

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยบูรพา  
ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล)

ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554

ชื่อโครงการวิจัย

พฤติกรรมระยะยาวของท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อน

เลขที่ 10/2554

BH 0143304

29 มี.ค. 2555

โดย

เริ่มบริการ

301487

สยาม ยิ้มศิริ

28 พ.ค. 2555

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

สิงหาคม 2554

อภิรักษ์นาการ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระยะยาวระหว่างท่อและดินสำหรับปัญหาท่อที่วางตัวในร่องขุดที่ถมกลับด้วยทรายที่ฝังในดินเหนียวอ่อนด้วยการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สถานการณ์นี้มักจะพบในการวางท่อที่ใช้ในงานชลประทาน โดยจุดประสงค์สูงสุดของการศึกษานี้คือเพื่อเสนอวิธีการออกแบบท่อในกรณีดังกล่าวโดยพิจารณาภาวะที่จะเกิดขึ้นในระยะยาว โดยจะศึกษาผลกระทบของมิติของร่องขุด, ความสำคัญของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายในร่องขุดและดินเหนียวรอบๆ, และ ความสำคัญของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและดิน การศึกษานี้จะประเมินความเหมาะสมของเทคนิคและวิธีดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหานี้

## ABSTRACT

Finite element analysis is performed in this study to investigate the long-term pipeline-soil interaction of a pipe buried in sand trench embedded in soft clay. This situation is often encountered for pipes used for irrigation purpose. The effects of trench dimensions, the importance of modelling interface between sand backfill and clay trench, and the importance of modelling construction sequences on the pipeline-soil interaction are investigated. The investigation also includes assessment of suitable numerical simulation techniques and procedures for this kind of problem. The ultimate aim is to propose a better pipeline design method for long-term condition.

## บทสรุปสำหรับผู้บริหาร

ในสมัยก่อนท่อส่งน้ำอุปโภค-บริโภคเพื่อใช้ในการเกษตรจะใช้ท่อคอนกรีต ต่อมามีการใช้ท่อเหล็ก และท่อพลาสติกเนื่องจากผลิตได้ง่ายกว่าและก่อสร้างได้รวดเร็วกว่า การใช้ท่อเหล็กจะเป็นท่อใหญ่และบาง ทำให้มีปัญหาในเรื่อง flexibility ในกรณีนี้การพิจารณา interaction ระหว่างท่อและดินรอบๆ จะมีความสำคัญมาก นอกจากนั้นโดยทั่วไปท่อที่จะฝังในชั้นดินเหนียวอ่อนจะต้องวางตัวในคูดินทรายทำให้ interaction ระหว่างท่อกับดินมีความซับซ้อนมากขึ้น

การออกแบบท่อและคูดินทรายสำหรับท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อนนั้นจะอาศัยประสบการณ์เป็นหลักเนื่องจากยังไม่มีข้อเสนอแนะมากพอในการพิจารณาออกแบบ การก่อสร้าง โดยทั่วไปจะทำเหมือนกับโครงการก่อนๆ ที่ได้ปฏิบัติกันมา หากมีการออกแบบก็จะเป็นการออกแบบอย่างง่ายโดยใช้พฤติกรรมการรับแรงของดินในระยะสั้น ได้มีความสนใจอย่างมากในการวิบัติของ flexible pipe และ Baikie & Meyerhof (1982) ได้สรุปวิธีที่จะประมาณการวิบัติ อย่างไรก็ตาม ข้อกำหนดในการออกแบบท่อต้องจะมี service life มากกว่า 50 ปี จะเห็นว่าข้อมูลของพฤติกรรมของท่อในสภาพดังกล่าวในระยะยาวยังมีน้อยมาก ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่ต้องพิจารณาอย่างละเอียดถึงพฤติกรรมระยะยาวของท่อในสภาพดังกล่าว จุดประสงค์ของโครงการวิจัยนี้คือจำลองพฤติกรรมของท่อฝังในคูดินภายใต้ gravity load โดยสังเกตพฤติกรรมระยะยาวเพื่อให้มีความเข้าใจในสภาพดังกล่าวมากขึ้น

## คำนำ

โครงการนี้สนใจพฤติกรรมระยะยาวของท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อนโดยการศึกษาเป็นการคำนวณเชิงตัวเลข การศึกษานี้สนใจพฤติกรรมของท่อเหล็ก flexible pipe ขนาดใหญ่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1000 มม วางตัวในคูดินทรายแน่นปานกลางถึงแน่นมาก และฝังตัวในชั้นดินเหนียวอ่อนเพราะจะเป็นสภาพจริงในการก่อสร้างสำหรับท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อนในภาคกลางของประเทศไทย การคำนวณจะทำที่มิติของคูดินต่าง ๆ และเทคนิคการวิเคราะห์ต่าง ๆ จุดมุ่งหมายสูงสุดคือการแนะนำการออกแบบท่อในระยะยาวและมิติของคูดินที่เหมาะสม

โครงการวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการวิจัยงบประมาณเงินรายได้ (เงินอุดหนุนจากรัฐบาล) ปีงบประมาณ พ.ศ. 2554 (เลขที่ 10/2554) จากมหาวิทยาลัยบูรพา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	i
บทสรุปสำหรับผู้บริหาร	ii
คำนำ	iii
สารบัญ	iv
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
<b>บทที่ 2 ท่อใต้ดินเพื่องานด้านการชลประทาน</b>	
2.1 มาตรฐานการดำเนินการที่แนะนำโดย ASTM	2
2.2 คุณสมบัติที่ทำการศึกษา	3
2.2.1 มิติของร่องขุด	3
2.2.2 ผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว	4
2.2.3 ขั้นตอนการก่อสร้าง	5
<b>บทที่ 3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์</b>	
3.1 ทัวไป	6
3.2 แบบจำลองดิน	7
3.2.1 แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb	7
3.2.2 แบบจำลองดินแบบ Clay plasticity	10
3.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์	12
3.3.1 ท่อ	12
3.3.2 ทรายถมกลับ	13
3.3.3 ดินเหนียว	13
3.3.4 ผิวสัมผัสระหว่างท่อและทรายถม (จำลองในทุกกรณี)	13
3.3.5 ผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว (เมื่อมีการจำลอง)	14
3.4 วิธีการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	14
3.4.1 กรณีไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง	14
3.4.2 กรณีมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง	15
3.4.3 Dummy element	16
3.5 โปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์	16

---

**บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์**

4.1 ผลกระทบของมิติของร่องชุด	20
4.2 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว	24
4.3 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง	29

**บทที่ 5 บทสรุป** 34

เอกสารอ้างอิง	35
ภาคผนวก ก	36
ภาคผนวก ข	53

## บทที่ 1 บทนำ

งานวิจัยนี้ศึกษาปฏิสัมพันธ์ระยะยาวระหว่างท่อและดินสำหรับปัญหาท่อที่วางตัวในร่องซุดที่ถมกลับด้วยทรายที่ฝังในดินเหนียวอ่อนด้วยการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ สถานการณ์นี้มักจะพบในการวางท่อที่ใช้ในงานชลประทาน โดยจุดประสงค์สูงสุดของการศึกษานี้คือเพื่อเสนอวิธีการออกแบบท่อในกรณีดังกล่าวโดยพิจารณาภาวะที่จะเกิดขึ้นในระยะยาว โดยจะศึกษาผลกระทบของมิติของร่องซุด, ความสำคัญของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายในร่องซุดและดินเหนียวรอบๆ, และ ความสำคัญของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและดิน การศึกษานี้จะประเมินความเหมาะสมของเทคนิคและวิธีดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของปัญหานี้

## บทที่ 2 ท่อใต้ดินเพื่องานด้านการชลประทาน

### 2.1 มาตรฐานการดำเนินการที่แนะนำโดย ASTM

ASTM ได้ให้คำแนะนำในการก่อสร้างท่อใต้ดินเพื่องานด้านการชลประทานใน ASTM F 690-86 Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pressure Piping Irrigation Systems โดยรูปหน้าตัดทั่วไปของงานขุดเพื่อวางท่อได้แสดงในรูปที่ 2-1 และแสดงส่วนประกอบที่สำคัญ โดยคำแนะนำของ ASTM นั้นสามารถสรุปได้ดังนี้:-

#### - ความกว้างของร่องขุด (Trench width):

ความกว้างของร่องขุดต้องมีช่องว่างเพียงพอและปลอดภัยสำหรับการวางแนวท่อและการเชื่อมต่อจุดต่อของท่อ โดยทั่วไปความกว้างของร่องขุดที่ส่วนบนควรจะกว้างกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อประมาณ 600 มม (2 ฟุต) จึงจะถือว่าเพียงพอ อย่างไรก็ตามสำหรับท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 475 มม (18 นิ้ว) และฝังอยู่ในร่องขุดที่มีผนังในแนวตั้งด้วย ร่องขุดควรจะมี ความกว้างมากกว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อประมาณ 1 ม (3 ฟุต)

#### - ชั้นรองท่อ (Bedding):

โดยทั่วไปชั้นรองท่อควรหนาประมาณ 100 ถึง 150 มม (4 ถึง 6 นิ้ว) จึงจะถือว่าเพียงพอ

#### - ความหนาขั้นต่ำของชั้นดินคลุมท่อ (Earth cover):

การกำหนดความหนาขั้นต่ำของชั้นดินคลุมท่อความจะพิจารณาถึงการป้องกันท่อจากแรงกระทำเนื่องจากการจราจร สำหรับท่อที่จะถูกกระทำโดยการจราจรปกติในพื้นที่เกษตรกรรม จะกำหนดความหนาขั้นต่ำของชั้นดินคลุมท่อดังนี้:-

ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 ถึง 2½ นิ้ว:	450 มม (18 นิ้ว)
ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ถึง 4 นิ้ว:	600 มม (24 นิ้ว)
ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 ถึง 18 นิ้ว:	750 มม (30 นิ้ว)
ท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางมากกว่า 18 นิ้ว:	900 มม (36 นิ้ว)

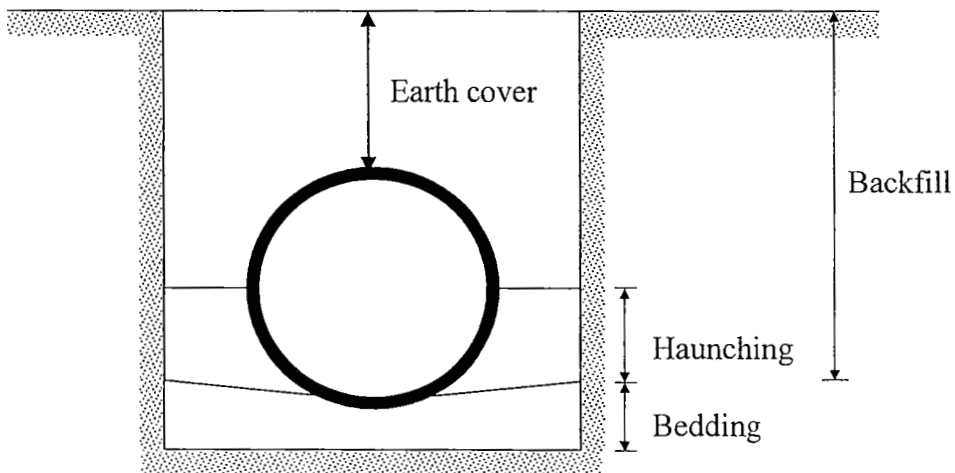
#### - วัสดุชั้นรองท่อ (Bedding material):

วัสดุชั้นรองท่อควรประกอบด้วย gravel, sand, silty sand, silty gravel, หรือ clayey sand และมีขนาดอนุภาคใหญ่สุดไม่เกิน 19 มม (3/4 นิ้ว)



- วัสดุถมกลับ (Backfill material):

วัสดุถมที่แนะนำมากที่สุดคือดินเม็ดหยาบ (coarse-grained soil) ที่มีส่วนละเอียดน้อยกว่า 5% เช่น clean gravel หรือ sand (ที่ไม่มี silt ปน) โดยถูกทำให้มีความหนาแน่นสูงสุดจะได้จากการรดน้ำ หรือการสั่นสะเทือน

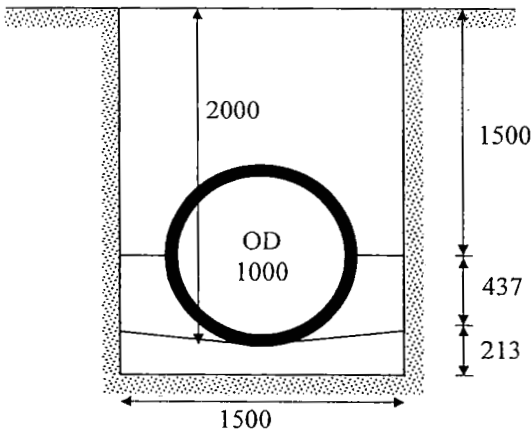


รูปที่ 2-1 รูปหน้าตัดของท่อและนิยามต่างๆ

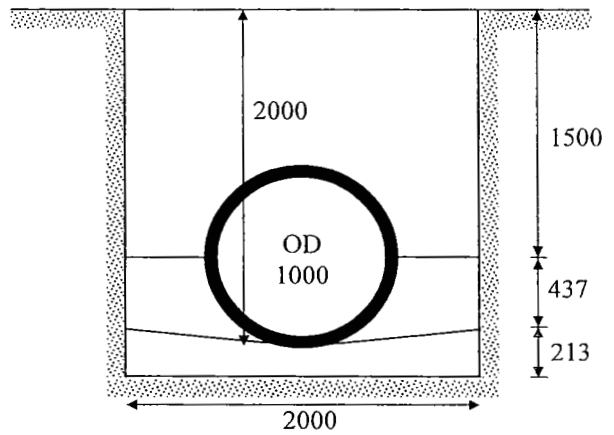
2.2 คุณสมบัติที่ทำการศึกษา

2.2.1 มิติของร่องขุด

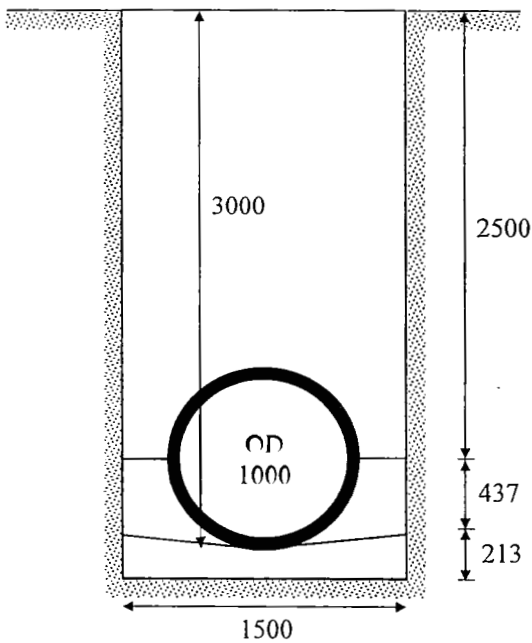
การศึกษาผลกระทบของมิติของร่องขุดต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและดินได้ดำเนินการโดยการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีที่มีความลึกของร่องขุดต่างๆ (ความลึก 2 ม และ 3 ม) และความกว้างของร่องขุดต่างๆ (1.5 ม และ 2.0 ม) กรณีศึกษาทั้ง 4 กรณีนี้ได้แสดงในรูปที่ 2-2 มิติของร่องขุดนี้เป็นไปตามคำแนะนำของ ASTM ที่ได้ให้ไว้ในหัวข้อ 2.1



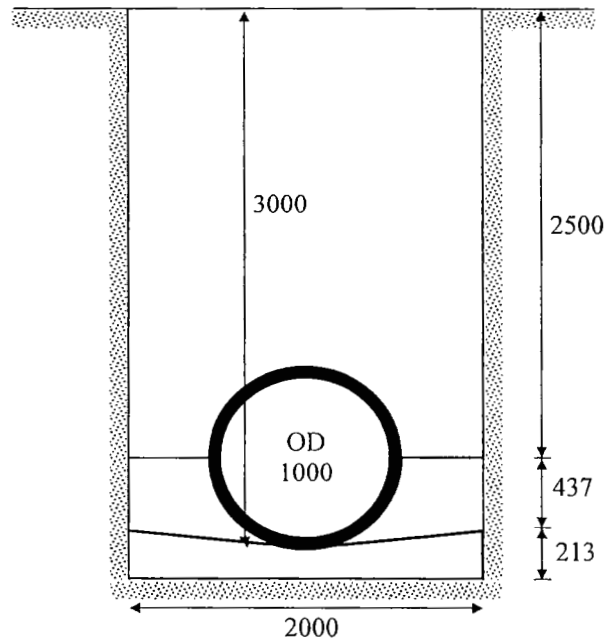
(a) ลึก 2.0 ม & กว้าง 1.5 ม



(b) ลึก 2.0 ม & กว้าง 2.0 ม



(c) ลึก 3.0 ม & กว้าง 1.5 ม



(d) ลึก 3.0 ม & กว้าง 2.0 ม

หน่วยเป็น มม

รูปที่ 2-2 มิติของร่องขุดในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

### 2.2.2 ผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว

การศึกษาความสำคัญของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมในร่องขุดและดินเหนียวรอบๆในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีที่มีการจำลองและไม่มีการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว การจำลองผิวสัมผัสนี้จะอนุญาต

ให้เกิดการเลื่อนไถลสัมพัทธ์ระหว่างทรายถมและดินเหนียว ผิวสัมผัสระหว่างท่อและทรายถมจะถูกจำลองในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เสมอในทุกกรณี

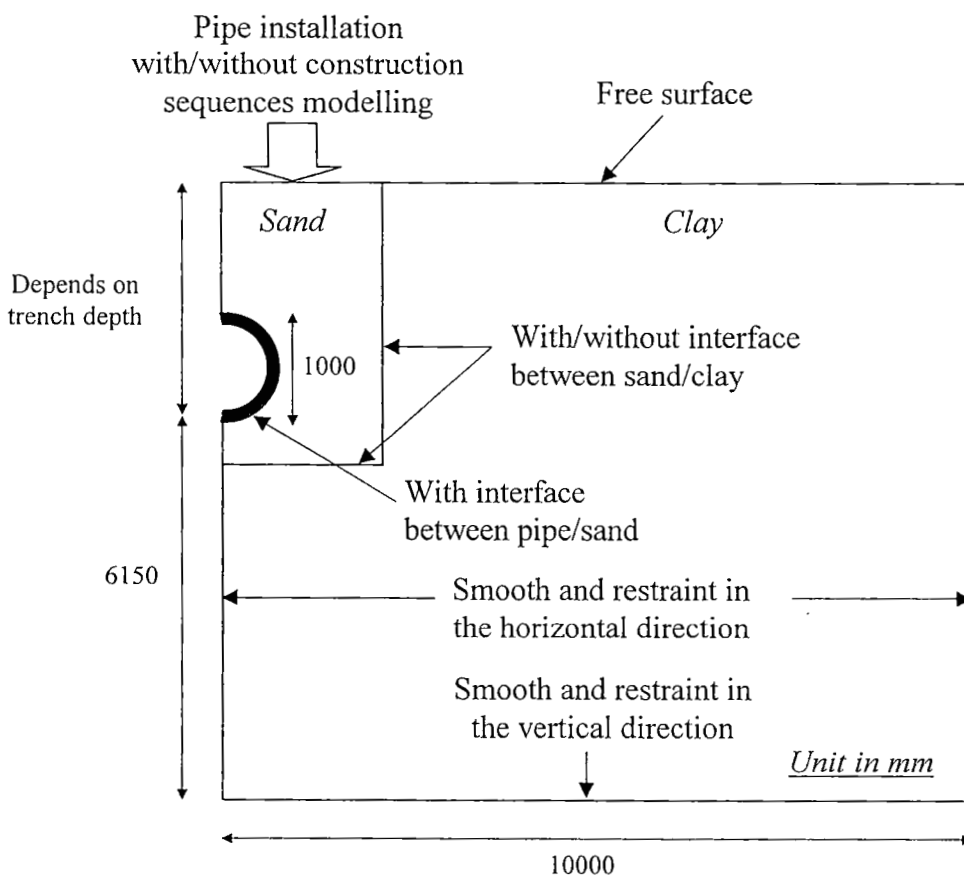
### 2.2.3 ขั้นตอนการก่อสร้าง

การศึกษาความสำคัญของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับกรณีการวิเคราะห์ที่มีการจำลองและไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง ในกรณีที่ไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างทรายถม (bedding, haunching, และ backfill) และท่อจะถูกสร้างในร่องขุดพร้อมกันในเวลาอันสั้น ในกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างการถมกลับของร่องขุดจะดำเนินการเป็นขั้นๆโดยการถม bedding และท่อ, haunching, และ backfill ตามลำดับ

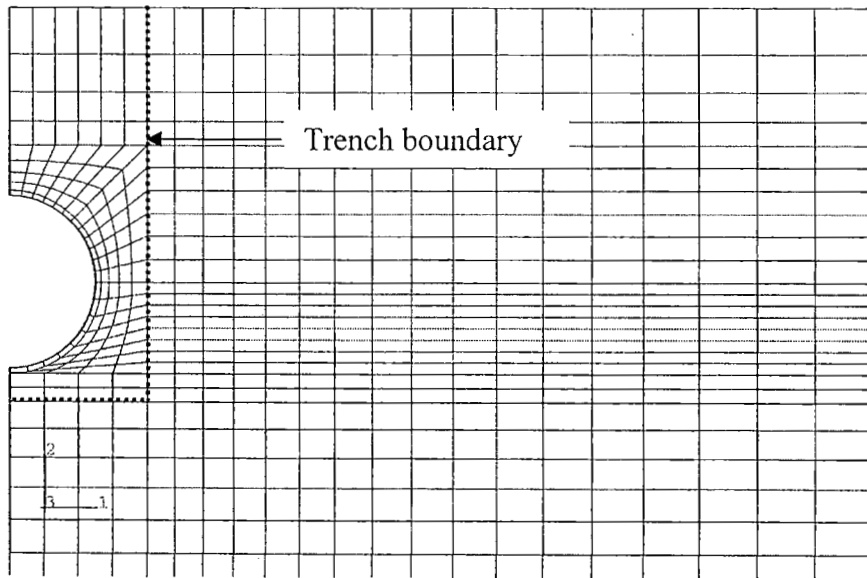
### บทที่ 3 การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

#### 3.1 ทัวไป

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ดำเนินการโดยใช้โปรแกรม ABAQUS รูปร่างทางเรขาคณิตและส่วนประกอบของ element ของแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ได้แสดงในรูปที่ 3-1 การวิเคราะห์ดำเนินการแบบ plane-strain condition สภาวะขอบเขตด้านข้างและด้านล่างสมมุติเป็นแบบเรียบและรับแรงในแนวตั้งฉากเท่านั้น และเนื่องจากความสมมาตรของปัญหาจึงจำลองแบบจำลองเพียงครึ่งหนึ่งของปัญหา ทรายถมและท่อจำลองด้วย 8-node biquadratic displacement, reduced integration continuum element และดินเหนียวจำลองด้วย 8-node biquadratic displacement, bilinear pore pressure, reduced integration continuum element พฤติกรรมของทรายถมได้จำลองโดยใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb และพฤติกรรมของดินเหนียวจำลองโดยใช้แบบจำลอง clay plasticity วัสดุที่เป็นท่อจำลองเป็น linear elastic material (ASTM F 679-86: type T-2) ปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและทรายถมรอบๆจำลองโดยใช้ surface-based contact โดยที่อนุญาตให้มีการเลื่อนไถลและการแยกออกจากกันระหว่างท่อและทรายถม ตัวอย่างของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ได้แสดงในรูปที่ 3-2 จำนวนของ element ที่ใช้เริ่มจาก 1900 (กรณีของร่องลึก 2 เมตร) ถึง 2200 (กรณีของร่องลึก 3 เมตร) ซึ่งจากการวิเคราะห์ผลกระทบของ mesh size แล้วพบว่ามีความเพียงพอ



รูปที่ 3-1 แบบจำลองทางเรขาคณิตสำหรับปัญหาที่วิเคราะห์



รูปที่ 3-2 ตัวอย่างของโครงข่ายไฟไนต์เอลิเมนต์ (กรณีร่องลึก 2.0 ม และกว้าง 1.5 ม)

### 3.2 แบบจำลองดิน

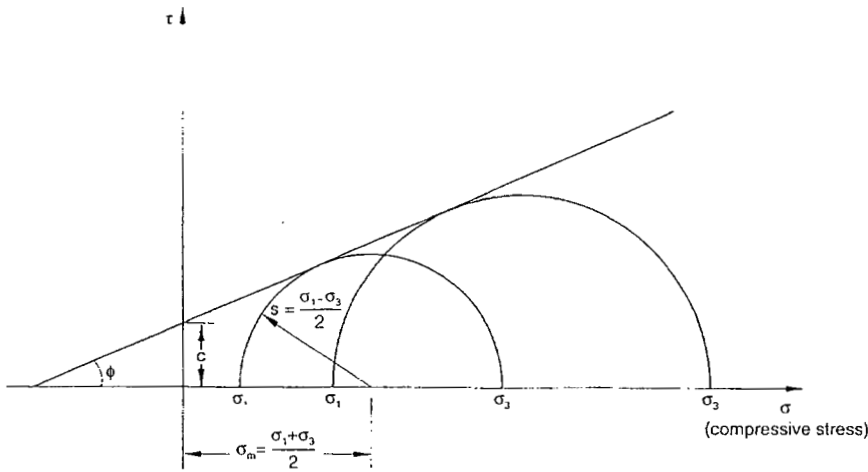
#### 3.2.1 แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb

แบบจำลองดินแบบ Mohr-Coulomb เป็นแบบจำลองแบบ linear elastic-perfectly plastic ผู้ใช้ต้องกำหนดค่า Young's modulus  $E$  และ Poisson's ratio  $\nu$  สำหรับคุณสมบัติอีลาสติกของดิน และต้องกำหนดค่า friction angle  $\phi_{max}$ , dilation angle  $\psi$ , และ cohesion intercept  $c'$  สำหรับคุณสมบัติการวิบัติของดิน ต่อไปนี้จะอธิบายลักษณะของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ที่ใช้ในโปรแกรม ABAQUS

ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb กำหนดให้การวิบัติเกิดขึ้นเมื่อ shear stress ที่จุดใด ๆ ก็ตามในมวลดินมีค่าเท่ากับค่าที่แปรผันโดยตรงกับค่า normal stress ในระนาบเดียวกัน แบบจำลอง Mohr-Coulomb มีพื้นฐานจากการวาดวงกลมของ Mohr สำหรับสภาพของความเค้นที่สภาวะวิบัติในระนาบของความเค้นหลักมากที่สุดและน้อยสุด เส้นวิบัติคือเส้นตรงที่สัมผัสวงกลมของ Mohr เหล่านี้แสดงในรูปที่ 3-3 ดังนั้นข้อกำหนดสำหรับการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb จะนิยามโดยสมการที่ (3-1)

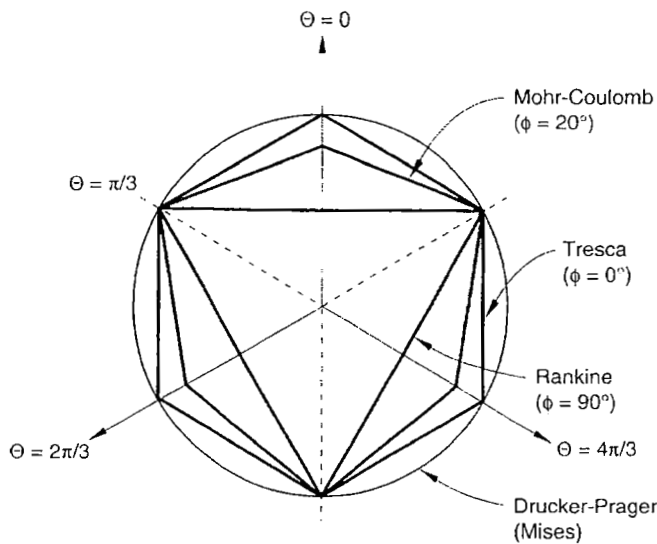
$$\tau = c' + \sigma \times \tan \phi \quad \dots\dots\dots (3-1)$$

โดยที่  $\tau$  คือ shear stress,  $c'$  คือ cohesion intercept,  $\sigma$  คือ effective normal stress, และ  $\phi$  คือ friction angle ของดิน



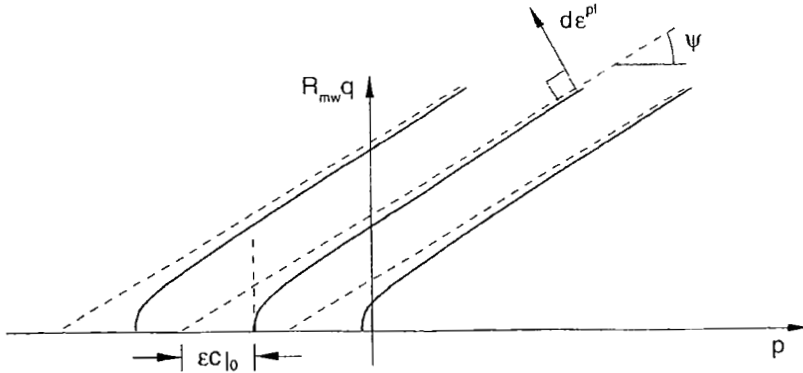
รูปที่ 3-3 ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ meridian (HKS, 2006)

ค่า friction angle  $\phi$  จะควบคุมรูปร่างของ yield surface ในระนาบ deviatoric ดังแสดงในรูปที่ 3-4 ค่า friction angle สามารถมีค่าระหว่าง  $0^\circ \leq \phi < 90^\circ$  ในกรณีที่  $\phi = 0^\circ$  นั้นแบบจำลอง Mohr-Coulomb จะกลายเป็นแบบจำลอง pressure-independent Tresca โดยที่มีรูปร่างเป็นหกเหลี่ยมในระนาบ deviatoric ในกรณีสำหรับ  $\phi = 90^\circ$  แบบจำลอง Mohr-Coulomb จะกลายเป็นแบบจำลอง “tension cut-off” Rankine model ที่มีรูปร่างเป็นสามเหลี่ยมในระนาบ deviatoric (กรณีนี้ไม่อนุญาตสำหรับแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในโปรแกรม ABAQUS)

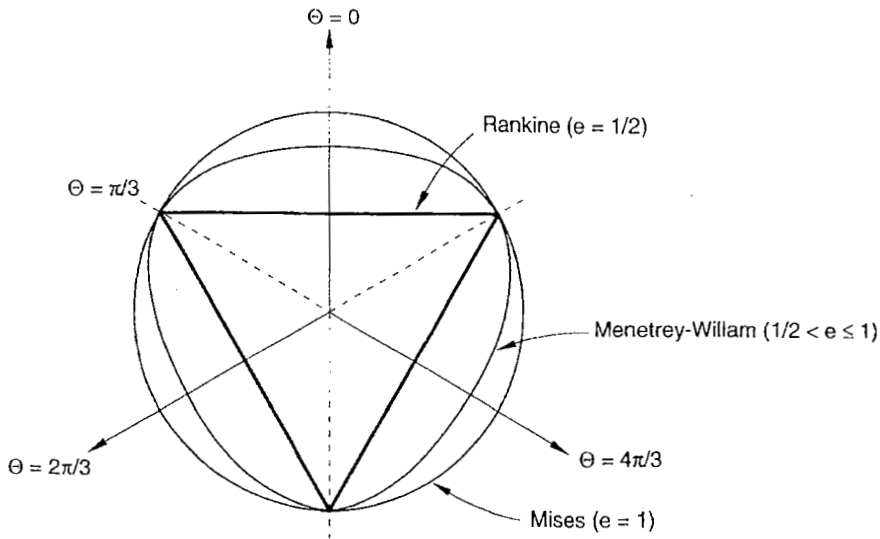


รูปที่ 3-4 ข้อกำหนดการวิบัติของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ deviatoric (HKS, 2006) (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

ข้อกำหนดของ flow potential จะใช้เป็นฟังก์ชันแบบ hyperbolic ในระนาบความเค้น meridional ดังแสดงในรูปที่ 3-5 และเป็นฟังก์ชันแบบ smooth elliptic ที่เสนอโดย Menetrey & William (1995) ในระนาบ deviatoric ดังแสดงในรูปที่ 3-6



รูปที่ 3-5 ข้อกำหนดของ flow potential ของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ meridional (HKS, 2006)



รูปที่ 3-6 ข้อกำหนดของ flow potential ของแบบจำลอง Mohr-Coulomb ในระนาบ deviatoric (HKS, 2006) (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

โดยข้อกำหนดเริ่มต้นของค่า deviatoric eccentricity  $e$  จะคำนวณโดยอัตโนมัติด้วยโปรแกรม ABAQUS ตามนิยามในสมการ (3-2) การคำนวณนี้เพื่อให้ flow potential ตรงกับ yield surface ในทั้ง triaxial compression และ extension ในระนาบ deviatoric

$$e = \frac{3 - \sin \phi}{3 + \sin \phi} \dots \dots \dots (3-2)$$

ข้อกำหนดของ plastic flow ในระนาบ meridional stress plane สามารถมีสภาพใกล้เคียง associated เมื่อค่า angle of friction  $\phi$  และค่า angle of dilation  $\psi$  มีค่าเท่ากันและกำหนดค่า meridional eccentricity  $\mathcal{E}$  ที่มีค่าน้อยมาก อย่างไรก็ตามโดยปกติ plastic flow ในระนาบนี้จะเป็นแบบ nonassociated ส่วนสภาพ plastic flow ในระนาบ deviatoric stress จะเป็นแบบ nonassociated เสมอ ฉะนั้นการใช้แบบจำลอง Mohr-Coulomb จะต้องการการคำนวณแบบ unsymmetric matrix storage and solution scheme

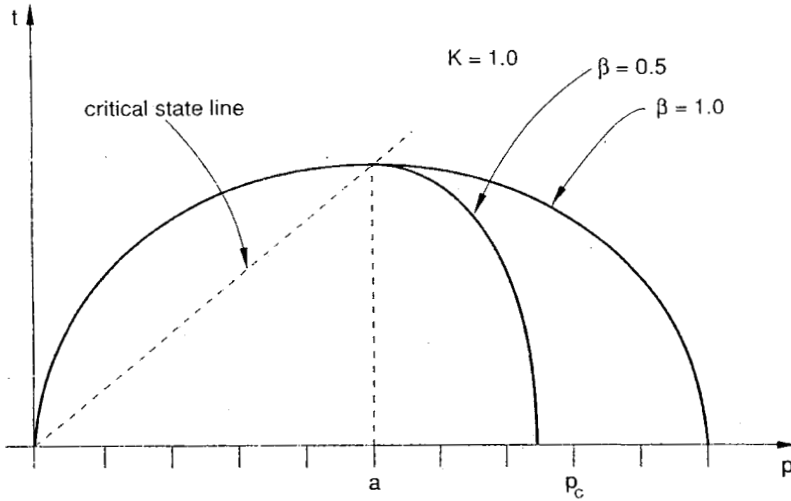
### 3.2.2 แบบจำลองดินแบบ Clay plasticity

แบบจำลอง clay plasticity ในโปรแกรม ABAQUS นั้นเป็นส่วนขยายของแบบจำลอง Cam-Clay (Schofield & Wroth, 1968) แบบจำลองนี้มี yield surface ดังสมการที่ (3-3)

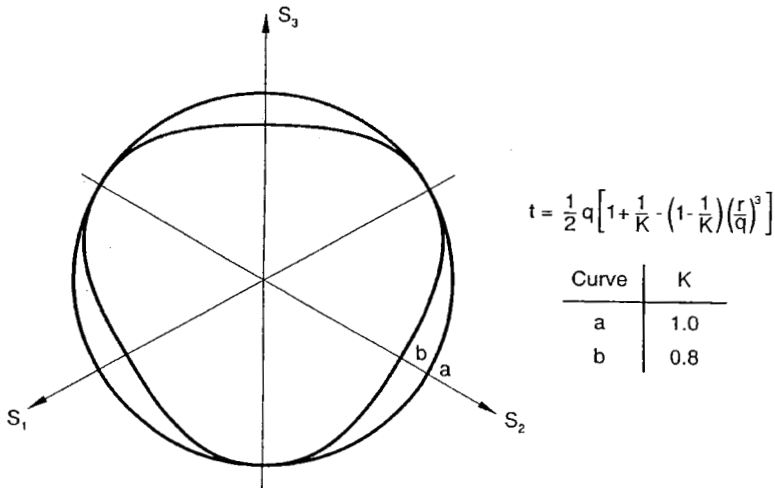
$$\frac{1}{\beta^2} \left( \frac{p}{a} - 1 \right)^2 + \left( \frac{t}{Ma} \right)^2 - 1 = 0 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

- |         |  |  |
|---------|--|--|
| โดยที่  | $p = \frac{1}{3} \text{trace } \sigma$   | คือ average confining pressure   |
|         | $t = \frac{1}{2} q \left[ 1 + \frac{1}{K} - \left( 1 - \frac{1}{K} \right) \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right]$ | คือ deviatoric stress  |
|         | $q = \sqrt{\frac{3}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S}}$   | คือ Mises equivalent stress  |
|         | $r = \left( \frac{9}{2} \mathbf{S} : \mathbf{S} \cdot \mathbf{S} \right)^{\frac{1}{3}}$                          | คือ third stress invariant   |
| $M$     |  | คือค่าคงที่ที่กำหนดความชันของเส้น critical state   |
| $\beta$ |  | คือค่าคงที่ โดยมีค่าเท่ากับ 1.0 เมื่ออยู่ที่ "dry" side ของเส้น critical state ( $t > Mp$ ) แต่อาจจะมีค่าต่างจาก 1.0 เมื่ออยู่ที่ "wet" side ของเส้น critical state (ข้อกำหนด $\beta \neq 1.0$ จะทำให้เกิดความแตกต่างของ ellipse ของ wet side ของเส้น critical state และจะมี "cap" ที่หดลงถ้า $\beta < 1.0$ ดังแสดงในรูปที่ 3-7) |
| $a_0$   |  | คือตัวแปร hardening parameter ที่กำหนดขนาดของ yield surface  |
| $K$     |  | คืออัตราส่วนของค่า flow stress ในสภาพ triaxial extension ต่อค่า flow stress ในสภาพ triaxial compression และกำหนดรูปร่างของ yield surface ในระนาบ deviatoric ( $\Pi$ -plane) (ตามแสดงในรูปที่ 3-8)  |





รูปที่ 3-7 Clay yield surface ในระนาบ p-t



รูปที่ 3-8 Clay yield surface ในระนาบ  $\Pi$ -plane (ความเค้นกดจะแสดงค่าเป็นลบ)

ข้อกำหนด hardening law ที่กำหนดขนาดของ yield surface ในทุกๆขณะจะคำนวณจากค่าเริ่มต้นของ hardening parameter  $a_0$  และปริมาณของ plastic volumetric strain จะเกิดขึ้นตามสมการที่ (3-4)

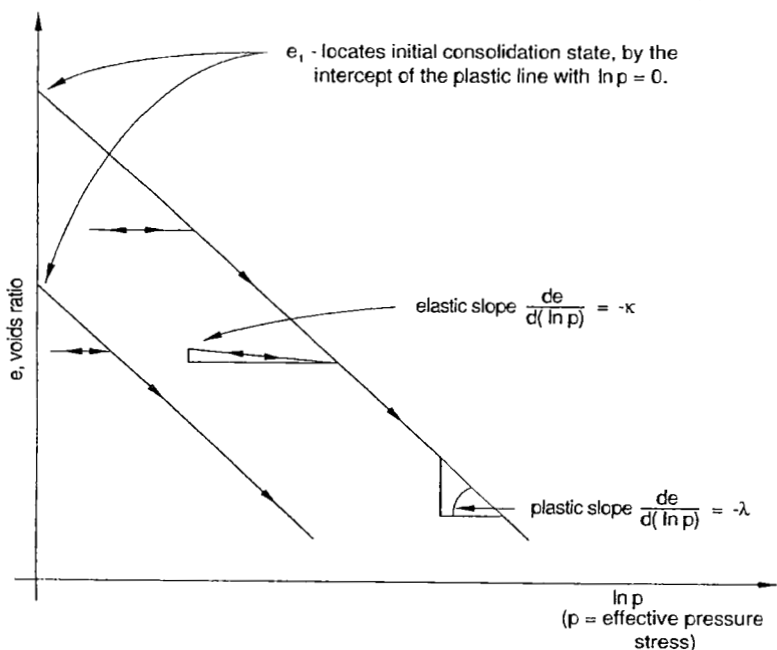
$$a = a_0 \exp \left[ \frac{1 + e_0}{\lambda - \kappa} \Delta \varepsilon_{vol}^{plastic} \right] \dots \dots \dots (3-4)$$

- โดยที่
- $\Delta \varepsilon_{vol}^{plastic}$  คือ plastic volumetric strain (การหดตัวจะเป็นบวก)
  - $\kappa$  คือ logarithmic bulk modulus ของวัสดุ
  - $\lambda$  คือ logarithmic hardening constant
  - $e_0$  ค่ค่า initial void ratio.

ค่า  $a_o$  จะสามารถนิยามโดยกำหนดค่า  $e_1$  ซึ่งเป็นจุดตัดของเส้น virgin consolidation line กับแกน void ratio ในพล็อตของ void ratio  $e$  versus logarithm of effective confining pressure  $\ln p$  (ตามแสดงในรูปที่ 3-9) ค่า  $a_o$  จะนิยามตามสมการที่ (3-5)

$$a_o = \frac{1}{2} \exp\left(\frac{e_1 - e_o - \kappa \ln p_o}{\lambda - \kappa}\right) \dots\dots\dots (3-5)$$

โดยที่  $p_o$  คือค่าเริ่มต้นของ equivalent hydrostatic pressure



รูปที่ 3-9 พฤติกรรม pure compression ของแบบจำลอง clay plasticity

### 3.3 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ในการวิเคราะห์

#### 3.3.1 ท่อ

(คุณสมบัติตาม ASTM F 679-86: type T-2)

วัสดุ: Poly Vinyl Chloride (PVC)

เส้นผ่าศูนย์กลางท่อ (nominal pipe diameter): 36 นิ้ว

เส้นผ่าศูนย์กลางภายนอก: 1000 มม

เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน: 942.6 มม

ความหนาของท่อ: 28.7 มม

Modulus of elasticity in tension: 2758 MPa

Poisson's ratio: 0.3

หน่วยน้ำหนัก: 14.0 kN/m<sup>3</sup>

### 3.3.2 ทฤษฎีกลับ

(สมมติให้เป็นตาม *dense sand* ของ *Trautmann & O'Rourke (1983)*)

Young's modulus $E$ :	2894 kPa
Poisson's ratio $\nu$ :	0.3
Peak friction angle $\phi_{peak}$ :	$44^\circ$
Dilation angle $\psi$ :	$16^\circ$
Initial void ratio $e_o$ :	0.584
Initial dry density $\gamma_{dry}$ :	$17.7 \text{ kN/m}^3$
Initial saturated density $\gamma_{sat}$ :	$21.4 \text{ kN/m}^3$
Initial submerged density $\gamma'$ :	$11.4 \text{ kN/m}^3$

### 3.3.3 ดินเหนียว

(สมมุติคุณสมบัติของ *Bangkok Clay* ตาม *Balasubramaniam & Chaudhry (1978)*, *Kuwano & Bhattarai (1989)*, และ *Tamrakar et al. (2000)*)

ความชันของเส้น critical state line ใน triaxial compression $M_{TC}$ :	1.0 ( $\phi_{crit TC} = 25.4^\circ$ )
ความชันของเส้น critical state line ใน triaxial extension $M_{TE}$ :	0.8
อัตราส่วนของ $M_{TE}:M_{TC}$ (K):	0.8
ความชันของเส้น normal compression line $\lambda$ :	0.50
ความชันของเส้น reloading line $K$ :	0.05
Void ratio ของเส้น ICL ที่ $p' = 1 \text{ kPa}$ :	4.012
Poisson's ratio $\nu$ :	0.3
ค่าคงที่ที่กำหนดรูปร่างของ yield surface ในระนาบ $p-t$ $\beta$ :	1.0
Coefficient of earth pressure at rest $K_o$ :	0.6
Initial void ratio $e_o$ :	2.0
Undrained shear strength $s_u$ :	15 kPa
Saturated unit weight $\gamma_{sat}$ :	$17.0 \text{ kN/m}^3$
Dry unit weight $\gamma_{dry}$ :	$10.3 \text{ kN/m}^3$
Submerged unit weight $\gamma'$ :	$7.2 \text{ kN/m}^3$
Coefficient of permeability $k$ :	$5 \times 10^{-11} \text{ m/s}$

### 3.3.4 ผิวสัมผัสระหว่างท่อและทรายถม (จำลองในทุกกรณี)

Interface friction angle  $\phi_{\mu}$  (pipe-sand) =  $22^\circ$  ( $=\phi_{peak}/2$ )

### 3.3.5 ผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว (เมื่อมีการจำลอง)

$$\text{Interface friction angle } \phi_{\mu} (\text{sand-clay}) = 25.4^{\circ} (= \phi_{crit})$$

## 3.4 วิธีการดำเนินการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

กระบวนการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ (i) กรณีที่ไม่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง และ (ii) กรณีที่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง ในกรณีที่ไม่นับพิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างนั้น ทรายถม (bedding, haunching, และ backfill) และท่อจะสร้างพร้อมกันในเวลาที่สั้นมาก ในกรณีที่พิจารณาการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างการถล่มกลับของร่องนั้นจะดำเนินการเป็นขั้นๆ โดยการวาง bedding และท่อ, haunching, และ backfill ตามลำดับ ในต่อไปนี้จะอธิบายกระบวนการวิเคราะห์ของทั้งสองกรณี

### 3.4.1 กรณีไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

ขั้นที่ 1: Geostatic (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: ทุก element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด

ขั้นที่ 2: Trench excavation (1 วินาที)

เอา trench element ออก

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด

ขั้นที่ 3: วาง bedding, pipe, haunching, และ backfill ในสภาพแห้ง (1 วินาที)

วาง bedding, pipe, haunching, และ backfill element ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

sand element =  $17.7 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $14.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด

ขั้นที่ 4: Trench flooding (เติมน้ำลงในร่องขุด) (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก: clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

sand element =  $11.4 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $4.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องขุด

ขั้นที่ 5: Long-term consolidation of clay (200 ปี)

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องชุด

### 3.4.2 กรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

ขั้นที่ 1: Geostatic (1 วินาที)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

ทุก element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 2: Trench excavation (1 วินาที)

เอา trench element ออก

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 3: Place bedding and pipe in dry condition (1 วินาที)

วาง bedding และท่อในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

bedding element =  $17.7 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $14.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

ขั้นที่ 4: Place haunching in dry condition (1 วินาที)

วาง haunching ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

bedding และ haunching element =  $17.7 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $14.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

Step 5: Place backfill in dry condition (1 วินาที)

วาง backfill ในสภาพ strain free

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

sand element =  $17.7 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $14.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

Step 6: Trench flooding (fill trench with water) (1 sec)

Body force เนื่องจากแรงโน้มถ่วงโลก:

clay element =  $7.19 \text{ kN/m}^3$

sand element =  $11.4 \text{ kN/m}^3$

pipe element =  $4.0 \text{ kN/m}^3$

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ :

ผิวบนสุด

ขอบเขตของร่องชุด

Step 7: Long-term consolidation of clay (200 years)

สภาพขอบเขตของ excess pore water pressure  $\Delta u = 0$ : ผิวบนสุด  
ขอบเขตของร่องซุด

### 3.4.3 Dummy element

เมื่อทำการเอา trench element ออกเพื่อจำลองการซุดร่องซุดนั้น node ด้านนอก (node ที่อยู่บน sand/clay interface) จะเคลื่อนตัวไปกับการเสียรูปของ mesh โดยที่ node ด้านในจะไม่มีเคลื่อนที่ เนื่องจากกำหนดให้มีสภาพ inactive กรณีเช่นนี้อาจจะทำให้เกิดปัญหาในการคำนวณ (convergence problem) เมื่อกำหนดสภาพ element กลับเป็น active ในกรณีที่ element เหล่านั้นเกิดการเคลื่อนตัวอย่างมาก ปัญหานี้จะแก้ไขได้ด้วยการอนุญาตให้ node ภายในสามารถเคลื่อนตัวไปกับ node ภายนอกได้ก่อนจะกำหนดสภาพเป็น active โดยการกำหนด elastic element ที่มีค่า stiffness ต่ำมาก ให้กับ sand element ซึ่งเรียกว่า “dummy” element โดย dummy element นี้จะใช้ node เดียวกับของ sand element แต่จะอ่อนตัวมากพอที่จะทำให้ไม่มีผลต่อการวิเคราะห์ “dummy” element นี้จะมีสภาพ active ตลอดการวิเคราะห์เพื่อให้ node ภายในเคลื่อนตัวตาม node ภายนอกได้ กลยุทธ์ “dummy” element นี้ได้ใช้สำหรับการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์นี้ การใช้ dummy element จะแก้ปัญหา convergence problem เมื่อกำหนดสภาพ sand element ให้ active เพื่อจำลองกระบวนการ backfilling

### 3.5 โปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

การวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในการศึกษานี้ได้ดำเนินการวิเคราะห์ 16 กรณี ดังแสดงรายการในตารางที่ 3-1

ตารางที่ 3-1 โปรแกรมการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

กรณีการวิเคราะห์	การจำลองชั้นตอนการก่อสร้าง	การจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว	ความลึกของร่องซุด (ม)	ความกว้างของร่องซุด (ม)
D20W15(nocon)	ไม่มี	ไม่มี	2.0	1.5
D20W15int(nocon)	ไม่มี	มี	2.0	1.5
D20W20(nocon)	ไม่มี	ไม่มี	2.0	2.0
D20W20int(nocon)	ไม่มี	มี	2.0	2.0
D30W15(nocon)	ไม่มี	ไม่มี	2.0	1.5
D30W15int(nocon)	ไม่มี	มี	2.0	1.5
D30w20(nocon)	ไม่มี	ไม่มี	2.0	2.0
D30W20int(nocon)	ไม่มี	มี	2.0	2.0
D20W15(withcon)	มี	ไม่มี	2.0	1.5
D20W15int(withcon)	มี	มี	2.0	1.5
D20W15(withcon)	มี	ไม่มี	2.0	2.0

พฤติกรรมระยะยาวของท่อส่งน้ำชลประทานในพื้นที่ดินอ่อน

D20W20int(withcon)	มี	มี	2.0	2.0
D30W15(withcon)	มี	ไม่มี	2.0	1.5
D30W15int(withcon)	มี	มี	3.0	1.5
D30w20(withcon)	มี	ไม่มี	3.0	2.0
D30W20int(withcon)	มี	มี	3.0	2.0

บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์

ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ในด้านการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องชุดและพื้นที่ท่อใต้ แสดงในตารางที่ 4-1 และ 4-2 normal stress ที่กระทำต่อท่อหลังจากการ trench backfilling ได้แสดงใน ตารางที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพิ่มเติมได้แสดงในภาคผนวก ก และ ข ในต่อไปนี้จะ อธิบายผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของกรณีไม่จำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

กรณีการวิเคราะห์	การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นร่องชุด (มม)				การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นที่ท่อ (มม)		
	Excavation	Backfill	Trench flooding	Long-term consln	Backfill	Trench flooding	Long-term consln
D20W15 (nocon)	0 ↓ 14.45	14.45 ↓ 14.35	14.35 ↓ 10.53	10.53 ↓ 1.52	0 ↓ -0.21	-0.21 ↓ -4.24	-4.24 ↓ -13.44
D20W15int (nocon)	0 ↓ 14.45	14.46 ↓ 13.91	13.91 ↓ 4.84	4.84 ↓ -0.53	0 ↓ -0.21	-0.69 ↓ -9.83	-9.83 ↓ -15.27
D20W20 (nocon)	0 ↓ 16.12	16.12 ↓ 14.92	14.92 ↓ 3.29	3.29 ↓ -1.03	0 ↓ -1.52	-1.52 ↓ -13.27	-13.27 ↓ -17.65
D20W20int (nocon)	0 ↓ 14.45	16.15 ↓ -3.55	-3.55 ↓ -0.78	-0.78 ↓ -3.03	0 ↓ -20.10	-20.10 ↓ -17.19	-17.19 ↓ -19.45
D20W15 (nocon)	0 ↓ 15.99	15.99 ↓ -1.38	-1.38 ↓ 2.41	2.41 ↓ -0.17	0 ↓ -18.00	-18.00 ↓ -14.05	-14.05 ↓ -16.68
D30W15int (nocon)	0 ↓ 15.99	16.01 ↓ 0.32	0.32 ↓ 0.83	0.83 ↓ -2.31	0 ↓ -18.00	-16.00 ↓ -15.41	-15.41 ↓ -18.58
D30W20 (nocon)	0 ↓ 18.08	18.08 ↓ 14.53	14.53 ↓ 2.87	2.87 ↓ -1.61	0 ↓ -3.93	-3.93 ↓ -15.69	-15.69 ↓ -20.24
D20W20int (nocon)	0 ↓ 16.12	18.15 ↓ 18.15	18.15 ↓ 18.13	18.13 ↓ 6.85	0 ↓ -0.02	-0.02 ↓ -0.13	-0.13 ↓ -11.53



ตารางที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ของกรณีจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

กรณีการวิเคราะห์	การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นร่องชุด (มม)				การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นที่ท่อ (มม)		
	Excavation	Backfill	Trench flooding	Long-term consoln	Backfill	Trench flooding	Long-term consoln
D20W15 (withcon)	0 ↓ 14.45	14.45 ↓ -3.43	-3.43 ↓ 1.29	1.29 ↓ 1.29	0 ↓ -18.63	-18.63 ↓ -13.72	-13.72 ↓ -13.72
D20W15int (withcon)	0 ↓ 14.45	14.46 ↓ 6.90	6.90 ↓ 2.85	2.85 ↓ -1.35	0 ↓ -8.10	-8.10 ↓ -12.05	-12.05 ↓ -16.26
D20W20 (withcon)	0 ↓ 14.45	16.12 ↓ -5.61	-5.61 ↓ 0.23	0.23 ↓ 0.23	0 ↓ -22.57	-22.57 ↓ -16.50	-16.50 ↓ -16.50
D20W20int (withcon)	0 ↓ 14.45	16.15 ↓ -2.04	-2.04 ↓ -0.54	-0.54 ↓ -2.20	0 ↓ -18.79	-18.79 ↓ -17.17	-17.17 ↓ -18.82
D30W15 (withcon)	0 ↓ 15.99	15.99 ↓ -2.45	-2.45 ↓ 1.62	1.62 ↓ 1.66	0 ↓ -18.97	-18.97 ↓ -14.74	-14.74 ↓ -14.73
D30W15int (withcon)	0 ↓ 14.45	16.01 ↓ 5.53	5.53 ↓ 0.51	0.51 ↓ -2.75	0 ↓ -10.79	-10.69 ↓ -15.63	-15.63 ↓ -18.86
D20W20 (withcon)	0 ↓ 14.45	18.08 ↓ -4.79	-4.79 ↓ 0.19	0.19 ↓ 0.22	0 ↓ -23.62	-23.62 ↓ -18.44	-18.44 ↓ -18.43
D30W20int (withcon)	0 ↓ 18.15	18.15 ↓ -9.43	-9.43 ↓ -2.53	-2.53 ↓ -5.04	0 ↓ -23.02	-28.03 ↓ -20.95	-20.95 ↓ -23.47

ตารางที่ 4-3 Normal stress ที่กระทำต่อท่อหลังจากการ trench backfilling

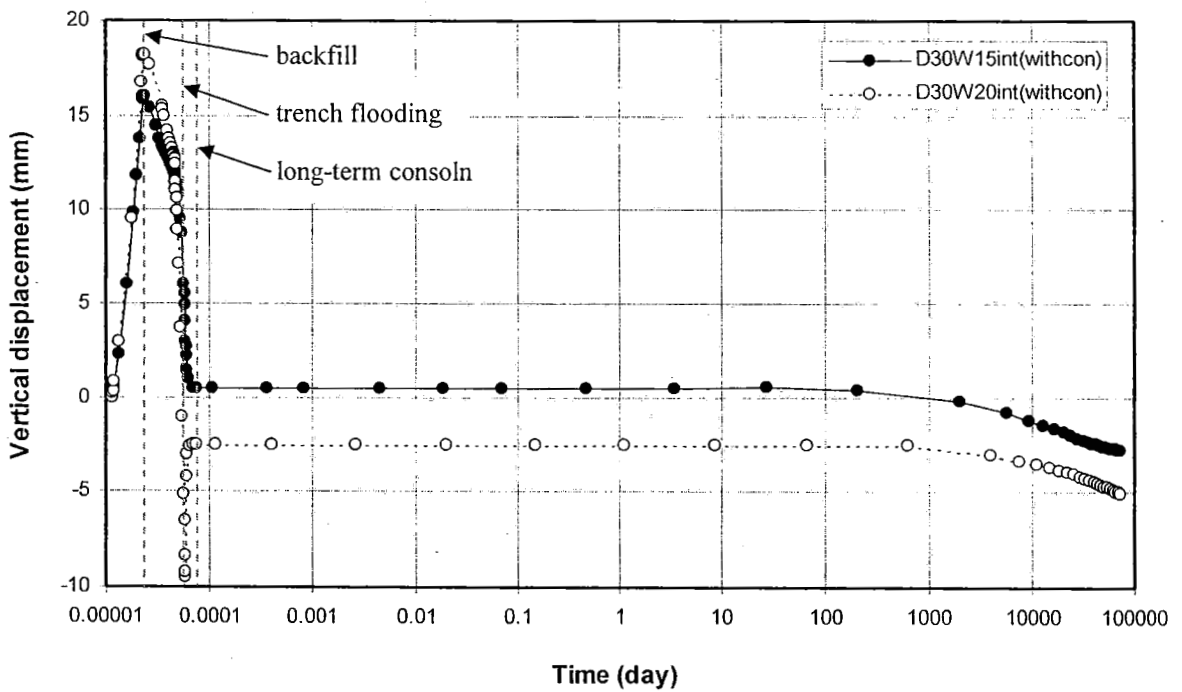
กรณีการวิเคราะห์	Normal stress ที่กระทำต่อท่อ	
	ระหว่าง trench flooding	ระหว่าง long-term consoln
D20W15(nocon)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น
D20W15int(nocon)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
D20W15(nocon)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
D20W20int(nocon)	ลดลง	เท่าเดิม
D20W15(nocon)	ลดลง	เท่าเดิม
D20W15int(nocon)	ลดลงเล็กน้อย	เท่าเดิม
D30W20(nocon)	เพิ่มขึ้น	เท่าเดิม
D20W20int(nocon)	เพิ่มขึ้น	เท่าเดิม
D20W15(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม
D20W15int(withcon)	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้นเล็กน้อย
D20W20(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม
D20W20int(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม
D30W15(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม
D20W15int(withcon)	เพิ่มขึ้น	เท่าเดิม
D20W20(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม
D30W20int(withcon)	ลดลง	เท่าเดิม

#### 4.1 ผลกระทบของมิติของร่องซุด

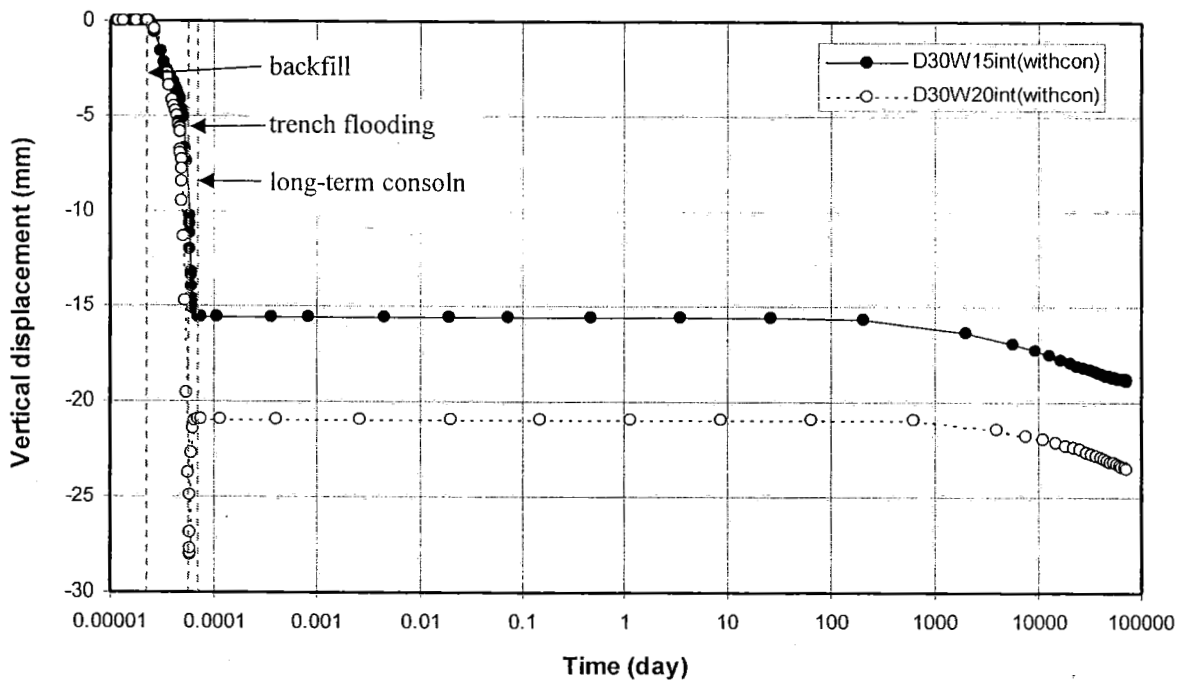
ผลกระทบของความกว้างและความลึกของร่องซุดต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและดินจะพิจารณาจากผลของการวิเคราะห์กรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายและดินเหนียวและมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเนื่องจากพิจารณาว่าผลการวิเคราะห์ในกรณีนี้ใกล้เคียงสภาพจริงมากที่สุด รูปที่ 4-1 แสดงการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องซุดและพื้นของท่อสำหรับกรณีร่องซุดลึก 3 เมตร โดยกรณีร่องซุดลึก 2 เมตรก็ให้ผลการวิเคราะห์ในแบบเดียวกัน รูปที่ 4-1 แสดงว่าความกว้างของร่องซุดมีผลกระทบต่อพฤติกรรมของร่องซุดและท่อในระหว่างกระบวนการก่อสร้าง หลังจากกระบวนการ backfilling สำหรับร่องซุดที่แคบ (กว้าง 1.5 เมตร) พื้นของร่องซุดและพื้นของท่อจะเคลื่อนตัวลงน้อยกว่ากรณีที่ร่องซุดกว้าง (กว้าง 2 เมตร) เนื่องจากเมื่อร่องซุดแคบลงขอบเขตด้านข้างของร่องซุดจะใกล้กันมากขึ้นซึ่งทำให้เกิดผลกระทบจาก arching effects มากขึ้น ซึ่งทำให้มีการถ่ายแรงจาก sand backfill สู่อื่นของร่องซุดและท่อน้อยลงดังแสดงในผลรูปที่ 4-2 ซึ่งแสดงว่าหลังจากกระบวนการ sand backfilling ค่า vertical stress ที่กระทำต่อท่อจะน้อยลงสำหรับร่องซุดที่แคบน้อยกว่า

พฤติกรรมหลังจาก trench flooding ก็มีความแตกต่างระหว่างร่องซุดที่แคบกับที่กว้าง สำหรับร่องซุดที่แคบนั้นพื้นของร่องซุดและพื้นของท่อจะทรุดตัวมากกว่าหลังจาก trench flooding ในขณะที่จะเกิดการ heave สำหรับร่องที่กว้าง (รูปที่ 4-1) สำหรับร่องซุดที่แคบค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อจะเพิ่มขึ้นหลังจาก trench flooding ในขณะที่ค่านี้จะลดลงสำหรับร่องซุดที่กว้าง (รูปที่ 4-2) ระหว่างการ

long-term consolidation พื้นของร่องขุดและพื้นของท่อจะทรุดตัวกับเวลาสำหรับกรณีความกว้างของร่องขุดทั้งสองกรณี สำหรับทั้งสองกรณีจะไม่มี ความแตกต่างของ normal stress ที่กระทำต่อท่อระหว่าง long-term consolidation ผลกระทบของความลึกของร่องขุดสำหรับในขอบเขตที่ศึกษาในที่นี้ไม่พบผลกระทบ (2 และ 3 เมตร)

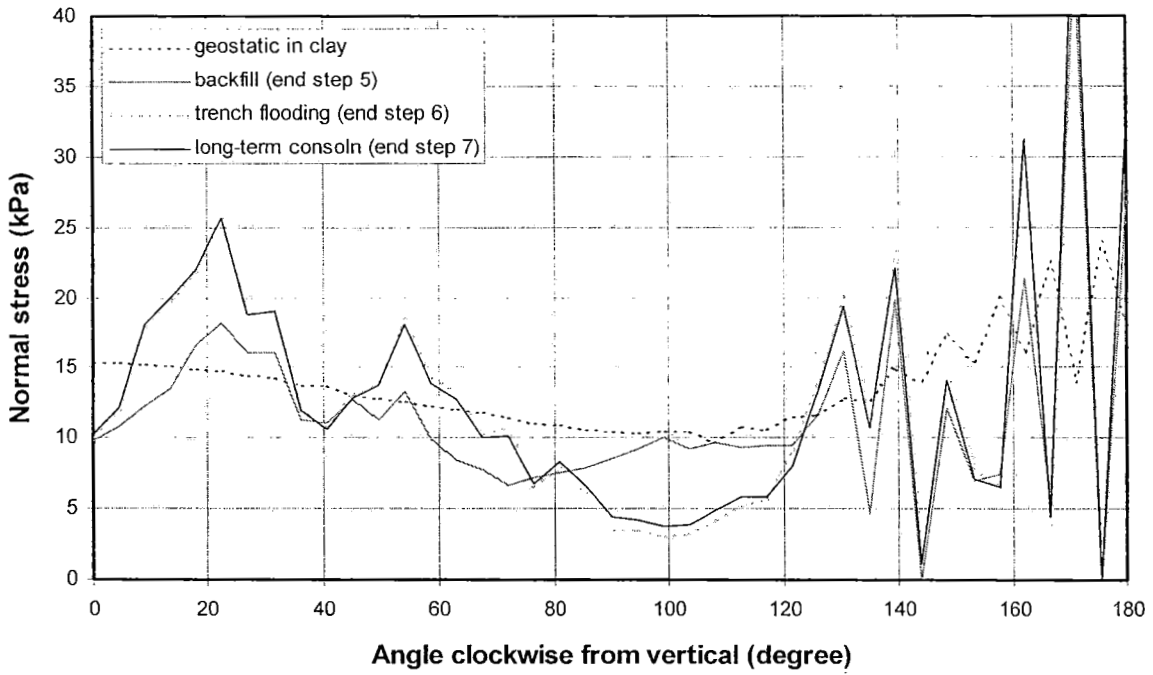


(a) Trench base

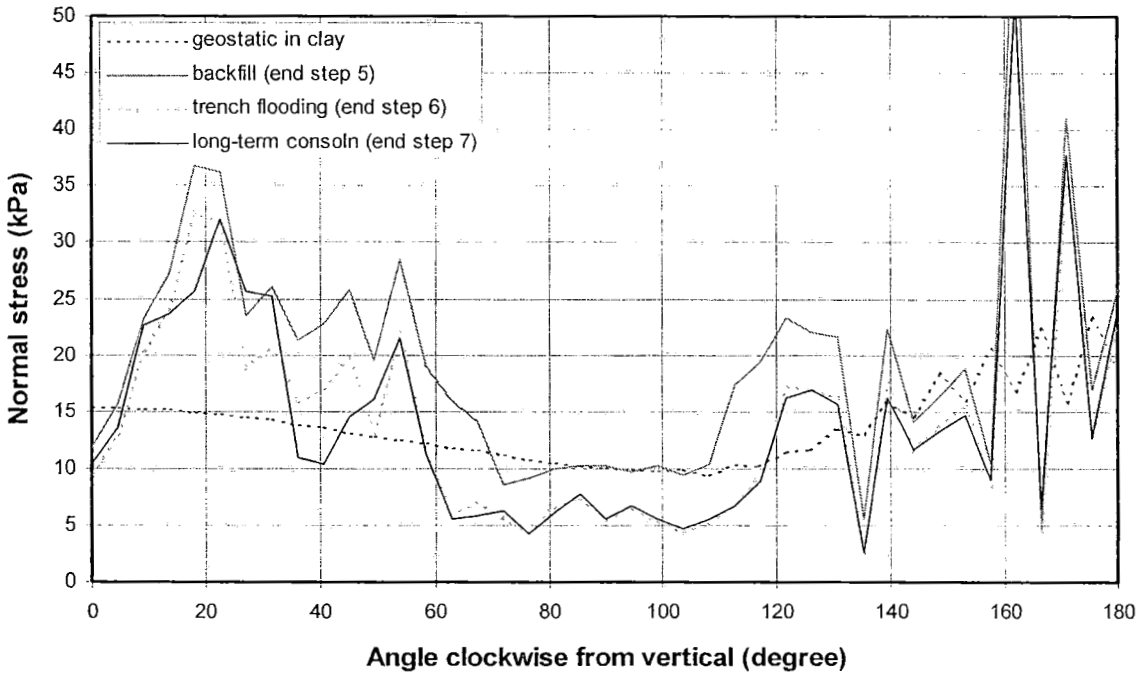


(b) Pipe base

รูปที่ 4-1 ผลกระทบของความกว้างของร่องชุดต่อการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของฐานของร่องชุดและฐานของท่อ



(a) กรณีการวิเคราะห์: D30W15int(withcon)



(b) กรณีการวิเคราะห์: D30W20int(withcon)

รูปที่ 4-2 ผลกระทบของความกว้างของร่องขุดต่อ normal stress กระทำต่อท่อ

301487

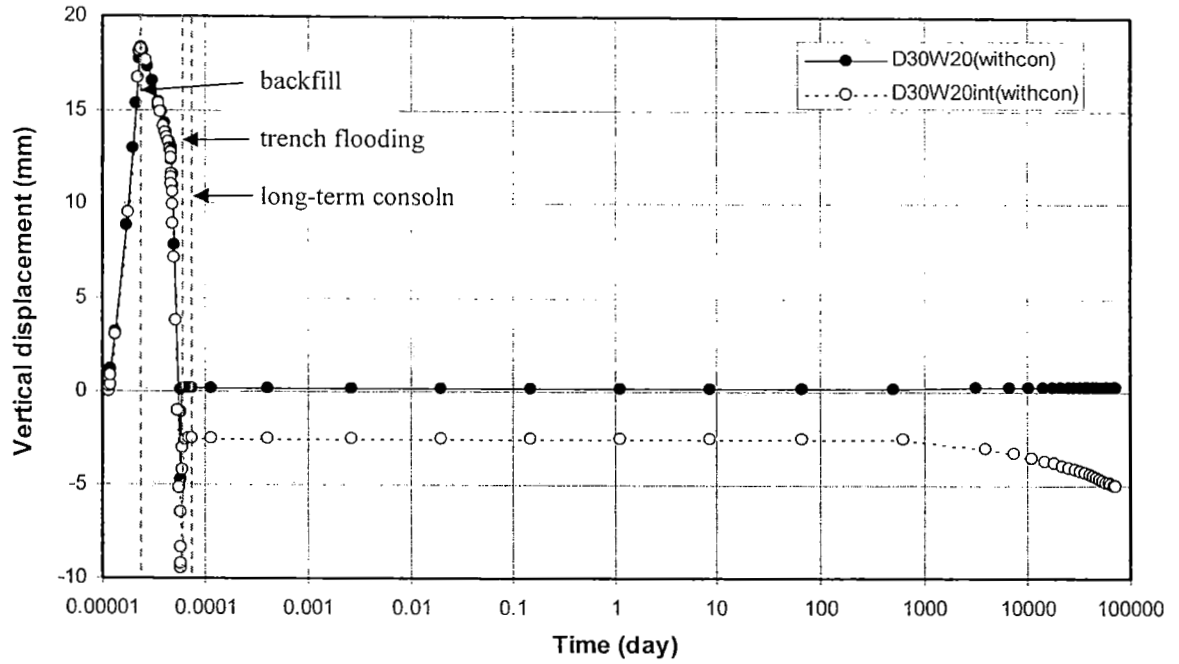
๖๒๗.๕๒

๙๓๑๙๗

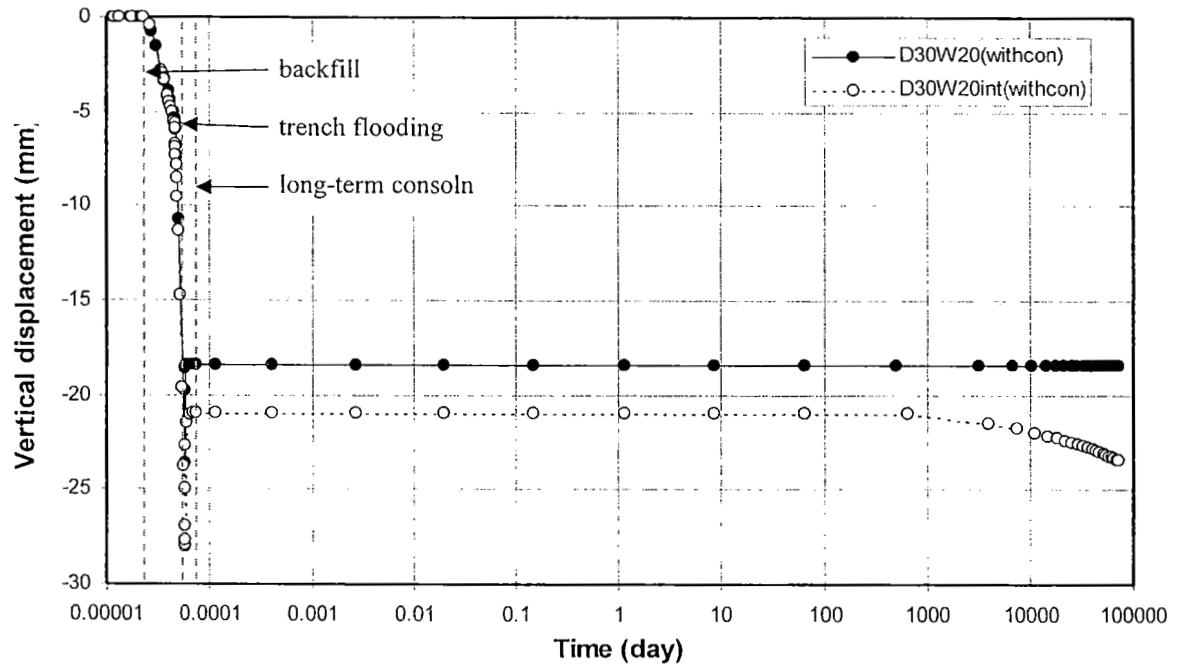
๑.๓

## 4.2 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว

การศึกษาความสำคัญของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียวในการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ทำโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างกรณีที่มีและไม่มี การจำลองผิวสัมผัส ซึ่งผลการศึกษาพบว่าหลังจากการถมทรายทันทีที่กรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัสไม่จำเป็นที่จะให้การหลุดตัวที่มากกว่ากรณีที่ไม่มีการจำลองผิวสัมผัสเสมอไป การหลุดตัวของกรณีที่มีผิวสัมผัสจะมากกว่าสำหรับกรณี D20W15(nocon) vs D20W15int(nocon), D20W20(nocon) vs D20W20int(nocon), และ D30W20(withcon) vs D30W20int(withcon) ดังแสดงในรูปที่ 4-3 สำหรับกรณีอื่นๆผลการวิเคราะห์จะได้ตรงกันข้ามโดยที่การหลุดตัวของพื้นร่องขุดและพื้นของท่อหลังจากการถมทรายจะมากกว่าสำหรับกรณีที่ไม่มีการจำลองผิวสัมผัส (รูปที่ 4-4) อย่างไรก็ตามสำหรับทุกกรณีการหลุดตัวของพื้นร่องขุดและพื้นท่อเมื่อสิ้นสุดการ trench flooding และ long-term consolidation จะมากกว่าสำหรับกรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัส (ยกเว้นกรณี D30W20(nocon) vs D30W20int(nocon)) สิ่งที่น่าสังเกตคือสำหรับทุกกรณีที่ไม่มีการจำลองผิวสัมผัสและมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง แทบจะไม่มี การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องขุดและพื้นของท่อระหว่างการ long-term consolidation สำหรับกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง ค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อหลังจากการติดตั้งท่อและถมทรายแล้ว จะมีค่ามากกว่าสำหรับกรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัส (รูปที่ 4-5) อย่างไรก็ตามค่า normal stress แทบจะไม่ขึ้นอยู่กับ การจำลองผิวสัมผัสเมื่อมีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง (รูปที่ 4-6)

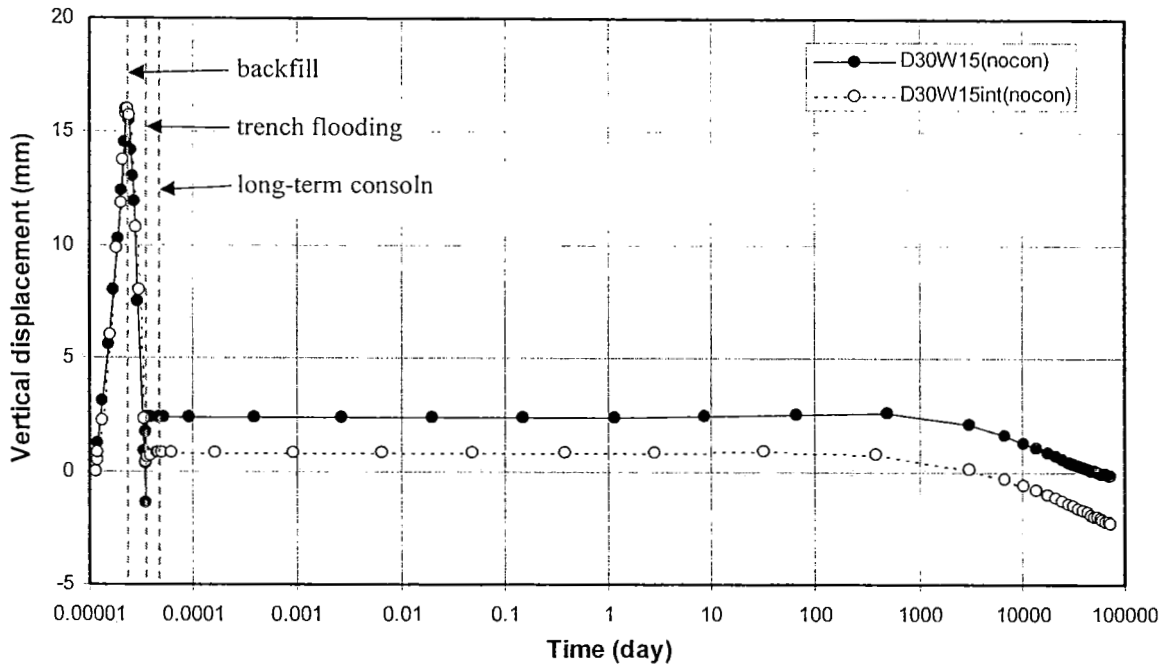


(a) Trench base

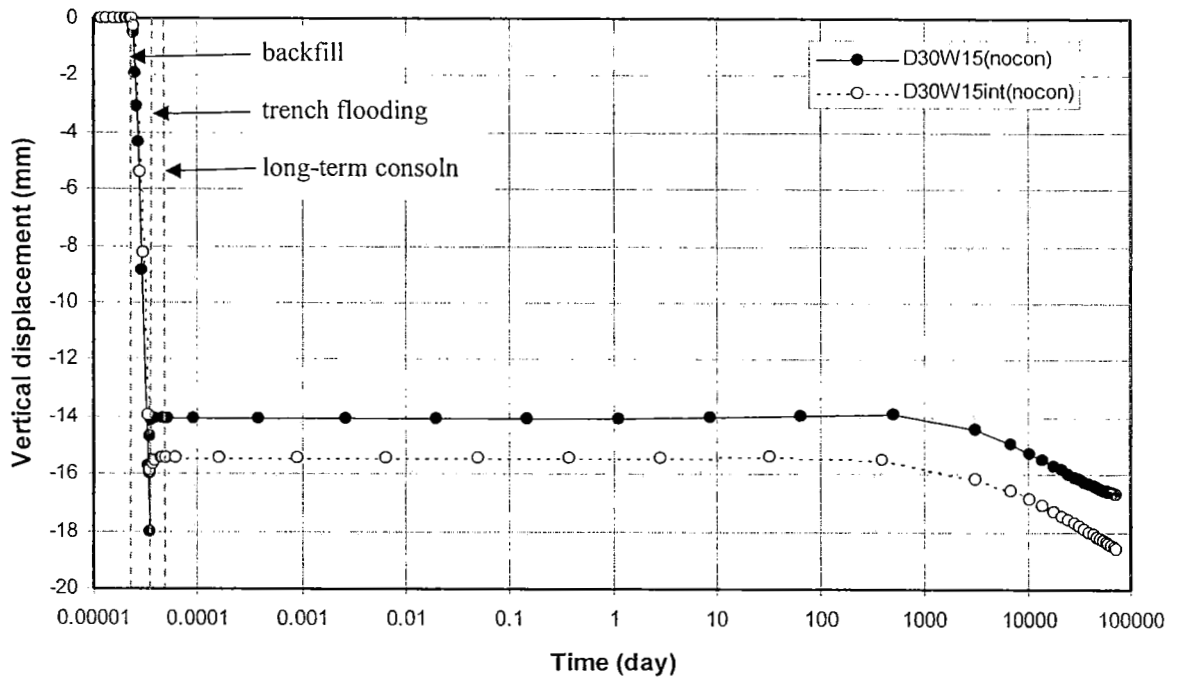


(b) Pipe base

รูปที่ 4-3 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียวต่อการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องขุดและพื้นของท่อ (กรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง)



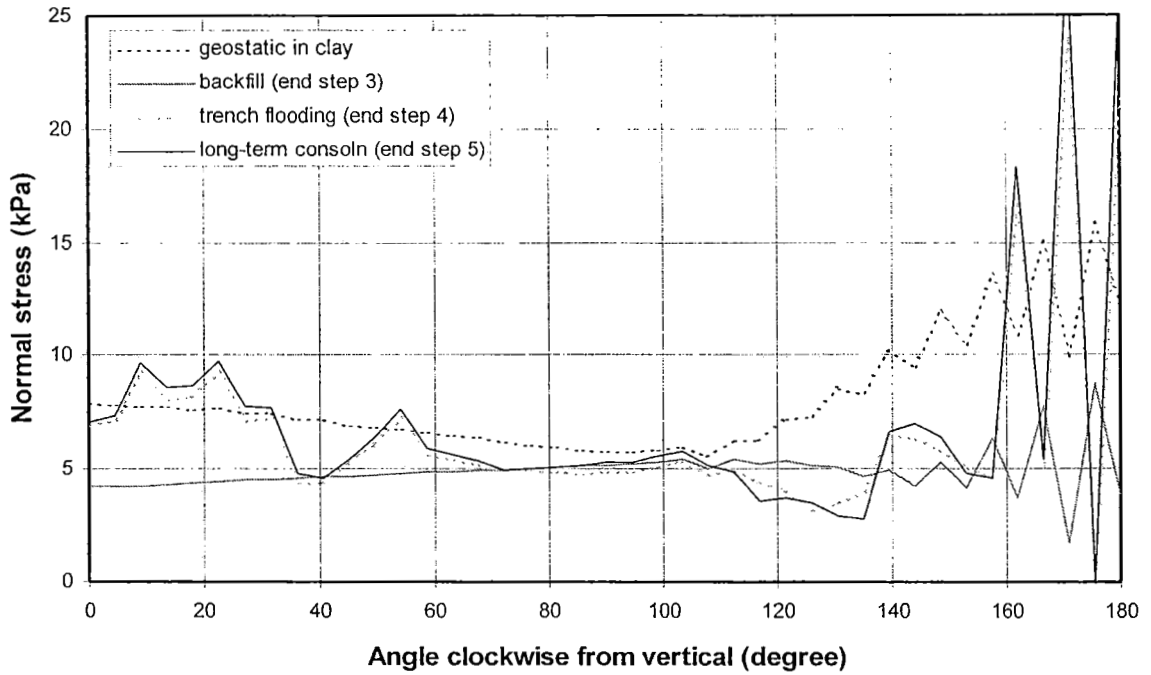
(a) Trench base



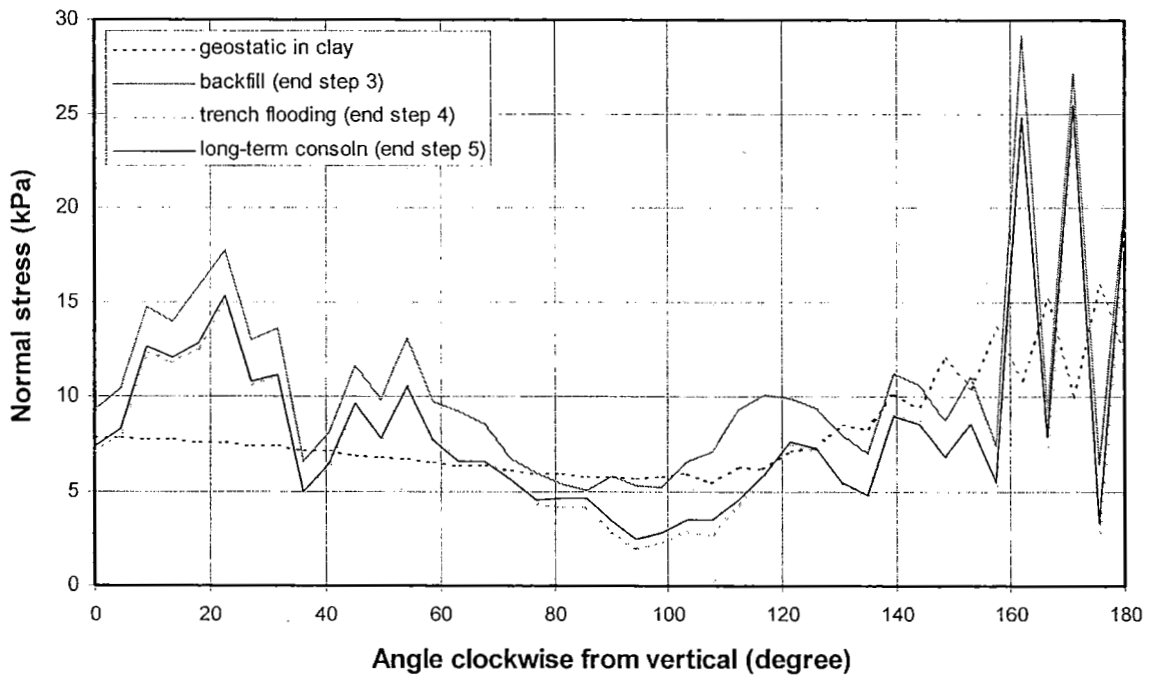
(b) Pipe base

รูปที่ 4-4 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียวต่อการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องขุดและพื้นของท่อ (กรณีที่ไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง)



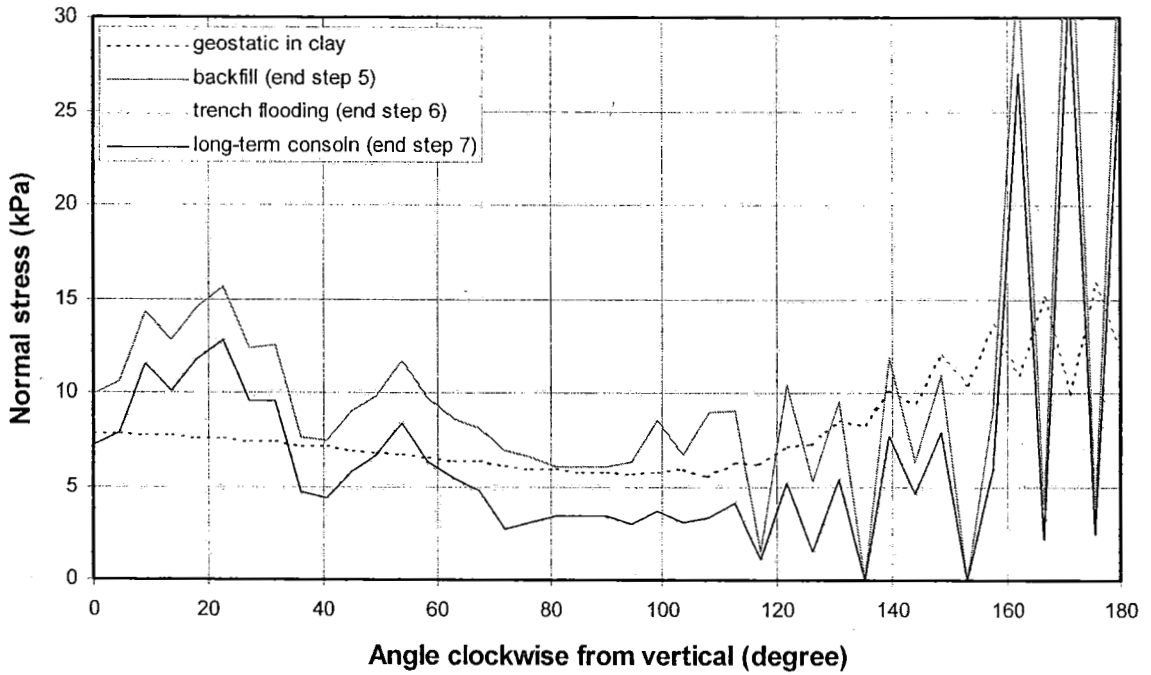


(a) กรณีการวิเคราะห์: D20W20(nocon)

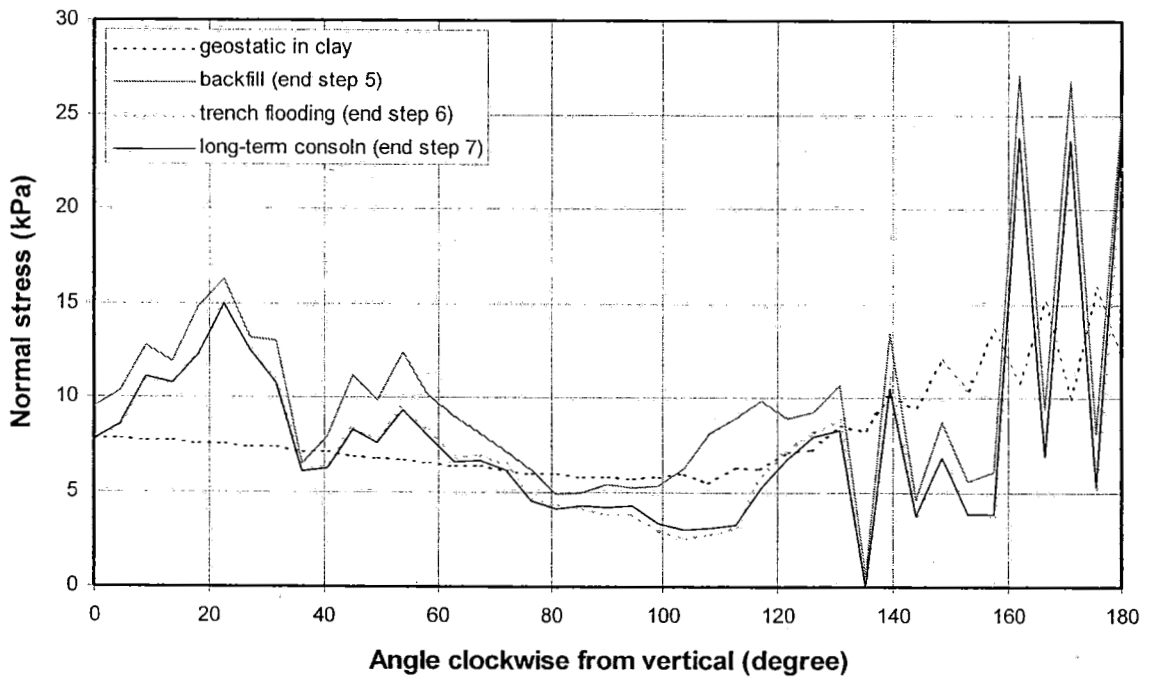


(b) กรณีการวิเคราะห์: D20W20int(nocon)

รูปที่ 4-5 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียวต่อ normal stress ที่กระทำต่อท่อ (กรณีที่ไม่มี การจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง)



(a) กรณีการวิเคราะห์: D20W20(withcon)



(b) กรณีการวิเคราะห์: D20W20int(withcon)

รูปที่ 4-6 ผลกระทบของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทราย/ดินเหนียว ต่อ normal stress ที่กระทำต่อท่อ (กรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง)

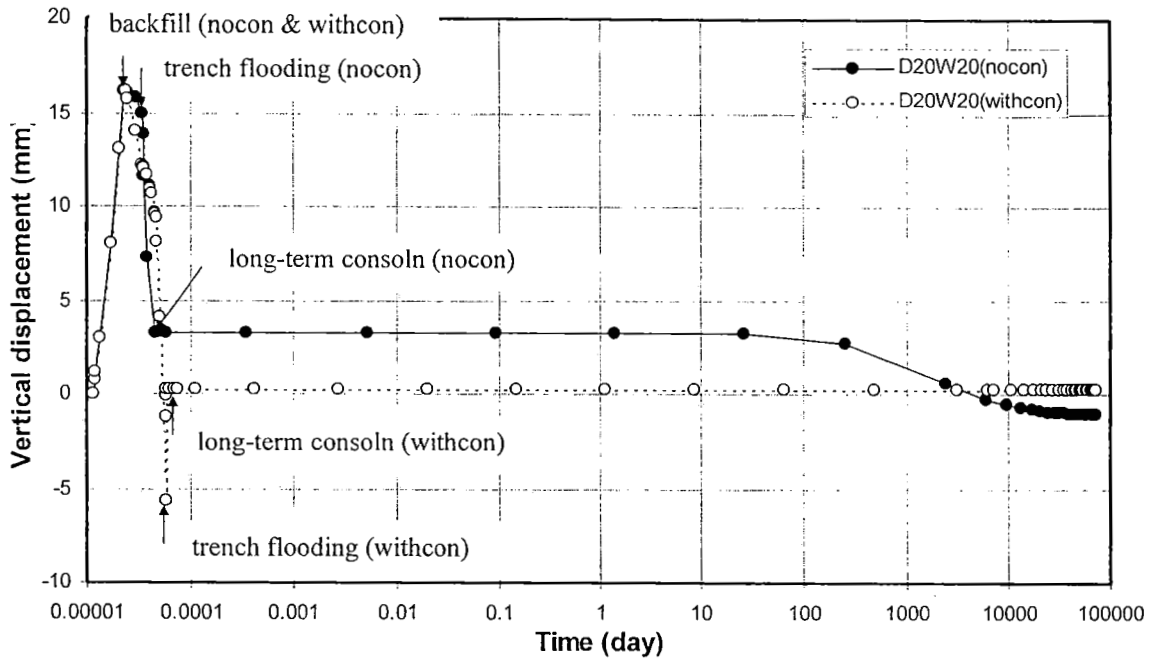
### 4.3 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง

การศึกษาความสำคัญของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ได้กระทำโดยการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ระหว่างกรณีที่มีและไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง สำหรับกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างการทรุดตัวของพื้นของร่องชุดและพื้นของท่อหลังจากการถมทรายนั้นจะมีค่ามากกว่ากรณีที่ไม่มีการจำลองการก่อสร้าง (รูปที่ 4-7) อย่างไรก็ตามเมื่อมีการจำลองผิวสัมผัสค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นของร่องชุดและพื้นของท่อของทั้งกรณีที่มีการจำลองและไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างจะมีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 4-8) (ยกเว้นกรณี

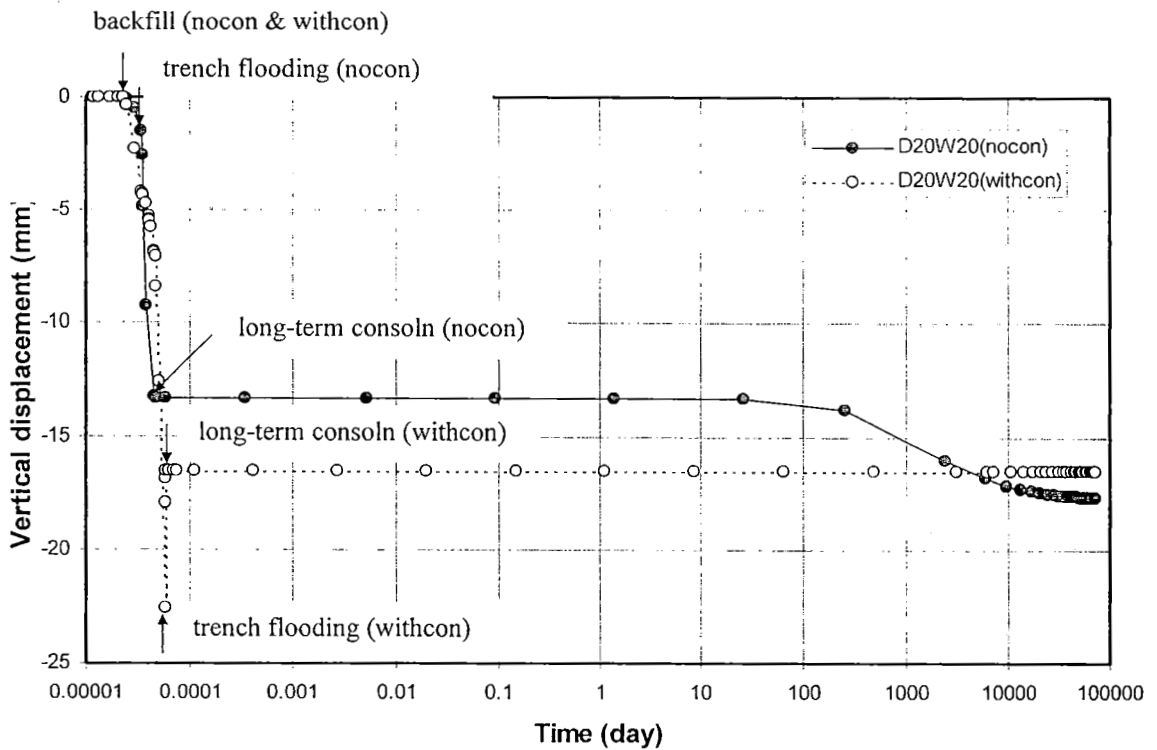
D30W15int(nocon) vs D30W15int(withcon) และ D30W20int(nocon) vs D30W20int(withcon))

สำหรับทุกกรณีการทรุดตัวเมื่อสิ้นสุดการ long-term consolidation สำหรับกรณีที่ไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างจะน้อยกว่าของกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างเล็กน้อย

การที่มีการทรุดตัวมากกว่าหลังจากการถมทรายสำหรับกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างน่าจะเนื่องมาจากการมี normal stress ที่มีค่ามากกว่ากระทำต่อท่อโดยทรายถม ดังที่จะเห็นได้จากรูป 4-9 ค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อหลังจากการถมทรายสำหรับกรณีที่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างจะมีค่ามากกว่าของกรณีที่ไม่มีการจำลองขั้นตอนการก่อสร้าง เมื่อมีการจำลองผิวสัมผัสค่า normal stress ของทั้งสองกรณีจะเหมือนกัน (รูปที่ 4-10)

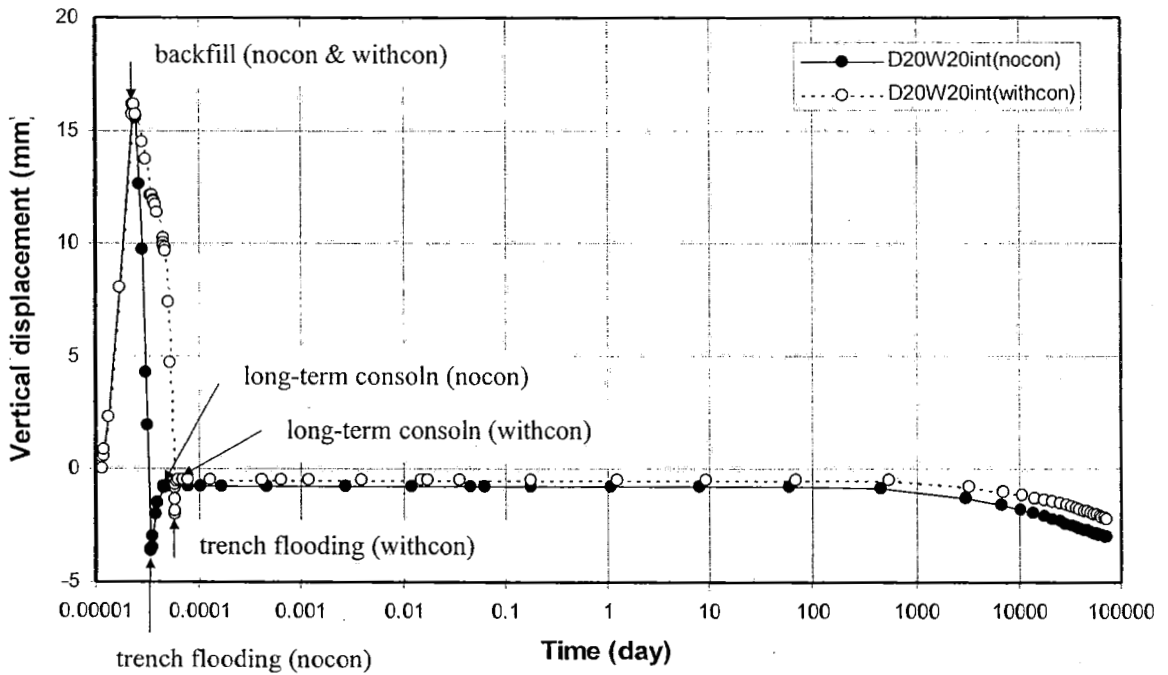


(a) Trench base

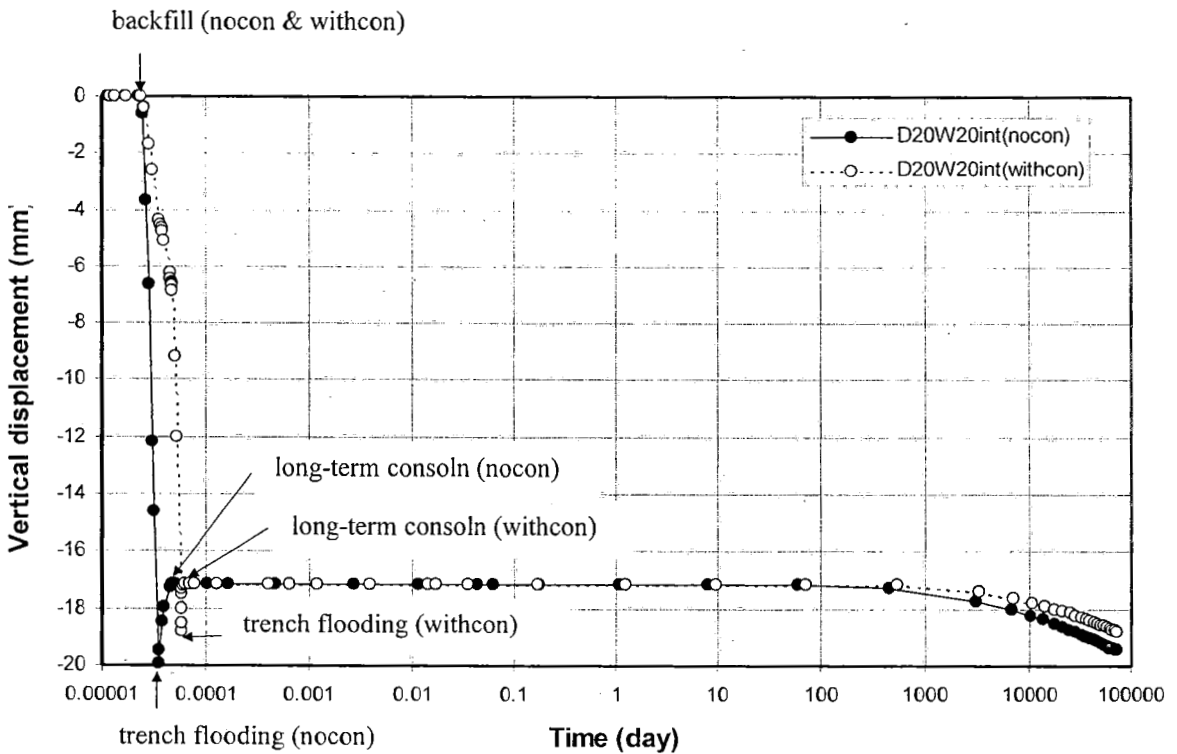


(b) Pipe base

รูปที่ 4-7 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างสำหรับกรณีที่ไม่มีการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียว

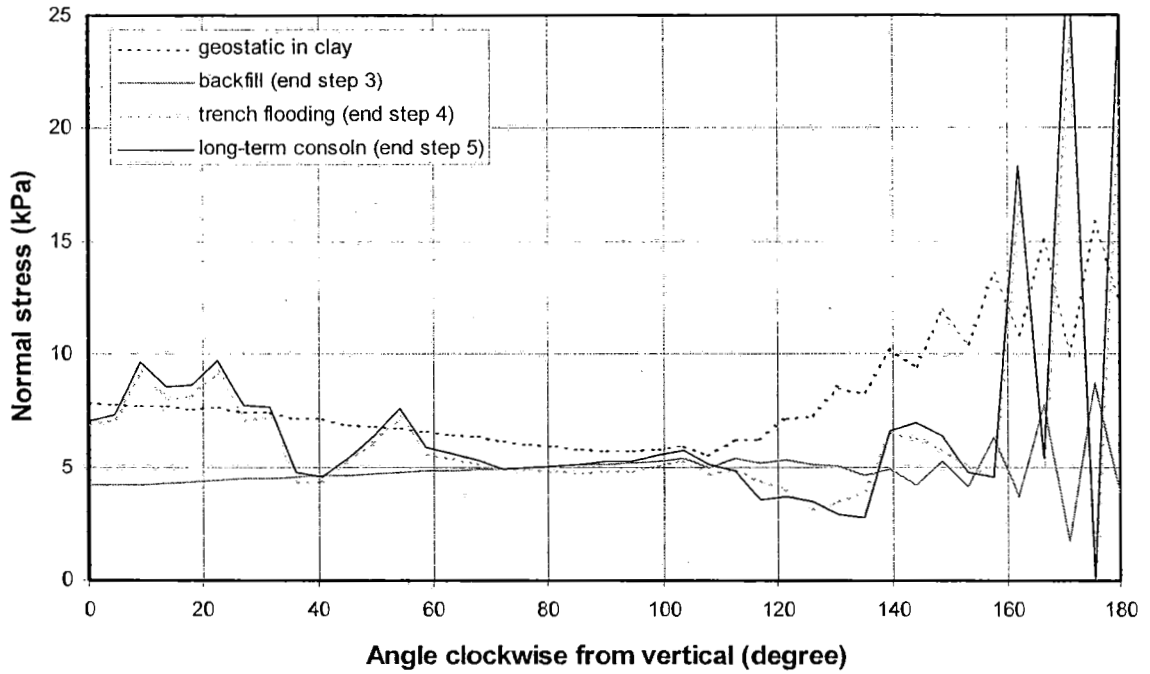


(a) Trench base

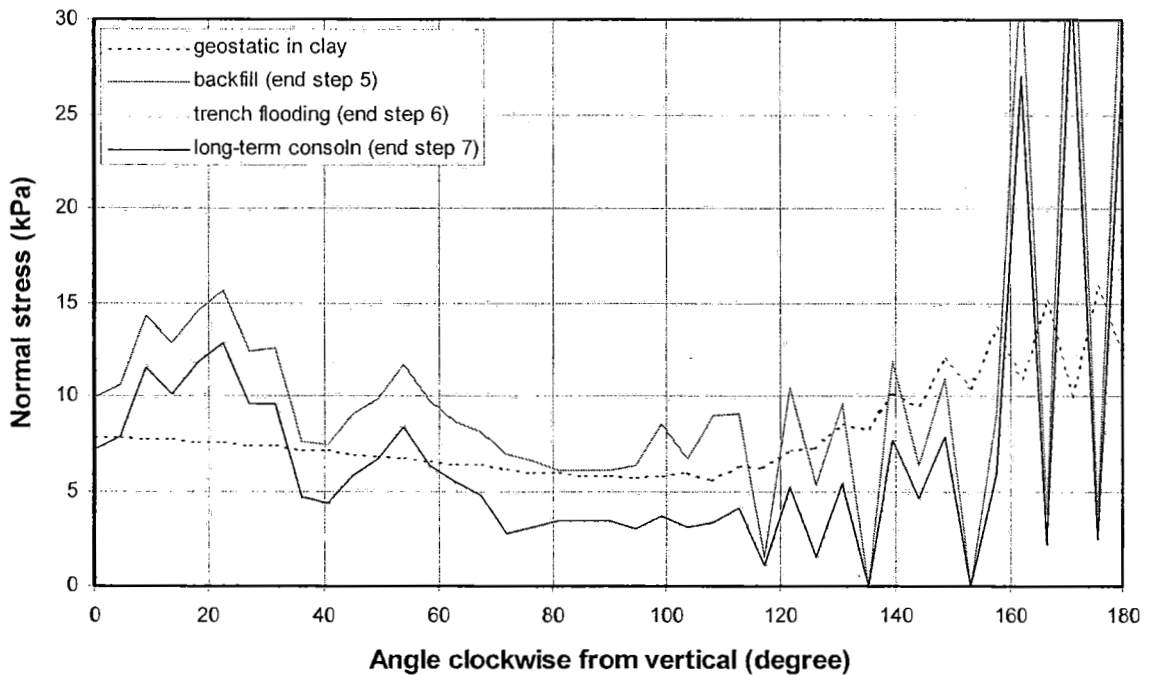


(b) Pipe base

รูปที่ 4-8 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างสำหรับกรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียว

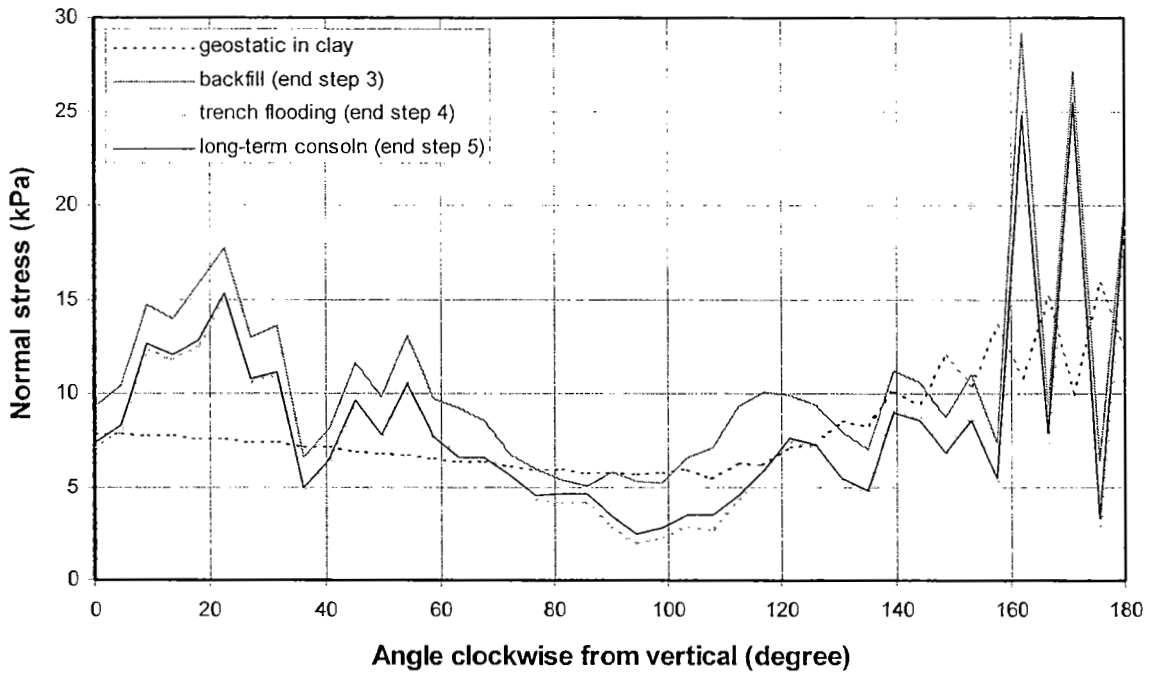


(a) กรณีการวิเคราะห์: D20W20(nocon)

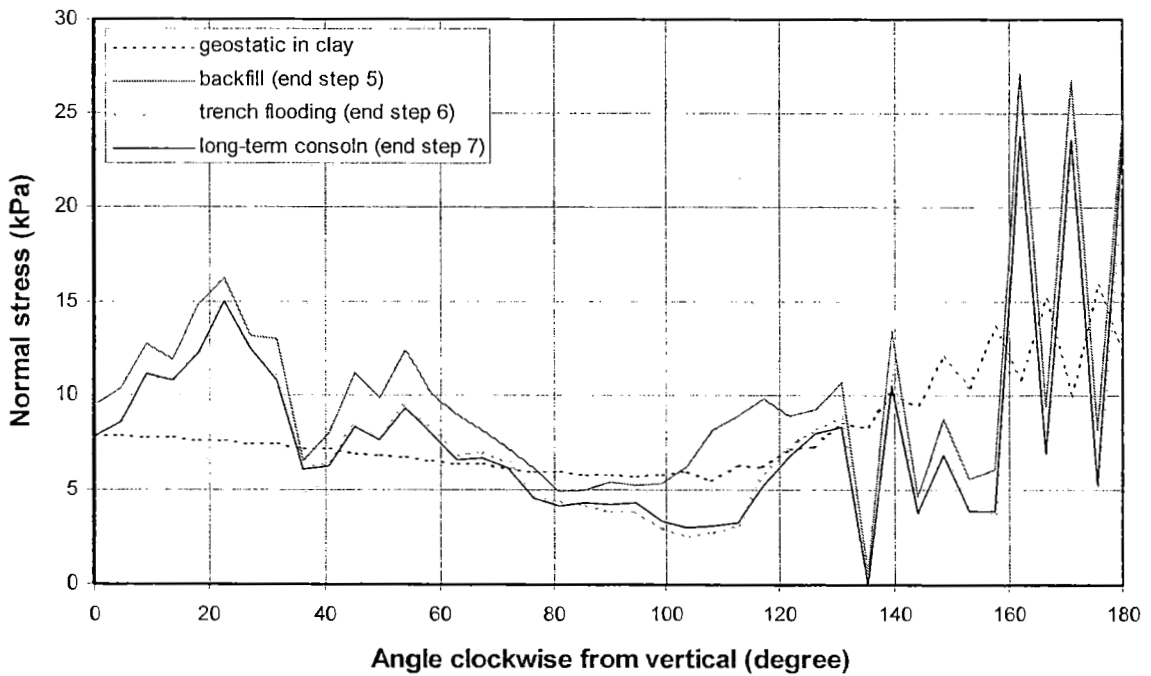


(b) กรณีการวิเคราะห์: D20W20(withcon)

รูปที่ 4-9 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อ normal stress ที่กระทำต่อท่อ (สำหรับกรณีที่ไม่มี การจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียว)



(a) กรณีการวิเคราะห์: D20W20int(nocon)



(b) กรณีการวิเคราะห์: D20W20int(withcon)

รูปที่ 4-10 ผลกระทบของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อ normal stress ที่กระทำต่อท่อ (สำหรับกรณีที่มีการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถม/ดินเหนียว)

## บทที่ 5 บทสรุป

การศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อศึกษา long-term pipeline-soil interaction ของท่อที่ฝังในร่องขุดที่ถมกลับโดยทรายที่ฝังตัวในดินเหนียวอ่อน โดยได้ศึกษาผลกระทบของมิติของร่องขุด, ความสำคัญของการจำลองผิวสัมผัสระหว่างทรายถมและดินเหนียว, และความสำคัญของการจำลองขั้นตอนการก่อสร้างต่อ pipeline-soil interaction

ในการศึกษาได้ทำการแยกพฤติกรรม long-term pipeline-soil เป็น 2 ขั้นตอน คือ (i) การที่น้ำท่วมร่องขุด (trench flooding) และ (ii) long-term consolidation ระหว่าง trench flooding ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงว่าความกว้างของร่องขุดมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อปฏิสัมพันธ์ระหว่างท่อและดิน สำหรับร่องขุดที่แคบ (กว้าง 1.5 ม) ค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อจะเพิ่มขึ้นและท่อจะทรุดตัวมากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากร่องขุดที่แคบจะมี normal stress จากทรายถมที่น้อยกว่ากระทำต่อท่อ เนื่องจากหลังจากสิ้นสุดการถมทรายกลับจะมี arching effect เหนือท่อมากกว่า ระหว่าง trench flooding ท่อและทรายถมจะทรุดตัวและปรับการปฏิสัมพันธ์ระหว่างกันเพื่อทำให้ทรายถมถ่าย stress ไปสู่ท่อมากขึ้นและจะทำให้เกิดการทรุดตัวเพิ่มขึ้นอีก สำหรับร่องขุดที่กว้าง (กว้าง 2 เมตร) ค่า stress ที่กระทำต่อท่อจะลดลงและท่อจะเคลื่อนที่ขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากร่องขุดที่กว้างมี arching effect เกิดขึ้นน้อยกว่าเมื่อสิ้นสุดการ trench backfilling ระหว่าง trench flooding กลไกที่สำคัญที่เกิดขึ้นคือการลดลงของ unit weight ของทรายถมและท่อจากค่า dry unit weight ไปเป็นค่า submerged unit weight ซึ่งจะเป็นผลทำให้ค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อลดลงและท่อและดินเคลื่อนที่ขึ้น

ระหว่าง long-term consolidation ท่อจะทรุดตัวลงสำหรับกรณีร่องขุดทั้งสองความกว้าง อย่างไรก็ตามไม่พบการเปลี่ยนแปลงของค่า normal stress ที่กระทำต่อท่อ หลังจากการเปลี่ยนแปลงของ normal stress ระหว่าง trench flooding ของทั้งสองกรณีความกว้างแล้ว (เพิ่มขึ้นสำหรับร่องขุดแคบ และ ลดลงสำหรับร่องขุดกว้าง) ค่า normal stress ของทั้งสองกรณีจะเท่ากันระหว่าง long-term consolidation

ในความเป็นจริงนั้น trench flooding และ long-term consolidation จะเกิดขึ้นไปพร้อมๆกันเป็นเวลายาวนาน ดังนั้นผลรวมของพฤติกรรมระหว่าง trench flooding และ long-term consolidation สามารถพิจารณาว่าเป็นพฤติกรรมในระยะยาวในสนามได้ ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงว่า long-term response ของท่อขึ้นอยู่กับความกว้างของร่องขุดอย่างมาก แต่ไม่ขึ้นกับความลึกของร่องขุดเลย (สำหรับความลึกที่ศึกษาในงานวิจัยนี้) นอกจากนี้ long-term response น่าจะเกิดเนื่องจากกระบวนการ trench flooding (การอิ่มตัวด้วยน้ำ) ไม่ใช่การ consolidation ของดินเหนียวรอบๆ

หากไม่มีการจำลองผิวสัมผัสและขั้นตอนการก่อสร้าง จะทำให้ arching effect กระทบกับผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์อย่างมาก ค่า stress ที่กระทำต่อท่อโดยทรายถมหลังจาก trench backfilling จะมีค่าน้อยกว่าความจริงในกรณีนี้ เพื่อที่จะให้ได้ผลการวิเคราะห์ไฟไนต์เอลิเมนต์ที่ใกล้เคียงความจริงควรมีการจำลองผิวสัมผัสและขั้นตอนการก่อสร้างในการวิเคราะห์สำหรับปัญหา pipeline-soil interaction ในร่องขุด

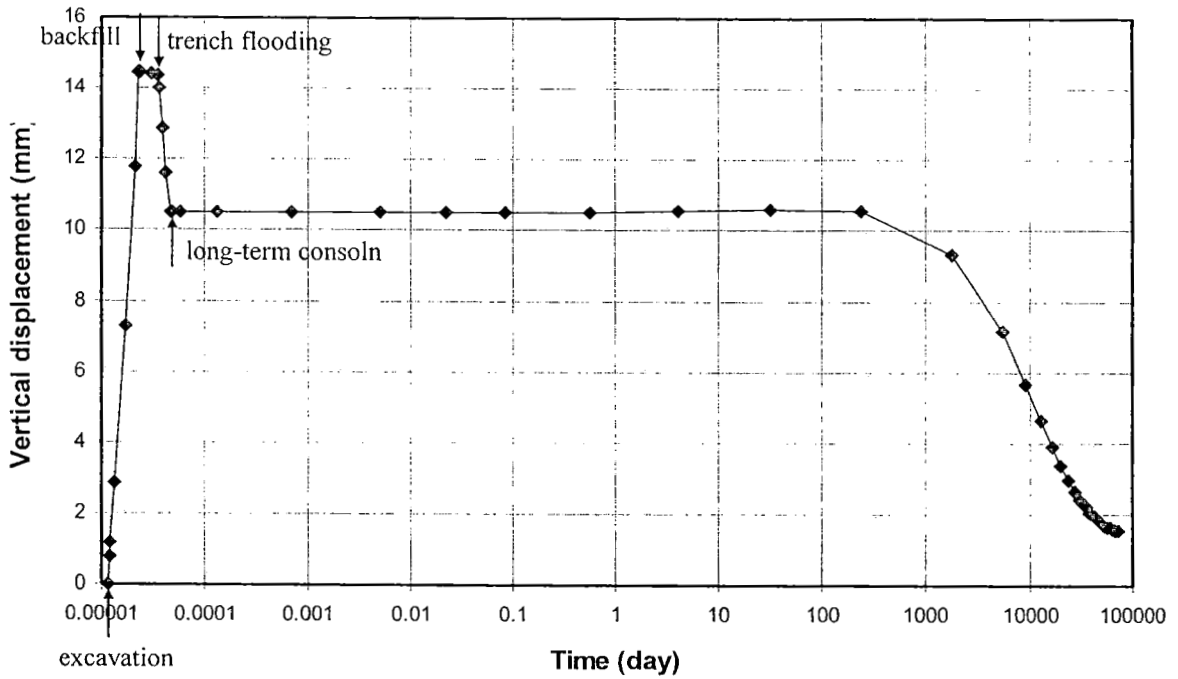


## เอกสารอ้างอิง

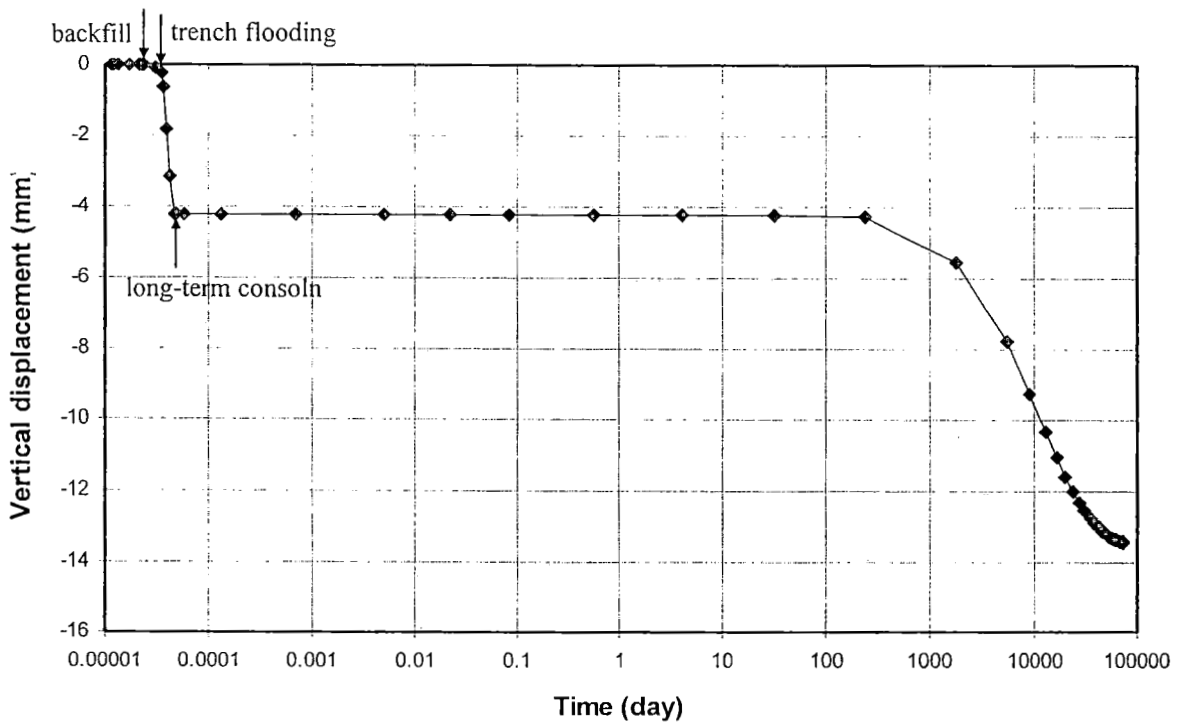
- ASTM Designation: F 679-86, "Standard Specification for Poly(Vinyl Chloride) (PVC) Large-Diameter Plastic Gravity Sewer Pipe and Fittings"
- ASTM Designation: F 690-86, "Standard Practice for Underground Installation of Thermoplastic Pressure Piping Irrigation Systems"
- Balasubramaniam, A. S. and Chaudhry, A. R. (1978), "Deformation and Strength Characteristics of Soft Bangkok Clay", *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 104, No. GT9, pp. 1153-1167
- Hibbitt, Karlsson, and Sorensen, Inc. (HKS) (2006), ABAQUS 6.6 User's Manual
- Kuwano, J. and Bhattarai, B. N. (1989), "Deformation characteristics of Bangkok Clay under three dimensional stress conditions", *Geotechnical Engineering, SEAGS*, Vol. 20, No. 2, pp. 111-137
- Menetrey, Ph. and William, K. J. (1995), "Triaxial Failure Criterion for Concrete and its Generalization", *ACI Structural Journal*, Vol. 92, pp. 311-318
- Schofield, A. N. and Wroth, C. P. (1968), *Critical State Soil Mechanics*, McGraw-Hill
- Tamrakar, S. B., Shibuya, S., and Mitachi, T. (2000), "Parametric FE analysis on the behaviour of Bangkok Clay underneath test embankment at Nong Ngoo Hao", *Geotechnical Engineering, SEAGS*, Vol. 31, No. 3, pp. 193-208
- Trautmann, C. H. and O'Rourke, T. D. (1983), "Behavior of Pipe in Dry Sand Under Lateral and Uplift Loading", *Geotechnical Engineering Report 83-7*, Cornell University

ภาคผนวก ก

การเคลื่อนตัวในแนวตั้งของพื้นที่ร่องชุดและท่อ

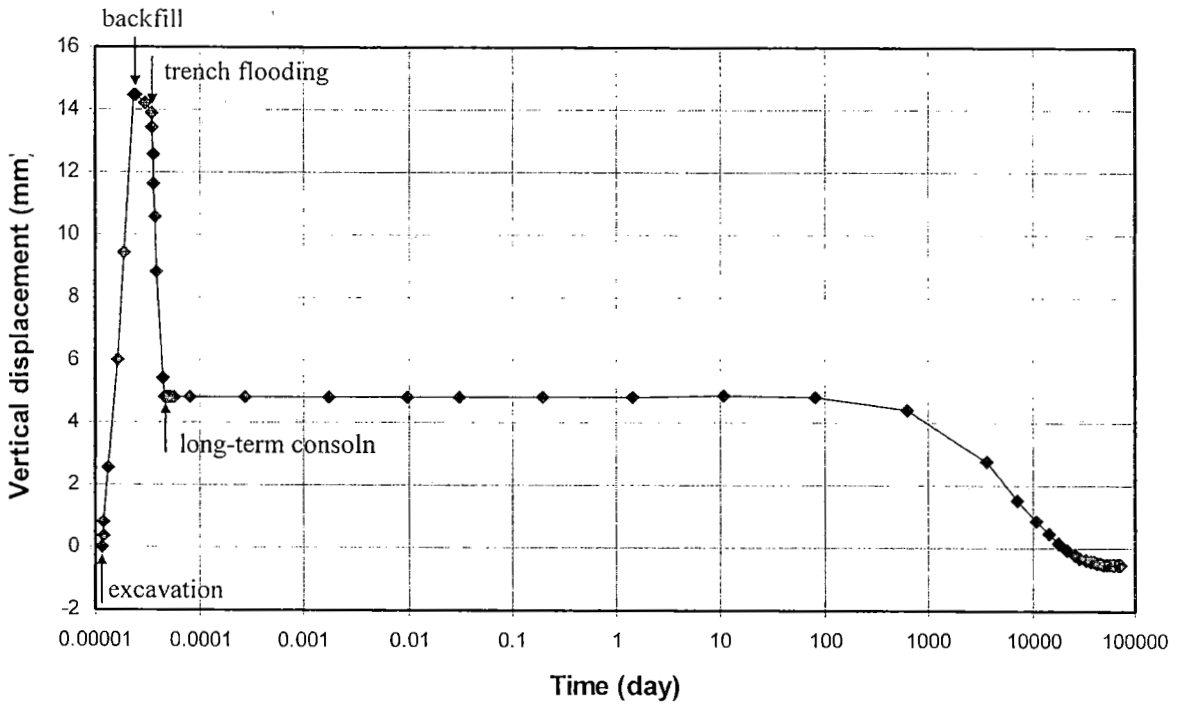


(a) Vertical displacement of trench base

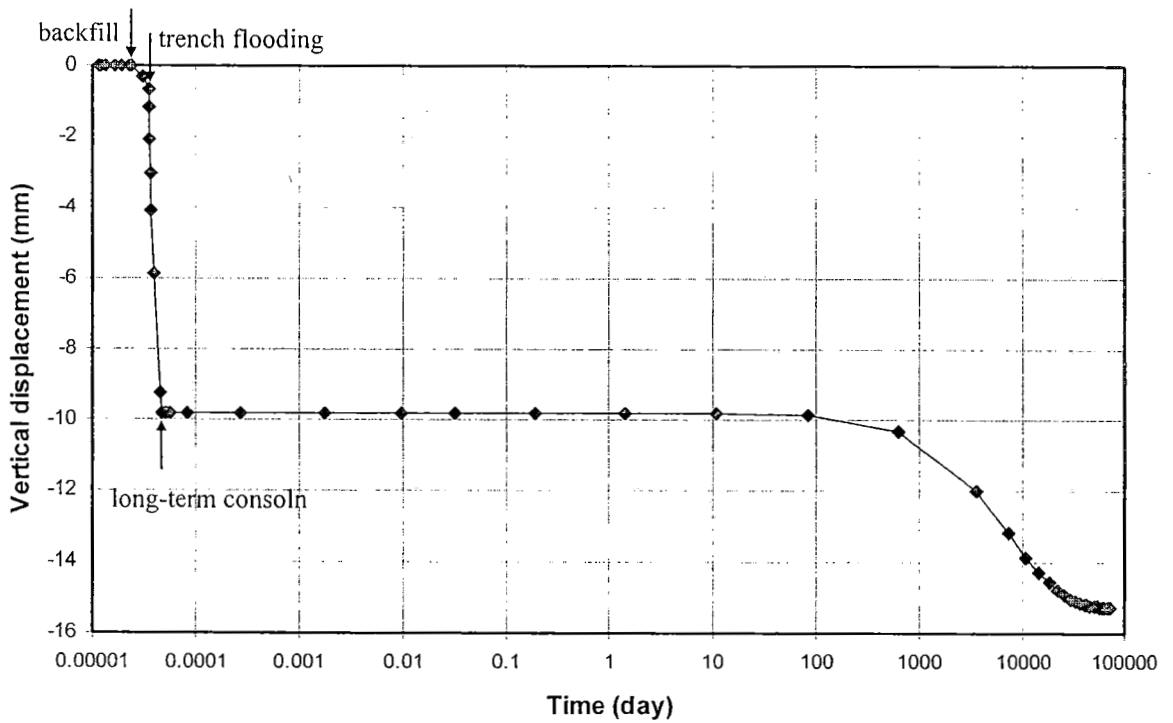


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-1 กรณีการวิเคราะห์ D20W15(nocon)

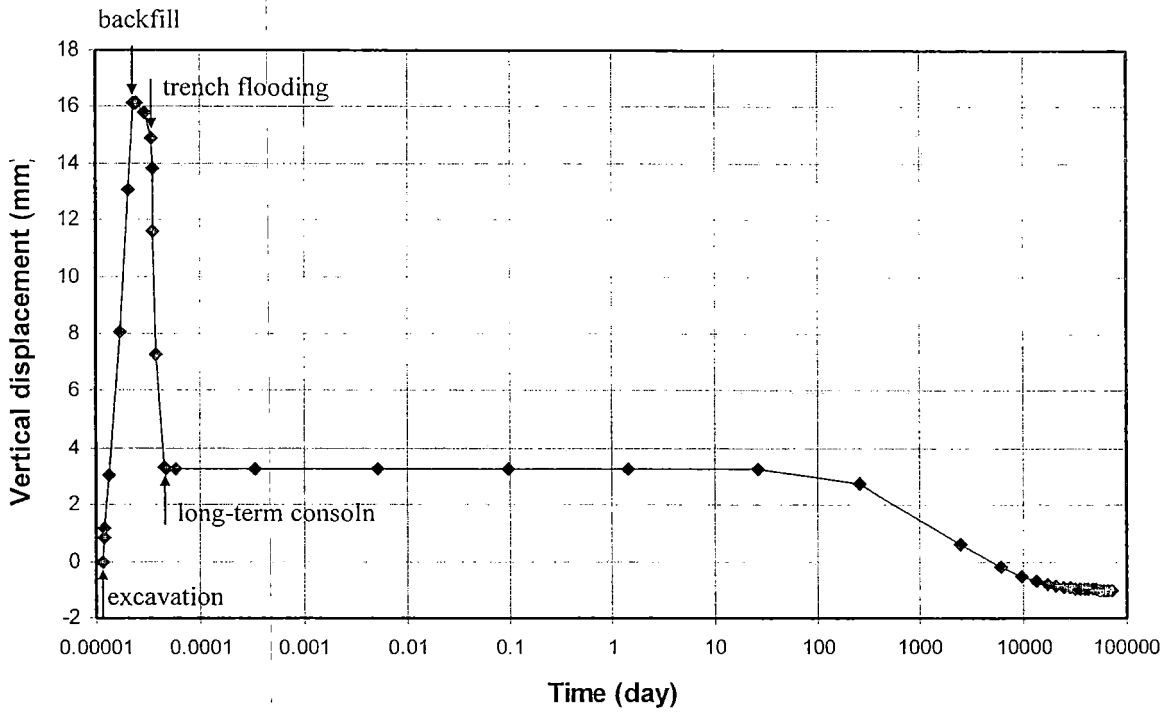


(a) Vertical displacement of trench base

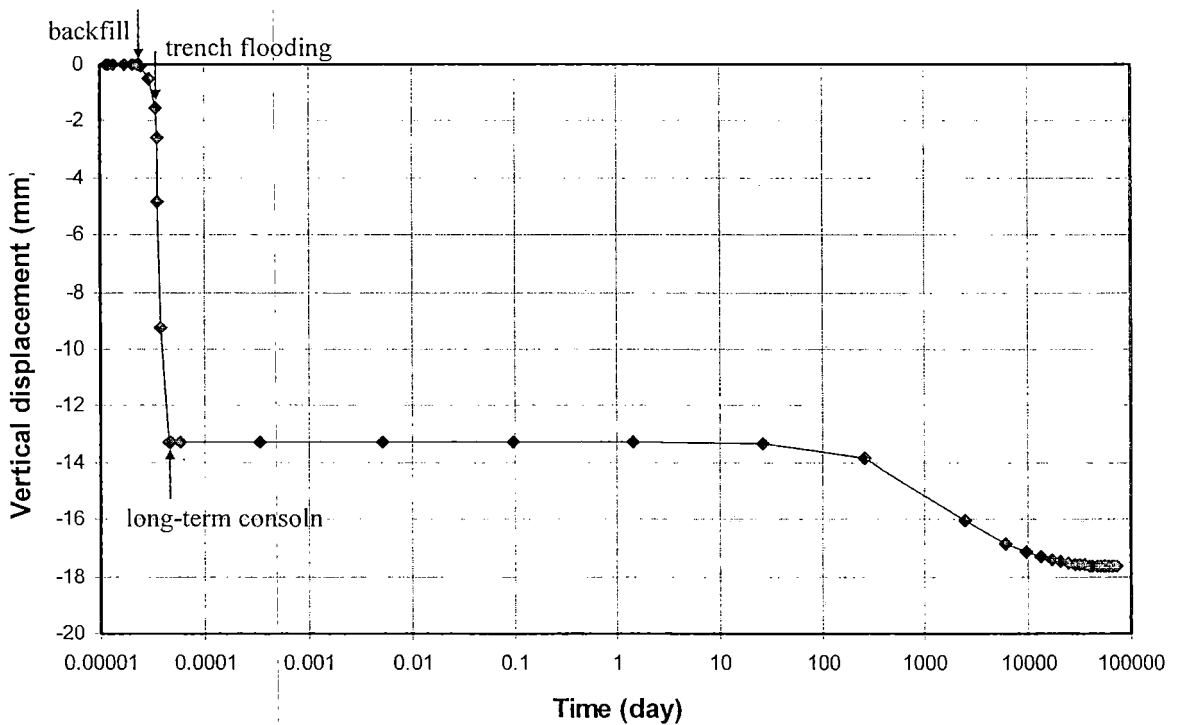


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-2 กรณีการวิเคราะห์ D20W15int(nocon)

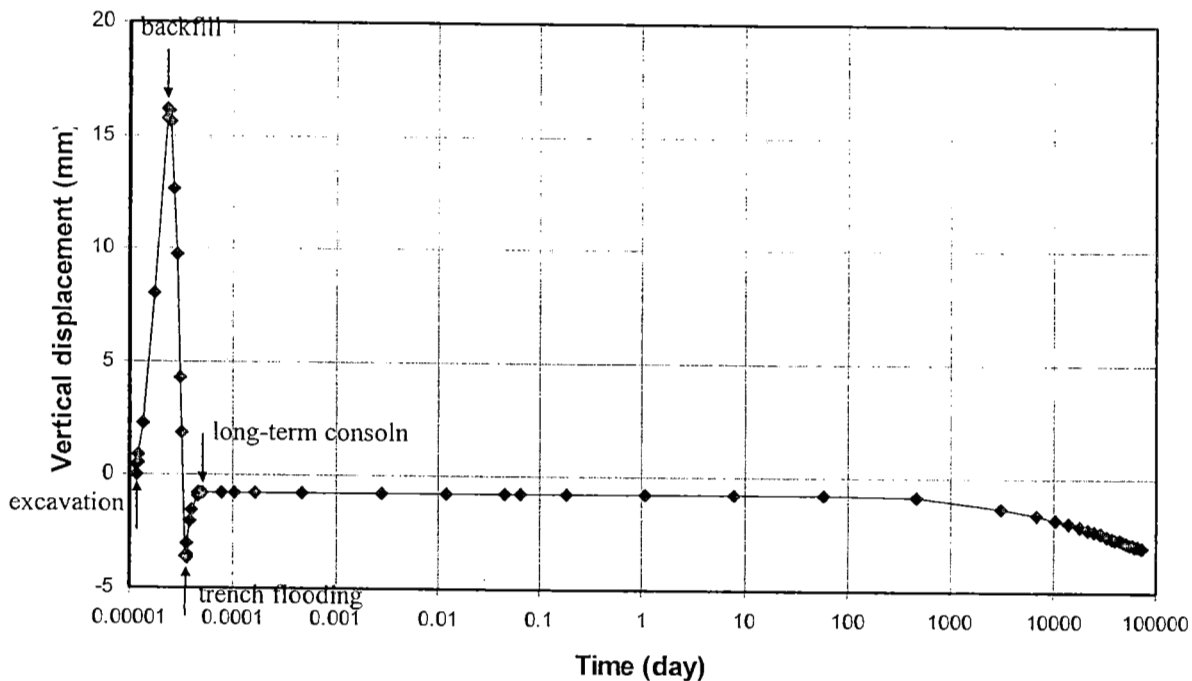


(a) Vertical displacement of trench base

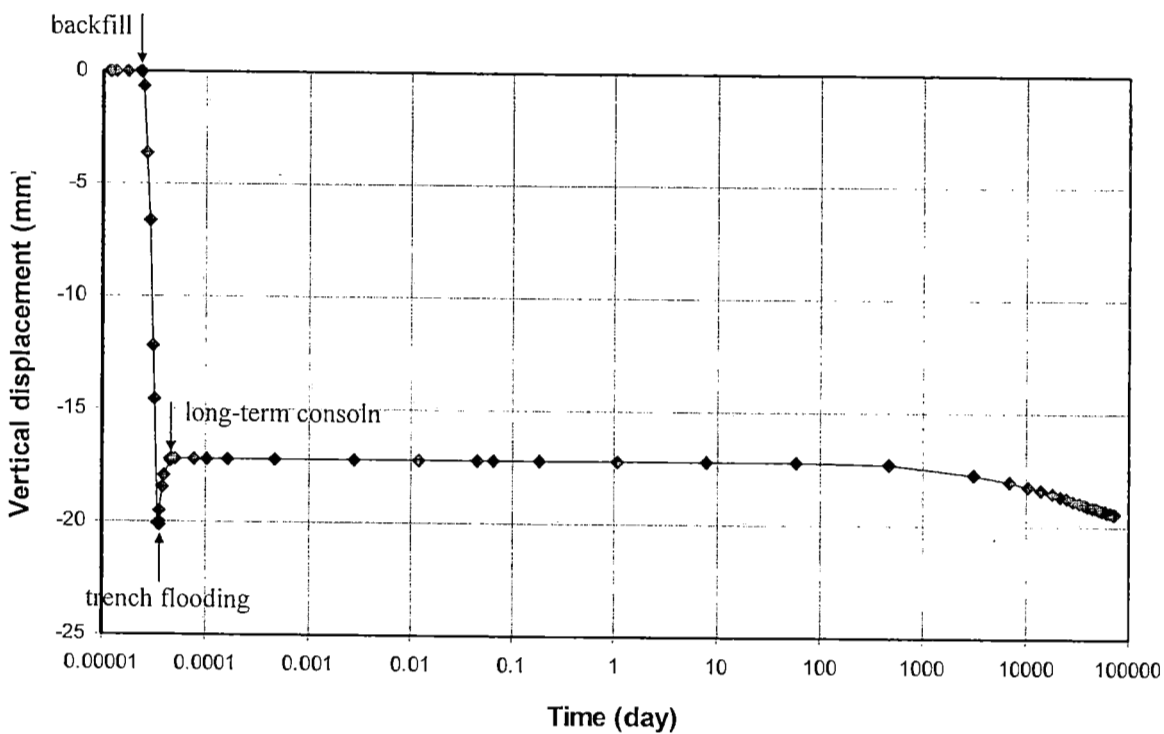


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-3 กรณีการวิเคราะห์ D20W20(nocon)

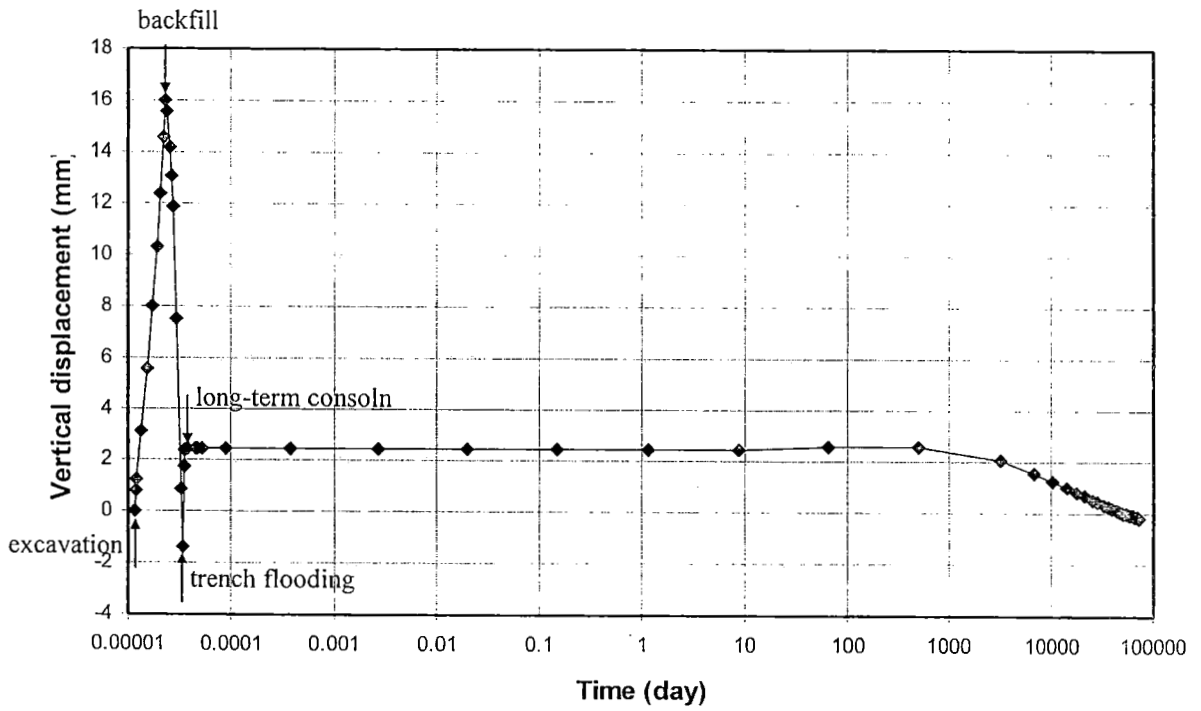


(a) Vertical displacement of trench base

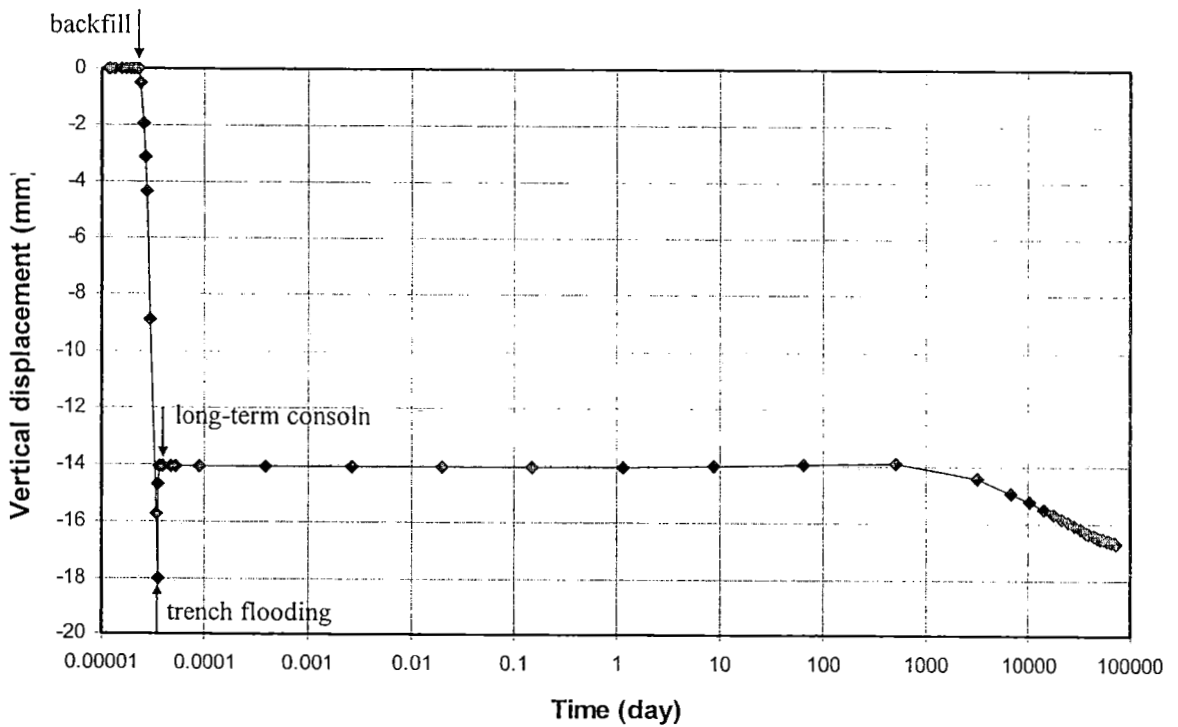


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-4 กรณีการวิเคราะห์ D20W20int(nocon)

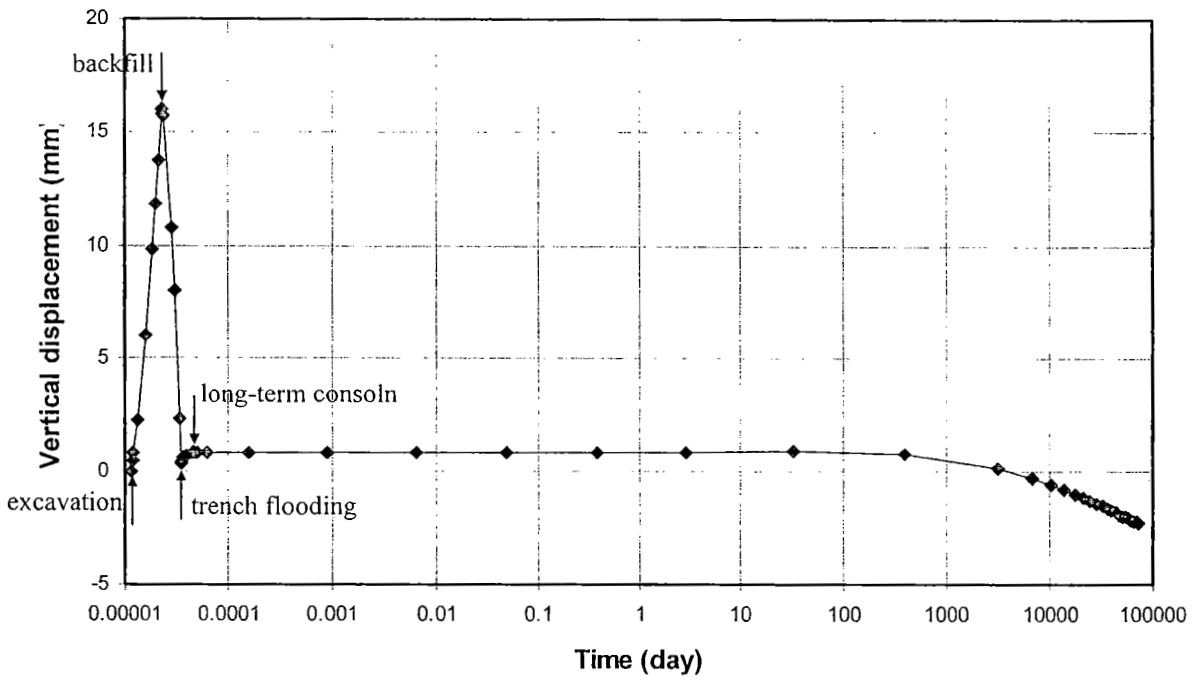


(a) Vertical displacement of trench base

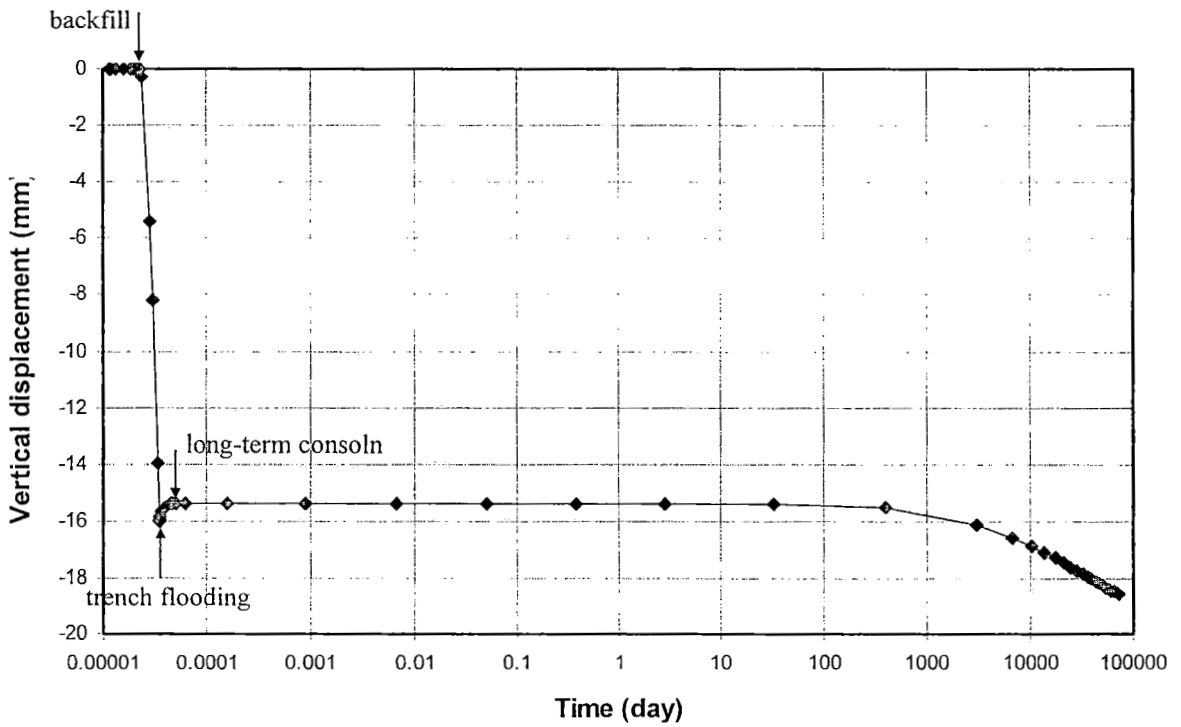


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ๓-5 กรณีการวิเคราะห์ D30W15(nocon)



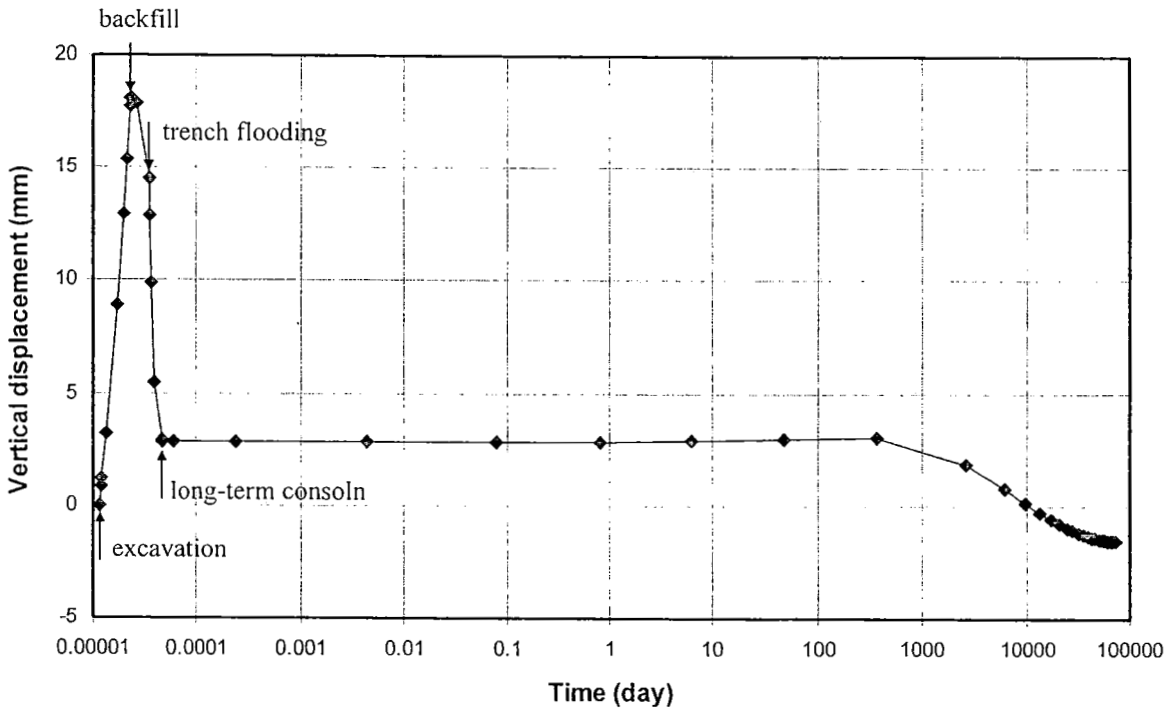
(a) Vertical displacement of trench base



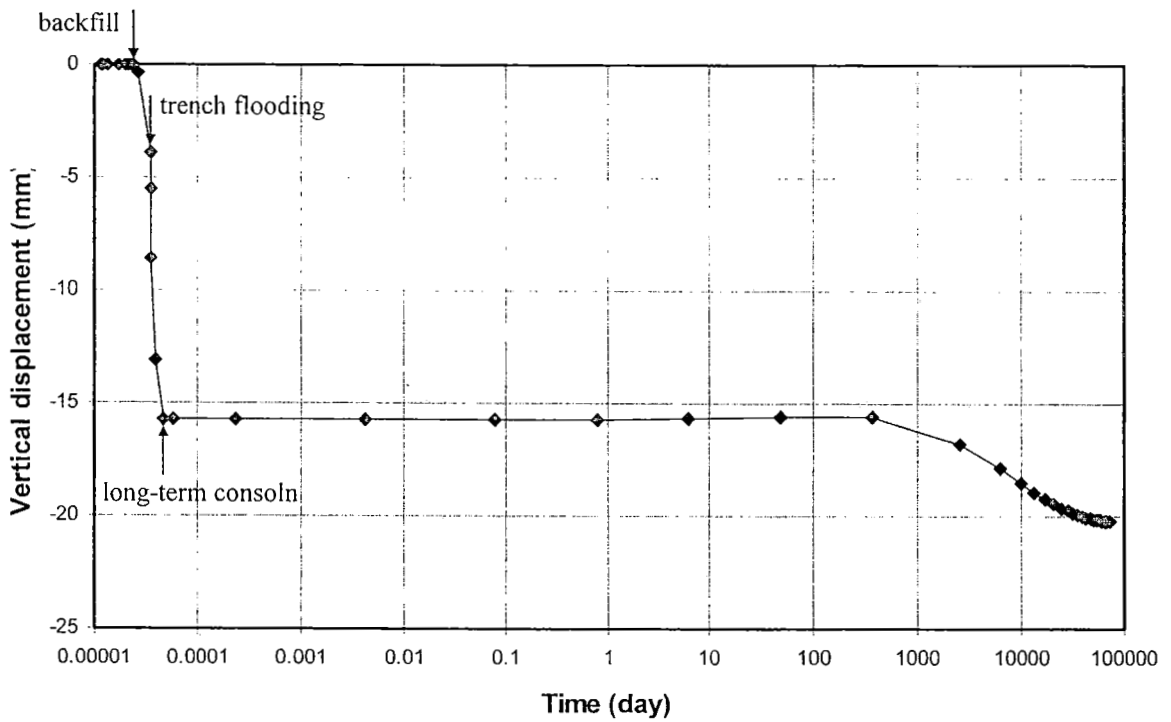
(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-6 กรณีการวิเคราะห์ D30W15int(nocon)



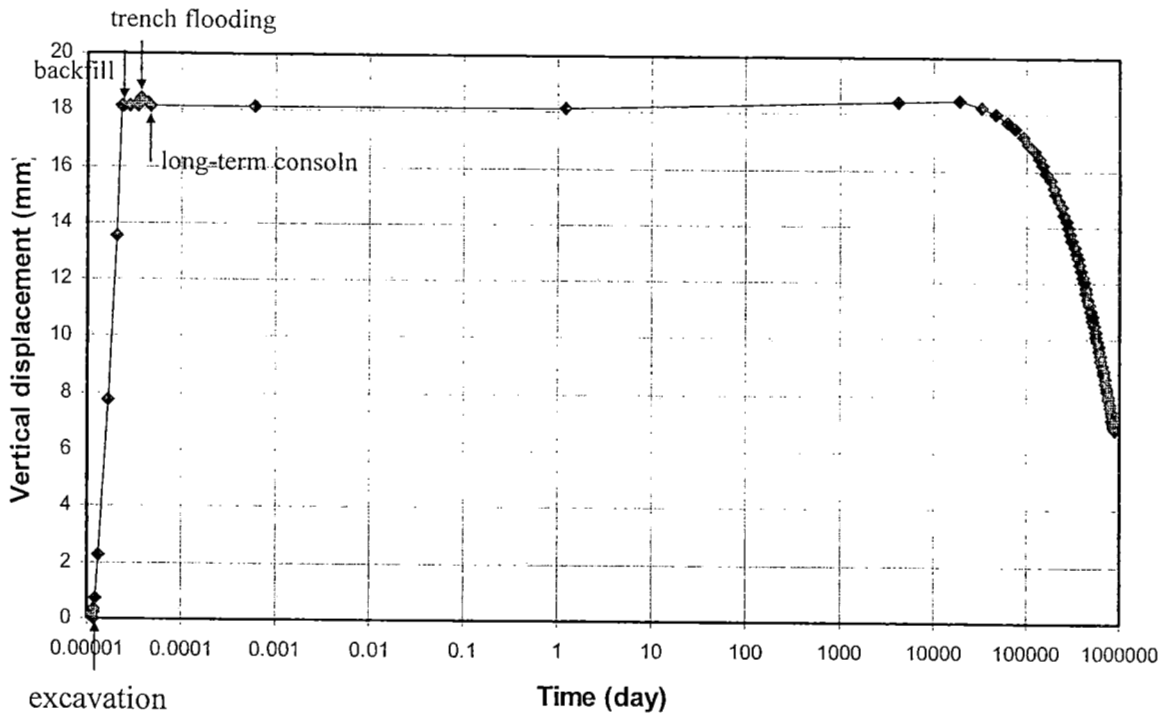


(a) Vertical displacement of trench base

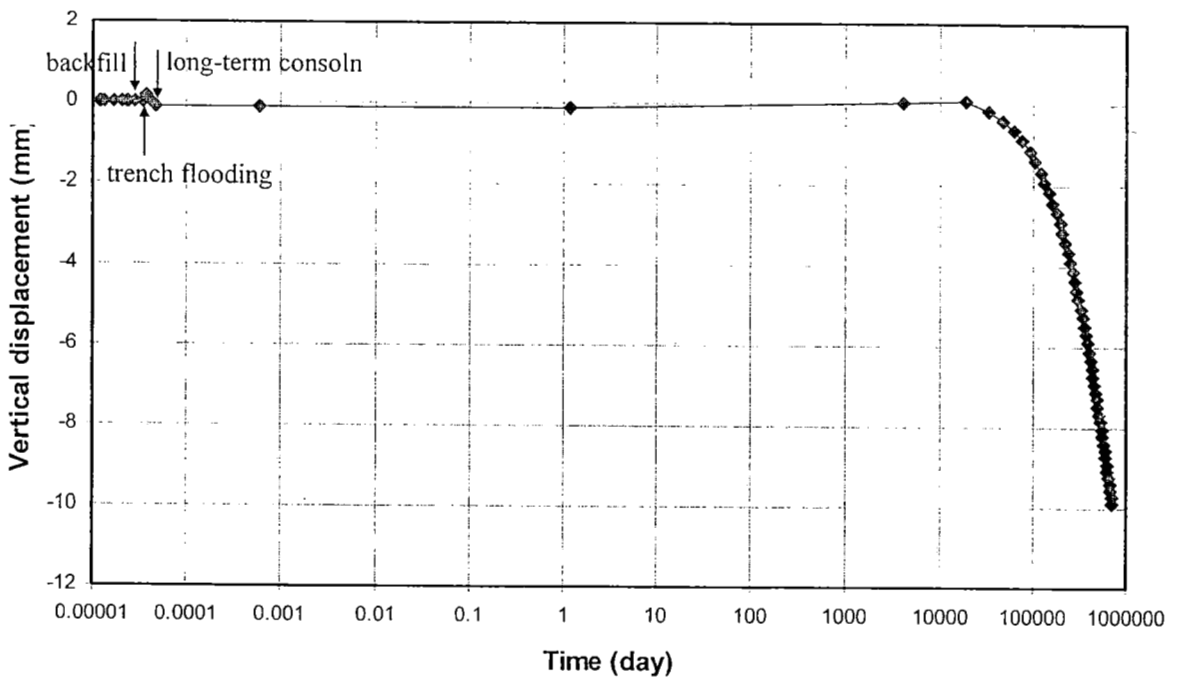


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-7 กรณีการวิเคราะห์ D30W20(nocon)

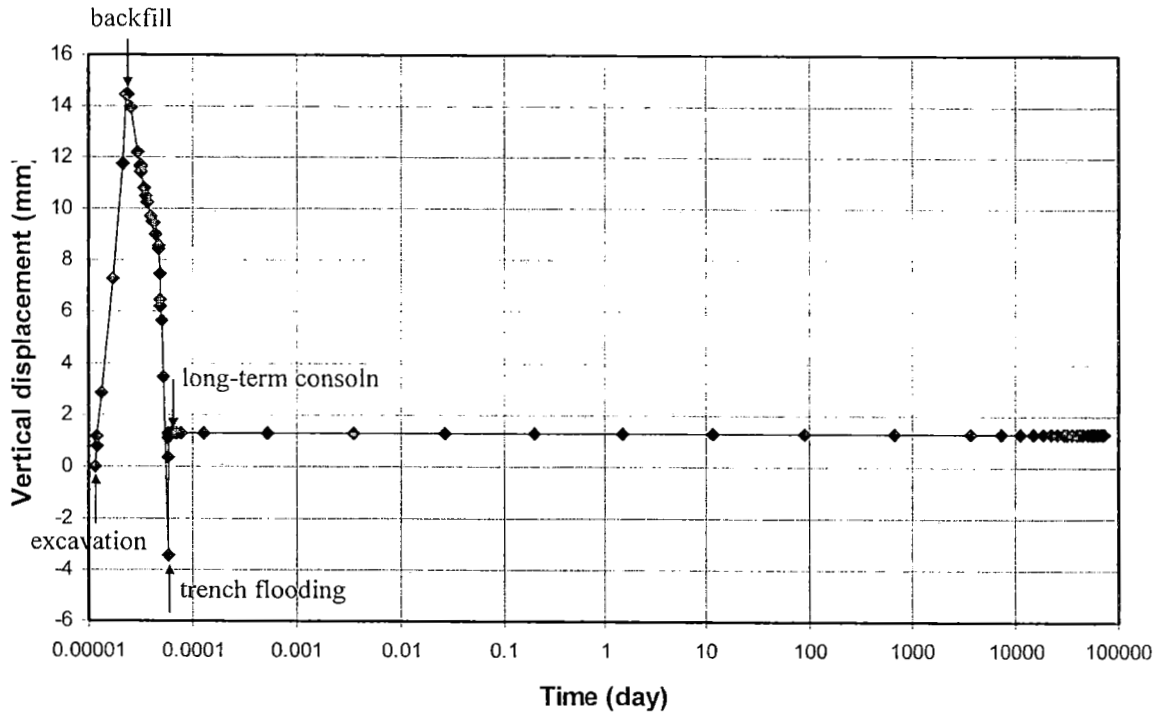


(a) Vertical displacement of trench base

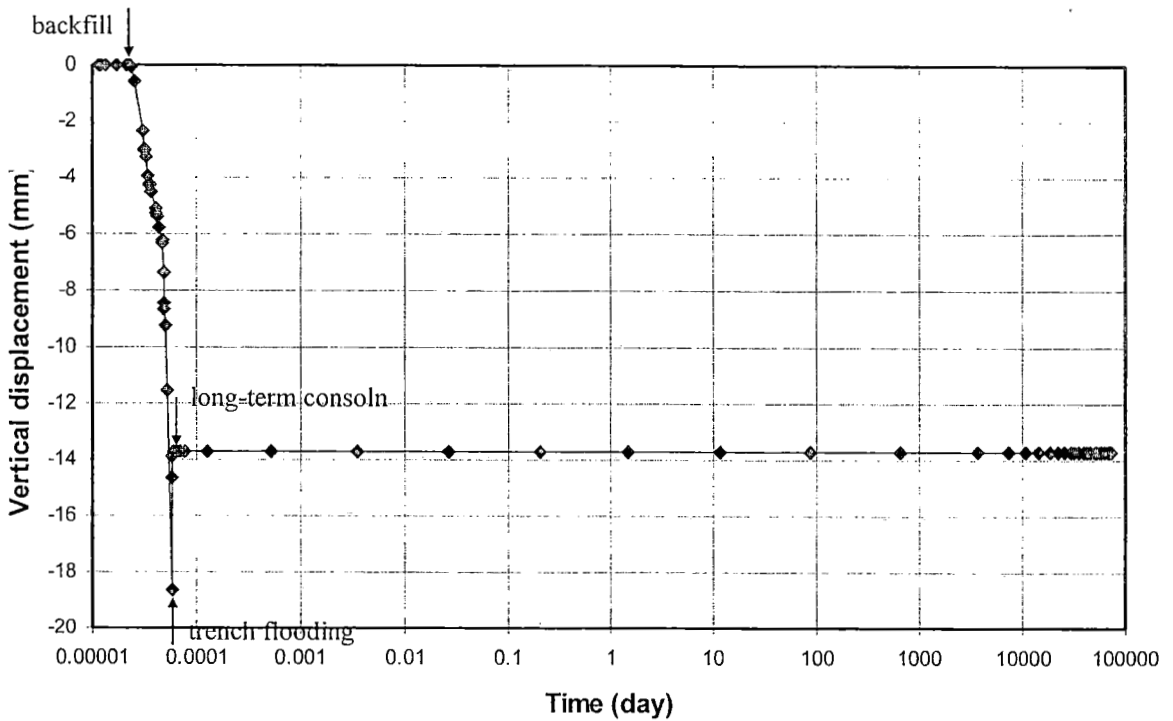


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ๓-๘ กรณีการวิเคราะห์ D30W20int(nocon)

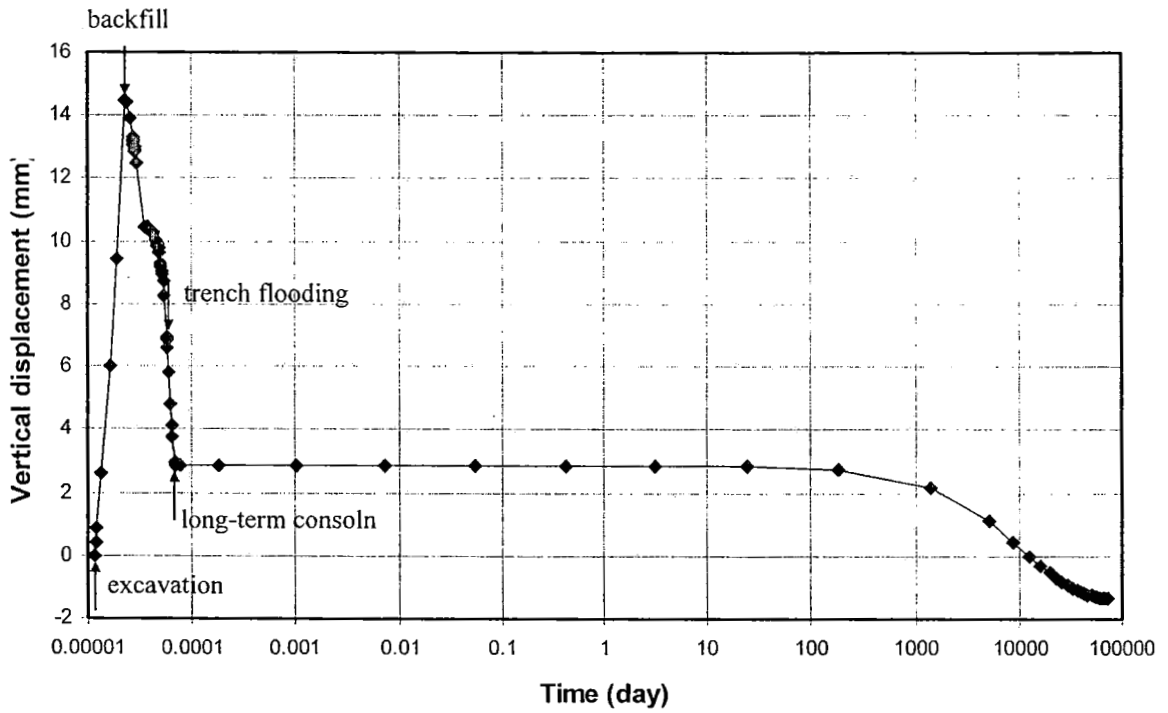


(a) Vertical displacement of trench base

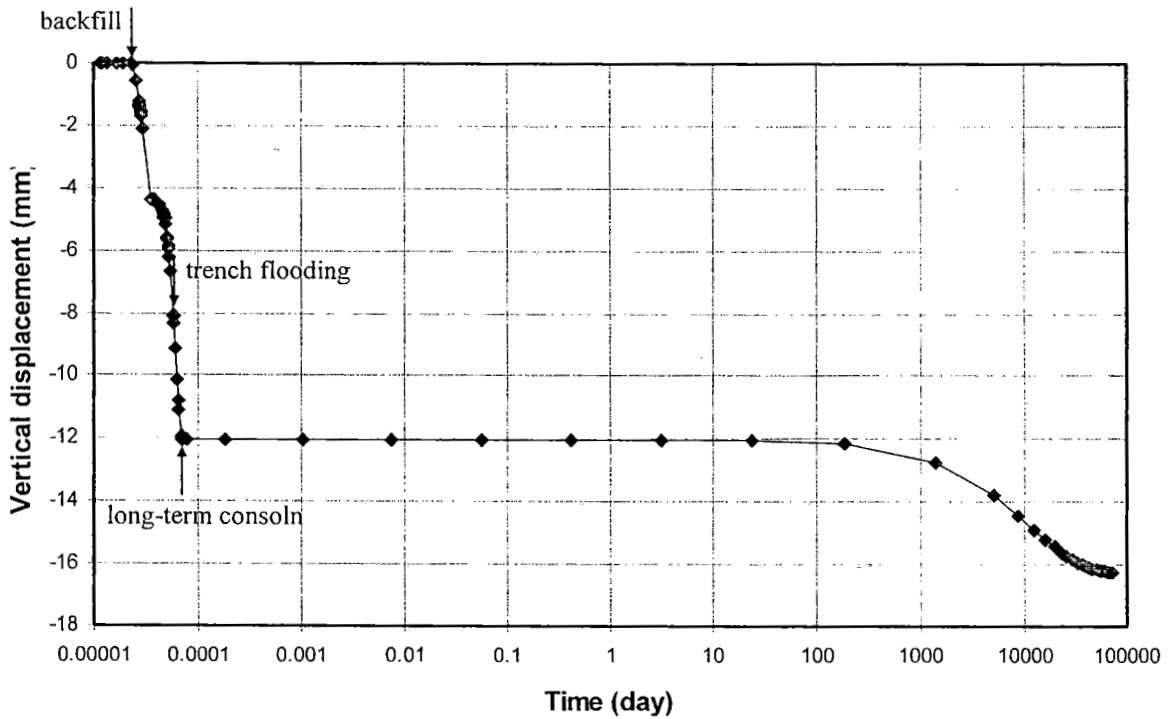


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-9 กรณีการวิเคราะห์ D20W15(withcon)

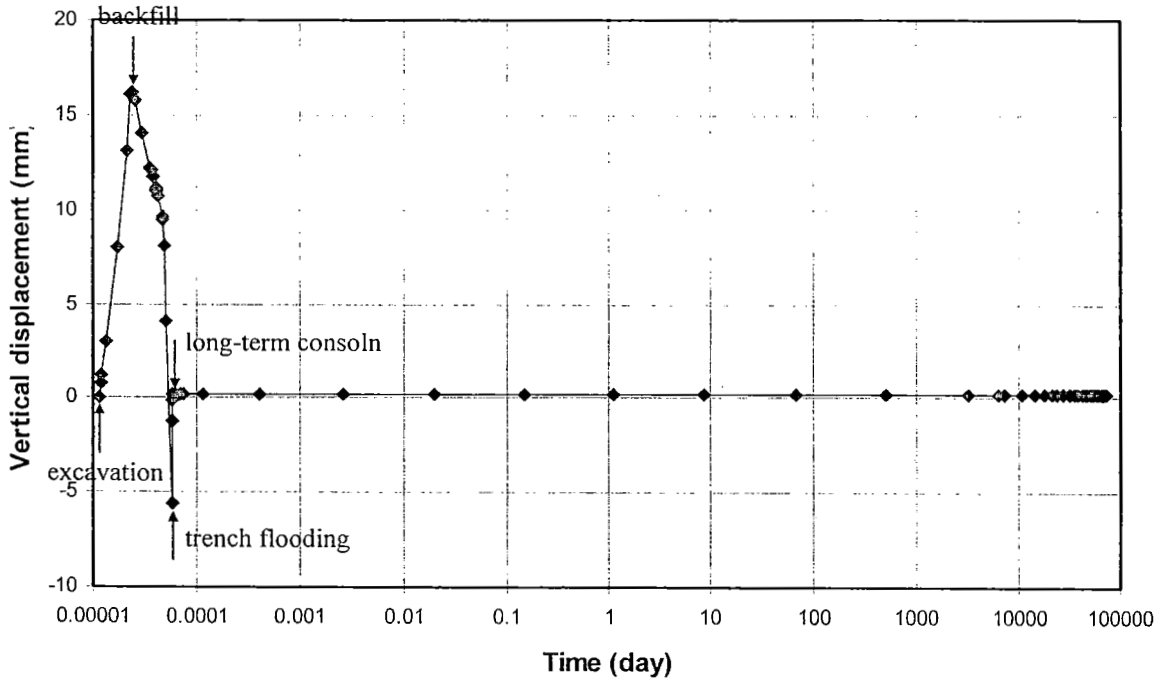


(a) Vertical displacement of trench base

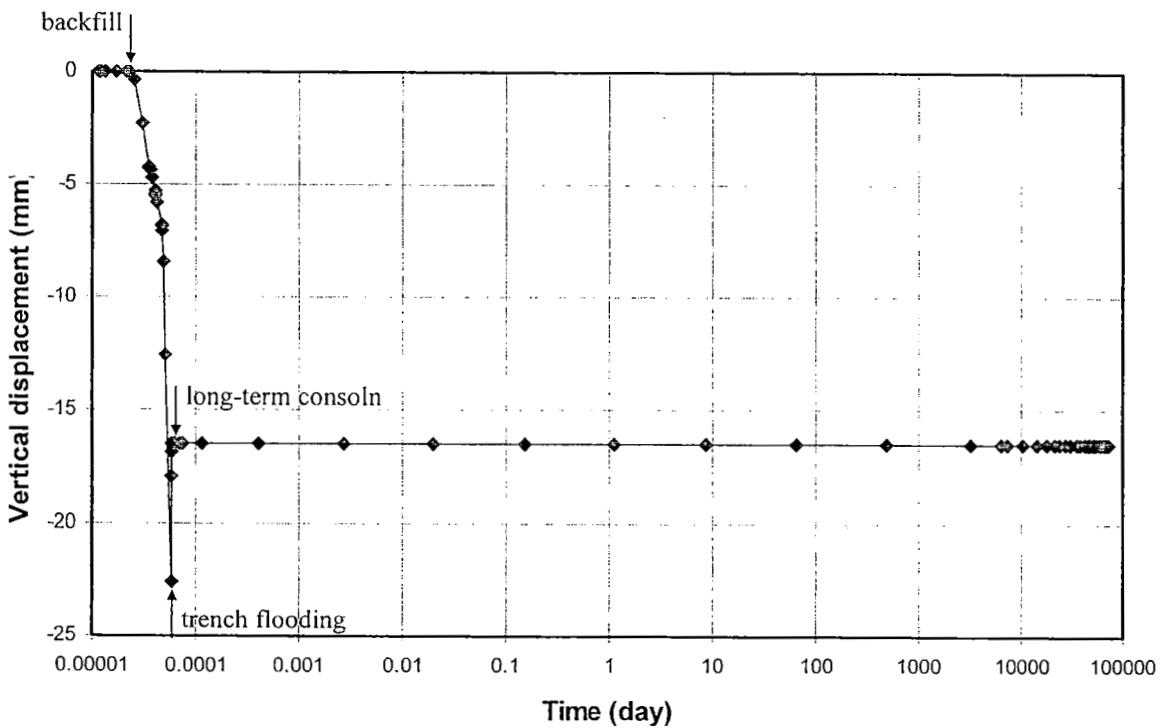


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-10 กรณีการวิเคราะห์ D20W15int(withcon)

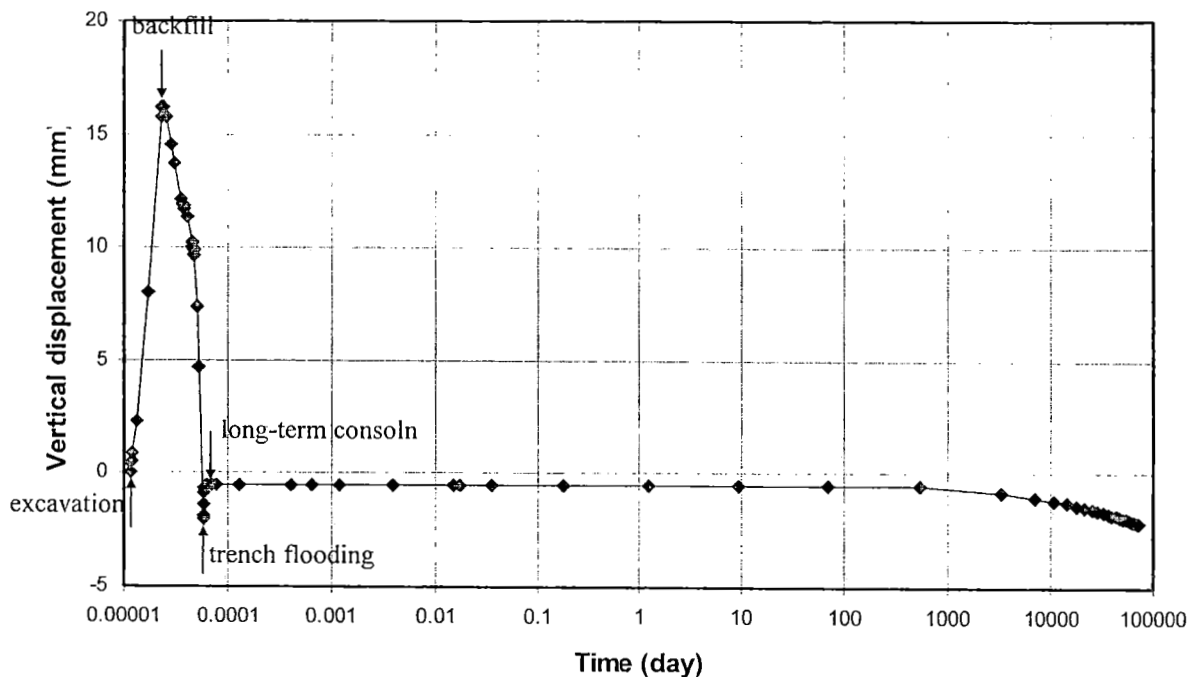


(a) Vertical displacement of trench base

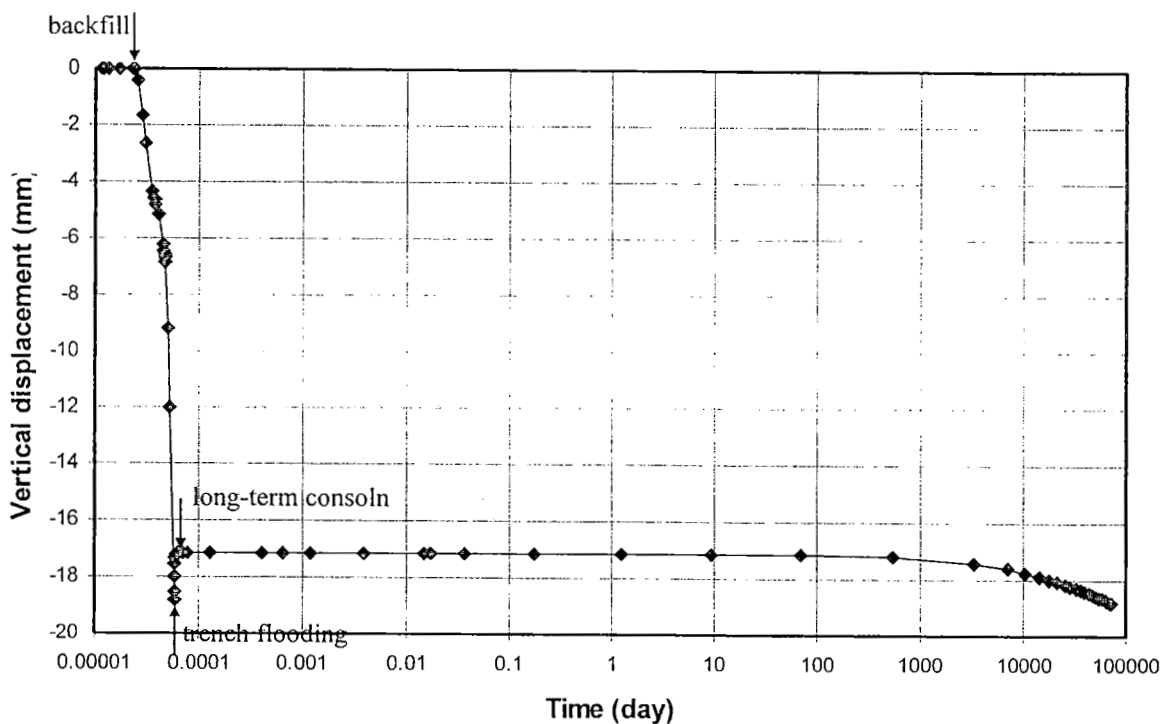


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-11 กรณีการวิเคราะห์ D20W20(withcon)

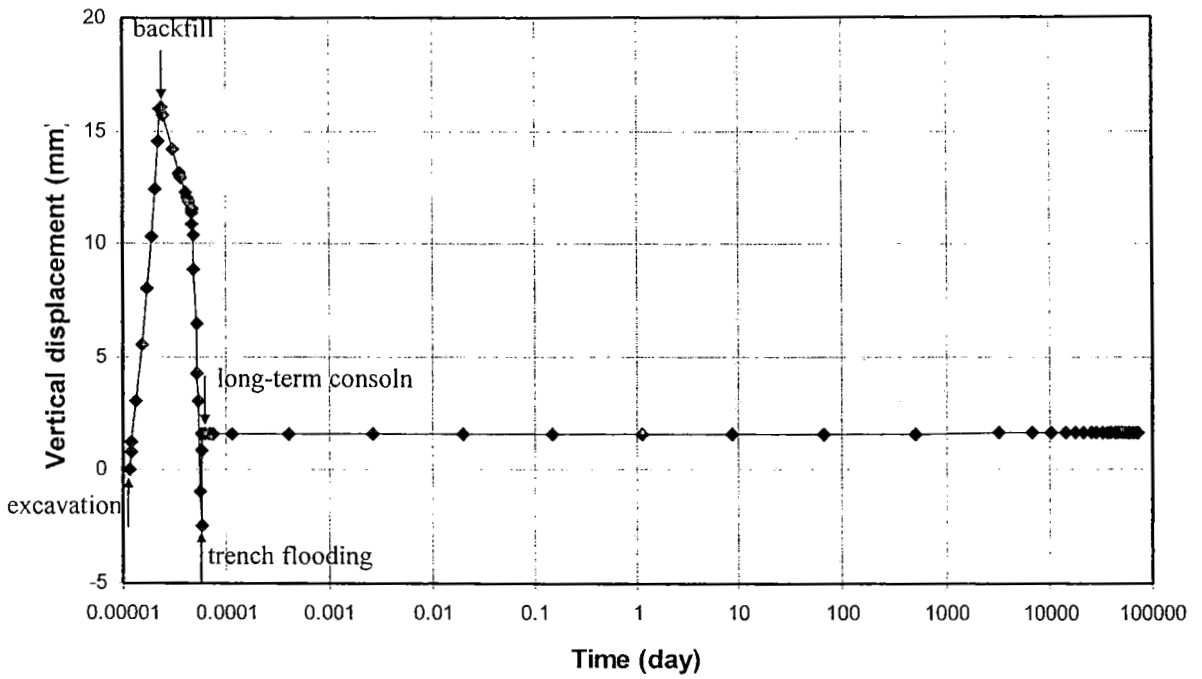


(a) Vertical displacement of trench base

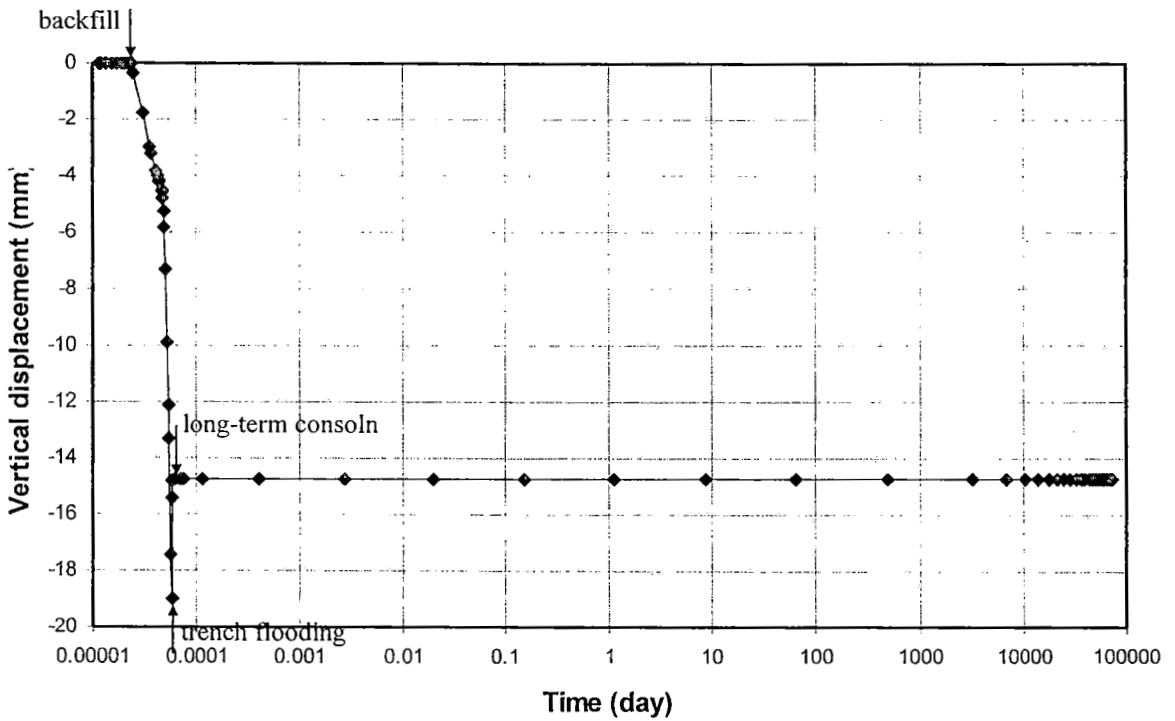


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-12 กรณีการวิเคราะห์ D20W20int(withcon)

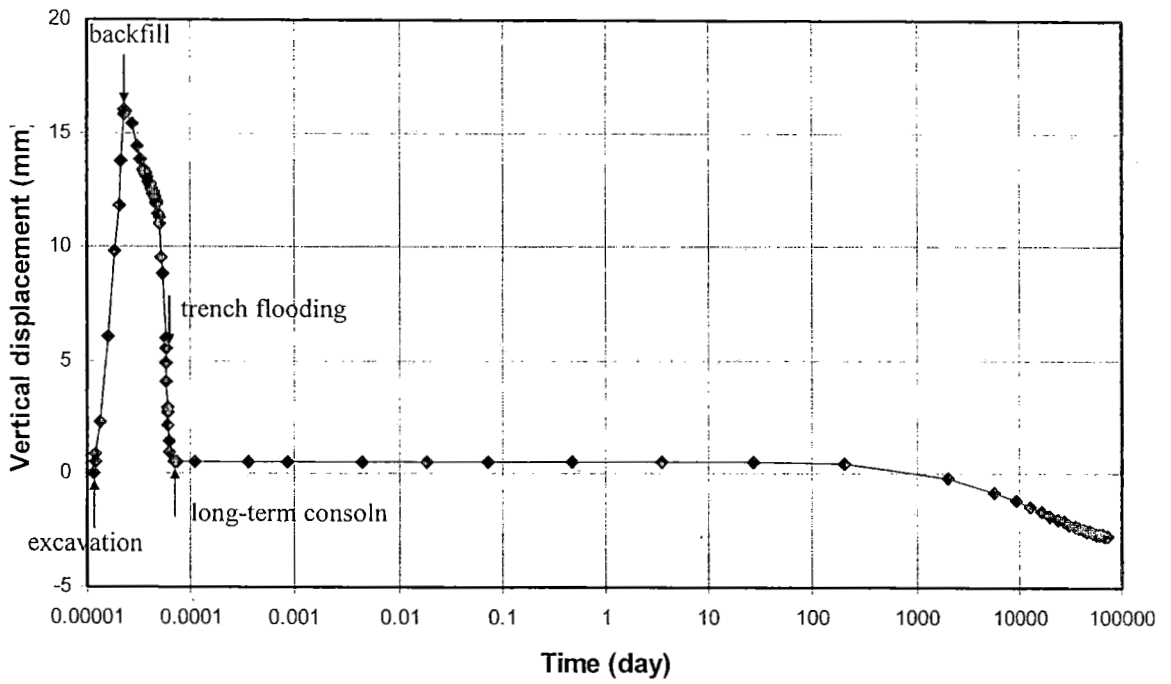


(a) Vertical displacement of trench base

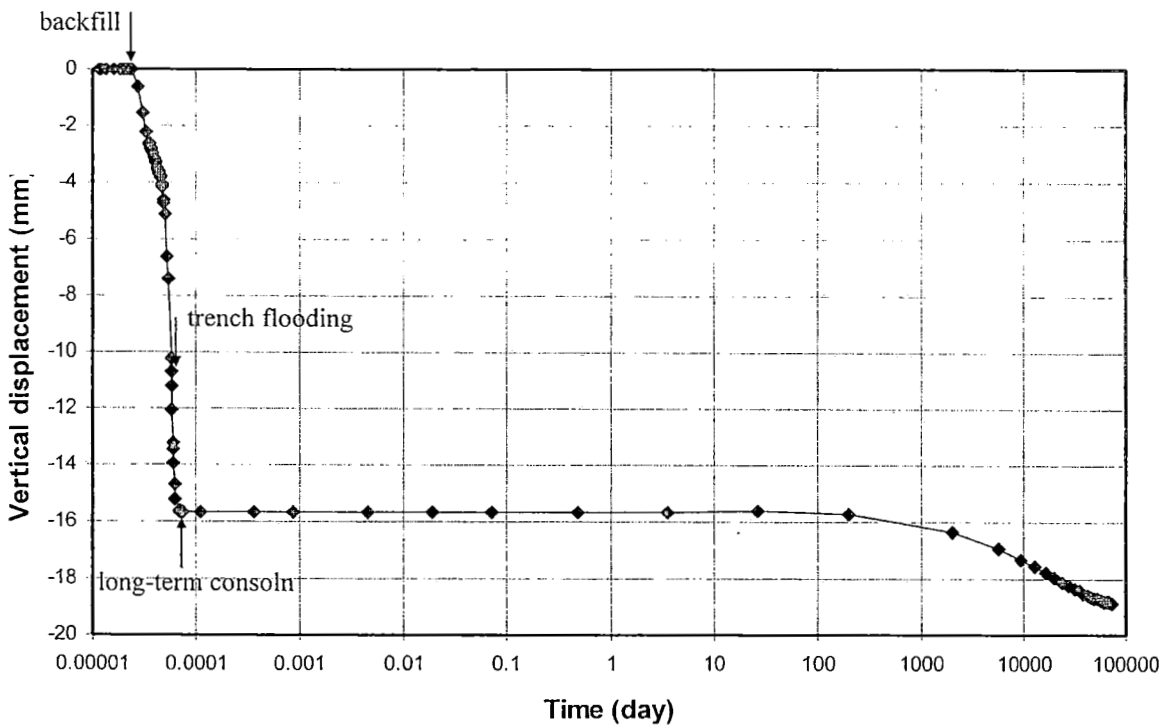


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-13 กรณีการวิเคราะห์ D30W15(withcon)



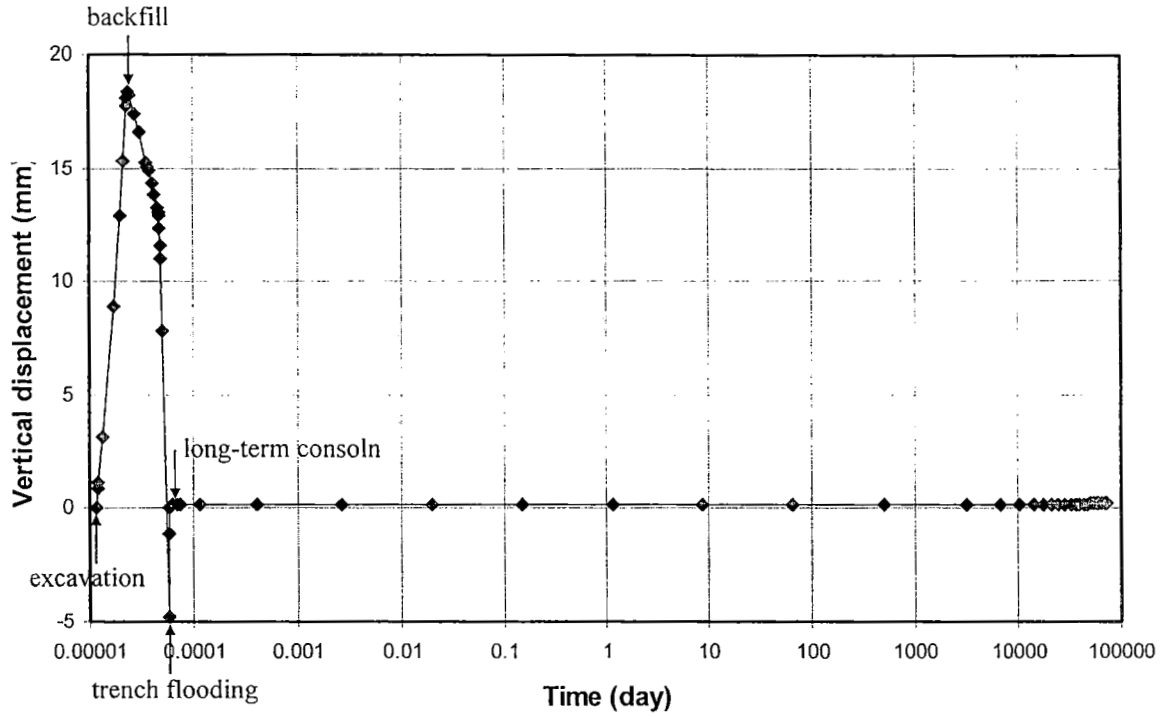
(a) Vertical displacement of trench base



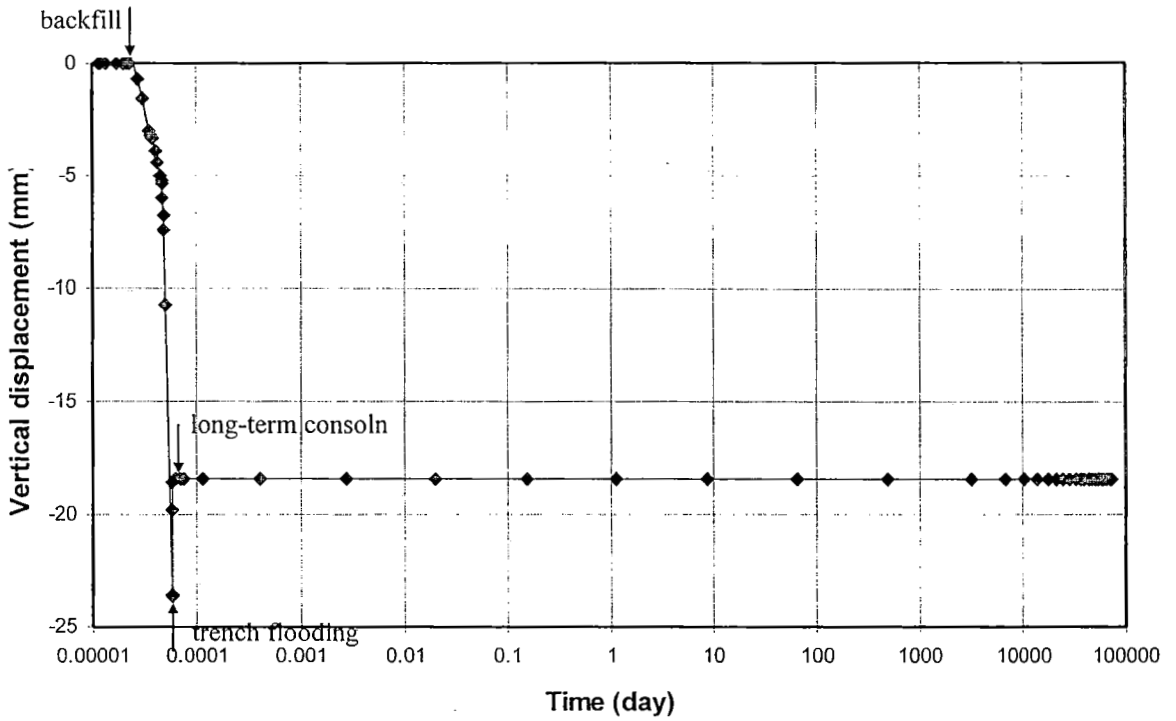
(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-14 กรณีการวิเคราะห์ D30W15int(withcon)



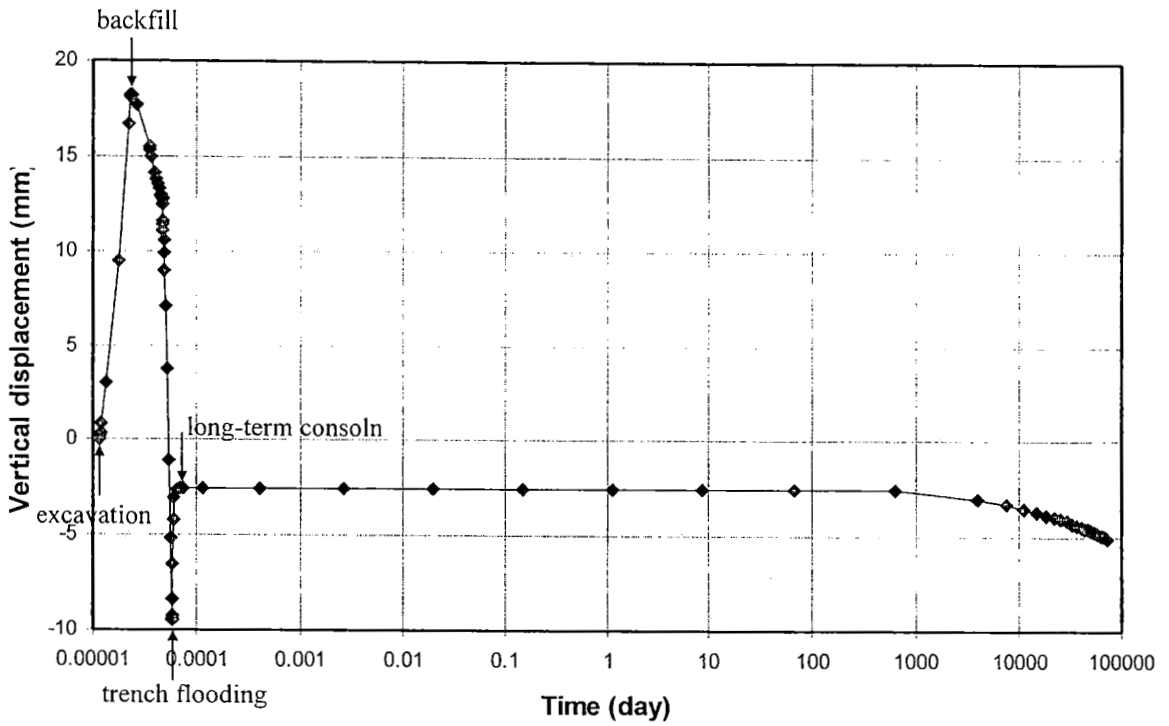


(a) Vertical displacement of trench base

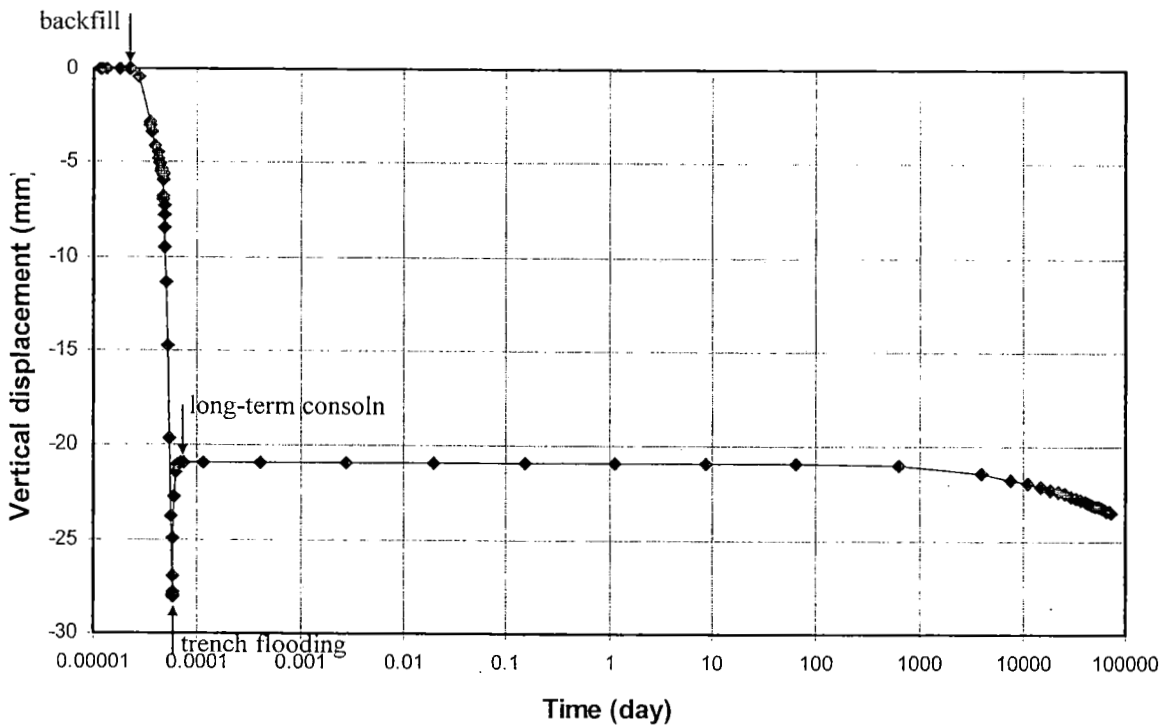


(b) Vertical displacement of pipe base

รูปที่ ก-15 กรณีการวิเคราะห์ D30W20(withcon)



(a) Vertical displacement of trench base

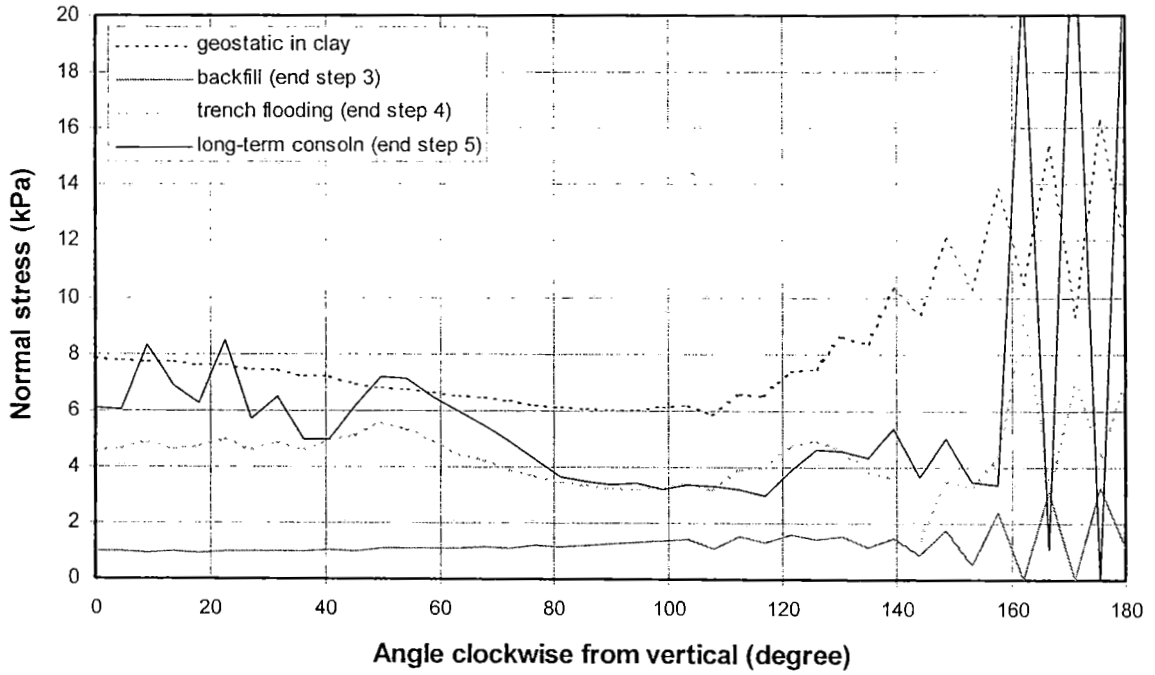


(b) Vertical displacement of pipe base

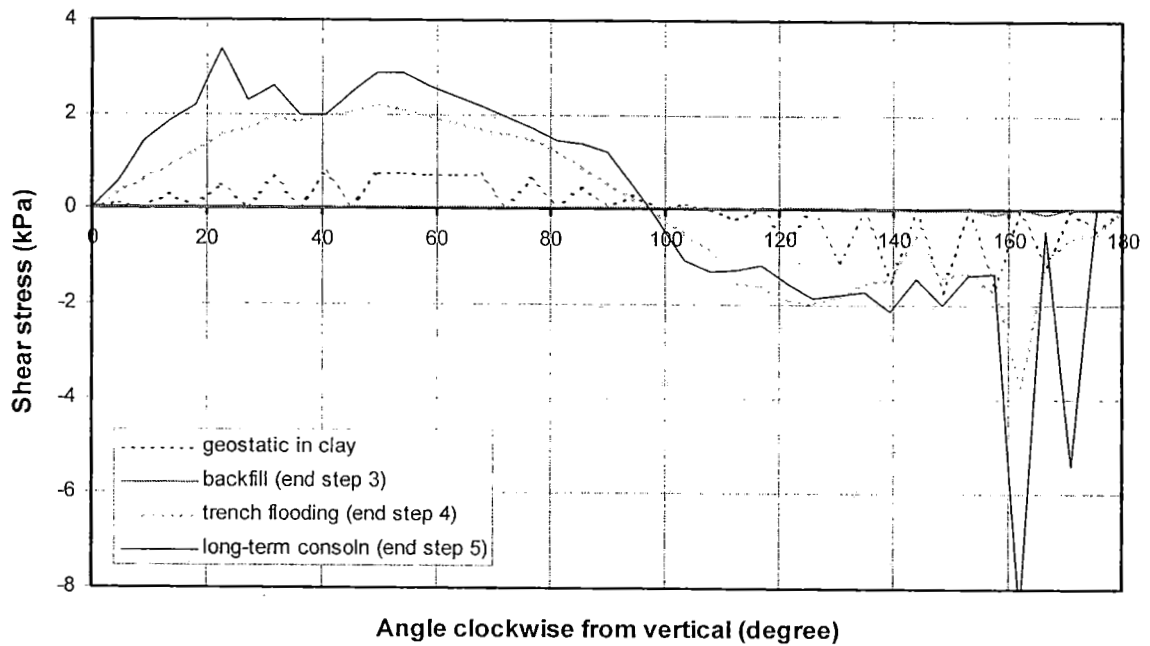
รูปที่ ก-16 กรณีการวิเคราะห์ D30W20int(withcon)

ภาคผนวก ข

ความเค็มที่กระทำต่อท่อ

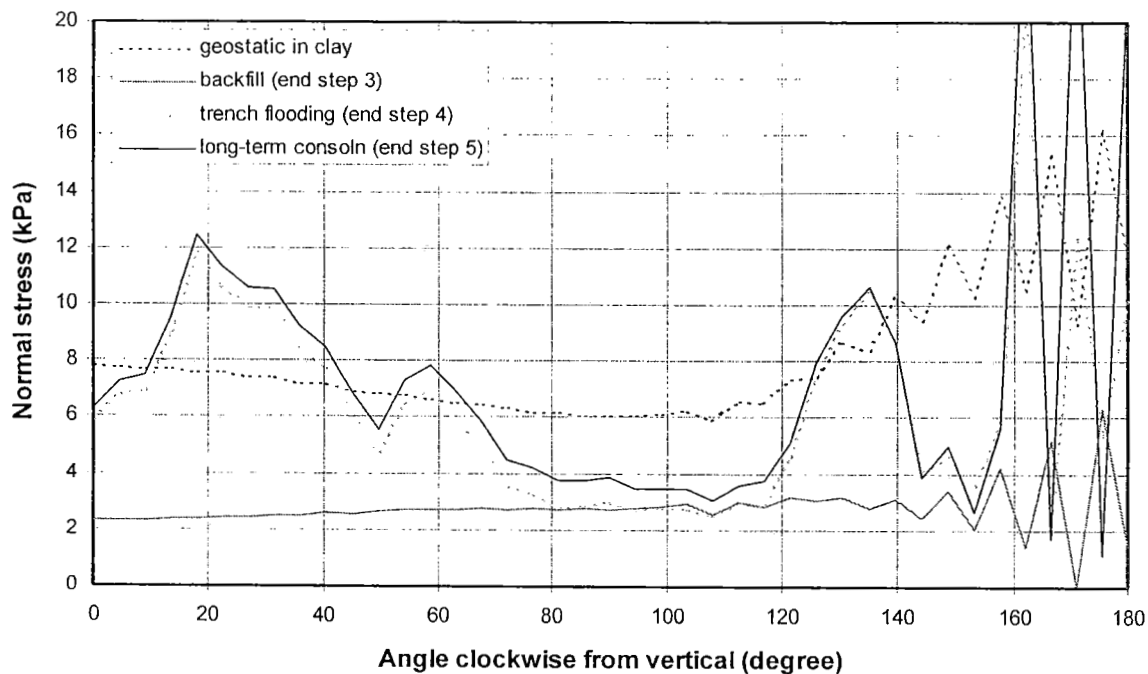


(a) Normal stress

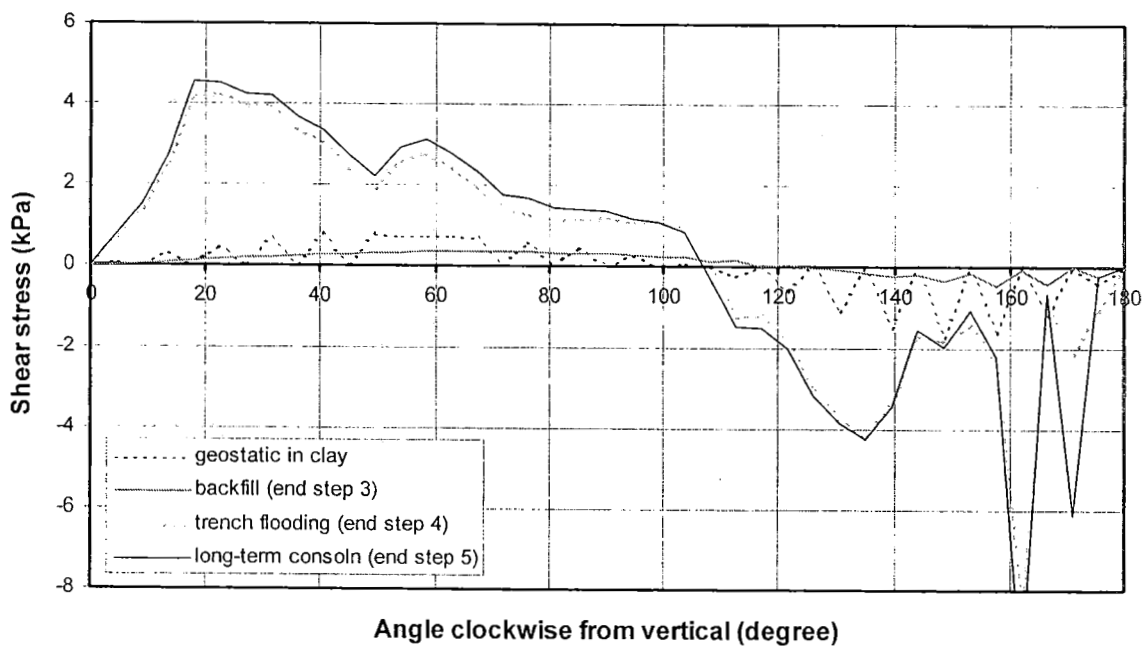


(b) Shear stress

รูปที่ ข-1 กรณีการวิเคราะห์ D20W15(nocon)

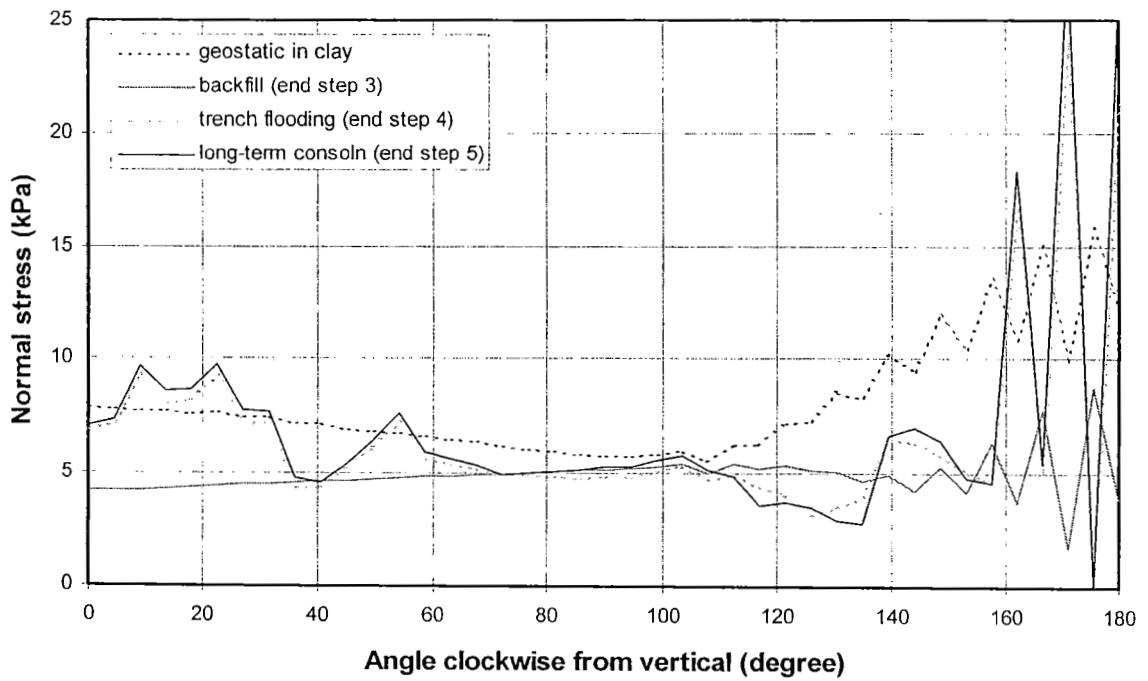


(a) Normal stress

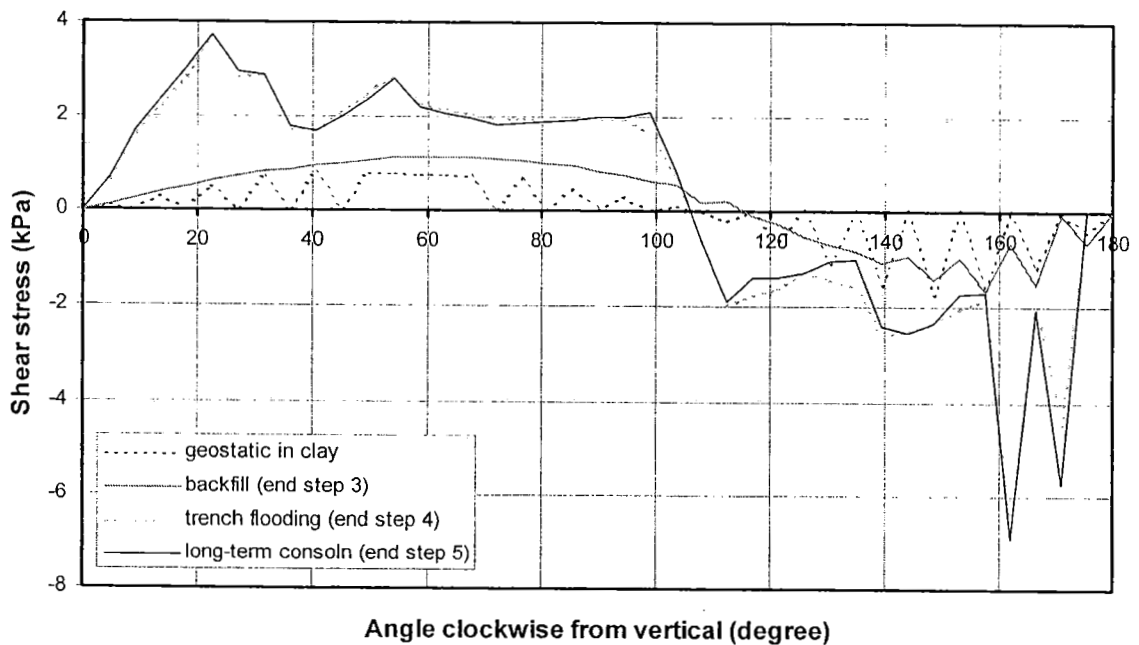


(b) Shear stress

รูปที่ ข-2 กรณีการวิเคราะห์ D20W15int(nocon)

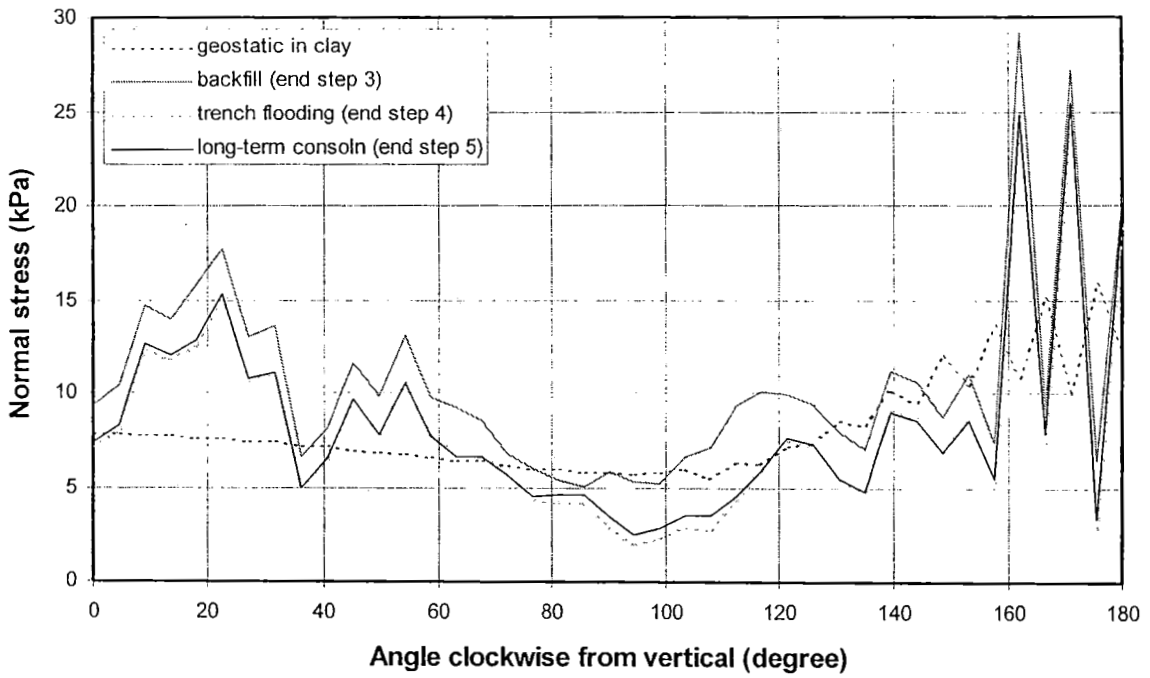


(a) Normal stress

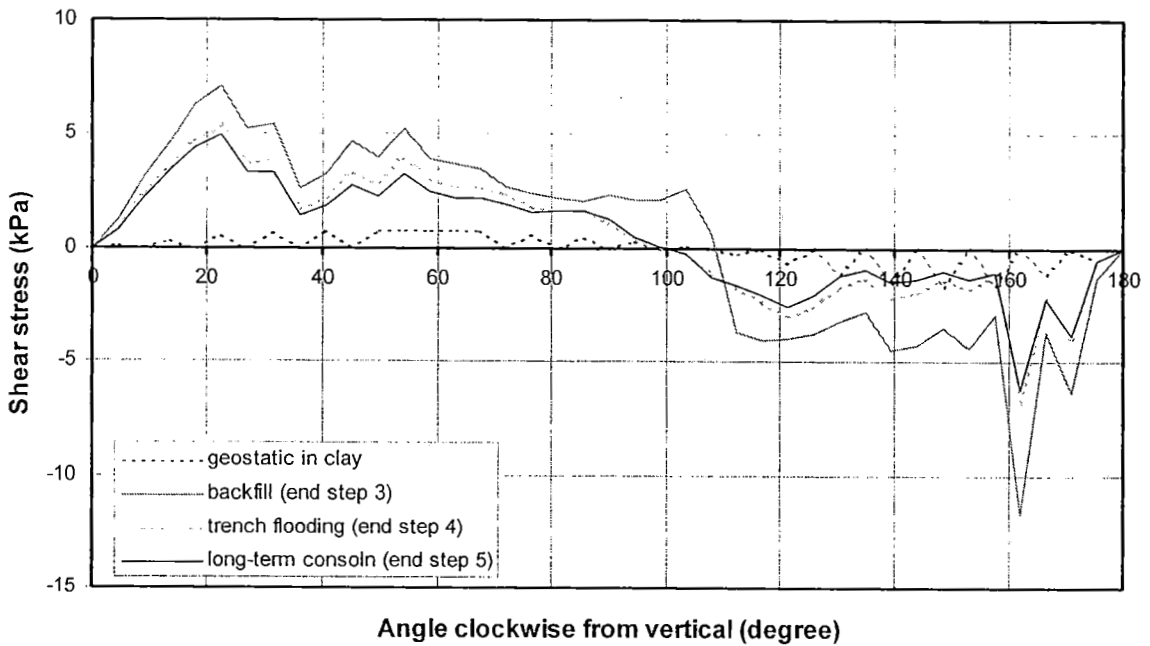


(b) Shear stress

รูปที่ ข-3 กรณีการวิเคราะห์ D20W20(nocon)

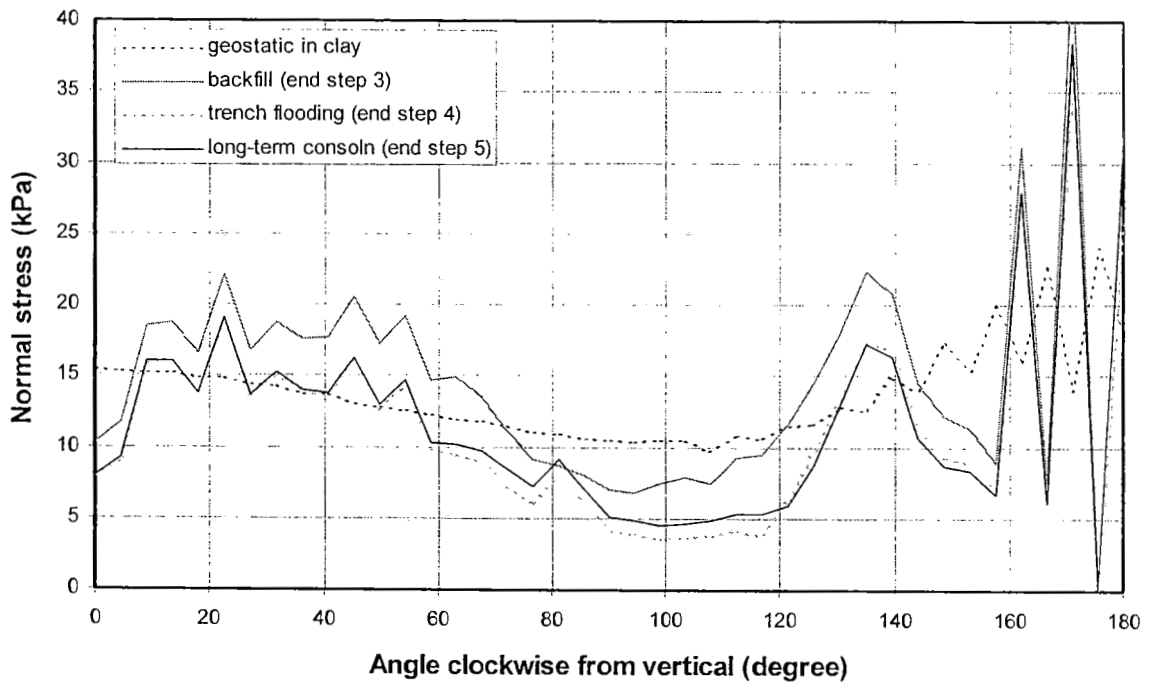


(a) Normal stress

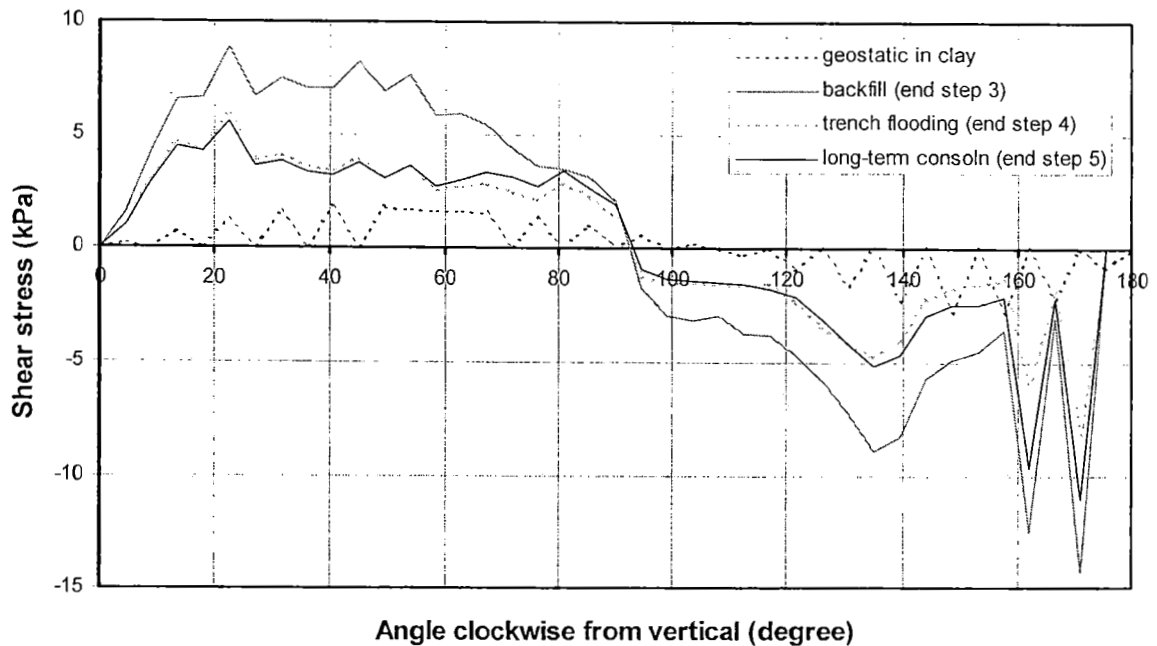


(b) Shear stress

รูปที่ ข-4 กรณีการวิเคราะห์ D20W20int(nocon)



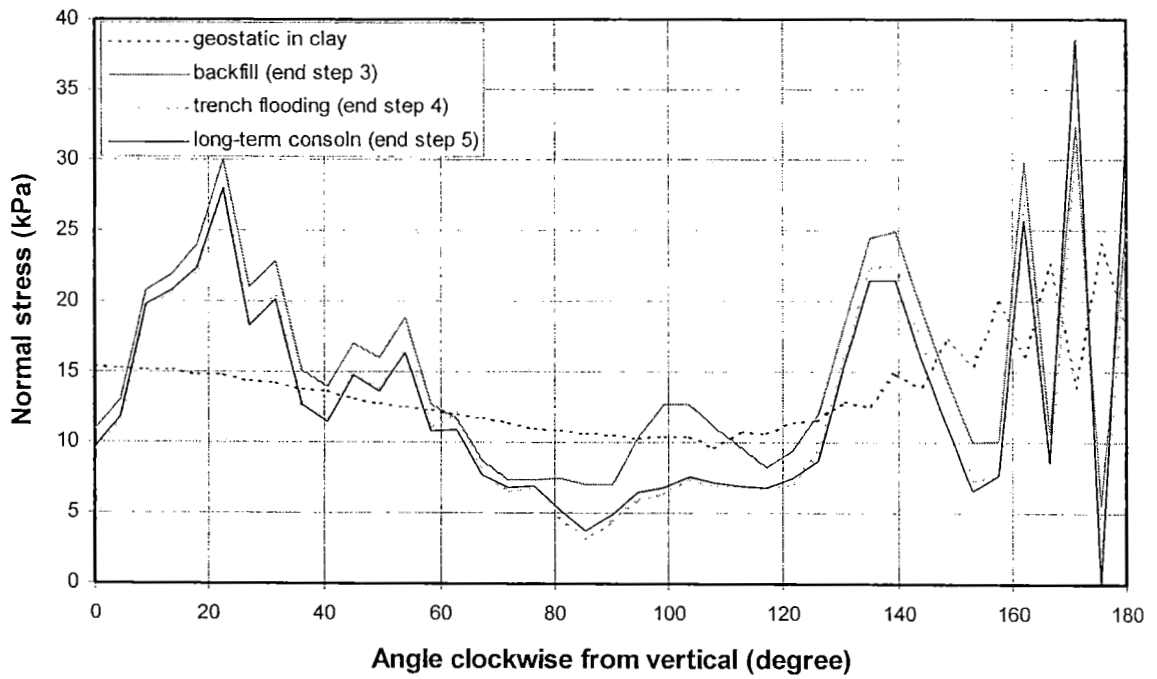
(a) Normal stress



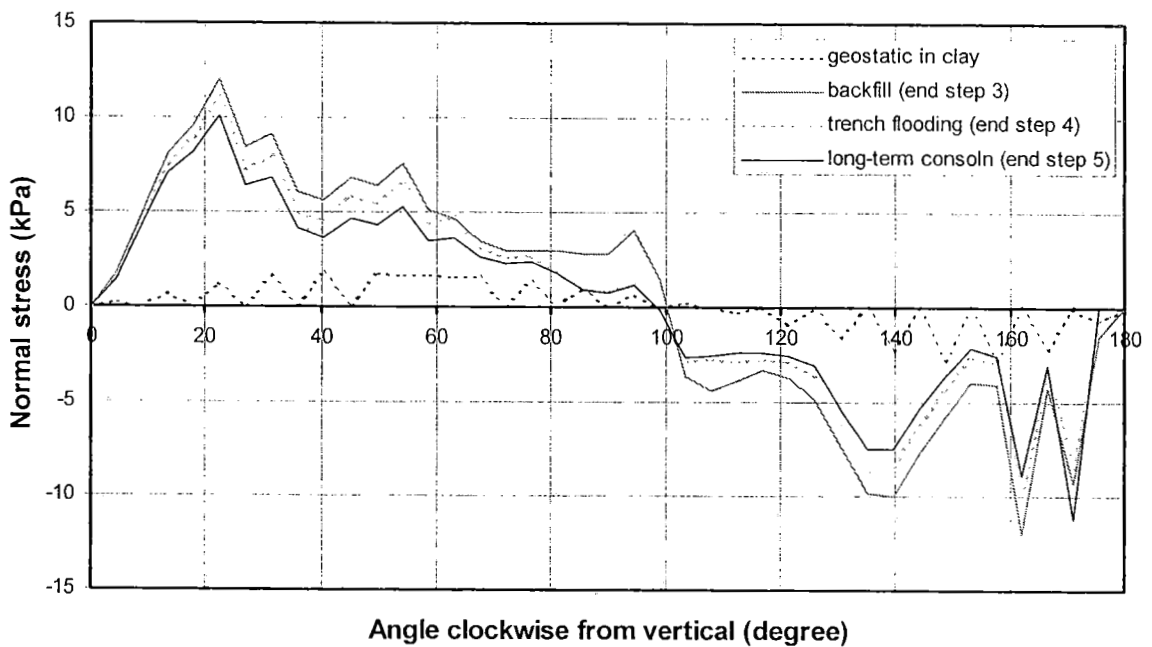
(b) Shear stress

รูปที่ ข-5 กรณีการวิเคราะห์ D30W15(nocon)



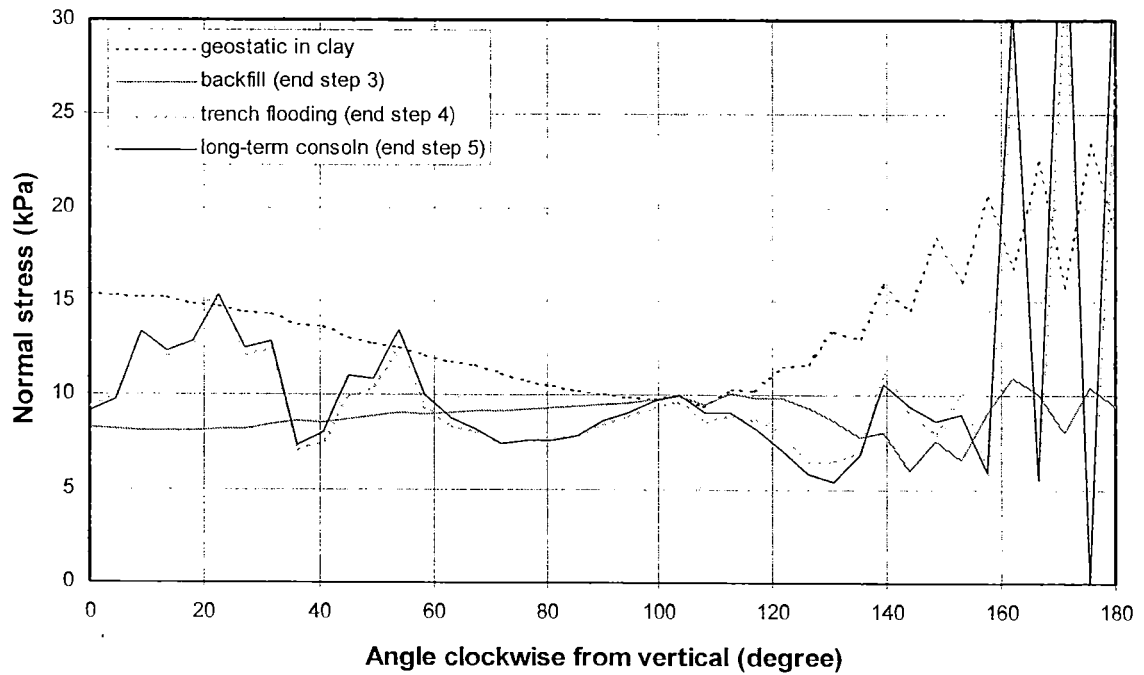


(a) Normal stress

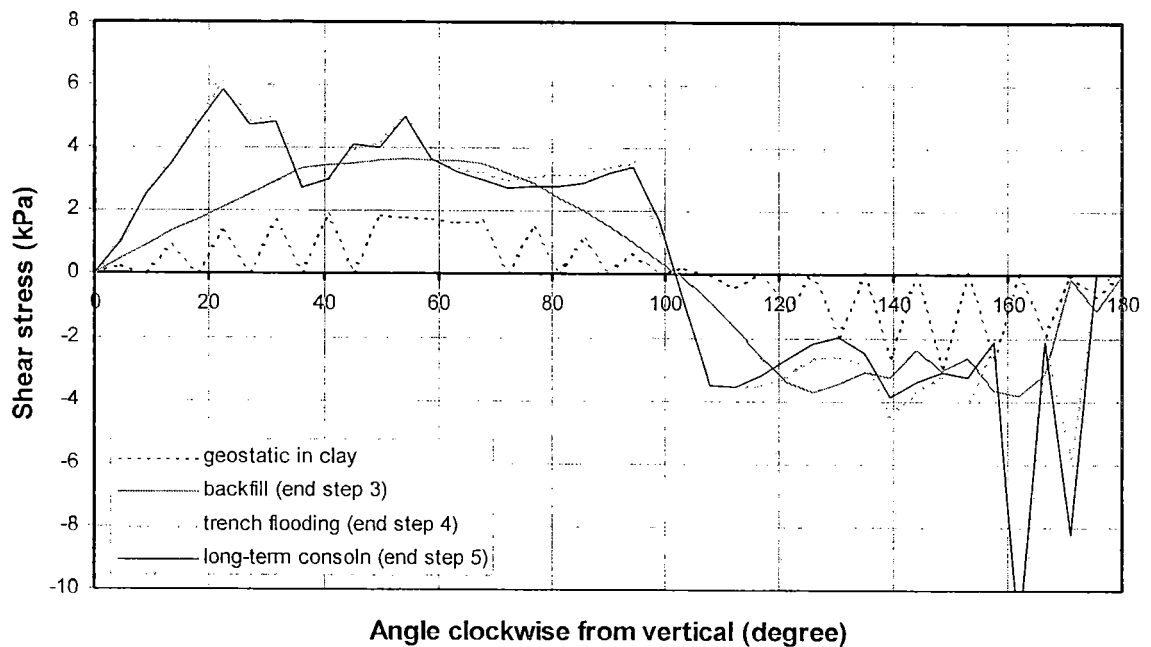


(b) Shear stress

รูปที่ ข-6 กรณีการวิเคราะห์ D30W15int(nocon)

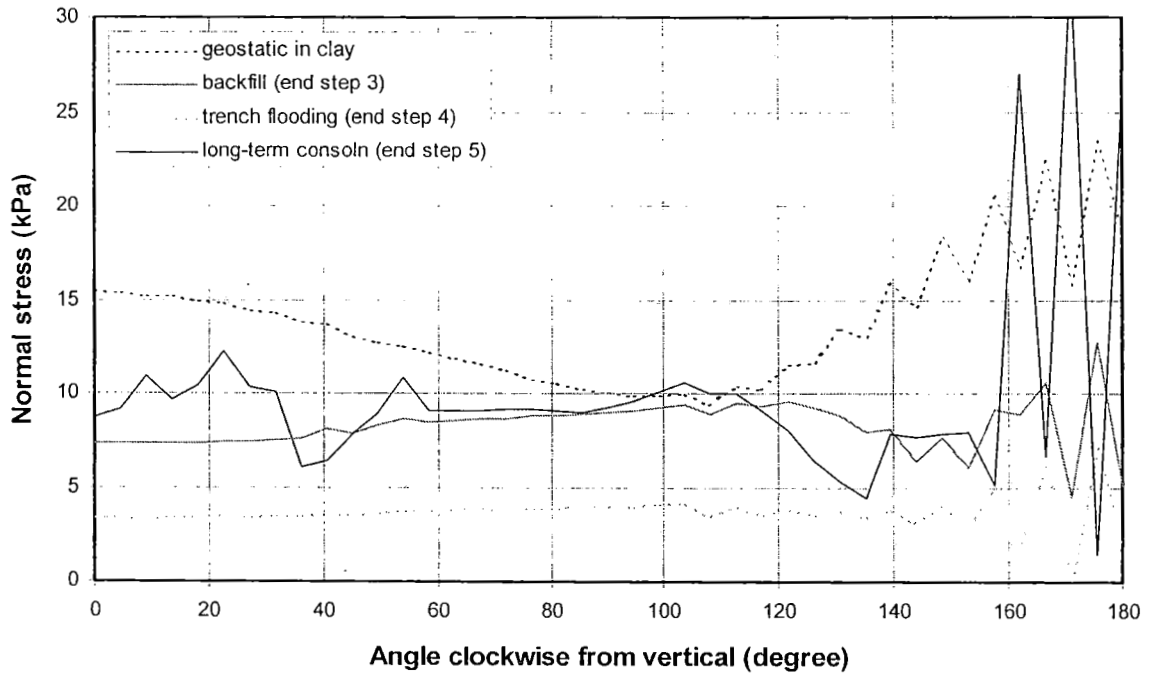


(a) Normal stress

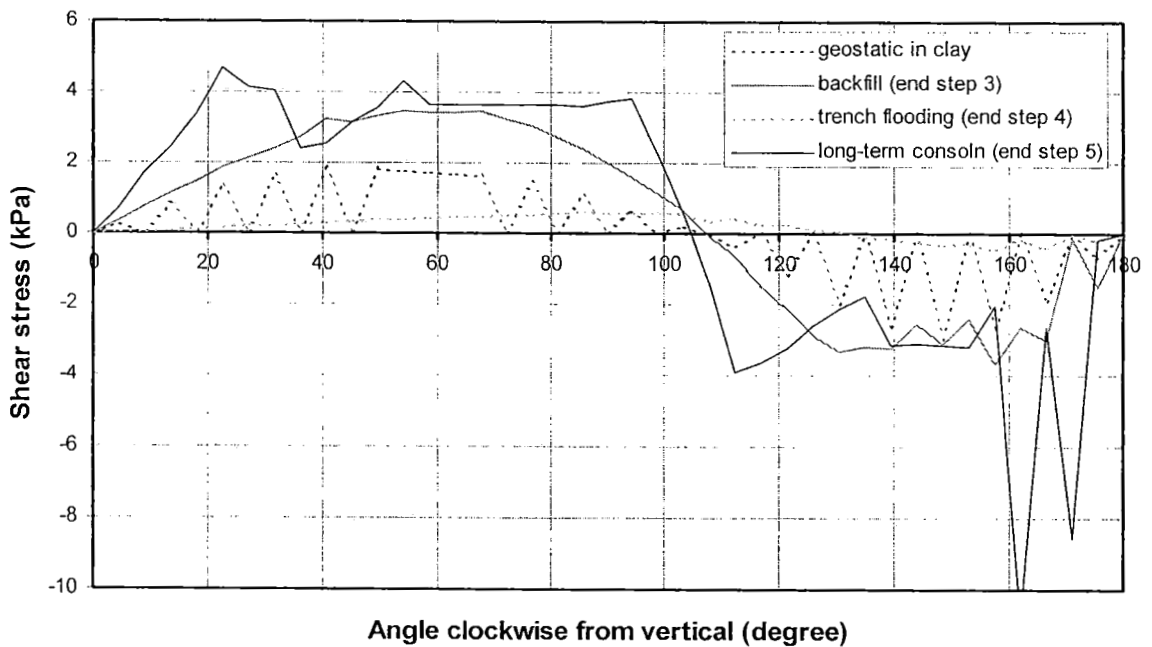


(b) Shear stress

รูปที่ ข-7 กรณีการวิเคราะห์ D30W20(nocon)

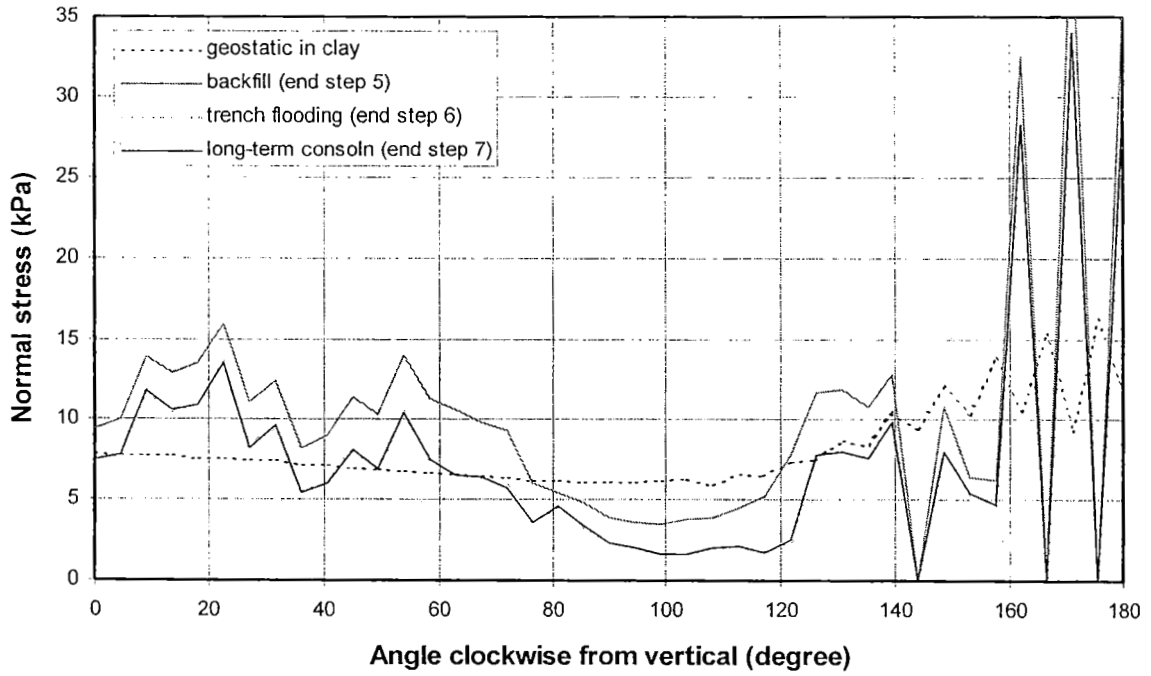


(a) Normal stress

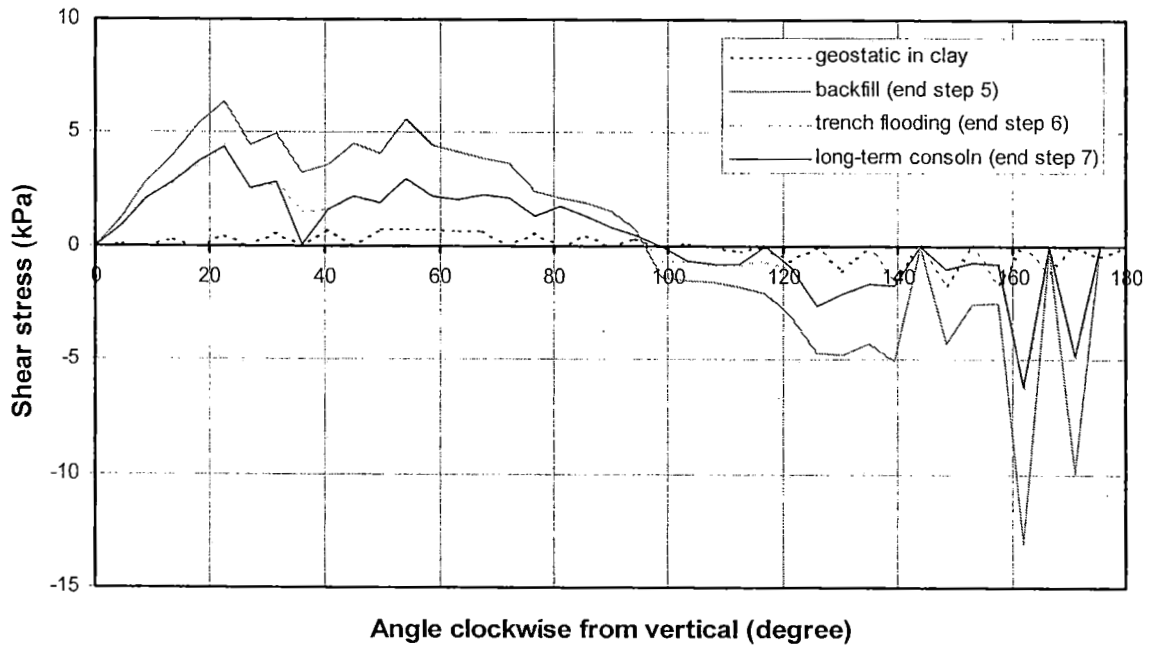


(b) Shear stress

รูปที่ ข-8 กรณีการวิเคราะห์ D30W20int(nocon)

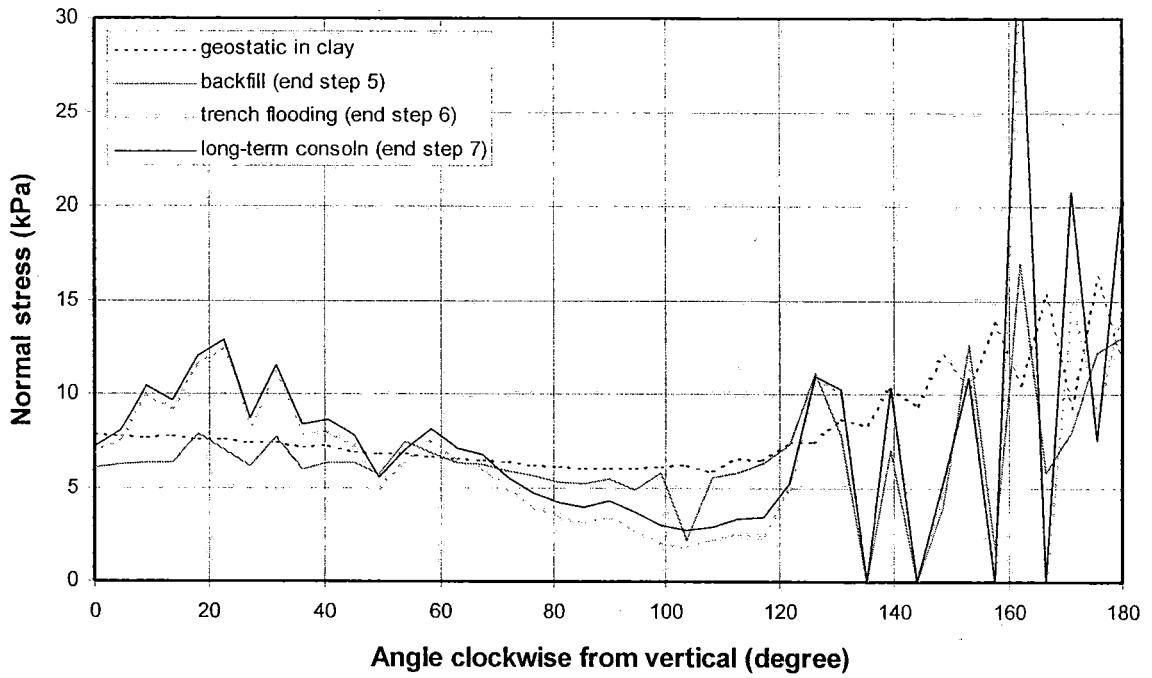


(a) Normal stress

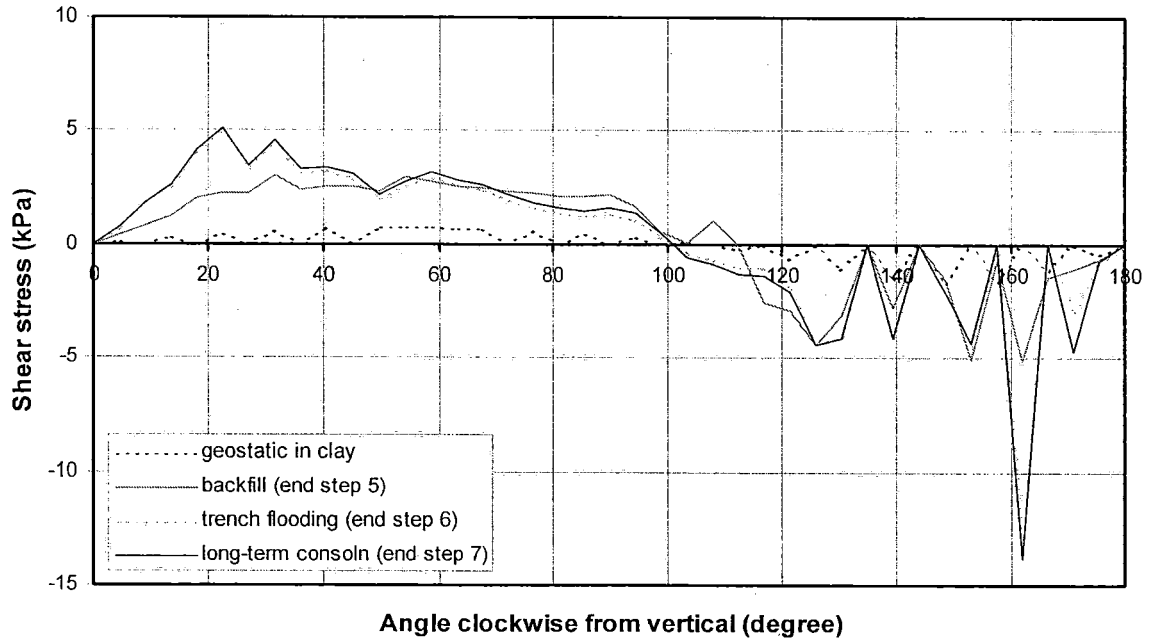


(b) Shear stress

รูปที่ ข-9 กรณีการวิเคราะห์ D20W15(withcon)

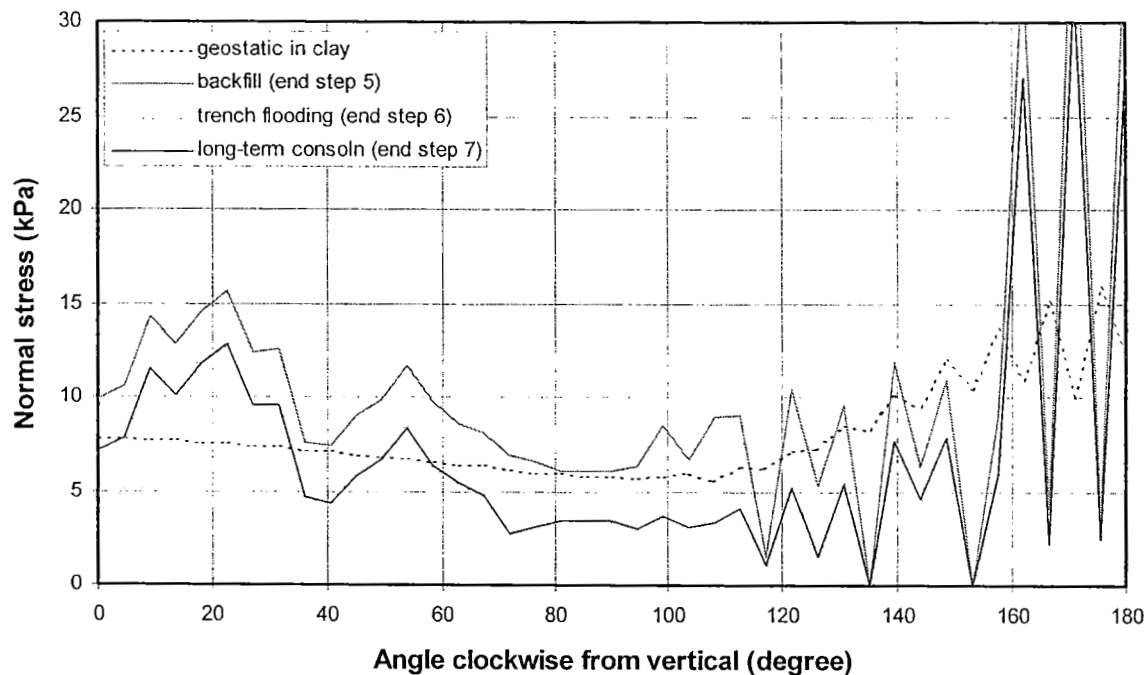


(a) Normal stress

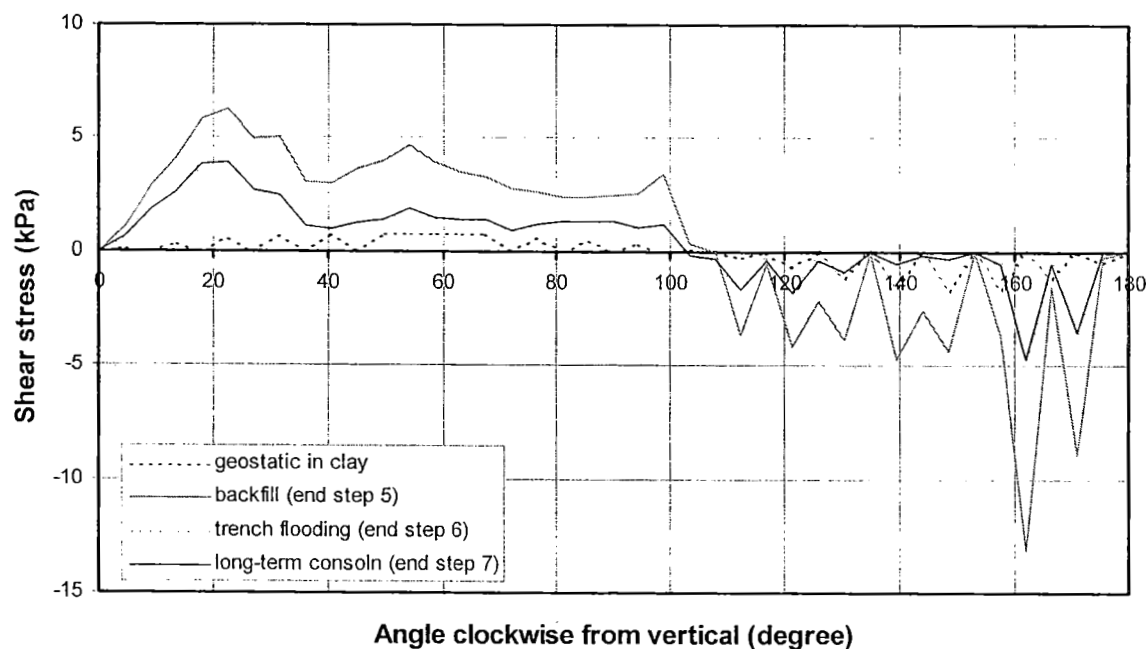


(b) Shear stress

รูปที่ ข-10 กรณีการวิเคราะห์ D20W15int(withcon)

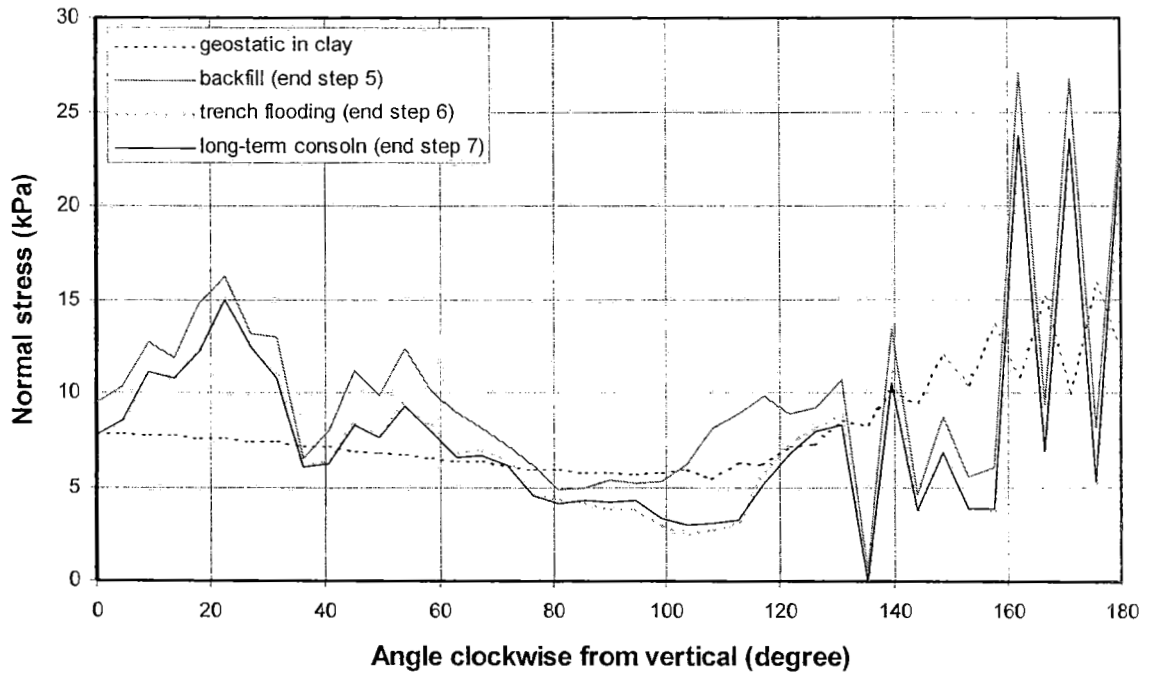


(a) Normal stress

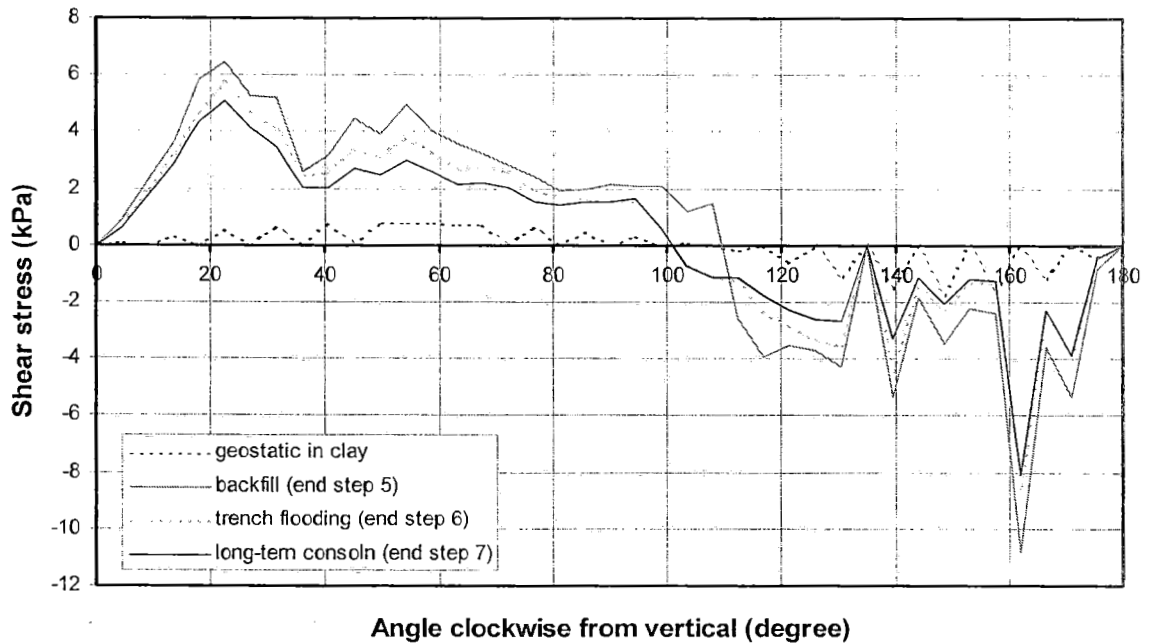


(b) Shear stress

รูปที่ ข-11 กรณีการวิเคราะห์ D20W20(withcon)

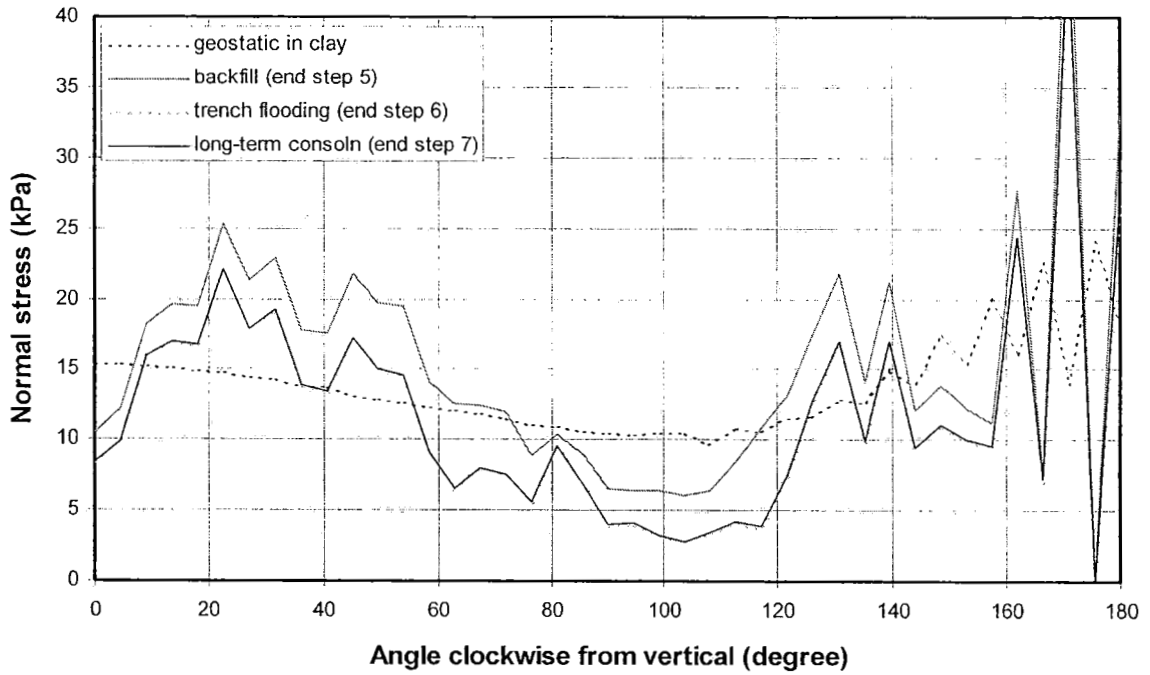


(a) Normal stress

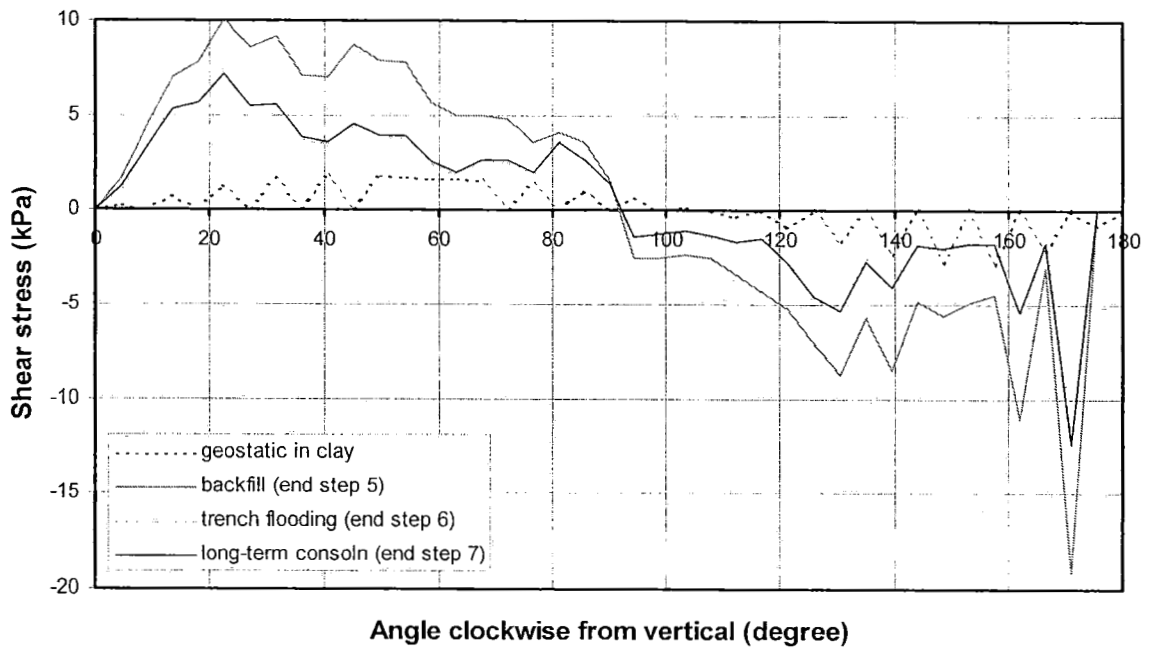


(b) Shear stress

รูปที่ ข-12 กรณีการวิเคราะห์ D20W20int(withcon)



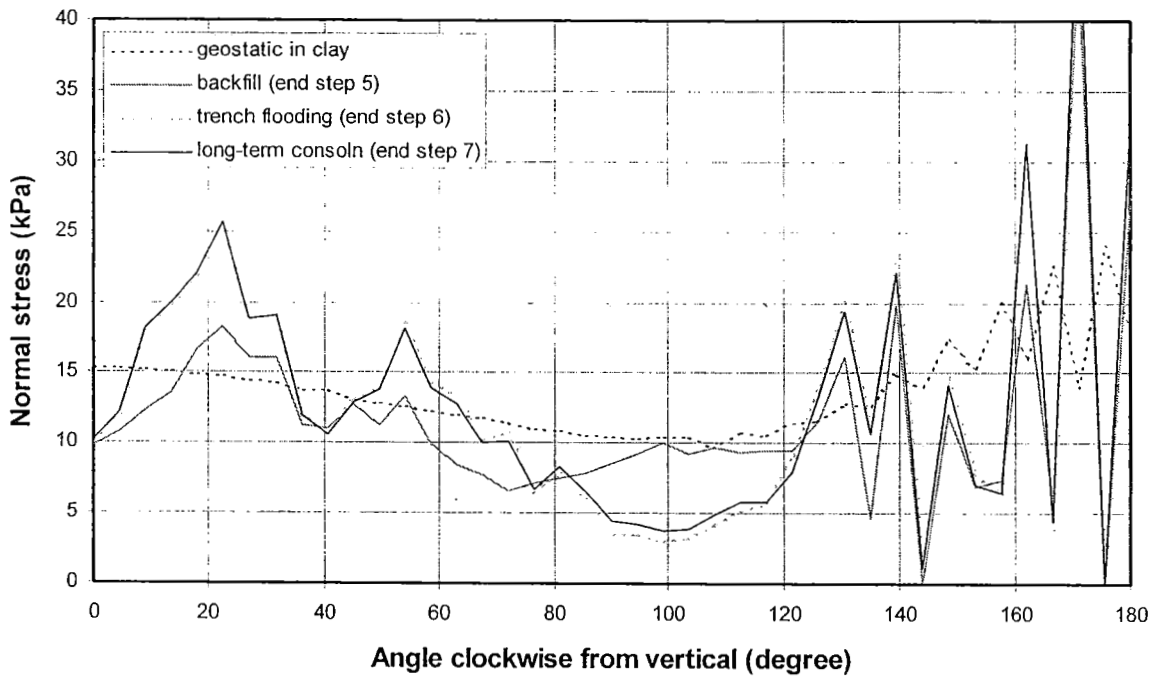
(a) Normal stress



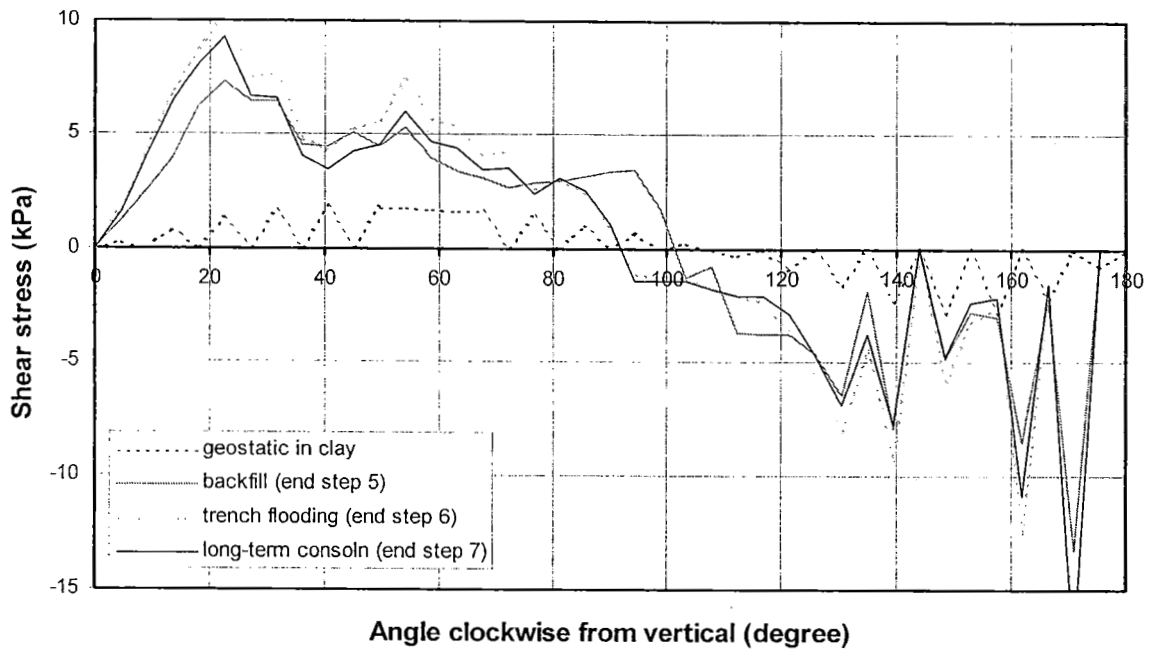
(b) Shear stress

รูปที่ ข-13 กรณีการวิเคราะห์ D30W15(withcon)





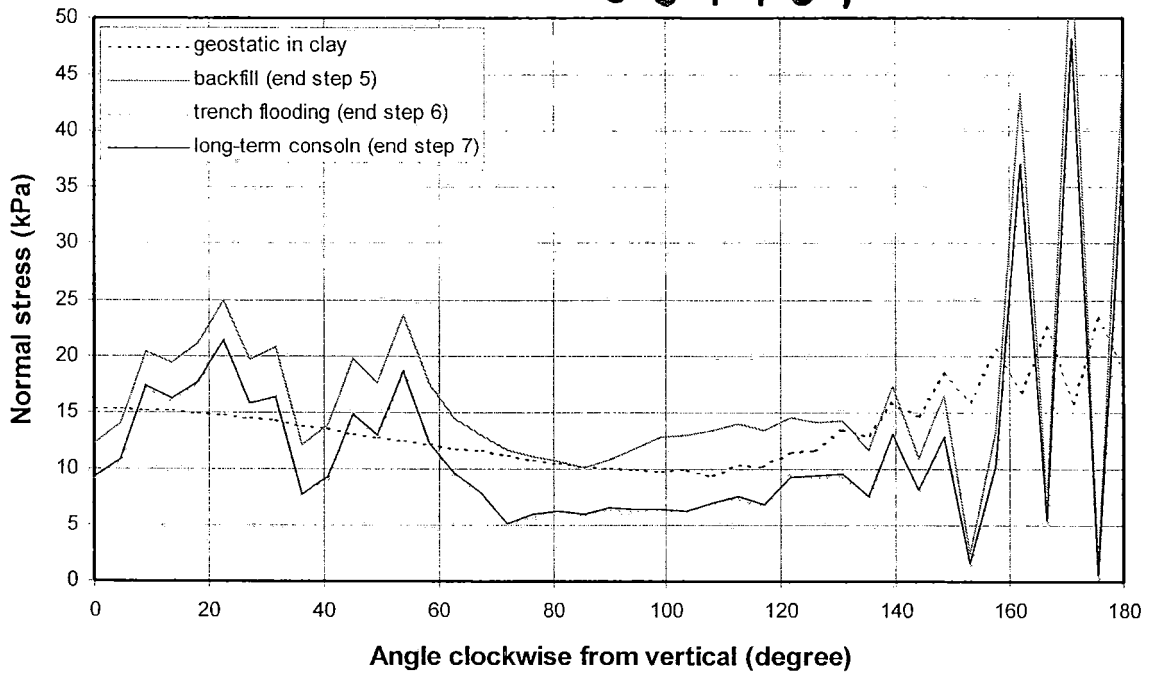
(a) Normal stress



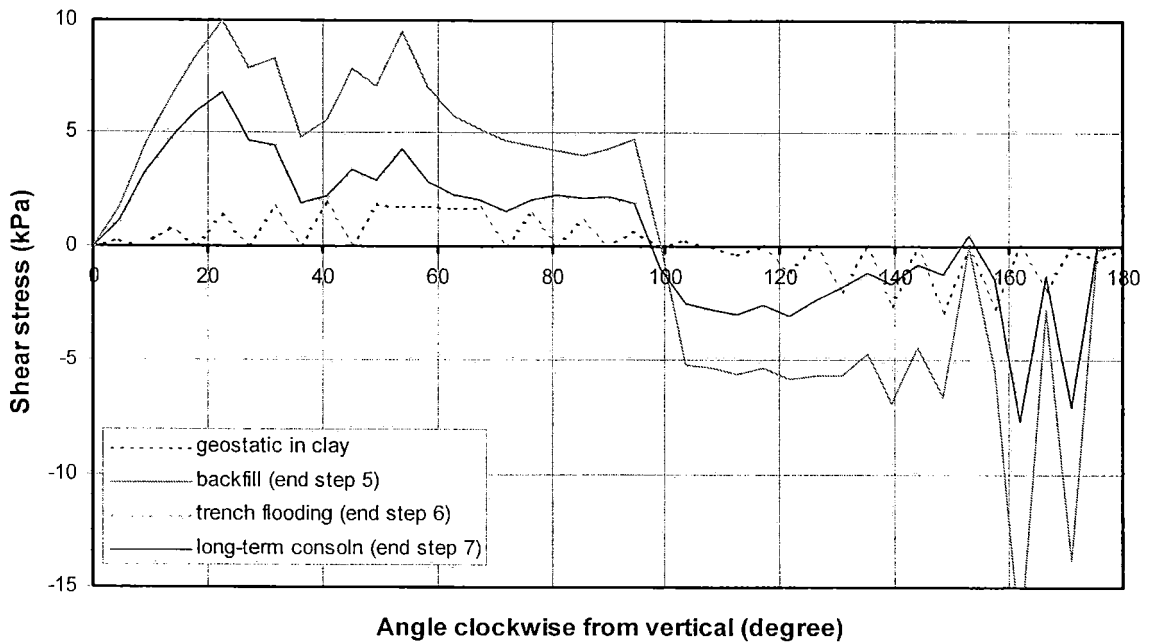
(b) Shear stress

รูปที่ ข-14 กรณีการวิเคราะห์ D30W15int(withcon)

301487

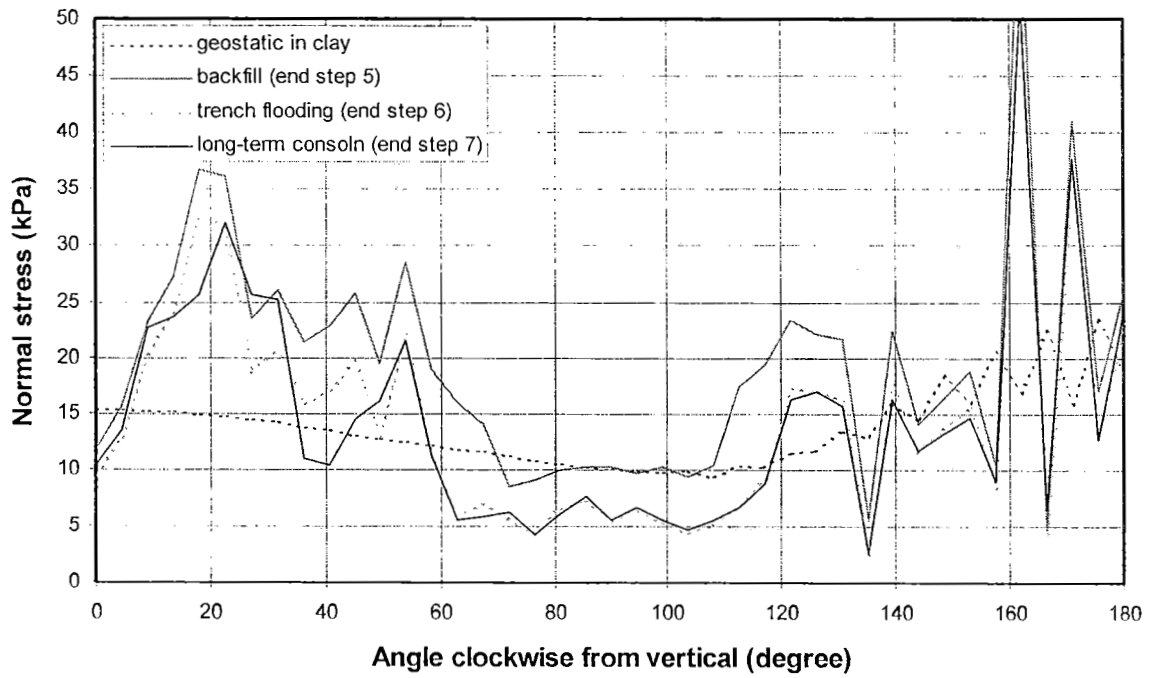


(a) Normal stress

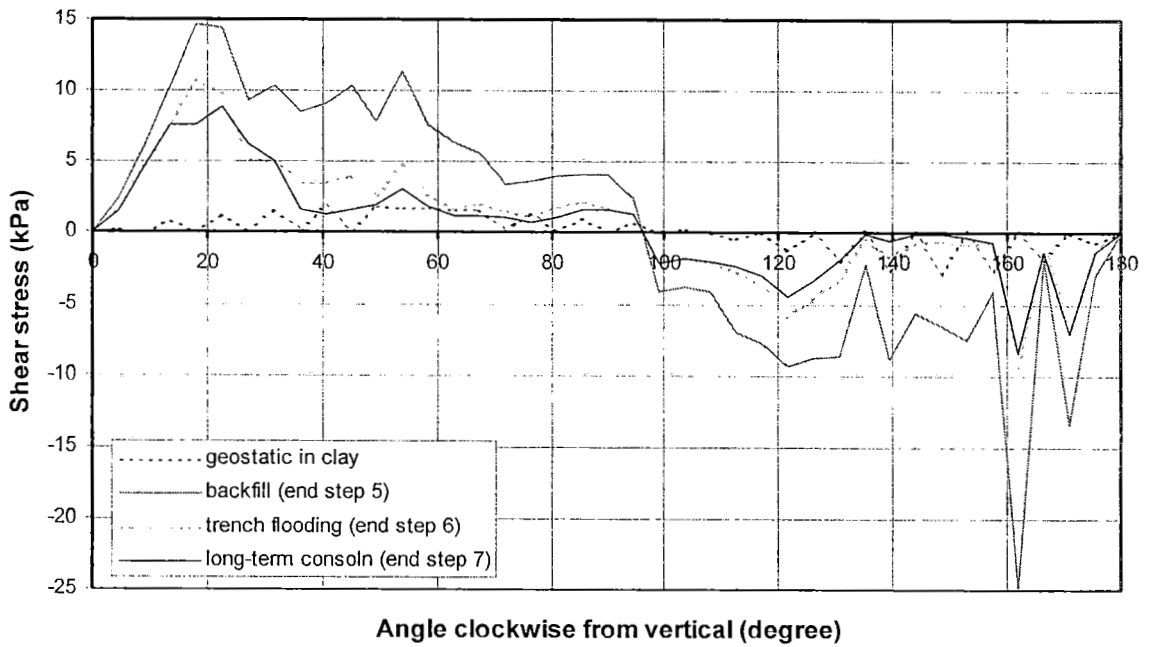


(b) Shear stress

รูปที่ ข-15 กรณีการวิเคราะห์ D30W20(withcon)



(a) Normal stress



(b) Shear stress

รูปที่ ข-16 กรณีการวิเคราะห์ D30W20int(withcon)