

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการวิเคราะห์

การทดสอบใส่น้ำหนักบรรทุกบนแปลงที่ทำทดสอบ(ซึ่งติดตั้งเครื่องมือทางธรณีเทคนิคเพื่อวัดค่าต่างๆ ดังรายละเอียดที่กล่าวมาแล้วในบทที่ 3) เพื่อดูพฤติกรรมของดินและเสาเข็มเมื่อรับน้ำหนักบรรทุก มีขั้นตอนการทำงานแสดงระยะเวลาการติดตั้งเครื่องมือ ดังรูปที่ 4.1

การถมทรายได้ทำหลังจากติดตั้งอุปกรณ์และวัดค่าจากอุปกรณ์ทางธรณีเทคนิคเริ่มแรกแล้ว โดยเริ่มถมทรายวันที่ 25 ธันวาคม 2539 ทรายที่นำมาถมได้นำมาทำ Classification ได้เป็น Poorly graded Sand (SP) และนำมาทำ Direct Shear Test ได้ค่า  $\phi = 40^\circ$  โดยจะถมทรายสูงจากระดับศูนย์(ผิวบนของ Lime mixing layer)ประมาณ 2.0 เมตร ด้วย Slope 1:1.25 การถมทรายได้ทำอย่างรวดเร็วในอัตรา 1 เมตรต่อวัน ใน 1.0 เมตรแรกแล้วพัก 1 วันจึงถมต่อไปถึง 2.0 เมตร

ในบทนี้เนื้อหาจะประกอบด้วยข้อมูลจากเครื่องมือทางธรณีเทคนิค พร้อมทั้งการแปลข้อมูลเพื่อแสดงพฤติกรรมของดินที่ได้ปรับปรุงแล้วภายใต้น้ำหนักบรรทุกจากการถมทราย การศึกษาจะทำทั้งที่แปลงทดสอบที่ 1 และ 2 และเปรียบเทียบพฤติกรรมทั้งสองแปลง

#### 4.1. พฤติกรรมของดินและเสาเข็มที่ปรับปรุงคุณภาพภายใต้น้ำหนักบรรทุก

##### 4.1.1 พฤติกรรมของดินเนื่องจากผลกระทบของการก่อสร้าง

ค่า Excess Pore Water Pressure ที่เกิดขึ้นในค่าเริ่มต้นในการวัดเกิดเนื่องมาจากค่าความดันน้ำส่วนที่เหลือจากการปรับพื้นที่ การก่อสร้างเสาเข็มและการเกิดปฏิกิริยาเคมีของปูนขาวกับน้ำในดิน การก่อสร้างทำให้เกิดค่า Excess Pore Water Pressure ( $\Delta u$ ) เป็นบวกแต่ปฏิกิริยาทางเคมีทำให้น้ำถูกดูดจากดินเกิด  $\Delta u$  เป็นลบ และเกิดการขยายตัวของขนาดของเข็มทำให้ดินถูกรบกวนและทำให้  $\Delta u$  เกิดขึ้นเป็นบวก ค่า  $\Delta u$  ที่เวลาเท่ากับศูนย์คือค่าที่ได้จากผลกระทำเหล่านี้

จากการวัดค่าแรงดันน้ำใต้ดิน (Pore Water Pressure) ที่ระดับความลึกต่างๆ ที่วัดจาก Piezometer ในแปลงทดสอบทั้ง 2 แปลง พบว่าก่อนการถมทรายที่ระดับความลึกในชั้นดินอ่อนนั้นคือที่ระดับความลึก -3.0 เมตร กับ -7.0 เมตร มีค่าแรงดันน้ำต่ำกว่าใน Dummy area ส่วน

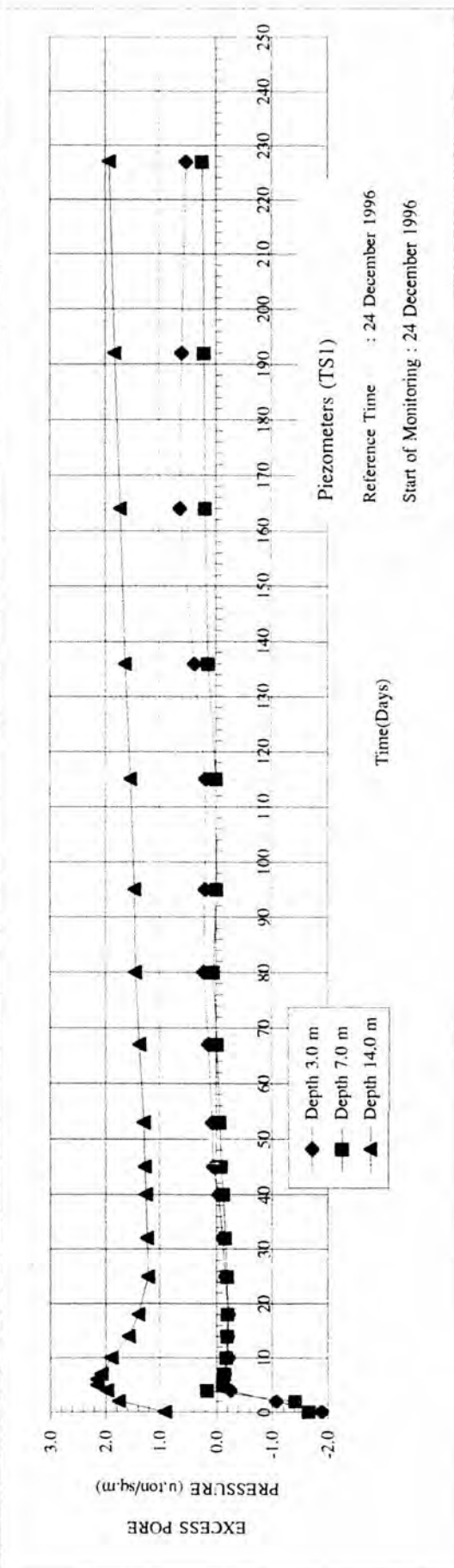
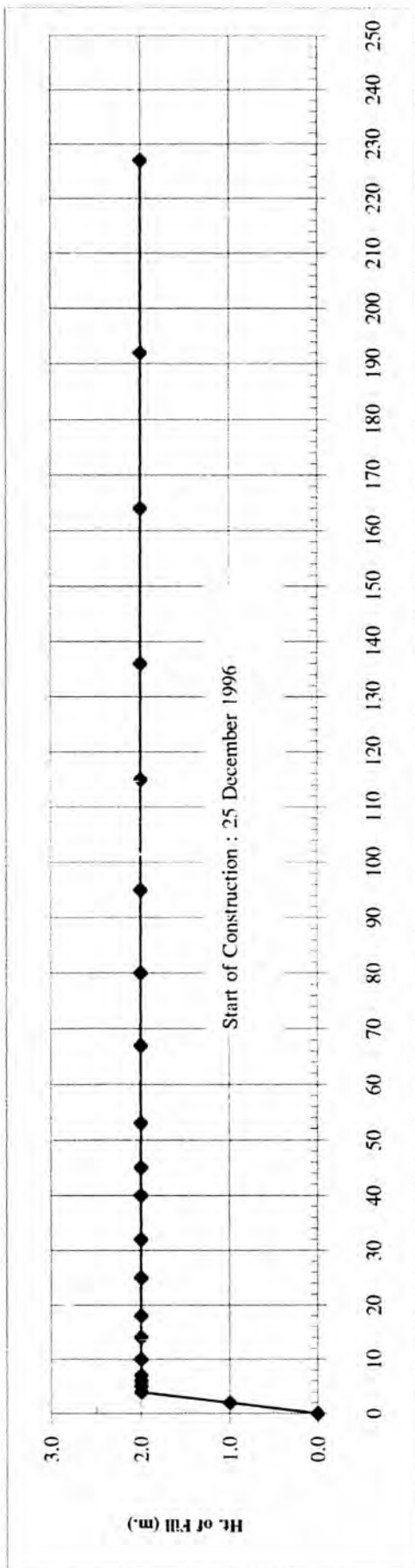


ในระดับความลึก -14.0 เมตร ซึ่งอยู่ในชั้นดินแข็งปานกลางนั้น มีค่าแรงดันน้ำสูงกว่าใน Dummy area รูปที่ 4.2 และ 4.3 ซึ่งสาเหตุนี้สามารถอธิบายได้จากพฤติกรรมของกรรมวิธีการติดตั้งและปฏิกิริยาพื้นฐานที่เกิดขึ้นของเสาเข็มปูนขาว ดังนี้

- จากกรรมวิธีการติดตั้งเข็มปูนขาวนั้นจะมีการรบกวนดินอย่างมากเนื่องจากทั้ง 2 แปลง จะใช้วิธีการหมุนและดัน Casing ลงไปในดินอ่อนโดยตรงในลักษณะการแทนที่ โดยไม่ได้มีการนำดินออกซึ่งการรบกวนดินเช่นนี้จะทำให้แรงดันน้ำใต้ดินสูงขึ้นเนื่องจากมีแรงมากระทำ โดยในแปลงทดสอบที่ 1 การติดตั้งเข็มจะใช้เครื่อง Rotary หมุน Casing ลงไปในดิน ซึ่งดินจะถูกรบกวนในระดับหนึ่ง ส่วนในแปลงทดสอบที่ 2 จะใช้การสั่นของ Casing เนื่องจากใช้กรรมวิธีการติดตั้งแบบ Vibrating โดยใช้ตัว Vibro จับตัว Casing ที่ส่วนหัว แล้วสั่น Casing ลงไปในดินจนถึงระดับความลึกที่ต้องการ ดังนั้นในแปลงที่ 2 จึงมีการรบกวนดินมากที่สุด ดังนั้น ค่าแรงดันน้ำใต้ดิน จึงมีค่าสูงกว่าในแปลงทดสอบที่ 1

- จากปฏิกิริยาทางเคมีพื้นฐานของเข็มปูนขาวนั้นสามารถดูดน้ำ ได้ถึง 30% ดังนั้น มวลดินที่อยู่โดยรอบเข็มจึงถูกดูดน้ำออกจนทำให้ Void Ratio ลดลงค่าการลดลงของ Void Ratio ได้แสดงในรูปที่ 3.7 และแรงดันน้ำในมวลดิน (Pore Water Pressure) เกิดการลดลงด้วย

รูปที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อเวลา  $t = 0$  แสดงผลของการก่อสร้างและผลกระทบจากปฏิกิริยาเคมี เมื่อเริ่มติดตั้งเข็มปูนขาว ค่า Excess Pore Water Pressure ของดินจะมีค่าเป็นบวกอันเป็นผลของการติดตั้งเสาเข็ม จากนั้นเมื่อติดตั้งเสร็จแล้วปูนขาวเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเป็นผลให้เสาเข็มดูดน้ำจากมวลดินซึ่งเป็นผลให้ Excess Pore Water Pressure เกิดการลดลงจนต่ำกว่าศูนย์(เนื่องจากแรงดันน้ำในแปลงต่ำกว่า Dummy area) ที่ความลึก 3.0, 7.0 เมตร ผลการก่อสร้างและปฏิกิริยาทางเคมีทำให้เกิดค่า  $\Delta u$  เป็นลบ แต่ที่ระดับความลึก 14 เมตรนั้น เป็นส่วนที่อยู่ในชั้นดินแข็งและอยู่บริเวณปลายของเสาเข็มแล้ว พบว่าแรงดันน้ำในดินมีค่าสูงกว่า Dummy area นั้นหมายความว่า มี Excess Pore Water Pressure เป็นบวกอยู่(ซึ่งต่างกับที่ระดับความลึก 3, 7 เมตร ซึ่งค่า Excess Pore Water Pressure มีค่าติดลบ) กรณีนี้อาจมีสาเหตุมาจากที่ดินที่ระดับนี้อยู่ในชั้นดินแข็งและมีค่า Plasticity ค่าจึงทำให้ปฏิกิริยาของปูนขาวไปถึงดินตำแหน่งที่ฝัง Piezometer น้อยลง ดังนั้นเมื่อการดูดน้ำในบริเวณนี้จึงมีน้อย แรงดันน้ำจึงลดลงไม่มากแต่ผลของการรบกวนดินเนื่องจากการก่อสร้างและการขยายตัวของเสาเข็มมีมากกว่า ความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นจึงเป็นบวก จากการที่ทดลองชุด



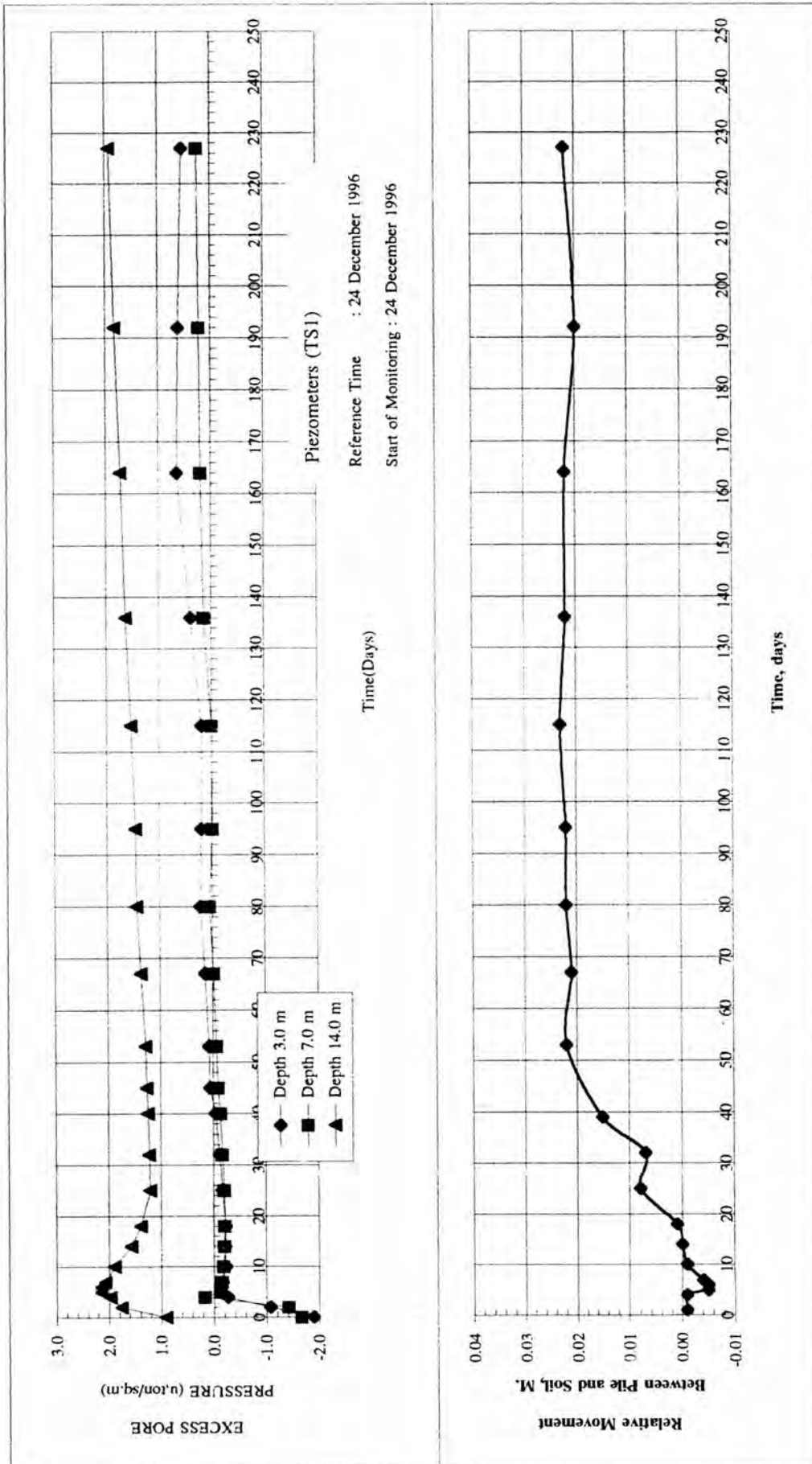
รูปที่ 4.2 Excess Pore Pressure ของแปลงทดสอบที่ 1(TS-1)

ตารางที่ 4.1 แสดงค่า Pore water Pressure และ Ground Water Level

| Times<br>(Days) | Pore Water Pressure ( $t/m^2$ ) |         |          |         |         |          |         |         |          | GW    |
|-----------------|---------------------------------|---------|----------|---------|---------|----------|---------|---------|----------|-------|
|                 | Dummy Area                      |         |          | TS-1    |         |          | TS-2    |         |          |       |
|                 | -3.0 m.                         | -7.0 m. | -14.0 m. | -3.0 m. | -7.0 m. | -14.0 m. | -3.0 m. | -7.0 m. | -14.0 m. |       |
| Initial         | 2.992                           | 6.385   | 11.478   | 1.095   | 4.719   | 12.380   | 0.065   | 5.909   | 13.754   | 0.980 |
| 2               | 2.560                           | 6.295   | 10.809   | 1.493   | 4.879   | 12.571   | 0.193   | 5.889   | 13.795   | 0.880 |
| 4               | 2.340                           | 6.165   | 10.957   | 2.087   | 6.335   | 12.933   | 1.187   | 6.404   | 13.737   | 0.676 |
| 5               | 2.297                           | 6.084   | 10.943   | 2.168   | 5.971   | 13.089   | 1.411   | 6.467   | 13.872   | 0.803 |
| 6               | 2.215                           | 6.065   | 10.945   | 2.093   | 5.943   | 13.092   | 1.376   | 6.403   | 13.975   | 0.845 |
| 7               | 2.218                           | 6.063   | 10.974   | 2.056   | 5.914   | 13.041   | 1.350   | 6.323   | 14.107   | 0.853 |
| 10              | 2.212                           | 6.044   | 11.066   | 1.988   | 5.858   | 12.953   | 1.318   | 6.286   | 14.182   | 0.898 |
| 14              | 2.213                           | 5.993   | 11.295   | 2.003   | 5.793   | 12.860   | 1.290   | 6.246   | 14.209   | 0.972 |
| 18              | 2.208                           | 5.987   | 11.415   | 1.984   | 5.777   | 12.801   | 1.295   | 6.159   | 14.354   | 0.972 |
| 25              | 2.169                           | 5.960   | 11.496   | 2.000   | 5.765   | 12.704   | 1.377   | 6.104   | 14.398   | 1.097 |
| 32              | 2.162                           | 5.927   | 11.486   | 2.045   | 5.758   | 12.709   | 1.413   | 6.103   | 14.510   | 1.165 |
| 40              | 2.130                           | 5.884   | 11.448   | 2.086   | 5.750   | 12.688   | 1.604   | 6.144   | 14.559   | 1.245 |
| 45              | 2.135                           | 5.861   | 11.425   | 2.192   | 5.766   | 12.686   | 1.668   | 6.168   | 14.545   | 1.324 |
| 53              | 2.114                           | 5.819   | 11.383   | 2.187   | 5.754   | 12.668   | 1.869   | 6.192   | 14.591   | 1.394 |
| 67              | 2.102                           | 5.771   | 11.316   | 2.244   | 5.750   | 12.682   | 2.094   | 6.228   | 14.863   | 1.458 |
| 80              | 2.087                           | 5.724   | 11.247   | 2.305   | 5.769   | 12.687   | 2.301   | 6.298   | 14.866   | 1.523 |
| 95              | 2.186                           | 5.805   | 11.250   | 2.380   | 5.793   | 12.706   | 2.553   | 6.416   | 14.908   | 1.54  |
| 115             | 2.253                           | 5.809   | 11.200   | 2.439   | 5.810   | 12.728   | 2.829   | 6.589   | 15.063   | 1.55  |
| 136             | 2.135                           | 5.695   | 11.106   | 2.521   | 5.831   | 12.735   | 3.027   | 6.690   | 15.094   | 1.696 |
| 164             | 2.207                           | 5.895   | 11.128   | 2.843   | 6.079   | 12.848   | 3.278   | 6.878   | 15.127   | 1.68  |
| 192             | 2.273                           | 5.946   | 11.111   | 2.882   | 6.160   | 12.933   | 3.347   | 6.892   | 15.076   | 1.849 |
| 227             | 2.230                           | 5.818   | 10.961   | 2.764   | 6.059   | 12.885   | 3.305   | 6.808   | 15.065   | 2.084 |

ตารางที่ 4.2 Excess Pore Water Pressure

| Times<br>(Days) | Excess Pore Water Pressure ( $t/m^2$ ) |         |          |         |         |          |
|-----------------|--|---------|----------|---------|---------|----------|
|                 | TS-1                                   |         |          | TS-2    |         |          |
|                 | -3.0 m.                                | -7.0 m. | -14.0 m. | -3.0 m. | -7.0 m. | -14.0 m. |
| Initial         | -1.897                                 | -1.666  | 0.902    | -2.927  | -0.476  | 2.276    |
| 2               | -1.067                                 | -1.416  | 1.762    | -2.367  | -0.406  | 2.986    |
| 4               | -0.253                                 | 0.170   | 1.976    | -1.153  | 0.239   | 2.780    |
| 5               | -0.129                                 | -0.113  | 2.146    | -0.886  | 0.383   | 2.929    |
| 6               | -0.122                                 | -0.122  | 2.147    | -0.839  | 0.338   | 3.030    |
| 7               | -0.162                                 | -0.149  | 2.067    | -0.868  | 0.260   | 3.133    |
| 10              | -0.224                                 | -0.186  | 1.887    | -0.894  | 0.242   | 3.116    |
| 14              | -0.210                                 | -0.200  | 1.565    | -0.923  | 0.253   | 2.914    |
| 18              | -0.224                                 | -0.210  | 1.386    | -0.913  | 0.172   | 2.939    |
| 25              | -0.169                                 | -0.195  | 1.208    | -0.792  | 0.144   | 2.902    |
| 32              | -0.117                                 | -0.169  | 1.223    | -0.749  | 0.176   | 3.024    |
| 40              | -0.044                                 | -0.134  | 1.240    | -0.526  | 0.260   | 3.111    |
| 45              | 0.057                                  | -0.095  | 1.261    | -0.467  | 0.307   | 3.120    |
| 53              | 0.073                                  | -0.065  | 1.285    | -0.245  | 0.373   | 3.208    |
| 67              | 0.142                                  | -0.021  | 1.366    | -0.008  | 0.457   | 3.547    |
| 80              | 0.218                                  | 0.045   | 1.440    | 0.214   | 0.574   | 3.619    |
| 95              | 0.194                                  | -0.012  | 1.456    | 0.367   | 0.611   | 3.658    |
| 115             | 0.186                                  | 0.001   | 1.528    | 0.576   | 0.780   | 3.863    |
| 136             | 0.386                                  | 0.136   | 1.629    | 0.892   | 0.995   | 3.988    |
| 164             | 0.636                                  | 0.184   | 1.720    | 1.071   | 0.983   | 3.999    |
| 192             | 0.609                                  | 0.214   | 1.822    | 1.074   | 0.946   | 3.965    |
| 227             | 0.534                                  | 0.241   | 1.924    | 1.075   | 0.990   | 4.104    |



รูปที่ 4.3 แสดงค่า Excess Pore Pressure กับ Relative Movement ของเสาเข็มกับดินของแปลงทดสอบที่ 1(TS-1)

เสาเข็มแล้ววัดขนาดเสาเข็มจำนวนแปลงละ 1 จุดที่กลางแปลง พบว่าเส้นผ่าศูนย์กลางของเข็มขยายตัวจาก 0.40 เมตร เป็น 0.50 เมตร โดยเฉลี่ย

ดังนั้นค่า Excess Pore Water Pressure ในช่วงก่อนการถมทราย ที่ระดับ 3.0 ,7.0 เมตร จึงมีค่าติดลบ ส่วนที่ระดับ 14.0 เมตรก็จะมีค่า Excess Pore Water Pressure( $\Delta u$ )เหลืออยู่เนื่องขบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งดูได้จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 ที่ความลึก 3.0 และ 7.0 เมตรเกิดค่า  $\Delta u$  เป็นลบ (เมื่อเวลาเท่ากับศูนย์)มีค่าประมาณ 2.0 ดันต่อตารางเมตร ส่วนที่ 14.0 เมตรซึ่งเป็นดินแข็งปานกลางหรือดินแข็ง เกิด  $\Delta u$  เป็นบวกมีค่าประมาณ 0.902 ดันต่อตารางเมตร

#### 4.1.2. พฤติกรรมของดินและเสาเข็มปูนขาวเมื่อมีทรายถม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการแสดงพฤติกรรมของเสาเข็มและดินจากการถมทรายสูง 2.0 เมตร

##### (ก) พฤติกรรมของเสาเข็มและดินในแปลงทดสอบที่ 1 (TS-1)

ที่แปลงทดสอบที่ 1 (TS-1) พบว่าหลังจากเมื่อถมทรายค่า Excess Pore Water Pressure จะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงประมาณวันที่ 5 ซึ่งเป็นวันที่การถมทรายเสร็จสิ้นลง ต่อจากนั้นค่า Excess Pore Water Pressure มีแนวโน้มลดลงเนื่องมาจากขบวนการอัดตัวคายน้ำของดิน (Consolidation) สังเกตจากค่า  $\Delta u$  ที่ความลึก 14.0 เมตร จนกระทั่งประมาณวันที่ 20 พบว่าค่า Excess Pore Water Pressure ค่อยๆ เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งในระดับ 3.0 ,7.0 และ 14.0 เมตร จนกระทั่งประมาณ 160 วัน ที่ระดับ 3 ,7 เมตรก็เริ่มคงที่ แต่ที่ 14.0 เมตรนั้นยังคงเพิ่มขึ้นอาจเนื่องจากแรงกระทำที่ยังคงมีอยู่อีก ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 จากรูปนี้แสดงให้เห็นว่าจากการถมทราย 2.0 เมตร ที่ความลึก 3.0 และ 7.0 เมตร ค่า  $\Delta u$  เพิ่มขึ้นเป็นบวกเล็กน้อย(ประมาณ 0.2 ดันต่อตารางเมตร)และที่ 14.0 เมตร ซึ่งเป็นความลึกชั้นดินแข็ง ค่า  $\Delta u$  เพิ่มสูงสุดเป็น 2.2 ดันต่อตารางเมตร และลดเหลือ 1.2 ดันต่อตารางเมตร ตารางที่ 4.1 และ 4.2 รวบรวมค่าความคืบหน้าจาก Dummy area และ ค่า Excess Pore Water Pressure ทั้งที่แปลงทดสอบที่ 1 และ 2

จากการวัดค่า Relative Movement ของเสาเข็มกับดิน ที่แปลงทดสอบที่ 1(TS-1) วิธีการวัดค่า Relative Movement นี้ วัดจากค่าการทรุดตัวของเข็มซึ่งฝังตัว Deep Settlement Point เอ1 ไว้ที่ตัวเข็มที่ระดับความลึก 8.00 เมตรกับดิน ค่าที่วัดได้เป็นการทรุดตัวของเสาเข็ม ที่ระดับความ



ลึก 8.00 - 16.00 เมตรเท่านั้น (พิจารณาว่าชั้นดินเหนียวแข็งมากที่อยู่ที่ระดับ -15.5 เมตรไม่มีการทรุดตัว) ซึ่งไม่รวมค่าการทรุดตัวของเข็มช่วงหัวเข็มถึง 8.00 เมตร ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดการยุบอัดตัวของเสาเข็ม (Compression of Pile) ด้วย ดังนั้นค่าจาก Deep Settlement Point (ข้อมูลรูปที่ 4.7) จึงไม่ใช่ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มทั้งหมด เมื่อทำการเปรียบเทียบการทรุดตัวของเสาเข็มกับดินจะต้องเปรียบเทียบการทรุดตัวของเสาเข็มและดินในระดับความลึกเดียวกัน ทำโดยใช้ค่าการทรุดตัวของเสาเข็มลบออกจากค่าการทรุดตัวของดิน การหาค่าการทรุดตัวสัมพัทธ์ (Relative Movement) จะใช้ค่าจาก Deep Settlement Point ที่ 8.0 เมตรลบกับค่าการทรุดตัวของดินจาก Extensometer ที่ระดับ 7.0 เมตร (เนื่องจากไม่ได้ติดตั้ง Extensometer ที่ 8.0 เมตร)

ค่า Relative Movement (รูปที่ 4.3) นั้นจะแสดงให้เห็นถึงการทรุดตัวที่แตกต่างกันระหว่างดินกับเสาเข็ม โดยตามปกติเสาเข็มถ้าปลายเข็มอยู่ที่ชั้นดินอ่อนและตื้น จะมีการทรุดตัวมากกว่าดิน ซึ่งจะเกิด Positive Skin Friction แต่ในแปลงทดสอบนี้ปลายเสาเข็มอยู่ที่ชั้นดินแข็ง ถ้าดินมีการทรุดตัวมากกว่าเสาเข็ม ก็จะทำให้เกิด Negative Skin Friction ซึ่งจะไปเป็นน้ำหนักกระทำที่เสาเข็มเพิ่มขึ้นอีก โดยค่า Negative Skin Friction นี้จะเพิ่มขึ้นกับเวลา จึงขึ้นอยู่กับอัตราการทรุดตัวของดินโดยรอบเสาเข็ม

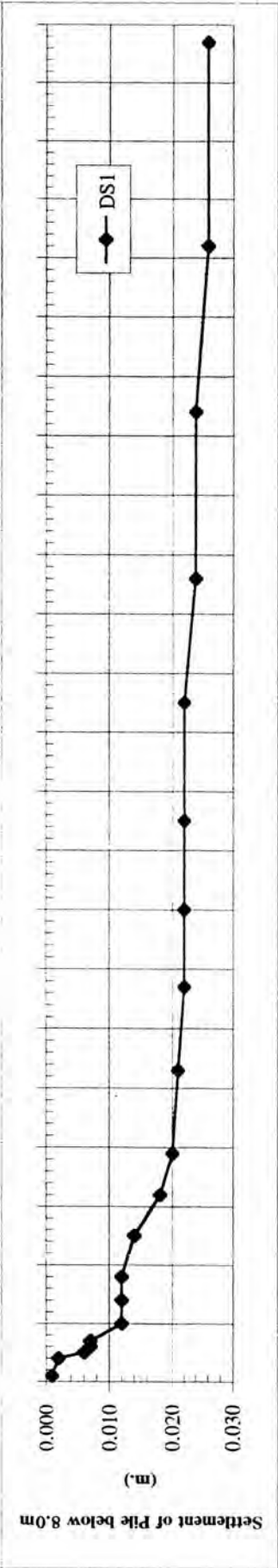
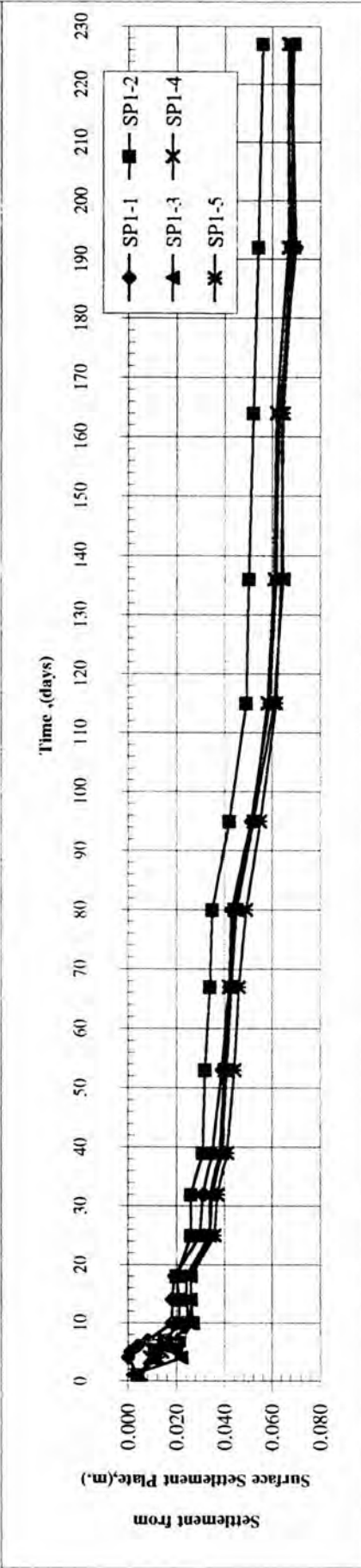
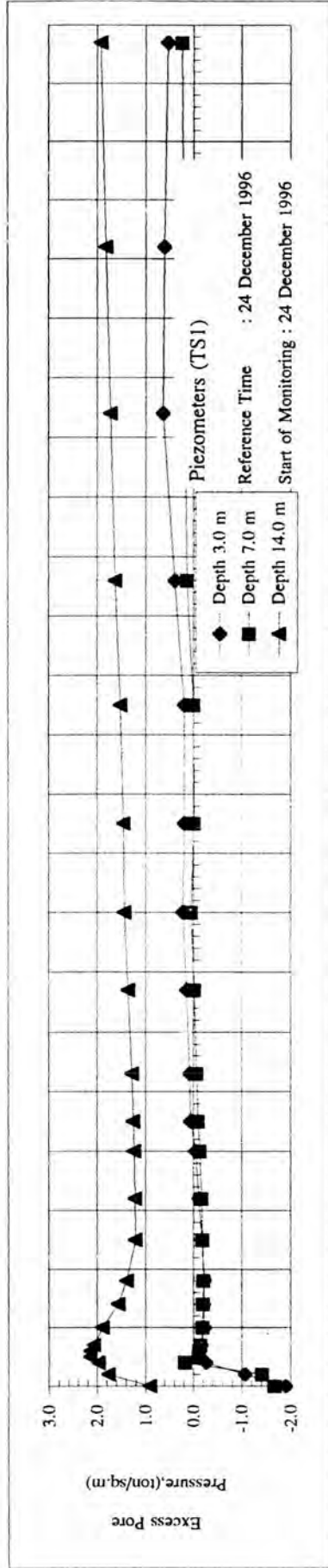
ดังนั้นจากรูปที่ 4.3 พบว่าค่า Relative Movement เริ่มเกิดขึ้นในลักษณะที่เกิด Positive Skin Friction ก่อนซึ่งอยู่ในระหว่างที่ทำการถมทราย(ประมาณ 6 วัน) ค่า  $\Delta u$  เพิ่มขึ้นพร้อมกับค่าการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ ซึ่งแสดงว่าเสาเข็มเคลื่อนตัวมากกว่าดินและเป็นค่าที่การเคลื่อนตัวสัมพัทธ์สูงสุด หลังจากนั้นการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์จึงค่อยๆลดลงจนกระทั่งมีค่าเท่ากับศูนย์ เป็นเวลาเกือบ 10 วัน(แสดงว่าดินเคลื่อนตัวไปพร้อมกับเสาเข็ม)แล้ว ข้อมูลจึงแสดงว่าดินเคลื่อนตัวมากกว่าเสาเข็ม ในช่วงเวลา 18 วันหลังถมทราย โดยจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงช่วงประมาณ 52 วัน จึงจะเริ่มคงที่นั่นคือเสาเข็มเกิดการทรุดตัวเนื่องจาก Negative Skin Friction ด้วยตั้งแต่วันที่ 18 วันจนกระทั่งถึงเวลา 52 วันหลังการถมทราย ค่า Negative Skin Friction จะมีค่าสูงสุดหลังจากนั้นผลต่างระหว่างดินกับเสาเข็มเริ่มมีค่าคงที่ ซึ่งแสดงว่าเสาเข็มกับดินเริ่มมีการเคลื่อนตัวไปด้วยกัน การตอบสนองของ Excess Pore Water Pressure ก็แสดงว่ามี Negative Skin Friction จากค่า  $\Delta u$  ที่ระดับ 3.0, 7.0 และ 14.0 เมตร(รูปที่ 4.3) มีแนวโน้มว่าเป็นบวกมากขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้นจากวันที่ 18 ค่า  $\Delta u$  ที่ระดับ 3.0 และ 7.0 เมตร เริ่มคงที่เมื่อเวลา 160 วันส่วนที่ความลึก 14.0 เมตรค่า  $\Delta u$  ยังเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

รูปที่ 4.4 แสดงการทรุดตัวของดิน การทรุดตัวของเสาเข็มจากระดับ 8.0 เมตร(ข้อมูลจาก Deep Settlement Point) และการทรุดตัวเนื่องจากการถมคันดินซึ่งหาจากผลต่างระหว่าง Surface Settlement Plate ที่คันดินกับที่ Dummy area การทรุดตัวของเสาเข็มได้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆจนถึงเวลา 10 วัน และอยู่กับที่ใน 10 วันต่อมา (เหมือนกับพฤติกรรมการเคลื่อนตัวสัมพัทธ์ รูปที่ 4.4) หลังจากนั้นการเคลื่อนตัวก็เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งแสดงว่ามีการเกิด Negative Skin Friction Load และการเพิ่มขึ้นของ Load ในเข็มเนื่องจากการทรุดตัวของดิน(Load Transferred) ส่วนการทรุดตัวของคันดิน(รูปที่4.5)ก็มีการเคลื่อนตัวมากขึ้นเรื่อยๆและแนวโน้มของค่าการทรุดตัวแสดงว่าการทรุดตัวของ Settlement Plate แต่ละอันมีค่าไม่แตกต่างกันมากแสดงว่ามีการ Distribute Load เกิดขึ้น การทรุดตัวจะมีการเพิ่มขึ้นเร็วมากขณะถมทราย (ในระหว่างถมทรายมีการทรุดตัวประมาณ 0.022 เมตร คาดว่าเป็น Undrained Settlement) จากนั้นการทรุดตัวก็คงที่ประมาณ 10 วัน จนกระทั่งประมาณวันที่ 18 ถึง 40 อัตราการทรุดตัวก็เร็วขึ้นอีก หลังจาก 40 วันแล้วอัตราการทรุดตัวเริ่มลดลงเล็กน้อยและเพิ่มขึ้นอีกหลังเวลา 80 วันจนกระทั่งถึงเวลา 140 วันหลังจากนั้นการทรุดตัวเริ่มมีน้อยซึ่งแสดงว่าการทรุดตัวใกล้เสร็จสิ้นลง พฤติกรรมของการทรุดตัวก็มีแนวโน้มว่ามี Negative Skin Friction และมีการ Transferred ของ load ระหว่างดินกับเสาเข็มเกิดขึ้น

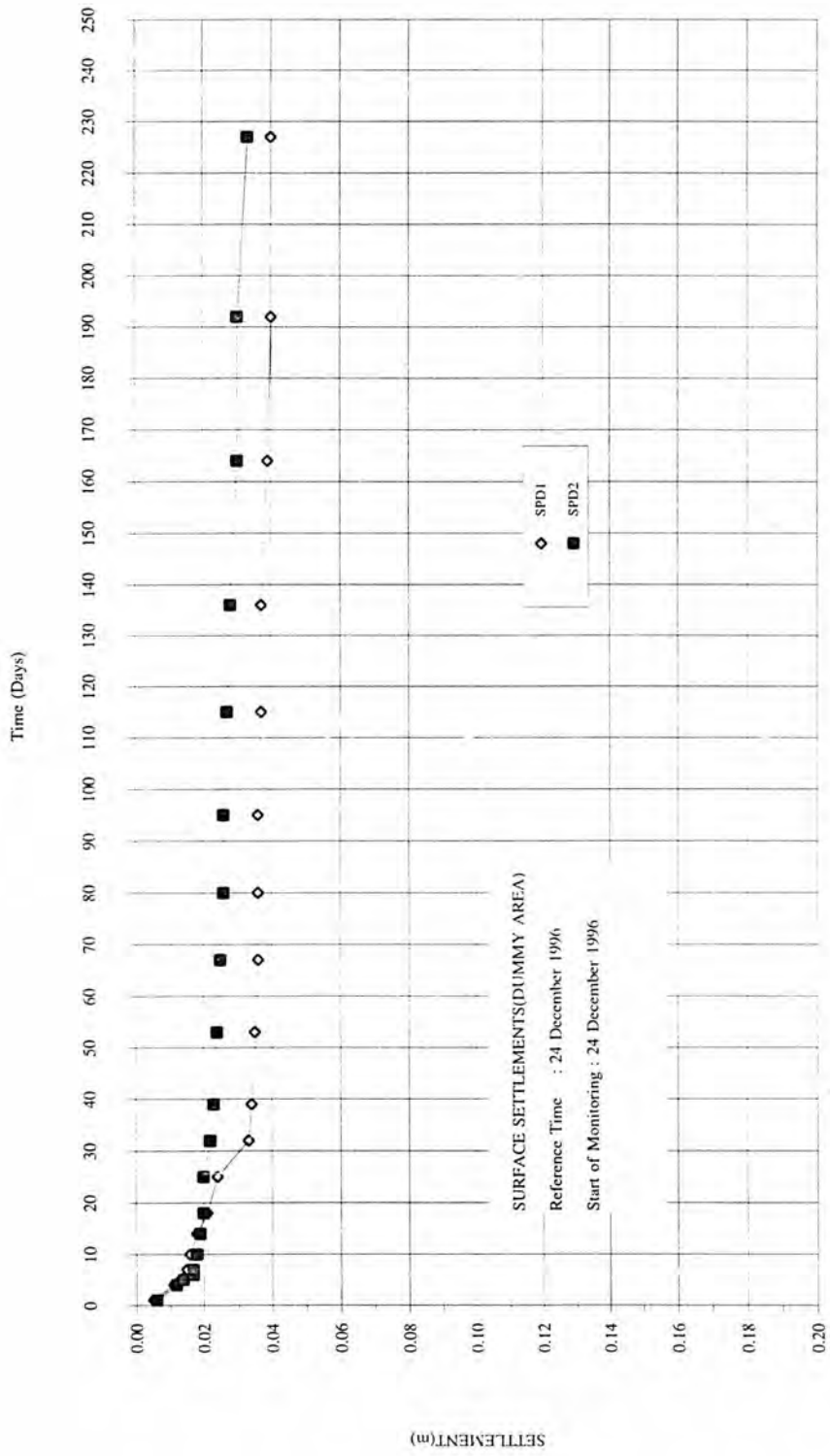
จากข้อมูลที่ได้จาก Dummy area (ตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.5,4.6) แสดงว่าค่าความดันน้ำลดลงกับเวลา และการทรุดตัวของทรายที่ใช้ปรับพื้นที่ที่เหลืออยู่รวมกับผลการก่อสร้างแปลงทดสอบที่ 1 (TS-1) ทำให้เกิดการทรุดตัวประมาณ 0.04 เมตร(รูปที่ 4.5) ค่าความดันน้ำและการทรุดตัวเริ่มคงที่เมื่อเวลา 80 วัน ดังนั้นผลกระทบของการปรับพื้นที่และการก่อสร้างแปลงทดสอบที่ 1 สิ้นสุดลงประมาณ 80 วันไปแล้วและค่า Pore Water Pressure ที่ 80 วันนี้คือค่า Equilibrium Pore Pressure ดังแสดงในรูปที่ 4.5

จากการวัดค่าการทรุดตัวของเสาเข็มของแปลงทดสอบที่ 1 เทียบกับเวลาโดยฝังตัว Deep Settlement Point (รูปที่ 4.7) ที่ตัวเสาเข็มที่ระดับความลึก 8.00 เมตร ที่ Gridline ที่ G6 โดยค่าที่ได้นี้เป็นค่าการทรุดตัวเพียงช่วง 8.00 - 16.00 เมตรเท่านั้น

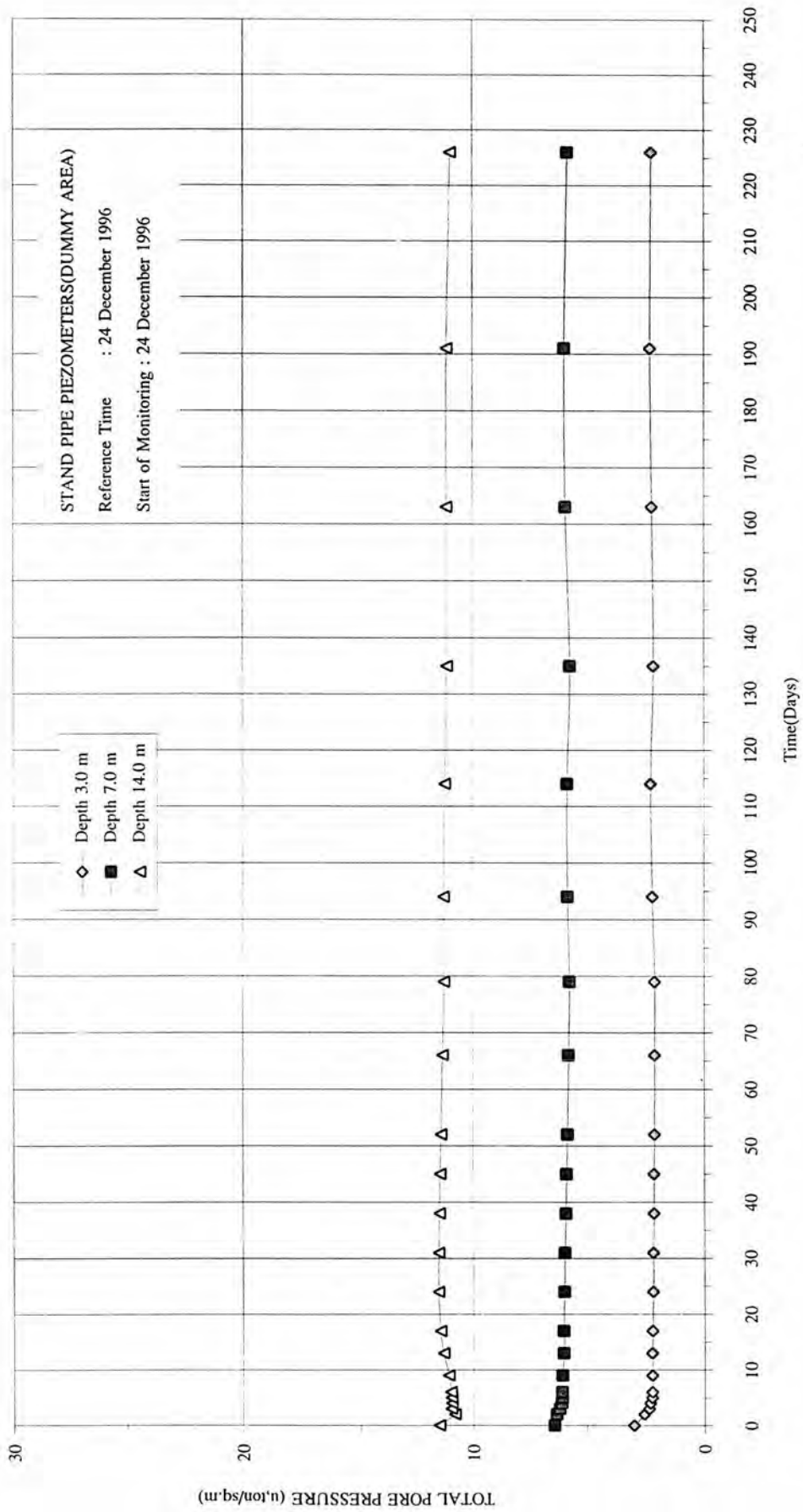
ผลการวัดค่าการทรุดตัวในระดับลึกของแปลงทดสอบที่ 1 (TS-1)เทียบกับเวลา โดยวัดจาก Magnetic Extensometer ที่ระดับความลึก 3.00 ,7.00 และ 14.0 เมตร(รูปที่ 4.8) ตามลำดับแต่ในแปลงทดสอบที่ 2 ชุดเครื่องมือเกิดความเสียหายจึงวัดไม่ได้ ที่เวลา 227 วัน ผลของการวัดตัวที่ระดับความลึก 14.00 เมตรนั้น แสดงค่าการทรุดตัวของดินตั้งแต่ 14.00 เมตรลงไป มีค่าการทรุดตัว



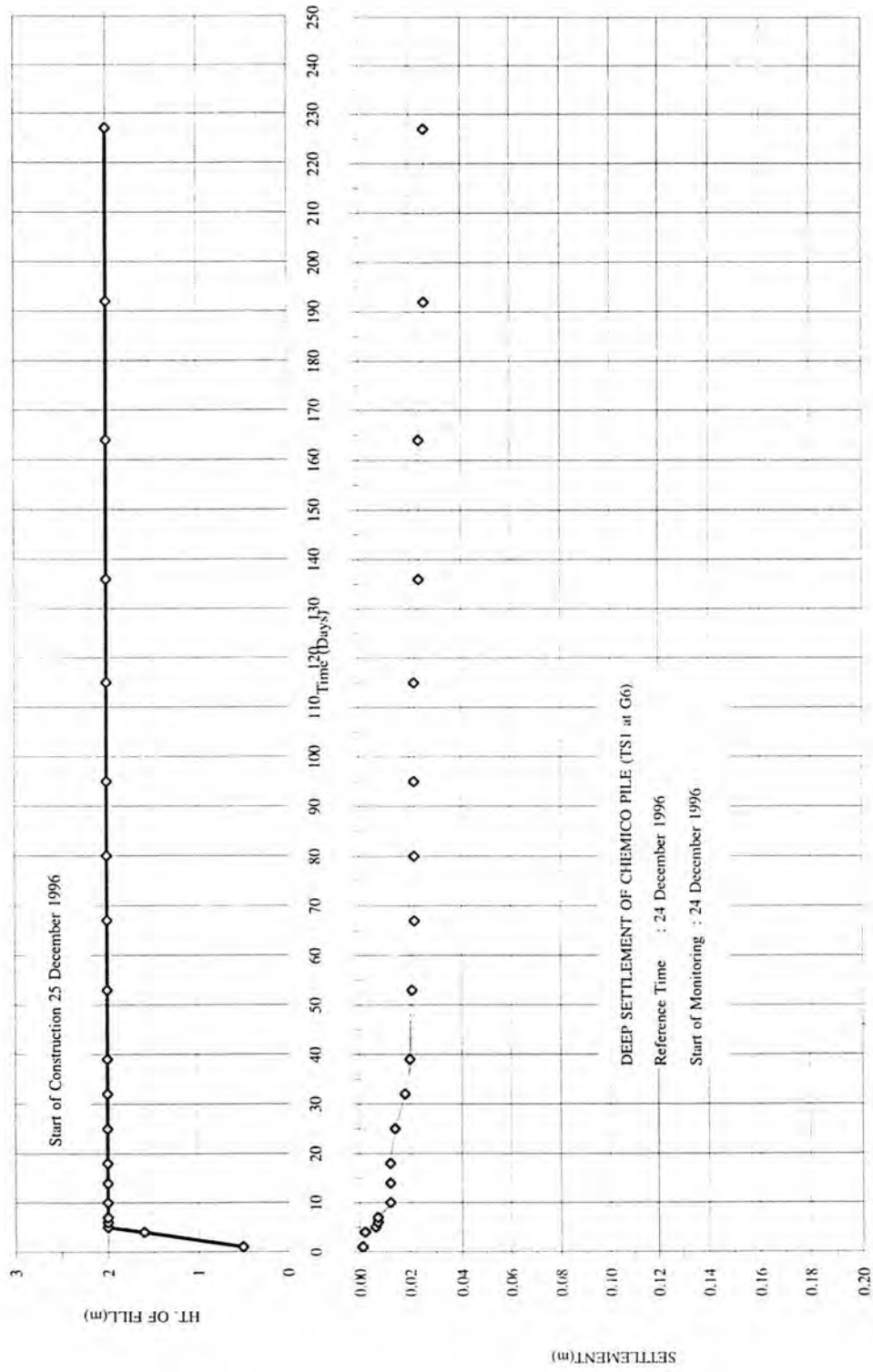
รูปที่ 4.4 แสดงค่า Excess Pore Pressure ,การทรุดตัวของดิน ,การทรุดตัวของเสาเข็มกับเวลาที่แปลงทดสอบที่ 1(TS-1)



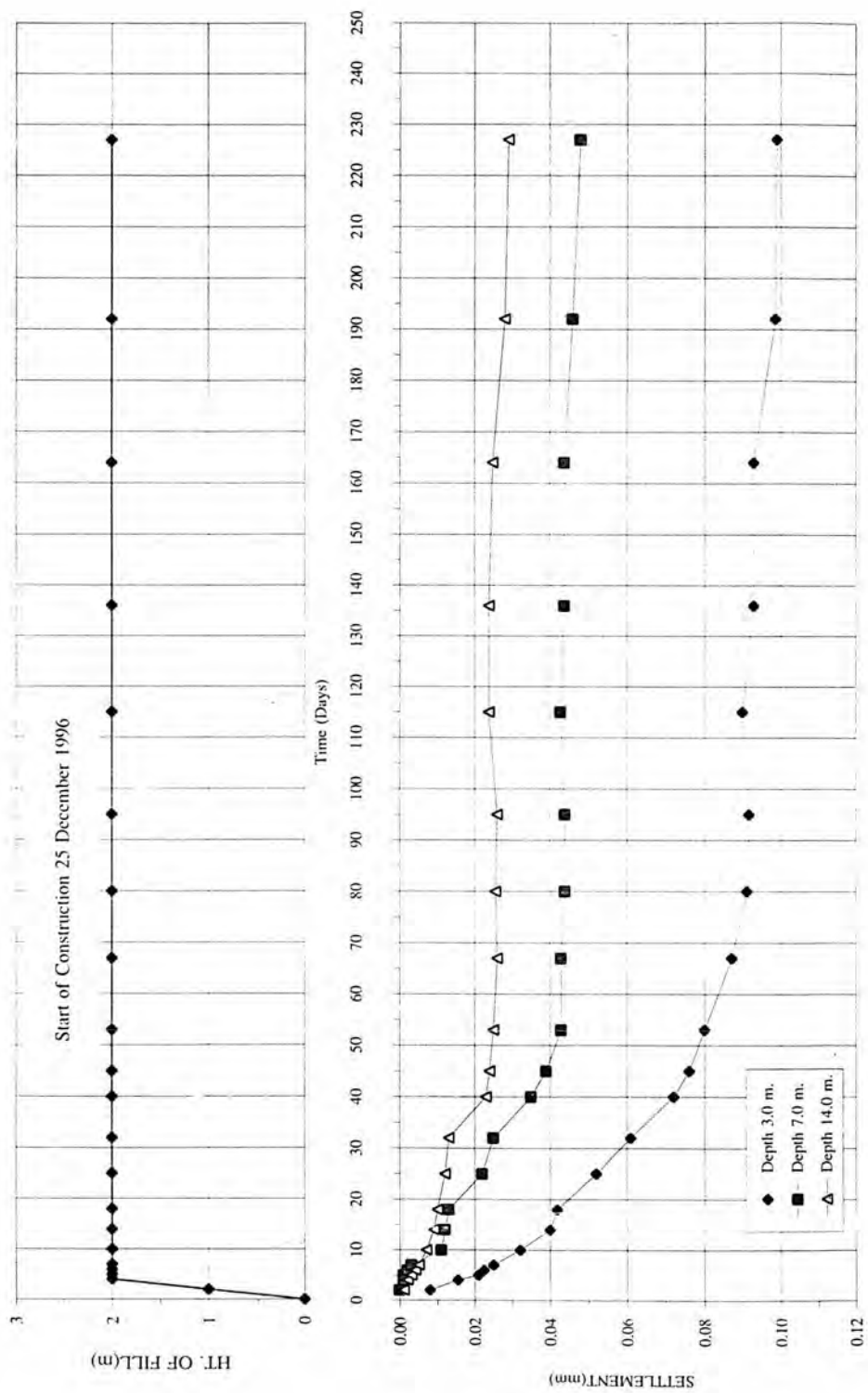
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของ Dummy Area เทียบกับเวลา



รูปที่ 4.6 แสดงความดันน้ำใน Dummy Area กับเวลา



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวของเสาเข็มของแปลงทดสอบที่ 1 เทียบกับเวลา ( คัด Settlement Point ในตัวเซ็นที่ระดับความลึก 8.00 เมตร ที่ Gridline ที่ G6 )



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่าการทรุดตัวจาก Extensometer ของแปลงทดสอบที่ 1 เทียบกับเวลา

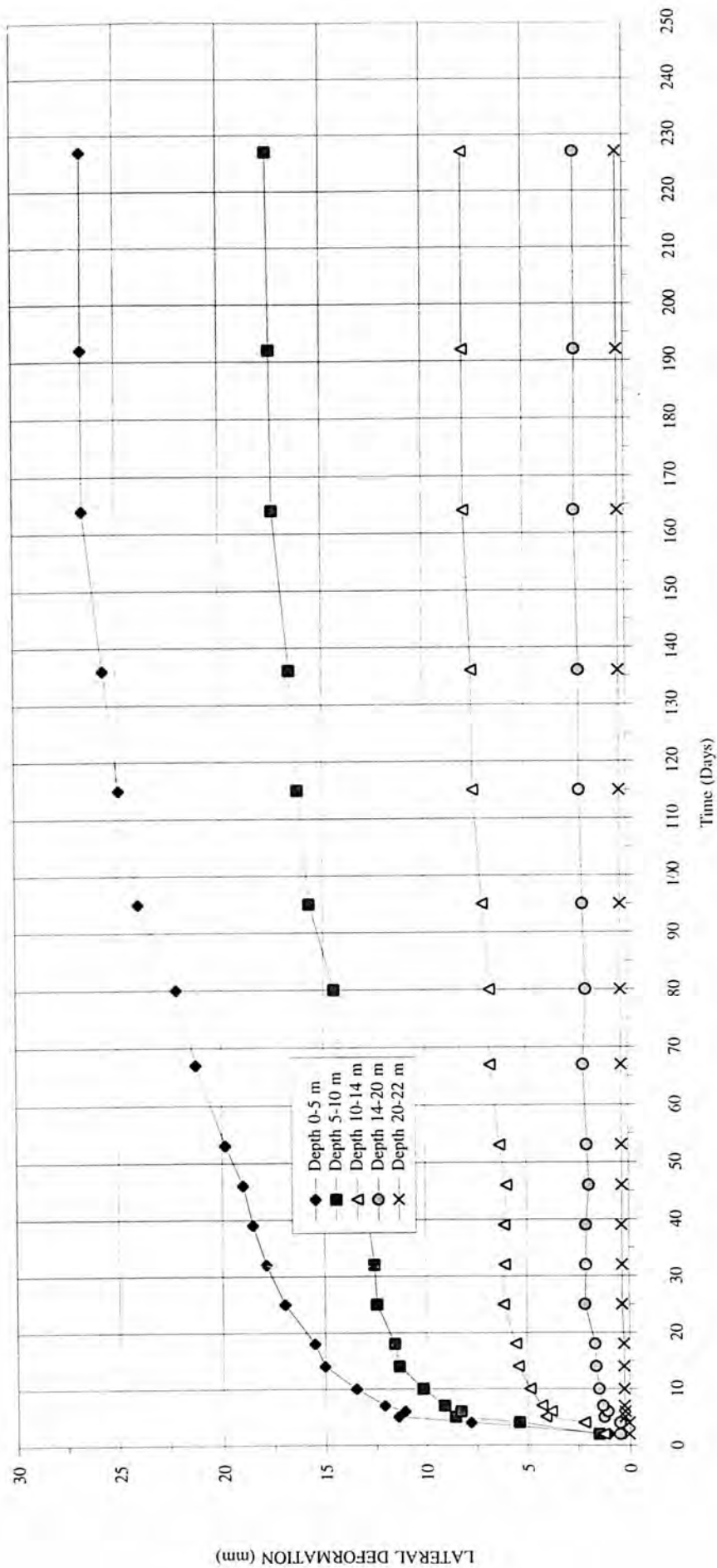
ประมาณ 0.029 เมตร ส่วนตัวที่ระดับความลึก 7.00 เมตรนั้น แสดงค่าการทรุดตัวของดินตั้งแต่ 7.00 เมตรลงไป มีค่าการทรุดตัวประมาณ 0.048 เมตร ส่วนตัวที่ระดับความลึก 3.00 เมตรนั้น แสดงค่าการทรุดตัวของดินตั้งแต่ 3.00 เมตรลงไป มีค่าการทรุดตัวประมาณ 0.099 เมตร ในรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ว่าการทรุดตัวรวมทั้งผลของการปรับพื้นที่ การก่อสร้างแปลงทดสอบที่ 1 และผลของการสูบน้ำบาดาล นอกจากนี้ข้อมูลยังแสดงให้เห็นว่าการทรุดตัวเกิดขึ้นมากที่สุดระหว่าง 3.0 ถึง 7.0 เมตร ประมาณ 0.05 เมตร ระหว่าง 7.0 ถึง 14.0 เมตร ประมาณ 0.02 เมตร และระหว่าง 14.0 ถึง 22.0 เมตร ประมาณ 0.029 เมตร ตั้งแต่ความลึก 7.0 ถึง 22.0 เมตรแต่ละช่วงจะรวมถึงการทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล เพราะค่าความดันน้ำที่สภาพสมดุลได้ต่ำกว่าสภาพ Hydrostatic ตั้งแต่ความลึก 6.0 เมตร

ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเทียบกับเวลาด้วย Inclinator ที่แปลงทดสอบที่ 1 (ดูรูปที่ 4.9 ถึง 4.10) พบว่า ผลจาก IN1-1 ซึ่งอยู่ด้านติดกับ Dummy area ที่ 227 วัน การเคลื่อนตัวของดินช่วงความลึก 0 - 5 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.027 เมตร ช่วงความลึก 5 - 10 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.018 เมตร ช่วงความลึก 10 - 14 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.008 เมตร ช่วงความลึก 14 - 20 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.0025 เมตร ช่วงความลึก 20 - 22 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.0001 เมตร การเคลื่อนตัวด้านข้างที่สูงที่สุดประมาณ 0.03 เมตร อยู่ที่ความลึก 3.5 เมตร

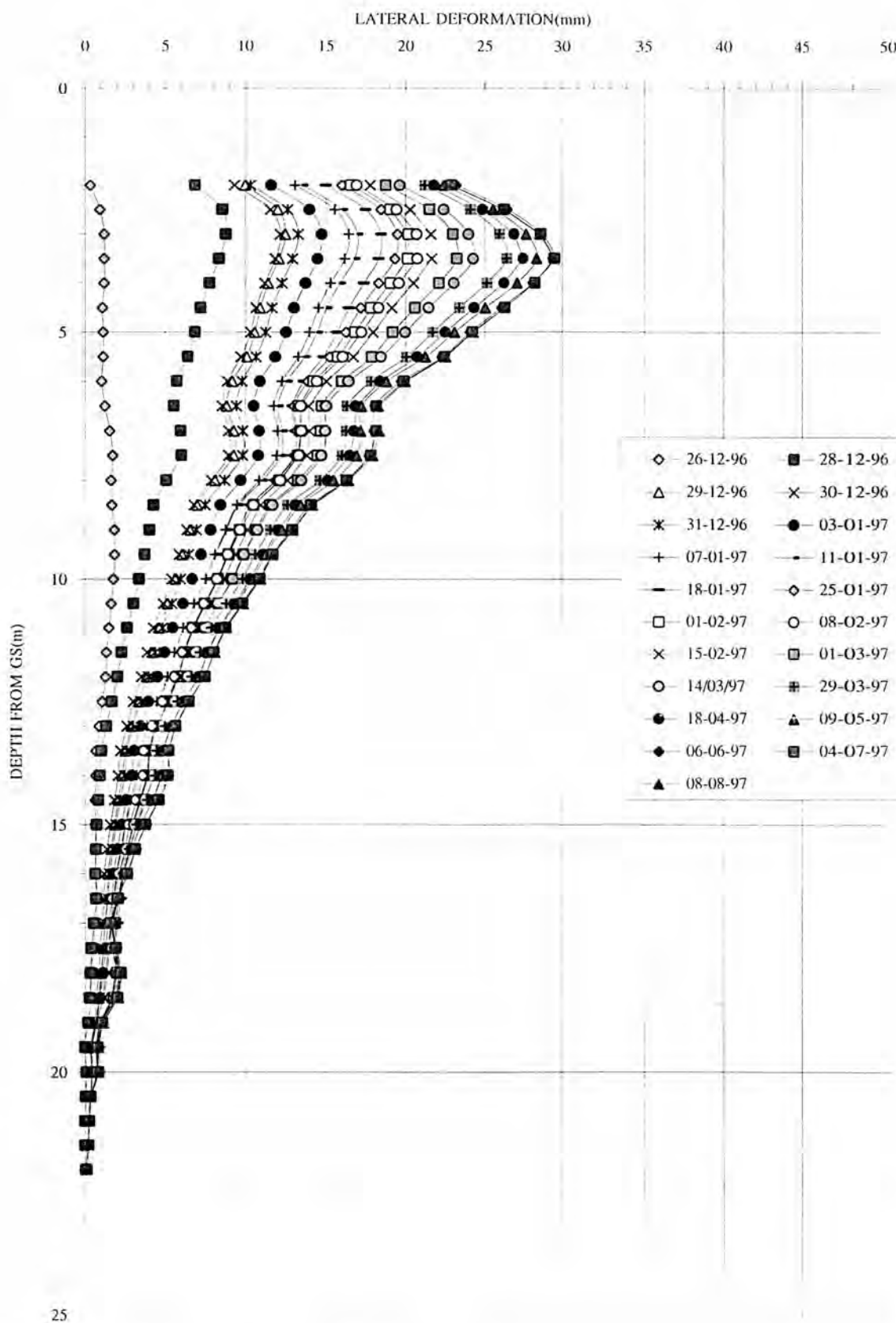
ส่วนผลจาก IN1-2 ซึ่งอยู่ด้านคูน้ำที่ 227 วัน (ดูรูปที่ 4.11 ถึง 4.12) ค่าการเคลื่อนตัว ช่วงความลึก 0 - 5 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.0255 เมตร ช่วงความลึก 5 - 10 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.017 เมตร ช่วงความลึก 10 - 14 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.0075 เมตร ช่วงความลึก 14 - 20 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.002 เมตร ช่วงความลึก 20 - 22 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.0001 เมตร ค่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างสูงสุดประมาณ 0.03 เมตร อยู่ที่ประมาณ 4.0 เมตร

นั่นคือค่าการเคลื่อนตัวในแปลงทดสอบที่ 1 ช่วงความลึก 0 - 5 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินอ่อนมากมีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุด ที่ 227 วันประมาณ 0.026 เมตร

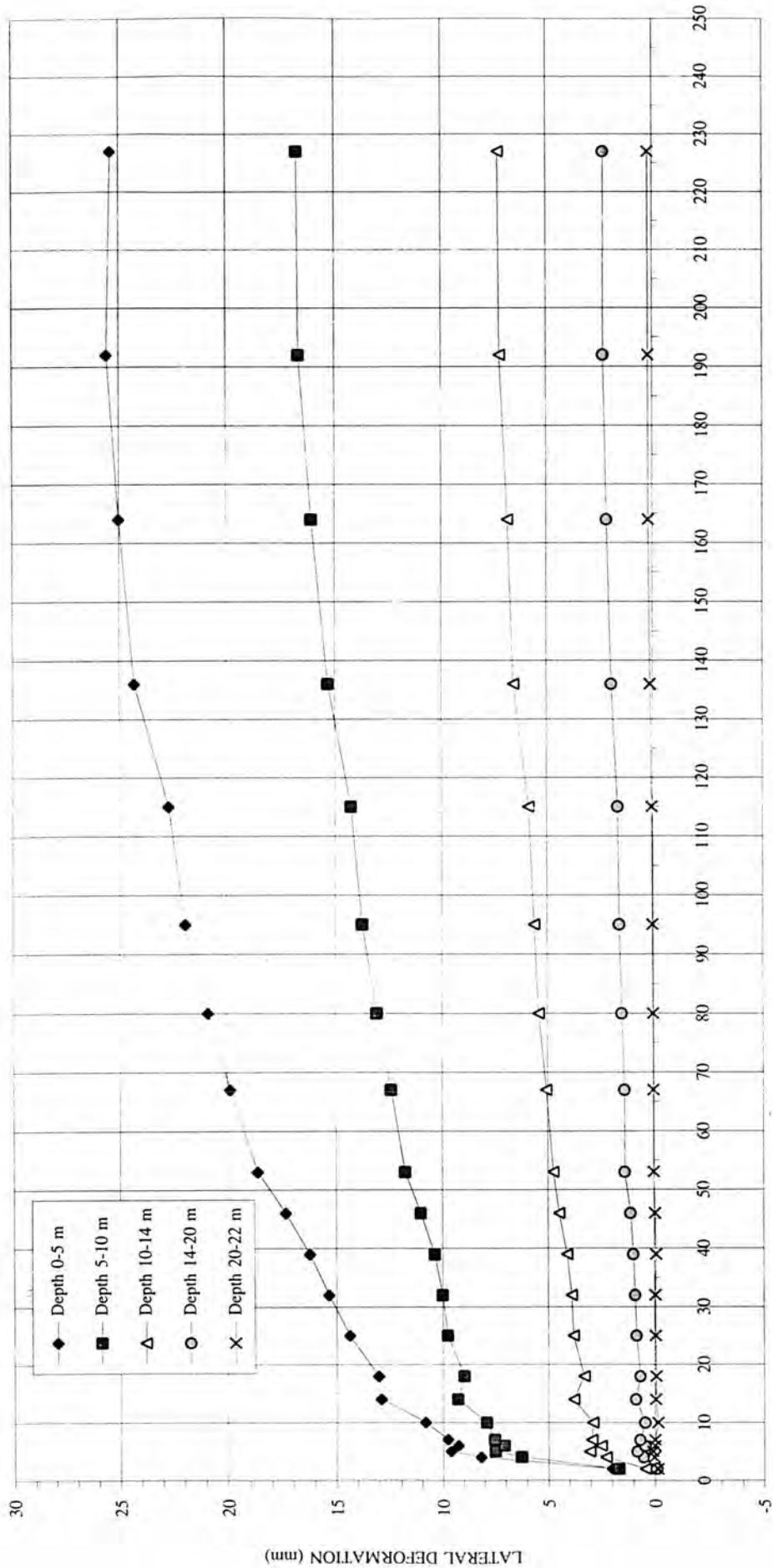




รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างที่เกี่ยวกับเวลาของ IN1-1 ที่แปลงทดสอบที่ 1

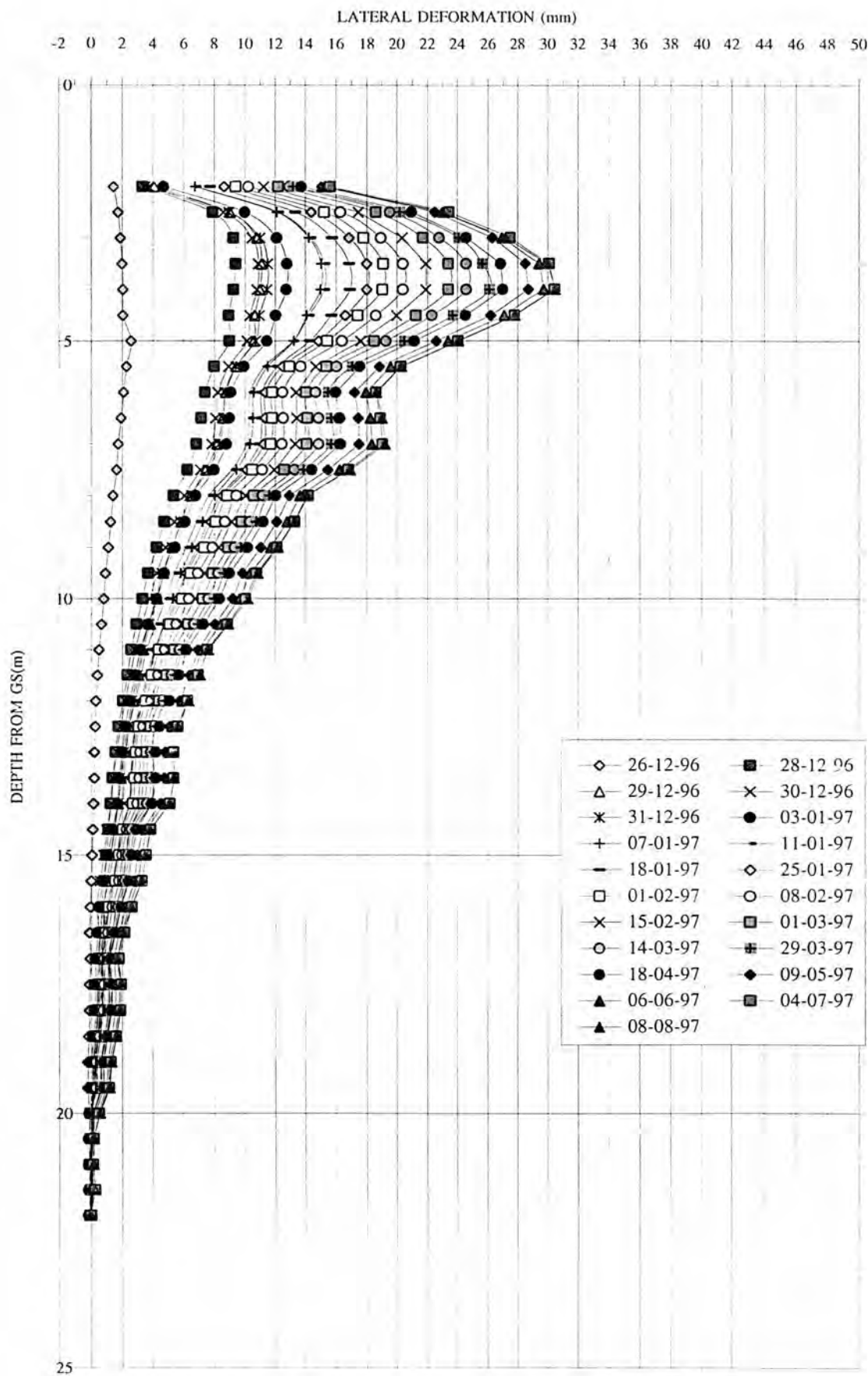


รูปที่ 4.10 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับความลึกของ IN1-1 ที่แปลงทดสอบที่ 1



Time (Days)

รูปที่ 4.11 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับเวลาของ IN1-2 ที่แปลงทดสอบที่ 1

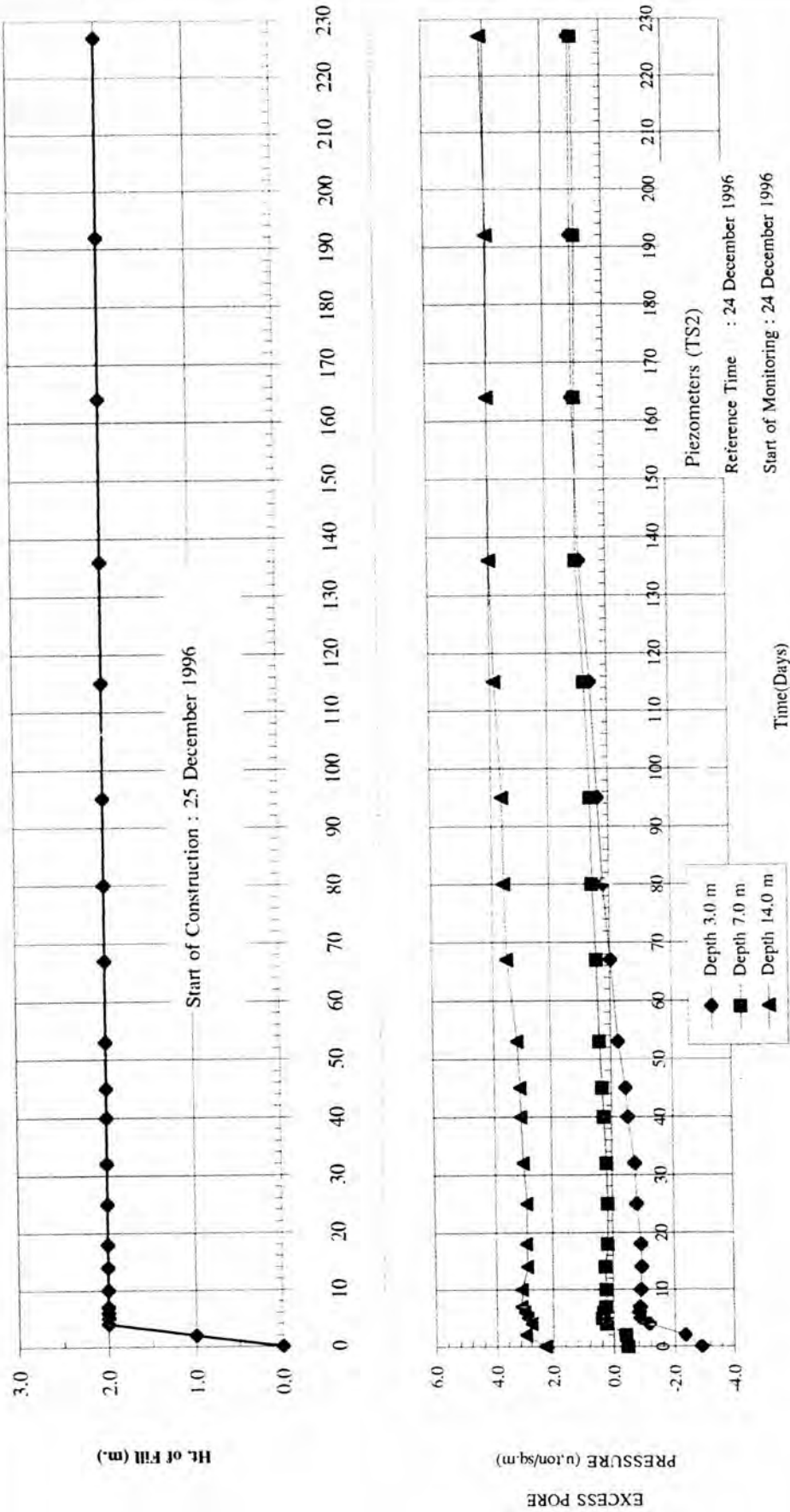


รูปที่ 4.12 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับความลึกของ IN1-2 ที่แปลงทดสอบที่ 1

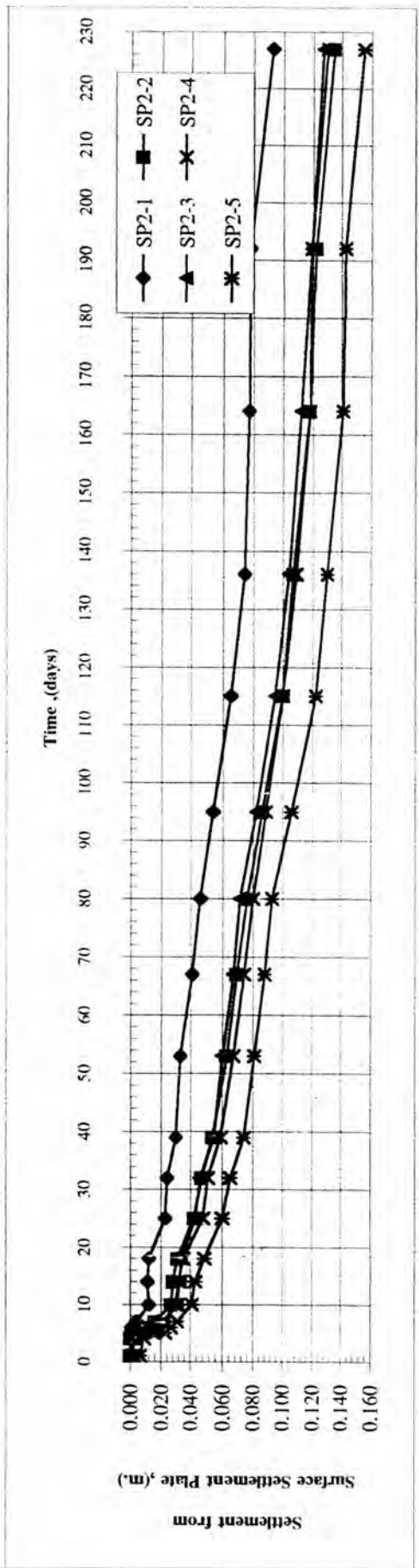
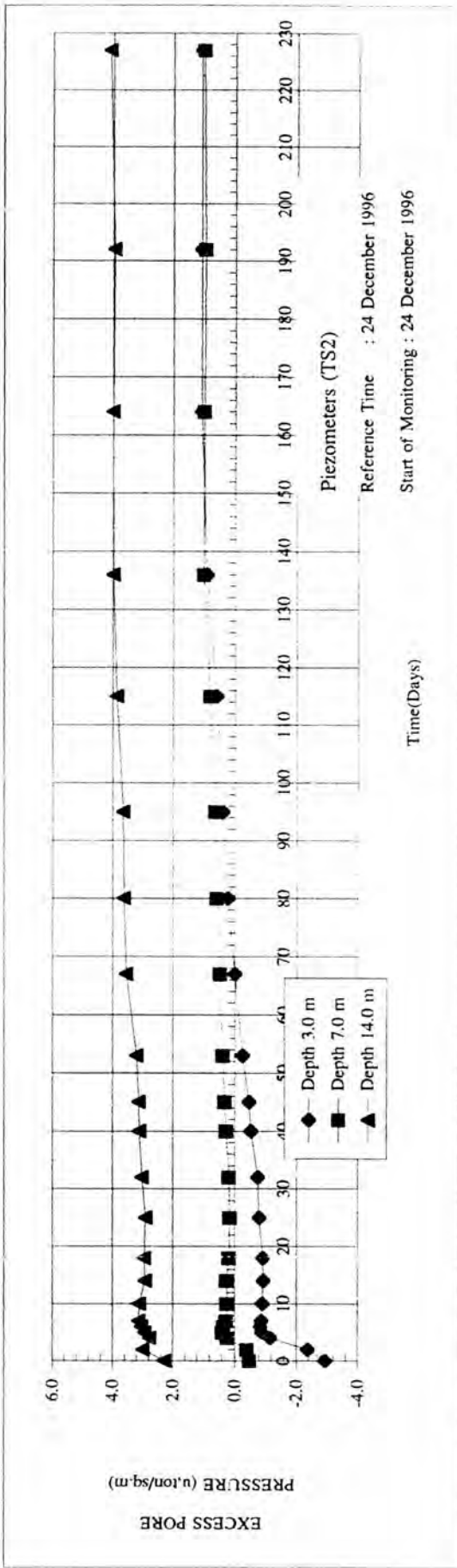
## (ข) พฤติกรรมของเสาเข็มและดินในแปลงทดสอบที่ 2 (TS-2)

ส่วนที่แปลงทดสอบที่ 2 ก่อนการถมทราย ดินมีค่า Excess Pore Water Pressure สูงกว่าแปลงทดสอบที่ 1 (รูปที่ 4.13) เนื่องจากที่แปลงนี้เข็มมีระยะห่างมากกว่า การก่อสร้างทำให้ดินถูกรบกวนมากขึ้น ด้วยเหตุนี้ทำให้ Excess Pore Water Pressure ในดินจึงลดลงไม่มากเหมือนแปลงที่ 1 โดยมีค่า Excess Pore Water Pressure เป็นลบที่ความลึก 3.0 และ 7.0 เมตรและค่าคิดลบน้อยลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นและ Excess Pore Water Pressure เป็นบวกที่ความลึก 14.0 เมตรเหมือนแปลงทดสอบที่ 1 จากผลการวัดพบว่าระหว่างถมทรายค่า Excess Pore Water Pressure มีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา จนกระทั่งคงที่และมีแนวโน้มลดลงแต่ลดลงปริมาณน้อย ซึ่งอาจเกิดจากการที่ดินกระจายแรงดันน้ำส่วนเกินช้าเนื่องจากดินถูกรบกวนจากขั้นตอนการติดตั้งเข็มมาก ทำให้ดินมีค่า Permeability ต่ำลง อีกทั้งมีระยะห่างระหว่างเข็มมากกว่า ทำให้ผลของปฏิกิริยาของปูนขาวกับดินน้อยลง แต่หลังจากนั้นประมาณวันที่ 20 ค่า Excess Pore Water Pressure มีแนวโน้มค่อยๆเพิ่มขึ้นอีก ซึ่งอาจเกิดจากผลของ Negative Skin Friction ด้วยก็ได้ แต่เนื่องจากแปลงทดสอบที่ 2 นี้ ไม่ได้มีการติดตั้ง Deep Settlement Point ที่เสาเข็มเช่นเดียวกับแปลงทดสอบที่ 1 และตัว Magnetic Extensometer ที่แปลงที่ 2 เกิดความเสียหาย จึงทำให้ไม่ทราบค่า Relative Movement ดังนั้นจึงไม่อาจบอกได้ชัดเจนว่าเกิดจาก Negative Skin Friction หรือผลของ Load Transferred แต่แนวโน้มน่าจะเกิดเช่นเดียวกับแปลงที่ 1 ซึ่งผลการวัดค่า Excess Pore Water Pressure นี้แสดงดังรูปที่ 4.13

จากการเขียนกราฟเพื่อเปรียบเทียบ Excess Pore Water Pressure ,การทรุดตัวของดิน ,การทรุดตัวของเสาเข็ม กับเวลา(รูปที่ 4.14)ที่แปลงทดสอบที่ 2 โดยค่าการทรุดตัวของดินนั้น ได้ลบผลกระทบเนื่องจากการปรับพื้นที่และการก่อสร้างแปลงทดสอบที่ 1 แล้ว ซึ่งวัดได้จาก Dummy area ค่าการทรุดตัวรวมเนื่องจากทรายถม ผลของ Negative Skin Friction และ Load Transferred ที่ 227 วัน(เวลาสิ้นสุดการวัด) มีค่าประมาณ 0.13 เมตร และจากผลของกราฟแสดง Excess Pore Water Pressure พบว่ามีแนวโน้มเริ่มคงที่ แต่การทรุดตัวยังคงมีต่อไปอีกเนื่องจากดินยังคงมี Excess Pore Water Pressure อยู่อีก ผลของ Settlement Plate แสดงว่ามีการทรุดตัวไม่เท่ากันในแปลงที่ 2 และการทรุดตัวแตกต่างกันมาก(รูปที่ 4.14) แสดงว่ามีการวิบัติของเข็มเป็นหย่อมๆ



รูปที่ 4.13 Excess Pore Water Pressure ของแปลงทดสอบที่ 2(TS-2)



รูปที่ 4.14 แสดงค่า Excess Pore Pressure กับ ค่าการทรุดตัวของดินที่แปลงทดสอบที่ 2(TS-2)

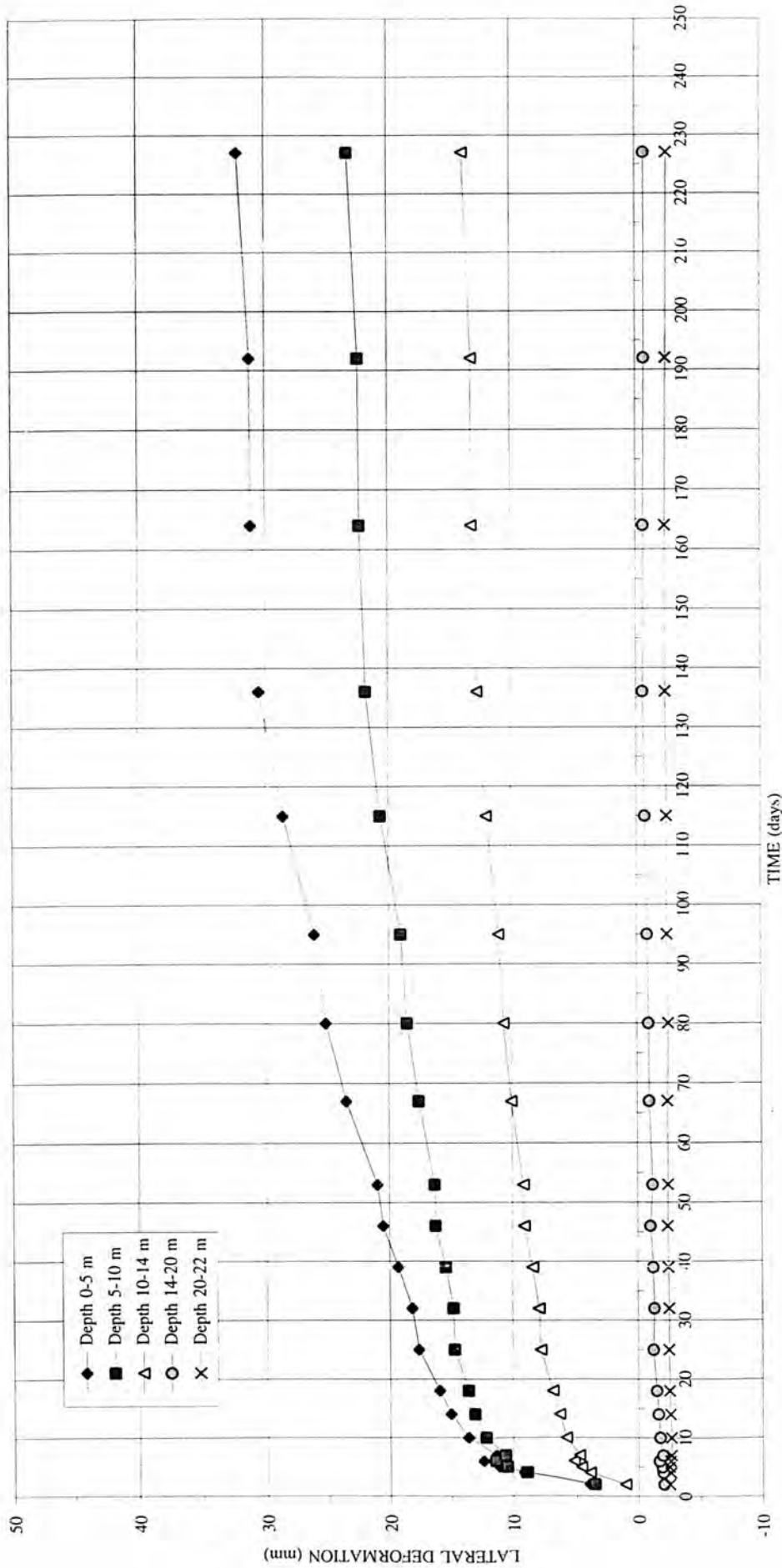
จากการเปรียบเทียบค่า Excess Pore Water Pressure กับการทรุดตัวของดินแปลงทดสอบที่ 2 โดยค่าการทรุดตัวนี้ได้ลบผลของการปรับพื้นที่และการสูบน้ำบาดาลแล้ว จากกราฟพบว่าผลการทรุดตัวของ Settlement Plate ตัว SP2-1, SP2-5 มีค่าที่แตกต่างกันมากอาจเนื่องมาจากตัว SP2-5 นี้วางบนดินอ่อนโดยตรง ซึ่งต่างกับตัวอื่นๆที่วางบน Lime mixing อีกทั้งแปลงนี้มีระยะห่างระหว่างเข็มมากกว่า ดังนั้นการทรุดตัวจึงมากกว่าตัวอื่น อีกทั้งแปลงนี้การทำ Lime mixing ทำได้ไม่ดีเนื่องจากสาเหตุบางประการ การถ่ายเทแรงจึงกระจายตัวได้ไม่สม่ำเสมอ ผลการวัดค่าการทรุดตัวในสนามเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกรวม Negative Skin Friction ที่เวลา 227 วัน มีค่าประมาณ 0.13 เมตร และการทรุดตัวก็ยังมีต่อไปเนื่องจากค่า Excess Pore Water Pressure ที่ยังคงเหลืออยู่อีกสาเหตุที่การทรุดตัวที่แตกต่างกันมากอาจเกิดจากที่พิภพความปลอดภัยของเสาเข็มปูนขาวต่ำมากด้วยประมาณ 1.11 ส่วนการทรุดตัวที่แปลงที่ 1 ผลจาก Surface Settlement Plate 4 ตัว มีค่าที่ใกล้เคียงกันเนื่องจากพิภพความปลอดภัยของเข็มดินเหนียวมีค่าถึง 1.73 (ดูรายการคำนวณในภาคผนวก ข)

กราฟแสดงค่าการทรุดตัวซึ่งวัดได้จากการสำรวจเริ่มต้นที่ Bench Mark ในแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ได้แสดงอยู่ในภาคผนวก ก.

ผลการวัดค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างของแปลงทดสอบที่ 2 (ดูรูปที่ 4.15 ถึง 4.16) พบว่าผล IN2-1 ซึ่งอยู่ด้านที่ก่อสร้างที่ทำการชั่วคราวของบริษัทรับเหมาก่อสร้างสนามบิน ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 227 วัน ช่วงความลึก 0 - 5 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.032 เมตร ช่วงความลึก 5 - 10 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.024 เมตร ช่วงความลึก 10 - 14 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.014 เมตร ช่วงความลึก 14 - 22 เมตร ดินไม่เคลื่อนตัวออกแต่เคลื่อนตัวเข้า การเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดประมาณ 0.037 เมตร อยู่ที่ระดับ 4.5 เมตร

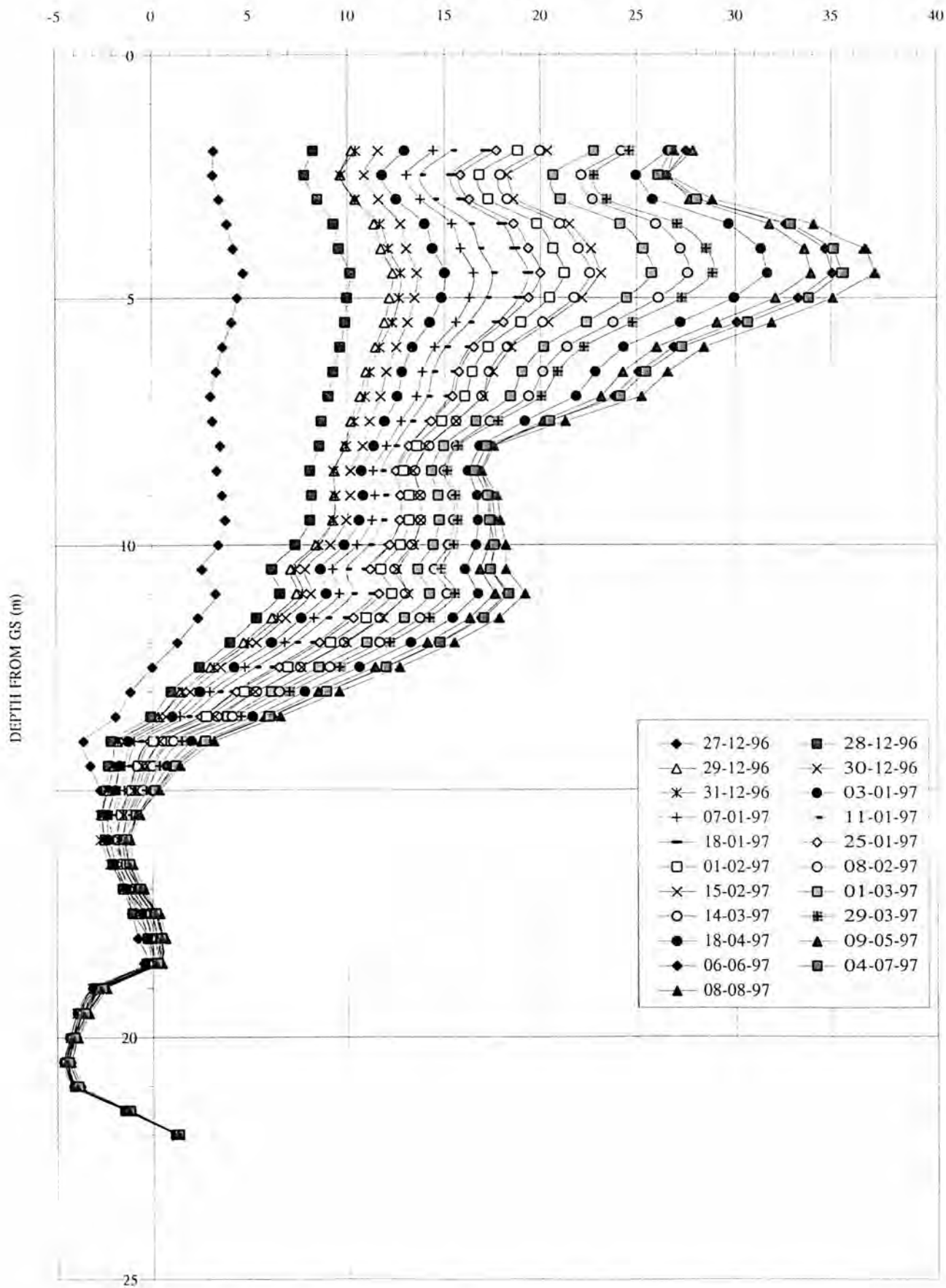
ผลจาก IN2-2 ที่อยู่ด้านคูน้ำ(รูปที่ 4.17 ถึง 4.18)ค่าการเคลื่อนตัวด้านข้างที่ 227 วัน ช่วงความลึก 0 - 5 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.034 เมตร ช่วงความลึก 5 - 10 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.028 เมตร ช่วงความลึก 10 - 14 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.021 เมตร ช่วงความลึก 14 - 20 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.010 เมตร ช่วงความลึก 20 - 22 เมตร มีค่าการเคลื่อนตัวเฉลี่ย 0.002 เมตร การเคลื่อนตัวทางข้างสูงสุดประมาณ 0.035 เมตร อยู่ที่ระดับ 4.5 เมตรเช่นกัน



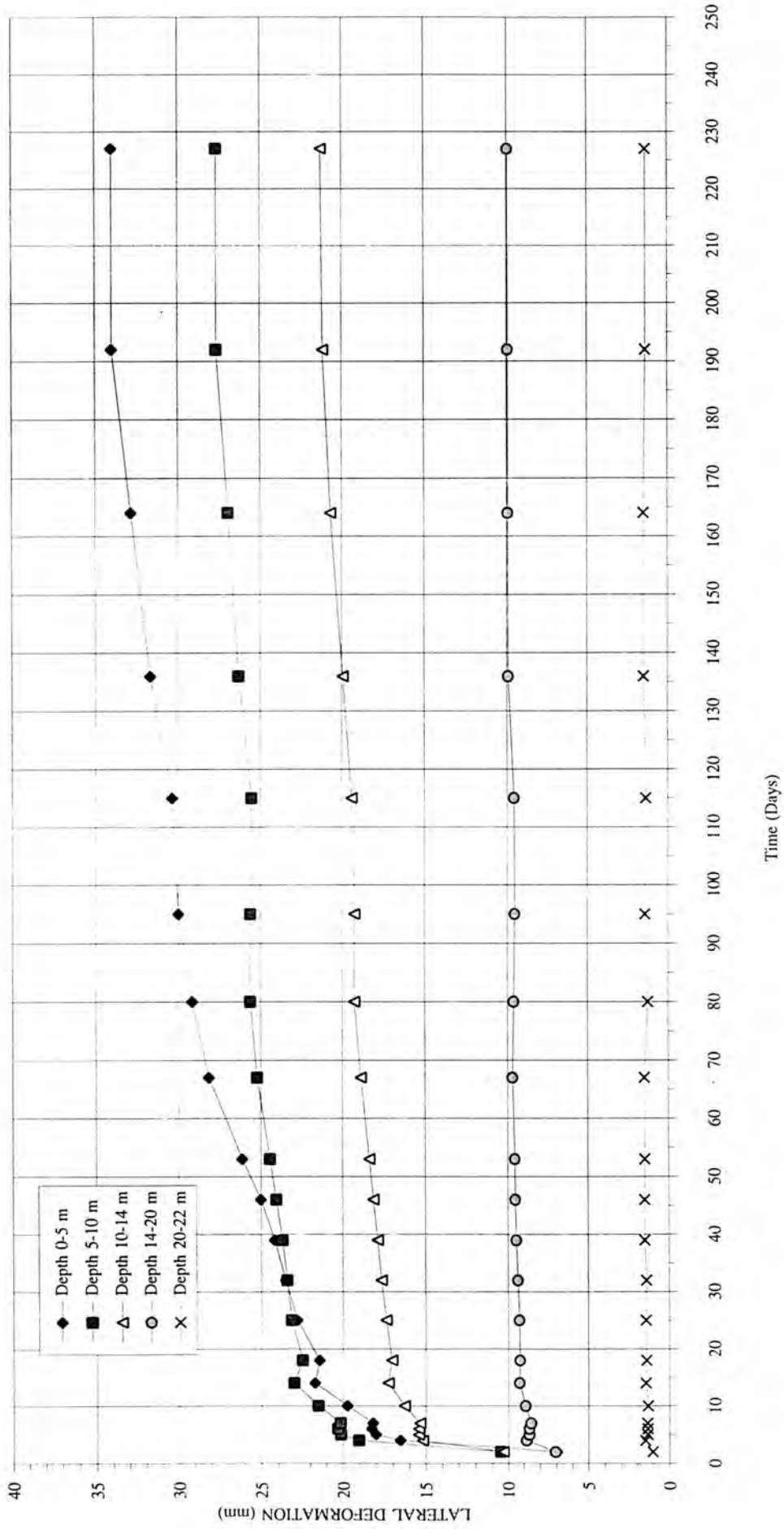


รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับเวลาของ IN2-1 ที่แปลงทดสอบที่ 2

LATERAL DEFORMATION (mm)

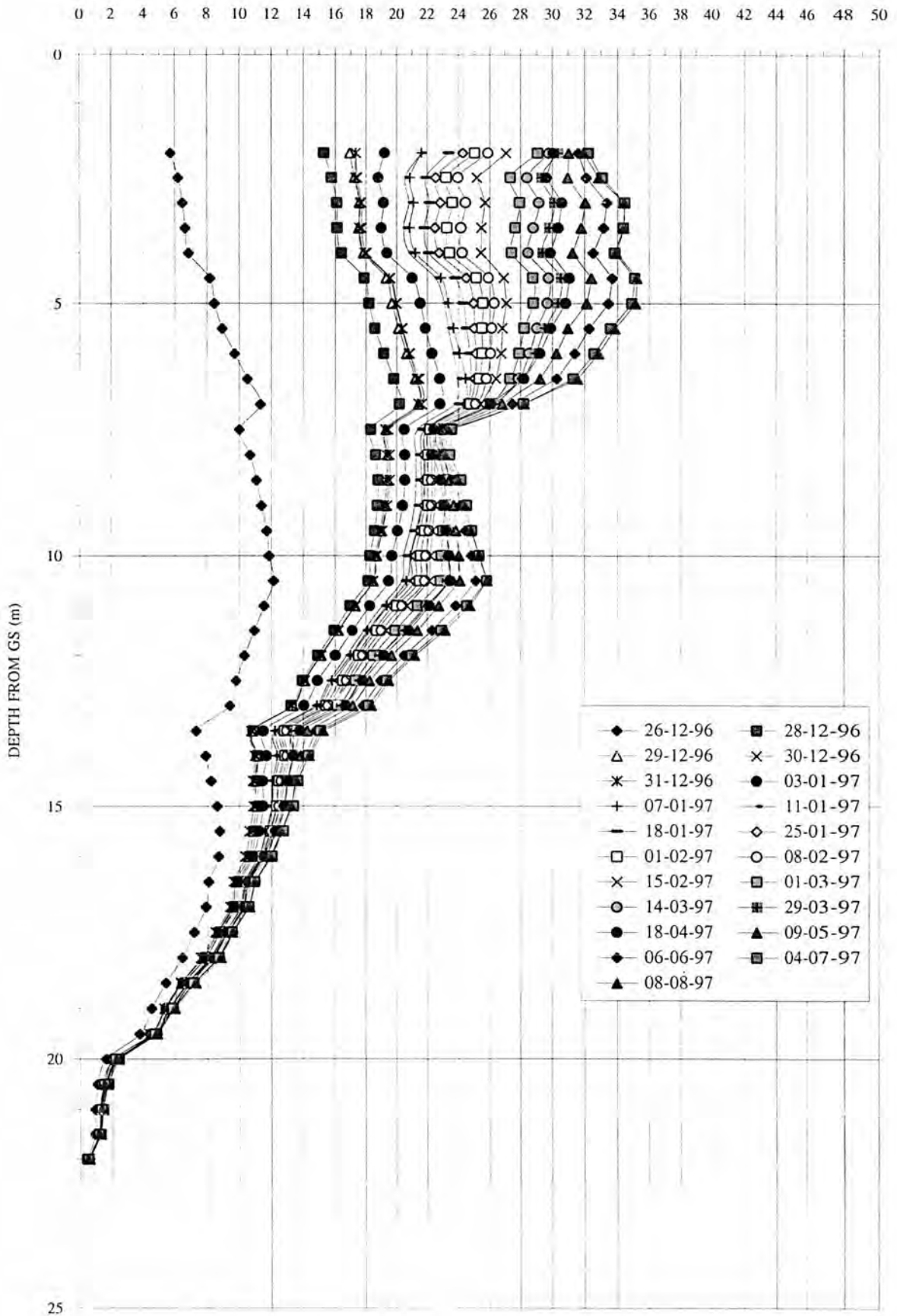


รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับความลึกของ IN2-1 ที่แปลงทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับเวลาของ IN2-2 ที่แปลงทดสอบที่ 2

LATERAL DEFORMATION (mm)



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงค่าการเคลื่อนตัวทางข้างเทียบกับความลึกของ IN2-2 ที่แปลงทดสอบที่ 2

จากข้อมูลพบว่าการเคลื่อนตัวทางด้านข้างที่แปลงทดสอบที่ 2 ที่ 227 วัน ช่วงความลึก 0 - 5 เมตร ซึ่งเป็นชั้นดินอ่อนมาก มีค่าการเคลื่อนตัวสูงสุดประมาณ 0.033 เมตร

สิ่งที่น่าสังเกตจากพฤติกรรมของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2 ก็คือ การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของแปลงทดสอบที่ 1 แทบจะหยุดนิ่งแล้วแต่การเคลื่อนตัวทางด้านข้างของแปลงทดสอบที่ 2 มีมากกว่าและยังไม่หยุด สาเหตุในเรื่องนี้อาจเกิดจากปัญหาทางด้านเสถียรภาพของคันดิน และแปลงทดสอบที่ 2 มีระยะห่างเสาเข็มมากกว่า การติดตั้งเข็มมีการรบกวนมากกว่า และดินอาจเกิด Local Failure เนื่องจากการรับน้ำหนักบรรทุกในแนวตั้ง(F.S.=1.11)

จากการเปรียบเทียบพฤติกรรมของสองแปลงนี้จะเห็นได้ว่าผลของ Negative Skin Friction ระยะห่างระหว่างเข็มที่เลือก ผลกระทบจากการก่อสร้างที่ทำให้ดินอ่อนถูกรบกวนตลอดจนการทำ Lime mixing Layer ไม่ดีเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการศึกษาพฤติกรรมของเสาเข็มปูนขาวในครั้งนี้

ภาคผนวก ก แสดงผลข้อมูลดิบจากการวัดการทรุดตัวจาก Bench Mark และข้อมูลการวัด Pore Water Pressure, Extensometer และ Inclinator ของแปลงทดสอบที่ 1 และ 2

#### 4.2 กลไกของพฤติกรรมของคันดินบนเสาเข็มปูนขาวแบบแทนที่

พฤติกรรมของการทรุดตัว การเกิดค่าความดันน้ำและการเคลื่อนตัวทางด้านข้างของแปลงที่ 1 (ซึ่งไม่มีปัญหาทางด้าน Local Failure ของดินอ่อน) แสดงให้เห็นกลไกของเสาเข็มปูนขาวและดินอ่อนที่อยู่ระหว่างเสาเข็มดังนี้

##### 4.2.1 ระหว่างการก่อสร้างเสาเข็ม

การทำเสาเข็มและปฏิกิริยาเคมีระหว่างปูนขาวกับน้ำในดิน(ซึ่งทำให้เข็มขยายตัว) ทำให้เกิดความดันน้ำที่ไม่สมดุลได้ทั้งในสภาพที่สูงขึ้นหรือต่ำลงก็ได้ การคูดน้ำเนื่องจากปฏิกิริยาเคมีทำให้ Void Ratio ของดินลดลงและเกิด Negative Excess Pore Pressure ขณะที่เสาเข็มขยายตัวออกและผลการรบกวนดินจากการก่อสร้างทำให้ Positive Excess Pore Water Pressure และทำให้ Compression Ratio, Preconsolidation Pressure, Shear Strength ของดินต่ำลง ด้วยสาเหตุดังกล่าว ค่า Net Excess Pore Water Pressure จึงอาจเกิดขึ้นเป็นบวกหรือลบก็ได้ การเคลื่อนตัวของเสาเข็ม

ในช่วงนี้อาจเกิดขึ้นน้อยมากเนื่องจากมีชั้น Lime mixing อยู่บนหัวเสาเข็มและเป็นชั้นดินที่บังคับการเคลื่อนตัวอยู่

#### 4.2.2 ระหว่างการถมทราย

ระหว่างการถมทรายในอัตราที่รวดเร็วทั้งเสาเข็มกับดินอ่อนจะต้องรับน้ำหนัก ข้อมูล Relative Movement ของเสาเข็มกับดินแสดงว่า เสาเข็มเป็นตัวรับน้ำหนักและ Positive Skin Friction เกิดขึ้นระหว่างถมทราย หลังจากนั้นดินอ่อนเกิดการทรุดตัวเนื่องจาก Undrained Creep และ Consolidation ทำให้การทรุดตัวของเสาเข็มและดินได้ปลายเสาเข็มมีมากขึ้นแต่ค่า Relative Movement (ค่าแสดงว่าเสาเข็มทรุดตัวมากกว่าดิน) กลับลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากการทรุดตัวของดินที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เกิด Load Transferred ไปยังเสาเข็ม(Load ทำให้เสาเข็มเคลื่อนตัวมากขึ้น) และดินก็จะรับน้ำหนักน้อยลง แต่ปริมาณการทรุดตัวของดินก็ยังสูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับขณะที่ยถมทรายเสร็จ ด้วยสาเหตุดังกล่าวทำให้ค่า Relative Movement ระหว่างดินกับเสาเข็มลดลงหลังจากถมทรายเสร็จใหม่ๆ

เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นดินจะทรุดตัวมากขึ้นทุกทีและ Load ถูก Transferred ไปยังเสาเข็มมากขึ้น ทำให้เสาเข็มทรุดตัวมากขึ้นแต่ดินทรุดตัวมากกว่า (ซึ่งแสดงโดยผลของ Relative Movement ว่าดินเคลื่อนตัวมากกว่าเข็ม) พฤติกรรมอันนี้แสดงว่า Negative Skin Friction Load ได้เกิดขึ้นเนื่องจากการทรุดตัวของเสาเข็มอยู่ที่ชั้นดินแข็ง

ด้วยเหตุของการเกิด Negative Skin Friction และ Load Transferred เป็นไปอย่างต่อเนื่อง ทำให้การทรุดตัวของคันดินเพิ่มขึ้นและในที่สุดดินกับเสาเข็มเคลื่อนตัวไปพร้อมกันเนื่องจาก Lime mixing layer แข็งแรงพอ(หลังจากเวลา 50 วัน ดูรูปที่ 4.3) สภาพดังกล่าวจะเห็นว่ามีค่า Relative Movement ประมาณ 0.02 เมตร ซึ่งแสดงว่า Negative Skin Friction ได้เกิดขึ้นเต็มที่ แต่ Load Transferred ระหว่างดินกับเสาเข็มก็ยังเป็นไปอย่างต่อเนื่อง(เพราะค่า Excess Pore Water Pressure ยังไม่คงที่ในบางตำแหน่ง) การ Transferred Load นี้จะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อค่าความดันน้ำที่เพิ่มขึ้นถูกขจัดออกไปหมดแล้ว

จากพฤติกรรมดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการคาดคะเนการทรุดตัวครั้งสุดท้ายจะทำได้ยากมากด้วยสาเหตุดังนี้

1. ค่าของ Load Transferred Factor มีค่าเท่าใดตอนที่การทรุดตัวหมดลง เพราะค่าที่ใช้ในการคำนวณต้องพิจารณาถึงพฤติกรรมที่ Load Transferred เกิดขึ้น

2. ค่า Negative Skin Friction จำเป็นต้องใช้ค่าความดันน้ำที่อยู่ในสภาพสมดุล(นั่นคืออยู่ในสภาพที่ไม่มีหน่วยแรงมากระทำ) และ Neutral Point ควรอยู่ที่ใดเพราะตำแหน่งอาจเปลี่ยนแปลงกับเวลาได้เนื่องจากผลของ Load Transferred ด้วยเหตุนี้การคำนวณการทรุดตัวจึงทำได้ยากลำบาก(โดยเฉพาะอย่างยิ่งอัตราทรุดตัว) ถ้าไม่มีการดูผลของการวัดค่า Load Transferred

ในหัวข้อที่ 4.3 และ 4.4 เป็นวิธีการที่ผู้วิจัยจะใช้ในการคาดคะเนการทรุดตัวในช่วงออกแบบ โดยคิดขึ้นมาจากการอาศัยที่มีข้อมูลเก่า(คันดินต้งบนเสาเข็ม) การคาดคะเนจะใช้วิธีการของ Broms(1987) โดยคิดผลกระทบของ Negative Skin Friction ลงไปด้วย และทฤษฎี Modified Elasticity ของ Poulos(1968) ส่วนการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากข้อมูลการทรุดตัวในสนามได้ใช้วิธีของ Asaoka(1978) และวิธี Hyperbolic ตลอดจนใช้วิธีคำนวณจากค่า Excess Pore Water Pressure ที่เหลืออยู่ ทั้งสามวิธีนี้พิจารณาว่าเป็นการทรุดตัวครั้งสุดท้ายที่เกิดขึ้นจริงในสนาม

การคาดคะเนการทรุดตัวจะทำให้ค้ำค้ำเมื่อดินไม่เกิด Local Yield , Structure ของเสาเข็มรับน้ำหนักได้ ,ไม่มีปัญหาทางด้าน Stability ของเสาเข็มและการเกิด Slope Failure

#### 4.3 การคาดคะเนการทรุดตัวทั้งหมดในสนาม

สิ่งที่ได้กล่าวมาแล้ววิธีการคาดคะเนการทรุดตัวครั้งสุดท้ายได้ใช้วิธีของ Asaoka(1978) และวิธี Hyperbolic การทำวิธีการดังกล่าวเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการของ Broms(1987) และวิธีของ Poulos(1968) ว่ามีค่าใกล้เคียงกันหรือไม่และสามารถนำมาออกแบบได้หรือไม่

##### 4.3.1 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากกราฟโดยวิธี Hyperbolic

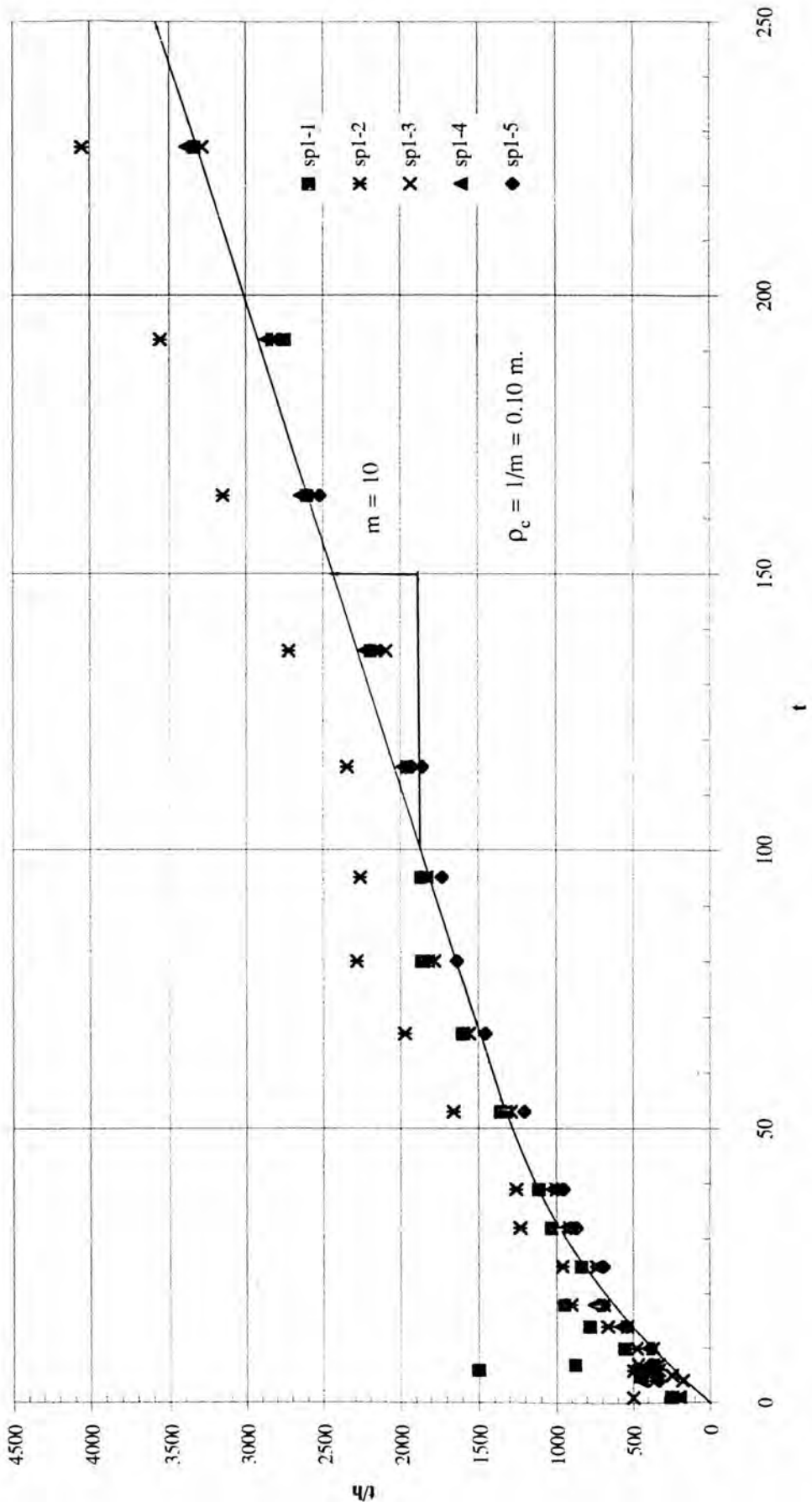
จากการนำข้อมูลการทรุดตัวในสนามที่วัดจาก Surface Settlement Plate ที่คันดินลบบกับค่าการทรุดตัวที่วัดใน Dummy area มาใช้ เพื่อที่จะหาค่าการทรุดตัวสุดท้าย เนื่องจากน้ำหนักบรรทุก(ถมทราย 2.0 เมตร)และ Negative Skin Friction โดยวิธี Hyperbolic ผลปรากฏว่า ที่แปลงทดสอบที่ 1 ได้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายประมาณ 0.10 เมตร ส่วนที่แปลงทดสอบที่ 2 ได้ค่าการทรุด

ตัวสุดท้ายประมาณ 0.20 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.21 เมื่อดูข้อมูลการทรุดตัวที่แปลงทดสอบที่ 1 พบว่าจะมีการทรุดตัวที่เหลืออีกประมาณ 0.04 เมตร ซึ่งตรงกับแนวโน้มความคืบหน้าจะเริ่มคงที่ในความลึก -3.0,-7.0 เมตร แต่ที่ความลึก -14.0 เมตรยังคงขยับขึ้นอยู่

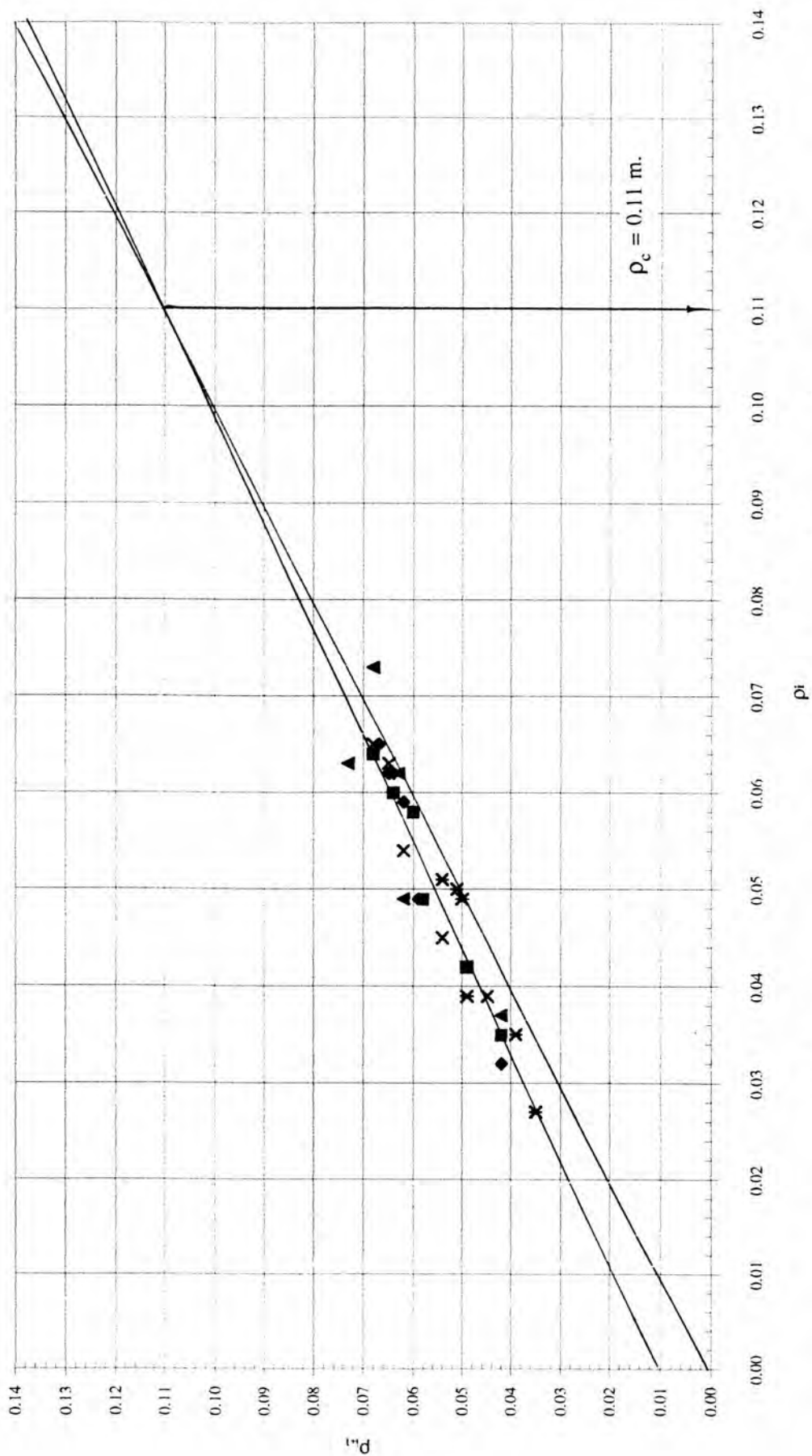
#### 4.3.2 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากกราฟโดยวิธี Asaoka

จากการนำข้อมูลในสนามที่วัดได้ลบการทรุดตัวของ Dummy area แล้ว ทำให้ได้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกและ Negative Skin Friction จากกราฟโดยวิธี Asaoka ที่แปลงทดสอบที่ 1 ได้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายประมาณ 0.11 เมตร ส่วนที่แปลงทดสอบที่ 2 ได้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายประมาณ 0.18 เมตร แสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.22

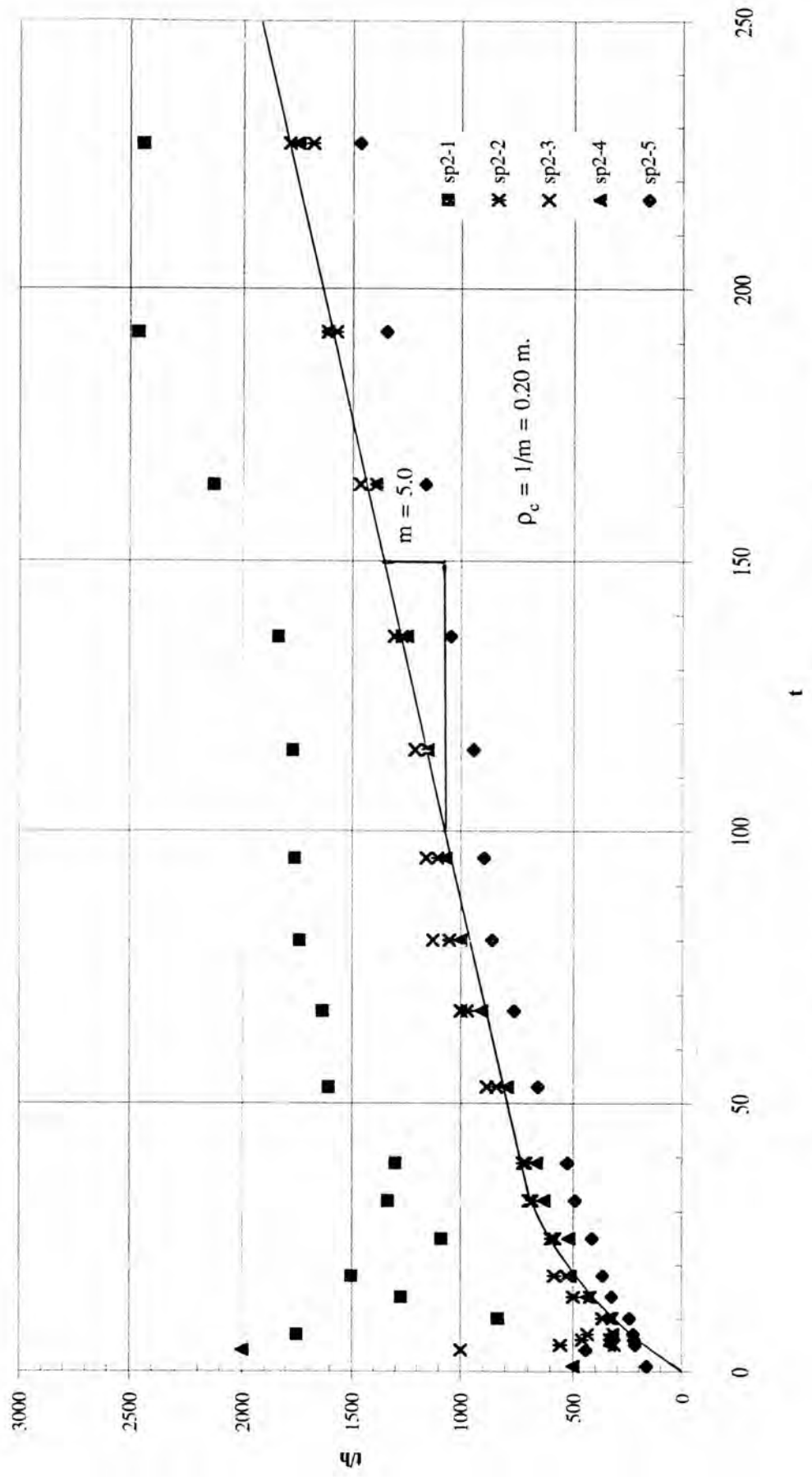




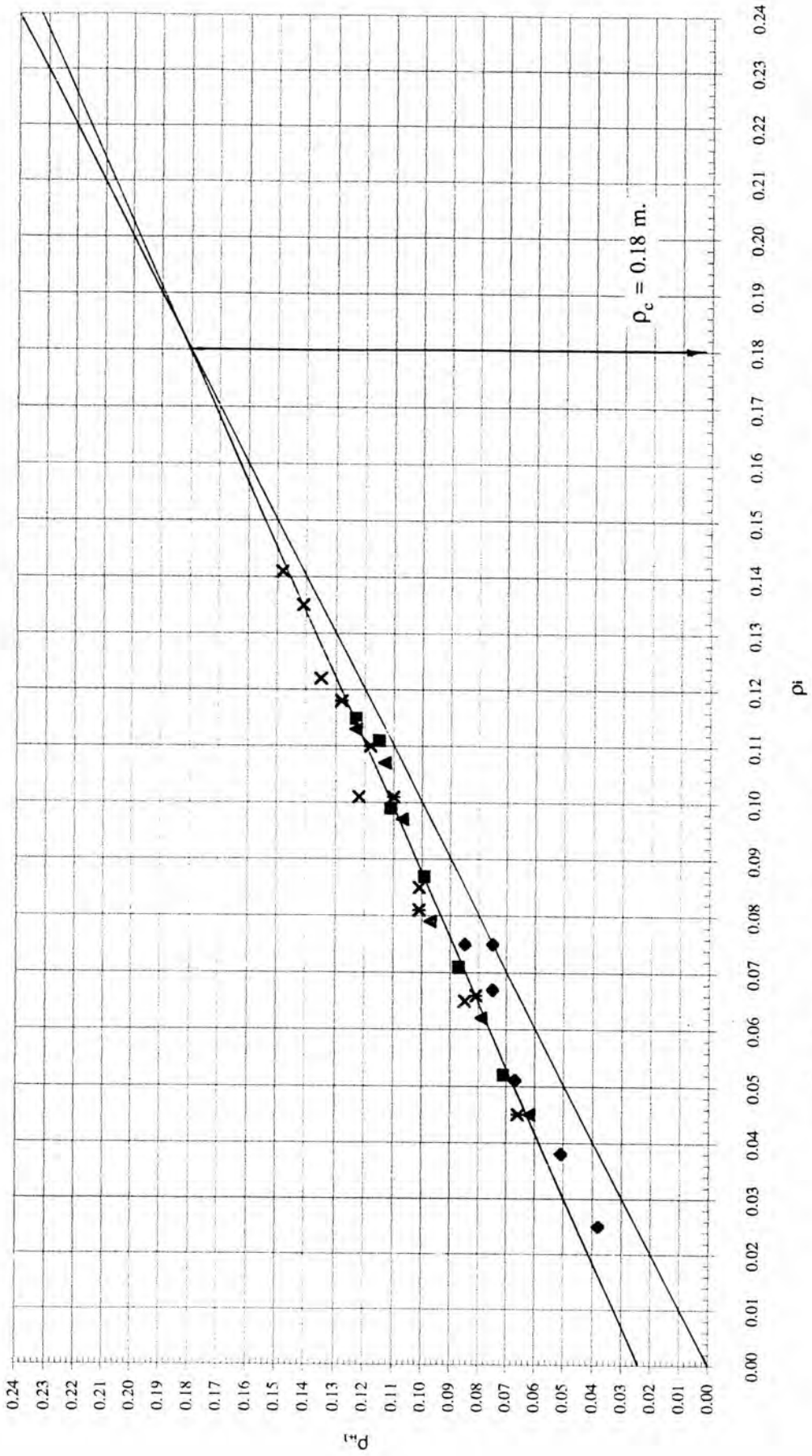
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงการคายประจุการทรุดตัวโดยวิธี Hyperbolic ที่แปลงทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.20 แสดงการหาค่าการทรุดตัวสุดท้ายโดยวิธี Asaoka ที่แปลงทดสอบที่ 1



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงการคาดคะเนการทรุดตัวโดยวิธี Hyperbolic ที่แปลงทดสอบที่ 2



รูปที่ 4.22 แสดงการทำค่าการทดสอบด้วยวิธี Asaoka ที่แปลงทดสอบที่ 2

#### 4.3.3 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากข้อมูลในสนาม

จากผลการวัดค่าการทรุดตัวและค่า Excess Pore Water Pressure ในสนามที่แปลงทดสอบ ทั้งสองแปลงนั้น เราสามารถที่จะทำการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากการถมทราย 2.0 เมตร ได้ โดยสามารถแยกออกได้เป็น 2 ส่วน นั่นคือ

1. ส่วนของผลการวัดค่าการทรุดตัวที่วัดได้จริงในสนามที่เกิดขึ้นแล้ว
2. ส่วนของผลการคำนวณการทรุดตัวที่ได้จาก Excess Pore Water Pressure ที่เหลืออยู่

ซึ่งเมื่อนำทั้งสองส่วนรวมกันก็จะได้ค่าการทรุดตัวสุดท้ายในสนาม

ที่แปลงทดสอบที่ 1 จากผลการวัดค่าการทรุดตัวในสนามที่เกิดขึ้นแล้ว ณ.เวลา 227 วัน มีค่าการทรุดตัวประมาณ 0.067 เมตร

และผลการวัดค่า Excess Pore Water Pressure ที่เหลืออยู่ที่ 227 วัน สามารถนำมาคาดคะเนการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นจากของเดิมที่วัดได้ 0.067 เมตร โดยการคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Excess Pore Water Pressure คิดที่ระดับ 0-16 เมตร ส่วนที่ 16 เมตร ลงไปถือว่าไม่มีทรุดตัว เนื่องจากเป็นชั้นดินแข็งมาก

การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Excess Pore Water Pressure ที่ระดับ 0-16 เมตร นั้นจะใช้สูตรคำนวณการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มของ Broms(1987) ในการคำนวณ แต่จะแยกคำนวณเป็นชั้นๆตามจุดที่ติดตั้ง Piezometerไว้โดยใช้ค่า Excess Pore Water Pressure แทนหน่วยแรงที่กระทำ ( $q$ ) (ดูรายละเอียดการคำนวณในภาคผนวก ข.)

จากการคำนวณซึ่งแสดงในภาคผนวก ข. ได้ค่าการทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นเนื่องจาก Excess Pore Water Pressure ช่วง 0-16 เมตร ที่ 227 วัน มีค่าการทรุดตัวประมาณ 0.005 เมตร

ดังนั้นการทรุดตัวสุดท้ายที่แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าประมาณ  $0.067+0.005 = 0.072$  เมตร

ที่แปลงทดสอบที่ 2 สามารถวัดค่าการทรุดตัวในสนามโดยลบการทรุดตัวที่ Dummy area แล้ว ที่เวลา 227 วัน มีค่าการทรุดตัวประมาณ 0.13 เมตร

การคำนวณการทรุดตัวเนื่องจาก Excess Pore Water Pressure ที่ระดับ 0-16 เมตร นั้น สามารถคำนวณได้เหมือนกับวิธีที่ใช้ในแปลงทดสอบที่ 1 การทรุดตัวที่เพิ่มขึ้นที่แปลงทดสอบที่ 2 มีค่าประมาณ 0.016 เมตร

ดังนั้นการทรุดตัวสุดท้ายที่แปลงทดสอบที่ 2 มีค่าประมาณ  $0.130 + 0.016 = 0.146$  เมตร

ฉะนั้นผลการคาดคะเนค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากข้อมูลที่วัดได้ในสนามนั้น แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าการทรุดตัวสุดท้ายประมาณ 0.072 เมตร ส่วนแปลงทดสอบที่ 2 มีค่าการทรุดตัวสุดท้ายประมาณ 0.146 เมตร

#### 4.4 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากการคำนวณ

การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายโดยการคำนวณนั้น จะคำนวณการทรุดตัวอันเนื่องมาจาก 2 ส่วนคือ

- การทรุดตัวอันเนื่องมาจากค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีอยู่ก่อนรับน้ำหนักบรรทุกอันเนื่องมาจากการติดตั้งเข็ม(เพราะทั้งวิธีของ Broms(1987)และ Poulos(1968)ไม่ได้พิจารณาส่วนนี้)
- การทรุดตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกและ Negative Skin Friction

ซึ่งเมื่อรวมผลการทรุดตัวจากข้างต้นแล้วก็จะได้ค่าการทรุดตัวสุดท้าย

การทรุดตัวอันเนื่องมาจาก Excess Pore Water Pressure ที่มีอยู่เนื่องมาจากการติดตั้งเข็ม ซึ่งถึงแม้ว่าดินจะไม่มีน้ำหนักบรรทุกจากทรายนม ดินก็จะมีทรุดตัวเนื่องมาจากค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีอยู่

ที่แปลงทดสอบที่ 1 ก่อนการใส่น้ำหนักบรรทุก ดินก็จะมีทรุดตัวเนื่องมาจากค่า Excess Water Pore Pressure ที่ข้างที่ระดับ 14.0 เมตร (ซึ่งมีค่าประมาณ 0.902 ตันต่อตารางเมตร)ทำได้

โดยใช้สูตรคำนวณค่าการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มของ Broms เช่นเดียวกัน ค่าที่ได้ประมาณ 0.002 เมตร

ฉะนั้นการทรุดตัวอันเนื่องมาจาก Excess Pore Water Pressure ที่เป็นบวกที่มีอยู่เนื่องมาจากการติดตั้งเข็ม ที่แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าเท่ากับ 0.002 เมตร

ที่แปลงทดสอบที่ 2 นี้ มีค่า Excess Pore Pressure ที่เป็นบวกค้างอยู่ที่ 14.0 เมตร เท่ากับ 2.276 ตันต่อตารางเมตร ก็จะได้ค่าการทรุดตัวของดินช่วง 10-16 เมตร ได้โดยใช้สูตรคำนวณค่าการทรุดตัวของกลุ่มเสาเข็มของ Broms เช่นเดียวกัน จะได้ค่าประมาณ 0.006 เมตร

ฉะนั้นการทรุดตัวอันเนื่องมาจาก Excess Pore Water Pressure ที่เป็นบวกที่มีอยู่ เนื่องมาจากการติดตั้งเข็ม ที่แปลงทดสอบที่ 2 มีค่าเท่ากับ 0.006 เมตร

เนื่องจากที่ -3.0 และ -7.0 เมตร ค่า Negative Excess Pore Water Pressure ที่เกิดขึ้น จะส่งผลทำให้เกิดการลอยตัวขึ้น ค่านี้มีค่าน้อยมากจึงไม่คิดในการคำนวณ

อนึ่งในการทำเข็มลักษณะนี้มีข้อได้เปรียบคือ Net Excess Pore Water Pressure จะมีค่าน้อยกว่าปกติ เพราะการก่อสร้างอาจทำให้เกิดค่า Excess Pore Water Pressure เป็นค่าลบ

ในการคาดคะเนการทรุดตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักบรรทุกและ Negative Skin Friction โดยการคำนวณเราจะใช้ทฤษฎีการคำนวณ 2 วิธี คือ

- วิธี Modified Theory of Elasticity ของ Poulos & Davis(1968)
- วิธี Lime Column Method ของ Broms(1987)

รายการคำนวณแสดงอยู่ในภาคผนวก ข.

#### 4.4.1 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายโดยวิธีของ Poulos & Davis

การคำนวณโดยวิธีนี้ เราไม่สามารถหาค่าของ Modulus ของตัวเข็มปูนขาว(Ep)ได้ เนื่องจากตัวปูนขาวไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างกัน (Cohesionless) ดังนั้น ในที่นี้จึงนำเอาความสัมพันธ์ระหว่างค่า CBR กับค่า Modulus ซึ่งได้จาก “Soil Investigation Method” by Japanese Geotechnical Society ,1995 ,P 367 โดยจะใช้ค่าจากความสัมพันธ์

$$E = (50-100)CBR \quad :(\text{kg/cm}^2)$$

ซึ่งจากผลการทดสอบ CBR ของหัวเข็มปูนขาวในสนามได้ค่า CBR = 28 % ดังนั้นเมื่อใช้ความสัมพันธ์ข้างต้นก็จะได้ค่า Modulus เท่ากับ 21,000 ตันต่อตารางเมตร(รายการคำนวณแสดงในภาคผนวก ข.)

จากวิทยานิพนธ์ของไพโรจน์(2536) ได้ทำการทดสอบคันทางเมื่อใช้เสาเข็มรับน้ำหนัก ซึ่งมีลักษณะคล้ายการวิจัยในครั้งนี้ พบว่าการกระจายน้ำหนัก(Load Transferred)ของเสาเข็มกับดินอยู่ในอัตราส่วน 75:25 ในขณะที่เริ่มถมคันทางและมีค่าคงที่ตลอด ดังนั้นในการคำนวณการทรุดตัวของเสาเข็มเราจะใช้น้ำหนักบรรทุกเพียง 75 % จากน้ำหนักบรรทุกของทรายถม

ในการคำนวณการทรุดตัวจะมีการคำนวณแยกเป็น 2 ส่วนคือ

- การทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักทรายถม
- การทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักทรายถมและ Negative Skin Friction

เนื่องจากไม่มีข้อมูลเกี่ยวกับการถ่ายเทของ Load จึงต้องอาศัยข้อมูลจากไพโรจน์ (2536) สำหรับเสาเข็ม Concrete โดยพิจารณาว่าเสาเข็มรับ 75% ของ Load ทั้งหมด

ในแปลงทดสอบที่ 1 มีเสาเข็มทั้งหมด 144 ต้น ผลการคำนวณค่าการทรุดตัวของเสาเข็ม 1 ต้นประมาณ 0.0036 เมตร จากนั้นจะมีการจับกลุ่มของเข็มทีละ 16 ต้น ก็จะได้อุปกรณ์ของเสาเข็มเป็น 9 กลุ่ม(ดูภาคผนวก ข.)นำมาคำนวณค่าการทรุดตัวในครั้งแรกของแต่ละกลุ่มซึ่งได้ค่าประมาณ 0.016 เมตร จากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนกลุ่มของเสาเข็มแต่ละกลุ่มเป็น Equivalent Pier ก็จะได้



Equivalent Pier 9 ต้น จากนั้นก็จะทำการคำนวณค่าการทรุดตัวอีกครั้ง จะได้ค่าการทรุดตัวรวม เนื่องจากการถมทราย 2.0 เมตรเท่ากับ 0.046 เมตร

ส่วนการคำนวณเนื่องจากผล Negative Skin Friction รวมเข้ากับผลของการถมทราย โดยกำหนดให้ Neutral Point อยู่ที่ -13.0 เมตร ซึ่งได้ค่า Negative Skin Friction ต่อต้นประมาณ 20.5 ตัน โดยนำไปรวมกับน้ำหนักทรายถมเป็นแรงที่กระทำต่อเสาเข็ม 1 ต้น ในแปลงทดสอบที่ 1 นั้น ผลการคำนวณค่าการทรุดตัวของเข็ม 1 ต้น ประมาณ 0.023 เมตร จากนั้นจะมีการจับกลุ่มของเข็มทีละ 16 ต้น ก็จะได้กลุ่มของเสาเข็ม 9 กลุ่ม มาคำนวณค่าการทรุดตัวในครั้งแรกของแต่ละกลุ่ม ซึ่งได้ค่าประมาณ 0.103 เมตร จากนั้นก็จะทำการเปลี่ยนกลุ่มของเสาเข็มแต่ละกลุ่ม เป็น Equivalent Pier ดังนั้นก็ได้ Equivalent Pier 9 ต้น จากนั้นก็จะทำการคำนวณค่าการทรุดตัวอีกครั้งจะได้ค่าการทรุดตัวรวมเท่ากับ 0.291 เมตร เมื่อคิดผลของ Negative Skin Friction และพิจารณาการทรุดตัวเป็น Rigid Foundation การทำเสาเข็มกลุ่มสามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ ที่มุมแปลง , ที่ขอบแปลงและที่กลางแปลง โดยที่กลางแปลงจะไม่มีผลของ Negative Skin Friction จาก Chart ของ Poulos(1974) แต่ในความเป็นจริงการทรุดตัวไม่ได้ทรุดไปตามนี้ (เนื่องจาก Poulos(1974) คิดเป็น Flexible Foundation) เพราะไม่เช่นนั้นแล้วกลางแปลงจะเกิดการโค้งตามความเป็นจริงแล้วในสนามการทรุดตัวเกือบเท่ากัน ฉะนั้นแรงที่กระทำก็จะเกิดการกระจายแรง (Distributed Load) ดังนั้นจึงได้นำค่าเฉลี่ยมาใช้และให้ค่าการทรุดตัวรวมเท่ากับ 0.10 เมตร

จากการคำนวณจะเห็นได้ว่าการทรุดตัวจากการถมทราย 2.0 เมตร และการทรุดตัวเนื่องจาก Negative Skin Friction เกือบเท่ากันในแปลงที่ 1

ในแปลงทดสอบที่ 2 มีเข็มทั้งหมด 110 ต้น ซึ่งในที่นี้จะนำมาคำนวณเพียง 100 ต้น เพื่อที่จะสามารถนำมาใช้ใน chart ที่มี ผลคำนวณการทรุดตัวของเข็ม 1 ต้น ประมาณ 0.01 เมตร จากนั้นทำการจับกลุ่มของเข็มทีละ 25 ต้น ก็จะได้กลุ่มของเสาเข็ม 4 กลุ่ม แล้วคำนวณการทรุดตัวของแต่ละกลุ่ม ได้ประมาณ 0.049 เมตร จากนั้นเปลี่ยนแต่ละกลุ่มเป็น Equivalent Pier ได้ 4 ต้น จากนั้นก็คำนวณการทรุดตัวอีกครั้งหนึ่ง ได้ค่าการทรุดตัวรวมเท่ากับ 0.095 เมตร

ส่วนการคำนวณรวมผล Negative Skin Friction และหน่วยแรงจากการถมดินที่แปลงทดสอบที่ 2 ผลคำนวณการทรุดตัวของเข็ม 1 ต้น ประมาณ 0.043 เมตร จากนั้นทำการจับกลุ่มของเข็มทีละ 25 ต้น ก็จะได้กลุ่มของเสาเข็ม 4 กลุ่ม แล้วคำนวณการทรุดตัวของแต่ละกลุ่ม ได้

ประมาณ 0.21 เมตร จากนั้นเปลี่ยนแต่ละกลุ่มเป็นEquivalent Pier ได้ 4 ต้น จากนั้นก็คำนวณ การทรุดตัวอีกครั้งหนึ่ง ได้ค่าการทรุดตัวรวมเท่ากับ 0.407 เมตร จากนั้นเมื่อคิดผลกระทบ Negative Skin Friction เนื่องจากเสาเข็มกลุ่มและใช้ค่าเฉลี่ยก็จะได้ค่าการทรุดตัวรวมเท่ากับ 0.158 เมตร

ในแปลงที่ 2 นี้ ผลของการถมทรายมีค่ามากกว่าผลกระทบเนื่องจาก Negative Skin Friction

ฉะนั้นค่าการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายของแปลงทดสอบที่ 1 ซึ่งรวมผลของค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีก่อนการถมทราย มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.002+0.10 = 0.102$  เมตร

ส่วนค่าการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายของแปลงทดสอบที่ 2 ซึ่งรวมผลของค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีก่อนการถมทราย มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.006+0.158 = 0.164$  เมตร

#### 4.4.2 การคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายโดยวิธีของ Broms(1987)

Broms,B(1987)ใช้สมมุติฐานที่ว่า ดินและเสาเข็มมีส่วนช่วยรับน้ำหนักด้วยและการทรุดตัว จะทรุดตัวลงไปด้วยกัน ในทางทฤษฎีการคำนวณค่าการทรุดตัวจะแบ่งการคำนวณออกเป็น 2 ส่วน คือ

- ส่วนของตัวเข็มกับดินที่อยู่รอบเข็ม โดยคิดเป็นกลุ่มเสาเข็ม
- ส่วนของดินที่อยู่ใต้กลุ่มเข็ม

ซึ่งการทรุดตัวในส่วนของดินใต้เสาเข็มถือว่าไม่มี เนื่องจากดินใต้เสาเข็มเป็นชั้นดินแข็งมาก ฉะนั้นจะคิดค่าการทรุดตัวเฉพาะส่วนของกลุ่มเสาเข็ม การคำนวณนี้จะหาค่าการทรุดตัว เนื่องจากทรายถมและ Negative Skin Friction โดยคิด Neutral Point อยู่ที่ -13.0 เมตร

ค่า Negative Skin Friction Load ของเสาเข็มกลุ่มคิดเช่นเดียวกับการคาดคะเนสำหรับการ ออกแบบ Piles Group กล่าวคือค่า Negative Skin Friction Load จะมีค่าเท่ากับ Effective Weight ของดินที่อยู่เหนือ Neutral line(ความลึก-13.0 เมตร)

สำหรับแปลงทดสอบที่ 1 จากการคำนวณค่าการทรุดตัวภายในกลุ่มเสาเข็ม ซึ่งรวมถึงค่า Negative Skin Friction ซึ่งคิดโดยใช้น้ำหนักประสิทธิผลของดินที่ -13.0 เมตร ก็จะได้ค่าการทรุดตัวประมาณ 0.051 เมตร โดยเป็นค่าการทรุดตัวแบบ Drained

การคำนวณการทรุดตัวโดยวิธีของ Broms(1987) กิจเฉพาะการทรุดตัวเนื่องจากการยุบอัดตัว(Consolidation) และใช้ค่า Average ของ Modulus ของเสาเข็มกับดินในการคาดคะเน ในกรณีของการทำวิจัยนี้พิจารณาถึงการเกิด Undrained Settlement ด้วยโดยคำนวณจากผลของ Lateral Movement โดยใช้หลักการที่ว่าปริมาตรของการเคลื่อนตัวทางด้านข้างเท่ากับปริมาตรอันเนื่องมาจากการทรุดตัว

$$V_{\text{lateral}} = V_{\text{settlement}}$$

$$A_{\text{lateral}} \cdot (4B) = \rho_{\text{undrained}} \cdot B^2$$

โดยที่  $V_{\text{lateral}}$  = ปริมาตรของดินที่เคลื่อนตัวทางด้านข้าง

$V_{\text{settlement}}$  = ปริมาตรของดินที่เคลื่อนตัวในแนวตั้ง

$A_{\text{lateral}}$  = พื้นที่ของดินที่เคลื่อนตัวทางด้านข้าง

B = ความยาวของคันดินถม

ดังนั้น

$$4 \cdot A_{\text{lateral}} = \rho_{\text{undrained}} \cdot B$$

ในแปลงทดสอบที่ 1 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างเฉลี่ย 0.023 เมตร โดยมีปลายของท่อ Inclinator อยู่ที่มีความลึก 22.0 เมตร แปลงทดสอบยาว 19.0 เมตร ดังนั้น

$$4 \cdot 1/2 \cdot 0.023 \cdot 22 = \rho_{\text{undrained}} \cdot 19$$

$$\rho_{\text{undrained}} = 0.053 \text{ เมตร}$$

ฉะนั้นการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกและ Negative Skin Friction ที่แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.051 + 0.053 = 0.104$  เมตร

ส่วนแปลงทดสอบที่ 2 จากการคำนวณค่าการทรุดตัวภายในกลุ่มเสาเข็ม และรวมถึงค่า Negative Skin Friction ซึ่งคิดโดยใช้น้ำหนักประสิทธิภาพของดินที่ -13.0 เมตร เช่นเดียวกัน ก็จะได้ค่าการทรุดตัวประมาณ 0.074 เมตร ซึ่งเป็นค่าการทรุดตัวแบบ Drained

จากนั้นก็คำนวณการทรุดตัวในลักษณะ Undrained ด้วยซึ่งสามารถคำนวณได้โดยในแปลงทดสอบที่ 2 การเคลื่อนตัวทางด้านข้างเฉลี่ย 0.035 เมตร โดยมีปลายของท่อ Inclinator อยู่ที่ความลึก 22.0 เมตร แปลงทดสอบยาวเฉลี่ย 20.0 เมตร ดังนั้น

$$4 * 1/2 * 0.035 * 22 = \rho_{undrained} * 20$$

$$\rho_{undrained} = 0.077 \text{ เมตร}$$

ฉะนั้นการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักบรรทุกและ Negative Skin Friction ของแปลงทดสอบที่ 2 มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.074 + 0.077 = 0.151$  เมตร

ดังนั้นการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายของแปลงทดสอบที่ 1 ซึ่งรวมผลของค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีก่อนการถมทราย มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.002 + 0.104 = 0.106$  เมตร

ส่วนการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายของแปลงทดสอบที่ 2 ซึ่งรวมผลของค่า Excess Pore Water Pressure ที่มีก่อนการถมทราย มีค่าประมาณเท่ากับ  $0.006 + 0.151 = 0.157$  เมตร

#### 4.5 สรุปผลการคาดคะเนการทรุดตัวของแปลงทดสอบ

จากผลการคาดคะเนการทรุดตัวจากกราฟ(โดยถือว่าเป็นการทรุดตัวในสนาม) และการคำนวณทางทฤษฎี โดยเป็นการทรุดตัวเนื่องจากน้ำหนักทรายเป็นที่มีผลของ Negative Skin Friction อยู่ด้วยแล้วและรวมถึงผลการทรุดตัวเนื่องจากค่า Excess Pore Water Pressure ที่เกิดเนื่องจากการติดตั้งเข็มด้วย ผลสรุปได้แสดงอยู่ในตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าการทรุดตัวจริงในสนามกับการคำนวณโดยวิธีต่างๆ

| ทฤษฎีและการหาค่าการทรุดตัว                     | ค่าการทรุดตัว (เมตร) |                |
|--|----------------------|----------------|
|  | แปลงทดสอบที่ 1       | แปลงทดสอบที่ 2 |
| กราฟ Hyperbolic                                | 0.100                | 0.200          |
| กราฟ Asaoka                                    | 0.110                | 0.180          |
| ค่าที่วัดจริงในสนาม + การทรุดตัวจาก $\Delta u$ | 0.072                | 0.146          |
| Poulos & Davis(1968)                           | 0.102                | 0.164          |
| Broms(1987)                                    | 0.106                | 0.157          |

จากตารางที่ 4.3 พบว่าการหาค่าการทรุดตัวสุดท้ายจากกราฟทั้งวิธีของ Hyperbolic และ Asaoka นั้นได้ค่าการทรุดตัวที่ใกล้เคียงกัน ส่วนผลการคาดคะเนการทรุดตัวจากการวัดค่าจริงในสนามรวมกับการทรุดตัวเนื่องจากค่า Excess Pore Pressure ที่เหลือ ก็มีค่าที่ต่ำกว่าที่คาดคะเนจากกราฟ นั่นคือ ที่แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าการทรุดตัวต่ำกว่าประมาณ 30 % และที่แปลงทดสอบที่ 2 มีค่าการทรุดตัวต่ำกว่าประมาณ 25 %

ส่วนผลจากการคำนวณการทรุดโดยวิธีของ Poulos และ Broms นั้นก็มีค่าใกล้เคียง ซึ่งที่แปลงทดสอบที่ 1 มีค่าใกล้เคียงมาก แต่ที่แปลงทดสอบที่ 2 มีค่าที่ต่ำกว่าที่ได้จากกราฟประมาณ 25 % เช่นเดียวกันกับที่ได้จากการคาดคะเนการทรุดตัวสุดท้ายจากข้อมูลในสนาม

ในการคาดคะเนการทรุดตัวของดินที่ปรับปรุงคุณภาพโดยวิธี Placing Lime Column นี้ พฤติกรรมที่แท้จริงหลังการรับน้ำหนักบรรทุกมีลักษณะเหมือน เสาค้ำรับน้ำหนักโดยมี Lime mixing เป็นตัวกระจายแรงลงดินและตัวเสาค้ำ เราสามารถใช้การคาดคะเนการทรุดตัวของ Hyperbolic มาคาดคะเนการทรุดตัวได้เนื่องจากไม่ได้มีพื้นฐานจากทางทฤษฎี ส่วนของ Asaoka นั้นใช้ได้เฉพาะในช่วงที่เกิด Consolidation Settlement รวมทั้งสามารถนำทฤษฎีการคำนวณการทรุดตัวของ Broms และ Poulos & Davis มาใช้ได้ผลที่ใกล้เคียง

#### 4.6 การวิเคราะห์หาค่า CBR กรณีของ Composite Soil

จากขบวนการทำเข็มปูนขาวโดยวิธีแทนที่นั้น จะมีการทำผิว Lime mixing ปกติห้ผิวเข็มหนาประมาณ 1 เมตร ดังนั้นถ้าจะมีการออกแบบพื้นผิวทางโดยใช้ Lime mixing เป็นส่วนของชั้น Subgrade จึงจำเป็นต้องมีการคำนวณหาค่า CBR ที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้

ในที่นี้เราจะใช้วิธีการหาโดยการทำ Field CBR Test โดยเราจะทำเฉพาะที่แปลงทดสอบที่ 1 เพื่อเป็นแนวทางเท่านั้น

- Lime mixing ได้ค่า  $CBR_U = 7.8 \%$

- Lime Column ได้ค่า  $CBR_1 = 28.0 \%$

- Soil between Piles ได้ค่า  $CBR_2 = 1.4 \%$

$$\text{หา Area ratio ; } a's = \pi D^2 / 4P^2$$

$$D = 0.5 \text{ m. (Expansion) ; } P = 1.2 \text{ m.}$$

$$a's = 13.64 \%$$

$$\begin{aligned} CBR_L &= CBR_1 * a's + CBR_2 * (1-a's) \\ &= 28 * 0.1364 + 1.4 * (1-0.1364) \\ &= 5.03 \% \end{aligned}$$

$$CBR_U = 7.8 \%$$

$$\begin{aligned} CBR_M &= (h_1 \cdot CBR_U^{1/3} + h_2 \cdot CBR_L^{1/3})^3 / (h_1 + h_2)^3 \\ &= 6.31 \% \end{aligned}$$

ดังนั้นค่า CBR ของแปลงทดสอบที่ 1 ที่จะสามารถนำไปใช้ออกแบบโครงสร้างทาง โดยใช้ผิว Lime Mixing เป็นชั้น Subgrade มีค่าประมาณ 6 %