

ความดันด้านข้างวินท์ติของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในดินเหนี่ยว

Lateral Failure Pressure of Contiguous Pile Wall in Cohesive Soils

สุรภพ แก้วสวัสดิ์วงศ์^{1)*} และ บุญชัย อุกฤษชาน²⁾

Suraparb Keawsawasvong^{1)*} and Boonchai Ukritchon²⁾

¹⁾นิสิตปริญญาโทและผู้ช่วยสอนประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

²⁾รองศาสตราจารย์ อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

* Corresponding author : suraparb@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ความดันด้านข้างวินท์ติของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องในดินเหนี่ยว วิธีไฟไนต์อิเลิเมนต์แบบระนาบความเครียด 2 มิติถูกนำมาใช้วิเคราะห์ความดันวินท์ติของปืนหานี้ กำแพงเสาเข็มนี้มีระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (S) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (D) สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์อิเลิเมนต์ ดินเหนี่ยวถูกจำลองเป็นอิเลิเมนต์แบบของแข็งที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบมอร์-คูลอมบ์ในสภาพไม่ระบายน้ำ กำแพงถูกจำลองเป็นอิเลิเมนต์แบบของแข็งที่มีคุณสมบัติของวัสดุแบบอิลาสติก ซึ่งส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นรอบวงของกำแพงเสาเข็ม แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับคุณรากที่มายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ ผลที่ได้นำเสนอในรูปของตัวแปร p/s_u ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มกับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D) และแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α)

คำสำคัญ : ระบบวินท์ติ แรงดันด้านข้าง ระยะห่างเสาเข็ม ค่าอิเลิเมนต์ กำแพงเสาเข็ม

Abstract

This paper presents lateral failure pressure of contiguous pile walls in cohesive soils. The two dimensional plane strain finite element is employed to determine stability of this problem. The contiguous pile wall have pile gap (S) and the diameter (D). For finite element analyses, the clay is modelled as solid element with the Mohr-Coulomb material in an undrained condition. The piled wall is modelled as solid element with elastic material. Soil-structure interface are used around circumference of piled walls. Adhesion factor between clay and pile (α) was also studied in the range of 0 - 1 with increment of 0.2. Adhesion factor of zero means fully smooth surface and that of unity 1 means fully rough surface. The results of analyses are presented in terms of ratio of lateral failure pressure to undrained shear strength (p/s_u) as a function of gap ratio (S/D) and adhesion factor (α).

Keywords : Numerical analysis, Plane strain, Finite element, Pile walls

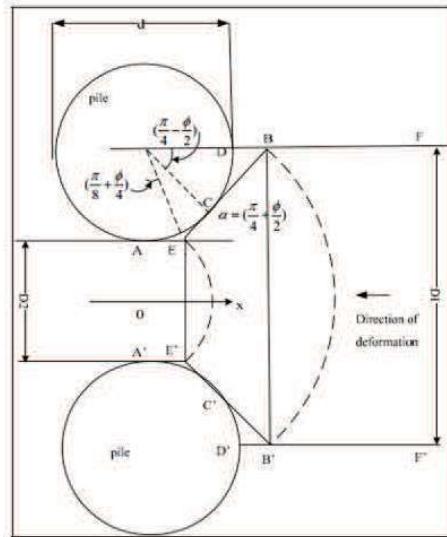
1. บทนำ

กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง (Contiguous Pile Wall) เป็นกำแพงกันดินรูปแบบหนึ่ง ที่มีเสาเข็มขนาดเท่ากันเรียงต่อเนื่องกันไปทีละตัน โดยระยะห่างระหว่างแต่ละตันมีขนาดเท่ากัน กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องเป็นระบบกำแพงที่นิยมในการก่อสร้างในปัจจุบัน โดยเฉพาะงานการสร้างห้องใต้ดินลึก

การก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องสามารถประยัดปริมาณวัสดุที่ต้องใช้ในงานก่อสร้างได้มากกว่าการสร้างกำแพงคอนกรีตหล่อในที่ (Diaphragm Wall) นอกเหนือจากนี้ยังมีความแข็งแรงมากกว่าและมีการแอลอนด้านข้างกว่ากำแพงเสาเข็มพีดเหล็ก (Sheet Pile Wall)

ตัวแปรที่สำคัญสำหรับการออกแบบกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องคือระยะห่างเสาเข็ม (S) ซึ่งทำให้เกิดพฤติกรรมแนวโค้งรับแรง (Arching Effect) ขึ้นที่ระยะห่างระหว่างเสาเข็ม หากกำลังด้านท่านของแนวโค้งสูงกว่าความดันดิน ก็จะช่วยให้ดินเหนียวที่อยู่เหนือน้ำโลกไม่พังทลายออก มาโดยเสาเข็มและดินต้องอยู่ในสภาวะสมดุล เสาเข็มเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) และไม่เกิดการเคลื่อนตัวใดๆ ดังนั้น การศึกษาอัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มกับเส้นผ่าศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D) จึงมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อการคำนวณความดันด้านข้างวิบติ นอกจากนี้ แฟกเตอร์การขีดเคาะ (α) ก็เป็นหนึ่งตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อความดันด้านข้างวิบติ เช่นกัน เพราะเป็นตัวแปรที่บวกกับค่าสัมพัทธิระหว่างเสาเข็ม และดินเหนียว หากผิวสัมผัสมีความเสียดทานมาก ความดันวิบติก็จะมาก ในทางกลับกัน หากผิวสัมผัสมีความเสียดทานเล็ก ความดันวิบติก็จะเป็นค่าน้อยที่สุด

งานวิจัยและหนังสือจำนวนมากที่ศึกษาและอธิบายถึงการก่อสร้างกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง เช่น หนังสือการออกแบบเสาเข็มหล่อต่อเนื่อง (Contiguous Bored Piles) ของ North (1975) [1] หนังสืองานบุคลิก (Deep Excavation) ของ Ou (2006) [2] หนังสือวิศวกรรมฐานราก (Foundation Analysis and Design) ของ Bowles (2001) [3] รวมไปถึงงานวิจัยต่างๆ ที่กล่าวถึงประสานการณ์การก่อสร้างในไทย เช่น งานของจรัปปภา (1993, 1996) [4, 5] ได้บันทึกการใช้กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องสำหรับกันดินที่ขุดลึก 15.5 เมตร ที่ถนนจันทร์ เขตayanนาวา จังหวัดกรุงเทพมหานคร อุนลเดช (2007) [6] ได้บันทึกเกี่ยวกับการก่อสร้างໂโครงสร้าง



รูปที่ 1 สมมุติฐานการวิบติของ Ito และ Matsui [8]

อาคารสมดุจพระเทพรัตน์ โรงพยาบาลรามาธิบดี โดยใช้กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องสำหรับกันดินที่ขุดลึก 8.1 เมตร ในการก่อสร้างมีการใช้ระยะห่างระหว่างเสาเข็มเท่ากับ 1.1 เมตร และมีปลายเสาเข็มอยู่ที่ความลึก 20 เมตร

Gaba และ Simpson (2003) [7] ได้เสนอขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มที่เหมาะสม รวมไปถึงระยะห่างระหว่างเสาเข็มของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

Ito และ Matsui (1975) [8] ได้ตั้งสมมุติฐานสำหรับการวิเคราะห์ความดันด้านข้างที่กระทำต่อแนวเสาเข็มในระบบความเครียด 2 มิติ (2D Plane Stain) โดยสมมุติพื้นผิวเคลื่อนตัว (Sliding Surface) ว่า เสาเข็มจะเคลื่อนตัวในแนว AEB และ A'E'B' ดังที่แสดงในรูปที่ 1 ลักษณะการวิบติของดินเป็นแบบพลาสติกซึ่งเป็นไปตามกฎภีการวิบติของมอร์-คูลอมบ์ คินมีทั้งกำลังรับแรงเฉือน (c) และมุมเสียดทานภายใน (ϕ) แต่ผลเฉลยที่ได้เป็นแค่การประมาณจากกฎภีสมดุลลิมิต (Limit Equilibrium Method) เท่านั้น

Atkinson et al. (1975) [9] ได้ทำการทดลองเกี่ยวกับพฤติกรรมการเกิดแนวโค้งรับแรงของอุ่นคงคืนระบบความเครียด โดยมีผลการทดลองคือ ระบบวิบติกิจจากพฤติกรรมแนวโค้ง ระบบวิบติจะเปลี่ยนไปตามการเคลื่อนตัวของแบบจำลองก่อนที่จะวิบติ และหลังจากที่แบบจำลองวิบติ ระบบการวิบติมีความแตกต่างกันไปตามความลึก

ของอุโมงค์ต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของอุโมงค์

จากสมมุติฐานของ Ito และ Matsui และการทดลองของ Atkinson นี้ เป็นการบุกเบิกการศึกษาเกี่ยวกับพฤติกรรมแนวโถกงับแรง ต่อมามีการศึกษาและอธิบายเกี่ยวกับ พฤติกรรมแนวโถกงับแรงมากขึ้น เช่นงานวิจัยของ Einstein et al. (1980) [10], Evans (1983) [11] และ Bastien et al. (2007) [12] แต่ทั้งสามงานวิจัยไม่ได้เสนอผลทดลองของ กำแพงสาเข็มเรียงต่อเนื่อง

จิรปภา (1993, 1996) [4, 5] ได้เสนอสมการสำหรับ การคำนวณหาความดันดินด้านข้าง ซึ่งเป็นฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างเสาเข็ม (S) และเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (D) ตามสมการที่ (1)

$$\frac{P}{s_u} = \sqrt{\frac{D}{2}} \left(\frac{D+S}{S} \right)^{-1.2946} \quad (1)$$

โดย P คือความดันด้านข้างวิบติ

s คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียว

D คือเส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม

S คือระยะห่างช่องว่าง (Gap) ระหว่างเสาเข็ม

สัจวนพานกุล (2004) [13] ได้จำลองกำแพงสาเข็มด้วยวิธีไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์ บนระนาบความเครียด 2 มิติ (2D Plane Stain) ด้วยโปรแกรม STRAND 6 Release 6.16 และได้สร้างสมการผลเฉลยที่เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความดันด้านข้างวิบติและอัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มกับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D) ตามสมการที่ (2)

$$\frac{P}{s_u} = 14.757 e^{-1.2946 \frac{S}{D}} \quad (2)$$

หมายเหตุนี้ (2010) [14, 15] ได้ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับความดันด้านข้างวิบติของกำแพงสาเข็มเรียงต่อเนื่อง โดยได้จำลองเสาเข็มในเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าอัตราส่วนความดันด้านข้างวิบติกับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (p/s) ที่ S/D ต่างๆ nokohnie จากนี้บังได้ใช้วิธีไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์หาผลเฉลยเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับการทดลองอีกด้วย สมการผลเฉลยของหมายเหตุนี้ (2010) ได้ศึกษาเพิ่มเติมตามคุณลักษณะ (Limit Equilibrium Method) ที่

$$\frac{P}{s_u} = \frac{S + D + \frac{\alpha D \pi}{2\sqrt{2}}}{S} \quad (3)$$

โดย α คือค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาร์ช (Adhesion Factor) อย่างไรก็ตาม ผลทดลองจากวิธีไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์ของหมายเหตุนี้ ไม่ถูกต้องนัก เพราะการแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อย (Mesh) ของแผนกใช้แบบหยาบ (Very Coarse) ซึ่งการวิเคราะห์ปัญหาทางไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์ใช้การแบ่งโครงข่ายแบบจำกัดให้มีความละเอียดสูง (Very Fine) เพื่อให้ผลทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าถูกต้อง (Exact Solution) นอกจากนี้ ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) ที่หมายได้ใช้วิเคราะห์ให้เทียบค่าเดียวคือ 0.9 ซึ่งไม่มีการศึกษาอิทธิพลของแฟกเตอร์การยึดเกาะกับความดันดินวิบติระหว่างดินกับสาเข็ม อนึ่ง สมการที่ (3) จะเห็นได้ว่าอิทธิพลของแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินกับสาเข็มเป็นฟังก์ชันเส้นตรงกับความดันด้านข้างวิบติเท่านั้น ซึ่งอาจยังไม่ถูกต้องนักและควรจะมีการศึกษาต่อไป

งานวิจัยนี้นำเสนอในรูปของตัวแปร ไร้มิติระหว่างอัตราส่วนความดันด้านข้างวิบติต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (p/s) ซึ่งเป็นฟังก์ชันของอัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มกับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D) และแฟกเตอร์การยึดเกาะ (α) ระหว่างดินและเสาเข็มมีค่าถึงแต่ 0 ถึง 1 เมื่อแฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับศูนย์หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่งหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ เพื่อหาผลเฉลยความดันวิบติของกำแพงสาเข็มเรียงต่อเนื่องในดินเหนียวเพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการวิเคราะห์ ออกแบบ และปรับปรุงการออกแบบระบบกำแพงกันดินให้มีความประทัดและเหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. วิธีการวิเคราะห์

งานวิจัยนี้ใช้โปรแกรมไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์ Plaxis 2D โดย Brinkgreve et al. (2002, 2007) [16, 17] ในการจำลองและวิเคราะห์หาผลเฉลยของปัญหา

2.1 แบบจำลองของดินเหนียว

การวิเคราะห์ไฟฟ้าในต่ออิเล็กทรอนิกส์จำลองให้ดินเหนียวเป็น

อลิเมนต์แบบปริมาตรที่เป็นการวินทีแบบมอร์-คูลอมบ์ อัตราส่วนโมดูลัสของยังต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่รับนัยน์ (E/s_u) = 500 กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่รับนัยน์ (s_u) มุมเสียดทานภายใน (ϕ) = 0 มนุษยาตัวชี้งปริมาตร (Ψ) = 0 อัตราส่วนของปื้วของ (v) = 0.495 ซึ่งเป็นคุณสมบัติทางกลศาสตร์ของดินหนี่ยวแบบไม่รับนัยน์หรือไม่มีการเปลี่ยนแปลงชิงปริมาตร

2.2 แบบจำลองของเสาเข็ม

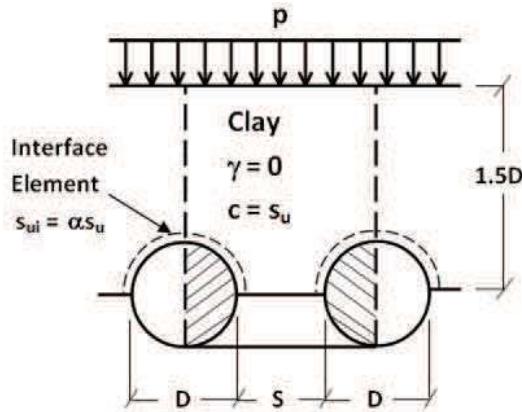
เสาเข็มจำลองเป็นอลิเมนต์แบบปริมาตร มีค่าอัตราส่วนของปื้วของ (v) = 0.21 โดยคูลัสของยัง (E) = 2.545×10^7 kPa เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็ม (D) ดังแสดงในรูปที่ 2 เสาเข็มเป็นแบบแข็งเกร็ง (Rigid) และไม่เกิดการเคลื่อนตัวใดๆ

2.3 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างเสาเข็มและดินหนี่ยว

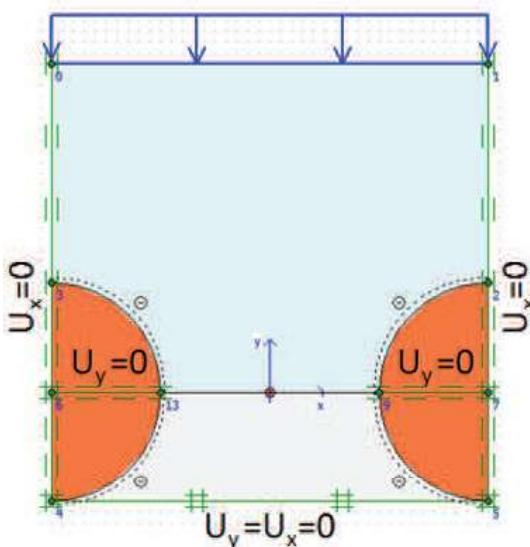
ชิ้นส่วนเชื่อมต่อระหว่างดินและโครงสร้างถูกใช้ตลอดความยาวระหว่างผิวสัมผัสของเส้นรอบวงของเสาเข็ม ค่าแฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) มีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเพิ่มขึ้นทีละ 0.2 แฟกเตอร์การยึดเกาะมีค่าเท่ากับสูญเสียหมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่นสมบูรณ์ (Smooth Surface) ในทางตรงกันข้าม แฟกเตอร์การยึดเกาะเท่ากับหนึ่ง หมายถึงกรณีที่พื้นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบสมบูรณ์ (Rough Surface) แฟกเตอร์การยึดเกาะมีนิยามคือ $\alpha = s_u / s_u$ โดย s_u คือกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่รับนัยน์ที่ผิวสัมผัสระหว่างดินและเสาเข็ม

2.4 เนื่องจากการเคลื่อนตัวและหน่วยแรงที่ขอบเขต

ขอบล่างของแบบจำลองไม่มีการเคลื่อนตัวที่ทึบแนวน และแนวตั้งเพื่อไม่ให้เกิดการเคลื่อนตัวของเสาเข็ม ขอบซ้าย และขอบขวาไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวราบ ขอบบนมีความดันกดทับ (Surcharge, p) ซึ่งมาจากการดันดินด้านข้าง แบบจำลองเสาเข็มถูกนำมาใช้เพียงครั้งเดียวของแต่ละตัวเนื่องจากเป็นระบบสมมาตร (Symmetry) ของเสาเข็ม ที่เสาเข็มเรียงห่างกันเป็นระยะเท่ากัน เส้นผ่านศูนย์กลางของเสาเข็มในระบบที่สัมผัสกับขอบของดินถูกกำหนดให้ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวตั้ง แบบจำลองมีระยะห่างระหว่างเสาเข็มทั้งสองตัวเท่ากับ S แบบจำลองทั้งหมดเป็นแบบสมมาตรในระบบความเครียดสองมิติของปัญหาแบบจำลองเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง โดยรายละเอียดทั้งหมดอยู่ในรูป



รูปที่ 2 ปัญหาแบบจำลองเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง



รูปที่ 3 แบบจำลองแบบจำลองเสาเข็มเรียงต่อเนื่องด้วยโปรแกรม

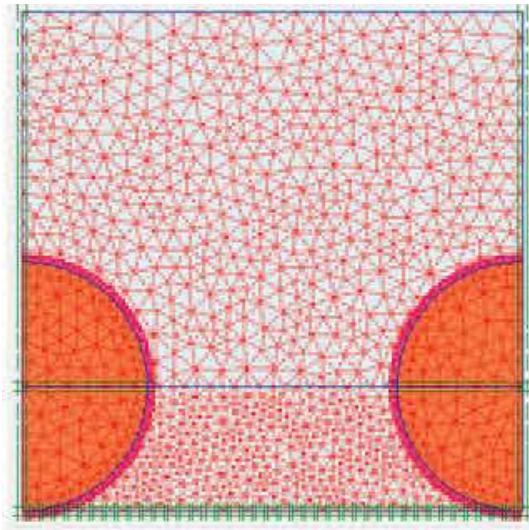
Plaxis

ที่ 2 และ 3

2.5 โครงข่ายไฟฟ้าในตัวอลิเมนต์

แบบจำลองเป็นแบบรับนัยน์ความเครียด (Plane Strain) ชิ้นส่วนดินเป็นชิ้นส่วนรูปสามเหลี่ยมแบบมี 15 จุดต่อ (Node) และหน่วยแรงภายในชิ้นส่วน 12 จุด (Stress Points) การแบ่งโครงข่ายออกเป็นชิ้นส่วนย่อยใช้แบบละเอียดสูงสุด (Very Fine) ดังที่แสดงในรูปที่ 4

2.6 ตัวแปรที่ศักดิ์



รูปที่ 4 ตัวอย่างโครงข่ายไฟฟ์ในตัวอิเลมเนต์

ตัวแปรป้อนเข้าของการวิเคราะห์ไฟฟ์ในตัวอิเลมเนต์มีดังนี้

1. อัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มค่อสีนผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D) = 0.1, 0.15, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1, 1.2, 1.5, 2, 2.5 และ 3
2. แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างดินและเสาเข็ม (α) = 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1

ผลเฉลยแบบตัวแปรไฟฟ์มิติที่ได้จากวิชีไฟฟ์ในตัวอิเลมเนต์คือ อัตราส่วนความดันด้านข้างวับติดต่อกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่รับน้ำหนักของดินหนึ่ง (p/s_u)

3. ผลการวิเคราะห์

การตรวจสอบตัวแปรไฟฟ์มิติจากผลการวิเคราะห์ไฟฟ์ในตัวอิเลมเนต์ของปัญหาทำแรงเสานเข็มยาวต่อเนื่องมีความสำคัญเพื่อทำให้สามารถประมาณประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในทุกกรณีของสีนผ่านศูนย์กลาง ระยะห่างของกำแพง และแฟกเตอร์การยึดเกาะ

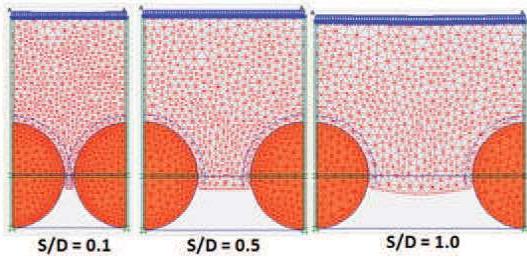
จากตารางที่ 1 คู่ของตัวอย่าง No. 1 และ No. 2 มีค่า S , D และ s_u ที่ต่างกัน แต่มีตัวแปรไฟฟ์มิติ S/D และ α ที่เท่ากัน ถึงแม้ว่าความดันวิบติมีค่าแตกต่างกัน แต่ผลเฉลย p/s_u มีค่าเท่ากัน คู่ตัวอย่าง No.3 และ No.4 รวมทั้งคู่ของตัวอย่าง No.5 และ No.6 ที่บ่งชี้ให้ว่า p/s_u มีค่าเท่ากันเมื่อ S/D และ α มีค่าไม่เปลี่ยนแปลง หากเปรียบเทียบคู่ตัวอย่างระหว่าง No. 1 และ No. 3 พบว่าตัวอย่างทั้งสองมีค่าของตัวแปร α ที่แตกต่างกันทำให้ผลเฉลย p/s_u มีค่าไม่เท่ากัน โดยผลเฉลยของ No. 1 มีค่ามากกว่า No. 3 ถึง 1.17 เท่า ในทำนองเดียวกัน หากเปรียบเทียบคู่ตัวอย่างระหว่าง No. 1 และ No. 5 พบว่า ตัวอย่างทั้งสองมีค่าของตัวแปร S/D ที่แตกต่างกันทำให้ผลเฉลย p/s_u มีค่าไม่เท่ากัน โดยผลเฉลยของ No. 1 มีค่าน้อยกว่า No. 5 ถึง 1.51 เท่า

จากการตรวจสอบตัวแปรไฟฟ์มิติในตารางที่ 1 สามารถสรุปได้ว่า ผลลัพธ์ตัวแปรไฟฟ์มิติเป็นฟังก์ชันของค่าป้อนเข้าแบบตัวแปรไฟฟ์มิติ คือ $p/s_u = f(S/D, \alpha)$ และตัวแปรไฟฟ์มิติ S/D และ α มีผลอย่างมากต่อ p/s_u

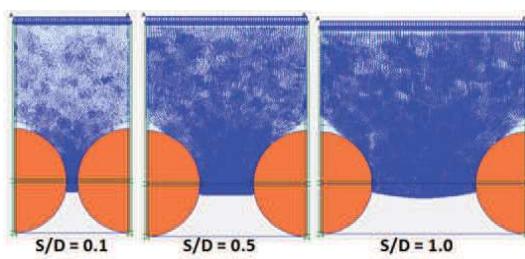
รูปที่ 5 - 8 แสดงตัวอย่างกลไกการวินาศัย (Failure Mechanism) ของกำแพงเสาเข็มยาวต่อเนื่องจากวิชีไฟฟ์ในตัวอิเลมเนต์ ผลการวินาศัยประกอบด้วย Deformed Mesh, Total

ตารางที่ 1 การตรวจสอบตัวแปรไฟฟ์มิติ

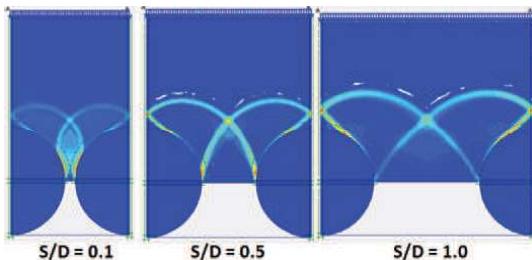
No	S (m)	D (m)	s_u (kPa)	p (-)	S/D (-)	α (-)	p/s_u
1	1	1	10	27.765	1	1	2.7765
2	0.8	0.8	20	55.532	1	1	2.7766
3	1	1	10	23.733	1	0.4	2.3733
4	0.8	0.8	20	47.463	1	0.4	2.3732
5	0.5	1	10	41.989	0.5	1	4.1989
6	0.25	0.5	10	41.986	0.5	1	4.1986



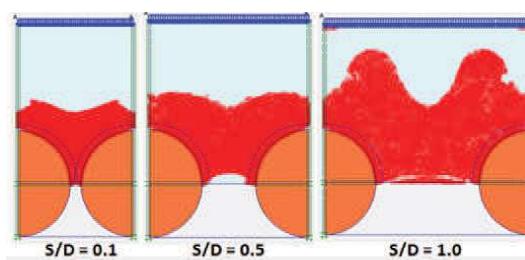
รูปที่ 5 Deformed Mesh ($\alpha = 1$)



รูปที่ 6 Total Increment Vector ($\alpha = 1$)



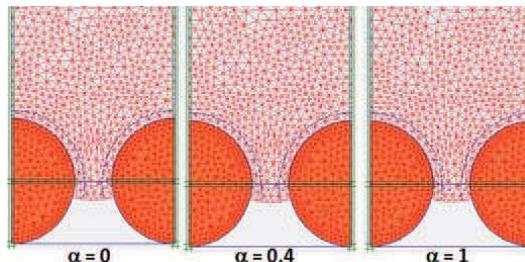
รูปที่ 7 Incremental Shear Strain Contour ($\alpha = 1$)



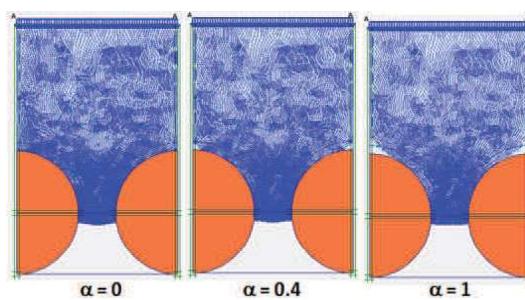
รูปที่ 8 Plastic Point ($\alpha = 1$)

Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่าง 3 กรณีคือ $S/D = 0.1, 0.5, 1$ โดยทั้ง 3 กรณีเป็นกรณีผิวสัมผัสแบบหยาบ (Rough Surface) ที่มี $\alpha = 1$ จากรูปพบว่าลักษณะการวินท์ติชของทั้ง 3 กรณีมีลักษณะคล้ายกัน อัลกิเมนต์ของคินที่อยู่ระหว่างเส้าเข็มถูกแรงผลักด้วยความดันด้านข้างของคินให้เคลื่อนตัวออกมาจากตำแหน่งกึ่งกลางเส้าเข็ม โดยอัลกิเมนต์ของคินส่วนที่อยู่บริเวณรอบเส้าเข็มจะเคลื่อนตัวผ่านผิวของเส้าเข็มในทิศทางที่สอดคล้องกัน ผลการวินท์ติชของ Incremental Shear Strain Contour มีลักษณะเป็นรอยคลื่นรูปสามเหลี่ยมที่ตรงกับกลาง โดยเริ่มจากขอบซ้ายสุดและขยายสุดของเส้าเข็มมาบรรจบกันที่ตำแหน่งตรงกลางของแนวจำลองมีความสูงใกล้เคียงกับขอบของเส้าเข็ม และจากจุดนี้ เส้นรอยเลื่อนจะขยายตัวออกไปเป็นลักษณะเดินส่วนโน้มของวงกลมไปแต่ที่ขอบซ้ายสุดและขวาสุดของแนวจำลอง เส้นส่วนโน้มของวงกลมนี้จะมีการขยายตัวสูงขึ้นเรื่อยๆตามค่า S/D ของแนวจำลอง สำหรับผลการวินท์ติชแบบ Plastic Point ของปัญหานี้ลักษณะการกระจายตัวคล้ายกับผลการวินท์ติชของ Incremental Shear Strain Contour และการกระจายมีมากขึ้นตามค่า S/D ด้วยเช่นกัน

รูปที่ 9 - 12 แสดงตัวอย่างการวินท์ติชของ Deformed

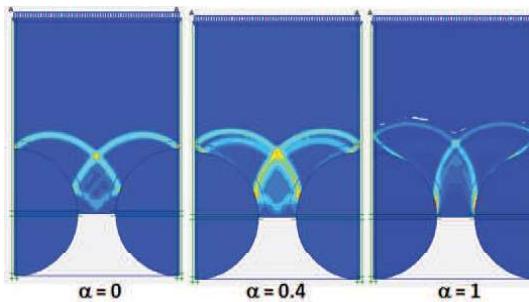


รูปที่ 9 Deformed Mesh ($S/D = 0.3$)

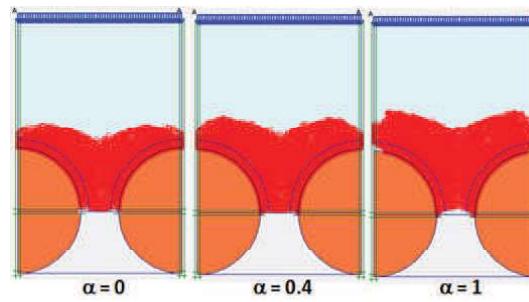


รูปที่ 10 Total increment Vector ($S/D = 0.3$)

Mesh, Total Increment Vector, Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point เปรียบเทียบระหว่าง 3 กรณีคือ $\alpha = 0, 0.4, 1$ ซึ่งสภาพที่ค่า $\alpha = 0$ คือกรณีที่เป็นผิวสัมผัสเป็นแบบลื่น (Smooth Surface) และ $\alpha = 1$ คือกรณีที่เป็นผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบ (Rough Surface) โดยทั้ง 3 กรณีเป็น



รูปที่ 11 Incremental Shear Strain Contour ($S/D = 0.3$)



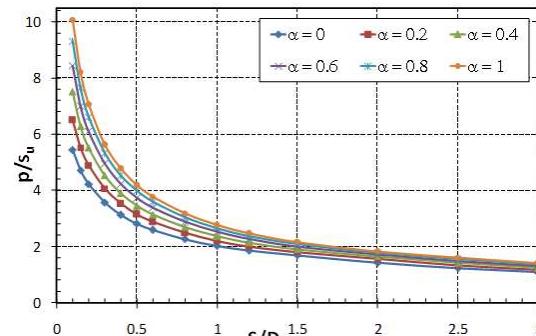
รูปที่ 12 Plastic Point ($S/D = 0.3$)

กำแพงเสาเข็มที่มี $S/D = 0.3$ จากรูปพบว่าลักษณะการวินิจฉัยของห้องทั้ง 3 กรณีมีลักษณะคล้ายกัน แตกต่างกันตรงที่ Incremental Shear Strain Contour เมื่อค่า α ของปั๊มahaสูงขึ้น ลักษณะเส้นส่วนโถ้งของวงกลมก็จะมีการขยายตัวสูงขึ้นตามค่า α ที่เพิ่มขึ้น

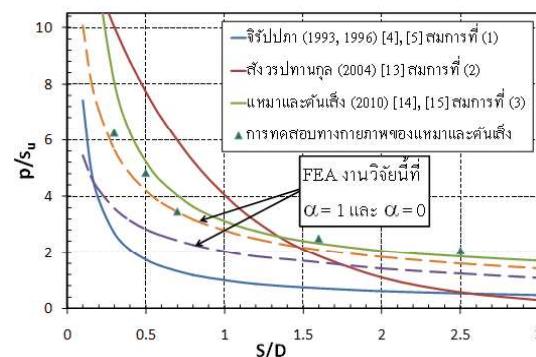
รูปที่ 13 แสดงแสดงความสัมพันธ์ของความดันด้านข้างวินิจฉัย p/s_u เปรียบเทียบกับอัตราส่วน S/D ตั้งแต่ 0.1 ถึง 3 โดยกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 13 แสดงการเพิ่มขึ้นของค่า α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยเส้นกราฟมีความสอดคล้องไปในทำนองเดียวกัน เส้นที่อยู่ต่ำสุดคือปั๊มaha กำแพงเสาเข็มที่ผิวสัมผัสเป็นแบบลisse (Smooth Surface) เส้นที่อยู่บนสุดคือปั๊มaha กำแพงเสาเข็มที่ผิวสัมผัสเป็นแบบหยาบ (Rough Surface)

รูปที่ 14 แสดงการเปรียบเทียบผลเฉลยกับงานวิจัยของจริรปภา (1993, 1996) [4, 5] สังวรปทานกุล (2004) [13] หมายและตันเสิง (2010) [14, 15] โดยคำนวณจากสมการที่ (1), (2) และ (3) จากรูปพบว่า ผลเฉลยของวิธีไฟโนต์อิลิเมนต์ในงานวิจัยนี้มีค่า�้อยกว่าเมื่อเทียบกับสมการที่ (3) ของหมายและตันเสิงอยู่ประมาณร้อยละ 120 - 20 โดยจะต่างกันมากในช่วง $S/D = 0.1 - 0.5$ หรือกล่าวได้ว่าสมการของหมายและตันเสิงให้ค่าความดันวินิจฉัยสูงเกินไปและไม่ปอดดกย เมื่อเทียบกับผลการทดสอบทางกายภาพของหมายและตันเสิงพบว่าผลการทดสอบทางกายภาพมีค่าสูงกว่าผลจากการวิเคราะห์ไฟโนต์อิลิเมนต์ที่ $\alpha = 1$ อยู่เล็กน้อยซึ่งอาจเกิดจากผลความเสียดทานของกระตกกับดิน ทำให้รูปแบบของปั๊มahaไม่เป็นแบบระนาบความเครียด ในการตรงกันข้าม ผลเฉลยของสมการที่ (1) ของจริรปภาก็ให้ค่าความดันวินิจฉัยต่ำมากเกินไป

รูปที่ 15 แสดงความสัมพันธ์ของความดันด้านข้างวินิจฉัย

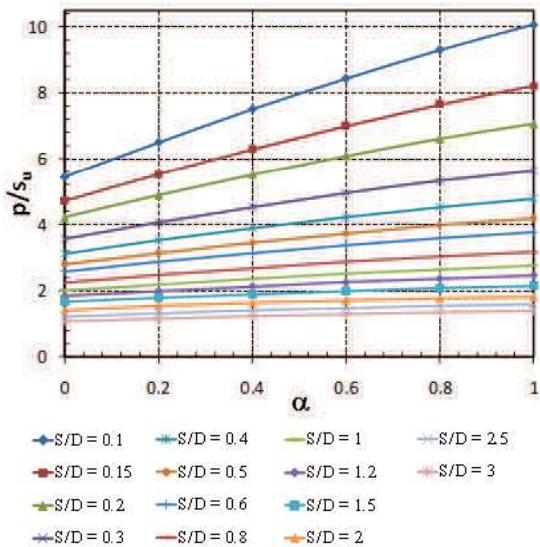


รูปที่ 13 ผลเฉลยความดันด้านข้างวินิจฉัยที่ $S/D = 0.1-3$



รูปที่ 14 เปรียบเทียบผลการศึกษา กับงานวิจัยในอดีต

p/s_u เปรียบเทียบกับตัวแปร α ตั้งแต่ 0 ถึง 1 โดยกราฟแต่ละเส้นในรูปที่ 15 แสดงการเพิ่มขึ้นของอัตราส่วน S/D ตั้งแต่ 0.1 ถึง 3 ในช่วงที่ S/D มีค่ามาก กราฟ p/s_u มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับ α แต่เมื่อ S/D มีค่าลดลง กราฟ p/s_u มีความสัมพันธ์แบบไม่เชิงเส้นกับ α ดังนั้นสมการที่ (3) ของหมายและตันเสิงใช้ได้ในกรณีที่เสาเข็มห่างมาก และจะไม่ปอดดกยเมื่อระยะห่างระหว่างเสาเข็มน้อยซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นจริงบ่อยครั้งในทางปฏิบัติ

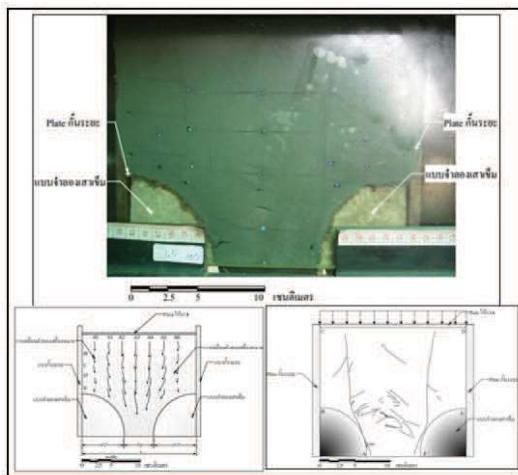


รูปที่ 15 ผลเฉลยความดันด้านข้างวินัยที่ $\alpha = 0-1$

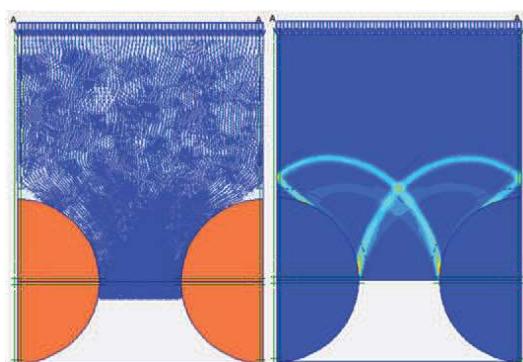
ไฟกเตอร์การหักเมฆระหว่างเสาเข็มกับดินยังมีอิทธิพลเป็นอย่างมากต่อค่า p/s_u กล่าวคือ p/s_u เป็นฟังก์ชันไม่เรียงเส้นกับตัวแปร α โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า S/D มีค่าน้อยซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น สมมุติฐานจากวิถีสมดุลลิมิต (Limit Equilibrium) ที่ให้ความสัมพันธ์ p/s_u กับ α แบบเชิงเส้นจึงมีข้อจำกัดและอาจให้ผลความดันดินวินัยที่ไม่ปลอดภัย

รูปที่ 16 แสดงผลของงานวิจัยของแหนมาและตันเสิง (2010) [14, 15] โดยรูปที่ 16 บนเป็นรูปของแบบจำลองทางกายภาพที่ $S/D = 0.5$ รูปที่ 16 ข้ามล่างเป็นผลการเคลื่อนตัวของอัลิเมนต์ต่างๆ รูปที่ 16 ขวาล่างเป็นรูปรอยแยกสุดท้าย (Crack) ของแหนมาและตัวเสิง

รูปที่ 17 แสดงผลจากการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอัลิเมนต์ของงานวิจัยนี้ที่ $S/D = 0.5$ และ $\alpha = 0.9$ รูปที่ 17 ข้ามเป็นรูปผลการเคลื่อนตัวของอัลิเมนต์ต่างๆ (Total Increment Vector) จากการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอัลิเมนต์ จากการเปรียบเทียบกับรูปที่ 16 พบร่วงการเคลื่อนตัวเมื่อความสอดคล้องไปในทางเดียวกัน คือแนวการเคลื่อนเป็นลักษณะเคลื่อนไปตามผิวเสาเข็ม รูปที่ 17 ขวาเป็นรูปรอยเฉือน (Incremental Shear Strain Contour) ที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอัลิเมนต์ จาก [15] แหนมาและตันเสิงได้กล่าวไว้ว่า “รอยแยกสุดท้ายมีลักษณะเป็นรอยเฉือนรูปสามเหลี่ยม มีจุดยอดอยู่บริเวณ



รูปที่ 16 ผลของงานวิจัยของแหนมาและตันเสิง (2010) [14, 15]

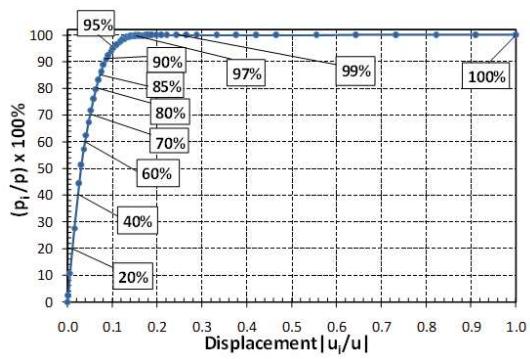


รูปที่ 17 ผลจากการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอัลิเมนต์

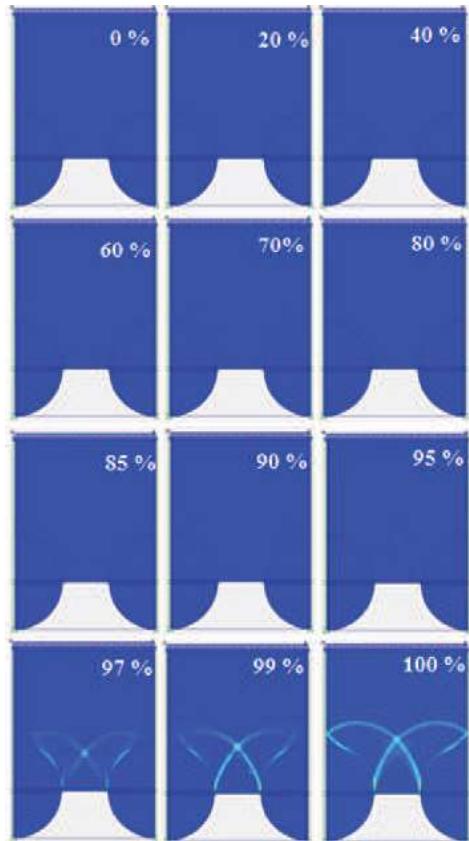
กึ่งกลางของแบบจำลอง ปลายสองข้างมีทิศทาง “ไปข้างซุนย์กลาง เสาเข็ม” ซึ่งมีความสอดคล้องกับรอยเฉือนที่ได้จากการวิเคราะห์ไฟฟ้าในตัวอัลิเมนต์ของงานวิจัยนี้

4. การพัฒนาการวินัย (Progressive Failure)

รูปที่ 18 แสดงอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันที่ขยับกับการเคลื่อนตัว โดยแกนในแนวตั้งแสดงถึงขั้นตอนการเพิ่มขึ้นของความดันด้านข้างในอัตราส่วนของความดันในขณะนี้ (p_i) หารด้วยความดันวินัย (p) หรือคิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นของความดันด้านข้าง ($(p_i/p) \times 100\%$ ตั้งแต่เริ่มต้น (0%) ไปจนถึงสภาพวินัย (100%) ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราส่วนของการเคลื่อนตัวในขณะนี้ (u) หารด้วยการเคลื่อนตัวที่



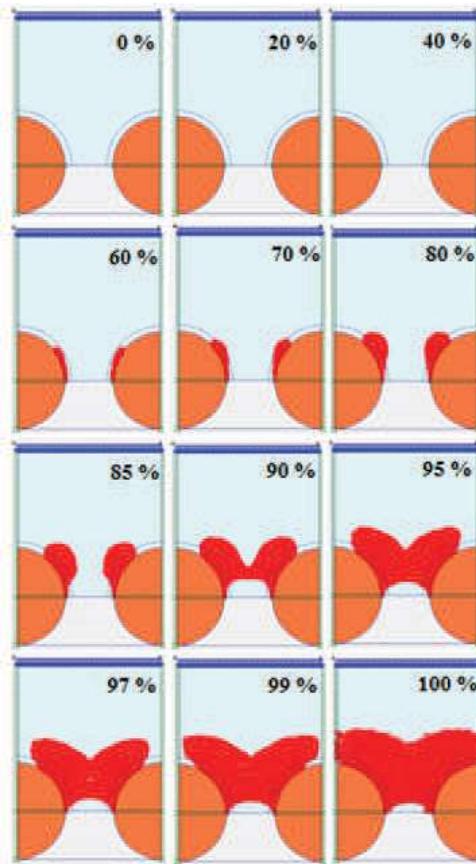
รูปที่ 18 การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนความดันค้านข้าง



รูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลง Incremental Shear Strain Contour

สถานะวิบติ (u) โดยมีค่าเปลี่ยนแปลง $\Delta u/u$

รูปที่ 19 - 20 แสดงการพัฒนาการวิบติ (Progressive Failure) จากสภาพเริ่มต้น (0%) ถึงสภาพวิบติ (100%) ซึ่งประกอบด้วย Incremental Shear Strain Contour และ Plastic Point ตัวอย่างที่แสดงนี้คือกำแพงเสาเข็มเรียงต่อ



รูปที่ 20 การเปลี่ยนแปลง Plastic Point

เนื่องที่มีค่า $S/D = 0.5$ และ $\alpha = 1$ ผลของ Plastic Point จะเริ่มจากขอบซ้ายสุดและขยายสุดของเสาเข็มและขยายตัวขึ้นเรื่อยๆ จนมาบรรจบกันที่ตำแหน่งตรงกลางของแบนจัลลง และเพิ่มไปตามเส้นรอบวงของเสาเข็มจนกระแทกเกิดเป็นรูปวงกลมสองวงซ้อนกันอยู่บนเส้นรอบวงของเสาเข็ม

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการวิเคราะห์กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องค่าวิชีไฟในต่ออิเล็กทรอนิกส์แบบมิติแบบสามมิติ กระบวนการ จากผลการศึกษาพบว่าความดันค้านข้างวิบติขึ้นอยู่ กับตัวแปรต่อไปนี้

1. อัตราส่วนระยะห่างเสาเข็มกับเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (S/D)
 2. แฟกเตอร์การยืดเคาระระหว่างคินและเสาเข็ม (α)
- ผลเฉลยความดันค้านข้างวิบติกูกันนำเสนอในรูปของอัตราส่วน

ความดันค้านด้านข้างวินท์กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (p/s_u)

ผลเฉลยความดันด้านข้างจากการวิเคราะห์ไฟฟ้าโนต็อติก เมนต์มีแนวโน้มเดียวกันกับทุกงานวิจัยต่างๆ ในอดีต คือเมื่อ S/D มีค่าลดลง ค่า p/s_u มีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่เชิงเส้น นอกจากนี้ แฟกเตอร์การยึดเกาะระหว่างเสาเข็มกับดินยังมีอิทธิพล เป็นอย่างมากต่อค่า p/s_u กล่าวว่า ค่า p/s_u เป็นฟังก์ชันไม่เชิงเส้นกับตัวแปร α โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อค่า S/D มีค่าน้อยซึ่งเป็นกรณีที่เกิดขึ้นจริงในทางปฏิบัติ ดังนั้น สมมุติฐานจากวิธีสมดุลลิมิต (Limit Equilibrium) ที่ให้ความสัมพันธ์ p/s_u กับ α แบบเชิงเส้นจึงมีข้อจำกัดและอาจให้ผลความดันดินวินท์ที่ไม่ปลอดภัย

กลไกการวินท์ (Failure Mechanism) มีความสอดคล้องกับงานวิจัยของเหมานและตันเสียง (2010) [14, 15] ทั้งผลการเคลื่อนตัวและรอยเฉือนที่เกิดขึ้น นอกเหนือจากนี้ การพัฒนาการวินท์ (Progressive Failure) ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] North, Lewis J.P., and Lyons, G.H.A. Contiguous Bored Piles. London: Institution of Civil Engineers. 1975.
- [2] Ou C.Y. Deep Excavation: Theory and Practice. Taylor & Francis Group. London. 2006.
- [3] Bowles J. E. Foundation Analysis and Design, 5th ed. McGraw-Hill. 2001.
- [4] จิรัปภาป. การใช้เข็มเจาะหล่อในที่เรียงต่อเนื่องเป็นกำแพงกันดินในงานบุดห้องใต้ดินลึกมากในกรุงเทพฯ. การประชุมใหญ่ทางวิชาการประจำปี 2536. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย. หน้า 66 – 78. 1993.
- [5] จิรัปภาป. กำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องกับงานก่อสร้างใต้ดินในกรุงเทพฯ. การประชุมสัมมนาทางวิชาการเรื่อง “งานก่อสร้างใต้ดิน 39”. หน้า 36-54. 1996
- [6] อุบลเดช อ. การก่อสร้างห้องใต้ดินลึกมากโดยใช้ระบบกำแพงกันดินแบบ Contiguous Pile Wall ในชั้นดินกรุงเทพฯ. รายงานปัญหาเฉพาะทางวิศวกรรมโยธาสาขาวิชาชีววิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2007.
- [7] Gaba R.A., Simpson B., et al. Embedded Retaining Walls z Guidance for Economic Design. CIRIA, London. 2003
- [8] Ito T., Matsui T. Methods to Estimate Lateral Force Acting on Stabilizing Pile. Soil and Foundations. Vol.15, No. 4, pp. 45-59. 1975.
- [9] Atkinson J.H., Brown E.T. and Potts D.M. Collapse of Shallow Unlined Tunnels in Dense Sand. Tunnels and Tunneling. Vol. 7, No 3, pp. 81-87. 1975.
- [10] Einstein H.H., Schwartz C.W., Steiner W., Baligh M.M., and Levitt R.E. Improved Design for Tunnel Supports. Analysis Method and Ground Structure Behavior. Vol. 2. MIT, DOT-05-60136. 1980.
- [11] Evans C.H. An Examination of Arching in Granular Soils. [M.S. Thesis]. MIT; 1983.
- [12] Bastien C., Gael C., and Pascal V. Loadtransfers and Arching Effects in Granular Soil Layer. 18eme Congres Francais de Mecanique, Grenoble 27 – 31. 2007
- [13] สังวรปทานกุล ว. วิสัยรับแรงและการด้านข้างของผนังเสาเข็มเรียงต่อเนื่อง. การประชุมทางวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 4. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยและสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2004.
- [14] แนมา ว. และ ตันเสียง พ. อิทธิพลของระยะห่างของเสาเข็มต่อแรงดันดินของกำแพงเสาเข็มจะเรียงต่อเนื่อง. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติครั้งที่ 15, GTE 026, โครงสร้างสูญญากาศและคอนกรีตอ่อนด้วยการเจาะช่อง. จ. อุบลราชธานี. 2010.
- [15] แนมา. อิทธิพลของระยะห่างต่อกำลังรับแรงทางข้างของกำแพงเสาเข็มเรียงต่อเนื่องสำหรับงานบุดห้องใต้ดินลึก. [วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี]. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2010.
- [16] Brinkgreve R.B.J., et al. PLAXIS 2D Version 8 Manual. A.A. Balkema Publishers. 2002.
- [17] Brinkgreve R.B.J. PLAXIS 2D Version 8.5 Finite-Element Code for Soil and Rock Analyses: Complete Set of Manuals, R. Brinkgreve, ed., Balkema, Rotterdam, The Netherlands. 2007.