



การวิเคราะห์เสถียรภาพคันดินทางรถไฟที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว
โดยใช้วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

STABILITY ANALYSIS OF CEMENT AND LIME STABILIZED RAILWAY
EMBANKMENT BY FINITE ELEMENT METHOD

ศิริศักดิ์ จินดาพล (Sirisak Jindapon)¹

สยาม ยิ้มศิริ (Siam Yimsiri)²

สุทธิศักดิ์ ศรีลัมพ์ (Suttisak Soralump)¹

อภินิติ โชติสังกาส (Apiniti Jotisangasa)¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

บทคัดย่อ : การก่อสร้างคันดินทางรถไฟในบริเวณภาคเหนือตอนล่างนั้น ได้ใช้ดินเหนียวในบริเวณแนวเส้นทางมาเป็นวัสดุก่อสร้าง ซึ่งดินนี้จะเสถียรกำลังอย่างมากเมื่อถูกแช่น้ำซึ่งเป็นสภาวะที่ต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝน ทำให้แนวรางรถไฟในบริเวณดังกล่าวเกิดการเคลื่อนตัวทำให้รถไฟไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ และยังคงมีการบำรุงรักษาคันทางอยู่บ่อยครั้ง จากปัญหาดังกล่าวจึงได้เกิดชุดโครงการวิจัยเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังกล่าวด้วยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาว ในบทความนี้จะนำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของคุณสมบัติของดินดังกล่าวหลังจากถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันดินทางรถไฟ เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการก่อสร้างต่อไป

ABSTRACT : The railway embankment in the Northern of Thailand was constructed from local clayey soil which loses its strength considerably in submerged condition. This submerged condition is encountered every year during rainy season, some years are more severe than other. This condition results in embankment deformation which leads to excessive track irregularity, low riding comfort, and low allowable train speed. Consequently, there were research projects studying about improving local soil by cement and lime to achieve better construction material. This paper presents the finite element analysis on the stability of the railway embankment constructed by improved soils. The engineering properties of the improved soils are taken from laboratory investigation by previous research projects. The results from this paper should be useful in determining construction criteria by these improved soils.

KEYWORDS : Embankment, Cement/lime stabilization, Submerged condition, Clay, Finite element

1. บทนำ

จากการสำรวจและวิเคราะห์คุณสมบัติของดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟในแถบจังหวัดภาคเหนือตอนล่าง [1] พบว่าคันทางรถไฟใน

บริเวณดังกล่าวมีปัญหาการเคลื่อนตัวทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของราง ซึ่งนำไปสู่การโคลงตัวของรถไฟที่วิ่งผ่านบริเวณดังกล่าวทำให้ไม่สามารถวิ่งด้วยความเร็วที่ออกแบบไว้ได้ส่งผลให้เกิดความล่าช้าใน



การเดินทางและอาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ อีกทั้งต้นทุนทางในบริเวณดังกล่าวยังต้องการการบำรุงรักษามาก เนื่องจากดินที่ใช้ก่อสร้างคันทางรถไฟซึ่งเป็นดินเหนียวในท้องถิ่นนั้นสูญเสียกำลังอย่างมากเมื่อถูกแช่น้ำ โดยสถานะที่ดินคันทางต้องแช่อยู่ในน้ำนั้นเป็นสิ่งที่จะต้องเผชิญทุกปีในฤดูฝน โดยในบางปีน้ำจะท่วมดินคันทางจนถึงระดับรางรถไฟ (ตัวอย่างดังแสดงในรูปที่ 1) การแก้ปัญหาดังกล่าวอาจทำได้โดยการเปลี่ยนดินคันทางให้เป็นดินที่ดีขึ้น โดยควรจะเป็นดินทรายแน่น แต่การจะได้ดินทรายนั้นต้องทำการขนส่งมาจากแหล่งที่อยู่ห่างไกลออกไป จึงได้เกิดชุดโครงการวิจัยเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในท้องถิ่นดังกล่าวด้วยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวเพื่อจะให้มีความสมบัติที่เหมาะสมในการใช้เป็นวัสดุก่อสร้างคันทางรถไฟ ในบทความนี้จะนำผลการทดลองในห้องปฏิบัติการของคุณสมบัติของดินดังกล่าวหลังจากถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวมาใช้ในการวิเคราะห์เสถียรภาพของคันทางรถไฟเพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการก่อสร้างต่อไป



รูปที่ 1 สภาพน้ำท่วมคันทางรถไฟหลักเสาโทรเลขที่ 309/2

2. ผลการทดลองที่ได้ดำเนินการมาแล้ว

ก่อนหน้านี้นี้ได้มีชุดโครงการวิจัยเพื่อศึกษาการปรับปรุงคุณสมบัติของดินในท้องถิ่นดังกล่าวด้วยการผสมปูนซีเมนต์และปูนขาวดังนี้ สิริศักดิ์และคณะ [2] ได้ศึกษาคุณสมบัติของดินดังกล่าวที่ถูกปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์และปูนขาวจากการทดสอบ CBR เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินดังกล่าว หลังจากนั้น สิริศักดิ์และคณะ [3] ได้ศึกษาคุณสมบัติของดินดังกล่าวที่ถูกปรับปรุงโดยปูนซีเมนต์จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด (unconfined compression test) และการทดสอบแรงเฉือนตรง (direct shear test) เพื่อศึกษาคุณสมบัติด้าน strength และ stiffness และ Yimsiri & Jindapon [4] ได้ศึกษาคุณสมบัติของดินดังกล่าวที่ถูกปรับปรุงโดยปูนขาวจากการทดสอบแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัดและการ

ทดสอบแรงเฉือนตรงเพื่อศึกษาคุณสมบัติด้าน strength และ stiffness โดยการศึกษาเหล่านี้จะเป็นการทดลองการปรับปรุงคุณสมบัติดินคันทางรถไฟด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาวในปริมาณต่าง ๆ (0%, 2%, 5%, 8% และ 10%), บดอัดด้วยปริมาณความชื้นต่าง ๆ (OMC-6%, OMC-3%, OMC, OMC+3% และ OMC+6%), และบ่มด้วยระยะเวลาต่างๆ (0 วัน, 7 วัน, 14 วัน และ 28 วัน) ซึ่งสนใจตัวอย่างในสภาพแช่น้ำเป็นสำคัญเพราะเป็นสถานะที่ตรงกับสภาพจริงในสนามแล้วนำไปทดสอบในห้องปฏิบัติการ

ตารางที่ 1 เป็นสรุปผลการทดสอบของดินดังกล่าวที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์และปูนขาว โดยเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลศาสตร์โดยรวมแล้วสภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์คือ ปริมาณปูนซีเมนต์ที่ 8% หรือ 10%, ปริมาณความชื้นระหว่าง OMC และ OMC + 3%, และระยะเวลาการบ่มระหว่าง 7 และ 14 วัน และ สภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการปรับปรุงด้วยปูนขาว คือ ปริมาณปูนขาวที่ 5% หรือ 8%, ปริมาณความชื้นที่ OMC+3% และ ระยะเวลาการบ่มที่ 14 วัน โดยในการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์จะใช้คุณสมบัติที่ได้จากการทดสอบจากสภาพที่เหมาะสมที่สุดดังกล่าว

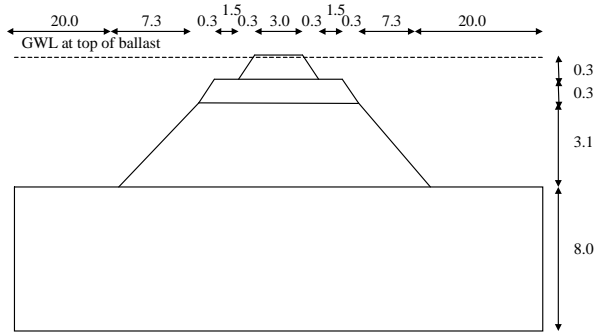
ตารางที่ 1 สรุปสภาพที่เหมาะสมจากผลการทดสอบดินที่ถูกปรับปรุง

| การทดสอบ | คุณสมบัติที่ได้ | ตัวแปร | ปูนซีเมนต์ | ปูนขาว |
|---------------------------------|-----------------|----------------|------------|--------|
| CBR | (soaked) | Admix. content | 5% | 5% |
| | | Water content | OMC+3% | OMC+6% |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |
| Swell | (soaked) | Admix. content | > 5% | > 2% |
| | | Water content | ≥ OMC | ≥ OMC |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |
| UCS | (soaked) | Admix. content | 8% | 8% |
| | | Water content | OMC+3% | OMC+3% |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |
| (E _u) ₅₀ | (soaked) | Admix. content | 8% | 8% |
| | | Water content | OMC+3% | OMC+3% |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |
| c' | (soaked) | Admix. content | 10% | 8% |
| | | Water content | OMC+3% | OMC+3% |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |
| DS | (soaked) | Admix. content | 8% | 5% |
| | | Water content | OMC+3% | OMC+3% |
| | | Curing time | 14 วัน | 14 วัน |

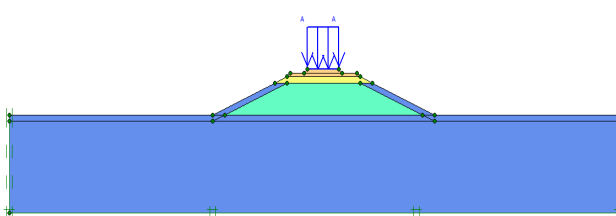


3. แผนการและแนวทางการวิเคราะห์

รูปหน้าตัดของคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2 และแบบจำลองคันดินทางรถไฟที่ถูกปรับปรุงเพื่อการวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์ได้แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งประกอบด้วย 3 ส่วนหลักคือ (i) ดินเดิมซึ่งอยู่ในส่วนล่างสุดของแบบจำลองโดยจะกำหนดให้อยู่ในสภาพแช่น้ำและใช้ข้อมูลจากการทดสอบดินในสภาพแช่น้ำที่ OMC+6%, (ii) คันทาง ซึ่งอยู่ในส่วนที่ถัดจากดินเดิมจะจำลองเป็น 2 สภาพโดยให้ผิวลาดดินหนา 0.5 เมตรอยู่ในสภาพแช่น้ำโดยผิวลาดดินใช้ข้อมูลจากการทดสอบดินสภาพแช่น้ำที่ OMC+6% ส่วนด้านในของคันทางเป็นดินที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพอยู่ในสภาพไม่แช่น้ำโดยใช้ข้อมูลดินสภาพไม่แช่น้ำที่ OMC+6%, และ (iii) ส่วนผิวบนของคันดินที่ปรับปรุงคุณภาพจะใช้ข้อมูลจากการทดสอบดินที่ถูกปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาวในสภาพแช่น้ำ โดยให้การปรับปรุงมีความลึกจากผิวบนเป็น 3 กรณีคือ 0.5, 1.0, และ 1.5 เมตร



รูปที่ 2 รูปหน้าตัดของคันทางที่ใช้ในการวิเคราะห์



- Original Ground (Soaked)
- Improved soil
- Embankment (Unsoaked)
- Ballast and Sub ballast
- Load

รูปที่ 3 ส่วนประกอบของแบบจำลองในการวิเคราะห์

การคำนวณ live load ของรถไฟเป็นน้ำหนักกระจายสม่ำเสมอถ่ายผ่านชั้นหินโรยทางลงบนชั้นดินคันทางตาม AREMA [5] โดยสามารถกระทำได้โดยพิจารณาน้ำหนัก

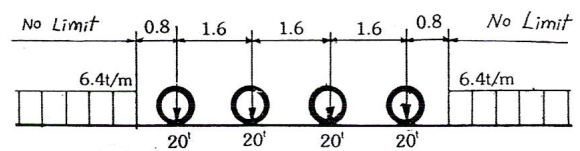
รถไฟตามรูปที่ 4 ซึ่งมีน้ำหนักล้อ 20 ตัน โดยกำหนดให้น้ำหนักจากล้อสามารถสมมุติเป็นน้ำหนัก กระจายลงบนพื้นที่ดังนี้

$$\text{ความยาว} = \text{ความยาว 3 ฟุต} + \text{ความหนาของชั้นหินโรยทาง (ใช้ 500 มม.)} = 1,414 \text{ มม.}$$

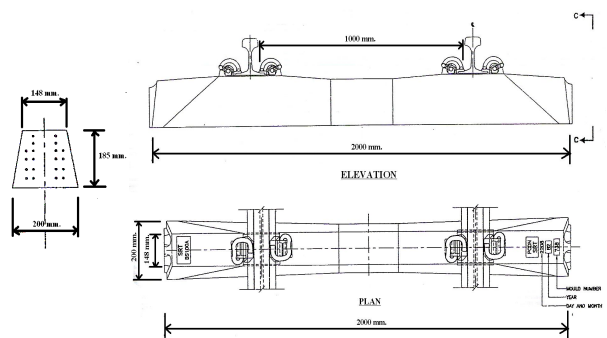
$$\text{ความกว้าง} = \text{ความยาวหอนรองราง (2,000 มม.)} + \text{ความหนาของชั้นหินโรยทาง (ใช้ 500 มม.)} = 2,500 \text{ มม. (เพื่อความสะดวก ใช้ 3,000 มม. ซึ่งเป็น ความกว้างของส่วนบนของคันทาง) (หอนคอนกรีตแสดงในรูปที่ 5)}$$

$$\text{ฉะนั้น live load} = 20 \text{ ตัน} / (1,414 \text{ มม.} \times 3,000 \text{ มม.}) = 47.3 \text{ kPa.}$$

และสามารถจำลอง impact load จากรถไฟโดยการเพิ่มน้ำหนักรถไฟอีก 50% สำหรับ diesel engine ดังนั้น impact load = 70.8 kPa.



รูปที่ 4 น้ำหนักรถไฟมาตรฐาน UIC (ข้อมูลจากการรถไฟแห่งประเทศไทย)

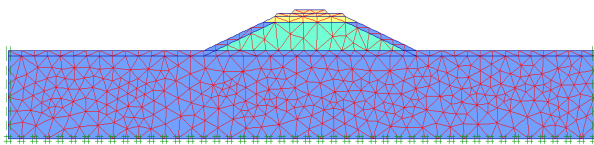


รูปที่ 5 หอนแบบคอนกรีตอัดแรง (ข้อมูลจากการรถไฟแห่งประเทศไทย)

4. การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์

การวิเคราะห์ไฟไนต์อีลิเมนต์เพื่อวิเคราะห์เสถียรภาพของลาดดินและ การเคลื่อนตัวของคันดินที่เกิดจากน้ำหนักของรถไฟที่วิ่งผ่าน การวิเคราะห์เป็นแบบความเครียดใน 2 มิติ โดยให้ขอบเขตด้านข้างและด้านล่างเป็นผิวเรียบ ดินและหินโรยทางถูกจำลองโดย 6-node triangular element with second-order interpolation of displacement และมีคุณสมบัติตาม Mohr-Coulomb model เนื่องจากในการวิเคราะห์นี้สนใจพฤติกรรมของ

ดินเดิมและคันดินเป็นหลัก และต้องการให้แบบจำลองไม่มีความซับซ้อนมาก ฉะนั้นในการวิเคราะห์จึงไม่รวมราง, หมอนรองราง และเครื่องจับยึดรางที่เกี่ยวข้อง แรงกระทำจากรถไฟที่วิ่งผ่านจำลองเป็น static load และไม่คำนึงถึง cyclic behavior ของดิน ตัวอย่างของ mesh ในการวิเคราะห์ที่ได้แสดงในรูปที่ 6 จุดบนคันดินที่สนใจการเคลื่อนตัว คือจุดที่อยู่ที่ยี่สิบบนสุดของชั้นหินโรยทางในแนว center line



รูปที่ 6 ตัวอย่าง mesh

คุณสมบัติแบบ Mohr-Coulomb ต้องการ soil parameters สำคัญ 5 ตัว โดยมีรายละเอียดดังนี้

- (i) **Young's modulus (E')** ใช้ E_{50}' โดยการคำนวณจาก $(E_u)_{50}$ ที่ได้จากการทดสอบแรงอัดแบบไม่มีขอบเขตจำกัด โดยที่ $E_{50}' = 0.85 (E_u)_{50}$ (เมื่อ $\nu = 0.3$) สำหรับหินโรยทางสมมุติให้ $E_{50}' = 100 \text{ MPa}$ [6]
- (ii) **Poisson's Ratio** สมมุติให้เป็น 0.3 สำหรับดินเหนียว (ดินคันทางและดินเดิม) และ 0.28 สำหรับหินโรยทาง [6]
- (iii) **Cohesion** ใช้ผลจากการทดสอบแรงเฉือนตรง และ cohesion ของหินโรยทางสมมุติให้เป็น 1.5 kPa
- (iv) **Friction angle** ใช้ผลจากการทดสอบแรงเฉือนตรง และ friction angle ของหินโรยทางสมมุติให้เป็น 40° [7]
- (v) **Dilatancy angle** สมมุติให้เป็น 0° สำหรับดินเหนียว (ดินคันทางและดินเดิม) และ 15° สำหรับหินโรยทาง

สำหรับค่าคุณสมบัติทางกายภาพอื่นๆ ได้จากการทดสอบที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าหน่วยน้ำหนักได้จากการทดสอบการบดอัด และ ค่าสัมประสิทธิ์ความซึมผ่านได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (consolidation test) ระหว่างการทำการทดสอบแรงเฉือนตรงโดยสมมุติให้ค่าสัมประสิทธิ์นี้มีค่าเท่ากันทั้งในแนวตั้งและแนวราบ สำหรับรายละเอียดของคุณสมบัติของดินต่างๆ สามารถดูได้จาก ศิริศักดิ์ [8] ตารางสรุปคุณสมบัติต่างๆ ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2 ถึง

ตารางที่ 2 ค่าคุณสมบัติดินที่ไม่ถูกปรับปรุงคุณภาพในสภาพแห้งและสภาพแช่น้ำบดอัดที่ OMC+6%

| Parameter | Original Ground Unsoaked | Embankment | | Ballast |
|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| | | Unsoaked | Soaked | |
| Material Model | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb | Mohr-Coulomb |
| Type of Behavior | Undrained | Undrained | Undrained | Drained |
| γ_{dry} (kN/m ³) | 16.3 | 16.5 | 16.5 | 27.1 |
| γ_{wet} (kN/m ³) | 20.3 | 20.8 | 20.8 | 29.5 |
| k_x (m/day) | 5×10^{-5} | 5×10^{-5} | 5.6×10^{-5} | 1×10^{-7} |
| k_y (m/day) | 5×10^{-5} | 5×10^{-5} | 5.6×10^{-5} | 1×10^{-7} |
| E' (kN/m ²) | 3219 | 60900 | 3219 | 1×10^8 |
| ν | 0.3 | 0.3 | 0.3 | 0.28 |
| c' (kN/m ²) | 5 | 10 | 34 | 1.5 |
| ϕ' (°) | 34 | 23 | 20 | 40 |
| ψ (°) | 0 | 0 | 0 | 15 |

ตารางที่ 3 ค่าคุณสมบัติดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนซีเมนต์ 8% และ 10% ในสภาพแช่น้ำ

| Parameters | Embankment | |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Cement 8% | Cement 10% |
| Material Model | Mohr Coulomb | Mohr Coulomb |
| Type of behavior | Undrained | Undrained |
| γ_{dry} (kN/m ³) | 17.1 | 17.0 |
| γ_{wet} (kN/m ³) | 21.0 | 20.8 |
| k_x (m/day) | 4.9×10^{-5} | 4.8×10^{-5} |
| k_y (m/day) | 4.9×10^{-5} | 4.8×10^{-5} |
| E' (kN/m ²) | 56028 | 51852 |
| ν | 0.3 | 0.3 |
| c' (kN/m ²) | 33 | 435 |
| ϕ' (°) | 63 | 17 |
| ψ (°) | 0 | 0 |

ขั้นตอนในการวิเคราะห์ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยการวิเคราะห์จะเป็นแบบไม่ระบายน้ำซึ่งเป็นสภาวะที่อ่อนแอที่สุด

- (i) **Initial condition** เป็นการให้เกิดสภาวะ geostatic
- (ii) **Train load** น้ำหนักรถไฟที่กระทำต่อคันดินสมมุติเป็นน้ำหนักกระจายขนาด 47.3 kN/m^2 โดยขนาดของน้ำหนักกระจายนี้คำนวณตาม AREMA [5]



- (iii) **Impact Load** น้ำหนักกระแทกเนื่องจากรถไฟที่วิ่งผ่านได้จำลองโดยการเพิ่มน้ำหนักอีก 50% ของน้ำหนักรถไฟ ซึ่งคือ 23.7 kPa. (ตาม AREMA [5])
- (iv) **การคำนวณ Factor of Safety** เป็นการคำนวณค่าความปลอดภัยจากวิธี Phi-c Reduction [9] โดยเป็นการลดค่ากำลังของดิน c' และ ϕ' ด้วยค่าคงที่หนึ่งและเพิ่มค่านี้ไปจนกระทั่งโครงสร้างวิบัติ ค่าคงที่ที่มากที่สุดนี้จะเป็น Factor of Safety

ตารางที่ 4 ค่าคุณสมบัติดินที่ถูกปรับปรุงคุณภาพด้วยปูนขาวที่ 5% และ 8% ในสภาพแช่น้ำ

| Parameter | Embankment | |
|-------------------------------------|----------------------|----------------------|
| | Lime 5% | Lime 8% |
| Material Model | Mohr Coulomb | Mohr Coulomb |
| Type of Behavior | Undrained | Undrained |
| γ_{dry} (kN/m ³) | 16.5 | 16.3 |
| γ_{wet} (kN/m ³) | 20.4 | 21.1 |
| k_x (m/day) | 2.2×10^{-4} | 2.9×10^{-4} |
| k_y (m/day) | 2.2×10^{-4} | 2.9×10^{-4} |
| E' (kN/m ²) | 25143 | 56028 |
| ν | 0.3 | 0.3 |
| c' (kN/m ²) | 68 | 74 |
| ϕ' (°) | 42 | 58 |
| ψ (°) | 0 | 0 |

5. ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

จากการวิเคราะห์ผลด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในสภาพต่าง ๆ ทั้งกรณีที่ไม่ปรับปรุงคุณภาพดินในสภาพแช่น้ำและไม่แช่น้ำและสภาพที่มีการปรับปรุงคุณภาพดิน สามารถสรุปผลที่ได้จากการวิเคราะห์ได้ตามตารางที่ 5 และรูปที่ 7 จากผลการวิเคราะห์พบว่าสภาพการปรับปรุงคันดินตามที่พิจารณาสามารถเพิ่มเสถียรภาพของลาดดินจากค่า 0.96 เมื่อยังไม่ถูกปรับปรุงจนเป็นค่ามากกว่า 2.0 ในทุกกรณีที่พิจารณา และทำให้การเคลื่อนตัวในแนวดิ่งลดลงจาก 70.6 มม. เมื่อยังไม่ถูกปรับปรุงจนเป็นระหว่าง 30-40 มม. หลังจากถูกปรับปรุง

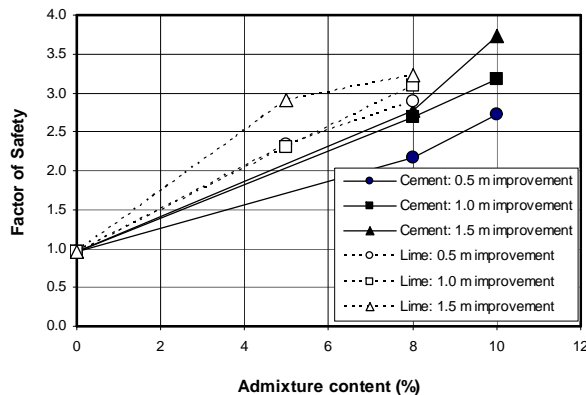
6. สรุปผลการทดลอง

จากผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงว่าการปรับปรุงคุณภาพดินด้วยปูนซีเมนต์ 8% หรือ ปูนขาว 5% ด้วยความลึกในการปรับปรุง 0.5 ม. จะสามารถทำให้เสถียรภาพ

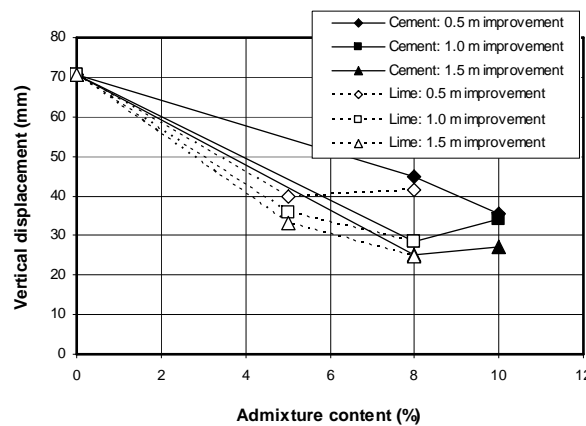
ของคันดินเพิ่มขึ้นจนมีค่ามากกว่า 2.0 และมีค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งลดลง 50% โดยในโครงการ Track Rehabilitation ระยะที่ 1 และ 2 ที่ได้ดำเนินการมาแล้วนั้นกำหนดให้มีการปรับปรุงดินคันทางส่วนบนช่วง 0.5 เมตร ด้วยการเปลี่ยนเป็นดินทรายแน่น ผลจากการวิเคราะห์นี้จึงแสดงถึงความเป็นไปได้ในการใช้ดินคันทางที่ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์หรือปูนขาวแทนดินทรายแน่นในการก่อสร้างดังกล่าว อีกทั้งหากพิจารณาว่าค่าเสถียรภาพของคันดินในระยะยาวโดยทั่วไปควรมีค่าอย่างน้อย 1.5 [10] ก็อาจทำให้สามารถใช้ความหนาในการปรับปรุงน้อยกว่า 0.5 เมตรได้ อย่างไรก็ตามเนื่องจากคันทางรถไฟนี้จะต้องถูกแรง dynamic load จากระถางไฟเข้าไปเข้ามาเป็นระยะเวลานานทำให้จะต้องใช้ Factor of Safety มากกว่าคันดินปกติ ฉะนั้นการที่จะพิจารณาความลึกของการปรับปรุงที่เหมาะสมในระยะยาว ต้องการการทดสอบเพิ่มเติม เช่น full-scale test หรือ trial section

ตารางที่ 5 สรุปผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

| Case | Admixture content | Load 100% (LL) | | Load 150% (LL+IL) | |
|----------------------------|-------------------|----------------|------|-------------------|------|
| | | Displ. (mm) | FS | Displ. (mm) | FS |
| Not Stabilized Unsoaked | 0% | 15.68 | 1.27 | 67.15 | 0.99 |
| Not Stabilized Soaked | 0% | 45.94 | 1.02 | 70.60 | 0.96 |
| Cement (Depth 0.5 m.) | 8% | 23.78 | 2.94 | 44.79 | 2.16 |
| Cement (Depth 1.0 m.) | 10% | 20.84 | 3.14 | 35.63 | 2.73 |
| Cement (Depth 1.5 m.) | 8% | 19.92 | 3.58 | 28.48 | 2.69 |
| Cement (Depth 1.0 m.) | 10% | 18.42 | 3.81 | 34.34 | 3.17 |
| Cement (Depth 1.5 m.) | 8% | 16.29 | 3.75 | 25.05 | 2.78 |
| Cement (Depth 1.5 m.) | 10% | 16.19 | 3.80 | 27.05 | 3.73 |
| Lime (Depth 0.5 m.) | 5% | 28.43 | 2.63 | 39.65 | 2.33 |
| Lime (Depth 0.5 m.) | 8% | 22.96 | 3.11 | 41.52 | 2.89 |
| Lime (Depth 1.0 m.) | 5% | 25.51 | 2.89 | 35.72 | 2.31 |
| Lime (Depth 1.0 m.) | 8% | 20.96 | 3.24 | 28.62 | 3.09 |
| Lime (Depth 1.5 m.) | 5% | 18.09 | 3.74 | 33.13 | 2.90 |
| Lime (Depth 1.5 m.) | 8% | 14.42 | 3.47 | 24.79 | 3.22 |



(a) Factor of Safety



(b) การเคลื่อนตัวในแนวตั้ง

รูปที่ 7 ผลการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์อีลิเมนต์

- [4] Yimsiri, S. and Jindapon, S. (2007). Improvement of local soil in the Northern of Thailand by lime stabilization for use as a construction material for railway embankment. The 2nd GMSARN International Conference.
- [5] American Railway Engineering and Maintenance of Way Association (AREMA) (2002). Manual for Railway Engineering.
- [6] อัมรินทร์ บุญตัน (2541). คุณสมบัติของหินชนิดต่างๆ. วิศวกรรมธรณี. ภาควิชาวิศวกรรมโยธามหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- [7] Lambe, T. W. and Whitman, R. V. (1969). Soil Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.
- [8] ศิริศักดิ์ จินดาพล. (2550). การปรับปรุงคุณภาพของดินในสภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาวสำหรับการก่อสร้างคันดินทางรถไฟ. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- [9] Brinkgreve, R. B. J. and Vermeer, P. A. (1998). General Information Plaxis V.7.
- [10] Huang, Y. H. (1983). Stability Analysis of Earth Slopes. Van Nostrand Reinhold Company.

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรม ปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา(#18/2551)

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] สยาม ยิ้มศิริ และ รุธีร เผ่าห้วยขี้ยืน (2547). การศึกษาการเคลื่อนตัวของคัน ดินทางรถไฟในบริเวณภาคเหนือตอนล่าง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 9.
- [2] ศิริศักดิ์ จินดาพล และคณะ (2549). การปรับปรุงคุณภาพของดินใน สภาพแช่น้ำด้วยการใช้ปูนซีเมนต์และปูนขาว. การประชุมวิชาการ วิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 11.
- [3] ศิริศักดิ์ จินดาพล และคณะ (2550). คุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินที่ถูก ปรับปรุงด้วยปูนซีเมนต์ในสภาพแช่น้ำจากการทดสอบแบบแรงอัดไม่มี ขอบเขตจำกัดและแบบแรงเฉือนตรง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธา แห่งชาติ ครั้งที่ 12.