

**การวิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี****Analysis and Design of Soil Cement Columns for Retaining Wall System****at Impact Arena Muang Thong Thani Parking Building****ปิยะ รัตนสุวรรณ , วรรณสิริ พันธุ์ไธ****Piya Rattanasuwan and Wonsiri Punurai**

ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล อ.พุทธมณฑล จ.นครปฐม 73170

โทร 02-889-2138 ต่อ 6396 โทรสาร 02-889-2138 ต่อ 6388

E-mail: egprt@mahidol.ac.th

**บทคัดย่อ**

การศึกษานี้นำเสนอการวิเคราะห์ ออกแบบ เสาเข็มดินซีเมนต์ที่ทำจากการปรับปรุงสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนเพื่อใช้ในการก่อสร้างระบบกำแพงกันดินอาคารจอดรถอิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี โดยปริมาณซีเมนต์ที่ใช้ผสมดินเพื่อการปรับปรุงสมบัติของดินเหนียวอ่อนนั้นได้จากการพิจารณาจากความสัมพันธ์ของกำลังอัดที่แปรผันตามอัตราส่วนผสมของดิน ซีเมนต์ และน้ำขณะทำการบ่มทดสอบในห้องปฏิบัติการ ผลจากการทดสอบพบว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ที่มีความลึก 15 เมตร สามารถก่อสร้างได้โดยการผสมซีเมนต์ตั้งแต่ 180 ถึง 220 กิโลกรัมต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตรด้วยวิธีผสมแบบเปียก ระยะเวลาการบ่มที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้กำลังรับน้ำหนักของเสาเข็มเพิ่มขึ้น การวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินเมื่อรับแรงดันดินด้านข้างแสดงให้เห็นว่าการก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร โดยใช้ซีเมนต์ 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ผสมเปียกแล้วทิ้งไว้ประมาณ 30 นาทีสามารถให้กำลังและรับน้ำหนักบรรทุกปลอดภัยโดยมีอัตราส่วนความปลอดภัยมากกว่า 2

**Abstract**

This paper evaluates the use of soil mixing in very soft soil cement columns to form a composite gravity structure to support vertical excavations located at the Impact Arena Muang Thong Thani parking building. The response of the cement-stabilized soft Bangkok clay to static loading in unconfined compression has been investigated over three

variables, cement content, initial setting period and curing time to provide a better understanding of the behavior of cement stabilized clay. It was found that a very soft and compressible clay layer located at 15 m below ground was sufficiently stabilized with a dosage rate ranged from 180 to 220 kg/m<sup>3</sup> for the wet deep mixing method. Higher curing time increased the unconfined compressive strength. In addition, the wall stability was checked to compute the maximum stresses in the composite section of the soil and soil-cement columns using soil stabilized properties. A satisfactory structural performance was achieved and a minimum factor of safety greater than 2 was obtained when a soil cement column diameter of 60 centimeters was cured at least 30 minutes with the dosage rate of 180 kg/m<sup>3</sup>.

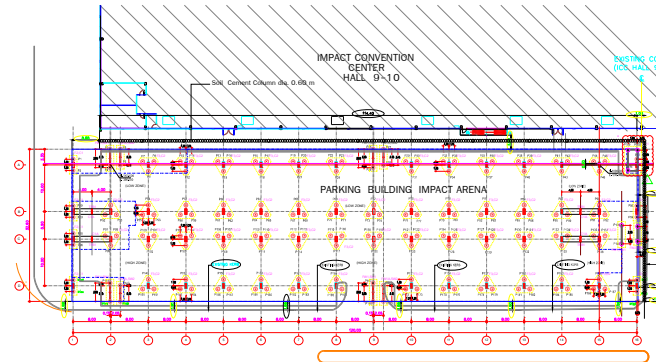
**1. บทนำ**

ชั้นดินบริเวณกรุงเทพและปริมณฑล ประกอบไปด้วยชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีความลึกประมาณ 0 - 10 เมตร เรียกดินชั้นนี้ว่า “ดินเหนียวอ่อนกรุงเทพ” (Soft Bangkok Clay) คุณสมบัติของดินเหนียวชนิดนี้ มีกำลังและความซึมผ่านของน้ำได้ต่ำ [1] ก่อให้เกิดปัญหาในการก่อสร้างเป็นประจำ โดยเฉพาะการก่อสร้างฐานรากอาคารใหญ่ๆ ที่อยู่ลึกลงไป การป้องกันดินเหนียวอ่อนไม่ให้เกิดการพังทลายระหว่างการขุดจึงนิยมใช้การออกแบบกำแพงกันดินด้วยวิธีการทำเสาเข็มดินซีเมนต์ (Soil Cement Columns)

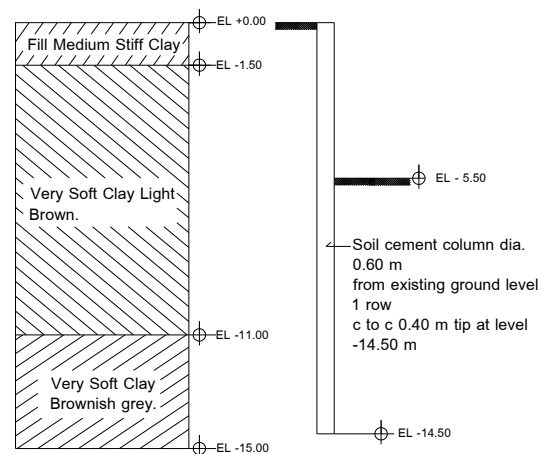
การทำให้เสาเข็มดินซีเมนต์เกิดจากการปรับปรุงคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนด้วยวิธีผสมแบบแรงดันสูง (Jet Grouting) ซึ่งเป็นวิธีการฉีดน้ำปูนซีเมนต์เข้าไปผสมรวมกับเนื้อดินด้วยความดันสูงผ่านทางหัวฉีด (Nozzle) บริเวณปลายล่างของก้านเจาะ ในขณะที่ทำงานเครื่องเจาะจะหมุนก้านเจาะผ่านชั้นดิน พร้อมทั้งฉีดน้ำอัดดินด้วยความดันสูง เมื่อถึงระดับความลึกที่กำหนดจะหมุนก้านเจาะด้วยอัตราความเร็ว 6-15 รอบต่อนาที พร้อมทั้งยกดึงขึ้นเป็นจังหวะประมาณ 2-30 ซม. ในขณะที่เสียกับการอัดฉีดน้ำปูนซีเมนต์ความดันสูง [2-4] จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าดินเหนียวอ่อนกรุงเทพมหานคร เป็นดินที่มีแร่ซิลิกาและแร่อะลูมินาผสมอยู่เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งหากผสมเข้ากับ  $(Ca(OH)_2)$  ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน Cement Hydration ของการผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยตรงกับน้ำ ก็จะเกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิก (Pozzolanic Reaction) ปฏิกิริยาดังกล่าวนี้ทำให้เกิด Calcium Silicate Hydrate (CSH) หรือ Calcium Aluminate Hydrate (CAH) เพิ่มเติมจากปฏิกิริยาที่เกิดจากซีเมนต์โดยตรง ซึ่งสาร CSH และ CAH ที่ได้จากทั้งปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกมีคุณสมบัติเป็นตัวเกาะยึดให้มวลดินรวมตัวเข้าด้วยกัน [5-6] ภายหลังการผสมมวลดินมีคุณภาพที่ดีขึ้นจะรวมตัวก่อรูปทรงกระบอกในลักษณะเหมือนเสาเข็มขนาดใหญ่ที่มีความแข็งแรงสูง

การออกแบบก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีนี้ปัจจุบัน  
ยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานที่แน่ชัด อัตราส่วนน้ำต่อ  
ปูนซีเมนต์ที่ใช้ ระยะเวลาการก่อตัว อัตราส่วนความ  
ปลอดภัยของเสาเข็มดินในแต่ละสถานที่ก่อสร้างจำเป็น  
จะต้องใช้ข้อมูลดินเฉพาะที่มาจากแต่ละสถานที่ก่อสร้างมา  
ทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้อัตราส่วนผสม  
และกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ต้องการ  
โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้มีค่า  
เกินกว่า 10 เมตร ดังนั้นการศึกษานี้นำเสนอตัวอย่างกรณี  
วิธีการวิเคราะห์และออกแบบความแข็งแรงของเสาเข็มดิน  
ซีเมนต์ในงานก่อสร้างระบบกำแพงกันดินของอาคารจอด  
รถอิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี (รูปที่ 1 และ 2) ซึ่งความ  
ลึกสูงสุดของเสาเข็มดินซีเมนต์อยู่ในช่วง 13 ถึง 17 เมตร  
การศึกษาเริ่มจากการเจาะสำรวจดิน และเก็บตัวอย่างดิน

ทุกๆ ความลึก 1 เมตร โดยเริ่มที่ความลึก 2 เมตร จนถึงความลึก 15 เมตร จากนั้นทำการหาลำกล้องการรับน้ำหนักบรรทุกของเสาเข็มดินโดยการทดสอบดินผสมซีเมนต์ในห้องปฏิบัติการเพื่อหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างหน่วยแรงอัดแนวแกน ระยะการก่อตัว และปริมาณของซีเมนต์ที่ใช้ผสมดิน แล้วจึงนำที่ได้จากการทดสอบมาวิเคราะห์เสถียรภาพของกำแพงกันดินเมื่อรับแรงดันดินด้านข้าง และหาขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เหมาะสม



รูปที่ 1 แผนผังบริเวณก่อสร้าง และแนวเสาเข็มดินซีเมนต์  
อาคารจอดรถอิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี



รูปที่ 2 รูปตัดตามขวางของเสาเข็มดินซีเมนต์ อาคารจอดรถอิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี

## 2. สมบัติและการทดสอบทางวิศวกรรมของวัสดุผสม ดิน-ซีเมนต์

ปัจจัยในการผสมดิน-ซีเมนต์ที่มีผลต่อกำลังของดิน แบ่งออกเป็นหมวดใหญ่ 2 หมวด คือ 1 คุณสมบัติของวัสดุผสม ได้แก่ ชนิดและคุณภาพของวัสดุผสม น้ำและสารผสมเพิ่ม

2 คุณสมบัติและสภาพของดินที่จะผสม ได้แก่ คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของดิน ปริมาณอินทรีย์สาร ความเป็นกรด ด่าง ปริมาณน้ำในดินตลอดจนกำลังรับแรงเฉือนของดิน 3 การผสมดินกับวัสดุผสม ได้แก่ อัตราการผสม อัตราการกดหรือถอนใบพัดขณะผสมดิน ระยะเวลาในการผสมหรือความเร็วรอบการหมุนของใบพัดในการผสมหรือความเร็วรอบการหมุนของใบพัด และ 4.สภาพการบ่มของดินซีเมนต์ ได้แก่ อุณหภูมิที่บ่ม ระยะเวลาในการบ่ม ความชื้นในดิน

การศึกษาที่ผ่านมาพบว่าการใช้ปริมาณของปูนซีเมนต์ร้อยละ 10–15 ของน้ำหนักดินจะทำให้กำลังเสาเข็มดินซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 50 – 60 เซนติเมตรดีที่สุด โดยปูนซีเมนต์ที่ใช้ผสมจะต้องมีไม่น้อยกว่า 150 กิโลกรัมต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตรสำหรับการผสมแห้ง และไม่น้อยกว่า 175 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรสำหรับการผสมเปียก เพื่อให้ได้กำลังของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่เท่ากัน นอกจากนี้ การกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ (w/c) ยังมีผลต่อกำลังรับแรงอัดแนวแกนและความหนาแน่นของเสาเข็มดิน โดยพบว่าการผสมแบบแห้งที่มี w/c=0 มีแนวโน้มให้กำลังสูงสุด ส่วนการผสมแบบแรงดันสูง (Jet Grouting) ค่ากำลังอัดและการก่อตัวของเสาเข็มดินจะดีที่สุดเมื่อค่า w/c=1 ซึ่งก่อนการใช้จะต้องทำการทดสอบหาค่าระยะการก่อและการแข็งตัวของปูนซีเมนต์ ทั้งนี้เพื่อให้ทราบถึงสมบัติของเสาเข็มดินรวมถึงอัตราส่วนความปลอดภัยก่อนนำไปใช้งาน โดยปกติระยะเวลาก่อตัวของปูนซีเมนต์ จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะคือ การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) คือ เวลานั้นจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มรับน้ำหนักของเข็มมาตรฐานไวแคตได้โดยเข็มไม่จมลงในซีเมนต์เพสต์เกิน 25 มิลลิเมตร ในเวลา 30 วินาที และการก่อตัวระยะปลาย (Final Setting Time) คือเวลาจากเริ่มผสมปูนซีเมนต์กับน้ำจนกระทั่งซีเมนต์เพสต์เริ่มรับน้ำหนักได้บ้าง [7-8]

กรณีการออกแบบวิเคราะห์ความแข็งแรงของเสาเข็มดินซีเมนต์ในงานเสริมความแข็งแรงของระบบกำแพงกันดินของอาคารจอดรถอิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี นี้จะได้คำนึงปริมาณซีเมนต์ รวมถึงระยะเวลาการก่อตัวที่มีผลต่อ

ความสามารถในการรับน้ำหนักบรรทุกทุกของเสาเข็มดินเป็นหลัก วิธีการ แนวทางในการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรมของวัสดุผสมดินซีเมนต์ ของการศึกษาที่ผ่านมาจะได้ใช้เป็นคำแนะนำตั้งต้นเพื่อกำหนดค่าและออกแบบของเสาเข็มดินซีเมนต์ต่อไป

### 3 การเจาะดินและเก็บตัวอย่างดิน

การเจาะเก็บตัวอย่างดิน บริเวณพื้นที่อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี อำเภอปากเกร็ด จังหวัดนนทบุรี ทำโดยใช้ส่วนเจาะจากหลุมเจาะจำนวน 1 หลุม โดยทำการเก็บตัวอย่างดินทุกๆ 1 เมตร ตลอดความลึกยาว 15 เมตร โดยเริ่มการเก็บตัวอย่างดินตั้งแต่ที่ระดับความลึก 2 เมตร เป็นต้นไป จำนวนทั้งหมด 14 ตัวอย่าง ตัวอย่างละประมาณ 30 กิโลกรัม ตัวอย่างดินที่เก็บมามีลักษณะเป็นดินที่เปลี่ยนสภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3

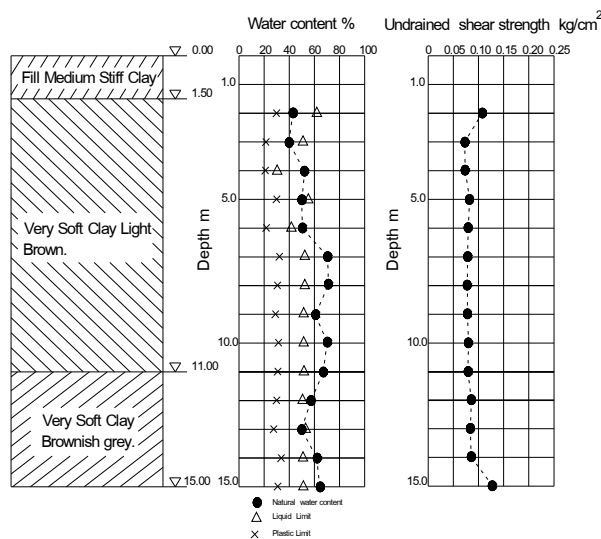


รูปที่ 3 การเจาะและเก็บตัวอย่างดิน ณ สถานที่ก่อสร้าง

### 4 การทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการ

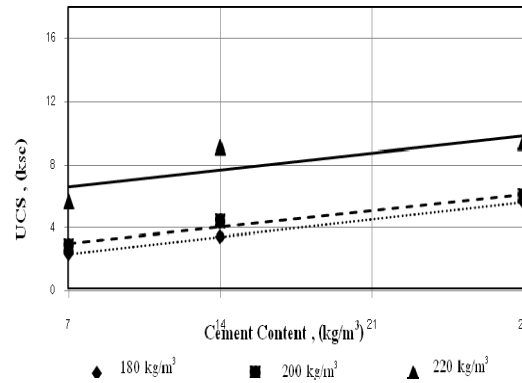
การทดสอบตัวอย่างดินในห้องปฏิบัติการเป็นไปตามมาตรฐาน ASTM [9-11] ประกอบด้วย การทดสอบหาปริมาณน้ำในมวลดิน ความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ชีดจำกัดความเหลว (Liquid Limit , L.L.) ชีดจำกัดพลาสติก (Plastic Limit , P.L.) และการทดสอบรับแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัด (Unconfined Compression Test ,  $q_u$ ) เมื่อนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบหาปริมาณน้ำในมวลดิน L.L. P.L. และ  $s_u$  ตามค่าความลึกต่างๆ ผลการทดสอบเป็น

ดังแสดงในรูปที่ 4 จากการพิจารณาผลในรูปที่ 4 นี้เอง แสดงให้เห็นว่าชั้นดินบริเวณที่ทำการก่อสร้างประกอบด้วย ชั้นดิน 2 ชั้น คือความลึกที่ 2 ถึง 11 เมตร ดินมีปริมาณ ความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 58.72 เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมาก สี น้ำตาลอ่อน (Very Soft Clay Light Brown) และที่ความ ลึก 11 ถึง 15 เมตร ดินมีปริมาณความชื้นเฉลี่ยร้อยละ 56.04 เป็นชั้นดินเหนียวอ่อนมาก สีเทาปนน้ำตาล (Very Soft Clay Brownish Grey) และสภาพของดินเป็นของเหลว

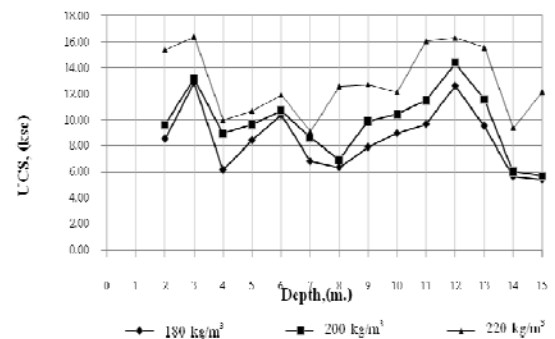


รูปที่ 4 ปริมาณความชื้นและค่ากำลังรับแรงเฉือนในดิน บริเวณพื้นที่อาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี

เมื่อนำตัวอย่างดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ 180 200 และ 220 กิโลกรัมต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร ที่อัตราส่วนการผสมน้ำ ต่อปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (w/c) เท่ากับ 1 ที่ ความลึกต่างๆ และทำการทดสอบค่ากำลังอัดแบบไม่ถูก จำกัด (Unconfined Compression Test, UCS) ที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน ผลการทดสอบเป็นดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6

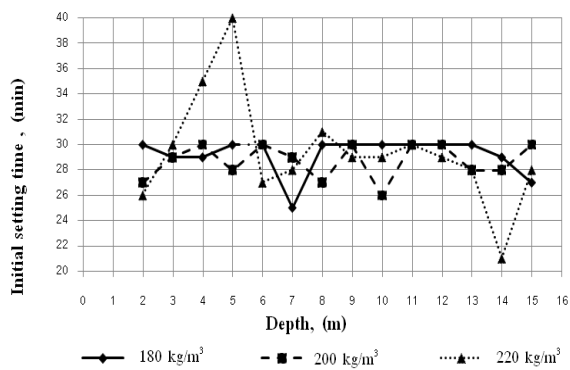


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดแบบไม่ถูกจำกัด กับ อายุการบ่มของดินตัวอย่างลึก 15 เมตร



รูปที่ 6 ค่าการทดสอบแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดเมื่อผสมปูนซีเมนต์ ณ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่างๆที่อายุการบ่ม 28 วัน

เมื่อนำตัวอย่างดินมาผสมกับปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในสัดส่วนปริมาณปูนซีเมนต์ 180 200 และ 220 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อัตราส่วนการผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1 ต่อ 1 ที่ความลึกต่างๆ และทำการทดสอบค่า การก่อตัวระยะต้น (Initial Setting Time) ผลการทดสอบ ในรูปที่ 7 พบว่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น (Initial Setting Time) ของดินซีเมนต์ ที่ได้จากการวัดการจมตัวของเข็มไว แคตในแต่ละส่วนผสมมีค่าต่ำที่สุดที่ 25 26 และ 21 นาที ตามลำดับโดยมีค่าเฉลี่ยสะสมอยู่ที่ 30 นาที ซึ่งค่าการก่อตัว ที่ใกล้เคียงและไม่แตกต่างกันมากนักก็เป็นเพราะการใช้ อัตราส่วนการผสมน้ำต่อปูนซีเมนต์ 1 ต่อ 1 นั้นเอง



รูปที่ 7 ค่าระยะเวลาการก่อตัวเริ่มต้น ณ อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ต่างๆ

## 5 การวิเคราะห์ขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน

ผลการทดสอบสมบัติดินในห้องปฏิบัติการถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ระบบกำแพงกันดิน การคำนวณใช้แบบจำลองพิจารณากรณีเป็นเสาเข็มปลายยื่นเมื่อตอกในชั้นดินเหนียว (Cantilever sheet piling penetration clay) รับน้ำหนักบรรทุกทุกตามข้อกำหนดออกแบบ การคำนวณใช้สมการของแรง 3 สมการ คือ ผลรวมแรงในแนวดิ่ง ( $\Sigma V$ ), ผลรวมแรงในแนวราบ ( $\Sigma H$ ) และผลรวมของโมเมนต์ ( $\Sigma M$ ) มีค่าเท่ากับศูนย์ ( $\Sigma V = \Sigma H = \Sigma M = 0$ ) [12-13]

เนื่องจากลักษณะของชั้นดินที่ดันกำแพงกันดินข้างแบ่งได้ออกเป็น 2 ชั้น คือชั้นที่ 1 หนา 11 เมตร มีค่าหน่วยน้ำหนักของดินขึ้น (Wet unit weight,  $\gamma_m$ ) 2.48 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion,  $c$ ) 0.078 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ดินชั้นที่ 2 หนา 4 เมตร มีค่าหน่วยน้ำหนักของดินขึ้น (Wet unit weight,  $\gamma_m$ ) 2.66 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร และ ค่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดิน (Cohesion,  $c$ ) 0.098 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร การวิเคราะห์เสถียรภาพเสาเข็มดินซีเมนต์เมื่อกำหนดให้ระยะความลึกการขุดเปิดหน้าดินสูงสุด 5.5 เมตร จะได้ความยาวเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ใช้เท่ากับ 14.5 เมตร โดยขนาดเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ออกแบบให้สามารถเลือกใช้ได้มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 60 80 และ 100 เซนติเมตร ตามลำดับ

กรณีใช้ขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร ค่าหน่วยแรงอัดแนวแกนที่เกิดขึ้นในเสาเข็มเท่ากับ 2.099 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทุกค่าความลึก มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ต่ำสุดเท่ากับ 5.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ามากกว่า 2.099 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 2.59

สำหรับขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เส้นผ่านศูนย์กลาง 80 เซนติเมตร จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม 1.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทุกค่าความลึก มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ต่ำสุดเท่ากับ 5.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ามากกว่า 1.18 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 4.60

สำหรับขนาดของเสาเข็มดินซีเมนต์เส้นผ่านศูนย์กลาง 100 เซนติเมตร จะได้ค่าหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นในเสาเข็ม 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการทดสอบในห้องปฏิบัติการจะใช้สัดส่วนผสมปูนซีเมนต์ที่ 180 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ทุกค่าความลึก มีค่าแรงอัดแบบไม่ถูกจำกัดที่ต่ำสุดเท่ากับ 5.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อายุการบ่ม 28 วัน มีค่ามากกว่า 0.75 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และมีอัตราส่วนความปลอดภัยเท่ากับ 7.20

## 6. สรุป

การออกแบบก่อสร้างเสาเข็มดินซีเมนต์ด้วยวิธีนี้ปัจจุบันยังไม่มีข้อกำหนดมาตรฐานที่แน่ชัด อัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ที่ใช้ ระยะเวลาการก่อตัว อัตราส่วนความปลอดภัยของเสาเข็มดินในแต่ละสถานที่ก่อสร้างจำเป็นต้องใช้ข้อมูลดินเฉพาะที่มาจากแต่ละสถานที่ก่อสร้างมาทำการทดสอบในห้องปฏิบัติการเพื่อให้ได้อัตราส่วนผสมและกำลังรับแรงอัดของเสาเข็มดินซีเมนต์ที่ต้องการ

การศึกษาได้แสดงขั้นตอนรวมถึงวิธีการวิเคราะห์และการออกแบบดังกล่าวเพื่อหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็มดินบริเวณการก่อสร้างกำแพงกันดินอาคารจอดรถ อิมแพ็ค อารีน่า เมืองทองธานี ที่สามารถต้านทานต่อแรงดันดินด้านข้างได้ปลอดภัย ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าเสาเข็มดินซีเมนต์ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 เซนติเมตร สามารถก่อสร้างที่อัตราส่วนผสมปูนซีเมนต์ 180 กิโลกรัมต่อดิน 1 ลูกบาศก์เมตร บ่มเป็นระยะเวลา 30 นาที และจะมีค่าหน่วยแรงอัดที่สามารถรับได้เท่ากับ 5.43 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเมื่อเทียบกับหน่วยแรงอัดที่เกิดขึ้นจริงเท่ากับ 2.099 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อัตราส่วนความปลอดภัย เท่ากับ 2.59

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้เขียนขอขอบพระคุณ บริษัท ซีพีแอนด์ จำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเจาะสำรวจดินและเก็บตัวอย่างดิน ขอขอบคุณ นายฐิตวัฒน์ กระจ่างสุวรรณ นายบุญทวี เชื้ออ่อน นางสาวสุภาภรณ์ ถึงนา และนางสาวอรวิสา กอบเกียรติกุล รวมทั้งมหาวิทยาลัยมหิดลที่ได้เข้าร่วมเก็บข้อมูลภาคสนามและสนับสนุนการศึกษาในครั้งนี้

#### เอกสารอ้างอิง

- [1] วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรมราชูปถัมภ์ (2549). ข้อมูลสภาพดินบริเวณลุ่มแม่น้ำเจ้าพระยาตอนล่าง . กรุงเทพมหานคร
- [2] Liver Norman L et al (1954). "Development and Applications of Intrusion Grout Mixed-in-Place Piles", Civil Engineering, March 1954, 56-57
- [3] Ground Improvement Technical Summaries (1998). Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation, Working Draft, No. FHWA-SA-98-086, Vol. II., in press.
- [4] Bergado, D.T., Ahmed, S., Sompaco, C.L. and Balasubramaniam, A.S. (1990). "Settlement of Bangna Bangkok Highway on Soft Bangkok clay", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 1, 136

155.

- [5] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (1993) Concrete Structure, Properties, and Materials, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.
- [6] Joel Manasseh and Agbede I. Olufemi (2008), Effect of Lime on some geotechnical properties of Igumale Shale, EJGE, Volume 13, Bundle A.
- [7] Lin, K.Q. and Wong, I.H. (1999). "Use of deep cement mixing to reduce settlements at bridge approaches", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 125, No. 4, 309-320.
- [8] Nicholson, P.J., Mitchell, J.K., Bahner, E.W. and Moriwaki, Y. (1998). "Design of composite gravity wall constructed by soil mixing", Soil Improvement for Big Digs, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 81, Boston, MA, October, 27-40.
- [9] American Society for Testing and Materials (ASTM) Standard.
- [10] Lamb, T.W. (1967) Soil Testing for Engineers, John Wiley & Sons, Inc., New York
- [11] มณฑิร กังคิเทียม.(2538).วิศวกรรมฐานราก.(พิมพ์ครั้งที่ 6).กรุงเทพมหานคร:สมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์
- [12] ปิยะ รัตนสุวรรณ.(2552).วิศวกรรมฐานราก.(พิมพ์ครั้งที่ 1).กรุงเทพมหานคร:ภาควิชาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
- [13] เกษม เพชรเกตุ. (2549).การวิเคราะห์และออกแบบเสาเข็มดินซีเมนต์.กรุงเทพมหานคร: ศูนย์วิจัยและพัฒนาวิศวกรรมปฐพีและฐานราก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์