

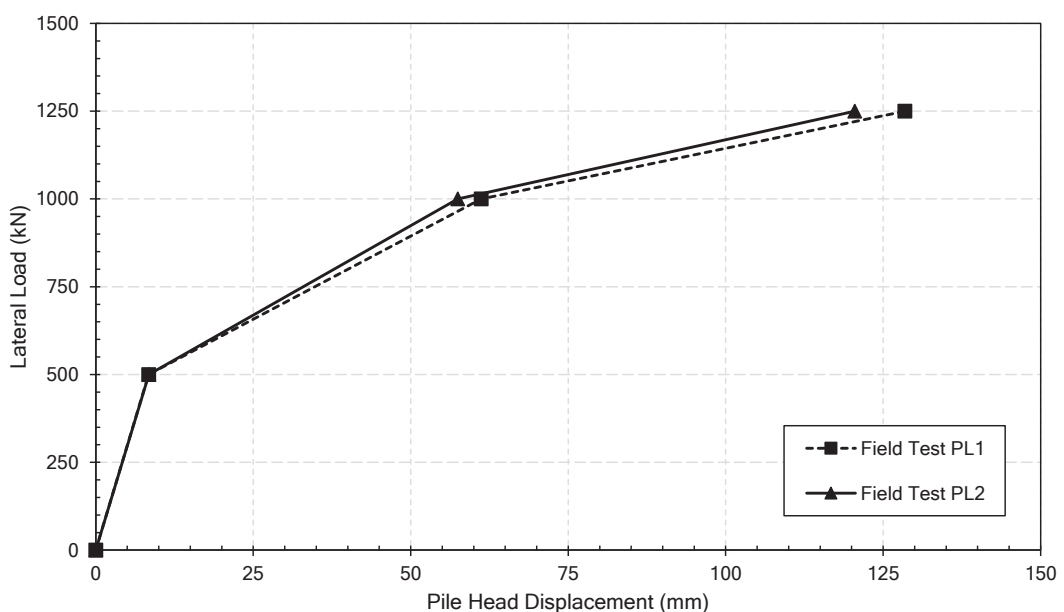
บทที่ 4

ผลการวิจัย

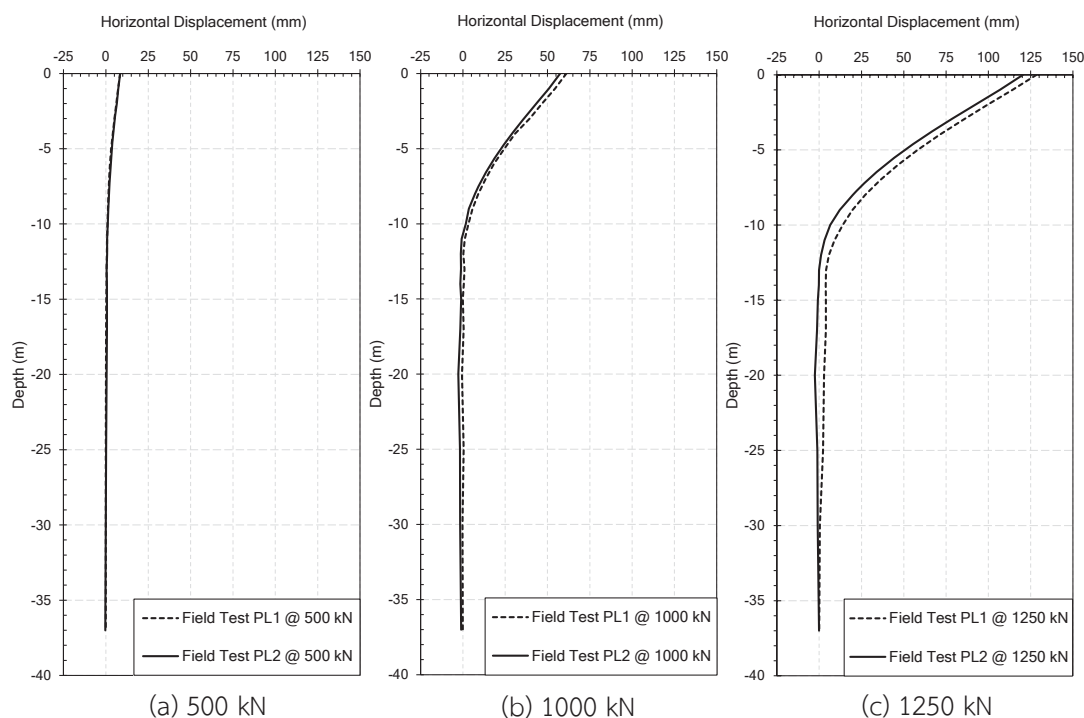
4.1 ข้อมูลผลทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม

4.1.1 การทดสอบเสาเข็มเดี่ยว

รายงานผลทดสอบเสาเข็มในสนามจากงานวิจัยของ (Wachiraprakarnpong, 1993) เป็นการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว (F1) ทำด้วยคอนกรีตเสริมเหล็ก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.50 เมตร ลึก 37 เมตร ตำแหน่งทดสอบอยู่บริเวณสถานีกลางบางซื่อ เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร ผลทดสอบได้จากการวัดการโก่งตัวโดยการติดตั้งท่อ inclinometer โดยวัดที่ขณะให้แรงกระทำเท่ากับ 500, 1000, และ 1250 กิโลนิวตัน สำหรับเสาเข็มหมายเลข PL1 และ PL2 ดังในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 เห็นได้ว่าการโก่งตัวเพิ่มขึ้นตามแรงกระทำที่เพิ่มขึ้น โดยการโก่งตัวที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตันของเสาเข็มทั้งสองต้นมีค่าใกล้เคียงกัน 8.40 มิลลิเมตร ถัดมาที่แรงกระทำสูงขึ้นเป็น 1000 กิโลนิวตันพบว่าเสาเข็มหมายเลข PL1 มีการโก่งตัว 61.20 มิลลิเมตร ส่วนเสาเข็มหมายเลข PL2 มีการโก่งตัวน้อยกว่าหมายเลข PL1 ประมาณ 4 มิลลิเมตร ส่วนที่แรงกระทำสูงสุด 1250 กิโลนิวตันพบว่า การโก่งตัวของเสาเข็มหมายเลข PL1 เท่ากับ 128.50 มิลลิเมตร ในขณะที่การโก่งตัวของเสาเข็มหมายเลข PL2 เท่ากับ 120.50 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นช่วงการโก่งตัวที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ตำแหน่งที่เริ่มเกิดการโก่งตัวที่ระดับประมาณ -10 เมตรจากผิวดิน



รูปที่ 4.1 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มเดี่ยว F1

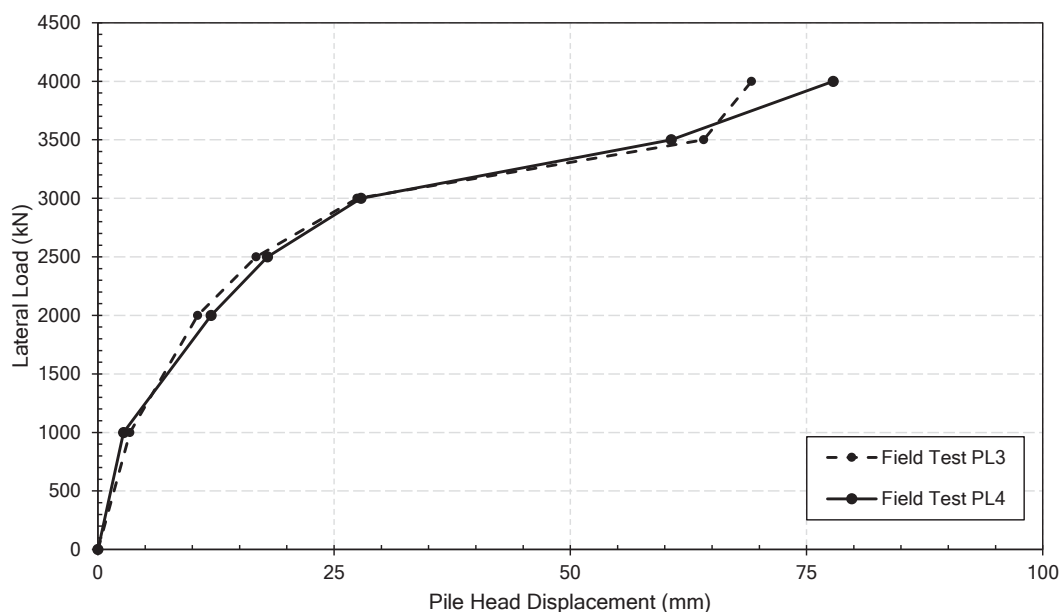


รูปที่ 4.2 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มเดี่ยว F1

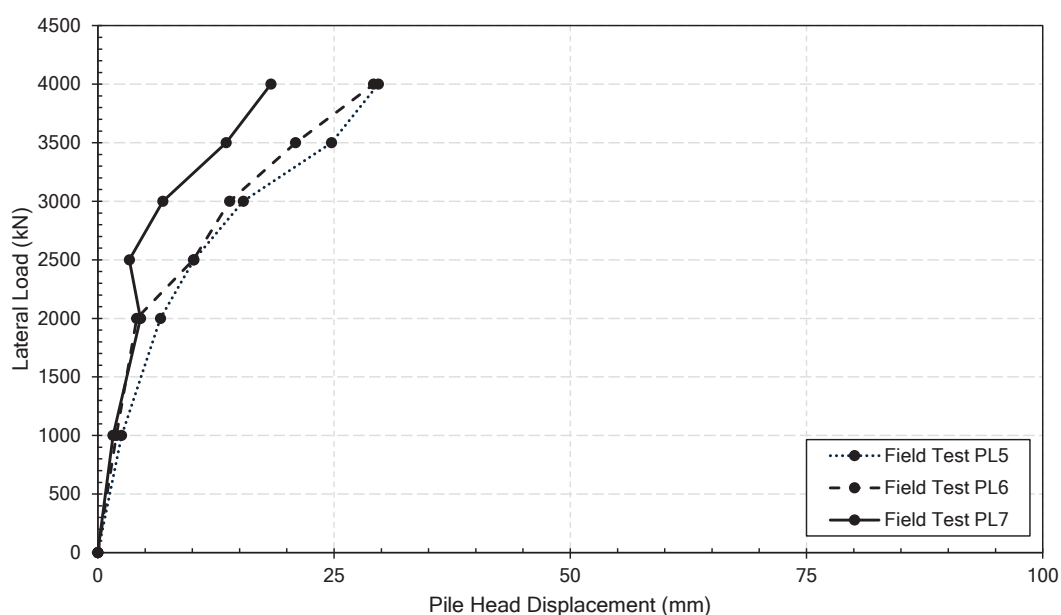
4.1.2 การทดสอบเสาเข็มกลุ่ม

รายงานผลทดสอบเสาเข็มในสนามจากงานวิจัยของ (Wachiraprakarnpong, 1993) ของเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ใช้วัสดุ ขนาด และความยาวเดียวกันกับเสาเข็มเดี่ยว ดังในรูปที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 เป็น load-displacement curve ของผลการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ส่วนรูปที่ 4.5 และรูปที่ 4.6 เป็นผลวัดการโก่งตัวโดยติดตั้งท่อ inclinometer โดยวัดที่ขณะให้แรงกระทำต่อ pile cap เท่ากับ 1000, 2000, 2500, 3000, 3500, และ 4000 กิโลนิวตัน สำหรับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F2 พบว่าในช่วงแรงกระทำ 1000 ถึง 3500 กิโลนิวตัน การโก่งตัวของเสาเข็มทั้งสองต้น ได้แก่ เสาเข็มต้นตาม (trailing pile) หมายเลข PL4 และเสาเข็มต้นนำ (leading pile) หมายเลข PL3 มีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยมีค่าการโก่งตัวที่ต่างกันน้อยกว่า 5 มิลลิเมตร ในขณะที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตัน การโก่งตัวของเสาเข็มในกลุ่มทั้ง 2 ต้นมีค่าแตกต่างกัน โดยเสาเข็มต้นตามมีการโก่งตัวมากกว่าต้นนำประมาณ 9 มิลลิเมตร สำหรับตำแหน่งความลึกการโก่งตัวอยู่ที่ระดับประมาณ -10 ถึง -15 เมตรจากผิวดิน โดยผลทดสอบนี้ชี้ให้เห็นถึงผลการโก่งตัวเนื่องจากผลกระทบของระยะห่างของเสาเข็มในกลุ่มที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ปริทรรศน์ไว้ก่อนหน้านี้ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าในช่วงแรงกระทำ 4000 กิโลนิวตัน ในส่วนผลการทดสอบเสาเข็มกลุ่ม F3 ที่ช่วงแรงกระทำ 1000 ถึง 2000 กิโลนิวตัน การโก่งมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนที่แรงกระทำถัดมาในช่วง 2500 ถึง 4000 กิโลนิวตัน การโก่งตัวของเสาเข็ม 2 ต้นตาม (หมายเลข PL5 และ PL6) ที่จัดเรียงแบบ side-by-side มีค่ามากกว่าเสาเข็มต้นนำ (หมายเลข PL7) ประมาณ 7 ถึง 11 มิลลิเมตร

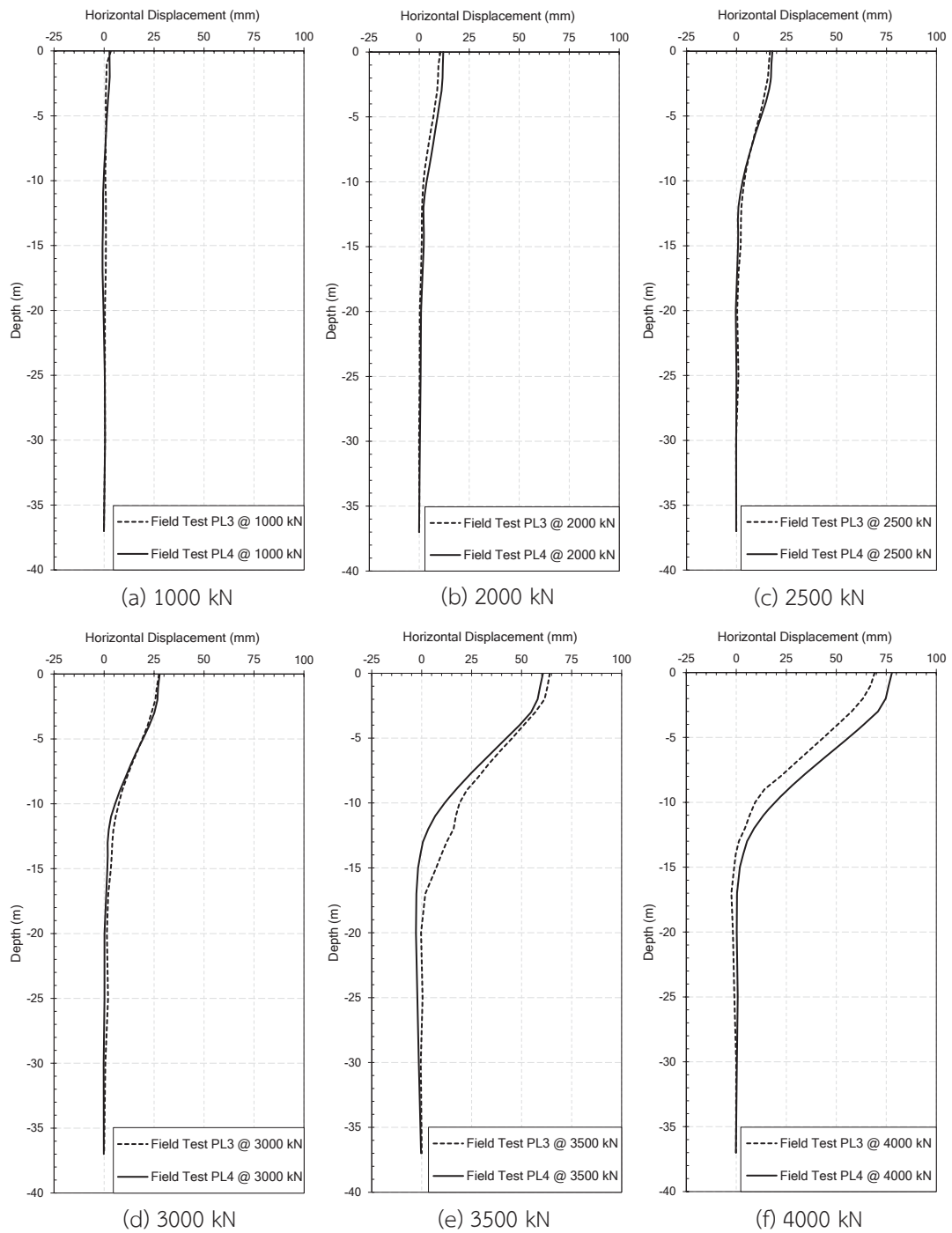
นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นว่าการโก่งตัวของเสาเข็มหมายเลข PL7 ที่แรงกระทำ 2500 กิโลนิวตันนั้น มีผลการโก่งเกิดขึ้นน้อยกว่าแรงกระทำก่อนหน้าประมาณ 3 มิลลิเมตร ผู้วิจัยสันนิษฐานว่าเป็นผลจากความผิดปกติของการตรวจวัดในสนาม เนื่องจากค่าการโก่งตัวที่แรงกระทำอื่นมีค่าอยู่ในแนวโน้มที่เหมาะสม สำหรับตำแหน่งความลึกการโก่งตัวของเสาเข็มกลุ่ม F3 นั้นเกิดขึ้นอยู่ที่ระดับประมาณ -10 ถึง -15 เมตรจากผิวดินเช่นเดียวกับเสาเข็มกลุ่ม F2



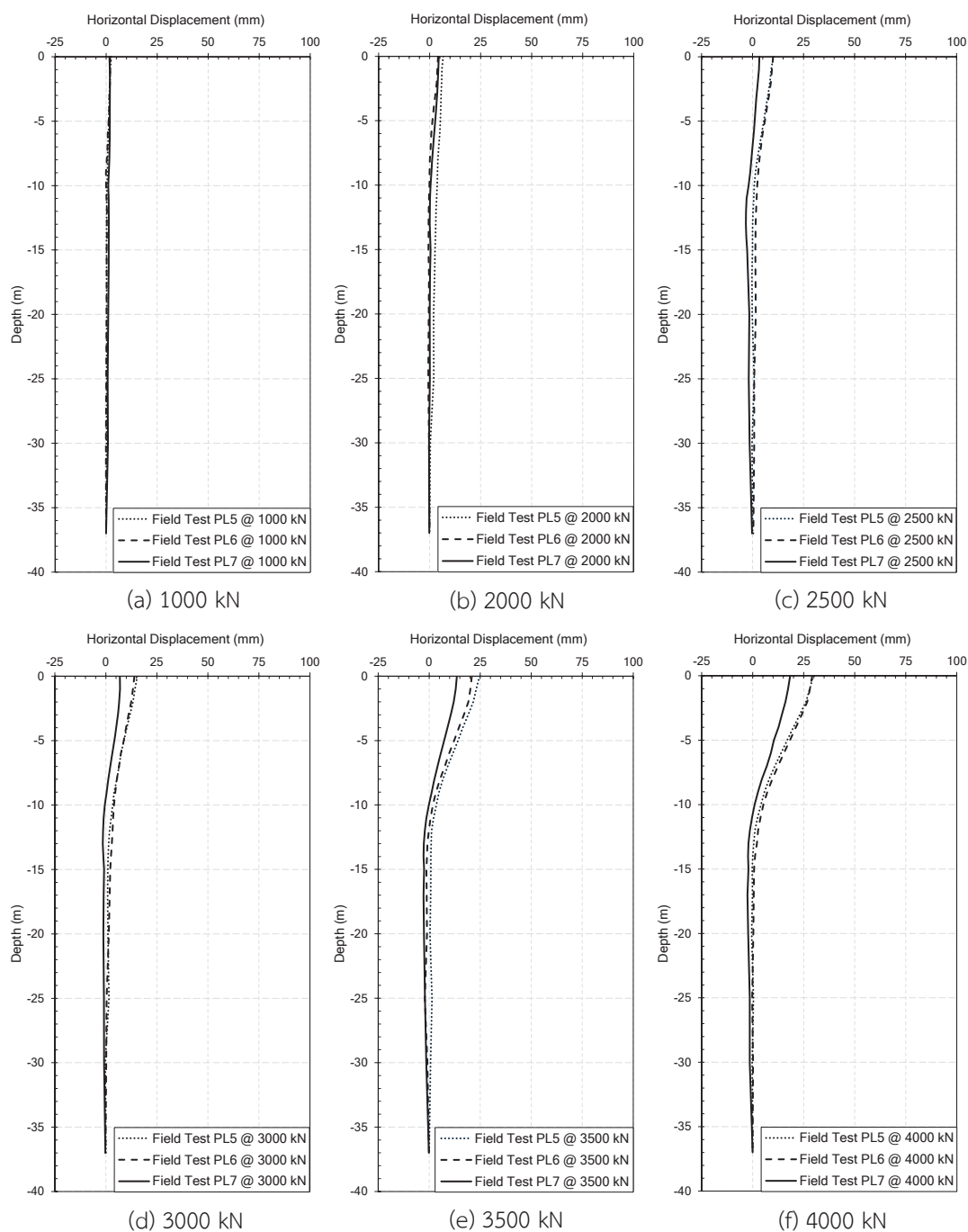
รูปที่ 4.3 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลุ่ม F2



รูปที่ 4.4 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลุ่ม F3



รูปที่ 4.5 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มกลุ่ม F2

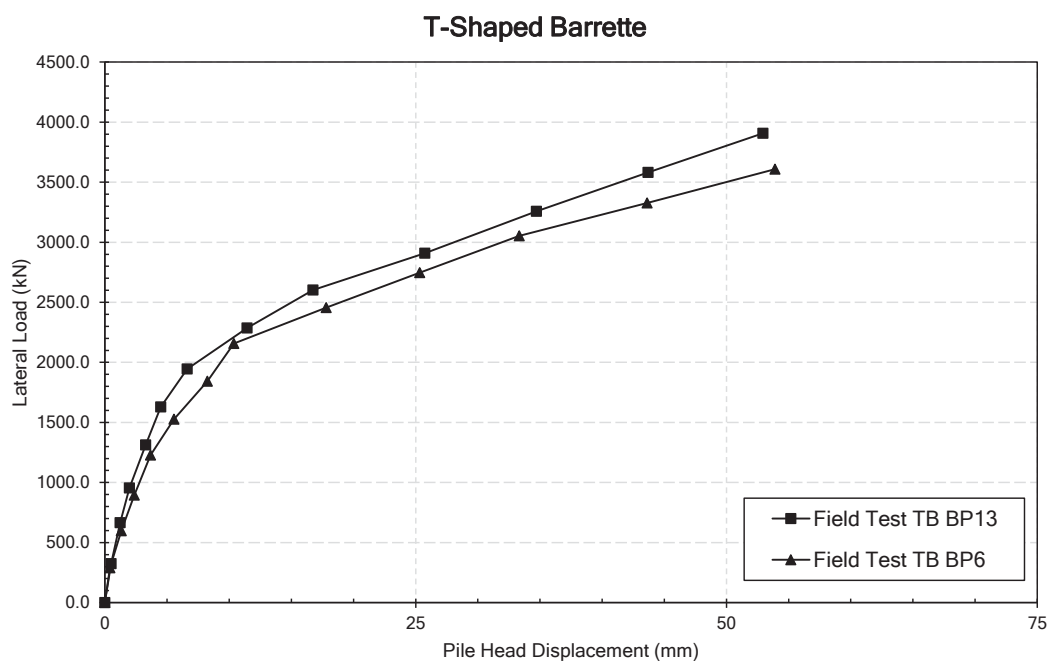


รูปที่ 4.6 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็มกลุ่ม F3

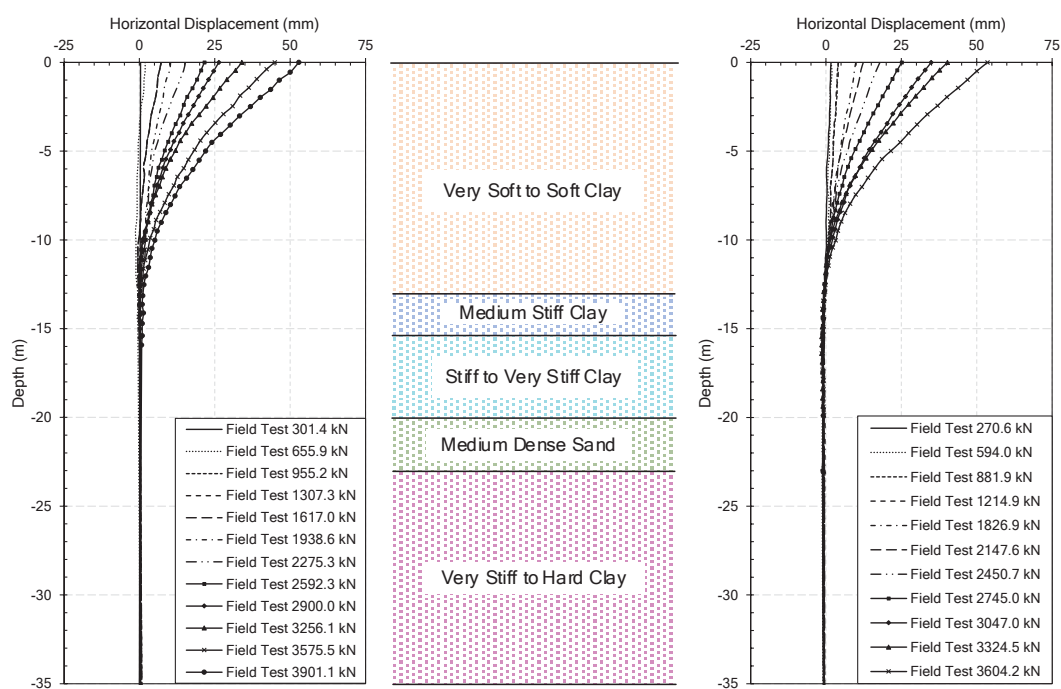
4.1.3 การทดสอบเสาเข็มแบเรตต์รูปตัวที

รายงานผลทดสอบในสนามของเสาเข็มแบเรตต์รูปตัวที (T-Shaped barrette, TB) จากงานวิจัยของ (Submaneewong, 2009) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำและการเคลื่อนที่ในแนวนอนดังรูปที่ 4.7 และการโก่งตัวแปรผันตามความลึก ดังรูปที่ 4.8 โดยการโก่งตัวเกิดขึ้นในชั้น

ดินเหนียวอ่อนถึงแข็งปานกลาง โดยการโก่งตัวเกิดขึ้น 54 มิลลิเมตรที่แรงกระทำ 3900 กิโลนิวตัน ส่วนที่แรงกระทำที่ต่ำกว่า 1600 กิโลนิวตัน ผลการทดสอบในสนามชี้ให้เห็นถึงสตีเฟนส์ที่สูงมากของเสาเข็ม TB จนส่งผลให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวไม่ต่างกันในขณะที่มีการให้แรงกระทำเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.7 ผลทดสอบในสนามของการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม TB



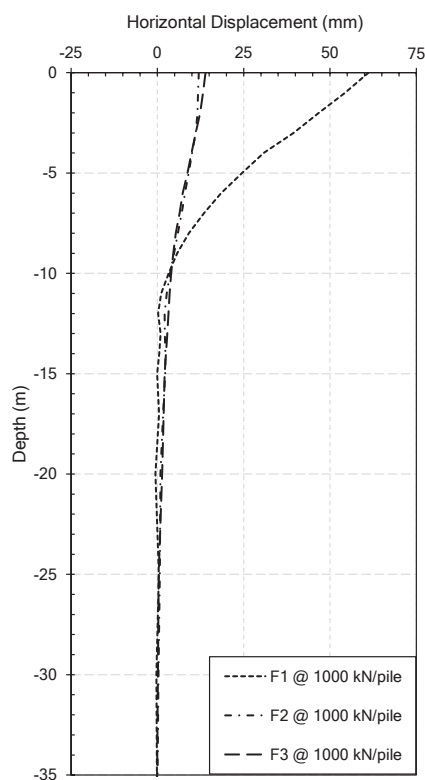
(a) TB หมายเลข T4 BP13

(b) TB หมายเลข T4 BP6

รูปที่ 4.8 ผลทดสอบในสนามของการโก่งตัวเสาเข็ม TB

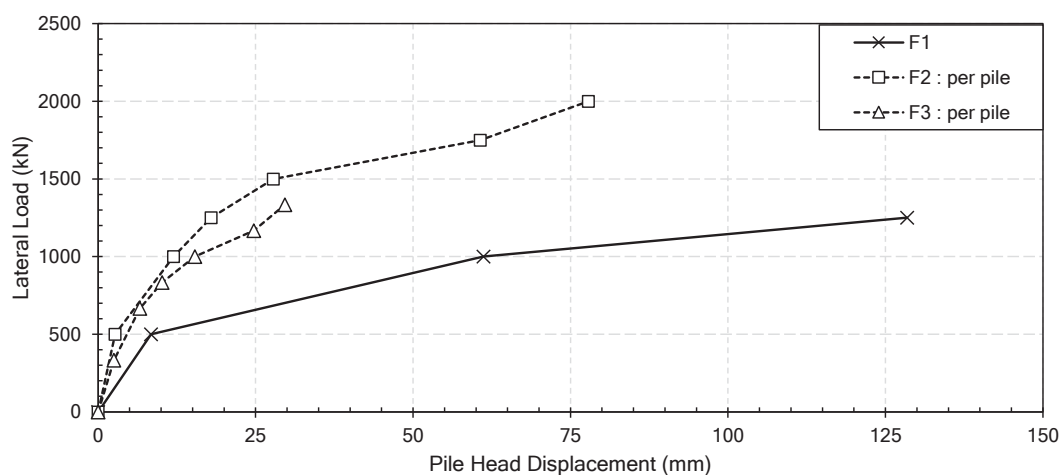
4.1.4 เปรียบเทียบผลการทดสอบเสาเข็มขนาดใหญ่ในสนาม

สำหรับผลทดสอบเสาเข็มเจาะกลมแบบเดี่ยวและแบบกลุ่มดังที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 4.1.1 และ 4.1.2 นั้น เมื่อพิจารณาเป็นแรงกระทำ 1000 กิโลนิวตันต่อเสาเข็มหนึ่งต้น จะเทียบเท่าเสาเข็มเดี่ยว F1 รับแรงกระทำเท่ากับ 1000 กิโลนิวตัน เทียบเท่าเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่รับแรงกระทำต่อ pile cap เท่ากับ 2000 กิโลนิวตัน และเทียบเท่าเสาเข็มกลุ่ม F3 ที่รับแรงกระทำต่อ pile cap เท่ากับ 3000 กิโลนิวตัน ผลการเปรียบเทียบเป็นการโก่งตัวของเสาเข็มตามความลึก ดังในรูปที่ 4.9 ซึ่งเห็นว่า เสาเข็มเดี่ยว F1 มีการโก่งตัวสูงกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ประมาณ 4 เท่า ซึ่งเป็นผลมาจากการที่เสาเข็มเดี่ยว F1 ไม่ถูกยึดรั้งที่หัวเสาเข็มด้วย pile cap จึงส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่และหมุนรอบจุดได้อย่างอิสระกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3



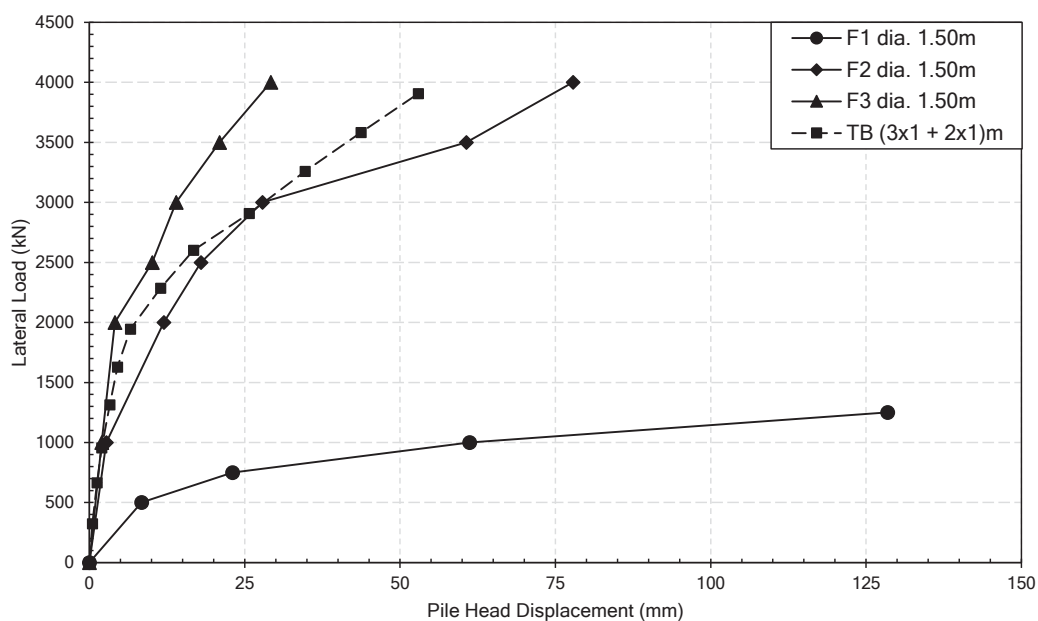
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตันต่อต้น

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่รับแรงกระทำเฉลี่ยต่อเสาเข็มหนึ่งต้นที่มาจากแรงกระทำรวมกันที่ pile cap ดังในรูปที่ 4.10 ซึ่งเห็นว่า ช่วงต้นที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวมีค่ามากกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ประมาณ 3 เท่า และเมื่อแรงกระทำสูงขึ้นพบว่า เสาเข็มเดี่ยว F1 มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวสูงกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 อย่างต่อเนื่อง



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่เป็นแรงกระทำเฉลี่ยต่อต้น

สำหรับผลทดสอบเสาเข็มรับแรงด้านข้างในชั้นดินกรุงเทพฯที่ได้กล่าวไปแล้วในข้อที่ 4.1.1 ถึงหัวข้อที่ 4.1.3 เมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบเป็นความสัมพันธ์ของการเคลื่อนตัวกับแรงกระทำ ซึ่งพิจารณาเลือกใช้ตัวแทนเสาเข็มที่มีผลการทดสอบในสนามที่ผิดปกติจากแนวโน้มน้อยที่สุดหรือเสาเข็มที่มีผลการโก่งตัวมากที่สุดมาเปรียบเทียบกัน ดังความสัมพันธ์ในรูปที่ 4.11 เห็นได้ว่าการเคลื่อนตัวเท่ากับเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการโก่งตัวน้อยที่สุด รองลงมาเป็นเสาเข็มแบเร่ตรูปตัวท และเสาเข็มกลุ่ม F2 ส่วนเสาเข็มเดี่ยว F1 มีการโก่งตัวมากที่สุด เมื่อพิจารณาที่แรงกระทำในช่วงแรก 500 กิโลนิวตัน ชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F3 เสาเข็มกลุ่ม F2 และเสาเข็มแบเร่ตรูปตัวทที่มีสติเฟนสูงกว่าเสาเข็มเดี่ยวอย่างชัดเจน โดยมีการเคลื่อนตัวที่แรงกระทำดังกล่าวมีค่าต่างกัน 8 เท่า

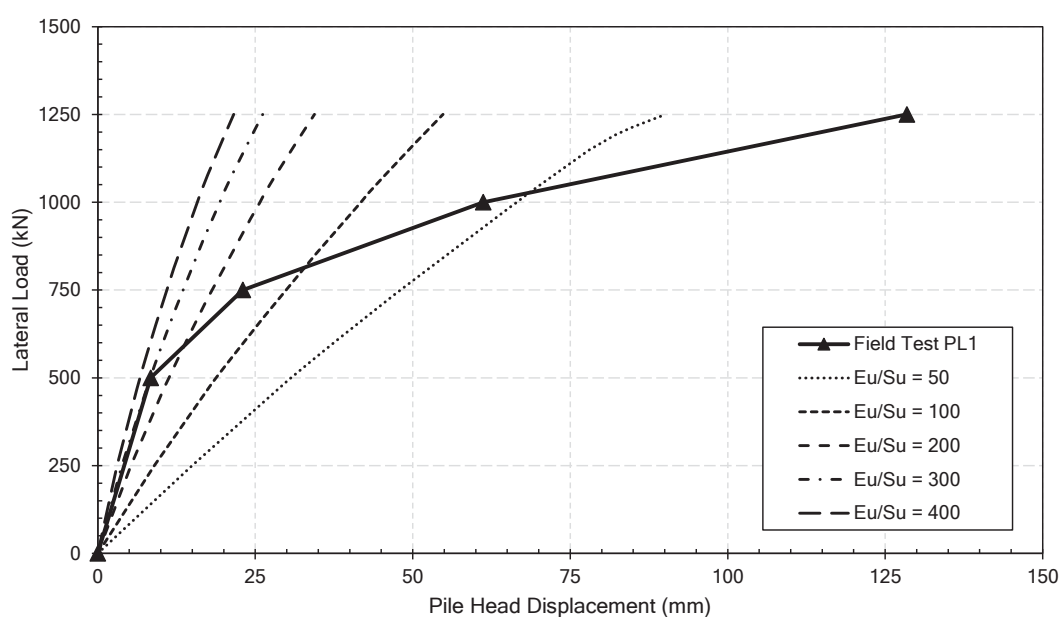


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบความสามารถในการรับแรงด้านข้างของเสาเข็ม

4.2 การวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสของแบบจำลองดิน

4.2.1 การวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน MCCS

การวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสเพื่อเลือกสตีฟเนสที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนสำหรับแบบจำลองดิน MC ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.2 สำหรับกรณีแบบจำลองดิน MC ที่มีสตีฟเนสคงที่ตลอดชั้นดิน (Mohr-Coulomb constant stiffness with depth, MCCS) ได้ผลการวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสดังในรูปที่ 4.12 เป็นการเปรียบเทียบผลวิเคราะห์เสาเข็มด้วย FEM กับผลทดสอบในสนาม หากพิจารณาช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงนั้น พบว่าแบบจำลองดิน MCCS ให้ผลการวิเคราะห์เสาเข็มที่จำลองด้วย EBE ที่อัตราส่วนสตีฟเนส E_u/S_u ประมาณ 300 ซึ่งเป็นช่วงสตีฟเนสที่ใช้งานในการวิเคราะห์โครงสร้างด้านวิศวกรรมฐานรากดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 2.7.1 ในขณะที่อัตราส่วนสตีฟเนส E_u/S_u เท่ากับ 50 ซึ่งถือว่าต่ำมากนั้นให้ค่าการเคลื่อนตัวในช่วงที่เป็นเส้นตรงสูงมากและยังส่งผลให้เสาเข็มที่จำลองด้วยเสาเข็มด้วย EBE เกิดการครากที่แรงกระทำประมาณ 1200 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตันนั้นพบว่า ผลวิเคราะห์ FEM ยังคงทำนายการเคลื่อนตัวที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนามมาก

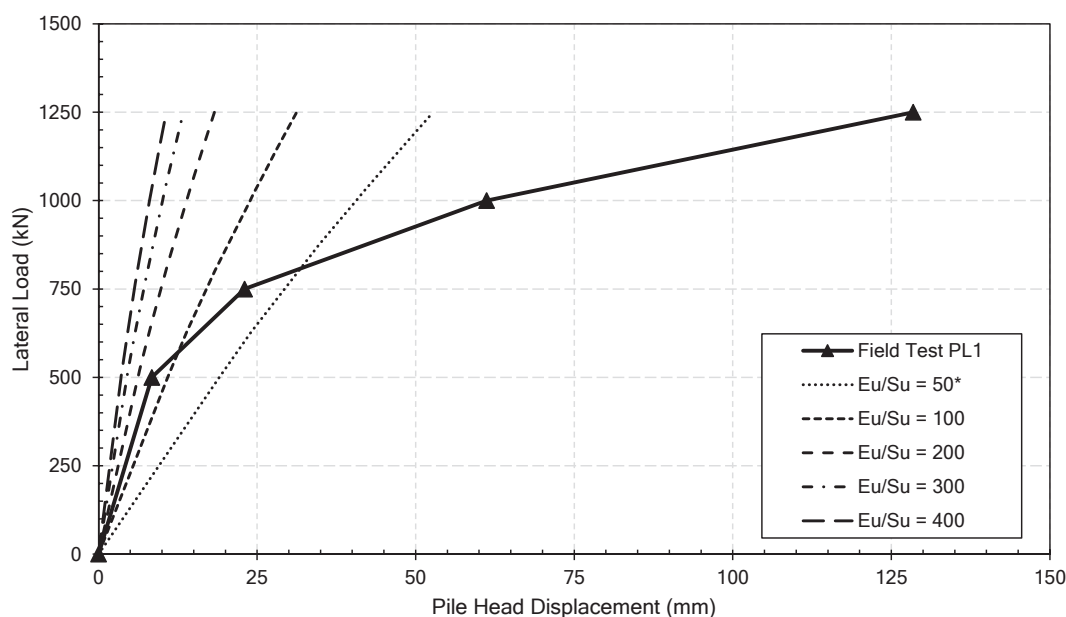


รูปที่ 4.12 ผลวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสเพื่อกำหนดสตีฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน MCCS

4.2.2 การวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสสำหรับแบบจำลองดิน MCVS

การวิเคราะห์หาค่าสตีฟเนสเพื่อเลือกสตีฟเนสที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อน สำหรับแบบจำลองดิน MC ที่มีสตีฟเนสแปรผันตามความลึก (Mohr-Coulomb vary stiffness with depth, MCVS) โดยพฤติกรรมของเสาเข็มที่ได้จากผลทดสอบในสนามนั้น ผู้วิจัยได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 4.1.1 โดยรูปที่ 4.14 เป็นการเปรียบเทียบผลการเคลื่อนตัวกับแรงกระทำที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM ในกรณีของแบบจำลองดิน MCVS กับผลทดสอบในสนาม พบว่าการจำลอง

เสาเข็มด้วย EBE กับแบบจำลองดิน MCVS ให้ผลวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มที่มีลักษณะเชิงเส้นตรงสำหรับทุกสตีเฟนส์ที่ทำการแปรผัน เมื่อพิจารณาผลการทดสอบในสนามในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงพบว่าอัตราส่วนสตีเฟนส์ E_u / S_u ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ระหว่าง 100 ถึง 200 ซึ่งชี้ให้เห็นว่าการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน MCVS นั้นมีแนวโน้มของสตีเฟนส์ดินสูงกว่าแบบจำลองดิน MCCC

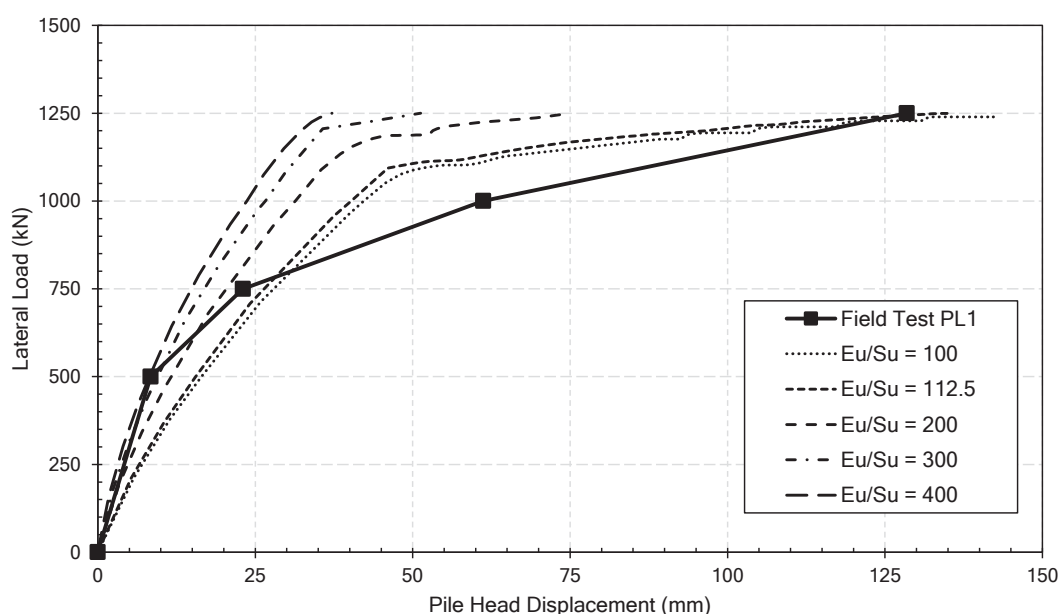


รูปที่ 4.13 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดสตีเฟนส์ของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน MCVS

4.2.3 การวิเคราะห์กลับหาสตีเฟนส์สำหรับแบบจำลองดิน HSM

การวิเคราะห์กลับเพื่อเลือกสตีเฟนส์ที่เหมาะสมสำหรับชั้นดินเหนียวอ่อนที่มีอิทธิพลต่อการจำลองพฤติกรรมของเสาเข็มมากที่สุด โดยการแปรผันสตีเฟนส์ของดินสำหรับแบบจำลองดิน HSM ดังที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยรูปแบบสตีเฟนส์ที่ใช้ขึ้นอยู่กับรูปของหน่วยแรงรวมเพื่อให้เป็นประโยชน์กับวิศวกรผู้ออกแบบ โดยความสัมพันธ์ระหว่างโมดูลัสยืดหยุ่นแบบไม่ระบายน้ำ (E_u) กับกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำ (S_u) สำหรับรูปที่ 4.12 เป็นผลการวิเคราะห์กลับโดยใช้ข้อมูลการทดสอบเสาเข็มเดี่ยว F1 ซึ่งอ้างอิงผลทดสอบในสนามโดยใช้เสาเข็มหมายเลข PL1 โดยผลวิเคราะห์กลับสามารถแบ่งพฤติกรรมของเสาเข็มออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงที่แรงกระทำเริ่มต้นไปจนถึง 500 กิโลนิวตัน พบว่าอัตราส่วนสตีเฟนส์ E_u / S_u ที่สอดคล้องนั้นมีค่าอยู่ระหว่าง 200 ถึง 300 หากพิจารณาที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตันเป็นแรงกระทำที่สภาวะประลัยนั้นจะได้ว่า พฤติกรรมเสาเข็มที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตันนี้เป็นการพิจารณาที่สัดส่วนความปลอดภัย (factor of safety) เท่ากับ 2.5 หรือที่แรงกระทำไม่เกินร้อยละ 40 ของแรงกระทำที่สภาวะประลัยซึ่งเป็นช่วงที่เสาเข็มถูกพิจารณาใช้งานในทางปลอดภัย ส่วนช่วงถัดมาเป็นอัตราส่วนสตีเฟนส์ E_u / S_u เท่ากับ 112.5 นั้นเป็นสตีเฟนส์ที่ใช้ศึกษาพฤติกรรมเสาเข็มในภาพรวมที่ให้ผลการวิเคราะห์

ที่ครอบคลุมตั้งแต่เริ่มต้นไปจนเข้าสู่สภาวะประลัย โดยในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเป็นเส้นตรงนั้นให้ค่าการเคลื่อนตัวที่สูงกว่าผลทดสอบในสนาม ซึ่งหากพิจารณาที่อัตราส่วน E_u/S_u ที่สูงกว่า 112.5 นั้นให้ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนตัวที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตันน้อยกว่าผลทดสอบในสนามมาก โดยงานวิจัยนี้จึงได้ใช้ E_u/S_u เท่ากับ 112.5 ในการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มต่อไป นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์กลับชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า การแปรผันสติฟเนสของแบบจำลองดิน HSM นั้นมีนัยสำคัญต่อผลการเคลื่อนตัวในช่วงที่เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงน้อยมาก และมีนัยสำคัญมากในช่วงที่เสาเข็มเข้าสู่สภาวะประลัยที่แรงกระทำสูงมาก โดยที่สภาวะดังกล่าวนี้ผลการวิเคราะห์มีความอ่อนไหวมาก เป็นเหตุผลที่งานวิจัยนี้เสนอการใช้งานผลการวิเคราะห์สติฟเนสของดินโดยพิจารณาพฤติกรรมแต่ละช่วงของเสาเข็ม เพื่อให้ได้ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมและอยู่ในทางปลอดภัย

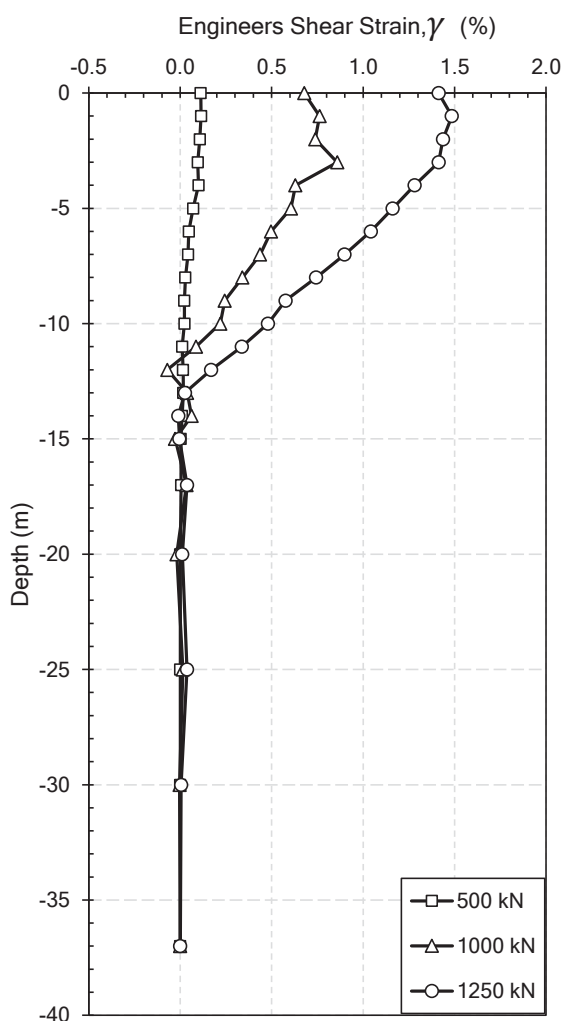


รูปที่ 4.14 ผลวิเคราะห์กลับเพื่อกำหนดสติฟเนสของชั้นดินเหนียวอ่อนกับแบบจำลองดิน HSM

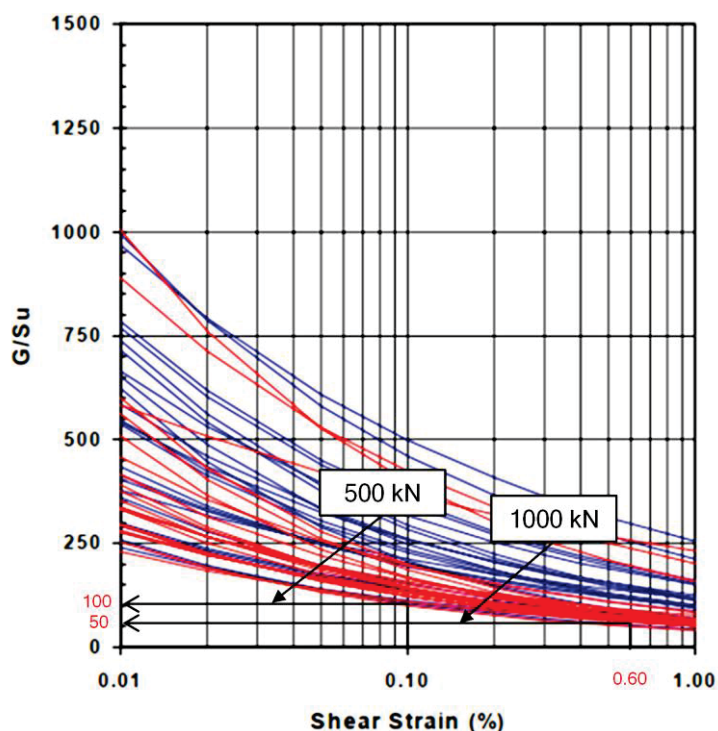
4.2.4 ความสัมพันธ์ของความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมกับสติฟเนสของดิน

สำหรับผลการวิเคราะห์กลับของการเคลื่อนตัวเสาเข็มภายใต้แรงกระทำด้านข้างนั้น เห็นได้ว่า การเคลื่อนตัวของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มมีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรม (engineers' shear strain, γ) ที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 2.7.1 สำหรับรูปที่ 4.15 เป็นการคำนวณความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมของเสาเข็มเดี่ยว F1 จากผลทดสอบในสนาม เห็นได้ว่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นในชั้นดินเหนียวอ่อน ผลคำนวณความเครียดเฉือนของดินมีค่าประมาณร้อยละ 0.1 ถึง 0.6 สำหรับเสาเข็มที่อยู่ในสภาวะใช้งานและเสาเข็มที่เริ่มเข้าสู่สภาวะประลัยตามลำดับ โดยความเครียดเฉือนเกิดขึ้นที่ความลึกของดินที่ชั้นดินเหนียวอ่อนถึงดินเหนียวแข็งปานกลาง ส่วนรูปที่ 4.16 เป็นการเลือกใช้สติฟเนสเบื้องต้นโดยใช้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.2 ในการวิเคราะห์ด้วย

FEM ของแบบจำลองดิน MC สำหรับแรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน มีค่าอัตราส่วน G/S_u ประมาณ 100 และมีค่าความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมประมาณร้อยละ 0.1 ต่างจากที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตัน มีอัตราส่วน G/S_u ประมาณ 50 และค่าความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมประมาณร้อยละ 0.6 ซึ่งถือว่าต่ำมาก ส่วนกรณีของเสาเข็มที่มีการเคลื่อนตัวสูงมากที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตัน พบว่าความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมมีค่ามากกว่าร้อยละ 1 ซึ่งอยู่นอกพิสัยของผลการทดสอบ self-boring pressuremeter ของชั้นดินเหนียวกรุงเทพฯ ที่มีการทดสอบเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ จากพฤติกรรมของเสาเข็มที่กล่าวมานั้นเป็นการชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า พฤติกรรมเสาเข็มที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงใช้งาน ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับสตีเฟนสของดินเพียงอย่างเดียว ต่างจากพฤติกรรมของเสาเข็มที่แรงกระทำสูงมากจนเสาเข็มเข้าสู่สภาวะประลัยหรือใกล้เกิดการวิบัติ พบว่าพฤติกรรมของเสาเข็มขึ้นอยู่กับสตีเฟนสของดินและสตีเฟนสของเสาเข็มที่พิจารณาการแตกร้าวของหน้าตัดภายใต้โมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นร่วมกัน



รูปที่ 4.15 ความเครียดเฉือนเชิงวิศวกรรมของการทดสอบเสาเข็มเดี่ยวในสนาม



รูปที่ 4.16 การพิจารณาใช้สติเฟนสของดินเหนียวจากค่าความเครียดเฉือน

4.3 เปรียบเทียบแบบจำลองดินจากผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์กลับสำหรับแบบจำลองดินเหนียวที่เหมาะสมสำหรับทำนายพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มจากหัวข้อที่ 4.2 ซึ่งประกอบไปด้วยแบบจำลองดิน HSM, แบบจำลองดิน MC ที่มีสติเฟนสคงที่ตลอดชั้นดิน, และแบบจำลองดิน MC ที่มีสติเฟนสแปรผันกับความลึก โดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์จาก load-displacement curve ชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แบบจำลองดิน HSM นั้นให้ผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมที่เกิดขึ้นในสนามมากที่สุด เนื่องจากสติเฟนสของดินแปรผันตามความเค้นที่เกิดขึ้นในดิน โดยในช่วงแรกสติเฟนสของดินสูงมาก ส่งผลให้เสาเข็มมีการเคลื่อนตัวน้อย และในช่วงท้ายเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวสูงมากเนื่องจากผลการแตกร้าวหรือการครากของเสาเข็ม ส่งผลให้สติเฟนสของดินต่ำมาก ส่วนกรณีที่จำลองด้วยแบบจำลองดิน MC ทั้งแบบสติเฟนสคงที่ตลอดชั้นดินและแบบสติเฟนสแปรผันตามความลึกนั้นให้ผลวิเคราะห์ที่สอดคล้องกับผลทดสอบในสนามในช่วงแรกที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน โดยเป็นช่วงแรงกระทำที่เสาเข็มยังไม่เกิดการแตกร้าวและมีการเคลื่อนตัวน้อย ซึ่งใกล้เคียงกับโครงสร้างใต้ดินที่มีการใช้งานโดยทั่วไป เช่น soil cement column, pile wall, และ diaphragm wall เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน MCCS และ MCVS พบว่าการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนามมาก ซึ่งผลการวิเคราะห์ด้วย FEM โดยแบบจำลองดินทั้ง 3 รูปแบบนั้นมีความใกล้เคียงกันก็ต่อเมื่อเสาเข็มมีการเคลื่อนตัวน้อยมากซึ่งอยู่ในช่วงเสาเข็มยังมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง

4.4 อิทธิพลความละเอียดของตาข่ายวิเคราะห์

สำหรับการจำลองเสาเข็มรับแรงกระทำด้านข้างตั้งแต่แรงกระทำน้อยไปจนถึงแรงกระทำมาก ที่ส่งผลให้เสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัยหรือใกล้เกิดการวิบัติ นั้น งานวิจัยนี้ได้เลือกผลวิเคราะห์ด้วยแบบจำลองดิน HSM มาใช้ในการศึกษา เนื่องจากผลวิเคราะห์มีความครอบคลุมถึงพฤติกรรมที่สภาวะประลัยของเสาเข็ม สำหรับการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มเดี่ยว F1 ดังรูปที่ 4.17 และรูปที่ 4.18 ซึ่งให้เห็นว่าผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมเมื่อเปรียบเทียบกับผลทดสอบในสนามนั้นขึ้นอยู่กับความละเอียดตาข่ายวิเคราะห์ (mesh resolution) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว F1 ที่แรงกระทำด้านข้างสูงสุด 1250 กิโลนิวตัน ดังรูปที่ 4.17 ซึ่งให้เห็นว่าความละเอียด fine mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ในขณะที่การวิเคราะห์ด้วย coarse mesh และ medium mesh ให้ผลการเคลื่อนตัวน้อยกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 100 มิลลิเมตร ส่วนกรณีของการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่มีแรงกระทำต่อเสาเข็มหนึ่งต้น สูงสุด 2000 กิโลนิวตันเมื่อพิจารณาที่แรงกระทำต่อ pile cap เท่ากับ 4000 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นแรงกระทำด้านข้างที่สูงมากจนเสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ผลวิเคราะห์ด้วย FEM ในรูปที่ 4.18 ของเสาเข็มกลุ่ม F2 นั้น พบว่าความละเอียด medium mesh ให้ผลที่มีความใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ต่างจากกรณีการวิเคราะห์ด้วยความละเอียด fine mesh ที่ให้ผลที่มีแนวโน้มการเคลื่อนตัวสูงกว่าผลทดสอบในสนามอย่างต่อเนื่อง ในขณะที่แรงกระทำเพิ่มขึ้นไม่มาก จึงต้องพิจารณาหยุดการคำนวณไว้ที่แรงกระทำประมาณ 3700 กิโลนิวตัน ส่วนเสาเข็มกลุ่ม F3 มีการเคลื่อนตัวน้อยกว่าเสาเข็มรูปแบบอื่น เนื่องจากเป็นเสาเข็มกลุ่มที่มีสติเฟนสูงมาก ส่งผลให้ความอ่อนไหวของความละเอียด FEM mesh ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งได้มีการศึกษาอิทธิพลของความละเอียดของตาข่ายวิเคราะห์ (mesh dependency) ในการจำลองด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยของ (De Borst et al., 1984), (Koutsabeloulis et al., 1989), และ (Dao, 2011) จากผลวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2 ในงานวิจัยนี้เห็นได้ว่าความละเอียด fine mesh ให้ค่าการเคลื่อนตัวสูงกว่าค่าที่ทดสอบได้ในสนาม เนื่องจากมีตำแหน่งของจุดความเค้น (stress point) สูงสุดที่เกิดขึ้นในการคำนวณนั้นไม่ตรงกับตำแหน่งที่มีความเค้นสูงสุดในสนาม ส่งผลให้การคำนวณสามารถดำเนินไปอย่างต่อเนื่องโดยไม่เกิดการวิบัติ ซึ่งผลการเคลื่อนตัวที่ได้ในระหว่างการวิเคราะห์นั้นเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง จำเป็นต้องหยุดการคำนวณเมื่อพบว่าผลการวิเคราะห์มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นอย่างไม่สอดคล้องกับผลทดสอบในสนาม จากนั้นนำผลวิเคราะห์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลวิเคราะห์ด้วยความละเอียด FEM mesh ที่แตกต่างกัน แล้วพิจารณาเลือกใช้ผลวิเคราะห์ที่เหมาะสมต่อไป ซึ่งความแตกต่างของผลวิเคราะห์นี้ชี้ให้เห็นถึงความอ่อนไหวของ FEM mesh ที่เลือกใช้ ในการวิเคราะห์ปัญหาด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์นั้นมีการกำหนด mesh ที่มีจำนวนของเอลิเมนต์ (element) และจุดต่อ (node) แตกต่างกัน สำหรับการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว F1 และการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2 นั้นมีจำนวนเอลิเมนต์, จำนวนจุดต่อ, และการเคลื่อนตัวสูงสุดดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 ตามลำดับ

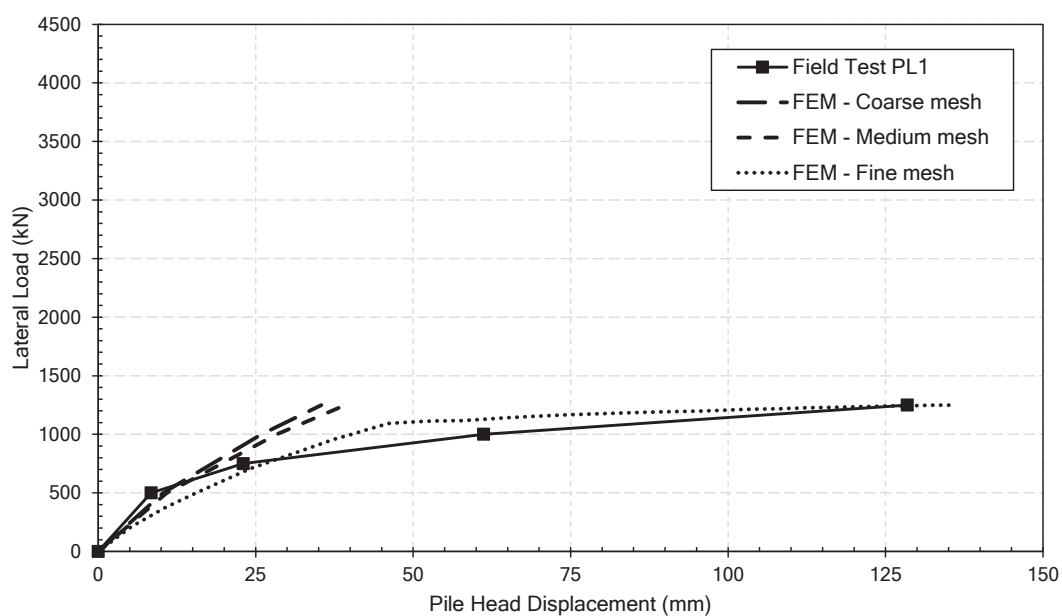
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มเดี่ยว F1

mesh type	number of nodes	number of elements	max. horizontal disp. at load 1250 kN (mm)
coarse	8391	5169	35.41
medium	17079	10872	39.20
fine	38299	25249	135.05

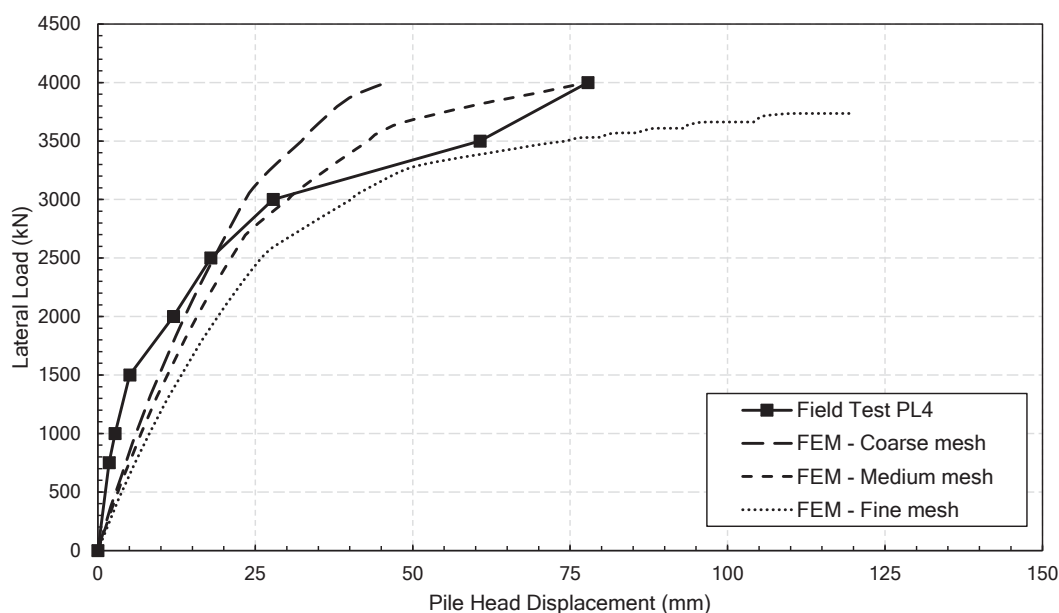
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบการจำลองความละเอียด mesh ของเสาเข็มกลุ่ม F2

mesh type	number of nodes	number of elements	max. horizontal disp. at load 4000 kN (mm)
coarse	13344	8314	45.85
medium	22207	14206	77.84
fine	43451	28585	119.97*

หมายเหตุ * คือ หยุดการคำนวณที่แรงกระทำ 3736 กิโลนิวตัน



รูปที่ 4.17 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว F1

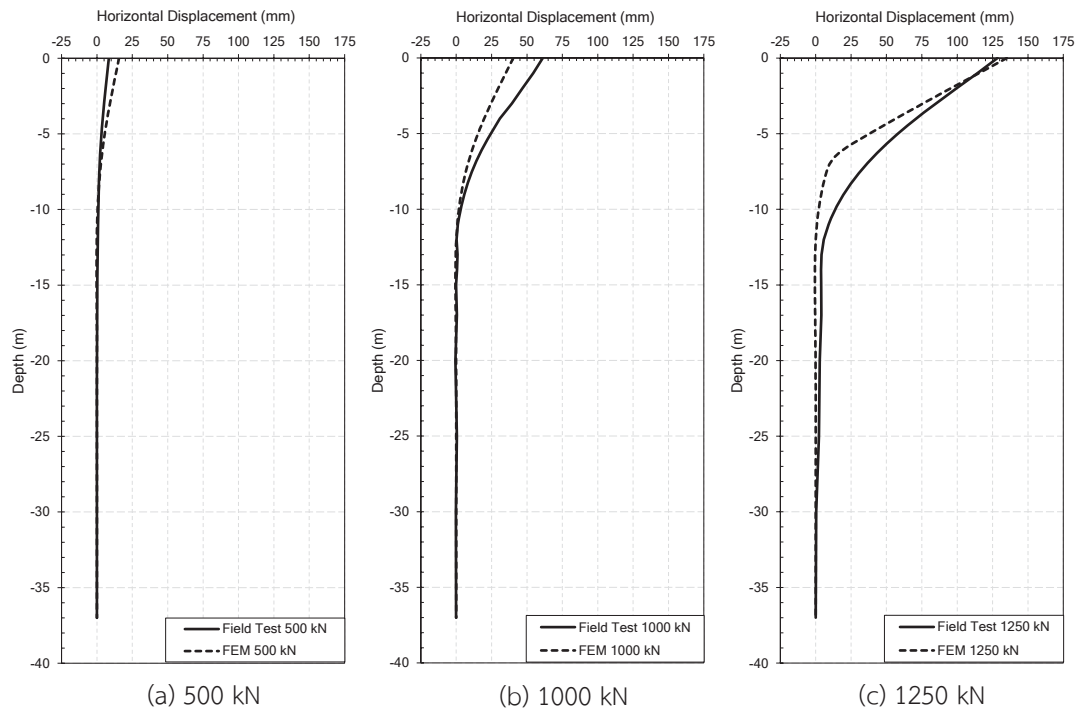


รูปที่ 4.18 ผลของ mesh dependency ของการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2

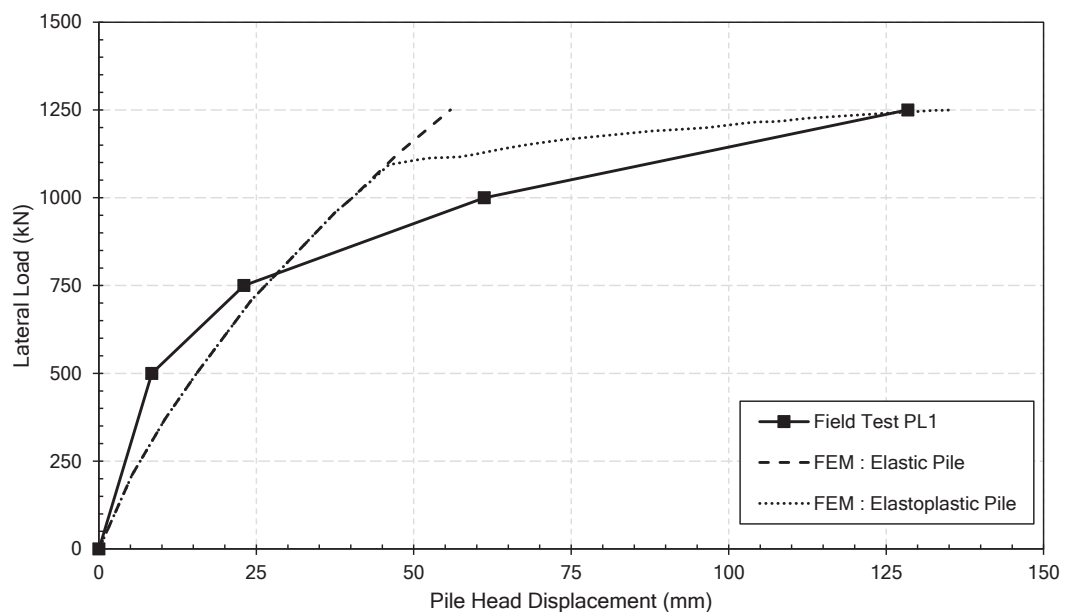
4.5 ผลการจำลองเสาเข็มเดี่ยวและเสาเข็มกลุ่มภายใต้แรงกระทำด้านข้าง

สำหรับกรณีของเสาเข็มเดี่ยว F1 พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM กับความละเอียด fine mesh ที่ให้ผลวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามที่พิจารณาเลือกตามการศึกษาจากหัวข้อที่ 4.4 นั้น ผลวิเคราะห์ที่ได้นั้นเป็นความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวของเสาเข็มแปรผันกับความลึกที่แรงกระทำ 500, 1000, และ 1250 กิโลนิวตันเทียบกับผลการโก่งตัวในสนาม ดังรูปที่ 4.19 พบว่าที่แรงกระทำ 500 กิโลนิวตัน การโก่งตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM มีค่ามากกว่าผลทดสอบในสนามเล็กน้อยประมาณ 5 มิลลิเมตร ส่วนที่แรงกระทำ 1000 กิโลนิวตัน ผลการวิเคราะห์ด้วย FEM มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 20 มิลลิเมตร ในขณะที่แรงกระทำสูงสุด 1250 กิโลนิวตัน นั้นผลวิเคราะห์ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลวิเคราะห์ที่ความลึกลงมาจากผิวดิน พบว่าผลวิเคราะห์ด้วย FEM ให้ผลการโก่งตัวที่ใกล้เคียงกับผลการโก่งตัวที่วัดได้ในสนาม และผลวิเคราะห์ยังชี้ให้เห็นถึงจุดตัดกลับที่ใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วัดได้ในสนามด้วย

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกระทำด้านข้างและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็ม (load-displacement curve) ของผลวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยวด้วย FEM ในรูปที่ 4.20 เห็นได้ว่าในช่วงแรกถึงแรงกระทำ 1200 กิโลนิวตัน เสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงเท่ากับผลวิเคราะห์ของเสาเข็มที่จำลองวัสดุแบบ elastic ถัดจากแรงกระทำดังกล่าวเสาเข็มมีหน่วยแรงเกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยแรงคราก ส่งผลให้เกิดการเคลื่อนตัวไม่เป็นเชิงเส้นตรง โดยความแตกต่างของการจำลอง EBE กับแบบจำลองวัสดุ elastoplastic และแบบจำลองวัสดุ elastic ให้ผลการเคลื่อนตัวที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตันที่ต่างกันประมาณ 80 มิลลิเมตร

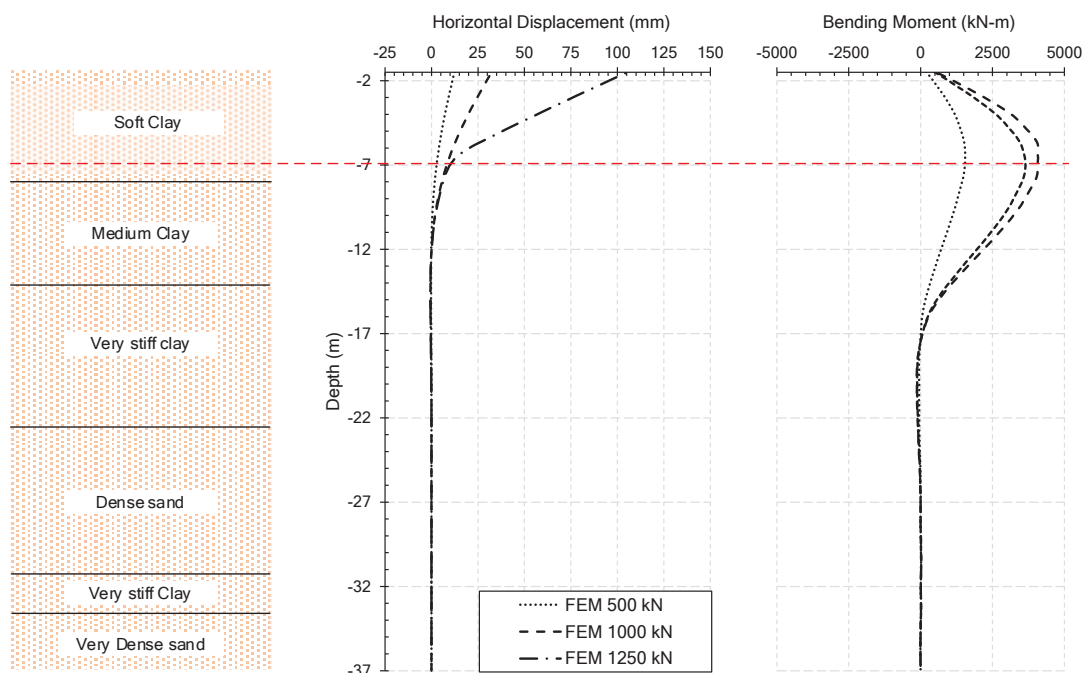


รูปที่ 4.19 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มเดี่ยว F1



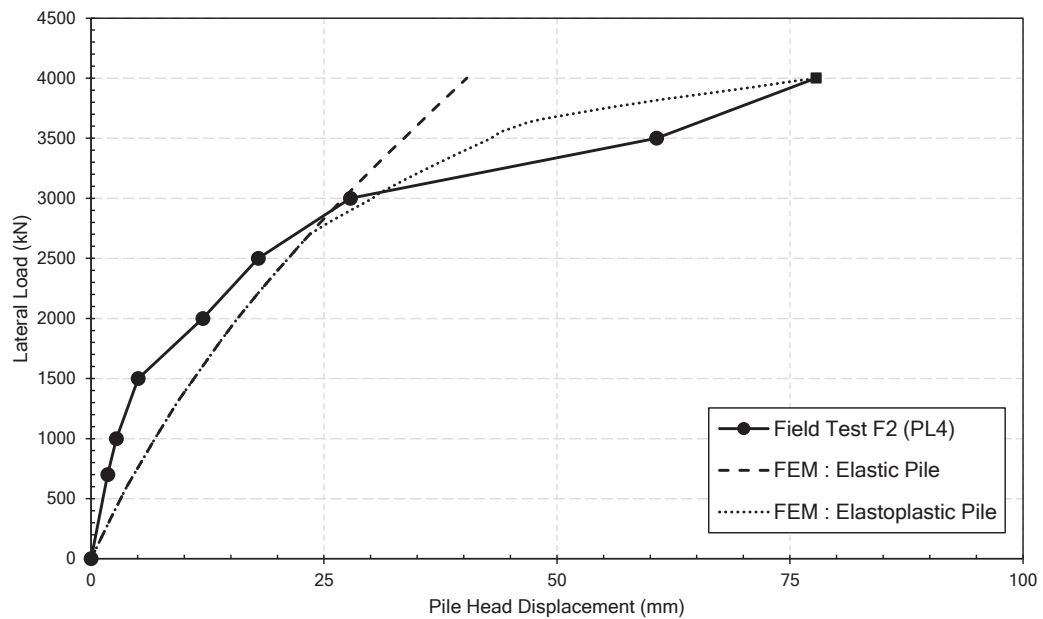
รูปที่ 4.20 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มเดี่ยว F1

สำหรับผลการวิเคราะห์เสาเข็มเดี่ยว F1 เมื่อพิจารณาโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นกับการโก่งตัวของเสาเข็มตลอดความยาว ดังรูปที่ 4.21 เห็นได้ว่าโมเมนต์ดัดมากที่สุดเกิดที่ระดับประมาณ -7 เมตรจากผิวดิน ซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน โดยเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว โดยผลวิเคราะห์มีโมเมนต์ดัดเกิดขึ้นสูงสุด 4090 กิโลนิวตัน-เมตร ที่แรงกระทำ 1250 กิโลนิวตัน

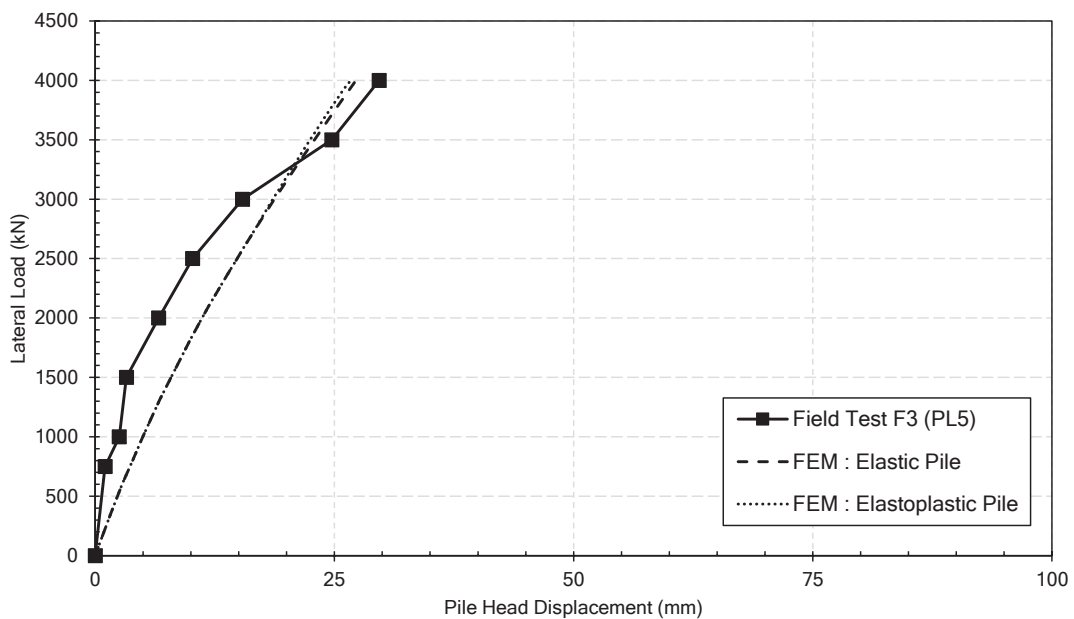


รูปที่ 4.21 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มเดียวกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็ม F1

สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 โดยผลการวิเคราะห์ด้วย FEM เป็นกราฟความสัมพันธ์ของแรงกระทำและการเคลื่อนตัวของหัวเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่วิเคราะห์ด้วยความละเอียด medium mesh ดังรูปที่ 4.22 เห็นได้ว่าลักษณะการเคลื่อนตัวของเสาเข็มในช่วงแรกมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงไปถึงแรงกระทำประมาณ 2800 กิโลนิวตัน เมื่อแรงกระทำสูงขึ้นพบว่าเสาเข็มมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้นตรงเนื่องจากหน่วยแรงที่เกิดขึ้นสูงกว่าหน่วยแรงครากของวัสดุเสาเข็ม และเสาเข็มมีพฤติกรรมเข้าสู่สภาวะประลัย ส่วนผลการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 ดังรูปที่ 4.23 นั้นพบว่าการเคลื่อนตัวสำหรับทุกแรงกระทำมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรง เนื่องจากผลของหน่วยแรงที่เกิดขึ้นน้อยกว่าหน่วยแรงครากที่กำหนดไว้ โดยแรงกระทำต่อต้นของเสาเข็มในกลุ่ม F3 น้อยกว่าเสาเข็มในกลุ่ม F2 กล่าวคือเมื่อพิจารณาที่แรงกระทำ 4000 กิโลนิวตันต่อ pile cap นั้นส่งผลให้แรงกระทำต่อเสาเข็มหนึ่งต้นของเสาเข็มในกลุ่ม F3 มีค่าประมาณ 1300 กิโลนิวตัน ในขณะที่แรงกระทำต่อเสาเข็มหนึ่งต้นของเสาเข็มในกลุ่ม F2 มีค่าประมาณ 2000 กิโลนิวตัน ซึ่งผลต่างจากแรงกระทำต่อต้นของเสาเข็มกลุ่ม F2 สูงกว่าเสาเข็มกลุ่ม F3 ยังเป็นกลไกที่ชี้ให้เห็นว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 นั้นเข้าสู่สภาวะประลัยก่อนเสาเข็มกลุ่ม F3



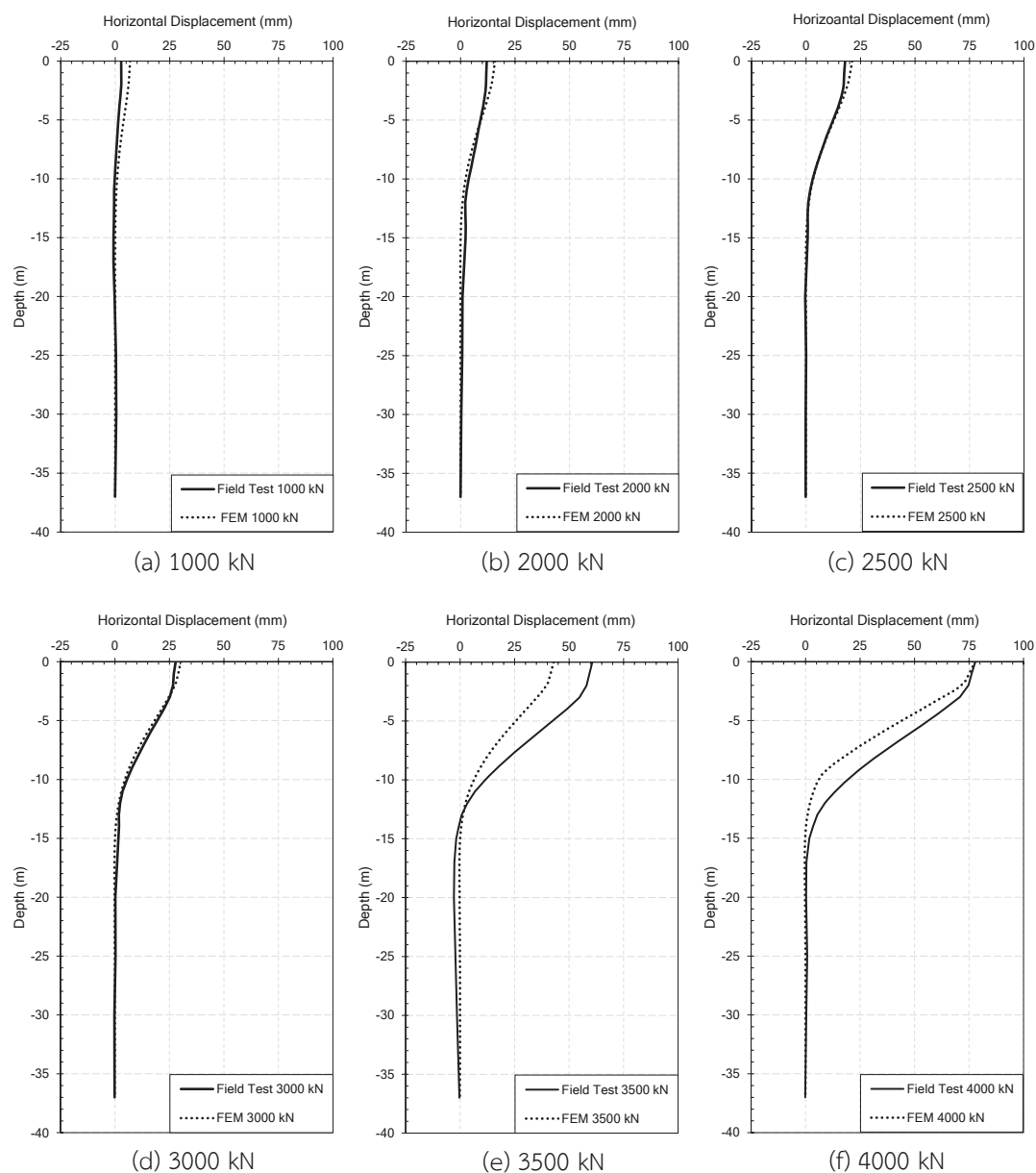
รูปที่ 4.22 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F2



รูปที่ 4.23 load-displacement curve ผลการวิเคราะห์ของเสาเข็มกลุ่ม F3

สำหรับผลการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F2 โดยใช้ความละเอียด medium mesh ซึ่งพิจารณาใช้ตามการศึกษาในหัวข้อที่ 4.4 นั้นพบว่าแรงกระทำด้านข้าง 1000, 2000, 2500, 3000, 3500, และ 4000 กิโลนิวตัน ความสัมพันธ์ระหว่างการโก่งตัวที่เกิดขึ้นของเสาเข็มกับแรงกระทำ ดังรูปที่ 4.24 เห็นได้ว่าที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของเสาเข็มมีผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนาม ในขณะที่แรงกระทำ 3500 ถึง 4000 กิโลนิวตัน การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วย FEM มีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนาม โดยที่แรงกระทำ 3500

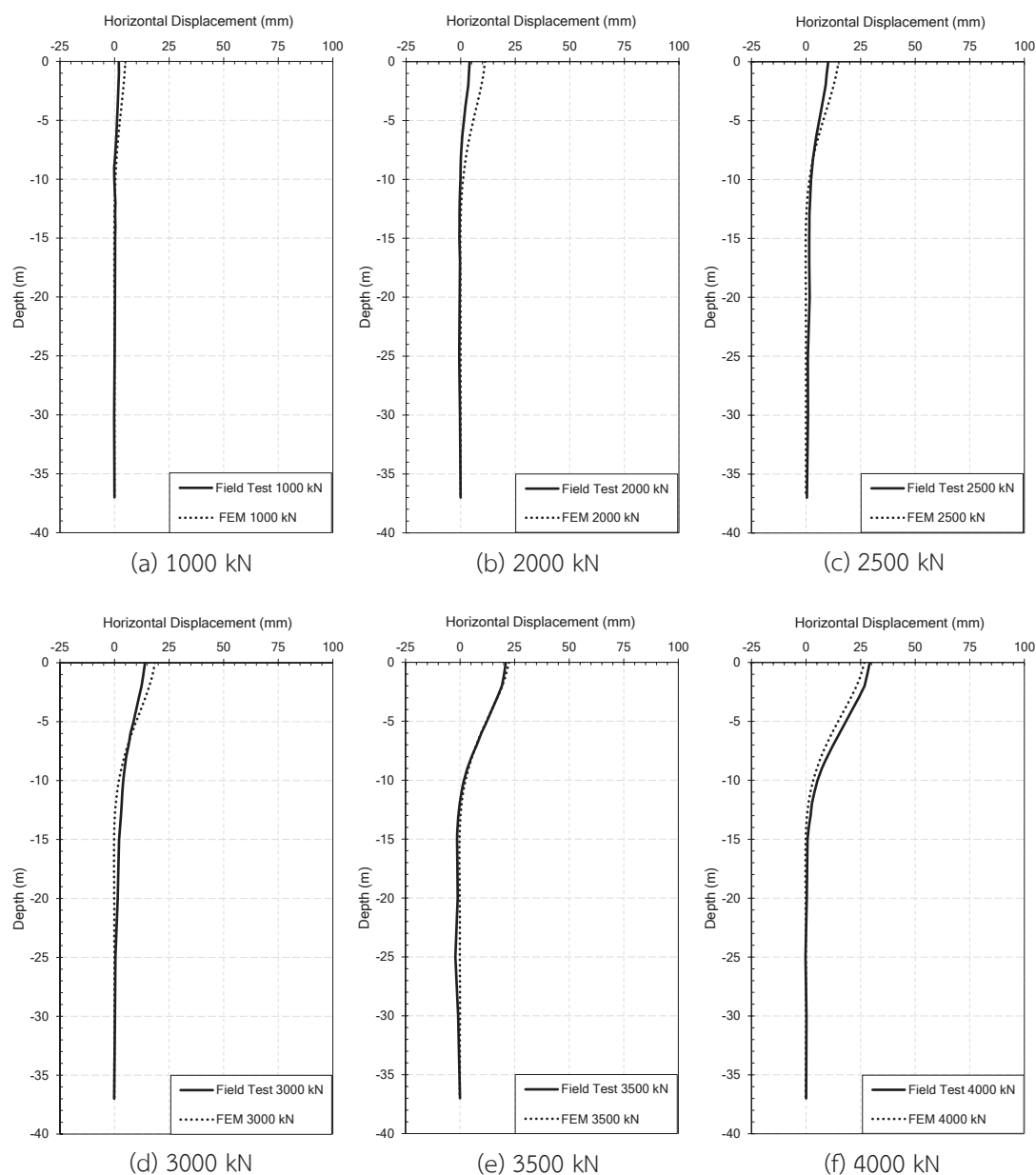
กิโลนิวตันให้ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวน้อยกว่าผลทดสอบในสนาม 18 มิลลิเมตร เนื่องจากเป็นช่วงที่พฤติกรรมของเสาเข็มเข้าสู่สภาวะประลัย ส่งผลให้ผลวิเคราะห์ที่ได้มีความอ่อนไหว ส่วนตำแหน่งของจุดดัดกลับที่ได้จากการวิเคราะห์ยังคงมีค่าใกล้เคียงกับตำแหน่งที่วัดได้จากผลทดสอบในสนาม



รูปที่ 4.24 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F2

สำหรับผลการวิเคราะห์เสาเข็มกลุ่ม F3 โดยใช้ความละเอียด medium mesh เช่นเดียวกับเสาเข็มกลุ่ม F2 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวพบว่าที่แรงกระทำด้านข้าง 1000, 2000, 2500, 3000, 3500, และ 4000 กิโลนิวตันเช่นเดียวกับเสาเข็มกลุ่ม F2 การโก่งตัวของเสาเข็มที่แปรผันกับความลึกดังรูปที่ 4.25 เห็นว่าผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ที่แรงกระทำ 1000 ถึง 3000 กิโลนิวตันนั้นให้ผลวิเคราะห์ผลการโก่งตัวที่สูงกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 7 มิลลิเมตร ขณะที่แรงกระทำ

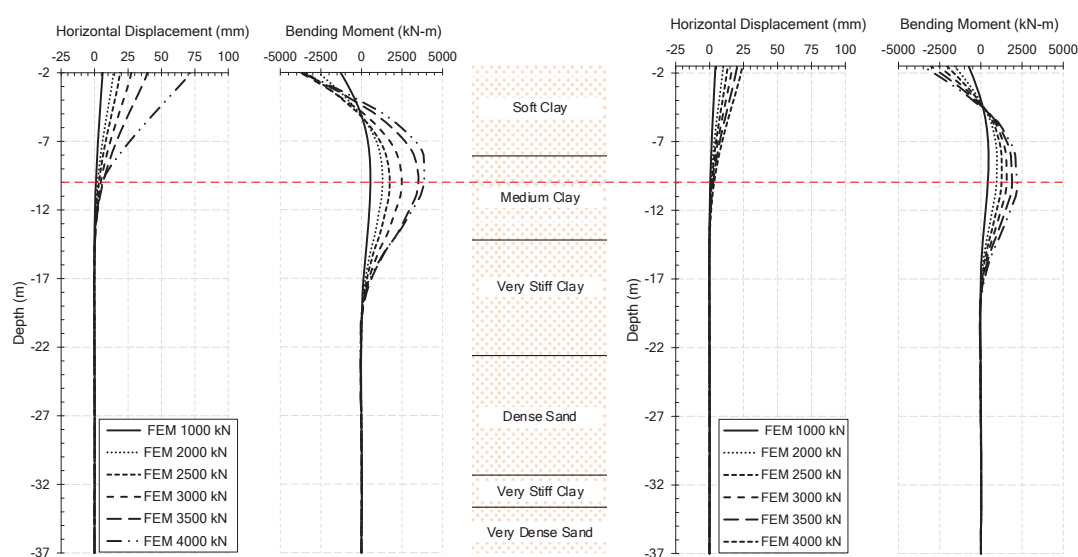
4000 กิโลนิวตันนั้นให้ผลวิเคราะห์การโก่งตัวที่น้อยกว่าผลทดสอบในสนามประมาณ 5 มิลลิเมตร และตำแหน่งของจุดดัดกลับที่ได้จากผลวิเคราะห์อยู่บริเวณใกล้เคียงกับตำแหน่งของผลทดสอบในสนาม หากพิจารณาผลวิเคราะห์ด้วย FEM ที่มีพฤติกรรมอยู่ในช่วงเส้นตรงนั้น ชี้ให้เห็นว่าพฤติกรรมของเสาเข็มที่อยู่ในช่วงดังกล่าวนี้ให้ผลการวิเคราะห์ที่เหมาะสมและไม่มีความอ่อนไหวของผลทดสอบซึ่งแตกต่างจากพฤติกรรมของเสาเข็มกลุ่ม F2



รูปที่ 4.25 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวเสาเข็มเทียบกับผลทดสอบในสนามของเสาเข็มกลุ่ม F3

สำหรับผลวิเคราะห์การโก่งตัวของเสาเข็มที่แปรผันกับความลึกและโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นที่แรงกระทำด้านข้าง 1000, 2000, 2500, 3000, 3500, และ 4000 กิโลนิวตัน สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F2 และ F3 ดังรูปที่ 4.26(a) และ 4.26(b) ตามลำดับ พบว่าโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นมีลักษณะแตกต่างจาก

เสาเข็มเดี่ยว โดยเกิดโมเมนต์ดัดที่สูงจำนวน 2 ตำแหน่ง คือ ระดับประมาณ -10 เมตรจากผิวดินซึ่งอยู่ในชั้นดินเหนียวแข็งปานกลาง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว และอีกตำแหน่งคือ บริเวณผิวดินใต้ pile cap ที่ระดับ -1.5 ถึง -2 เมตร จากผลการยึดรั้งหัวเสาเข็มในกลุ่มด้วย pile cap นั้นส่งผลต่อพฤติกรรมการรับแรงด้านข้างของเสาเข็มอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือ เกิดโมเมนต์ดัดที่จุดดังกล่าวจากผลของการยึดรั้งที่ส่งผลให้หัวเสาเข็มในกลุ่มไม่สามารถเกิดการหมุน (rotation) ได้อย่างอิสระเช่นเดียวกับกรณีของเสาเข็มเดี่ยว



(a) เสาเข็มกลุ่ม F2

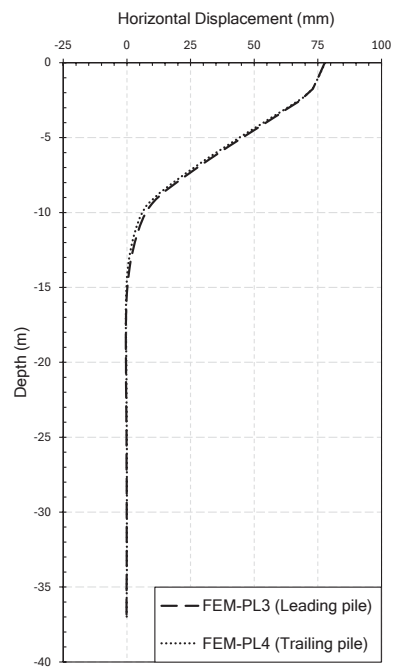
(b) เสาเข็มกลุ่ม F3

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบการโก่งตัวของเสาเข็มกลุ่มกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้น

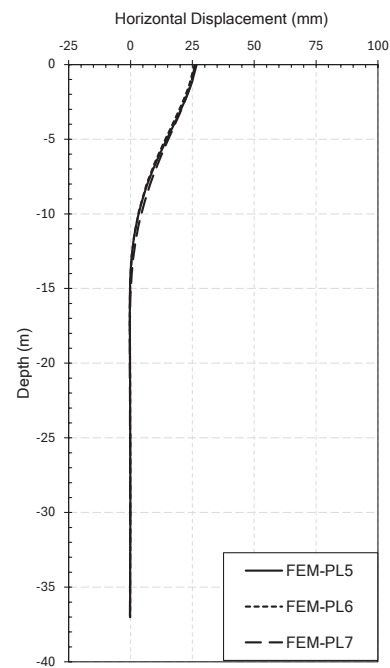
4.6 ผลของระยะห่างระหว่างเสาเข็มในกลุ่ม

ผลวิเคราะห์การโก่งตัวสูงสุดของเสาเข็มตามความลึกที่แรงกระทำด้านข้างต่อ pile cap เท่ากับ 4000 กิโลนิวตัน ดังรูปที่ 4.27 เป็นผลการวิเคราะห์ด้วย FEM ของเสาเข็มกลุ่ม F2 ที่ประกอบไปด้วยเสาเข็มต้นนำ (leading pile) หมายเลข PL3 และเสาเข็มต้นตาม (trailing pile) หมายเลข PL4 ที่เป็นการจัดเรียงแบบ in-line สำหรับเสาเข็มกลุ่ม F3 เป็นการจัดเรียงรูปแบบผสมระหว่าง side-by-side และ in-line โดยเสาเข็มทั้งสองกลุ่มนั้นมีระยะห่างระหว่างจุดศูนย์กลางเสาเข็มในกลุ่มด้วยกันเท่ากับ 3 เท่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเสาเข็ม (3D center-to-center) ส่วนรูปที่ 4.28 เป็นผลวิเคราะห์แบบภาพตัดแสดงการเคลื่อนที่ของดินที่บริเวณระนาบใต้ pile cap ที่ระดับ -2 เมตรจากผิวดิน ที่แรงกระทำเดียวกัน ซึ่งชี้ให้เห็นอย่างชัดเจนถึงการเคลื่อนที่ของดินและเสาเข็มในกลุ่มแต่ละต้นไม่มีการเคลื่อนตัวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากความแข็งแกร่งจากการยึดรั้งหัวเสาเข็มด้วย pile cap นอกจากนี้ยังพบอีกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 เกิดผลกระทบของ shadow effect อย่างชัดเจน ในขณะที่เสาเข็มกลุ่ม F3 นั้นพบ shadow effect ที่แผ่ขยายอิทธิพลน้อยกว่า F2 เนื่องจากการเคลื่อนตัวของเสาเข็มกลุ่ม F3 น้อยกว่าเสาเข็มกลุ่ม F2 โดยการเคลื่อนตัวของดินและเสาเข็มนั้นมี

ค่าสูงมากบริเวณใกล้ตำแหน่งของเสาเข็ม และการเคลื่อนตัวดังกล่าวมีค่าลดลงเมื่อมีระยะห่างจากตำแหน่งเสาเข็มออกไป

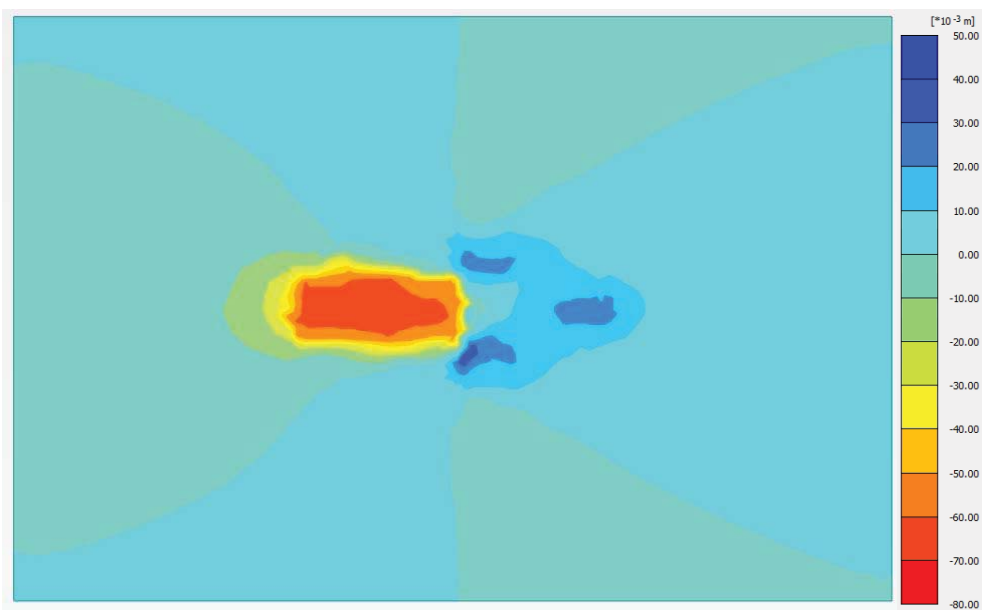


(a) เสาเข็มกลุ่ม F2



(b) เสาเข็มกลุ่ม F3

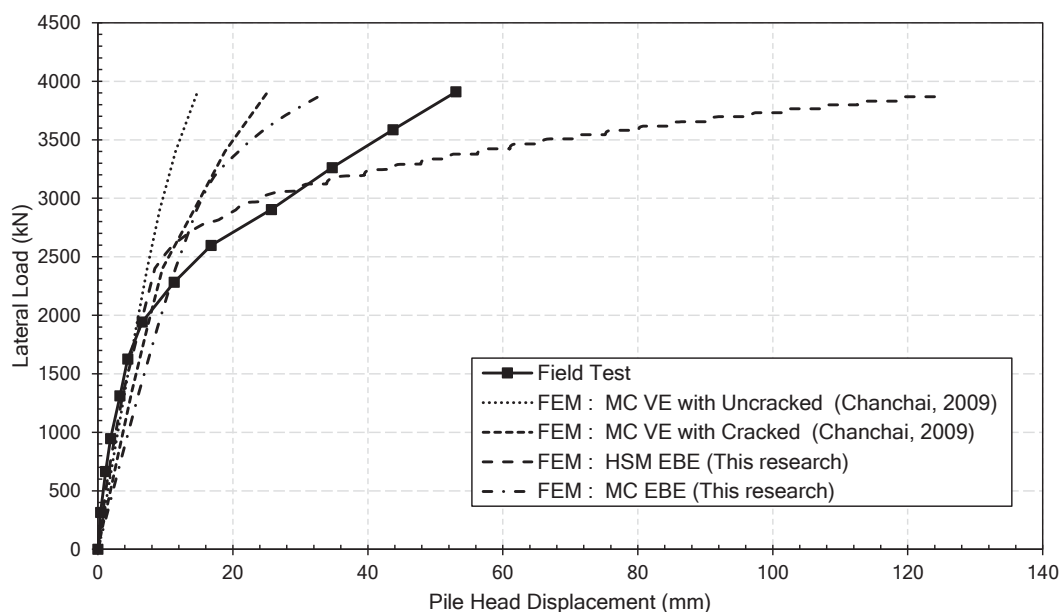
รูปที่ 4.27 ผลวิเคราะห์ FEM สำหรับอิทธิพลระยะห่างของเสาเข็มกลุ่ม



รูปที่ 4.28 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของดินใต้ pile cap

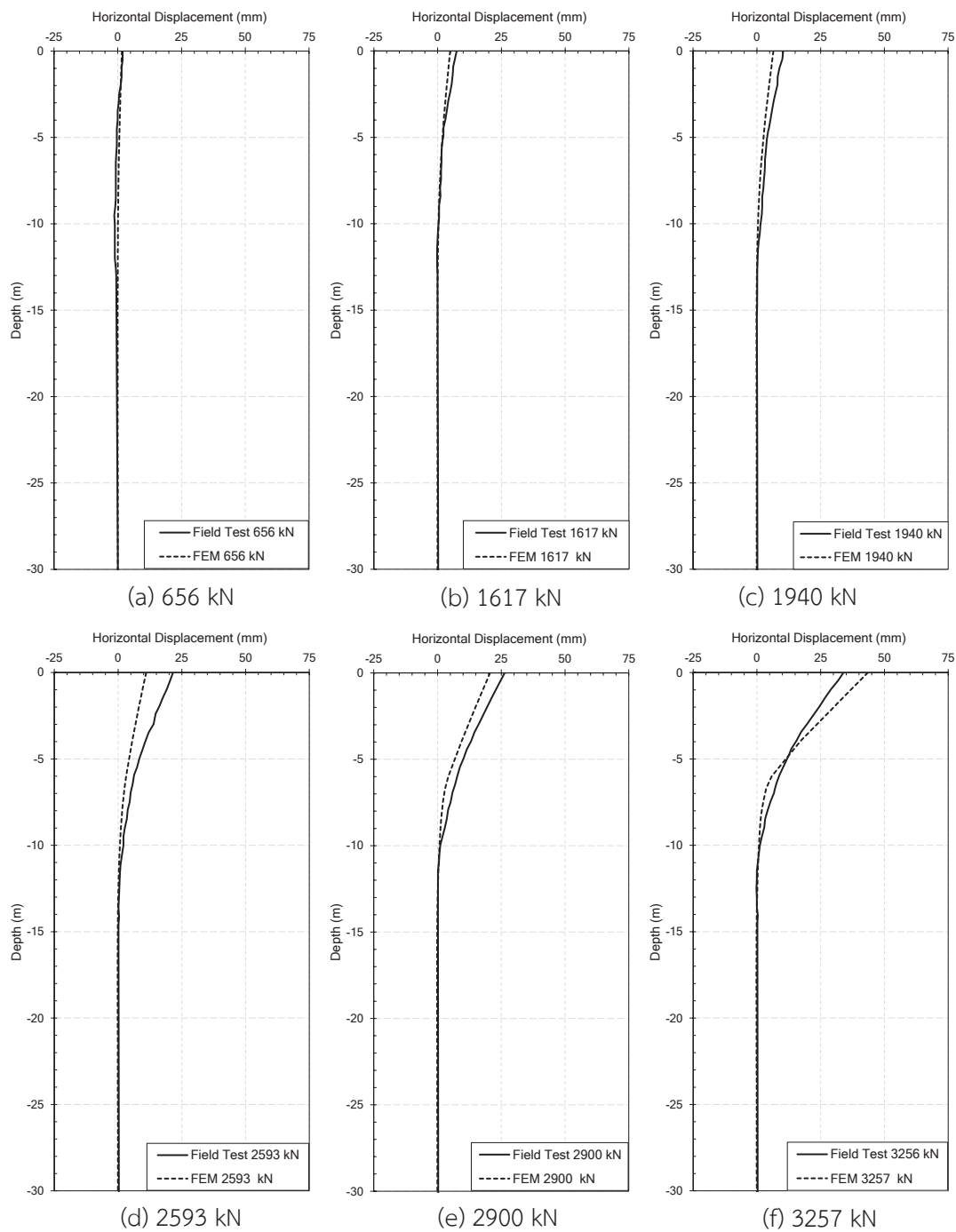
4.7 การประยุกต์ใช้ EBE กับเสาเข็มแบบเรีต

สำหรับผลการวิเคราะห์พฤติกรรมของเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวที (TB) โดยการจำลองเสาเข็มด้วย EBE และกำหนดคุณสมบัติของเสาเข็มแบบเรีตรูปตัวทีเป็นตามทีระบุไว้ในหัวข้อที่ 3.5.2 โดยในรูปที่ 4.29 เป็นผลการวิเคราะห์โดยให้แรงกระทำตั้งแต่ 300 กิโลนิวตันไปจนถึง 3900 กิโลนิวตัน พบว่าช่วงแรงกระทำที่น้อยกว่า 2500 กิโลนิวตัน ผลการจำลองเสาเข็มด้วย EBE กับแบบจำลองดิน HSM ที่ใช้สตีเฟนของดินเทียบเท่ากับแบบจำลองดิน MC ในงานวิจัยของ (Submaneeewong, 2009) ดังที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ 3.5 นั้น ผลการทดสอบในสนามชี้ให้เห็นว่าการโก่งตัวของเสาเข็มแบบเรีต TB มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับเสาเข็มเจาะกลม ผลวิเคราะห์จากการจำลองเสาเข็มด้วย EBE โดยใช้ medium mesh นั้นได้ค่าใกล้เคียงกับผลการวิเคราะห์ที่จำลองเสาเข็มด้วย VE ที่พิจารณาการแตกร้าวโดยลดสตีเฟนของเสาเข็มโดยใช้แบบจำลองดิน MC ที่กล่าวไว้ในงานวิจัยเดียวกัน โดยเสาเข็มมีพฤติกรรมเชิงเส้นตรงไปจนถึงแรงกระทำประมาณ 2500 กิโลนิวตัน และเมื่อมีแรงกระทำสูงขึ้นพบว่า ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวนั้นใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามมากขึ้น จนกระทั่งแรงกระทำประมาณ 3200 กิโลนิวตัน ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่สูงกว่าผลทดสอบในสนามมาก



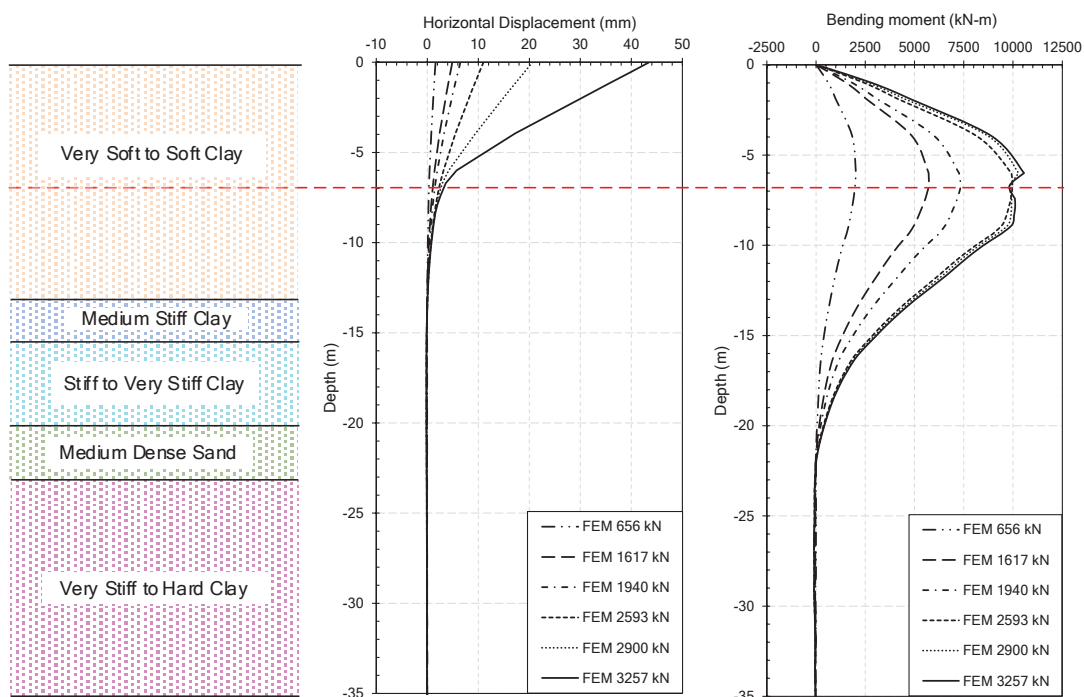
รูปที่ 4.29 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวด้วย FEM ของเสาเข็ม TB

ผลวิเคราะห์การโก่งตัวที่สอดคล้องกับการเคลื่อนตัวของเสาเข็มที่กล่าวไว้ในรูปที่ 4.29 นั้น พบว่าการโก่งตัวที่เกิดขึ้นนั้นจะใกล้เคียงกับผลทดสอบในสนามเมื่อแรงกระทำน้อย ในขณะที่แรงกระทำเพิ่มขึ้น พบว่าผลวิเคราะห์ที่ได้นั้นมีค่าน้อยกว่าผลทดสอบในสนาม 10 มิลลิเมตร ซึ่งการโก่งตัวเกิดขึ้นที่ผิวดินจนถึงระดับประมาณ -10 เมตร ดังรูปที่ 4.30



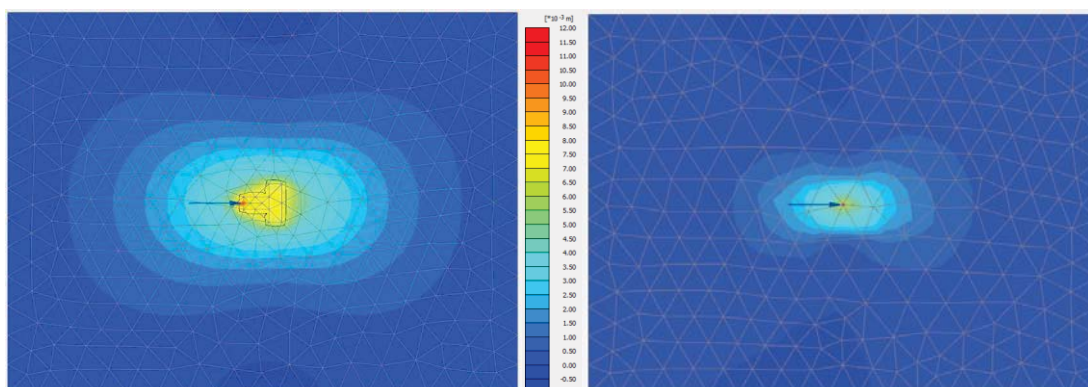
รูปที่ 4.30 ผลวิเคราะห์การโก่งตัวด้วย FEM ของเสาเข็ม TB

ผลวิเคราะห์การโก่งตัวและโมเมนต์ดัดตามความลึกที่เกิดขึ้นในช่วงที่ผลสอดคล้องกับผลทดสอบในสนาม พบว่า เสาเข็ม TB เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุดที่ระดับ -7 เมตร อยู่ในชั้นดินเหนียวอ่อน ซึ่งเป็นตำแหน่งที่เสาเข็มเริ่มเกิดการโก่งตัว ผลวิเคราะห์เกิดโมเมนต์ดัดสูงสุด 10560 กิโลนิวตัน-เมตร ที่แรงกระทำ 3257 กิโลนิวตัน ดังรูปที่ 4.31



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบการโก่งตัวกับโมเมนต์ดัดที่เกิดขึ้นของเสาเข็ม TB

ส่วนผลวิเคราะห์จากการจำลองเสาเข็มด้วย VE และจำลองด้วย EBE ที่แรงกระทำ 1940 กิโลนิวตัน ดังในรูปที่ 4.32 พบว่าการจำลองเสาเข็มด้วย VE นั้นมีประสิทธิภาพต่อการเคลื่อนที่ของดินโดยรอบมีขอบเขตประมาณ 30 เมตร ในขณะที่การจำลองเสาเข็มด้วย EBE นั้นมีประสิทธิภาพถึงการเคลื่อนตัวของดินดังกล่าวลดลงมาเหลือขอบเขตประมาณ 20 เมตร ผลวิเคราะห์ดังกล่าวชี้ให้เห็นถึงความแตกต่างของการจำลองเอลิเมนต์เสาเข็มที่แตกต่างกัน



(a) volume element

(b) embedded beam element

รูปที่ 4.32 ผลวิเคราะห์การเคลื่อนตัวแวนอนด้วย FEM ของของเสาเข็ม TB