

การจำลองคันท่างบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ใน ดินเหนียวอ่อนโดยวิธีทางไฟไนต์เอลิเมนต์ Finite Element Modeling of Full Scale Test Embankment on Cement Column in Soft Clay

พานิช วุฒิปุณษ์* เกษม เพชรเกตู** และสมโชค ประเสริฐวินิจกุล**

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการจำลองคันท่างบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ในดินเหนียวอ่อน ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ แล้วนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลในสนาม คันท่างทดลองตั้งกล่าวทำการก่อสร้างบริเวณโรงไฟฟ้าวังน้อย อำเภอวังน้อย จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลง เพื่อให้ผลที่ได้มีความสอดคล้องในสนาม คือ ค่าโมดูลัสของยัง ค่าความซึมผ่านของน้ำ และค่าแรงปฏิกริยาของดินถมกับลวดตาข่ายเหล็กเหล็ยม

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบในสนามมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าอาจจะมี ความแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้เพราะจากสมมุติฐานเบื้องต้น ความไม่สม่ำเสมอของกำลังและหน้าตัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวปรับเปลี่ยน (λ) และสัมประสิทธิ์การบวมตัวปรับเปลี่ยน (K) ของแบบจำลองในชั้นดินอ่อนนั้น พบว่า มีผลต่อค่าการทรุดตัวน้อยมาก ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงชั้นดินอ่อน ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพของดินโดยใช้เสาเข็มดินซีเมนต์ ปัจจัยที่มีความสำคัญต่อผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของคันท่างทดลองบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ คือ แบบจำลองที่เลือกใช้ ค่าตัวแปรที่ทำการเปลี่ยนแปลงในชั้นดินและเสาเข็มดินซีเมนต์ ขั้นตอนในการถม คุณสมบัติของดินถม และค่าแรงปฏิกริยาระหว่างดินถมกับวัสดุเสริมกำลัง พฤติกรรมที่เกิดขึ้นในลวดตาข่ายเหล็กเหล็ยมและดินถมจะเป็นประเภทเกิดแรงเฉือนเป็นส่วนใหญ่

Abstract

A study of the finite element modeling of embankment on cement column in soft clay is described in this paper. The findings were analyzed by finite element program, then compared with the data from the field. The embankment was constructed at Wangnoi Power Plant, Wangnoi District, Ayudthaya Province. The varied parameters for the agreement between the finite element results and the field data were : young's modulus, permeability, and the interaction between soil and reinforcement.

As a result, analytic data and the field data are similar with only small deviations in values. This is probably due to an inconsistent of material properties, the strength and cross-section of cement column. From the results of the analysis, the modified compression index and the modified swelling index in soft soil model have the small effect to the settlement because soft soil layer has been stabilized by cement column. The important parameters for simulating behavior of reinforced wall embankment on cement column were : The selection of the appropriate model, The variation of parameters of soil layer and cement column, The steps of construction, the properties of backfill and the interaction between soil and the reinforced

* ภาควิชาครุศาสตร์โยธา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

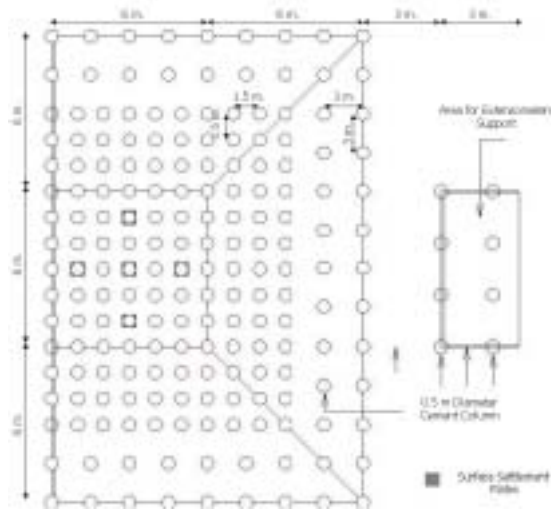
** ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

materials. For the interface between soil and reinforcement, the direct shear mechanism generally dominates the behavior of hexagonal wire mesh reinforcement.

Keywords : Finite Element Modeling, Cement Column, Hexagonal Wire Mesh

1. บทนำ

ลักษณะทางภูมิศาสตร์ของชั้นดินในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณกรุงเทพมหานคร จะประกอบไปด้วยชั้นดินอ่อนเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงเรียกดินบริเวณนี้ว่า "ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ" (Soft Bangkok Clay) คุณสมบัติของดินเหนียวชนิดนี้ จะมีกำลัง (Strength) และความซึมผ่านของน้ำ (Permeability) ต่ำซึ่งจะก่อให้เกิดปัญหาในการก่อสร้างเป็นอย่างมาก ด้วยสาเหตุนี้คุณสมบัติของดินควรจะถูกปรับปรุงก่อนที่จะทำการก่อสร้าง วิธีการที่ใช้ในการปรับปรุงคุณสมบัติของดินอ่อนโดยทั่วไป คือ การปรับปรุงดินโดยปูนขาวและซีเมนต์ ซึ่งการใช้ปูนขาวและซีเมนต์จะใช้เป็นส่วนผสมทั้งในการปรับปรุงดินแบบดินและแบบบล็อก เพื่อที่จะปรับปรุงคุณสมบัติของดินให้สามารถที่จะใช้เป็นวัสดุที่เหมาะสมกับงานก่อสร้างได้ หลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพของดินแล้ว คุณสมบัติของดินจะเปลี่ยนแปลงไป เช่น กำลังของดินเพิ่มมากขึ้น การทรุดตัวของดินลดลง เป็นต้น



รูปที่ 1 ตำแหน่งระยะห่างของเสาเข็มดินซีเมนต์

ความมีเสถียรภาพหรือความลาดชันของคันทาง เป็นอีกปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่ง ในอดีตอาจแก้ไขปัญหานี้ด้วยวิธีการกำหนดให้มีความลาดชันต่ำๆ ซึ่งจะทำให้เกิดค่าใช้จ่ายและพื้นที่ที่ใช้ในการก่อสร้างเพิ่มขึ้น แต่ในปัจจุบันปัญหาเดียวกันนี้จะใช้วิธีการเพิ่มค่ากำลังให้กับดิน โดยใช้วัสดุที่มีความสามารถในการรับแรงดึงได้ดี เพราะดินโดยทั่วไปนั้นสามารถรับแรงดึงได้น้อยมาก การเสริมกำลังในดิน โดยใช้วัสดุสังเคราะห์นั้น จะนิยมใช้มากในการก่อสร้างกำแพงกันดิน คันทางที่อยู่บนชั้นดินอ่อน ชนิดและประเภทของการเสริมกำลังนั้น ก็ได้มีการพัฒนาและปรับปรุงขึ้นมากมาย โดยให้มีต้นทุนต่ำ และสามารถที่จะทนทานต่อการเกิดการเสีรูปมาก ๆ ได้ และถ้าหากมีการใช้วัสดุในท้องถิ่นที่มีเม็ดละเอียดเป็นวัสดุดินถมในโครงสร้างที่ต้องการเสริมกำลัง จะทำให้ราคาต้นทุนลดลง [1] วัสดุที่ใช้ในการเสริมกำลังมีหลายประเภท เช่น แผ่นเหล็ก (Steel strip) เส้นใยสังเคราะห์ (Geotextile) และลวดตาข่ายหกเหลี่ยม (Hexagonal wire mesh) เป็นต้น

2. วิธีการศึกษาขั้นตอนการก่อสร้างคันดินทดลอง

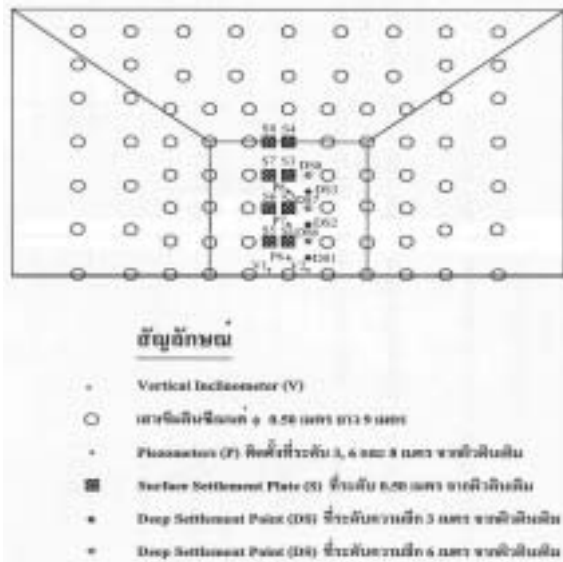
ในการศึกษาจะทำการติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อรับน้ำหนักจากคันดินทดลอง จำนวนทั้งหมด 80 ต้น ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.50 เมตร ยาว 9 เมตร และระยะห่างของเสาเข็มดินซีเมนต์มีทั้ง 1.5 เมตรและ 2.0 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 1 การติดตั้งเสาเข็มดินซีเมนต์เพื่อให้ได้ค่าตามมาตรฐานที่ใช้ในการออกแบบจะใช้แรงดันในการฉีดพ่นอยู่ในช่วง 200 บาร์ อัตราเร็วในการหมุน 12 รอบต่อนาที

คันดินทดลองที่เสริมกำลังด้วยลวดตาข่ายหกเหลี่ยมและประกอบด้วยแผ่นหินหล่อสำเร็จ เริ่มทำการก่อสร้างเมื่อวันที่ 28 มกราคม พ.ศ. 2545 ใช้ระยะเวลาการก่อสร้างทั้งสิ้น 15 วัน การก่อสร้างเริ่มต้นด้วยการวางแผ่นหินหล่อสำเร็จให้อยู่ในแนวตั้ง หลังจากนั้นก็มี การวางลวดตาข่ายหกเหลี่ยมทุกๆ ระยะ 75 เซนติเมตร กระทำเช่นนี้เรื่อยไปจนถึงความสูงที่ต้องการเท่ากับ 6 เมตร โดยในระหว่างที่วางแผ่นหินหล่อสำเร็จและลวดตาข่ายหกเหลี่ยมนั้น ก็จะต้องมีการติดตั้งเครื่องมือที่ต้องการจะใช้วัดค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 2 พร้อมทั้งทำการบดอัดดินถมด้วย ซึ่งการบดอัดจะกระทำทุกๆ ระยะ 0.375 เมตร และต้องบดอัดให้ได้ความหนาแน่นอย่างน้อย 95% ของค่าความหนาแน่นแห้งสูงสุดของ

ทราย ($\gamma_{d_{max}}$) โดยมีปริมาณความชื้นอยู่ในระหว่าง $\pm 2\%$ ของปริมาณน้ำสูงสุด (OMC) ในการศึกษาครั้งนี้ เครื่องมือที่ใช้ในการบดอัด คือ รถบดล้อเรียบและเครื่องบดอัดด้วยมือ และทำการทดสอบความหนาแน่นโดยการแทนที่ด้วยทราย (Sand Cone Test) เพื่อให้ทราบถึงปริมาณความชื้นและความหนาแน่นของการบดอัด

2.2 การวิเคราะห์ด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์ (Finite Element Analysis)

คันดินทดลองที่เสริมกำลังด้วยลวดตาข่ายเหล็กเหล็ย และวางอยู่บนดินอ่อนที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเสาเข็มดินซีเมนต์ จะถูกจำลองด้วยวิธีการทางไฟไนต์



รูปที่ 2 การติดตั้งเครื่องมือที่ไว้วัดค่าต่างๆ

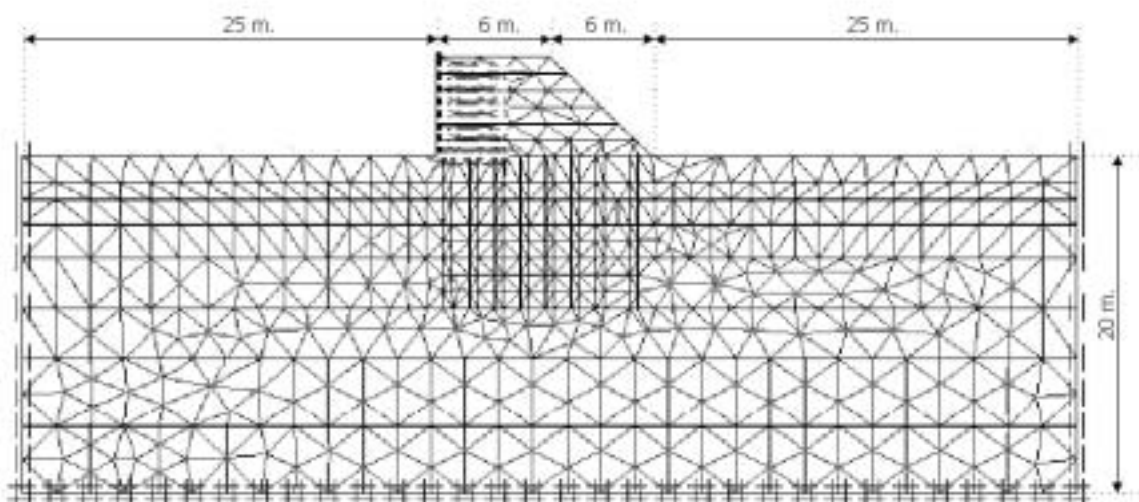
เอลิเมนต์โดยวิเคราะห์ให้เป็น 2 มิติ แบบ Plane Strain สำหรับรูปการแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆ (Mesh) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งโปรแกรมจะทำการแบ่ง Node โดยอัตโนมัติ

การวิเคราะห์จะทำการวิเคราะห์ทั้งในสภาพที่ไม่มีการระบายน้ำและในสภาพที่เกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ โดยการระบายน้ำเกิดขึ้นในแนวตั้งเท่านั้นและพิจารณาถึงผลกระทบของขั้นตอนในการก่อสร้าง พร้อมทั้งจำลองการวิเคราะห์เมื่อเกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำ โดยกำหนดให้คันดินทดลองนี้ทำการก่อสร้างโดยการถมดินทั้งหมด 6 ชั้นชั้นละ 1 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 4

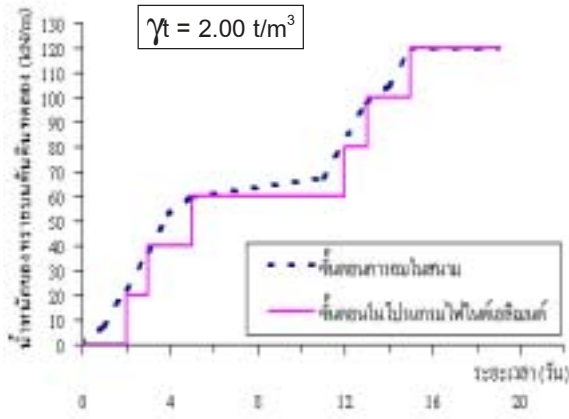
2.3 แบบจำลองที่แสดงถึงพฤติกรรมของวัสดุ (Material Behavior Models)

2.3.1 ดินถม (Backfill Soil)

วัสดุที่เลือกใช้เป็นดินถมในโครงสร้างที่เป็นคันทางโดยทั่วไปจะใช้ทรายซึ่งในการศึกษานี้เลือกใช้ทรายยูธยา ซึ่งคุณสมบัติของทรายชนิดนี้ Bersabe [2] ได้ทำการทดสอบไว้แล้วและสรุปไว้ในตารางที่ 1 ส่วนแบบจำลองที่สามารถเลือกใช้เพื่อจำลองพฤติกรรมของดินถมนี้ คือ แบบจำลองของมอร์คูลอม ส่วนค่าแรงยึดเกาะและค่ามุมเสียดทาน จะได้จากการทดสอบการรับแรงเฉือน (Large direct shear test) [3] ค่าโมดูลัสของการยึดหยุ่นได้มาจากการคำนวณกลับโดยสมมุติให้ค่าอัตราส่วนปัวซองเท่ากับ 0.33 [3] Overconsolidated Clay) แบบจำลอง Cam Clay นั้นไม่เหมาะสมสำหรับดินประเภทนี้ ควรเลือกใช้แบบจำลองแบบยึดหยุ่นหรือ



รูปที่ 3 การแบ่งชิ้นส่วนย่อยๆ (Mesh) ทางไฟไนต์เอลิเมนต์



รูปที่ 4 ขั้นตอนการถล่มเปรียบเทียบกับกรณีวิเคราะห์ในโปรแกรม

แบบจำลองแบบมีความเป็นพลาสติกสูงและเลือกใช้ค่าอัตราส่วนบัวของคงที่ [4] จากการศึกษาที่แบบจำลองมอร์คิวลอมเหมาะสม

สำหรับดินประเภทนี้ ค่าตัวแปรบางส่วน เช่น ค่าแรงยึดเกาะ (Cohesion) และค่ามุมเสียดทาน (Friction Angle) จะได้จากข้อมูลที่มีอยู่ของดินกรุงเทพฯ [5] โมดูลัสของความยืดหยุ่นได้จากการคำนวณกลับ โดยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์โดยสมมุติให้อัตราส่วนบัวของเท่ากับ 0.25 [4]

2.3.2. ชั้นดินอ่อน (Soft Clay)

แบบจำลอง Cam Clay นั้นถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อจำลองพฤติกรรมของชั้นดินอ่อน ซึ่งเป็นดินเหนียวประเภทอัดตัวปกติ (Normally Consolidated Clay) และดินเหนียวแบบอัดตัวเกินปกติเล็กน้อย (Slightly Overconsolidated Clay)

ตารางที่ 1 คุณสมบัติในเชิงวิศวกรรมของทรายอุยยูธา[2]

Specific Gravity, G_s	2.68
USCS classification	SP-SM
Maximum dry density, ρ_d^{\max}	1.78 g/cm ³
Optimum water content	12.2%
Internal Friction Angle	38.7 at 15% strain CID test 26.6 at 6 mm horizontal displacement d.s test
Cohesion	None
Test condition	Dr = 90%

สำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน อัตราส่วนของสัมประสิทธิ์การบวมตัวประยุกต์ต่อสัมประสิทธิ์การอัดตัวประยุกต์ K'/γ ซึ่งใช้ในช่วง 0.2-0.4 [6] จากการทดลองที่ผ่านมา [3-4,7] แสดงให้เห็นว่า ค่า K'/γ ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 0.2 ตามคำแนะนำของ Vermeer และ Brinkgreve [8] สำหรับทุกชั้นดินของดินอ่อน

2.3.3 เสาเข็มดินซีเมนต์ (Cement Column)

การจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์จะเลือกใช้แบบจำลองมอร์คิวลอมหรือแบบจำลองแบบยืดหยุ่นและไม่ควรเลือกใช้แบบจำลองสำหรับดินแข็งเพราะว่าพฤติกรรมของเสาเข็มดินซีเมนต์ไม่เป็นแบบไฮเปอร์โบลิกและอัตราส่วนสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อสัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำของดินอ่อน $K_{pile}/K_{soil} = 30$ [9])

2.3.4 การเสริมกำลังด้วยลวดตาข่ายหกเหลี่ยม (Hexagonal Wire Mesh Reinforcement)

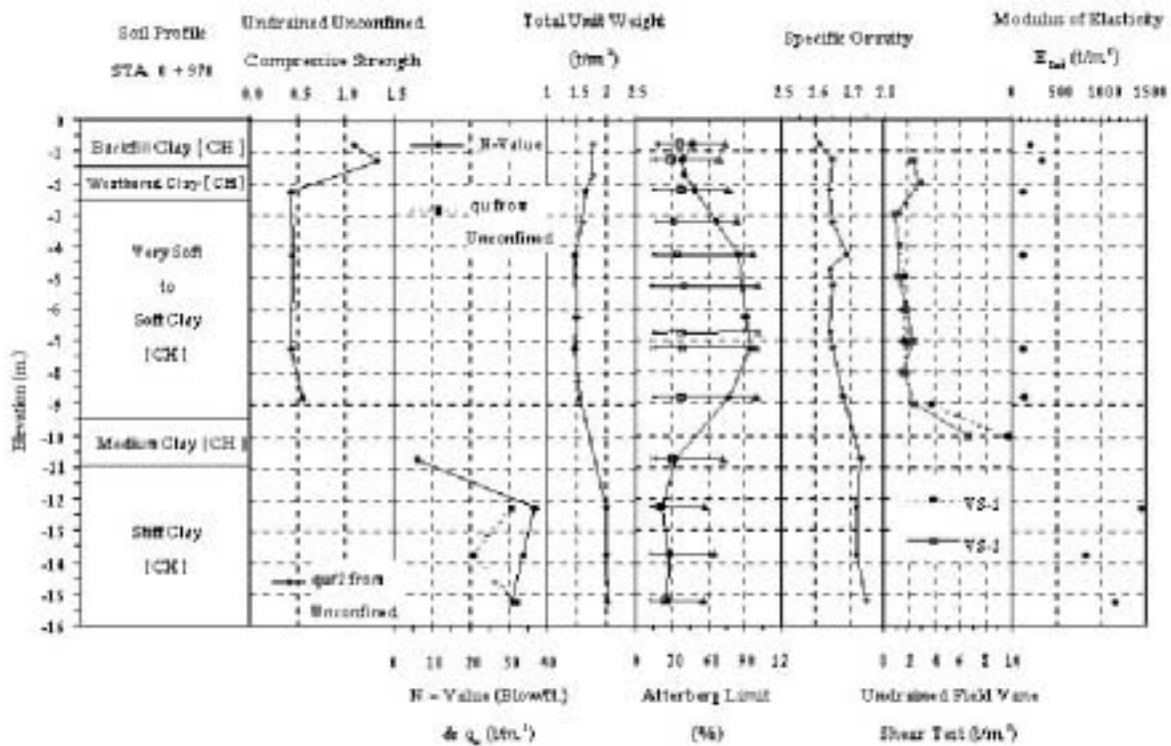
การจำลองพฤติกรรมเสริมกำลังด้วยลวดตาข่ายหกเหลี่ยมที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จะเลือกใช้เป็นชั้นส่วนที่เป็นแท่ง (Bar Element) ซึ่งมีค่าความเครียดเป็นเส้นตรง (Linear Tension Strain) คุณสมบัติที่ใช้ในแบบจำลองนี้คือความแข็งแรงในแนวแกน (Axial Stiffness, EA) ซึ่งค่าความแข็งแรงในแนวแกนได้มาจากการทดสอบแรงดึงของลวดตาข่ายหกเหลี่ยมในอากาศซึ่งกระทำโดย Wongsawanon [10] มีค่าเท่ากับ 900 kN/m

2.3.5 แบบจำลองบริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างดินและลวดตาข่ายหกเหลี่ยม (Soil/Hexagonal Wire Mesh Interface Models)

แบบจำลองแบบยืดหยุ่นและมีความเป็นพลาสติกสูง (Elastic Perfectly-Plastic Model) จะถูกเลือกใช้เพื่อนำไปจำลองความสัมพันธ์บริเวณพื้นผิวสัมผัสระหว่างดินและลวดตาข่ายหกเหลี่ยม ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ค่าโมดูลัสการอัดตัว (Compression Modulus) จะสัมพันธ์กับโมดูลัสของแรงเฉือน (Shear Modulus) ซึ่งสมมุติให้ค่าอัตราส่วนบัวของมีค่าคงที่เท่ากับ 0.45 ค่าโมดูลัสของแรงเฉือนและค่าของกำลังจะถูกคำนวณอย่างอัตโนมัติจากตัวแปรต่างๆ ในดินโดยใช้สัมประสิทธิ์แรงปฏิสัมพันธ์ Interaction Coefficient, R) ค่าสัมประสิทธิ์

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่า Parameters ต่างๆ ของชั้นดิน

ประเภทดิน	แบบจำลอง	C' (kPa)	ϕ	ν'	E' (KN/m ²)	Kv (10 ⁻⁴ m/d)	γ_{dry} (KN/m ³)	γ_{wet} (KN/m ³)
ชั้นดินเหนียวแห้งแข็ง	M-C	15	23	0.25	3000	6.25	13	17
ชั้นทรายถม	M-C	5	30	0.33	5000	100	18	20
เสาเข็มดินซีเมนต์	M-C	280	28	0.25	14000	75	14	18



รูปที่ 5 ลักษณะสภาพชั้นดินและคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเดิมที่บริเวณที่ทำการศึกษ

แรงปฏิสัมพันธ์ ได้มาจากการทดสอบการรับแรงเฉือนจากการศึกษาที่ผ่านมาค่าสัมประสิทธิ์แรงปฏิสัมพันธ์ควรจะมีค่าเท่ากับ 0.7 - 0 [11]

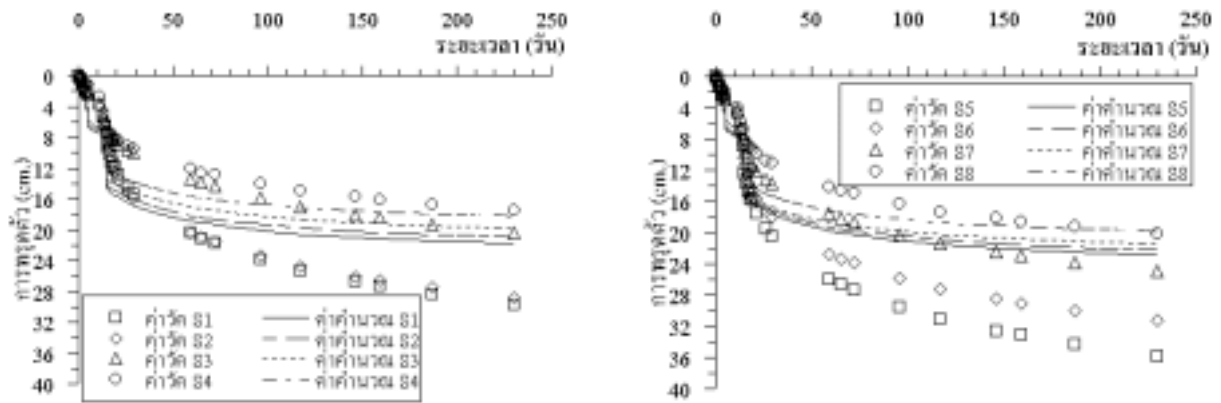
2.3.6 ผิวหน้าแผ่นหินหล่อสำเร็จ (Precast concrete facing)

แผ่นหินหล่อสำเร็จมีความกว้างเท่ากับ 1.7 เมตร ความสูงเท่ากับ 1.5 เมตร โดยในการศึกษาครั้งนี้จำลองแผ่นหินหล่อสำเร็จด้วยแบบจำลองแบบคานยืดหยุ่น (Elastic Beam) ค่ากำลังและโมดูลัสยืดหยุ่นได้มาจากการงานวิจัยที่ผ่านมา ซึ่งค่า $EI = 5.22 \times 10^6$ kN.m²/m และ $EA = 9787.5$ kN/m [12]

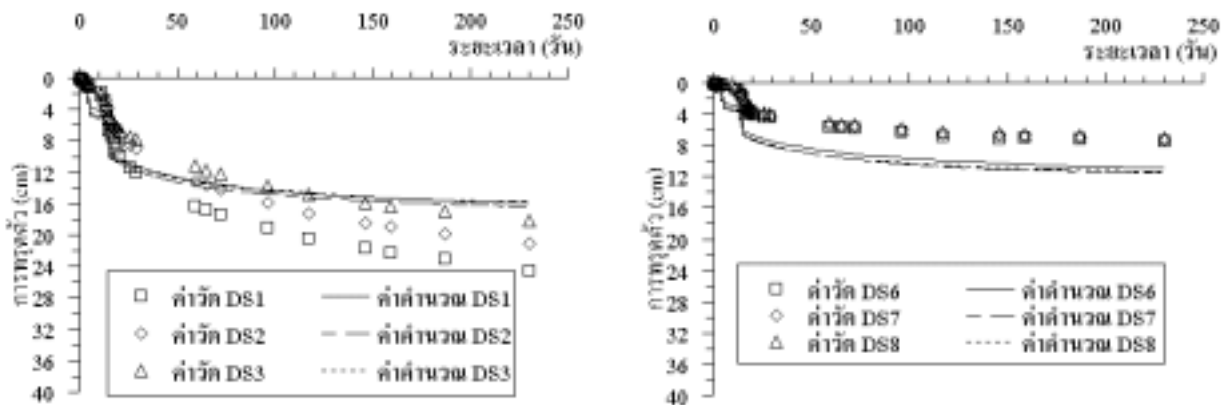
3. ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

3.1 ผลการทดสอบในห้องปฏิบัติการและในสนาม

จากการทดสอบตัวอย่างดินบริเวณที่ทำการศึกษในห้องปฏิบัติการและในสนาม ทำให้ทราบถึงค่ากำลังของดิน (Shear Strength) การจำแนกดิน N-value ค่าน้ำหนักต่อหน่วยปริมาตร (Unit Weight) ค่าขีดจำกัดชั้นเหลว (Atterberg Limit) ค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ผลการทดสอบ Field Vane Shear Test และค่าโมดูลัสของชั้นดินโดยนำผลทั้งหมดมาแสดงในรูปของกราฟได้ดังรูปที่ 4 ทำให้ทราบถึงผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำซึ่งทำให้ทราบค่าความดันก่อดทับประสิทธิผล (Effective Overburden Pressure) และความ



รูปที่ 6 การเปรียบเทียบการทรุดตัวที่พื้นผิวบนเสาเข็มดินซีเมนต์และที่ระดับต่ำจากพื้นผิว 0.5 เมตร



รูปที่ 7 การเปรียบเทียบการทรุดตัวที่ระดับต่ำจากพื้นผิว 3 และ 6 เมตร

ดันอัดตัวคายน้ำในอดีต (Preconsolidation Pressure) OCR สัมประสิทธิ์การอัดตัว (Compression Index) และสัมประสิทธิ์การคืนตัว (Recompression Index) อัตราส่วนช่องว่าง (Void Ratio) และค่าการซึมผ่านของน้ำ

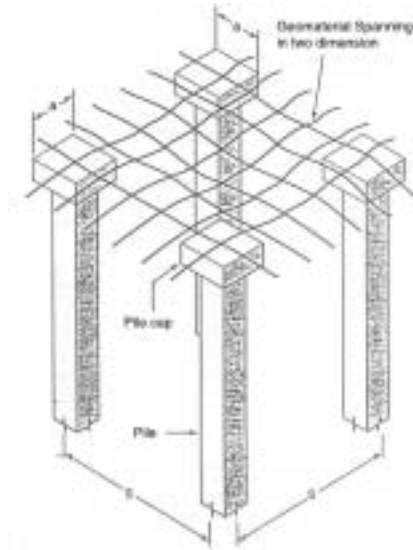
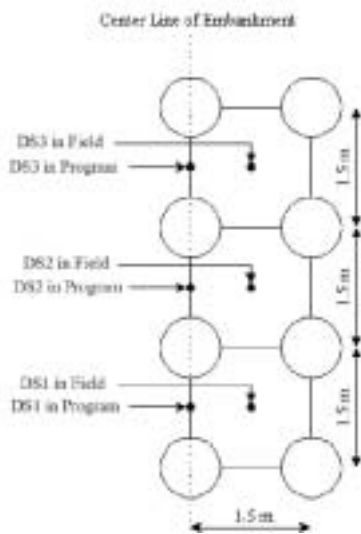
3.2 การทรุดตัวบริเวณพื้นผิว

ค่าการทรุดตัวที่บริเวณด้านหน้าของคันดินทดลองจะเกิดมากกว่าบริเวณด้านหลังของคันดินทดลอง คือจากรูปที่ 6 การทรุดตัวของ S1 > S2 > S3 > S4 และ S5 > S6 > S7 > S8 ซึ่งทั้งจากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และการทดสอบในสนามก็มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ค่าอาจจะแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น หน้าตัดและกำลังที่ได้อาจจะมีความไม่สม่ำเสมอเหมือนกับที่จำลองในแบบจำลองในโปรแกรม อีกทั้งค่าความซึมผ่านของน้ำของเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น ซึ่งกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 30 เท่าของ

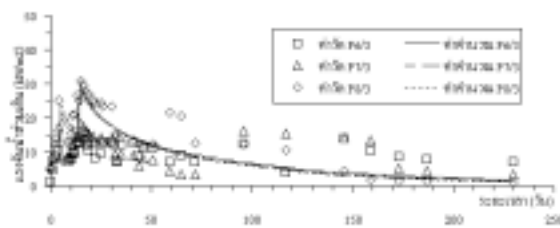
ชั้นดินเหนียวอ่อนตามงานวิจัยที่ผ่านมา แต่จากรูปที่ 6 นั้นการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ในช่วงที่เกิดกระบวนการอัดตัวคายน้ำที่ระยะเวลาหลังจากการทำการก่อสร้างคันดินทดลองเสร็จ ค่าการทรุดตัวนั้นเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ค่าการทรุดตัวส่วนใหญ่เกิดขึ้นขณะทำการก่อสร้างคันดินทดลอง ซึ่งหมายความว่า แรงดันน้ำส่วนเกิดส่วนหนึ่งได้ถูกระบายออกไปในขณะที่ทำการก่อสร้าง ดังนั้นจึงทำให้โค้งของกราฟในช่วงการอัดตัวคายน้ำของ S3, S4, S7, S8 นั้นมีความแตกต่างกันระหว่างการวิเคราะห์กับผลการทดสอบในสนาม

3.3 การทรุดตัวบริเวณใต้พื้นผิว

จากรูปที่ 7 การทรุดตัวบริเวณใต้พื้นผิวที่ระดับ 3 เมตรนั้นค่าที่ได้จากโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ จะมีค่าน้อยกว่าที่ได้จากในสนาม ทั้งนี้เนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้การวิเคราะห์แบบ 2 มิติ ซึ่งจากรูปที่ 8 จะเห็น



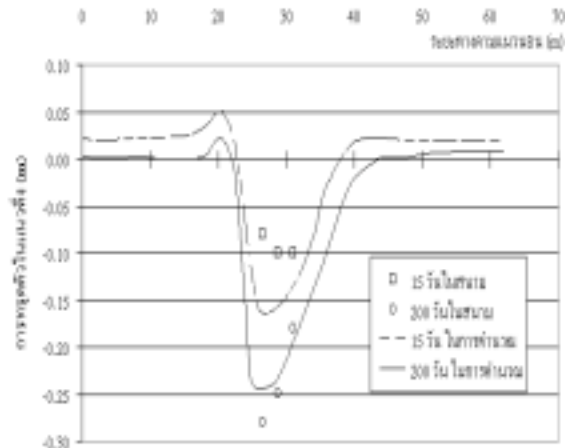
รูปที่ 8 ความแตกต่างของจุดที่เลือกใช้ในโปรแกรมกับค่าจริงในสนาม



รูปที่ 9 การเปรียบเทียบแรงดันน้ำส่วนเกินที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิวดิน 3, 6 และ 8 เมตร

ได้ว่าตำแหน่งที่ติดตั้งเครื่องมือ DS1-DS3 นั้นเป็นบริเวณที่อยู่ระหว่างเสาเข็มดินซีเมนต์แต่ตำแหน่งเสมือนของ DS1-DS3 ที่ใช้ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นเป็นคนละจุดกัน ระยะทางของ DS1-DS3 ในสนามจะห่างจากเสาเข็มดินซีเมนต์มากกว่าระยะทางเสมือน DS1-DS3 ในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังนั้นค่าการทรุดตัวของในสนามจึงมีค่ามากกว่าการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งตรงกับผลงานวิจัยที่ผ่านมาที่กล่าว

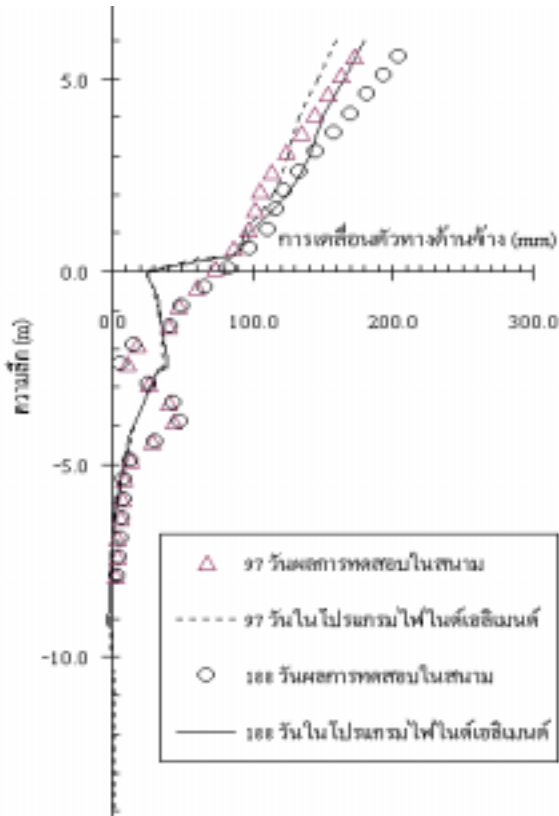
ในเรื่องของวิธีการหาค่า Soil Arching บนเสาเข็ม [13] ซึ่งการเกิด Soil Arching ในระบบ 3 มิติแสดงได้ดังรูปที่ 8 กันตลอดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ จากรูปที่ 7 การทรุดตัวที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิว 6 เมตรนั้นค่าอาจจะมีความแตกต่างกันบ้าง ทั้งนี้เนื่องมาจากการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์นั้น มีค่าโมดูลัสและพื้นที่หน้าตัดไม่เท่ากันตลอดความยาวของเสาเข็มดินซีเมนต์ ซึ่งจะแตกต่างจากการจำลองในโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์ที่จะให้ค่าโมดูลัสและพื้นที่หน้าตัดเท่า



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบการทรุดตัวจากการวิเคราะห์และจากการทดลองในสนามที่บริเวณพื้นผิวดินเดิม

3.4 แรงดันน้ำส่วนเกิน

จากรูปที่ 9 การทำนายค่าแรงดันน้ำส่วนเกินนั้นจากการวิเคราะห์จะมีค่ามากกว่าการทดสอบในสนามเนื่องมาจากขั้นตอนในการถมคันดินทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ขั้นตอนในการถมคันดินทดลอง 6 ครั้ง ครั้งละ 1 เมตร จากข้อมูลนี้จะนำไปคำนวณในสภาพที่ไม่เกิดการระบายน้ำ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันน้ำที่สูงกว่าค่าที่ได้จากการทดสอบ ในความเป็นจริงนั้น กระบวนการอัดตัวคายน้ำจะค่อยๆ เกิดที่ละเอียดลงและแรงดันน้ำส่วนเกินก็จะลดลงในแต่ละขั้นตอนการถม ดังนั้น ทำให้สามารถสรุปได้ว่า ถ้าหากใช้ขั้นตอนการก่อสร้างให้มากกว่านี้



รูปที่ 11 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ระยะเวลา 97 และ 188 วัน

ในโปรแกรมก็จะทำให้ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่วิเคราะห์ได้ใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากยิ่งขึ้น

3.5 ระดับการทรุดตัว (Settlement Profile)

ระดับการทรุดตัวด้านตัดขวางของคันดินทดลองที่บริเวณพื้นผิวแสดงในรูปที่ 10 การเปรียบเทียบจะแสดงในกรณีที่ทำการก่อสร้างเสร็จ ซึ่งมีค่าประมาณ 15 วัน และที่ระยะเวลาที่สิ้นสุดการเก็บข้อมูล คือประมาณ 200 วัน

3.6 ผลการเปรียบเทียบการเคลื่อนตัวทางด้านข้าง (Lateral Displacement)

จากรูปที่ 11 แสดงการเปรียบเทียบการทรุดตัวทางด้านข้างที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์และผลจากการทดสอบในสนาม ที่ระยะเวลา 97 และ 188 วัน ในช่วงชั้นดินที่ระดับความลึกต่ำกว่าผิวดิน 5 เมตรนั้นการวิเคราะห์ผลโปรแกรมไฟไนต์เอลิเมนต์กับผลการทดสอบในสนามมีความสอดคล้องกันดี แต่ว่าในช่วงชั้นดิน 0-5.0 เมตรนั้น ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างมีความแตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะผลกระทบจากการเลือกใช้

อัตราส่วนปัวซอง ความไม่สม่ำเสมอของคุณสมบัติของดิน (Non-Homogeneity) และ Anisotropy ความแข็งของท่อค้ำยันเครื่องมือวัดความเอียงตัว (Inclinometer Casing) เป็นต้น ส่วนการเคลื่อนตัวทางด้านข้างบริเวณแผ่นหินหล่อสำริดนั้น จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับผลการทดสอบก่อนข้างมีความสอดคล้องกันดี

4. สรุปผลการศึกษา

การจำลองในเชิงตัวเลขด้วยวิธีการทางไฟไนต์เอลิเมนต์นั้น จะใช้ในการจำลองพฤติกรรมจริงของคันดินทดลองที่เสริมกำลังด้วยลวดตาข่ายเหล็กเหล็บบนฐานรากเสาเข็มดินซีเมนต์ซึ่งจากการศึกษาทำให้สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. ค่าวัดการทรุดตัวในสนามที่บริเวณเสาเข็มดินซีเมนต์ ที่ระยะเวลา 230 วัน ค่า $S_1 > S_2 > S_3 > S_4$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 31, 29, 21, 17 ซม. ตามลำดับ และค่าวัดการทรุดตัวในสนามที่บริเวณต่ำกว่าพื้นดิน 0.5 เมตร ที่ระยะเวลา 230 วัน ค่า $S_5 > S_6 > S_7 > S_8$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 36, 32, 23, 20 ซม. ตามลำดับ ซึ่งแนวโน้มค่าคำนวณจะสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดในสนาม
2. ค่าวัดการทรุดตัวบริเวณใต้พื้นผิว ที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิว 3 เมตร ที่ระยะเวลา 230 วัน ค่า $DS_1 > DS_2 > DS_3$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24, 20, 18 ซม. ตามลำดับ และค่าวัดการทรุดตัวบริเวณใต้พื้นผิวที่ระดับต่ำกว่าพื้นผิว 6 เมตร ที่ระยะเวลา 230 วัน ค่า $DS_6 > DS_7 > DS_8$ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.5, 7.3, 7.2 ซม. ตามลำดับ แนวโน้มค่าคำนวณจะสอดคล้องกับค่าที่ได้จากการวัดในสนาม
3. แรงดันน้ำส่วนเกินค่าที่วัดได้ในสนามมีค่าเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก คือตั้งแต่ 5-30 KN/m² แต่จากการคำนวณเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่วัดในสนามค่าที่ได้ก็มีความสอดคล้องกัน การเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่ระยะเวลา 97 และ 188 วันเกิดการเคลื่อนที่มากที่สุดเท่ากับ 170 และ 200 มม. ตามลำดับซึ่งก็จะสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม

เอกสารอ้างอิง

1. Bergado, D.T., et al. "Performance of Welded Wire Wall with Poor Quality Backfills on Soft Clay." *ASCE Geotechnical Engineering Congress*. pp. 909-922. U.S.A.: Boulder, Colorado, 1991.
2. Bersabe, N.D. "Engineering Properties of Locally

- Available Clayey to Silty Sand Their Applicability as Sand Compaction Pile Material." AIT Thesis No. GT 91-20, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.1992.
3. Long, P.V. "Behavior of Geotextile-Reinforced Embankment on Soft Ground." PhD. Dissertation No. GE 96-1, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand. 1996.
 4. Chai, J.C. "Interaction Behavior between Grid Reinforcements and Cohesive Frictional Soils and Performance of Reinforced Wall/Embankment of Soft Ground." PhD. Dissertation No. GT 91-1, Asian Institute of Technology. Bangkok, Thailand.1992.
 5. Balasubramaniam, A. S., et al. "Critical State Parameters and Peak Stress Envelopes for Bangkok Clays." *Quarterly Journal of Engineering Geology*. 11 (1978) : 219-232.
 6. Britto, A.M. and Gunn, M.J. *Critical State Soil Mechanics via Finite Elements*. U.K. : Ellis Horwood, Chichester.1987.
 7. Alfaro, M.C. "*Reinforced Soil Wall-Embankment System on Soft Foundation Using Inextensible and Extensible Grid Reinforcements.*" PhD. Dissertation, Saga University, Japan. 1996.
 8. Brinkgreve, R.B.J. and Vermeer, P.A. *Manual of finite element : Version 7*. Netherlands : Rotterdam, 1998.
 9. Lorenzo, G.A. "New compressibility model and finite element simulation of deep mixing method (DMM) application." AIT Thesis No. GE 00 -13, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 2001.
 10. Wongsawanon, T. "Interaction between Hexagonal Wire Mesh Reinforcement and Silty Sand Backfill." AIT Thesis No. GE 97-14, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.1998.
 11. Youwai, S. "Finite element modelling of hexagonal wire mesh embankment on soft foundation." AIT Thesis No. GE 98-13. Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand.1999.
 12. Chai, X. "Full-scale test of reinforced wall / embankment using hexagonal wire mesh reinforcement with precast concrete facing on jet-grouted soil-cement piles." AIT Thesis No. GE 01-7, Asian Institute of Technology, Bangkok, Thailand. 2001.
 13. Low, B.K., Tang, S.K. and Choa, V. "Arching in Piled Embankments." *Journal of Geotechnical Engineering*. 120, 11 (1994) : 1917-1938.