ให้กับผู้ใช้รถใช้ถนนเป็นอันมาก

การศึกษาปัญหาการทรุดตัวของบริเวณคอสะพานนั้น ในอดีตได้มีการศึกษาและวิจัยปัญหา และผลกระทบของปัญหาดังกล่าวในประเทศต่าง ๆ อาทิเช่น ในทวีปอเมริกา , ทวีปยุโรป , ทวีปออสเตรเลีย และในทวีปเอเชียทางแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ผลการศึกษาในอดีตบางส่วน ได้ใช้เป็นแนวทางในการแก้ปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันที่เกิดขึ้นในบริเวณคอสะพาน ตัวอย่างของการศึกษาในบางประเทศ จะได้กล่าวในรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 การศึกษาในทวีปอเมริกา

C.W. Jones ( 1959 ) ได้ศึกษาถึงความเรียบของคอสะพานของถนน 4 สาย ใน Los Angeles ซึ่งมีสภาพต่าง ๆ กัน ดังนี้ ถนน San Bernardino Freeway ผ่านพื้นที่ที่เป็นกรวดทรายหยาบ ( coarse granular material ) พบว่าไม่มีการทำให้เกิด patching คอนกรีตสายสะพานเลข ถนน Santa Ana Freeway ซึ่งผ่านหุบเขา ซึ่งมีการกรวดหยาบ ( granular material ) ไปจนถึงดินเหนียว ( clay ) มีการทรุดตัวต่างจากโครงสร้าง 20% ถนน Hollywood Freeway ซึ่งผ่านพื้นที่ที่มี rolling terrain มีดินถมตามหลุมบ่อบางช่วง จะมีการทรุดตัวของคอสะพาน 60% เทียบกับตัวสะพานและถนน

Harbor Freeway ผ่านบริเวณที่มีพหุดินอ่อน ( silt and soft Clay ) เกิดการทรุดตัวคอสะพาน 70% เทียบกับโครงสร้างสะพาน

เมื่อเปรียบเทียบการทรุดตัวของคอสะพานกับสะพานที่วางบนเสาเข็มกับสะพานที่วางบนฐานรากแผ่ ( Spread footing ) จะเห็นได้ว่ามีความแตกต่างกันเล็กน้อย คือ 40% และ 38% ตามลำดับ

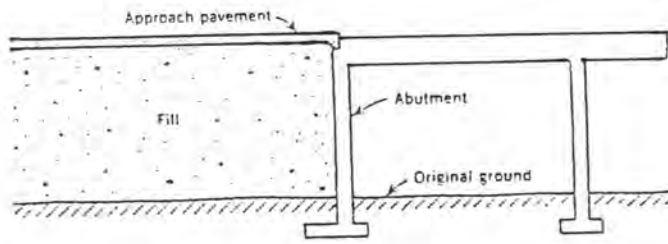
ลักษณะของค่อมแบบเปิดและแบบปิด ( Open end and closed abutment ) ก็มีผลต่อการเกิด เป็นคลื่นที่คอสะพาน จะเกิดมากในแบบค่อมปิด ทั้งนี้เนื่องจากค่อมแบบเปิดมีการบดอัดเสร็จแล้ว จึงสร้างสะพาน ฉะนั้นช่วงเวลาการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำจึงมากกว่าแบบปิด ซึ่งทำการบดอัดคอสะพานภายหลังการสร้างสะพาน ซึ่งถึงเวลาไว้น้อยกว่า

C.W. Jones ( 1959 ) ได้แนะนำการลดการทรุดตัวแตกต่างกันของผิวสะพานกับคอสะพาน ดังนี้

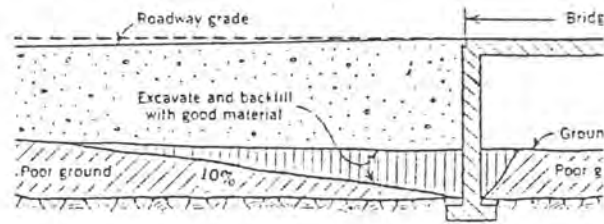
1. ใช้ค่อมแบบเปิดดีกว่าแบบปิด ในกรณีที่ดินฐานรากเดิมไม่ดี
2. กำหนดให้มีการบดอัดคอสะพานก่อนสร้างสะพานและปูผิวทาง เพื่อให้มีช่วงเวลาอัดตัวคายน้ำก่อน
3. ควรใช้วัสดุถมที่มีคุณภาพดี เช่น ทราย , กรวดหรือหินคลุก ที่มีค่าแรงเฉือนสูง
4. กรณีผิวทางเป็นแบบลาดยางมะตอย ควรปูผิวเข้าไปในสะพานด้วย
5. ก่อนก่อสร้างบริเวณคอสะพาน ให้ถมดินสูงกว่าที่เป็นจริง แล้วทิ้งไว้ให้มีการบดอัดตัวแบบคลายน้ำก่อน แล้วจึงก่อสร้าง ( Surcharging )
6. ทำ apron slab ยาวประมาณ 30 ฟุต เพื่อป้องกันการเปลี่ยนระดับที่ปลายสะพาน
7. ขุดเอาดินฐานรากที่ไม่ดีออกแล้วใส่วัสดุถมที่ดีกว่าบดอัดลงไปแทนในบริเวณคอสะพานก่อนเริ่มก่อสร้าง
8. ขยายความยาวของสะพานออกไปเพื่อลดความสูงของดินถมคอสะพานลง

กรณีที่ดินเดิมไม่ดี ( Poor natural material ) เราต้องพิจารณาชั้นดินที่ไม่ดี ดังรูป 2.1 (ค) ถ้าชั้นดินหนาไม่เกิน 5 ฟุต ก็ควรขุดออกและใส่วัสดุถมแทน ดังรูป 2.1 (ข) กรณีที่ชั้นดินไม่ดีหนากว่า 5 ฟุต ก็ไม่เหมาะที่จะขุดออก แต่ใช้วิธีถมน้ำหนักทิ้งไว้ช่วงระยะเวลาหนึ่ง ถ้าดินนั้นมีความซึมได้ต่ำก็ควรทำเป็น apron slab ดีกว่า ปัญหาที่เกิดขึ้นในกรณีต่าง ๆ ดังรูป 2.1 (ง) , 2.1 (จ) , 2.1 (ฉ) เป็นการใส่วัสดุถมที่ไม่ดี

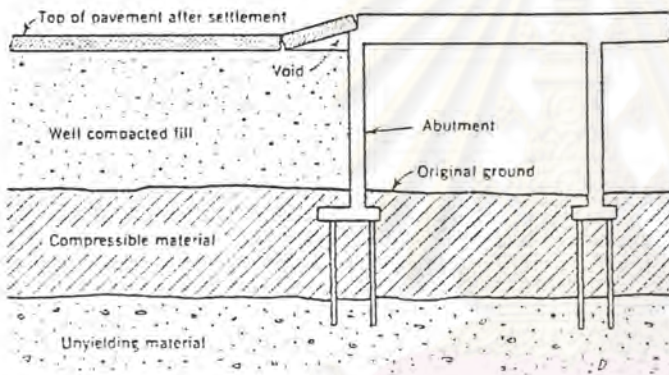




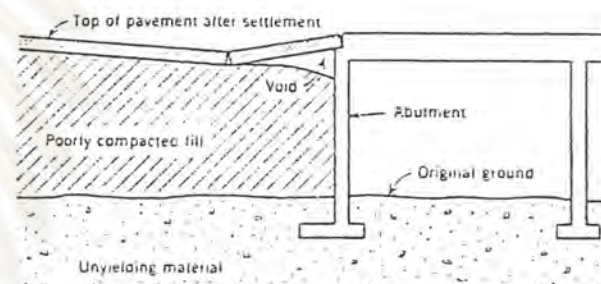
ก. ความไม่สม่ำเสมอที่ปลายสะพาน เนื่องจากการบดอัดโดยไม่ถูกระดับของตัวสะพานจริง แก้ปัญหาโดยทำระดับให้เลยถึงตัวสะพาน เมื่อจะปรับแก้ระดับจากดินถมบดอัดแน่น



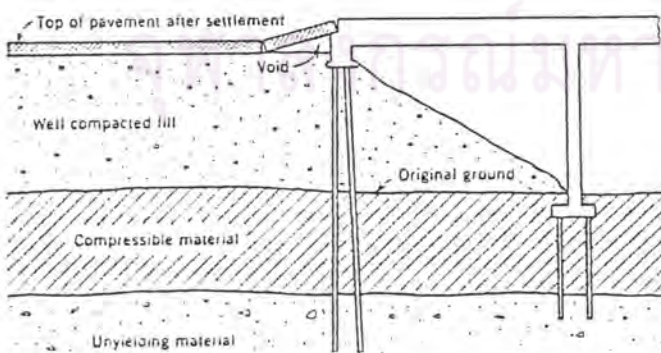
ข. การทรุดตัวที่ต่างกันใกล้ปลายสะพาน สามารถป้องกันได้โดยการเอาดินไม่ต้ออก แล้วใส่วัสดุที่ดีแทน



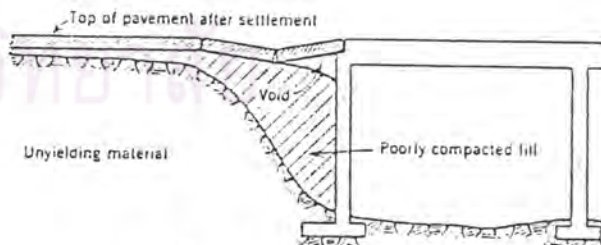
ค. การบดอัดวัสดุที่ตีบนดินที่ยุบตัวทำให้เกิดการทรุดตัวต่างกันที่ปลายสะพาน ซึ่งหลีกเลี่ยงโดยการเอาวัสดุไม่ต้ออก หรือการปล่อยให้มีการอัดตัวคายน้ำก่อน



ง. การบดอัดที่ใช้วัสดุไม่ดี หลีกเลี่ยงโดยใช้วัสดุถมที่ดีและการบดอัดที่ดี



จ. การลดการทรุดตัวที่ต่างกันบริเวณคอสะพาน ที่มีตอม่อแบบเปิด สามารถทำได้โดยการถมน้ำหนักทิ้งไว้ก่อน ( Surcharging )



ฉ. การใช้วัสดุถมไม่ดีในช่วงของชั้นหิน วิธีลดการทรุดตัวที่ต่างกันทำได้โดยค่อช่วงยาวของสะพาน เลยออกไปหรือลดการทรุดตัวโดยใช้วัสดุถมที่ดีหรือทำให้ความลาดชันของชั้นลดลง

รูปที่ 2.1 ตัวอย่างของการแก้ไขปัญหาการทรุดตัวที่ต่างกันบริเวณคอสะพาน ( After C.W. Jones , 1959

George F. Bishop ( 1966 ) ได้ศึกษาการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณคอสระพาน ( Bridge Approach slabs ) ซึ่งได้ตอบคำถามต่าง ๆ เช่น ทำไมแผ่นพื้นคอนกรีตที่คอสระพานทำให้เกิดการสะตูด? ข้อบกพร่องเช่นนี้หลีกเลี่ยงได้อย่างไร? มีความพยายามแก้ปัญหาที่บ้างไหม อย่างไร? ถ้าตอบคำถามเหล่านี้ได้ก็จะแก้ไขปัญหาในการออกแบบก่อสร้าง , ข้อมบ่ารุง บริเวณคอสระพานได้ ทั้งยังเพิ่มความเร็วในการขับชี่ และไม่ทำให้เกิดอุบัติเหตุและความรำคาญกับผู้ใช้ถนน เขาได้พิจารณาสาเหตุว่าเป็นเพราะข้อแรกคือตัวสะพานมีเสาเข็มถ่ายแรงไปสู่ชั้นดินที่ไม่ยุบอัดตัว ( Incompressible ) ส่วนคอสระพานวางอยู่บนชั้นดินที่ยุดอัดตัวได้ ( Compressible ) จึงเกิดการสะตูด ข้อสองกรณีที่ตั้งดินถมคอสระพานและตอม่อสะพานวางบนชั้นดินที่ยุดอัดตัวได้กรณีนี้ตอม่อจะทรุดมากกว่าทำให้เกิดการสะตูด ในระหว่างขับชี่ ข้อสามกรณีที่บดอัดดินถมคอสระพานไม่ดีพอ และการไม่ได้ตรวจสอบระดับของ bridge deck กับคอสระพานก่อน คือควรวัดระดับจริงในสนาม

นอกจากนี้ เขายังได้รวบรวมประวัติและวิธีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณสะพาน ในมณรัฐอินโดนีเซีย ดังนี้

ก่อนปี 1932 ยังไม่ให้ความสำคัญ หรือความจำเป็นในการใช้แผ่นพื้นคอนกรีตคอสระพาน เพียงแต่มีการถมดินให้สูงกว่าระดับที่ออกแบบ ปล่อยให้เกิดการทรุดตัวคาน้ำ แล้วจึงปูผิวทาง

ปี 1932 ได้พัฒนามาตรฐานขึ้น เพราะปัญหาของความขรุขระและมีฝุ่นฟุ้ง ได้มีการออกแบบแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กคอสระพานโดยปลายหนึ่งวางบนตอม่อ ( Abutment ) อีกปลายหนึ่งวางสูงขึ้นมา 2 ฟุต จากดินเดิม และยังออกแบบตอม่อให้รับแรงดันน้ำเต็มที่ กรณีมีน้ำข้างใช้แผ่นพื้นคอนกรีตหนา 9 นิ้ว

ปี 1935 ได้พัฒนาการออกแบบใหม่ ซึ่งแบบคล้ายของเก่า แต่ถ้ามีการขุดตอม่อลึกน้อยกว่า 10 ฟุต ก็ทำแผ่นพื้นคอนกรีตคอสระพานยาว 20 ฟุต ถ้าลึกกว่า 10 ฟุต ก็ใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสองแผ่นยาว 20 ฟุต และความหนาของแผ่นพื้นคอนกรีตคอสระพานนี้ เท่ากับ 10.5 นิ้ว ส่วนที่ขอบหนา 16.5 นิ้ว

ปี 1940 ได้ใช้แผ่นพื้นคอนกรีตคอสระพานแบบ Spill-Thru กรณีขุดตอม่อเล็กน้อย

ปี 1957 ใช้แผ่นพื้นคอนกรีตสองแผ่นปูผิวร่วมกับตอม่อชนิด Spill - Thru

ปี 1958 ปรับปรุงมาตรฐานใหม่ โดยใช้ตอม่อแบบ pile bent ร่วมกับ



Creosoted piles ชนิด Untreated pile โดยตอกจนรับน้ำหนักบรรทุกได้ 15 ตัน

ปี 1961 ได้มีการศึกษาอย่างจริงจังซึ่งมาประเมินหาแนวทางในการหาความยาวเสาเข็มที่ใช้กับคอสะพาน เพื่อให้มีความเรียบขึ้นในช่วง transition พบว่าเกิดการทรุดตัวครึ่งหนึ่งที่ระยะห่างไป 40 ฟุต จากตอม่อ

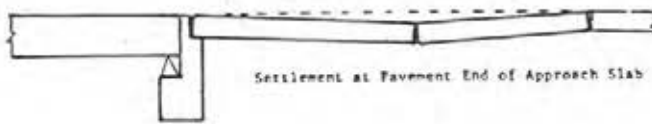
ในบางรัฐได้เปลี่ยนตัวแปรใหม่ เช่น เปลี่ยนความยาวของแผ่นพื้นคอสะพานในช่วง 10 ฟุต ถึง 30 ฟุต ความหนาที่เปลี่ยน และยังได้สำรวจจระดပ်ในสนามเพื่อหาวิธีการออกแบบเพื่อลดการสะดุดให้น้อยที่สุด และได้ตั้งสมมุติฐานขึ้น 2 ข้อ คือ

1. ออกแบบให้เป็นแผ่นพื้นแข็ง ( rigid slab ) ถ้าย่น้ำหนักไปยัง backwall และ subgrade

2. เหมือนวิธีแรก แต่ว่าปลายข้างหนึ่งวางบนแนวเข็มไม้ที่ treated แล้ว โดยตอกให้รับน้ำหนักบรรทุกได้ 15 ตัน หรือตอกลงไปใต้ดินถม ( embankment ) การทรุดตัวที่เกิด ส่วนหนึ่งถ่ายให้เสาเข็ม ส่วนที่เหลือกระจายให้แผ่นพื้นคอสะพานที่อยู่ห่างไป 40 ฟุต จากตอม่อ เป็นการช่วยลดการสะดุด และยังมีตัวแปรอื่น ๆ ที่ส่งผลให้เกิดการสะดุดบริเวณคอสะพาน คือรูปแบบของคอสะพาน เช่น Stub or spill - Thru type , Closed หรือ bin - type , ปัญหาของ skew ของคอม่อคือ ยิ่ง skew มากก็ต้องใช้แผ่นพื้นยาวมากขึ้น

G. Margason ( 1966 ) พบว่าจะเกิดการทรุดตัวต่างกันน้อยมาก ถ้าใช้วัสดุถมที่ดี บดอัดบริเวณใกล้คอม่อดี ตามมาตรฐานของ M.O.T. ( Ministry of Transport and Civil Aviation )

Highway Research Board ( 1969 ) ทำการศึกษาตามโครงการ NCHRP ( National Cooperative Highway Research Program ) และรายงานว่ สาเหตุส่วนใหญ่ของการไม่ราบเรียบบริเวณคอสะพานเกิดจาก ดินฐานราก ( foundation ) เกิดการทรุดตัว , ดินถมคอสะพานใช้วัสดุไม่ดี , การควบคุมงานก่อสร้างไม่ตรงตามข้อกำหนด , ผลของความต่างชนิดกันของคอสะพาน , ระบบการระบายน้ำ , วิธีการก่อสร้าง และการบำรุงรักษา ปัญหาที่เกิดกับคอสะพานดูได้จากรูป 2.2 บางครั้งถ้าใช้วิธีพิเศษสำหรับดินถม การปรับปรุงผิวดินเดิม Subgrade จะช่วยได้มากในบริเวณที่มีดินเป็นดินพองตัวได้ ( expansive soil ) หรือในสภาวะการแข็งตัวของน้ำในมวลดิน ( Freezing Condition ) นอกจากนี้ยังมีการแนะนำอีก ในเรื่องการเจาะสำรวจเพื่อการออกแบบและก่อสร้าง การตรวจสอบ



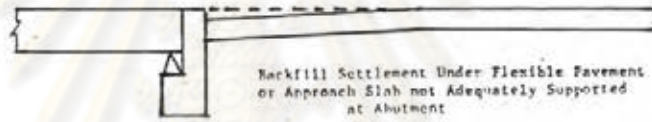
Settlement at Pavement End of Approach Slab

การทรุดตัวของผิวทางที่บริ เวณปลายของแผ่นพื้นคอสระพาน



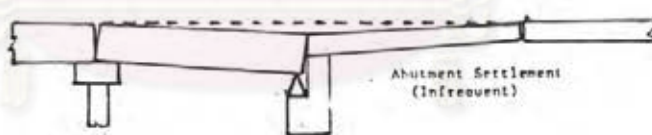
Uplift of Approach Slab - Expansion from Swelling Soils or Freezing

การลอยขึ้นของแผ่นพื้นคอสระพาน เนื่องจากดินเกิด Swelling หรือ Freezing



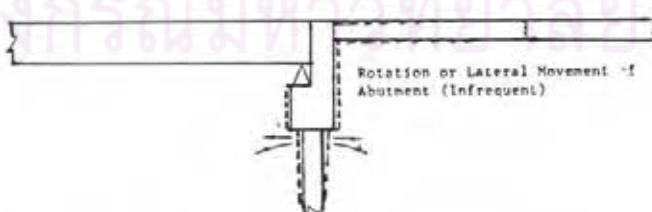
Backfill Settlement Under Flexible Pavement or Approach Slab not Adequately Supported at Abutment

การทรุดตัวของวัสดุถมใต้ผิวทางแบบ Flexible หรือ การทรุดของแผ่นพื้นคอสระพานที่ไม่ได้วางบนตอม่อสะพาน



Abutment Settlement (Infrequent)

การทรุดตัวของตอม่อสะพานซึ่งปกติ เกิดขึ้นไม่บ่อย



Rotation or Lateral Movement of Abutment (Infrequent)

การบิดหรือการ เคลื่อนตัวด้านข้างของตอม่อสะพานซึ่งปกติ เกิดขึ้นไม่บ่อย

รูปที่ 2.2 ตัวอย่างของปัญหาที่มักจะมีกับบริเวณคอสระพาน ( After Highway Research Board , 1969 )

ความลาดชันที่จุดวิบัติในสนาม , ความจำเป็นที่ต้องมีระบบระบายน้ำ และวัสดุที่ใช้เป็นดินถม  
 ข้อแนะนำในการออกแบบต้องตรวจระดับ , แนะนำความลึกของดินเดิมที่ต้องขุดออก และ  
 ความจำเป็นของระบบระบายน้ำพิเศษ ; ความสูงของดินถม และค่าการทรุดตัวที่ยอมให้  
 อิทธิพลของคอม่อะพานแบบต่าง ๆ มีผลต่อการทรุดตัวแตกต่างกัน เช่น แบบ Spread  
 footing , stub หรือ shelf , drilled shaft supports , spill - through ,  
 และ bin type ดูรูปที่ 2.3 การออกแบบแต่ละชนิดขึ้นกับปริมาณจราจร , ค่าก่อสร้าง ,  
 ปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้น เมื่อใช้คอม่อะพานแบบต่าง ๆ นอกจากนี้ต้องพิจารณาการออกแบบและก่อสร้าง  
 ดังนี้

1. สภาพดินเดิม พิจารณาอัตราการยุบตัวของดิน , ความชื้นได้ , ความหนา ,  
 สภาพรอม ๆ , ความยาวของเส้นทางระบายน้ำ , สภาพการรัมน้ำหนัก , ทั้งนี้เพื่อทำให้  
 ฐานรากมั่นคงซึ่ง วิธีช่วยเช่นการทำ preload ทั้งไว้ช่วงเวลาหนึ่ง , ทำ Sand drain  
 ดูรูป 2.4

2. ถ้าดินเดิมไม่ดีที่ต้องขุดออก

3. ต้องมีการฝัง เครื่องช่วยระบายน้ำพิเศษหรือไม่ ดูรูป 2.5

4. ความสูงของดินถม , วัสดุที่ใช้ถม และวิธีการก่อสร้าง ดูรูป 2.6

5. น้ำหนักสมทบ ( surcharge ) , และเวลาที่ต้องรอคอยก่อนก่อสร้าง

6. ดินชั้นทาง ( Subgrade ) , ชั้นรองพื้นทาง ( Subbase ) และวัสดุที่ใช้

ทำชั้นฐานราก ( base )

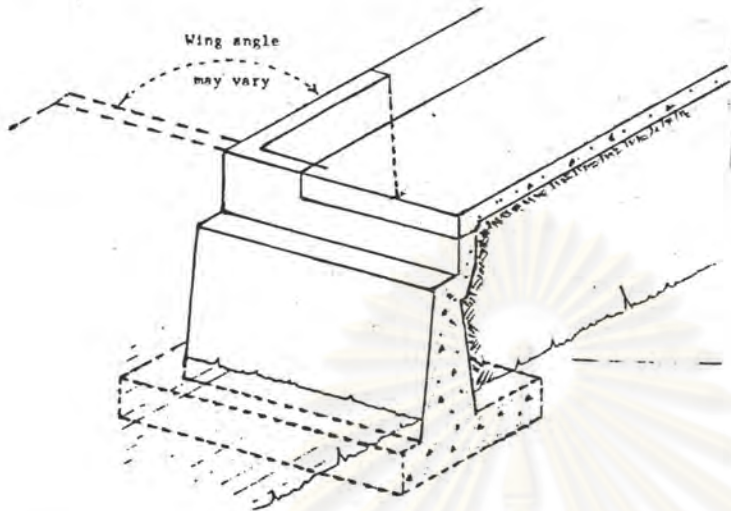
7. ชนิดของคอม่อะพาน ดูรูป 2.3 , ตัวรับน้ำหนัก Support , ระบบระบายน้ำ ,

วัสดุถมหลังคอม่อะ

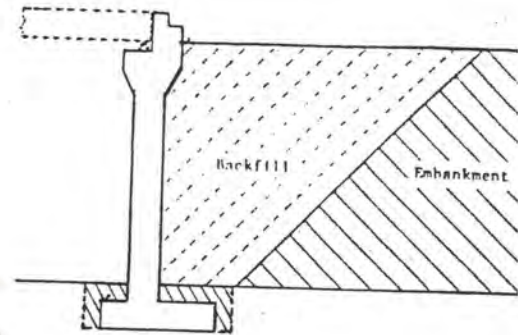
8. พิจารณาแบบพิเศษของแผ่นพื้นคอนกรีตคอสะพาน

รอยต่อของแผ่นพื้นคอนกรีตคอสะพานกับสะพาน ดูรูป 2.7 ก็มีความสำคัญ ทั้งนี้เพราะ  
 เป็นตัวช่วยถ่ายน้ำหนักให้กับคอม่อะพาน กันน้ำซึม , กันการขยายตัวและหดตัวของผิวคอนกรีต เพื่อลด  
 การแตกร้าว มักเป็นวัสดุพวกกระดาษขานอ้อย ( building paper ) , ยางมะตอย หรือ  
 roofing felt รอยต่อแบบต่าง ๆ ดูจากรูป 2.7 (ค) , 2.8 (ก) การซ่อมแซมบำรุงกระทำ  
 เมื่อมีตรวจพบการสะดุดทันที นอกจากถ้ามีการจราจรมาก ก็อาจเลื่อนเวลาออกไป การซ่อม  
 ใช้พวก ยางมะตอย หรือ epoxy resin ลาดบดอัดทับ หรือใช้การยกแผ่นพื้นคอนกรีต

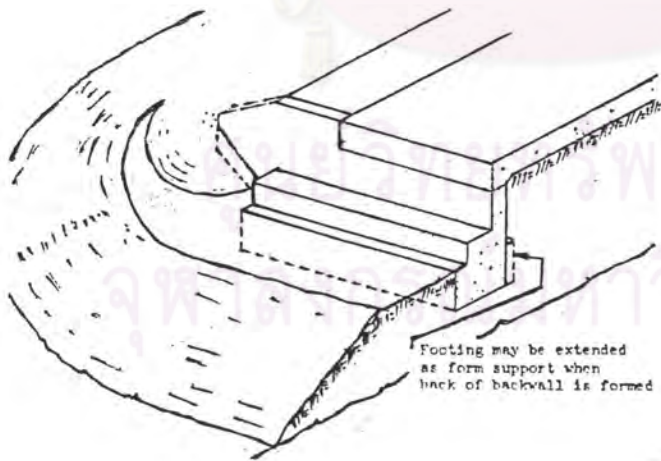




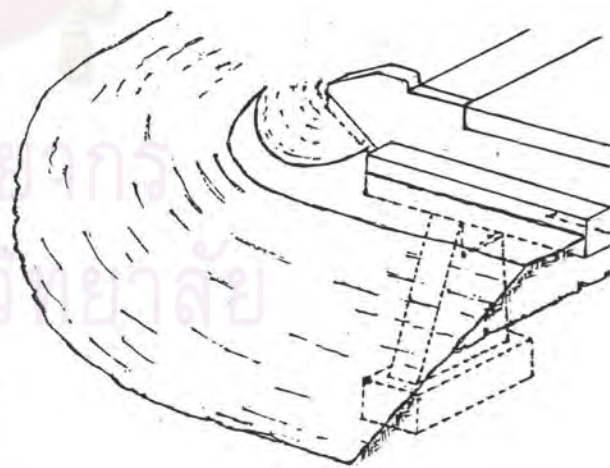
ชนิดของตอม่อแบบปิด



ดินถมคันทางสร้างก่อนตอม่อซึ่งการถมดิน  
หลังตอม่อกระทำหลังจากทำ Span ช่วงแรก



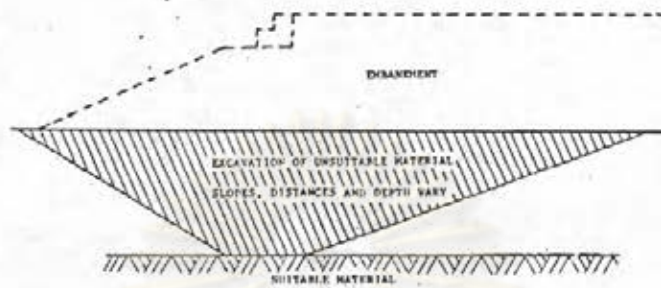
ตอม่อแบบ Stub หรือ Shelf



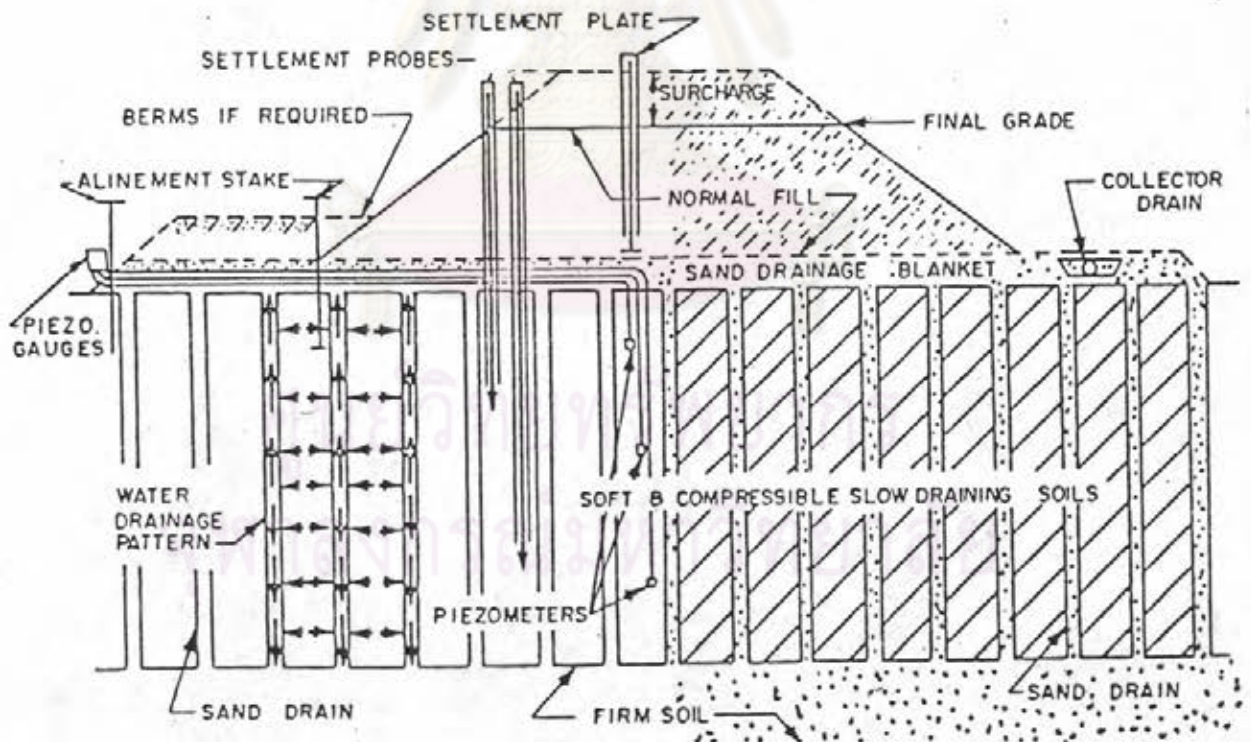
ตอม่อแบบ Pedestal หรือ Spill - Through

รูปที่ 2.3 ลักษณะของตอม่อสะพานแบบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการทรุดตัว แตกต่างกันไป  
( After Highway Research Board , 1969 )



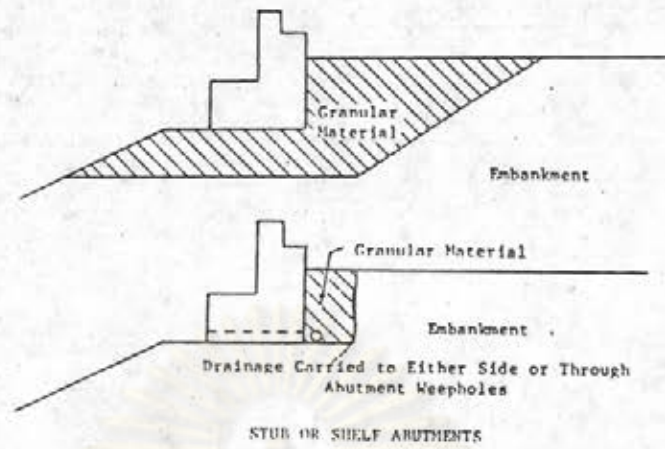


การขุดเอาวัสดุที่ไม่ดีข้างใต้คอม่อสะพานออก

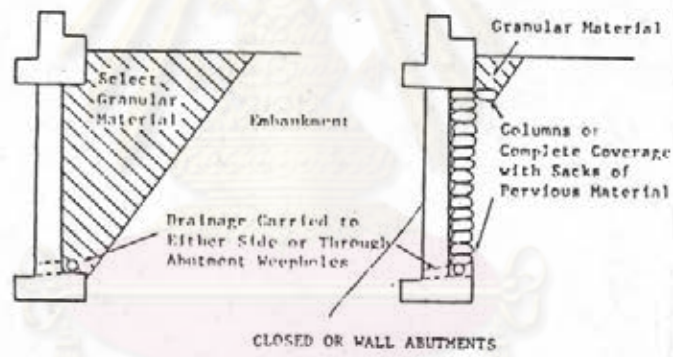


การทำ Sand drain และการติดตั้งเครื่องมือวัด

รูปที่ 2.4 วิธีการแก้ไขและปรับปรุงดินฐานรากเดิมให้ดีขึ้น ( After Highway Research Board , 1969 )



ค่อมแบบ Stub หรือ Shelf

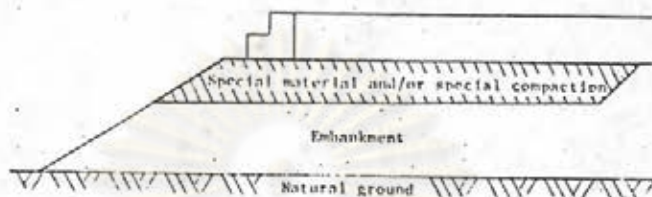
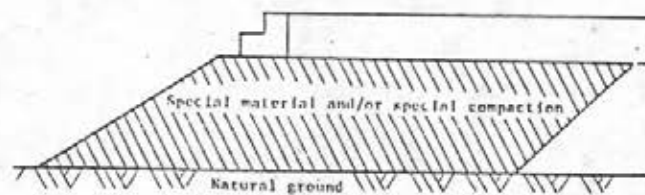


ค่อมแบบปิด หรือแบบกำแพง

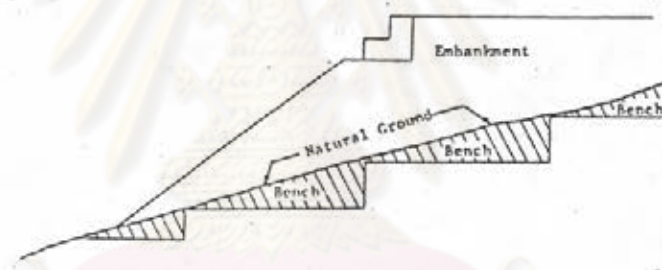
รูปที่ 2.5 วิธีการที่ใช้ในการระบายน้ำข้างหลังคอสสะพานที่มีค่อมในแบบต่าง ๆ

( After Highway Research Board , 1969 )

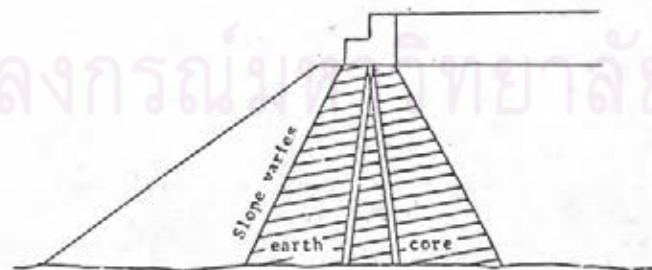




การใช้วัสดุชนิดพิเศษหรือการบดอัดเป็นพิเศษ

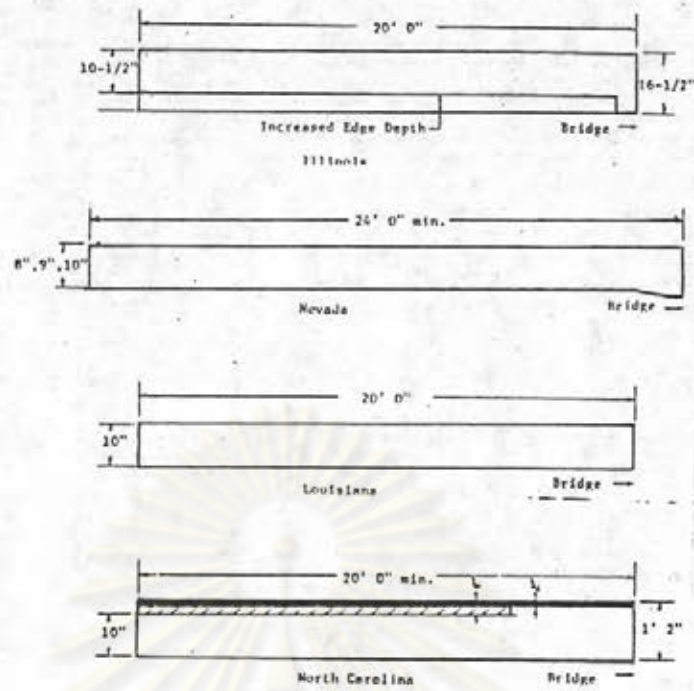


รูปตัดปลายตอม่อโดยการทำ benched กับพื้นดินธรรมชาติ

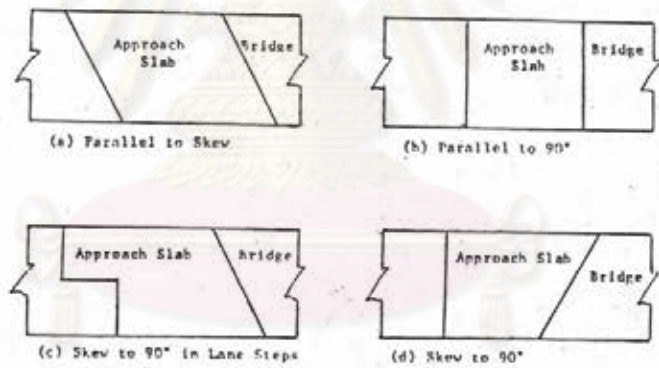


การทำแกนดินพิเศษเพื่อกันการกระเทือนต่อเสาเข็ม

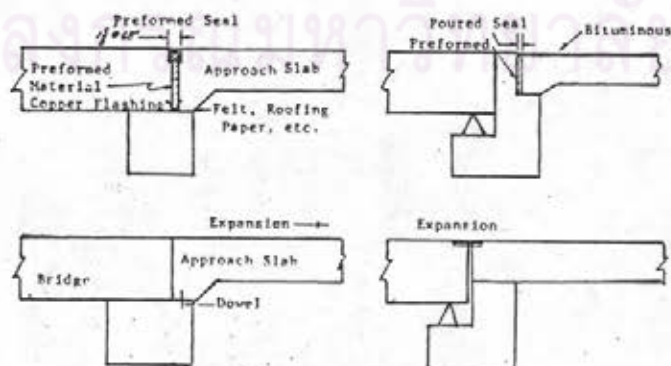
รูปที่ 2.6 แสดงการใช้วัสดุชนิดพิเศษหรือการก่อสร้างเป็นพิเศษที่บริเวณตอม่อคอสะพาน ( After Highway Research Board , 1969 )



การใช้แผ่นพื้นคอนกรีตบริเวณคอสะพานโดยทั่วไป



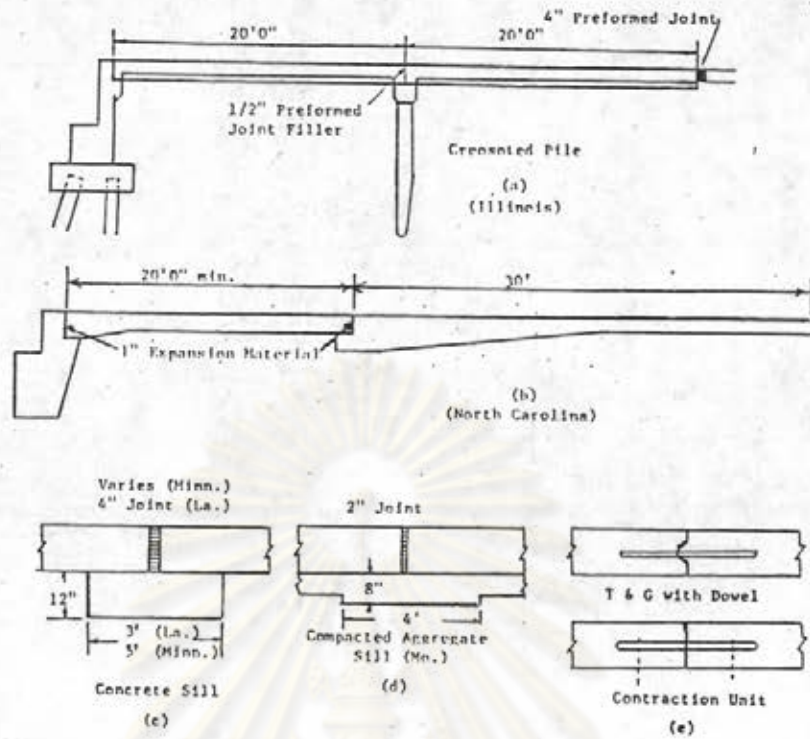
รูปแบบรอยต่อแบบต่าง ๆ ของแผ่นพื้นคอสะพาน



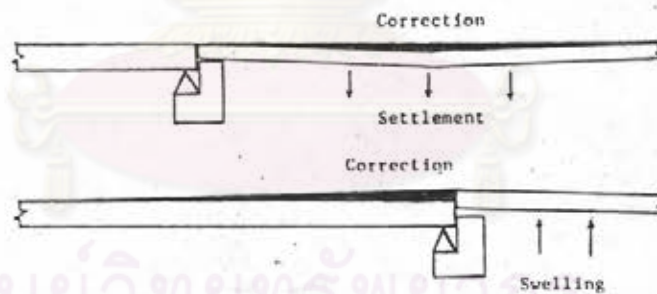
รอยต่อที่ใช้ระหว่างคอสะพานกับแผ่นพื้นคอสะพาน

รูปที่ 2.7 ลักษณะของแผ่นพื้นคอสะพานและรอยต่อแบบต่าง ๆ ( After Highway Research Board , 1961





(ก) รอยต่อที่ใช้ระหว่างพื้นถนนและพื้นคอนกรีตคอสสะพาน



(ข) การใช้ยางมะตอยในการปรับระดับ เนื่องจากการหดตัวหรือบวมตัว ( Swelling )



(ค) การทำผิวที่ไม่สม่ำเสมอให้ราบขึ้นของคอสสะพานที่ลาดยางมะตอยด้วย heater - planer

รูปที่ 2.8 รอยต่อและการซ่อมบำรุงเมื่อเกิดการหดตัวที่บริเวณคอสสะพาน  
( After Highway Research Board , 1969 )

( slab - jacking ) แล้วอัดพวกปูนเหลวลงไป ( slurry หรือ grout mixture )  
 รูป 2.8 (ข) , 2.8 (ค)

## 2.2 การศึกษาในทวีปยุโรป

ได้มีการศึกษาเพื่อลดปัญหาการทรุดตัวที่แตกต่างกันของสะพานกับบริเวณคอสะพาน  
 ในประเทศต่าง ๆ ในทวีปยุโรป ดังนี้

### 2.2.1 ประเทศอังกฤษ

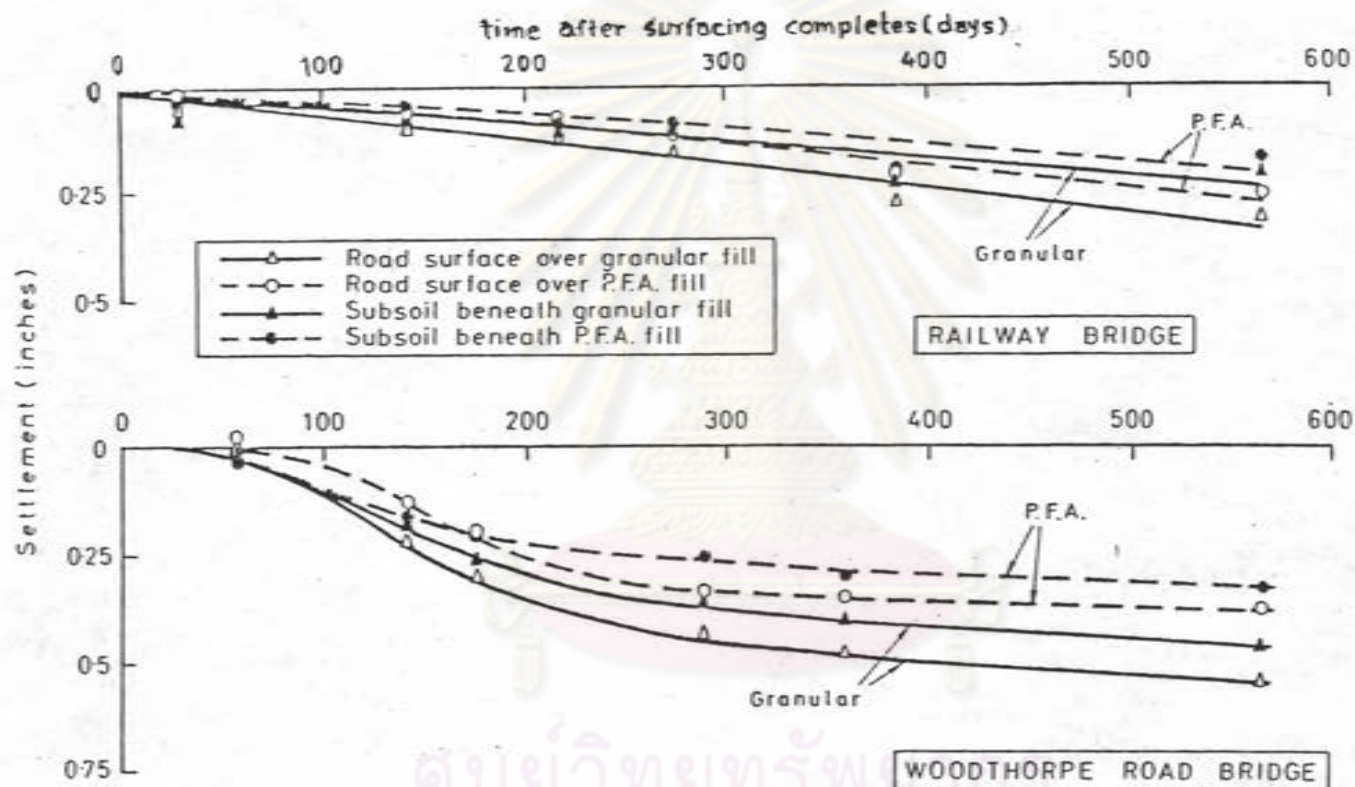
G. Margason ( 1966 ) ได้ศึกษาการทรุดตัวข้างหลังค่อมสะพานเมื่อมีการถมด้วยวัสดุเบา คือ Pulverised fuel ash ( P.F.A. ) เปรียบเทียบกับทราย ( well graded sandy gravel ) ของสะพานสองแห่งคือ Staines By pass ซึ่งสร้างข้ามถนน Woodthorpe และสะพาน Southern Region Line of British Rail ซึ่งทั้งสองสะพานมีค่อมชนิดแบบปิด มีชั้นระบายน้ำหนา 12 นิ้ว สภาพของชั้นดินมีลักษณะคล้ายกัน คือ ชั้นบนเป็นกรวดทราย ( Sandy Gravel ) ชั้นล่างเป็นดินเหนียว ( London Clay ) การบดอัด P.F.A. นั้นควบคุมที่ความหนาแน่นด้านข้าง ให้ความชื้นในช่วง 20-25% ซึ่งเป็นข้อกำหนดโดยมาตรฐานของ M.O.T. การวัดการทรุดตัวมีความแม่นยำ  $\pm 0.05$  นิ้ว ในช่วงเวลาที่ศึกษาคือ 1.5 ปี ผลการศึกษาพบว่า แม้จะควบคุมความชื้นในการบดอัด P.F.A. ได้ยาก แต่การทรุดตัวที่เกิดขึ้น มีค่าน้อยกว่าการทรุดตัวที่เกิดจากทรายถมบดอัดทั้งสองสะพาน แสดงผลเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดไว้ในรูปที่ 2.9

### 2.2.2 ประเทศสกอตแลนด์

W. M. Reid and N. W. Buchanan (1984) ได้ศึกษาระบบการแก้ไขการทรุดตัวที่ต่างกัน บริเวณคอสะพานโดยใช้ระบบที่เรียกว่า Bridge Approach Support Piling ( BASP ) system ในบริเวณที่มีดินอ่อน ( Soft alluvial deposits ) ซึ่งหนามากถึง 20 เมตร

ในปี 1973 The Scottish Development Department Commissioned Stirling County Council ได้เคยศึกษาระบบถนนที่ผ่านบริเวณดินอ่อน โดยการใช้วัสดุน้ำหนักเบา พวก P.F.A. ถม จากการวัดการทรุดตัวมีถึง 800 มม. ในจุดที่มีดินถมสูงสุด และยังคงระวังเรื่องเสถียรภาพในการก่อสร้าง และปัญหาของการทรุดตัวที่เกิดเมื่อเวลาผ่านไป





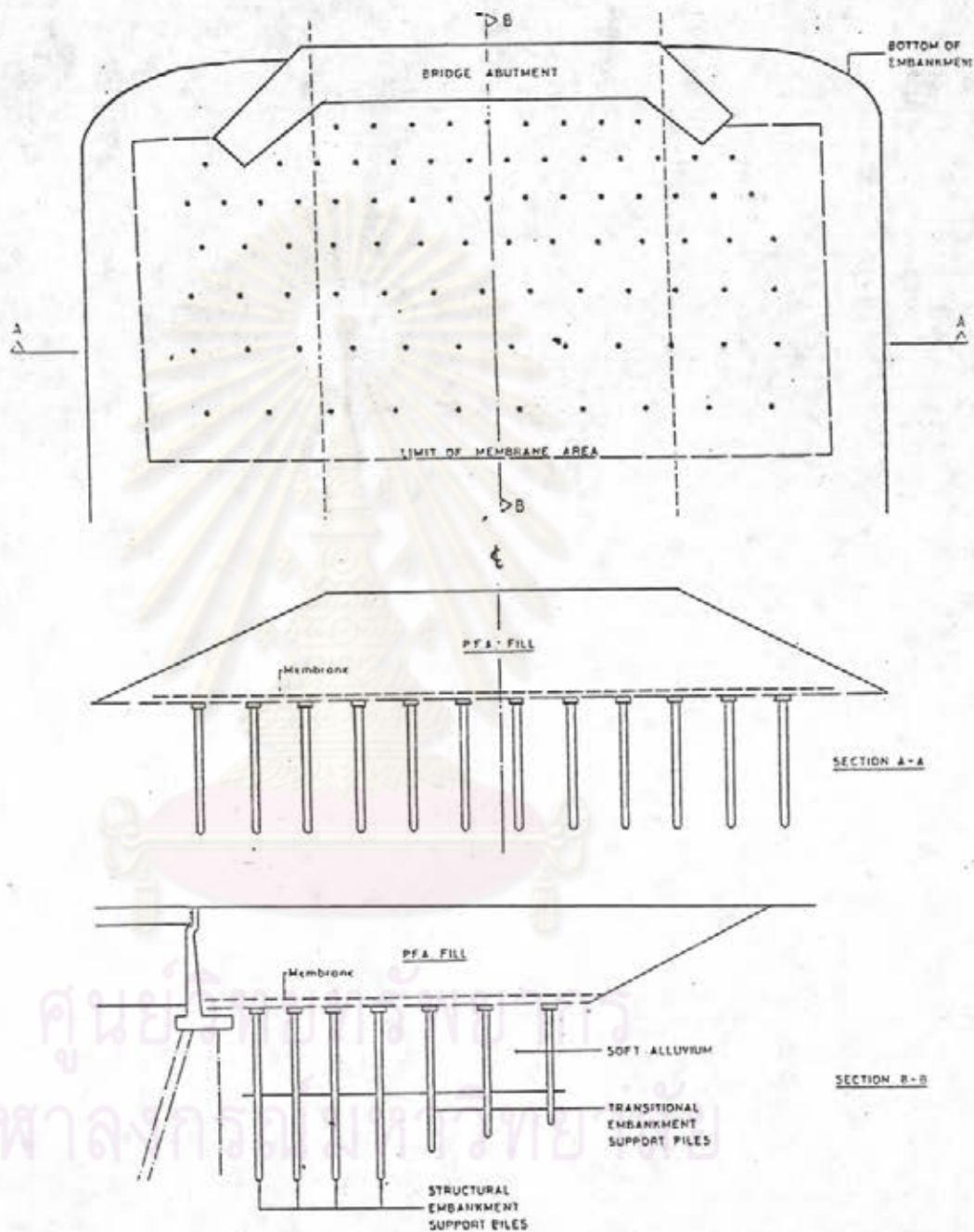
รูปที่ 2.9 ผลการเปรียบเทียบการทรุดตัวที่เกิดเมื่อใช้วัสดุเบาพวก PFA ( Pulverised Fuel Ash )  
กับทรายเป็นวัสดุถมบริเวณคอสะพาน ( After Margason , 1966 )

ไปนาน ๆ ( longterm settlement ) ซึ่งส่งผลให้เกิดแรงเฉือนด้านข้าง และโมเมนต์ ดัดที่กระทำต่อค่อม่อสะพาน ซึ่งมีปัญหาเหล่านี้แม้นจะพยายามลดด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น ทำ preload , sandrain , ทำ side span หรือ bank seat foundation ทุกอย่าง ต้องเสียเวลาและเสียเงินมาก จึงได้แนะนำวิธีการใช้เสาเข็มช่วย เรียก B.A.S.P. System รูป 2.10 ประกอบด้วยเสาเข็ม ความยาวต่าง ๆ กัน ระยะระหว่างเสาต่างกัน มีแท่นหัวเข็ม ( pile cap ) และก็มี membrane ปิดคลุมระหว่างแท่นหัวเข็ม เพื่อ กันการยุบตัวต่างกันของดินระหว่างแท่นหัวเข็ม ขนาดของส่วนต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับความสูงของดิน ถมคอสะพาน ปกติแท่นหัวเข็มจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.1 - 1.5 ม. ระยะระหว่าง เสาเข็มประมาณ 3 - 4 เมตร membrane มีไว้เพื่อกระจายน้ำหนักกระทำให้เกิด arching membrane จะมี 2 ชั้น ในแนวตั้งฉากกันของ terram reinforce กับ Paraweb Strapping ซึ่งเป็นตัวที่รับแรงดึงได้ดี ระบบ BASP นี้ ใช้กับสะพานที่ทำการศึกษาถึง 9 สะพาน ผลการวิจัยพบว่า ระบบ BASP จะช่วยลด Lateral Shear Strains และแรงดัน น้ำในโพรงดิน ( Pore water pressure ) ความแตกต่างของการหลุดตัวของสะพาน กับ ช่วง transition มีน้อย และค่าที่ได้ใกล้เคียงกับที่ประมาณไว้ ระบบนี้ใช้ได้โดยไม่ต้องมี side span เป็นที่รองรับ ทั้งยังสะดวกในการก่อสร้างถมดินได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ต้อง ตรวจสอบอัตราการเพิ่มน้ำหนัก ส่วนค่าใช้จ่ายก็ประหยัด และเวลาที่ใช้ทำงานก็น้อยกว่า การศึกษายังได้พบความสัมพันธ์ของการรับน้ำหนักบรรทุกสูงสุดของเสาเข็ม กับพลังงานจาก ดัชนีน้ำหนัก ที่ใช้ตกในช่วงต่ำ ๆ ซึ่งเราสามารถเลือกความยาวของเสาเข็มได้จากแรง ด้านทานที่เกิด

### 2.2.3 ในประเทศนอร์เวย์

NRRL ( Norway Road Research Laboratory ) , 1980 ได้มีการ นำเอาวัสดุเบาพวก Plastic Foam ชนิด expanded polystyrene มาใช้กับงานสร้าง ทางหลวงที่ผ่านบริเวณที่มีดินอ่อน ซึ่งมักจะมีปัญหาเกี่ยวกับความสามารถในการรับน้ำหนัก ( bearing capacity ) และการหลุดตัว ทั้งนี้ยังได้รวมถึงการนำไปใช้ กับบริเวณคอสะพาน เพื่อลดน้ำหนักของวัสดุถมลง เป็นการบรรเทาการหลุดตัวที่ต่างกันระหว่างบริเวณคอสะพานกับ สะพานได้ ลักษณะของการก่อสร้าง แสดงไว้ในรูปที่ 2.11 และตารางที่ 2.1 คุณสมบัติโดย ทั่วไปตามมาตรฐานของ NRRL ที่กำหนดคือ มีความหนาแน่น 20 กิโลกรัม ต่อลูกบาศก์เมตร





รูปที่ 2.10 รายละเอียดของการใช้ระบบ BASP ( Bridge Approach Support Piling system )  
ในการแก้ปัญหาบริเวณคอสะพาน ( After Reid and Buchanan , 1984 )

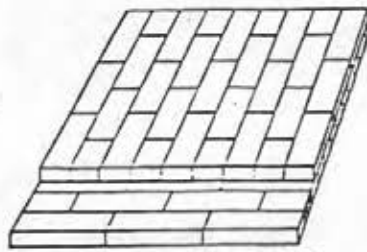
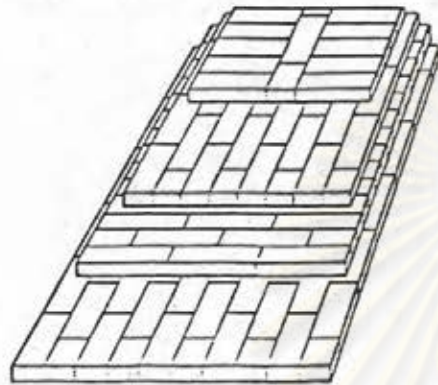
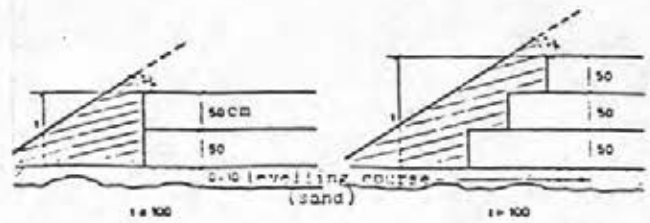


Fig. 1. Construction of fill height  $h = 1,0$  m



รูปที่ 2.11 ลักษณะการนำ Plastic Foam ชนิด Expanded polystyrene มาใช้กับงานสร้างทางหลวง ( After NRRL , 1980 )

ตารางที่ 2.3 แสดงความหนาของผิวทางคอนกรีต ในสภาวะที่เกิดการแข็งตัวของน้ำได้ ถนน ( After NRRL , 1980 )

Probability-icing on adjacent road	Less thickness of road pavement on top of a plastic foam embankment, cm 1)		
	AD1 = 1000	1000 < AD1 < 10000	AD1 > 10000
Great	21	21	21
Medium	40	50	60
Little	50	60	70
Very little	60	70	80

Symbols: = asphalt = crushed material = expanded polystyrene  
 = gravel = crushed rock

1) Thickness requirement given in the pavement design manual shall always be fulfilled.  
 2) Thickness of road pavement to be taken from the pavement design manual. If the base layer, due to stability requirements or other reasons, will be constructed using crushed material or bitumen stabilized materials, the thickness of subbase layer should be increased with 5 cm.

ตารางที่ 2.2 ความหนาแน่นของวัสดุเบาชนิดต่าง ๆ

Material	Density kg/m <sup>3</sup> for calculation
Bark	1000-1100
Sawdust	1000
Cellular concrete waste	1000
Light expanded clay (Leca)	800-1000
Waste bricks of Leca	1000
Expanded polystyrene	100

ตารางที่ 2.1 แสดงรายละเอียดของสะพานต่าง ๆ ที่ใช้วัสดุเบาพวก Plastic Foam เป็นวัสดุถมบริเวณคอสะพาน ในประเทศนอร์เวย์ ( After NRRL , 1980 )

Fill no	Road no	Location	Year	Lenght (m)	Volume (m <sup>3</sup> )	Max. height	Sealing	Road construction	Surfacing	Notes
1	159	Plom bridge Lørenslog	1972	85	320	0.5	30-50 cm PUR	10 cm sand, 20 cm fine aggr. 10 cm pen. macadam	10 cm asphalt	
2	159	Plom bridge Lørenslog	1973	115	1125	1.1	10 cm Rf. PUR	10 cm sand, 20 cm fine aggr. 10 cm pen. macadam	10 cm asphalt	
12	E18	S. Sande bridge Vestfold	1977	6+6	360	3.0	-	20 cm Leca. 70 cm gravel	10 cm asphalt	
13	(E18)	Lenken bridge. Asker. C544	1978	40	2000	3.0	10 cm Rf. C	23 cm crushed stone 10 cm pen. macadam	7 cm asphalt	

Index.  
 ( ) = cross-roads/bridges  
 PUR = Foamed Polyurethane

Rf C = Reinforced Concrete  
 P S = Polyethylene sheeting  
 P = For Pedestrians only

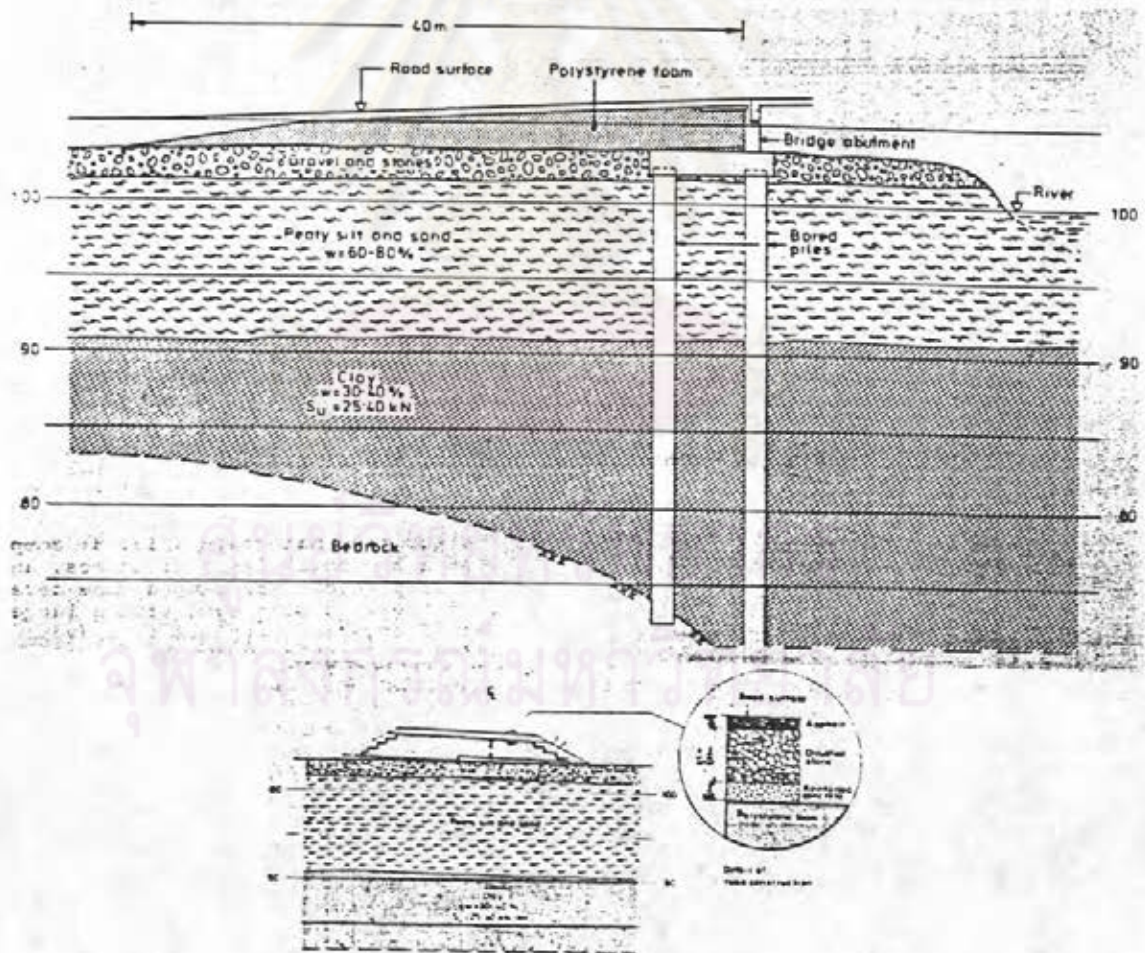


แสดงไว้ในตารางที่ 2.2 มีค่าหน่วยแรงอัดเฉลี่ย ( Average compressive Strength ) เท่ากับ  $100 \text{ kN/m}^2$  ปกติขนาดที่หาขายโดยทั่วไปมีขนาด  $0.5 \times 1.0 \times 3.0$  เมตร และขนาด  $0.5 \times 1.0 \times 5.0$  เมตร ซึ่งแต่ละก้อนจะมีน้ำหนักเพียง 30 กิโลกรัม และ 50 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งสามารถเคลื่อนย้ายและก่อสร้างได้สะดวกด้วยแรงงานคน ความหนาที่น้อยที่สุดของผิวคอนกรีตที่ปิดด้วย expanded polystyrene เพื่อป้องกันการสูญเสียที่อาจจะเกิดจากน้ำมัน ซึ่งจะเป็ตัวละลายโฟมได้ นั้นมักใช้คอนกรีตหนา  $0.10 - 0.15$  ม. เทปัดทับ และจากการแข็งตัวของน้ำใต้ถนน แสดงไว้ในตารางที่ 2.3 ตัวอย่างที่นำไปใช้กับสะพานของถนนนอกเมือง Oslo ซึ่งมีการหลุดตัวที่ต่างกันของถนนกับสะพานถึง 80 ซม. ได้มีการยกผิวถนนขึ้น 80 ซม. โดยวิธีขุดวัสดุถมดินออกแล้วใส่ Expanded polystyrene และผิวจราจรยังคงเป็นลักษณะเดิม ซึ่งการทำเช่นนี้ช่วยลดน้ำหนักดินถมลงไป  $5 \text{ KN/m}^2$  อีกตัวอย่างคือ การนำไปใช้กับสะพาน Lenken นอกเมือง Oslo ( 1978 ) ซึ่งจะมีการหลุดตัวเกิดขึ้นมาก ถ้าถมดินสูง 3.5 เมตร จึงได้นำเอา expanded polystyrene ใส่แทน สูง 3.0 ม. ซึ่งพบว่าการหลุดตัวเกิดขึ้นเพียง 25 มม. ในปีแรก และหน่วยแรงดันที่เพิ่มขึ้นที่กระทำต่อดินเดิมมีเพียง  $10 \text{ kN/m}^2$  กรณีที่ไม่มีการจราจร แสดงไว้ในรูปที่ 2.12 จากการศึกษาต่อมา ( Aabøe , 1979 ) พบว่าตัว expanded - polystyreneสามารถรับน้ำหนักจราจรได้ และอายุการใช้งานจะไม่มีผลในการทำให้วัสดุเสื่อมสภาพ

### 2.3 การศึกษาในทวีปออสเตรเลีย

H. M. Sherrard ( 1957 ) ได้ศึกษาปัญหาของคอสะพานและพัฒนาทฤษฎีที่ใช้ประมาณการเคลื่อนตัวของดินฐานราก ซึ่งได้สรุปไว้โดย E. H. Davis and H. Taylor ( 1962 ) ซึ่งได้ศึกษาการเคลื่อนตัวของคอสะพานและค่อม่อสะพานในบริเวณฐานรากที่เป็นดินอ่อน และกล่าวถึงวิธีการประมาณการเคลื่อนตัว ทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ( Vertical and Horizontal movement ) เนื่องจากน้ำหนักของดินถมคอสะพานที่กระทำบนดินอ่อน วิธีการประมาณจะอยู่ในรูปของตัวประกอบทางแนวตั้งและแนวราบ ร่วมกับทฤษฎีของการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิว ( Surface displacements ) ในชั้นที่มีการยืดหยุ่นได้ ( Elastic layer ) อีกทั้งยังพิจารณาถึงการเคลื่อนตัวทันทีที่รับน้ำหนัก ( immediate movement ) และการเคลื่อนตัวเมื่อเวลาผ่านไปนาน ๆ ( longterm movement ) การหาแรงเค้นทางตั้ง (  $q_2$  ) และ





รูปที่ 2.12 ลักษณะการนำวัสดุเบาพวก Polystyrene foam เป็นวัสดุถมบริเวณคอสะพาน Lenken ในประเทศนอร์เวย์ ( After Rugg and Sørlic , 1981 )

แรงเค้นทางนอน ( $q_x, q_y$ ) ดังแสดงในรูป 2.13 (ก) ซึ่งแรงเหล่านี้ ถ้าเกิดขึ้นมาก จะส่งผลต่อการยึดหดของรอยต่อ (expansion joints) ทำให้เกิด dropping ในช่วงแรกๆของค่อม ทัศนคติที่ใช้ในการประมาณการเคลื่อนตัวในแนวราบนี้ แยกออกได้เป็น 2 ส่วน คือ

- 1) ทัศนคติของหน่วยแรงเค้น (Stress) ที่เกิดภายในและที่ฐานของทรายถมอัดแน่น (Granular bank) ซึ่งวางอยู่บนดินฐานรากที่ยึดตัวได้
- 2) ทัศนคติของการเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ยึดหยุ่นได้ (Elastic layer) ที่ตั้งอยู่บนชั้นหินแข็ง (Rigid Base) ซึ่งองค์ประกอบของการเคลื่อนตัวขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำที่ผิวบน

#### 1) ทัศนคติของหน่วยแรงเค้นภายในทรายถมอัดแน่น

โดยทั่วไปคอสะพานมักนิยมใช้ทรายถมอัดแน่น แรงดันที่ทำให้เกิดการทรุดตัวที่ผิว เป็นลักษณะ Arching action ซึ่ง Trollope (1957) ได้แนะนำวิธีการหาหน่วยแรงเค้นภายในทรายถมจาก arching action โดยได้ตั้งสมมุติฐานว่า การจัดเรียงตัวของเม็ดดินเป็นแบบเดี่ยว (Singular arrangement) คัดการถมดินเป็นรูปสามเหลี่ยม หาหน่วยแรงเค้นที่กระทำภายในอนุภาคดินที่จุดวิบัติได้ดังนี้

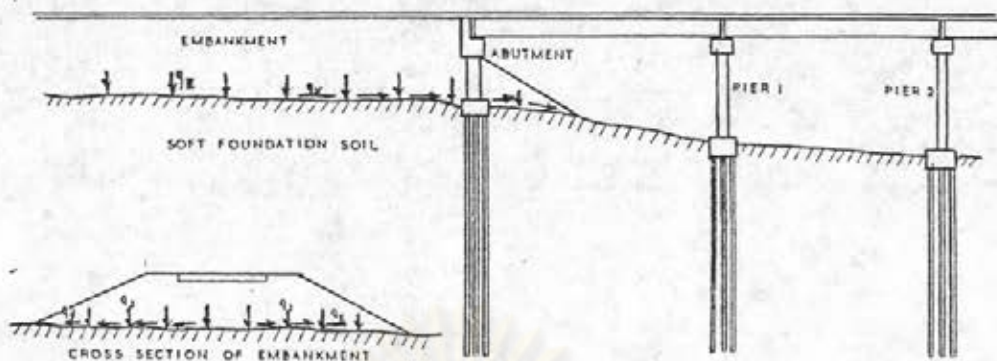
$$\sigma_1 = \sigma_3 \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ  $\sigma_1, \sigma_3$  คือหน่วยแรงเค้นหลักและหน่วยแรงเค้นรอง (Major and Minor principal stress)

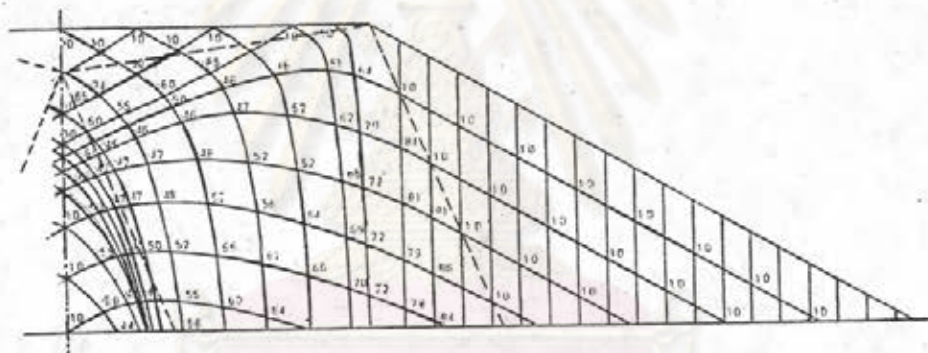
$\phi$  คือ มุมเสียดทานภายในของอนุภาค

โดยกำหนดให้สภาพของแรงเค้นที่เกิดมีข้อจำกัดตาม Rankine passive failure ซึ่งสามารถแบ่งหน่วยแรงเค้นออกเป็น ส่วน ๆ ได้ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 2.14 (ก) ซึ่งในรูปพิจารณาเพียงครึ่งเดียวของรูปตัด กรณีนี้คิดมุมเสียดทานภายใน  $\phi = 30^\circ$  จะได้หน่วยแรงเค้นในส่วนต่าง ๆ ได้จากการคำนวณดังสมการต่อไปนี้ (แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 (ข) . 2.14 (ค) . 2.14 (ง))

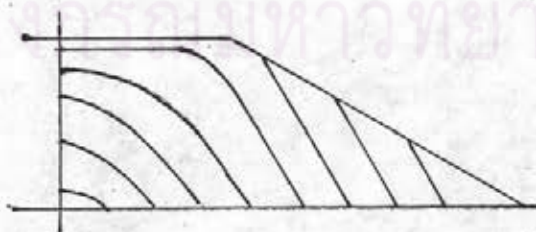




ก. ธรรมชาติของหน่วยแรงเค้นที่เกิดขึ้น



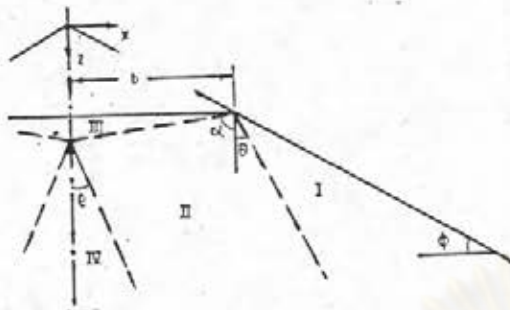
ข. รูปแบบของเส้นที่มีศักดิ์ของการพังทลาย



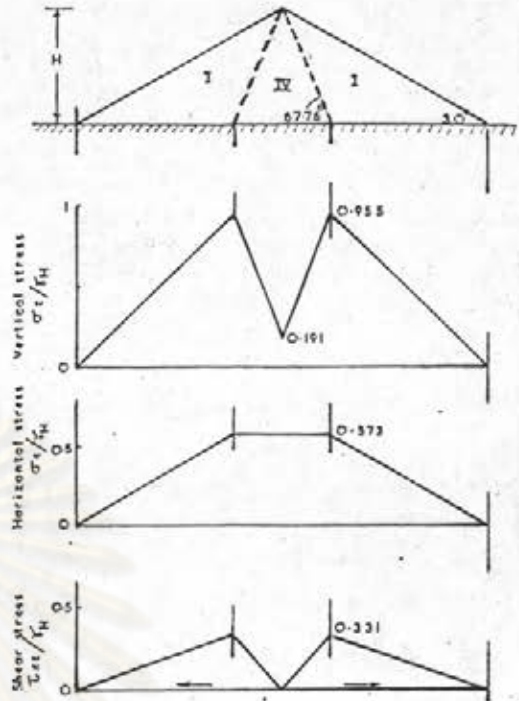
ค. แนวทางเดินของหน่วยแรงเค้นหลัก

รูปที่ 2.13 หน่วยแรงเค้นที่เกิดในดินถมบริเวณคอสะพาน ( After Davis and Taylor , 1962 )

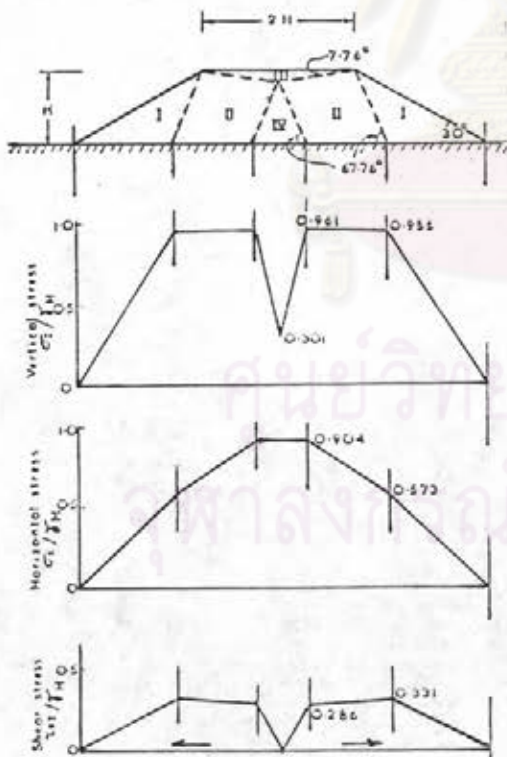




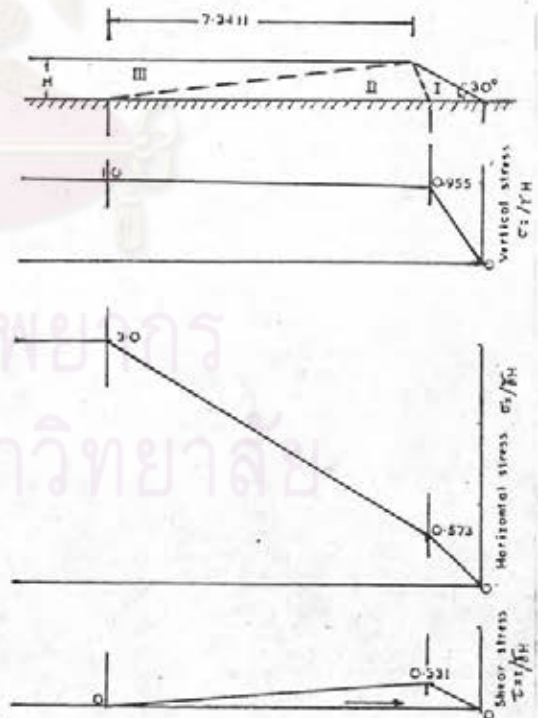
ก. สมมุติฐานของการเกิดหน่วยแรงเค้นใน เป็น ส่วน ๆ ภายในดินถมคันทาง



ข. การกระจายของหน่วยแรงเค้น ( $\phi = 30^\circ$ ) ที่ฐานของดินถมรูปสามเหลี่ยม



ค. การกระจายของหน่วยแรงเค้น ( $\phi = 30^\circ$ ) ที่ฐานของดินถมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู



ง. การกระจายของหน่วยแรงเค้นที่ฐานของดินถมที่มีความกว้างมาก ๆ

รูปที่ 2.14 ข้อสมมุติฐานการกระจายของหน่วยแรงเค้นเมื่อมีดินถมในลักษณะต่าง ๆ ( After Davis and Taylor , 1962 )

$$\begin{aligned}\tan \alpha &= \sqrt{3} (\sqrt{5} + 2) = 7.3371 \\ \tan \theta &= \sqrt{3} (\sqrt{5} - 2) = 0.4088\end{aligned}\quad \dots\dots( 2.2 )$$

ในส่วนที่ I

$$\begin{aligned}\sigma_x/\gamma &= 0.7500Z - 0.4330X \quad \dots\dots( 2.3 ) \\ \sigma_z/\gamma &= 1.2500Z - 0.7217X \\ \tau_{xz}/\gamma &= 0.4330Z - 0.2500X\end{aligned}$$

ในส่วนที่ II

$$\begin{aligned}\sigma_x/\gamma &= 0.7011Z - 0.3133X - 0.0915b \quad \dots\dots( 2.4 ) \\ \sigma_z/\gamma &= 0.9573Z - 0.0058X - 0.5469b \\ \tau_{xz}/\gamma &= 0.3133Z + 0.0427X - 0.2236b\end{aligned}$$

ในส่วนที่ III

$$\begin{aligned}\sigma_x/\gamma &= 3.0000Z - 1.7322b \quad \dots\dots( 2.5 ) \\ \sigma_z/\gamma &= 1.0000Z - 0.5774b \\ \tau_{xz} &= 0\end{aligned}$$

เส้นแสดงศักดิ์ของการวิบัติ ( Potential failure lines ) และทางเดินของเส้นที่แสดงหน่วยแรงหลัก ( Major principal Stress trajectories ) แสดงไว้ในรูปที่ 2.13 (ข) . 2.13 (ค)

## 2) ทฤษฎีของการเคลื่อนตัวของชั้นดินที่ยึดหยุ่นได้

จากทฤษฎีนี้มีข้อสมมุติฐานว่า ชั้นดินจะต้องเป็นวัสดุที่มีความสม่ำเสมอ ( Uniform ) และเป็นเอกพันธ์ ( Homogeneous ) ตั้งอยู่บนชั้นดินแข็ง การเคลื่อนตัว ( displacement ) ที่เกิดจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักที่กระทำบนผิว , E ( Young's Modulus ) ,  $\nu$  ( Poisson ratio ) เมื่อพิจารณาน้ำหนักกระทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า การเคลื่อนตัวในทิศทางใด ๆ

$i$  ( X , Y หรือ Z ) หาได้จากสมการ

$$\mu_i = q_j \cdot \frac{D}{E} (1 + \nu) I_{ij} \quad \dots\dots\dots( 2.6 )$$

- เมื่อ  $\mu_i$  เป็น การเคลื่อนตัวในทิศทาง  $i$   
 $q_j$  เป็น น้ำหนักแผ่สม่ำเสมอบนพื้นที่สี่เหลี่ยมผืนผ้า  
 $D$  เป็น ความลึกของชั้นที่พิจารณา ( finite depth )  
 $I_{ij}$  เป็น ตัวแปรที่ขึ้นกับค่าของ  $l$  ,  $b$  และ  $\nu$  กรณีที่คิดแบบ 2 มิติ  
 $l$  เป็น อัตราส่วนของ  $L/D$   
 $b$  เป็น อัตราส่วนของ  $B/D$   
 $L$  คือ ความยาว  
 $B$  คือ ความกว้าง

ค่า  $I_{ZZ}$  ได้แนะนำครั้งแรกโดย Stenbrenner ( 1961 ) ต่อมา Davis ( 1961 ) ได้ทำการคำนวณกลับโดยใช้สมมติฐานของ Burmister ( 1956 ) จะหาได้จากสมการดังนี้

$$I_{ZZ} = \frac{0^m_{ZZ} + 1^m_{ZZ} \cdot \nu + 2^m_{ZZ} \cdot \nu^2}{\dots\dots\dots( 2.7 )}$$

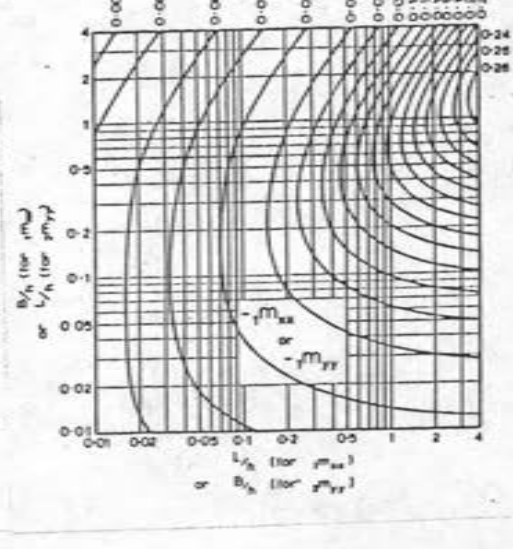
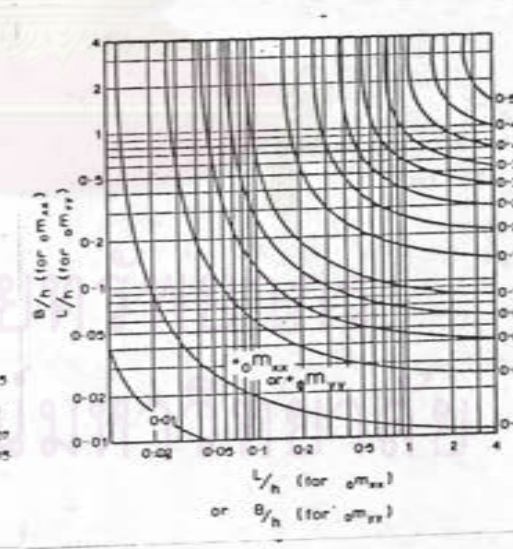
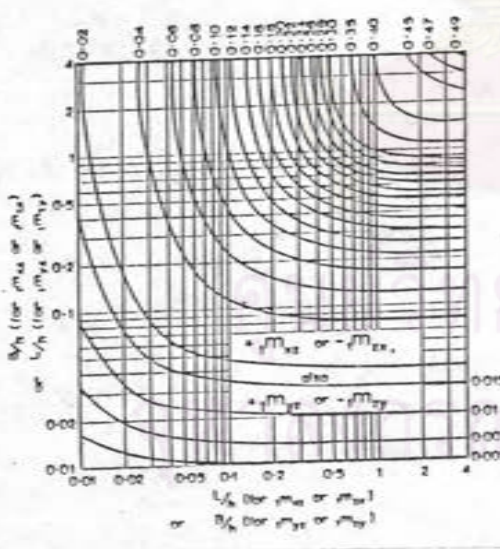
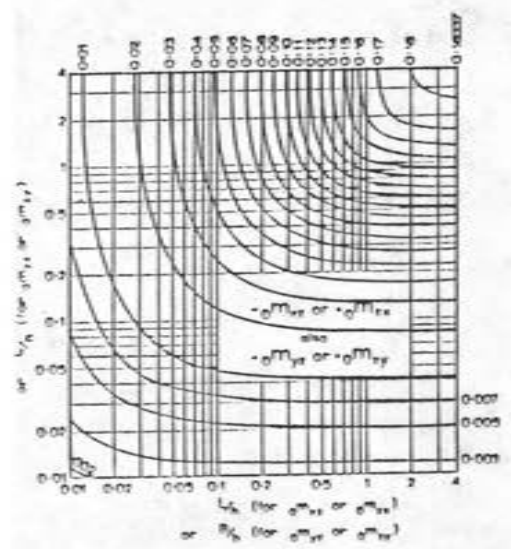
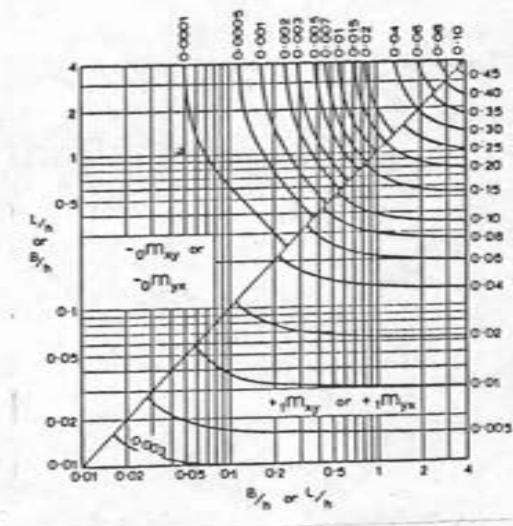
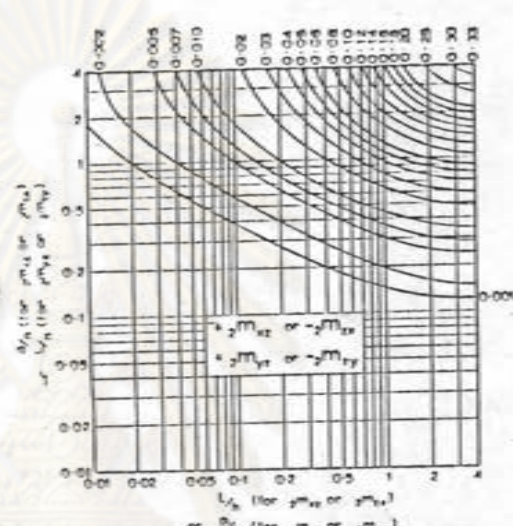
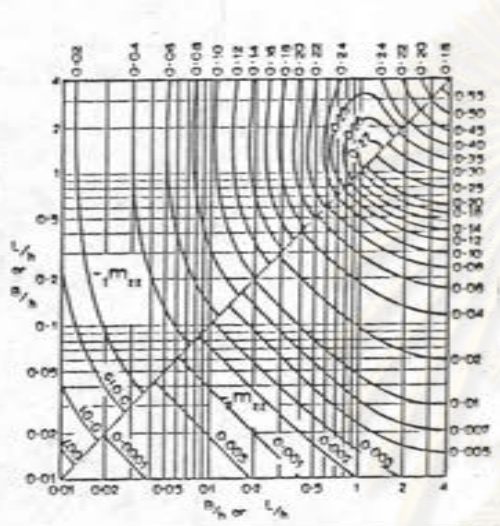
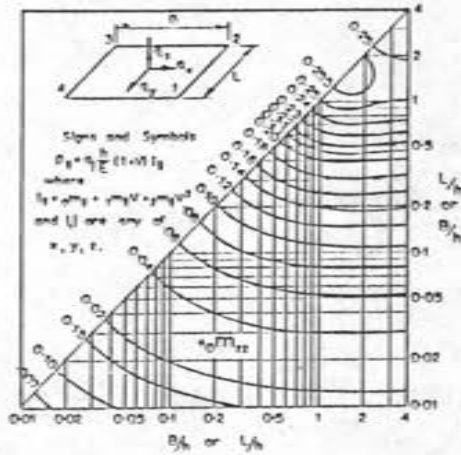
$$I_{XX} = \frac{0^m_{XX} + 1^m_{XX} \cdot \nu}{\dots\dots\dots( 2.8 )}$$

( เมื่อ  $2^m_{XX} = 2^m_{XY} = 0$  )

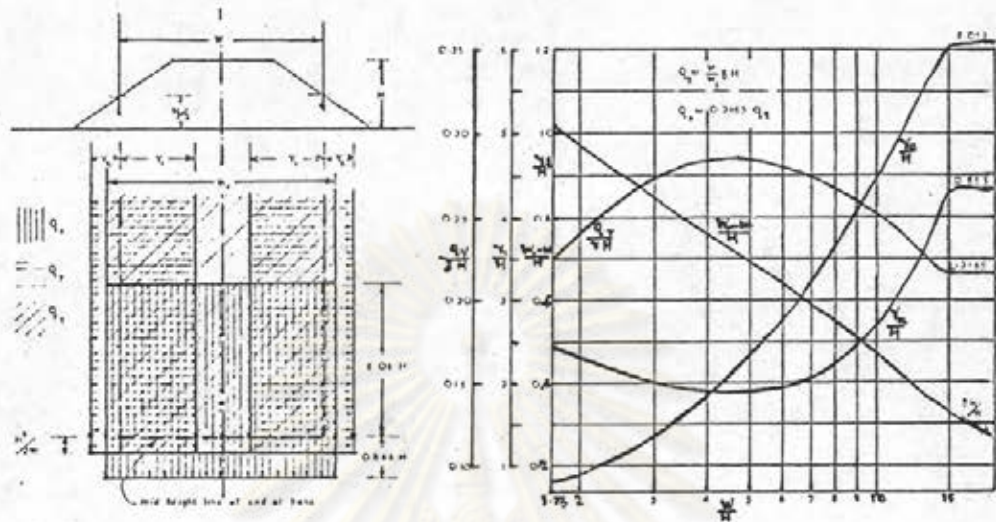
ค่า  $m$  หาได้จากกราฟรูป 2.15

จากทฤษฎีทั้งสองข้อดังกล่าว เมื่อนำมาใช้กับการหาการเคลื่อนตัวของคอสะพาน เราจะพิจารณาให้เป็นลักษณะของ จุดสิ้นสุดของดินถม ( End of an embankment ) ซึ่งการเคลื่อนตัวในแนวราบสู่แม่น้ำ ( Horizontal streamward movement ,  $\delta X$  ) และการทรุดตัวในแนวตั้ง ( Vertical Settlement ,  $\delta Z$  ) หาได้จากสมการ ซึ่งอยู่ในรูปของ Numerical value โดยที่เราต้องทำการเปลี่ยนพื้นที่รับน้ำหนักที่ปลายให้เป็นพื้นที่รับน้ำหนักสม่ำเสมอสมมูล ( the equivalent uniform Loaded area ) ซึ่งจะหาได้โดยใช้รูปที่ 2.16 (ก) , 2.16 (ข) ( Davis and Taylor , 1962 ) ดังนี้



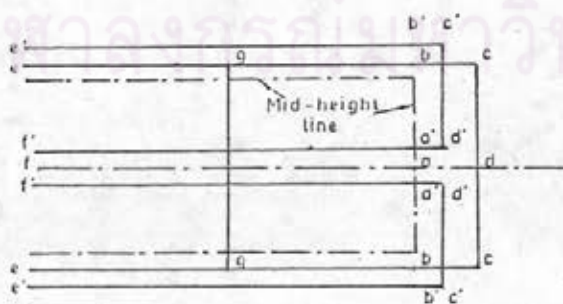
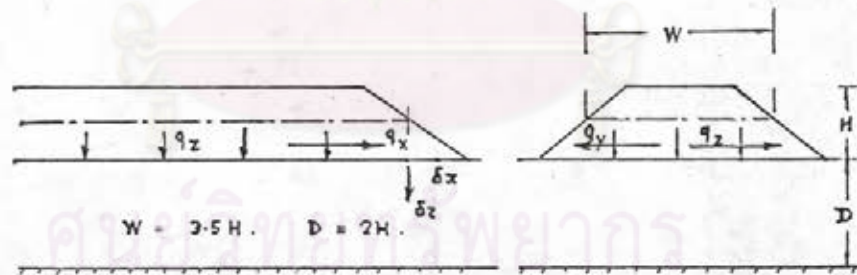


รูปที่ 2.15 แสดงตัวแปรที่ใช้ในการหาค่า I ในแนวแกนต่าง ๆ ( After Davis and Taylor , 1962 )



ก. รูปของพื้นที่รับน้ำหนักสมมูลสม่ำเสมอของสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ข. พื้นที่สี่เหลี่ยมของน้ำหนักสมมูล เมื่อน้ำหนักวางตั้ง .  $q_z$  . แทนด้วยสี่เหลี่ยม  $ecce$  . น้ำหนักแรงเฉือนที่ส่งผ่าน .  $q_y$  . แทนด้วยสี่เหลี่ยม  $e'c'd'f'$  . น้ำหนักแรงเฉือนตามยาว .  $q_y$  . แทนด้วยสี่เหลี่ยม  $gcccg$  .



รูปที่ 2.16 การเปลี่ยนพื้นที่รับน้ำหนักบริเวณจุดสิ้นสุดของดินถมให้เป็นพื้นที่รับน้ำหนักสม่ำเสมอสมมูล ( After Davis and Taylor , 1962 )



$$\delta = \frac{\gamma H D}{E} (1 + \nu) (M_0 + M_1 \nu + M_2 \nu^2) \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ  $\gamma H M = \sum q_i m_{ij}$

- เมื่อ  $m_{ij}$  หาได้จากรูป 2.15 โดยพิจารณาที่มุมของรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- D คือ ความลึกจนถึงชั้นที่พิจารณา
- E คือ Young's Modulus สภาพไม่มีการระบายน้ำ ( Undrain )  
ในกรณีที่จะหาการเคลื่อนตัวทันทีที่รับน้ำหนัก
- และคือ Young's Modulus สภาพที่มีการระบายน้ำ ( draine )  
ในกรณีที่จะหาการเคลื่อนตัวทั้งหมดสุดท้าย
- $\nu$  ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.5 กรณีที่จะหาการเคลื่อนตัวทันทีที่รับน้ำหนัก เป็น  $\nu'$   
ในสภาพที่มีการระบายน้ำเมื่อจะหาการเคลื่อนตัวทั้งหมดสุดท้าย

จากทฤษฎีของการหาการเคลื่อนตัวทั้งในแนวตั้งและแนวราบ ทั้งขนาดและทิศทางของจุดสิ้นสุดของดินถม เรายังสามารถใช้ได้กับโครงสร้างที่เป็นกลุ่ม ค่าการเคลื่อนตัวที่หาได้นั้น ในทางปฏิบัติค่าที่ได้อาจจะไม่ถูกต้องนัก ทั้งนี้เป็นเพราะว่า ปัญหาของชั้นดินที่ไม่เป็นเอกพันธ์ ( Non - Homogeneous ) กรณีที่เกิดการเคลื่อนตัวทางแนวราบมากพอ เนื่องจากน้ำหนักดินถมคอสะพานแล้ว จะต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบคอสะพานด้วย และวิธีการที่จะลดการเคลื่อนตัวในแนวราบทันทีที่รับน้ำหนักอาจทำได้ โดยเพิ่มความแข็งแรงด้านข้าง ( Lateral stiffness ) ของกลุ่มเสาเข็มโดยอาจใช้เป็น Raking Piles

#### 2.4 การศึกษาในทวีปเอเชียทางแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้

ได้มีการศึกษาปัญหาการทรุดที่ต่างกันของสะพานกับคอสะพานที่เกิดในประเทศไทย และประเทศมาเลเซีย ดังนี้

##### 2.4.1 การศึกษาในประเทศไทย

ได้มีการศึกษาโดยกองวิเคราะหฺวิจัย กรมทางหลวง ( วิชาญ . 2523 ) ซึ่งได้ศึกษาวิธีการและรูปแบบต่าง ๆ ที่ได้นำมาใช้กับบริเวณคอสะพานที่อยู่บนชั้นดินอ่อน ดังนี้

คือ



1. การใช้เสาเข็มก่อนความยาว ( relief piles ) แบบต่าง ๆ
2. ใช้วัสดุเบาประเภทซีเมนต์แกลบผสมปูนขาวเป็นดินถม
3. ใช้วิธีการอัดดินเดิมให้แน่น ( preloading )
4. ใช้วิธีอัดดินโดยใช้เข็มทรายช่วย ( sand - drained preloading )

จากผลการศึกษาได้เปรียบเทียบการทรุดตัวของดินถมบริเวณคอสะพานแบบต่าง ๆ ดังกล่าว ปรากฏว่า การก่อสร้างถนนที่มีปริมาณจราจรสูงและดินเดิมอ่อนมาก มีวิธีที่ให้ผลในชั้นนำพอใจคือ การใช้เสาเข็มก่อนความยาวแบบมีแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็กอยู่บนหัวเสาเข็ม และการอัดดินโดยใช้เข็มทรายช่วย ส่วนวิธีใช้เสาเข็มก่อนความยาวแบบที่มีแท่นหัวเข็ม ( pile cap ) เสี่ยงต่อการไหลของดินเดิมที่จะทำให้เกิดแรงดันตามแนวนอนที่คอสะพานได้มาก และยังมี การทรุดตัวเกิดมากในดินที่อยู่ระหว่างแท่นหัวเข็มกับเสาเข็ม สำหรับวิธีการอื่น ๆ นั้น ก็จะทำให้ผลในชั้นพอใจได้ หากดินเดิมไม่อ่อนตัวมากนักและปริมาณจราจรมีไม่มาก

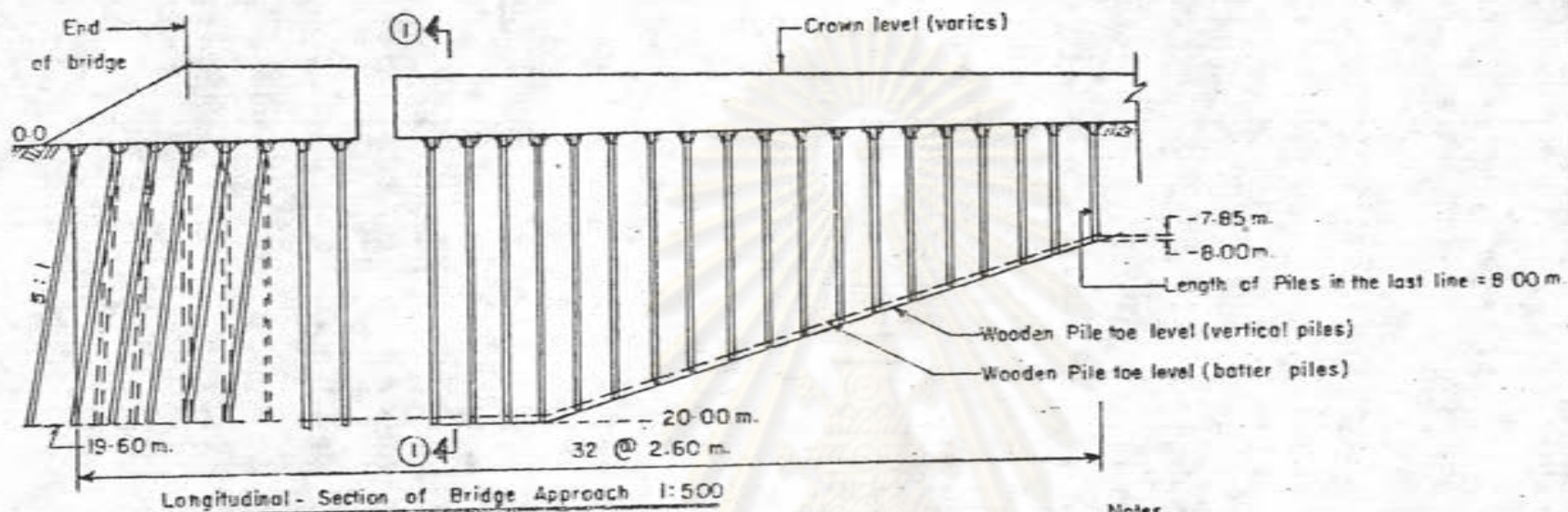
การศึกษาเกี่ยวกับการทรุดตัวของคอสะพานบนทางหลวงสายต่าง ๆ พอสรุปได้ดังนี้

1. บางนา - บางปะกง รูป 2.17 คอสะพานทางสายนี้ได้ออกแบบเพื่อรักษา Stopping sight distance ของ Vertical alignment ที่บริเวณสะพานไว้ในช่วงแรก ที่ติดกับสะพานยอมให้มีการทรุดตัวน้อยมาก ได้ใช้เสาเข็มขนาดยาวหยั่งลงไปถึงชั้นดินแข็ง จากช่วงนี้เป็นช่วงก่อนการทรุดตัว ( settlement transition ) จึงใช้เสาเข็มลดความยาวลงทีละน้อย โดยเสาเข็มค้ำสุดท้ายยาวประมาณ 7.85 เมตร ดินถมคอสะพานสูง 4 เมตร

ผลการวัดการทรุดตัวของคอสะพานบริเวณสะพานข้ามคลองจรเข้ ปรากฏว่าที่คอสะพานด้านบางนา การทรุดตัวในช่วงเสาเข็มยาวหยั่งถึงชั้นดินแข็งจะเกิดขึ้นไม่มากนัก แต่มีการทรุดตัวไม่ต่อเนื่อง เกิดที่ตอนปลายช่วงเสาเข็มสั้นทำให้เกิดเป็นคลื่นที่ระยะประมาณ 80 เมตร ห่างจากสะพาน และขนาดการทรุดตัวที่วัดได้ที่คอสะพานด้านบางนา มีการทรุดตัวมากกว่า 4 ซม. ส่วนคอสะพานด้านบางปะกง การทรุดตัวประมาณ 1 ซม. ในช่วงเวลา 9 เดือน

2. ธนบุรี - ปากท่อ รูป 2.18 คอสะพานทางสายนี้ได้ออกแบบโดยเลือกใช้วัสดุน้ำหนักเบา ๆ เช่นซีเมนต์แกลบผสมปูนขาว และทำ preload ดินถมคอสะพานมีความสูงประมาณ 2.50 ม.

ผลการวัดการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณที่ใช้วัสดุเบาสูงกว่าบริเวณที่เป็นตัวถนน

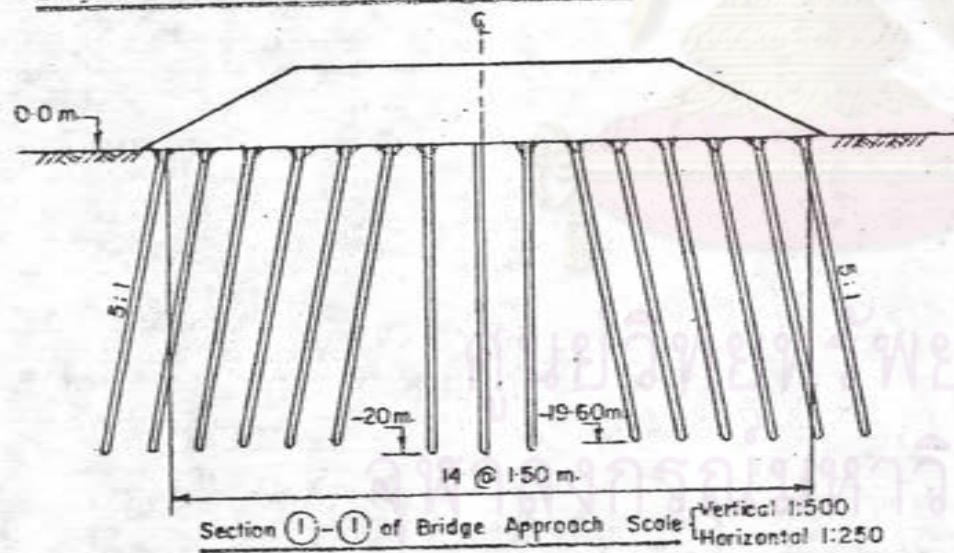


Notes

Piling at

Klong Bang Nam Chud = 83.20 m.

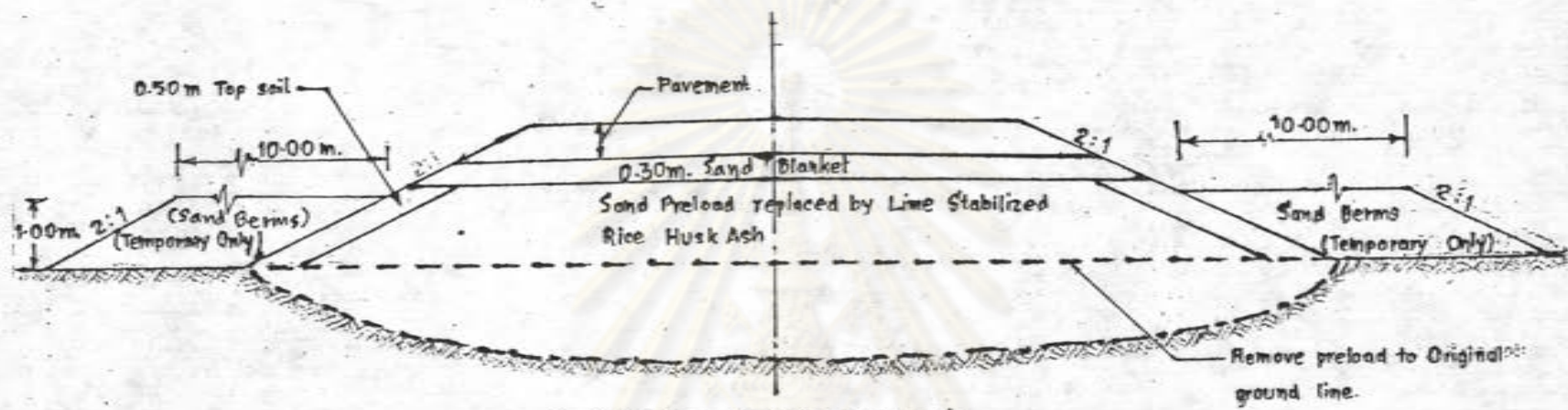
Klong Jarokae = 88.60 m.



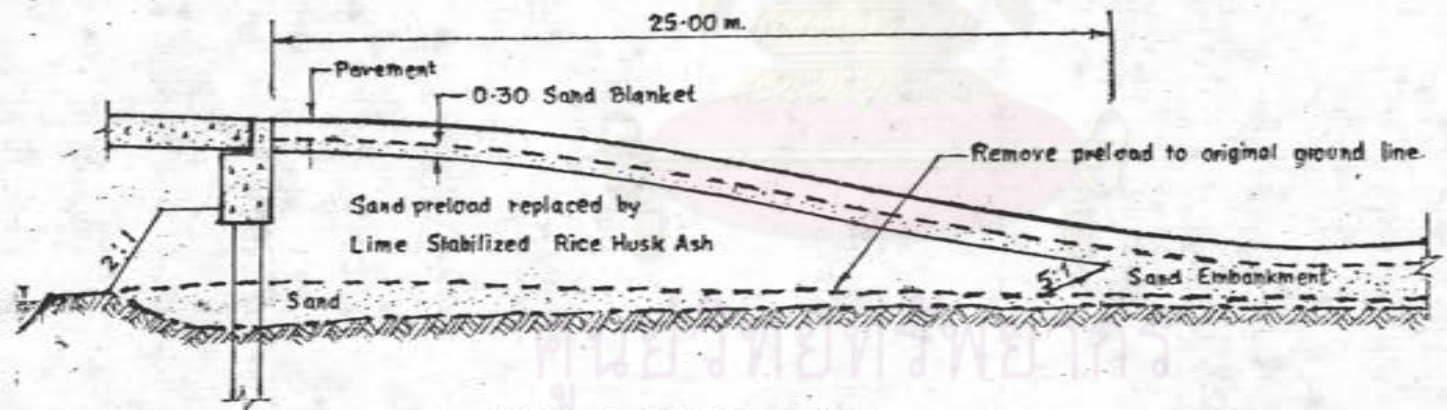
รูปที่ 2.17 แบบแสดงก่อสร้างสะพานของทางหลวงสาย บางนา-บางปะกง ( After วิธานี , 2523 )







Typical Section at Bridge Approach



Profile of Bridge Approach

รูปที่ 2.18 แบบแสดงคอสะพานของทางหลวงสาย อนุรี-ปากท่อ ( After วิชาญ . 2523 )

ธรรมชาติ คอนปลายของช่วงที่ใช้วัสดุเบาถมมีรอยคลื่นและแอ่งทรุดตัว เนื่องจากแรงกระทำของรถทั้งยังพบว่าทรุดตัวของดินถมคอสะพานจะมากในขณะที่รถวิ่งออกจากสะพาน ซึ่งอัตราการทรุดตัวของช่วงที่ดินถมอ่อน ทางด้านปากท่อประมาณ 1.3 ซม./เดือน และด้านอนุบริประมาณ 1.5 ซม./เดือน

3. คลองด้าน - ขางบ่อ รูป 2.19 สำหรับสะพานด้านทิศใต้ การออกแบบของทางสายนี้ ก็เพื่อป้องกันการพังทลายเป็นส่วนใหญ่ และเป็นการลดอัตราการทรุดตัวของคอสะพานลง ฉะนั้นเสาเข็มในช่วงที่ติดกับสะพานจึงไม่ยาวพอที่จะหยั่งลงไปถึงชั้นดินแข็ง ด้วยวิธีนี้ การทรุดตัวรวมยังคงมีมากอยู่เพียงแต่อัตราการทรุดตัวลดลงเท่านั้น ดินถมคอสะพานสูงประมาณ 3.0 เมตร ส่วนคอสะพานด้านทิศเหนือมีเฉพาะแผ่นพื้นคอนกรีตไม่มีเสาเข็มรองรับ

ผลปรากฏว่า ทางด้านเหนือซึ่งใช้แผ่นพื้นคอนกรีตโดยไม่ได้ดอกเสาเข็ม เกิดรอยหักของพื้นคอนกรีตที่ระยะประมาณ 5 เมตร เกิดเป็นร่องลึกประมาณ 8 ซม.

ส่วนทางด้านทิศใต้ รูปร่างการทรุดตัวค่อนข้างจะเรียบ

4. สะพานสุทธิสาร รูป 2.20 ไม่มีการเสริมกำลังของดินเดิมแต่อย่างใด การออกแบบได้ใช้วิธี Preload ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินเดิม เพื่อลดอัตราการทรุดตัวและดินถมคอสะพานสูงประมาณ 2.5 เมตร

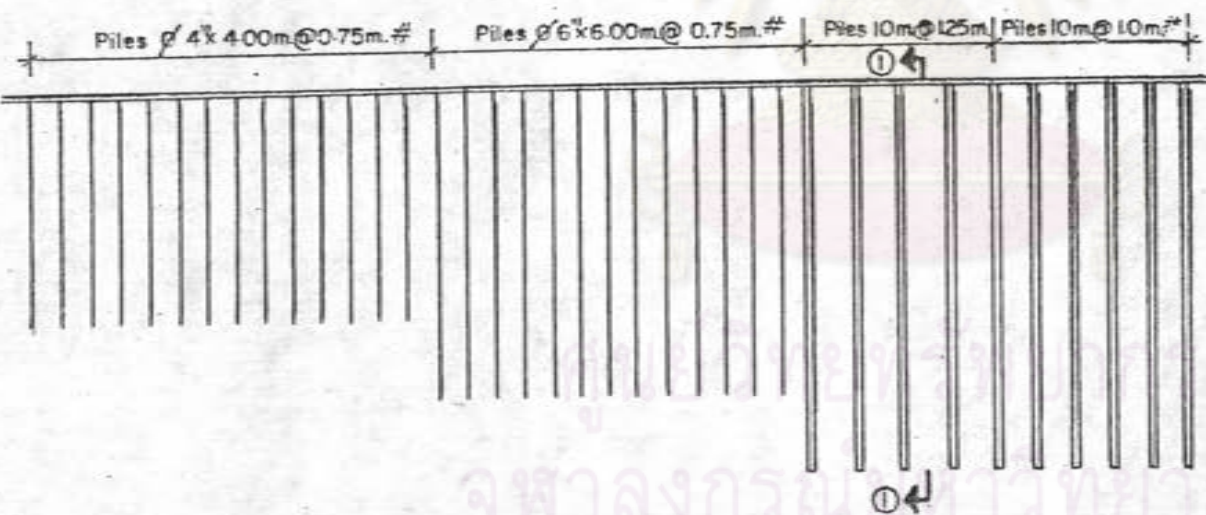
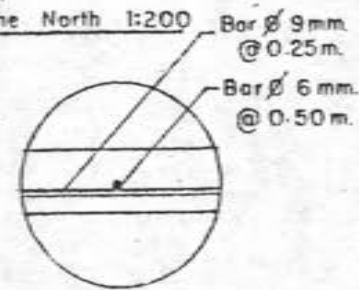
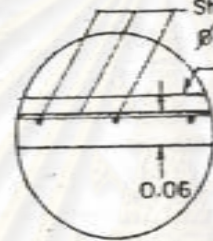
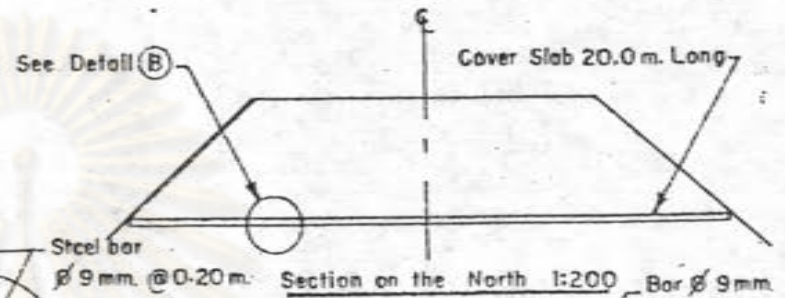
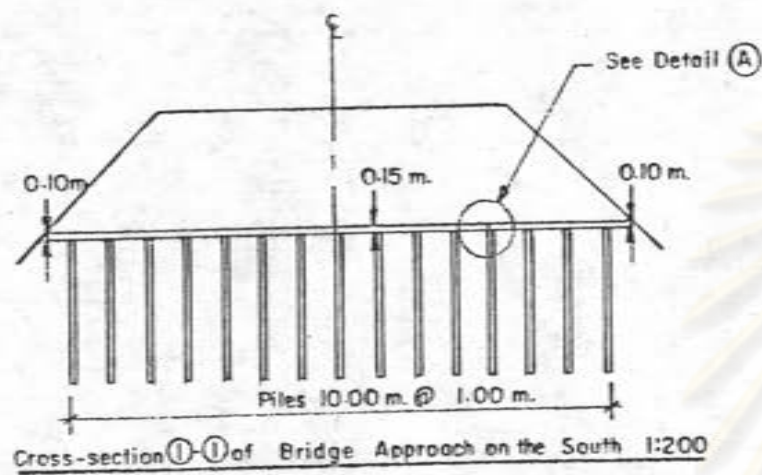
ผลการทรุดตัวของดินถมทั้งสองด้าน มีลักษณะคล้ายคลึงกัน บริเวณที่ทรุดตัวเป็นแอ่งอยู่ที่ระยะประมาณ 20 เมตร จากคอสะพานในระยะเวลา 5 เดือน มีการทรุดตัวประมาณ 25 ซม. ทางด้านดินแดง 6.5 ซม. ทางด้านลาดพร้าวและจากอัตราการทรุดตัวที่วัดได้ แสดงว่าวิธี Preload กับดินเดิมที่มีกำลังอ่อนปานกลาง ก็ให้ผลดีพอประมาณ

5. สะพานท่าช้าง รูป 2.21 ใช้วิธีการระบายน้ำด้วยทราย ( Sand drain ) เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของดินเดิม ดินถมคอสะพานสูงประมาณ 5.0 เมตร

ผลการทรุดตัวในช่วงที่มี sand drain จะน้อยกว่าดินถมช่วงถัดไป ไม่มีคลื่น มีความเรียบตามยาวของผิวทางอยู่ในสภาพค่อนข้างดี ในช่วงเวลา 10 เดือนที่สังเกตพบว่าการทรุดตัวสูงสุดประมาณ 4 - 5 ซม.

จากรูปที่ 2.22 เป็นผลจากการศึกษาข้างต้น จะเห็นได้ว่าตำแหน่งที่มีการทรุดตัวมากที่สุด เกิดประมาณที่ระยะ 5 เมตร และ 10 เมตร ห่างจากปลายสะพานและบริเวณที่มีการทรุดตัวมากที่สุด ในเวลาสั้น ๆ ได้แก่บริเวณที่ไม่มีสิ่งถ่ายน้ำหมักลงไปในระดับลึก การไหล

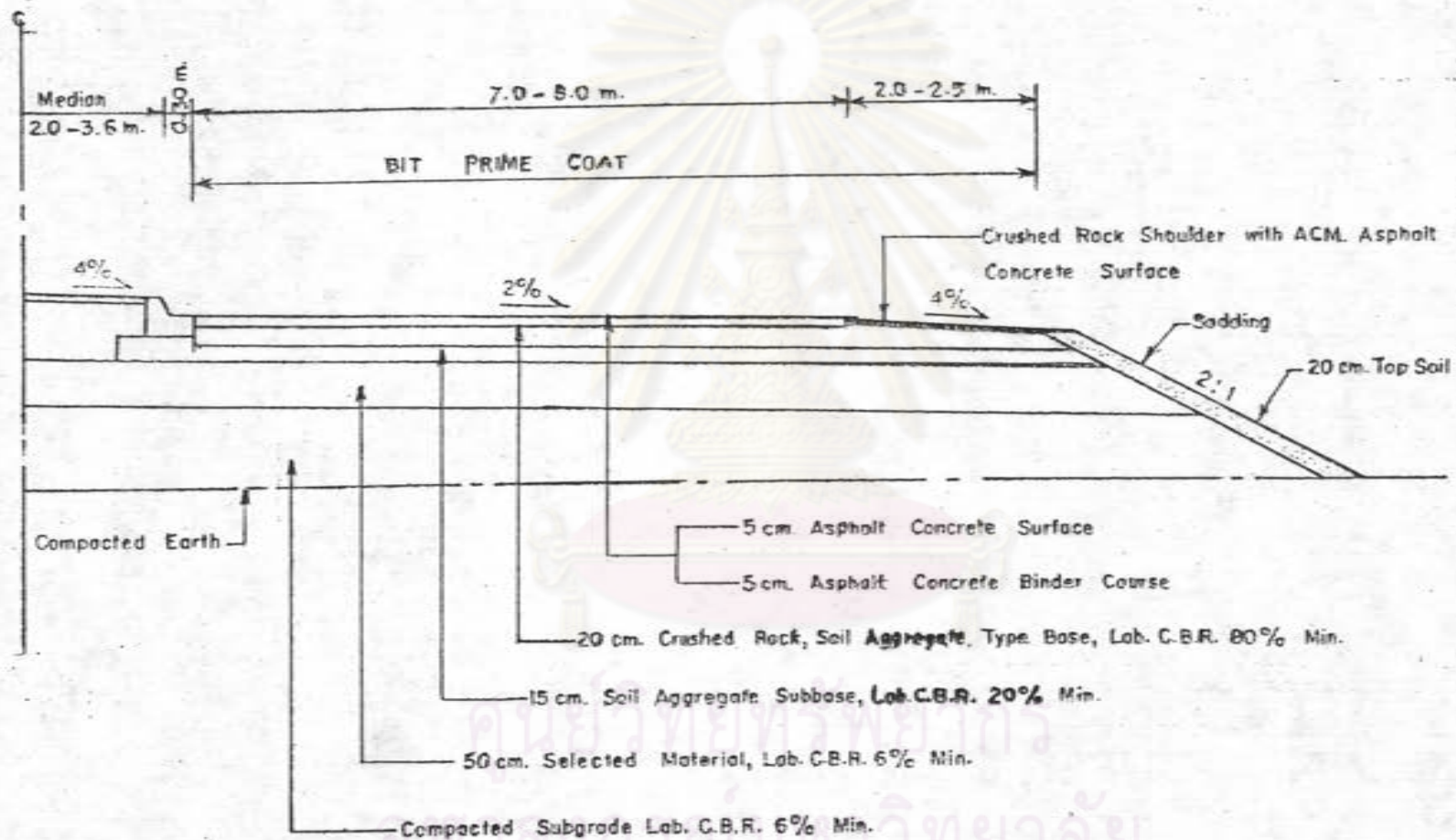




Longitudinal Detail of Piles and Cover Slab of Bridge Approach on the South 1:200

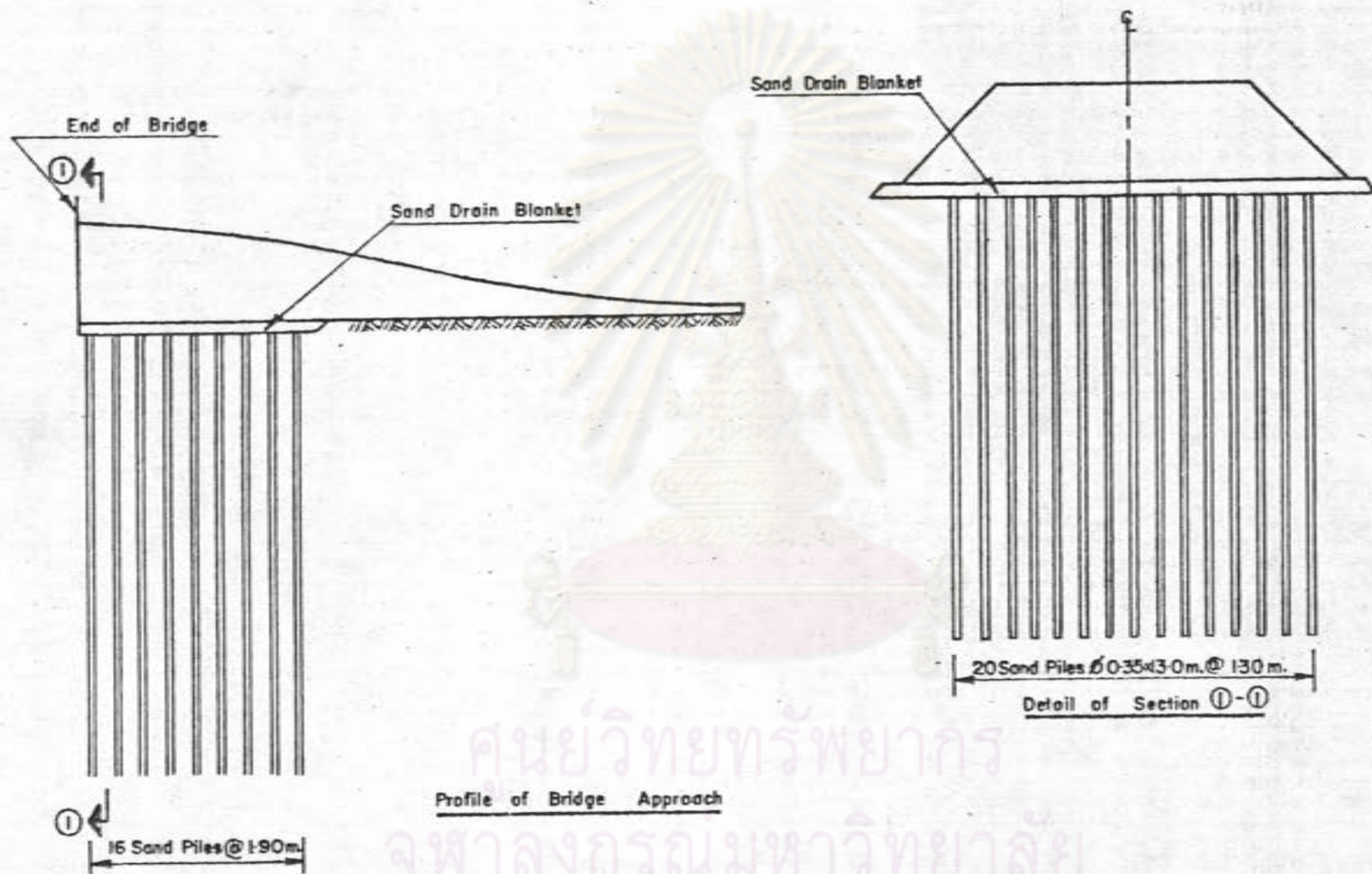
**Notes**

- P.C.C. Y 72/10
- I Wooden Piles
- Reinforcing Steel in Wooden Piles
- Section are ∅ 9 mm. in Transverse
- and ∅ 6 mm. in Longitudinal @ 0.30 m.



รูปที่ 2.20 รายละเอียดรูปตัดคอสพานบริเวณสะพานสุทธีสาร ( After วิชาญ . 2523 )



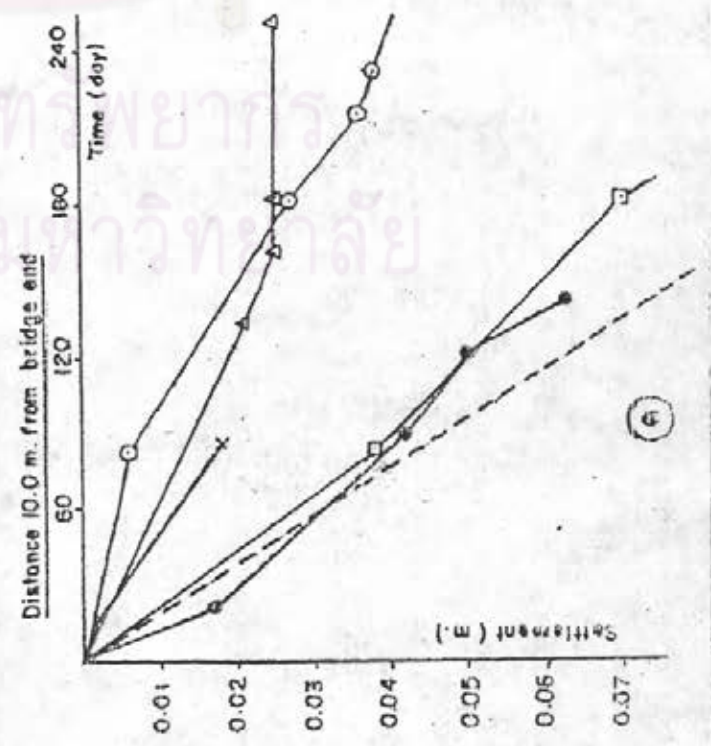
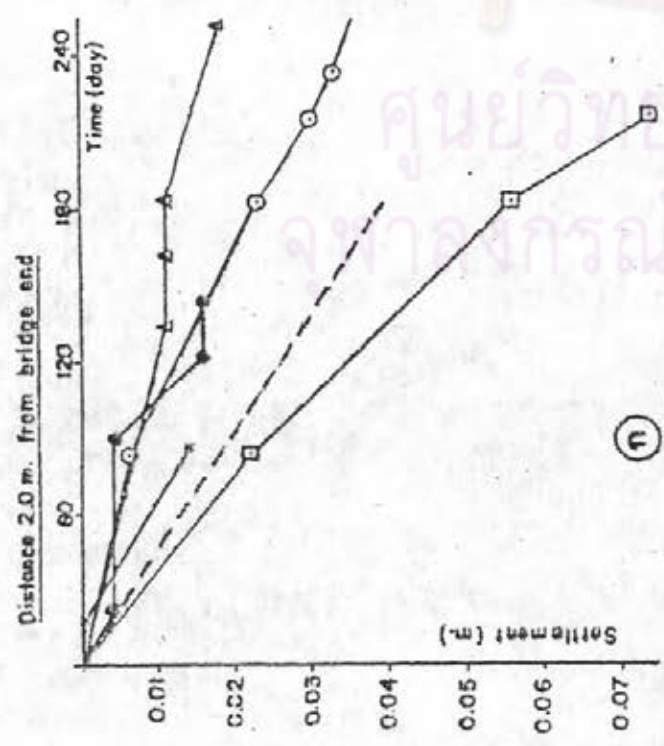
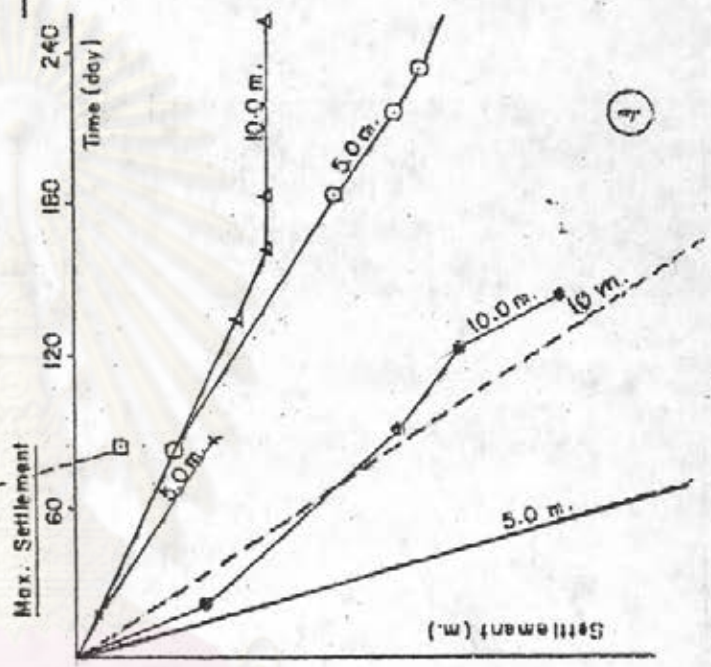
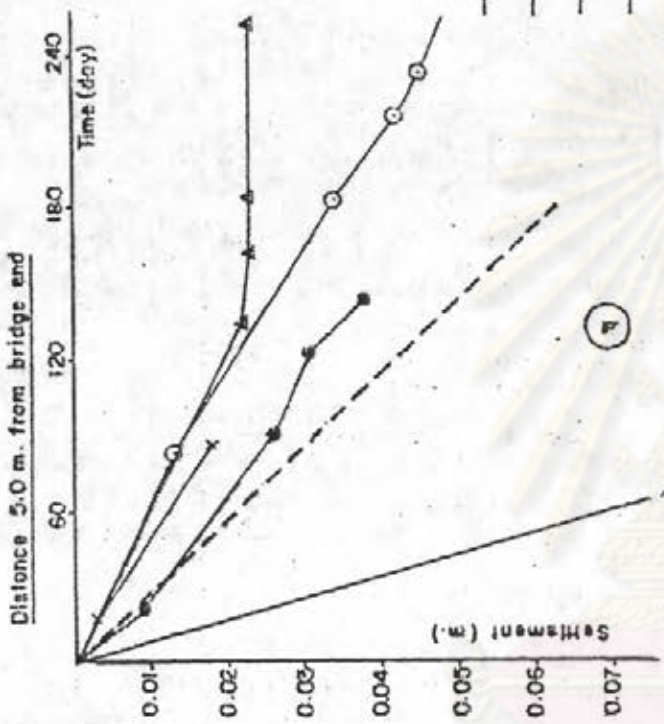


รูปที่ 2.21 รายละเอียดบริเวณคอสะพานทำข้าง ( สะพานพระปิ่นเกล้า ฯ ) ด้านฝั่งธนบุรี

( After วิชาญ . 2523 )

รูปที่ 22

- Preloading
- x— Long pile + cap
- ▲— Sand drain
- Slap
- Slab+short piles
- Rice Hash Ash



รูปที่ 2.22 กราฟ เปรียบเทียบการทรุดตัวกับเวลาจากวิธีการต่าง ๆ ( After วิษญู , 2523 )

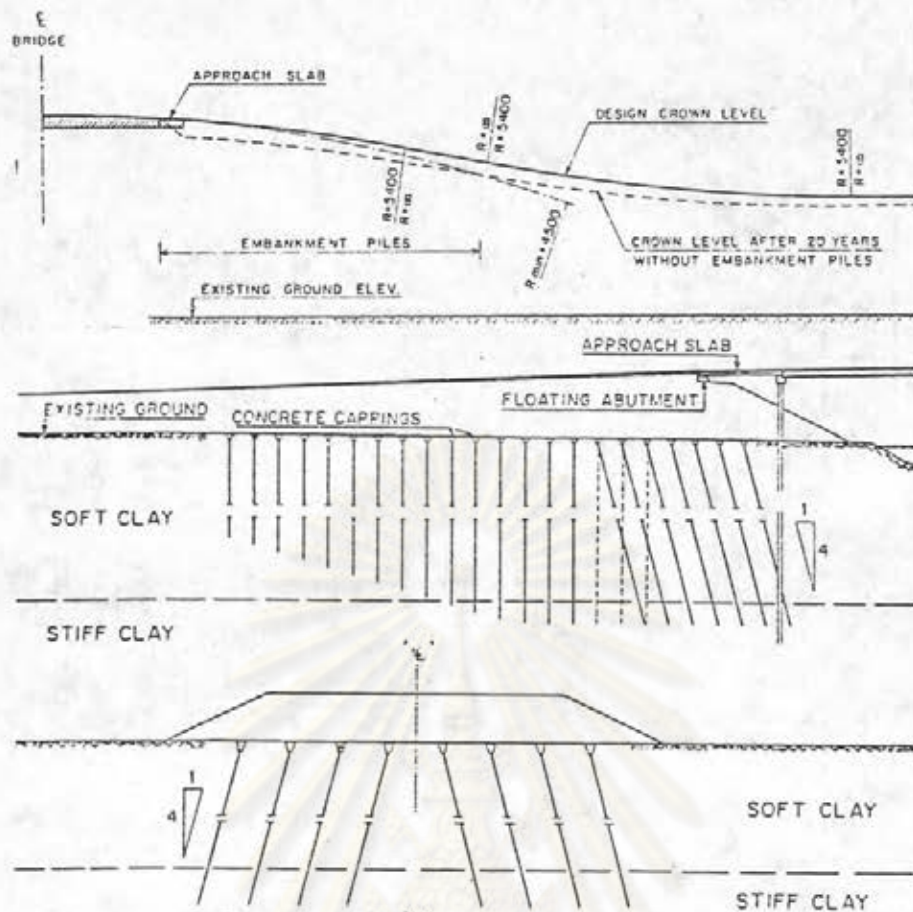


ตัวจึงอยู่ที่ระดับดิน ทำให้เกิดการทรุดตัวมากที่สุด

Soren Holmberg ( 1978 ) ได้ทำการศึกษาคอสะพานในบริเวณดินอ่อน โดยมีเสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ( Embankment Piles ) ของทางหลวงสายบางปะอิน - นครสวรรค์ โดยมีแผ่นพื้นคอนกรีตคอสสะพาน ( approach slabs ) วางอยู่บนค่อมลอย ( floating abutment ) จากการศึกษาเป็นเวลา 6 ปี หลังจากเปิดจราจร พบว่ามีการทรุดตัวของคอสสะพานอยู่ในช่วงครึ่งเมตร ( 50 ซม. ) โดยเข็มที่รับน้ำหนักคันทางทรุดตัวแบบที่ยังทำให้ตัวสะพานและคอสสะพานยังคงเรียบสม่ำเสมอ ( smooth transition ) วิธีการให้เสาเข็มช่วยรับน้ำหนักคันทางนี้ไม่ใช่เทคนิคใหม่เลยในปี 1983 มาตรฐานของ National Swedish Road Board. ก็แนะนำให้ใช้กรณีที่ดินอ่อนมีความหนาแน่นกว่า 6 เมตร ( Flodin & Broms , 1977 ) และ Kjellman ( 1940 ) แนะนำวิธีการออกแบบเสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ของทางหลวงสามบางปะอิน - นครสวรรค์ มีแนวทางผ่านบริเวณที่เป็นดินอ่อนซึ่งบางช่วง เป็นร่องแม่น้ำเดิม ชั้นล่างเป็นดินเหนียวแข็ง มีค่าแรงเฉือนสูง ดังแสดงรายละเอียดโดย E IDE ( 1968 ) การออกแบบเสาเข็มรับน้ำหนักคันทางของเส้นทางนี้แสดงในรูปที่ 2.23 การออกแบบเพื่อให้ได้ความเร็ว 80 - 100 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยประมาณการทรุดตัวที่เกิดในเวลา 20 ปี แบบไม่มีเสาเข็มช่วยดังรูป 2.23 การจัดเรียงเสาเข็มแสดงไว้ในรูปที่ 2.23 โดยคอกเป็นแนวเฉียง 1:4 การออกแบบให้เสาเข็มรับน้ำหนักดินถมคันทางทั้งหมด ความยาวเสาเข็มเท่ากับ 16 ม. เส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ 20 ซม. สำหรับเสาเข็มไม้และถ้าเป็นเสาเข็มคอนกรีตจะมีขนาด 0.22 x 0.22 ม. เมื่อใช้เข็มยาวกว่า 16 ม. มีแท่นหัวเข็ม ( pile cap ) ขนาด 0.80 x 0.80 ม. รายละเอียดของเสาเข็มแสดงในตารางที่ 2.4 จากการศึกษาในปี 1978 พบว่าได้ผลเป็นที่น่าพอใจ เพราะในช่วง 6 ปี ไม่มีการปรับปรุงพิจารณาเลย แสดงให้เห็นว่าการใช้เสาเข็มรับน้ำหนักคันทางได้คอสสะพานที่ผ่านบริเวณดินอ่อนเหมาะสมเพียงพอในการแก้ปัญหาการทรุดตัวที่ต่างกัน ( Soren Holmberg )

#### 2.4.2 การศึกษาในประเทศมาเลเซีย

ในมาเลเซียได้มีการใช้เสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ( Piled Embankment ) เพื่อลดการทรุดตัวของทางด่วนสาย Jitra by Changkat Jering Toll ในรัฐ Jalan Derga ดังรูป 2.24 ความยาวของดินถมคอสสะพานเท่ากับ 220 ม. ผ่านบริเวณที่เป็นดินอ่อน



รูปที่ 2.23 วิธีการออกแบบเสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ( Embankment Pile ) บริเวณคอสะพานของทางหลวงสาย บางปะอิน-นครสวรรค์ ( After Holmberg , 1978 )

ตารางที่ 2.4 รายละเอียดของเสาเข็มรับน้ำหนักคันทางที่ใช้กับทางหลวงสายบางปะอิน-นครสวรรค์ ( After Holmberg ; 1978 )

Bridge (km)	Bridge Function	Length of Piled Section (m)	Maximum Emb. Height(m)	Minimum Emb. Height(m)	Pile Type	Pile Lengths (m)	Number of Piles	Total Pile Length (m)	Capping Area (m <sup>2</sup> )	Capping Area (%)	Capping Area max(%)	Capping Area min%
54 + 910	S Flood Relief	52.5	3.8	3.1	T	6-7-9-11	268	2520	135	10	14	6.0
		86.5	3.6	3.1	T	12-13-14-15	464	6610	233	11	19	5.0
56 + 982	S Khlong Crossing	80.0	4.8	4.2	C/T	6-8-9-12-15-17-18	260/168	4570/1692	238	10	16	5.0
		76.0	5.1	4.4	C/T	6-8-10-13-15-17	224/178	3808/1826	226	10	15	5.0
57 + 891	S Khlong Crossing	89.5	6.1	4.4	T	6-7-8-9-10-11	633	6017	318	11	16	5.6
		89.5	6.1	4.4	T	6-7-8-9-10-11	633	6017	318	11	16	5.6
60 + 320	S Flood Relief	47.5	3.8	3.5	T	6-7-9-10-11	231	2121	116	9	16	3.7
		47.5	3.8	3.5	T	6-7-9-10-11	231	2121	116	9	16	3.7
62 + 204	S Khlong Crossing	75.0	5.2	4.6	T	6-7-8-9-10-11	404	3631	203	9	16	4.4
		89.0	6.0	5.2	T	6-7-8-9-10-11	546	4985	275	11	16	6.0
64 + 829	S Khlong Crossing	67.0	4.9	3.8	T	8-9-10	365	3360	184	10	16	4.9
		96.0	6.3	4.3	T	7-8-10	639	5981	321	10	17	4.6
66 + 315	S Flood Relief	53.5	3.5	3.4	T	6-7-9	256	2007	129	10	13	5.4
		53.5	3.9	3.5	T	6-7-9	256	2007	129	9	13	5.3
69 + 430	S Flood Relief	37.5	~3.5	~3.5	T	5-6-8-9	196	1485	99	10	15	4.1
		37.5	3.8	3.5	T	5-6-8-9	196	1485	99	10	14	4.1
71 + 486	S Crossing Irrigation Canal	48.5	3.5	3.0	C	17-18-19	148	2697	95	8	13	5.3
		52.5	3.3	3.2	C	16-17-18-19	183	3297	117	9	15	5.3
72 + 058	S Flood Relief	31.5	3.1	2.9	T	6-7-8.5	105	808.5	53	7	10	4.4
		31.5	3.1	2.9	T	6-7-8.5	105	808.5	53	7	10	4.4
72 + 384	S Khlong Crossing	19.0	3.2	2.9	T	6-8	75	558	38	8	9	5.0
		21.0	3.7	3.4	T	6-9-10	84	720	42	8	9	5.0

T= Timber piles, C= Concrete piles.



( soft alluvium ) ความสูงของคันทางจาก 2.57 ถึง 5.78 ม. ช่วงที่มีเสาเข็มรับ น้ำหนักยาว 140 ม. โดยในช่วงที่มีความสูงดินถมน้อยกว่า 3.34 ม. จะอยู่บนดินเดิมที่ไม่ มีการปรับปรุง ระยะห่างระหว่างเสาเข็มจะเท่ากับ 3.2 ม. ในช่วงปลายดินถมด้านสูง และ 3.8 ม. ในช่วงปลายที่ต่ำกว่าเสาเข็มแต่ละต้นมีแท่นหัวเข็มขนาด 1.60 ม. เข็มที่ใช้เป็นแบบ Cylindrical Spun เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก = 500 ม.ม. หน้าหนา 130 ม.ม. ยาว 20 ม. การออกแบบอาศัยหลักของพฤติกรรมร่วมกันของแท่นหัวเข็มกับการเกิด arching ของดิน โดยที่แท่นหัวเข็มจะถูกออกแบบให้รับน้ำหนักทั้งหมดของคันทาง โดยสมมุติฐานว่า น้ำหนักที่กระทำแก่กระจายสม่ำเสมอทั่วแท่นหัวเข็ม การหาระยะห่างได้จากความสัมพันธ์ที่หาโดย Walter Kjellman ( 1941 ) ซึ่งทำการทดสอบผลจาก Model โดยใช้ทรายแห้ง ซึ่งพบ ความสัมพันธ์ของ  $( S/d )^2$  และ  $h/d$  เมื่อ  $d$  คือเส้นผ่าศูนย์กลางของแท่นหัวเข็ม .  $S$  คือระยะห่างซึ่งลดลงเมื่อความสูงของคันทาง (  $h$  ) ลดลง, Broms ( 1979 ) แนะนำว่า แท่นหัวเข็มควรมีพื้นที่อย่างน้อยเท่ากับ 30% ในบริเวณดินอ่อน และสำหรับในดินกรุงเทพฯ ( Bangkok Clay ) Holmberg ( 1978 ) พบว่าสำหรับคันทางที่สูงไม่เกิน 6 เมตร จะมีพื้นที่ของแท่นหัวเข็มที่เหมาะสมน้อยที่สุดเท่ากับ 4.1% Hansbo ( 1983 ) พบว่าการ เกิด arching จะเกิดได้ดีในทรายถมที่มีแรงเสียดทานภายในสูงและ arching นั้น จะเกิด จากอิทธิพลของความกว้างของ interspace มากกว่าขนาดของแท่นหัวเข็ม Terzaghi & Peck ( 1976 ) พบว่า แรงดันสูงสุด ( ultimate pressure ) ที่คันทางกระทำต่อดิน ฐานราก ในช่วงว่างระหว่างขอบของแท่นหัวเข็ม จะมีน้อยและไม่ขึ้นกับความสูงของดินถมคันทาง ด้วย ถ้าเป็นทรายถมที่มีแรงยึดเกาะบ้าง แรงดันจะไม่ลดลง แม้ว่าจะเอาดินข้างใต้ทรายถม นั้นออกไป ดังนั้นการใช้วัสดุที่มีแรงยึดเกาะ ( Cohesive material ) เป็นดินถมคันทาง จะดีกว่า เพราะ arching ที่เกิดจะส่งผ่านแรงดันจากส่วนที่เกิด Yielding ไปยังส่วนที่เป็น immobile จากการศึกษาบริเวณไม่มีเสาเข็ม ซึ่งสร้างในช่วง 15 กันยายน 1981 ถึงกรกฎาคม 1982 การทรุดตัวเกิดหลังจากถมได้สูงเต็มที่ดังนี้ ( รูป 2.24 )

25 มม. - 32 มม. ตามแนว A

35 มม. - 52 มม. ตามแนว B

31 มม. - 48 มม. ตามแนว C





สำหรับในบริเวณที่มีเสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ที่สร้างเสร็จเมื่อ 15 สิงหาคม 1982 พบว่า ไม่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นกับจุดที่วาง settlement plate C บนหัวเสาเข็ม แต่จุดอื่นซึ่งวางระหว่างแท่นหัวเข็ม บนชั้นดิน ปรากฏการทรุดตัวเกิดในช่วง 3 ถึง 13 มม. 1 ถึง 9 มม. และ 4 ถึง 30 มม. สำหรับการทรุดตัวตามแนว A , B และ C ตามลำดับ จากการศึกษาการใช้เสาเข็มรับน้ำหนักคันทาง ในบริเวณ Alor Setar และ Prai พบว่า เหมาะสม และเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพในการลดปัญหาการทรุดตัวที่มากเกินไปในบริเวณดินอ่อน และค่าก่อสร้างจะตกประมาณ 26% ของสะพาน และใน Trai ซึ่งมีดินถมคันทางสูงถึง 7.5 ม. ค่าใช้จ่ายประมาณ 33% ของสะพาน

จากผลของการศึกษาในอดีตที่ผ่านมา อาจสรุปการทรุดตัวที่เกิดขึ้นได้ 2 อย่างคือ

1) การทรุดตัวที่เกิดกับดินถมคอสะพานทรุด ซึ่งอาจเกิดจากการใช้วัสดุถมไม่ดี หรือการบดอัดไม่ดีพอ

2) การทรุดตัวที่เกิดกับดินเดิม ( Foundation )

วิธีการแก้ไขปัญหาก็อาจทำได้ด้วยวิธีการต่าง ๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งทั้งหมดขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 อย่างคือ

1. การออกแบบที่ดี
2. การเลือกใช้วัสดุที่ดีพอ
3. การเลือกวิธีการก่อสร้างที่ดี

ส่วนงานวิจัยเรื่องการทรุดตัวของคอสะพานในบริเวณดินอ่อน โดยใช้หน่วยแมริง ( ที่สะพานปลัด เป็ซียง ) เพื่อหาวิธีการที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ เพื่อใช้ประมาณค่าการทรุดตัวทั้งหมดที่เกิดขึ้น ( Total Settlement ) ในชั้นดินเดิม ( Foundation ) โดยถือว่า ไม่มีการทรุดตัวเกิดขึ้นในชั้นดินถมคอสะพาน ( Bridge Approach Embankment ) และรูปแบบคอสะพานมีการใช้เสาเข็มผ่อนความยาวเป็นลักษณะ Sine curve โดยมีแผ่นพื้นคอนกรีตเสริมเหล็ก ( slab ) ปิดหัวเสาเข็มทั้งหมด ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Embankment slab ( เป็นโครงสร้างที่กันการทรุดตัวทางตั้งอย่างเดียว ) แต่กรมทางหลวง มักนิยมใช้คำว่า Bearing Unit ( เพื่อเป็นโครงสร้างที่กันได้ทั้งการทรุดตัวแนวตั้งและการเคลื่อนตัวแนวราบ ) ในงานวิจัยนี้ผู้เขียนจะใช้คำว่า Bearing Unit และเนื่องจากโครงสร้างประกอบด้วยเสาเข็มจำนวนมาก วิธีการหาการทรุดตัวจึงเน้นเรื่องการทรุดตัวของเสาเข็มดังจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป