

## การศึกษาพฤติกรรมของคอนกรีตมวลเบาในงานวิศวกรรมปฐพี

## A STUDY IN BEHAVIOR OF CELLULAR CONCRETE ON GEOLOGY ENGINEERING

นายกันตพงศ์ ศิริทรัพย์สุนทร<sup>1</sup> นายเศรษฐพงศ์ ประภาสังค์<sup>2</sup>

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ฐิรวีตร บุญญะฐิติ<sup>3</sup>

<sup>3</sup> ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย จ.กรุงเทพฯ

๕

### บทคัดย่อ

คุณสมบัติพื้นฐาน การทดสอบ และการใช้งานคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้านั้นมีให้เห็นเป็นจำนวนหนึ่งแล้ว แต่การทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าในงานวิศวกรรมปฐพีนั้นยังเห็นไม่มากนัก ผู้วิจัยจึงได้ทำโครงการนี้เพื่อศึกษาการจำลองการยุบตัวของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าในงานวิศวกรรมปฐพีและเพิ่มข้อมูลที่ขาดนี้ โดยนำไปประยุกต์ในเรื่องการใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าในการเพิ่มเสถียรภาพของดินถม ผู้วิจัยจะใช้โปรแกรม Plaxis 2D CE ในการคำนวณและวิเคราะห์ถึงความปลอดภัยของการประยุกต์ใช้คอนกรีตมวลเบาในสถานการณ์ต่าง ๆ โดยจะสมมติสภาพวิเคราะห์ เป็นการถมดินสูง 1.6 เมตร ละให้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าเป็นกำแพงกันดินชันสูงไปเป็นมุม 45 องศา และค่าคุณสมบัติคอนกรีตมวลเบาจะใช้ค่าที่ได้มีการวิจัยมาแล้ว และดินเหนียวในการวิเคราะห์จะเป็นคุณสมบัติดินเหนียวของกรุงเทพฯ

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้า, การเพิ่มเสถียรภาพดิน, ค่าความปลอดภัย, Plaxis 2D CE

### Abstract

Properties, testing and using of Cellular Concrete have been seen for a while, there is a little published material regarding its properties - in particular, Geology Engineering used.

The aim of this project is to study on applying Cellular Concrete on Geology Engineering and address this lack of information. We use Plaxis 2D CE for analyse and calculate the Safety of Factor of the applying Cellular Concrete on stabilizing fill soil in many conditions. We assume 1.6 meters tall and in a triangle shape with a 45-degree retaining wall. The properties

of Cellular Concrete come from the published research and soil type is Bangkok Clay.

Key words: Cellular Concrete, Stabilising soil, Safety of factor, Plaxis 2D CE

### 1. ที่มาและความสำคัญ

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้ามีการเรียกชื่อหลายแบบมาก ทั้ง Cellular Concrete หรือ Foamcrete และมีการสับสนเป็นอย่างมาก ระหว่างคอนกรีตมวลเบา กับ คอนกรีตโพรงอากาศ จึงมีการนิยามคอนกรีตมวลเบาโดย Van Deijk (1991) ว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าคือวัสดุซีเมนต์ที่มีส่วนประกอบของโฟมอย่างน้อยร้อยละ 20 โดยปริมาตร ความแตกต่างของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้ากับคอนกรีตโพรงอากาศ คือการที่โพรงอากาศทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างฟองลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสารคาไลนต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้ปริมาตรของอากาศในซีเมนต์มีน้อยกว่า

ในช่วง 10 ปีหรือมากกว่าที่ผ่านมา คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าได้มีการใช้งานอย่างมากในสหราชอาณาจักร โดยใช้เป็นวัสดุอุดรูหรือช่องว่าง วัสดุแทนที่ การทำถนนใหม่ และอื่น ๆ มากมาย รวมไปถึงการเพิ่มเสถียรภาพของดินตัดที่สนใจในโครงการนี้

เนื่องจากการวิจัยของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโล้าในงานเพิ่มเสถียรภาพของดินมีมาไม่มากนัก โครงการนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อเพิ่มข้อมูลที่จำเป็นหรือขาดหาย และให้ผู้สนใจนำไปใช้ต่อเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้งานคอนกรีตมวลเบาในงานเพิ่มเสถียรภาพของดินในสภาพต่าง ๆ

## 2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 ความหมาย องค์ประกอบ และคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์มีการเรียกชื่อหลายแบบมาก ทั้ง Cellular Concrete หรือ Foamcrete และมีการสับสนเป็นอย่างมาก ระหว่างคอนกรีตมวลเบากับคอนกรีตโพรงอากาศ จึงมีการนิยามคอนกรีตมวลเบาโดย Van Deijk (1991) ว่า คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์คือวัสดุซีเมนต์ที่มีส่วนผสมของโฟมอย่างน้อยร้อยละ 20 โดยปริมาตร ความแตกต่างคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์กับคอนกรีตโพรงอากาศ คือการที่โพรงอากาศทำปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์และสาร

ออกไซด์ต่าง ๆ ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้ปริมาตรของอากาศในซีเมนต์มีน้อยกว่า

สำหรับการใช้งานทั่วไป จะใช้ที่ร้อยละ 40 ถึง 80 ของปริมาตรทั้งหมด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโพรงอากาศอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 1.5 มม.

คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ไม่ต้องการการอัดแน่น สามารถไหลลงรูหรือช่องแปลกที่เข้าถึงยากได้ และสามารถส่งผ่านท่อที่ความสูงและระยะทางไกลได้ กำลังและความหนาแน่นแห้งที่ 28 วัน แปรผันตามส่วนผสม แต่ส่วนมากค่าจะอยู่ที่ 1 ถึง 10 N/mm<sup>2</sup> และ 400 ถึง 1600 kg/m<sup>3</sup> ตามลำดับ โดยยิ่งกำลังน้อย ความหนาแน่นก็จะน้อยตาม

#### 2.1 สภาพดินกรุงเทพฯ

กรุงเทพฯ ตั้งอยู่บนชั้นดินเหนียวหนามาก โดยเป็นชั้นที่ต้องทำการก่อสร้าง ได้มีนักวิจัยทำการศึกษเกี่ยวกับดินกรุงเทพฯ เช่น Likitlersuang et al. (2013a) ที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างดินทั่วกรุงเทพฯ และได้ทำการแบ่งชั้นเป็น Made Ground (MG), Bangkok Soft Clay (BSC), Medium Clay (MC), 1<sup>st</sup> Stiff Clay (1<sup>st</sup> SC), Clayey Sand (CS), 2<sup>nd</sup> Stiff Clay (2<sup>nd</sup> SC), and Hard Clay (HC) และ Likitlersuang et al. (2013c) โดยค่าที่ใช้จะเป็นค่าของชั้น BSC ซึ่งเป็นดินธรรมชาติของกรุงเทพฯ

#### 2.2 ทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria

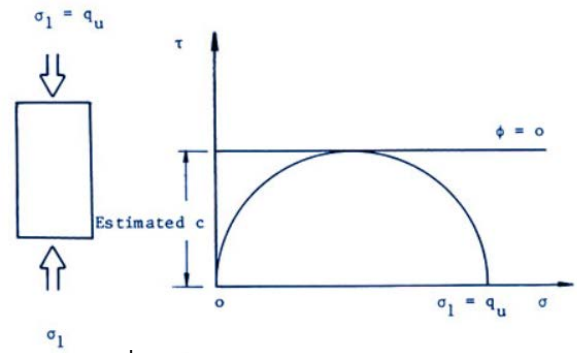
Coulomb ได้เสนอความสัมพันธ์ ขณะที่เขาสารวจกำแพงกันดิน (Heyman 1972)

$$|\tau| = S_0 + \sigma \tan(\phi) \quad (2.1)$$

โดย  $S_0$  คือ inherit shear strength หรือที่รู้จักกันคือ C (Cohesion) แรงยึดเหนี่ยว หน่วย kPa

$\phi$  คือ มุมเสียดทานภายใน

2.3.3 การประยุกต์ ทฤษฎี Mohr-Coulomb ในการหาค่า Cohesion จากการทดสอบ Unconfine Compressive Test (UCS)



รูปที่ 2.1 Mohr Diagram ของการทดสอบ UCS

จากรูปที่ 2.1 ทำให้ได้สมการใหม่เป็น

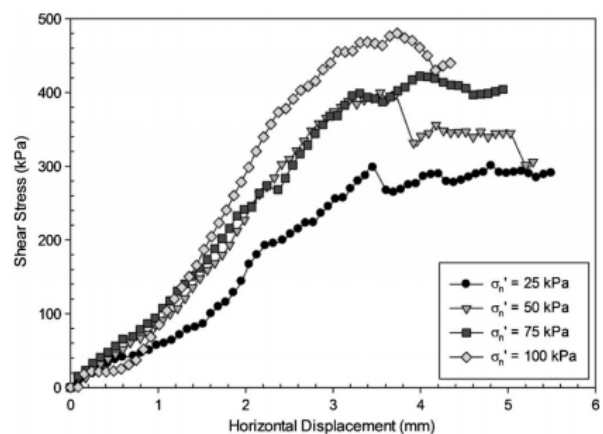
$$\tau = \frac{UCS}{2} = C \quad (2.2)$$

#### 2.3 การทดสอบ DS ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์

จากรูปที่ 2.2 แสดงถึงความเค้นเฉือนกับพฤติกรรมเคลื่อนตัวในแนวตั้งของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ที่หน่วยแรงตั้งฉาก 4 ค่า ซึ่งได้ทำการทดลองแล้วเห็นแนวโน้มในคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ที่หน่วยน้ำหนักต่าง ๆ ที่เหมือนกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ที่เมื่อหน่วยน้ำหนักที่มากขึ้นแล้ว จะทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่มากขึ้น (จุดตัดแกน Y) และมีการที่เพิ่มขึ้นของมุมแรงเสียดทานทั้งหมด ( $\phi$ ) อย่างเห็นได้ชัด โดยมุมแรงเสียดทานทั้งหมดในที่นี้ หมายถึง มุมแรงเสียดทานของคอนกรีตมวลเบาที่อมน้ำบางส่วนที่มาจากทดสอบ DS ที่ค่าอัตราการเฉือนตามรูปที่ 2.4 ซึ่งเมื่อดูจากความสัมพันธ์แล้วจะได้สมการดังนี้

$$\phi = 1.187\gamma + 15.062 \quad (2.6)$$

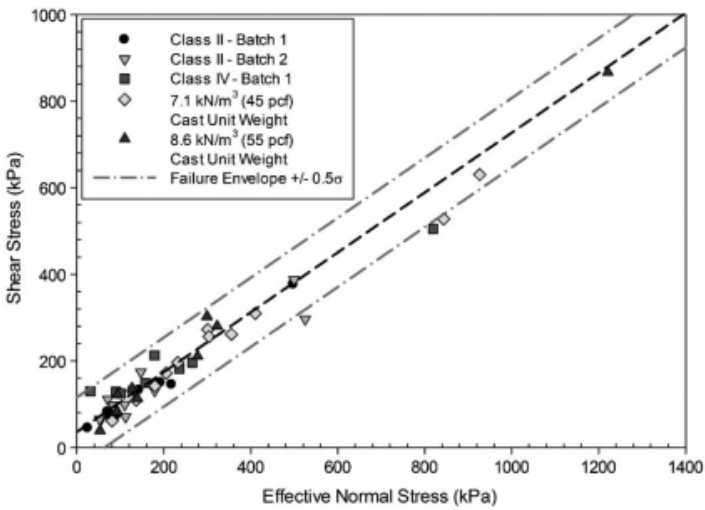
$$C = 274.386\gamma - 654.958 \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับการกระจัดแนวตั้ง ด้วยวิธีทดสอบ DS จากตัวอย่างทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูลาร์ที่มีหน่วยน้ำหนัก 7.1 kN/m<sup>3</sup> ที่หน่วยแรงตั้งฉาก 4 ค่า

## 2.4 การทดสอบ DSS ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

จากรูป 2.3 ได้เส้นค่าความเค้นประสิทธิของการแตกหัก จากการทดสอบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ค่าหน่วยน้ำหนักต่าง ๆ ซึ่งสามารถแปลงเป็นค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลได้เท่ากับ 35° และค่าแรงยึดเหนี่ยวเท่ากับ 36 kPa



รูปที่ 2.5 ความเค้นประสิทธิการแตกหักจากผลจากการทดสอบ DSS ของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสต่าง ๆ

## 2.8 การใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสสำหรับเพิ่มเสถียรภาพให้ดินถม

การก่อสร้างค้ำยันหรือการเพิ่มเสถียรภาพดินไม่รวมแรงยึดเหนี่ยว เพราะคำนึงถึงคุณสมบัติของวัสดุอัดละเอียดชั่วคราว ซึ่งแนะนำให้ใช้ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลที่ 35° และไม่คำนึงถึงค่าแรงยึดเหนี่ยวเมื่อคำนวณถึงค่าเสถียรภาพจากแรงภายนอกในระยะยาว และจากคุณสมบัติทั่วไปของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสนั้นวัดได้ยากด้วยการทดสอบ Drained และ Undrained ด้วยสมมติฐานนี้จึงจะใช้ค่ามุมเสียดทานประสิทธิผลของคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสที่ค่าใกล้เคียงตัวน้ำให้มากที่สุด เพื่อคำนึงถึงความปลอดภัยที่สุด

## บทที่ 3 การวิเคราะห์ผลการจำลองดินถม

เอกสารฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นการจำลองการพฤติกรรมของดินถมเมื่อมีการนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสมาใช้ในงานเพิ่มเสถียรภาพของดินถม โดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D โดยกำหนดสภาพวิเคราะห์ เป็นการถมดินสูง 1.6 เมตร โดยให้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสทำมุมกำแพงกันดินเป็นมุม 45 องศา โดยในเอกสารฉบับนี้จะทำการเปรียบเทียบคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสในกรณีต่างๆ กับ ดินปกติที่มีการนำมาใช้ในงานถมทั่วไปของกรุงเทพมหานคร ผ่านทาง Safety Factor ของกำแพงกันดิน

### 3.1 รายละเอียดของแบบจำลองกำแพงกันดิน

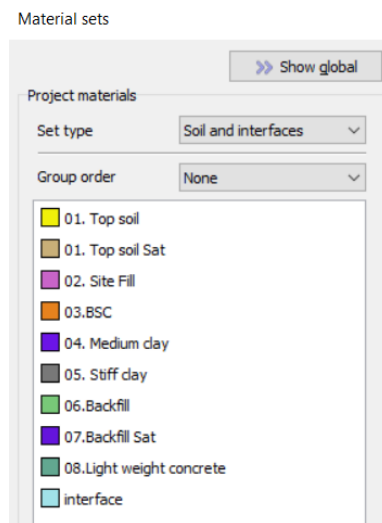
#### 3.1.1 ตัวแปรของชั้นดินที่ใช้ในการจำลอง

ตารางที่ 3.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในจำลองชั้นดินในแบบจำลอง

ชนิดของดิน	Unit Weight [kN/m <sup>3</sup> ]	E' [kN/m <sup>2</sup> ]	V'	S <sub>u</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	C' [kN/m <sup>2</sup> ]	Φ [°]	Analysis Type
Top Soil	16.5	10,000	0.3	20	-	-	Undrained
Top Soil Sat	18	10,000	0.3	-	5	25	Drained
Site Fill	16.5	10,000	0.3	20	-	-	Undrained
BSC	16.5	10,000	0.3	20	-	-	Undrained
Medium Clay	17.5	27,500	0.3	55	-	-	Undrained
Stiff clay	19.5	40,000	0.3	80	-	-	Undrained
Backfill	16.5	10,000	0.3	20	-	-	Undrained
Backfill Sat	18	10,000	0.3	-	5	25	Drained
interface	7.1	1,810,000	0.3	-	0	23	Drained
light weight concrete	7.1	1,810,000	0.3	1926	-	-	Undrained

#### 3.1.2 กำหนดสีในกินในการจำลอง

กำหนดสีในชั้นดินต่างๆให้แตกต่างกันเพื่อความสะดวกในการศึกษาและทดสอบ



รูปที่ 3.1 สีที่ใช้แทนชั้นดินที่ต่างกัน

#### 3.1.3 กำหนดรูปแบบกำแพงกันดินในการจำลอง

ใช้กำแพงกันดินเป็นแบบ Soldier Pile ในการวิเคราะห์โดยใช้เสาเข็ม เป็นเหล็ก I beam ขนาด 26\*26cm และกั้นด้วยแผ่นคอนกรีตสำเร็จรูป

### 3.1.4 การกำหนดจุดที่นำมาใช้วิเคราะห์ค่า FS

โดยในการจำลองผู้วิจัยได้กำหนดจุดที่จะนำมาวิเคราะห์ค่า FS โดยใช้ จุดที่ใกล้เคียงกับจุดยอดของกำแพงมากที่สุด

## 3.2 กำหนดกรณีในการวิเคราะห์แบบจำลอง

### 3.2.1 การถมดินทั่วไปพร้อมทั้งจำลองแรงที่อาจเกิดขึ้นในสภาพจริง

3.2.2 การถมคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสพร้อมทั้งจำลองแรงที่อาจ เกิดขึ้นในสภาพจริง

3.2.3 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสพร้อมทั้งจำลองกรณีเกิดฝน ตกหนักและมีน้ำซัง

3.2.4 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 1 รอย

3.2.5 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 2 รอย

3.2.6 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 3 รอย

3.2.7 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจาก Tension 1 รอย

3.2.8 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจาก Tension 2 รอย

3.2.9 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจาก Tension 3 รอย

3.2.10 กรณีที่คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกเป็นจำนวน มากจนมีสภาพเป็นผองคอนกรีต

## 3.3 เปรียบค่า Safety Factor ของในแต่ละกรณี

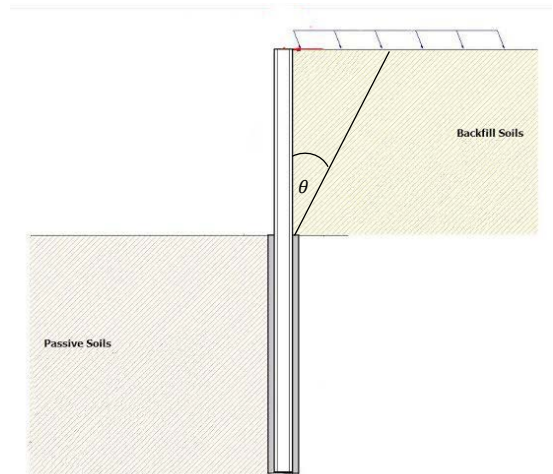
นำค่า Safety Factor ที่ได้จากวิเคราะห์ข้อมูลในแต่ละกรณีมาสร้างมา เปรียบเทียบกันผ่านกราฟ



รูปที่ 3.2 ภาพกราฟเปรียบเทียบค่า Safety Factor ในแต่ละกรณี

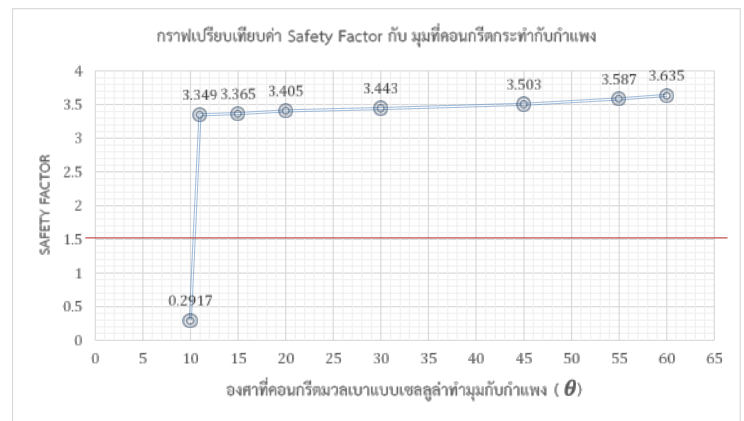
## 3.4 วิเคราะห์หองศาในการถมคอนกรีตมวลเบาที่ยังทำให้กำแพงมี เสถียรภาพ

ในการวิเคราะห์นี้จะจำลองการถมคอนกรีตมวลเบาชนิดเซลลูโลสที่ กระทำต่อกำแพงในองศาต่างๆกันเพื่อหองศาที่ทำมุมกับกำแพงน้อยที่สุด เนื่องจากยังมีมุมมององศาที่ทำกับกำแพงน้อยเท่าไรก็ยิ่งใช้คอนกรีตในการถม น้อยลงเท่านั้น โดยองศาที่ใช้ที่ยังทำให้กำแพงกันดินยังมีเสถียรภาพอยู่ โดยกำหนดค่า Safety Factor ต้องไม่น้อยกว่า 1.5



รูปที่ 3.3 ภาพมุมที่การถมคอนกรีตมวลเบากระทำกับกำแพง

โดยจากการจำลององศาที่ทำมุมกับกำแพงน้อยที่สุดที่ยังทำให้กำแพงมี ค่า Safety Factor มากกว่า 1.5 อยู่คือ 79 องศา ดังตาราง



รูปที่ 3.4 ภาพกราฟเปรียบเทียบค่า Safety Factor กับ มุมที่คอนกรีต กระทำกับกำแพง

#### บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย

ในบทนี้จะเป็นการนำเสนอสรุปของผลลัพธ์ที่ได้ทำการศึกษา โดยจะมีการเสริมรายละเอียดกล่าวถึงภาพรวมทั้งหมดในการศึกษาประกอบ ตั้งแต่ขั้นต้นจนถึงได้ผลการวิเคราะห์ ซึ่งจะประกอบไปด้วยรายละเอียดโดยย่อในส่วนของการทำงานการศึกษา อาทิ เช่น การเก็บรวบรวมข้อมูล ตลอดจนถึงการสร้างโมเดลจำลองในการวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดิน รวมถึงคำแนะนำที่เกี่ยวข้องเพิ่มเติมในตอนท้าย เพื่อทำการเปรียบเทียบ กำแพงกันดินในองค์ที่แตกต่างกันเพื่อความประหยัด

จากการศึกษาพบว่าในการในปัจจุบันการก่อสร้างสิ่งก่อสร้างต่างๆ เช่น บ้านจัดสรร ทาวน์โฮม ในพื้นที่กรุงเทพฯ จำเป็นต้องการถมดินสูง เนื่องจากพื้นที่ตั้งอยู่ในที่ราบลุ่มเจ้าพระยาตอนล่างโดยมีแม่น้ำเจ้าพระยา ไหลผ่านแบ่งพื้นที่เป็นสองฝั่ง คือฝั่งธนบุรี กับฝั่งพระนคร (กรุงเทพฯ) ซึ่งฝั่งธนบุรีอยู่ในระดับที่สูงกว่าฝั่งกรุงเทพฯ เพราะมีพื้นที่เป็นดอน ต่างจากฝั่งกรุงเทพฯ ที่มีพื้นที่ลุ่มต่ำลาดลงไปทางทิศตะวันออก และมีลักษณะเป็นแอ่งกระทะ ทำให้ง่ายต่อการเกิดน้ำท่วมขัง โดยตามพรบ.ควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 “จำเป็นต้องสร้างกำแพงกันดินหรือกำแพงกันน้ำเพื่อรองรับความดันของดินหรือน้ำที่มีความสูงตั้งแต่ 1.50 เมตรขึ้นไป” ทำให้ต้องมีการสร้างกำแพงกันดินกรณีต้องการถมดินสูง โดยทั่วไปการก่อสร้างกำแพงกันดินเพื่อถมดินมักใช้กำแพงกันดินแบบ Soldier pile เนื่องจากเหมาะสมกับการรับแรงดันดินในด้านที่สูงกว่าและมีความรวดเร็วในการติดตั้ง โดยการถมดินสูงในหลายที่มักพบปัญหาการเกิดดินถล่มจากแรงดันดินที่มากเกินไปเนื่องจากสาเหตุที่คาดไม่ถึงเช่น ฝนตกหนักหรือมีน้ำในโครงการเกินกว่าที่ออกแบบไว้ เป็นต้น

ในเอกสารนี้จึงได้มีการนำเสนอการใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส คอนกรีตมาช่วยเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดิน โดยเนื่องจากปัจจุบันมีเอกสารอ้างอิงเกี่ยวกับการใช้ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสคอนกรีตค่อนข้างน้อย ผู้จัดทำจึงจำลองการออกแบบโครงสร้างกันดินโดยใช้ คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเพื่อแสดงประสิทธิภาพในการใช้งาน คอนกรีตมวลเบาในงานเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดินโดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D CE โดยหวังว่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจหรือวางแผนที่จะเพิ่มเสถียรภาพของกำแพงกันดินด้วยคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส

โดยจากผลการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Plaxis 2D CE ได้ผล ดังนี้

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ ดินทั่วไปกรณีจำลองแรงที่อาจเกิดขึ้นในสภาพจริงเท่ากับ 1.002
- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณีจำลองแรงที่อาจเกิดขึ้นในสภาพจริงเท่ากับ 3.508
- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณีฝนตกหนักเท่ากับ 3.396

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 1 รอยเท่ากับ 3.505

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 2 รอยเท่ากับ 3.503

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกตามทฤษฎี Mohr – Coulomb Failure Criteria 3 รอยเท่ากับ 2.637

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจากTension 1 รอยเท่ากับ 3.500

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจากTension 2 รอยเท่ากับ 3.500

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตก เนื่องจากTension 3 รอยเท่ากับ 3.493

- ค่าSafety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้ คอนกรีตมวลเบารวมกรณี คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสเกิดรอยแตกเป็นจำนวนมากจนมีสภาพเป็นผงคอนกรีตเท่ากับ 1.109

และค่าเฉลี่ย Safety Factor ของกำแพงกันดินที่ใช้คอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลส ในทุกรณีเท่ากับ 3.128 โดยมีค่าเป็น 3 เท่าของดินทั่วไป

เมื่อเปรียบเทียบการนำเอาคอนกรีตมวลเบาเพิ่มเติมเสถียรภาพของดินใน องค์ที่ต่างกัน

สามารถสรุปได้ว่า มุมองศาที่น้อยที่สุดที่ทำให้มีSafety Factor มากกว่า 1.5 คือมุม 79 องศาโดยมีค่า Safety Factor เท่ากับแต่เมื่อพิจารณาใน สภาพการทำงานจริงการถมดินโดยให้ทำมุมอย่างละเอียดเป็นไปได้ยากจึง แนะนำองศาที่เหมาะสมอยู่ที่ 75 องศา

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำหวังว่าผลการวิเคราะห์ข้อมูลจะช่วยให้ผู้ที่สนใจหรือ ต้องการนำคอนกรีตมวลเบาแบบเซลลูโลสไปใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพของ กำแพงกันดินในการถมดินสูง สามารถเข้าใจเกี่ยวกับประสิทธิภาพของ คอนกรีตมวลเบาได้มากขึ้นและสามารถนำไปต่อยอดในการใช้งานจริงได้

#### กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ ได้ด้วยความช่วยเหลือ อย่างดีของ รองศาสตราจารย์ ดร.จิรวีตร บุญญะฐิติ ผู้เป็นอาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์หลัก ซึ่งท่านได้คอยให้คำแนะนำ และเสนอข้อคิดเห็น ต่าง ๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการวิจัยนี้ รวมไปถึงการช่วยตรวจสอบ และแก้ไขปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ด้วย กลุ่มผู้วิจัยขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ เป็นอย่างยิ่งมา ณ ที่นี้ด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Binod Tiwari, M.ASCE1 ; Beena Ajmera, A.M.ASCE2 ; Ryan Maw, M.ASCE3 ; Ryan Cole, M.ASCE4 ; Diego Villegas5 ; and Peter Palmerson6 , Mechanical Properties of Lightweight Cellular Concrete for Geotechnical Applications, 03-2017.
- [2] J. Mater. Civ. Eng., 2017, 29(7): 06017007
- [3] Tiwari, B. (2016). "Application of cell-crete in civil engineering—Phases I and II, static and dynamic properties." Technical Rep. Project No. 50123514.
- [4] ASTM. (2000). "Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil." ASTM D2166-00, West Conshohocken, PA.
- [5] ASTM. (2007). "Standard test method for the consolidated undrained direct simple shear testing of cohesive soils." ASTM D6528-07, West Conshohocken, PA.
- [6] ASTM. (2011c). "Standard test method for direct shear tests of soils under consolidated drained conditions." ASTM D3080-11, West Conshohocken, PA.
- [7] ASTM. (2012). "Standard test method for compressive strength of light-weight insulating concrete." ASTM C495/C495M, West Conshohocken, PA.
- [8] ASTM. (2015). "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens." ASTM C39-15, West Conshohocken, PA.
- [9] K C Brady, G R A Watts and M R Jones, Specification for foamed concrete, TRL Limited, May 2001.
- [10] Anon (1997). Cellular concrete pour relieves earthquake damage. Civil Engineering, November, pp 14-15
- [11] British Cement Association (1994). Foamed concrete; Composition and properties. Report Ref. 46.042. BCA, Slough
- [12] Likitlersuang et al., Strength and Stiffness Parameters of Bangkok Clays for Finite Element Analysis, Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA Vol. 49 No. 2 June 2018.
- [13] Mohr Diagram ของการทดสอบ UCS [ภาพ]/ค้นเมื่อ 25 พ.ค. 2564/ จาก [http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch13/ch133\\_theory.htm](http://www.gerd.eng.ku.ac.th/Cai/Ch13/ch133_theory.htm)