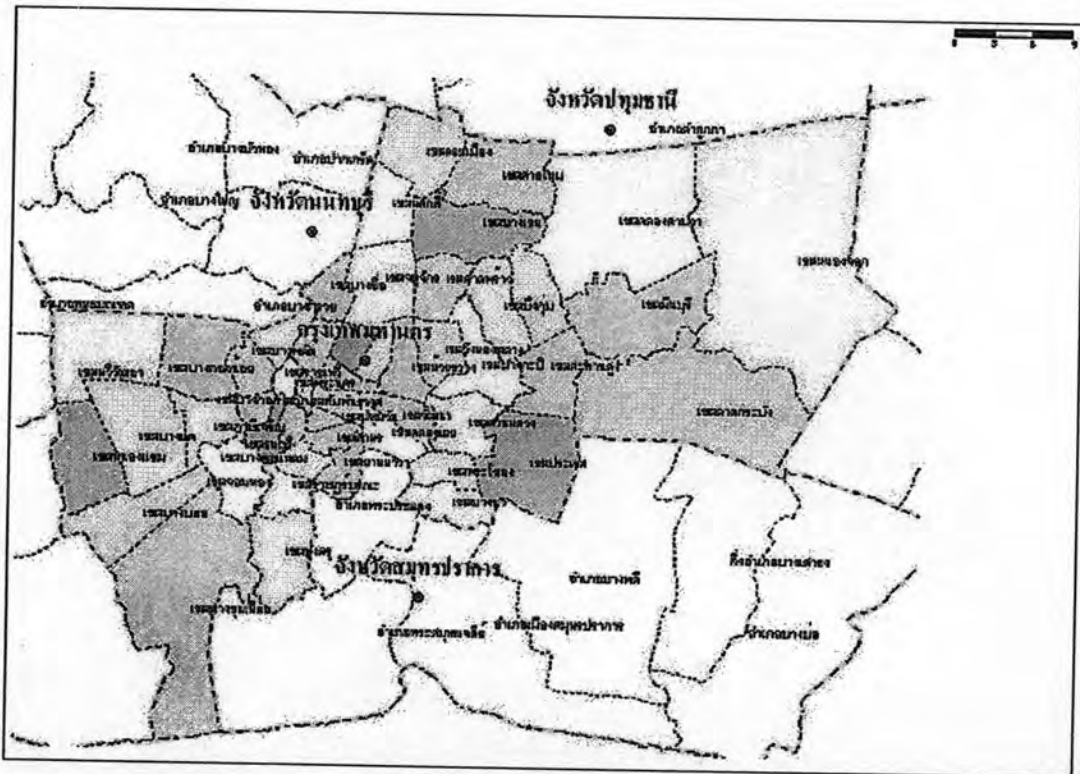


บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 จำแนกพื้นที่ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ข้อมูลดินที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้ได้จากการรวบรวมข้อมูลหลุมเจาะจากโครงการต่างๆ ในพื้นที่ กรุงเทพมหานคร จังหวัดนนทบุรี และจังหวัดสมุทรปราการ ซึ่งแบ่งตามพื้นที่การปกครองคือ กรุงเทพมหานคร มีทั้งสิ้น 50 เขต จังหวัดนนทบุรี มีทั้งสิ้น 6 อำเภอ และจังหวัดสมุทรปราการมีทั้งสิ้น 5 อำเภอ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 พื้นที่จัดแบ่งตามข้อมูลชั้นดินในพื้นที่กรุงเทพฯ และปริมณฑลแบ่งตามเขตและอำเภอ

เพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และใช้งานจึงจำเป็นต้องแบ่งพื้นที่ในเขตกรุงเทพฯ และปริมณฑลให้เป็นพื้นที่ย่อยๆ ตามคุณสมบัติของดินซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 10 เขต ที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมและความหนาแน่นดินใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 พื้นที่จัดแบ่งตามข้อมูลชั้นดินที่มีคุณสมบัติทางวิศวกรรมและความหนาชั้นดินใกล้เคียงกัน

พื้นที่	เขตและอำเภอ
1	เขตพระนครศรี เขตป้อมปราบศัตรูพ่าย เขตบางรัก เขตสัมพันธวงศ์ เขตปทุมวัน เขตคลองเตย เขตยานนาวา เขตสาทร เขตวัฒนา
2	เขตราชเทวี เขตพญาไท เขตดินแดง เขตห้วยขวาง
3	เขตดุสิต เขตบางพลัด เขตบางกอกน้อย เขตตลิ่งชัน เขตภาษีเจริญ เขตจอมทอง เขตบางคอแหลม เขตราชบุรีบูรณะ เขตทุ่งครุ
4	เขตบางกอกใหญ่ เขตธนบุรี เขตคลองสาน
5	เขตทวีวัฒนา เขตบางแค เขตหนองแขม เขตบางบอน เขตบางขุนเทียน
6	เขตวังทองหลาง เขตบางกะปิ เขตสวนหลวง เขตสะพานสูง เขตลาดพร้าว เขตบึง กุ่ม เขตคันนายาว เขตบางซื่อ เขตจตุจักร เขตบางเขน เขตหลักสี่ เขตดอนเมือง เขตสายไหม
7	เขตพระโขนง เขตบางนา เขตประเวศ จังหวัดสมุทรปราการ
8	เขตมีนบุรี เขตลาดกระบัง
9	เขตหนองจอก เขตคลองสามวา
10	จังหวัดนนทบุรี

สำหรับชั้นดินเหนียว สามารถแบ่งเป็นชั้นดินเหนียวชนิดต่างๆได้โดยเทียบเคียงจากค่ากำลังรับแรงอัดของดินเหนียวที่ได้จาก Unconfined compression test (หรือค่า q_u) และค่า Blow count ที่ได้จาก Standard penetration test (หรือค่า N) ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 การแบ่งชั้นดินเหนียวตามค่า q_u และ N

ชนิดดินเหนียว	q_u		N
	[t/m ²]	[kPa]	[blows/ft]
Very soft (อ่อนมาก)	< 2.5	< 25	< 2
Soft (อ่อน)	2.5-5	25-50	2 - 4
Medium (แน่นปานกลาง)	5-10	50-100	4 - 8

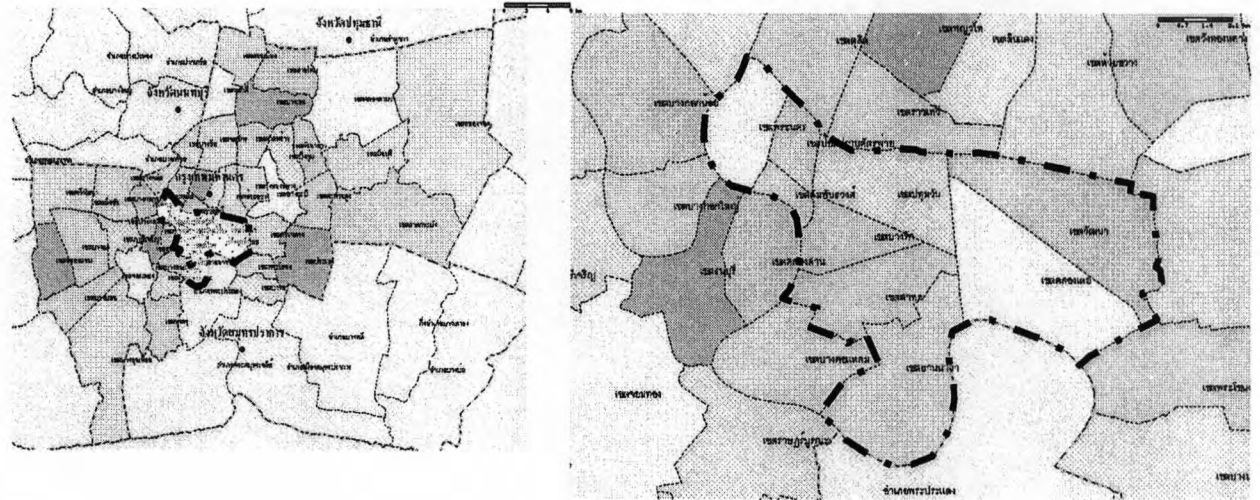
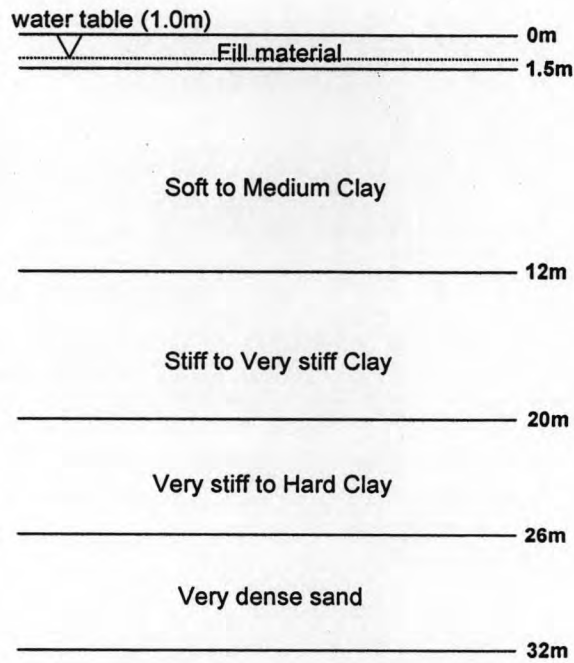
Stiff (แน่น)	10-20	100-200	8 – 15
Very stiff (แน่นมาก)	20-40	200-400	15 – 30
Hard (แข็ง)	> 40	> 400	> 30

สำหรับชั้นดินทราย สามารถแบ่งเป็นชั้นดินทรายชนิดต่างๆได้โดยเทียบเคียงจากค่า Blow count ที่ได้จาก Standard penetration test (หรือค่า N) ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 การแบ่งชั้นดินทรายตามค่า N

ชนิดดินทราย	Relative density [%]	N [blows/ft]
Very loose (หลวมมาก)	0 – 15	0 – 4
Loose (หลวม)	15 – 35	4 – 10
Medium dense (แน่นปานกลาง)	35 – 65	10 – 30
Dense (แน่น)	65 – 85	30 – 50
Very dense (แน่นมาก)	85 – 100	> 50

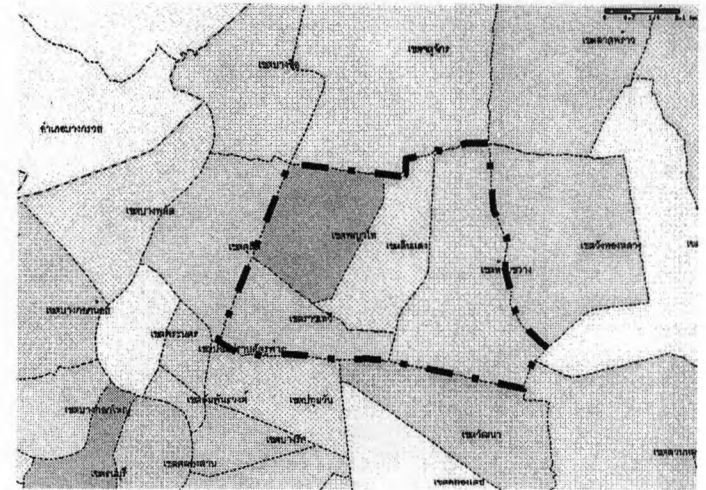
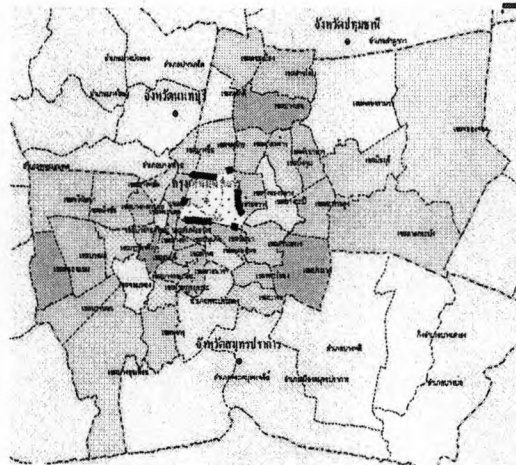
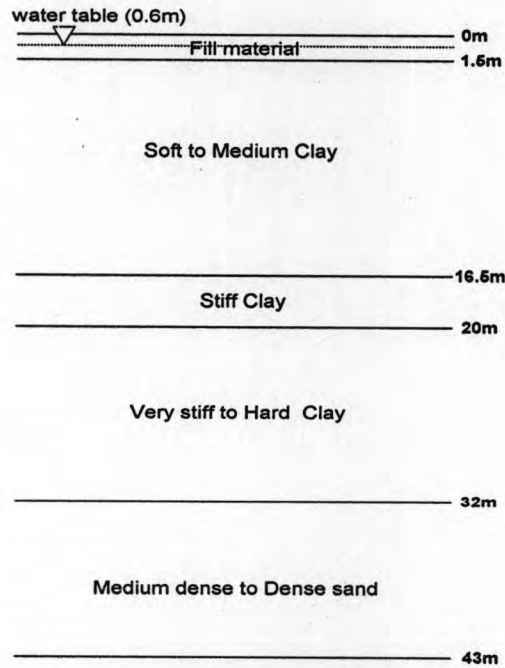
ข้อมูลคุณสมบัติพื้นฐานของดินในพื้นที่ที่ 1 ถึง 10 ได้แสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ถึงรูปที่ 3.11 ตามลำดับ



Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soft to Medium Clay	43.8-75.3 (61.3)	54.7-79.3 (64.2)	27.5-32.6 (22.5)	1.58-2.03 (1.68)	-	1.6-4.8 (2.9)	2.3-5.6 (3.4)	25-29 (27)	290-618 (430)
Stiff to Very stiff Clay	22.6-37.3 (28.6)	45.6-63.1 (53.1)	19.2-25.4 (23.5)	1.82-2.04 (1.94)	16-32 (24)	11.9-22.1 (15.4)	5.8-5.8 (5.8)	28-30 (29)	1358-5800 (3080)
Very stiff to Hard Clay	17.8-25.3 (21.9)	25.9-43.3 (38.0)	11.6-20.8 (19.4)	1.94-2.08 (2.01)	31-52 (39)	22.5-22.5 (22.5)	-	28-33 (31)	5800-6800 (5623)
Very dense Sand	19.3-26.0 (22.5)	-	-	2.06-2.18 (2.17)	35-60 (53)	-	-	36-41 (38)	48000-96000 (74568)

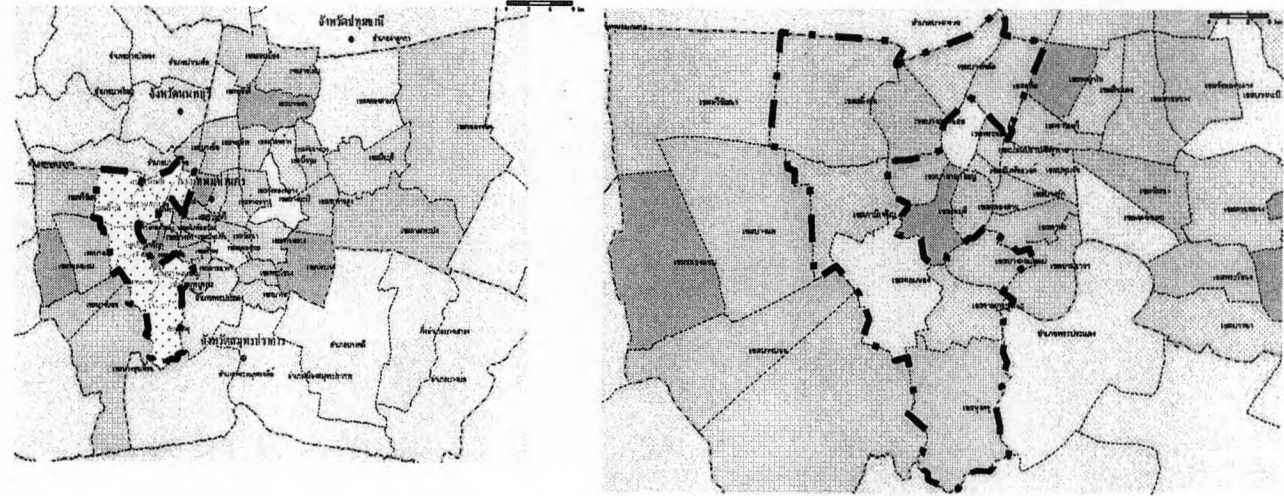
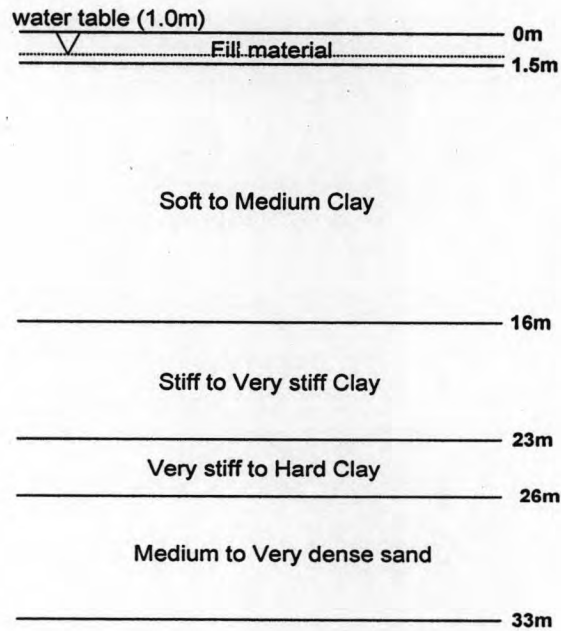
รูปที่ 3.2 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 1





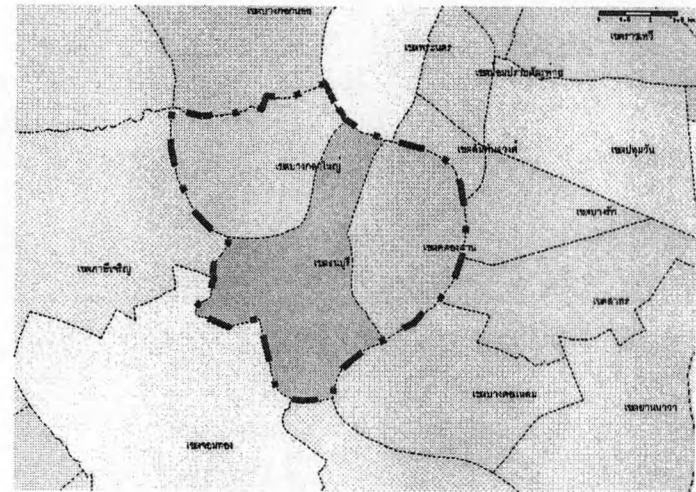
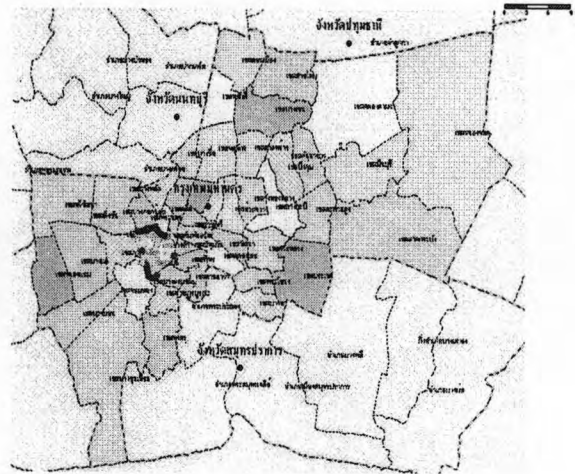
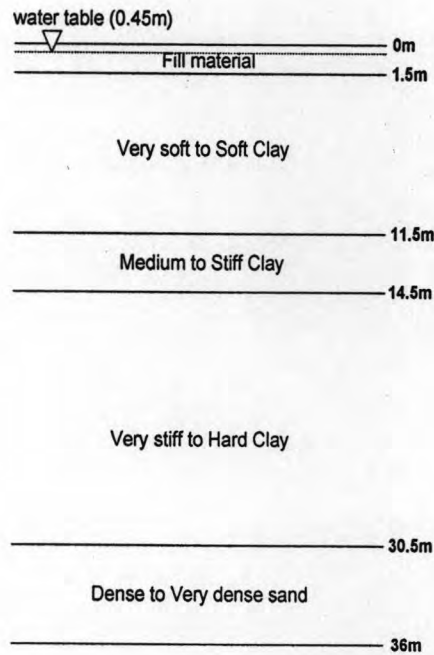
Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soft to Medium Clay	25.6-73.1 (46.0)	33.9-70.1 (50.3)	17.1-31.1 (23.5)	1.54-1.91 (1.71)	8-11 (10)	1.5-3.4 (2.3)	1.1-2.7 (1.6)	27-31 (29)	268-433 (345)
Stiff clay	20.6-59.9 (37.0)	37.2-79.7 (59.1)	14.3-35.8 (25.8)	1.60-2.12 (1.87)	14-22 (18)	7.3-10.3 (7.5)	-	26-30 (28)	852-2600 (1507)
Very stiff to Hard Clay	15.5-34.6 (22.2)	28.2-54.9 (44.7)	16.8-26.8 (21.2)	1.88-2.20 (2.00)	25-51 (37)	15.0-29.7 (21.7)	-	28-32 (30)	4800-6800 (5416)
Medium dense to Dense Sand	12.8-24.5 (17.2)	-	-	1.99-2.00 (1.99)	32-69 (49)	-	-	35-41 (37)	48000-78000 (58000)

รูปที่ 3.3 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 2



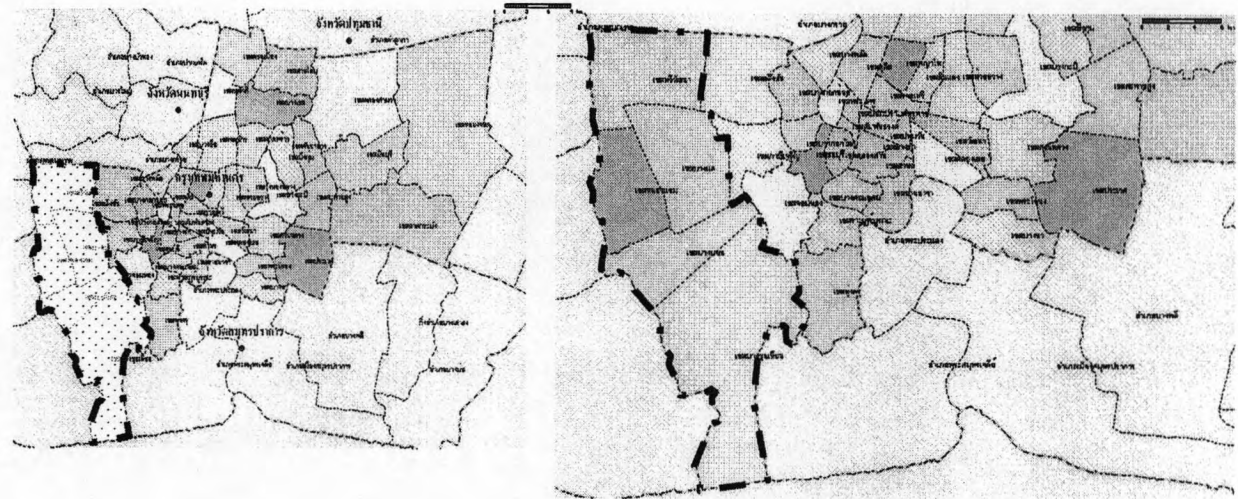
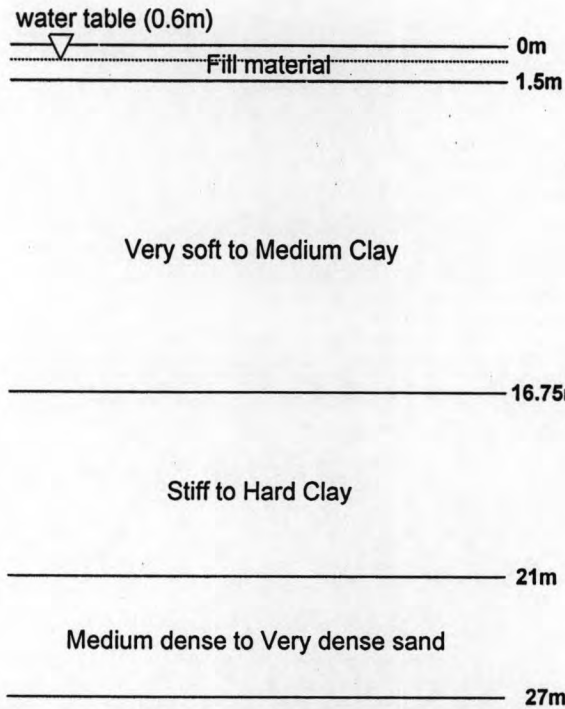
Soil description	W_n (%)	W_l (%)	W_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Soft to Medium Clay	20.4-77.7 (52.1)	49.7-76.9 (65.7)	22.2-31.2 (27.8)	1.60-1.90 (1.70)	7-8 (6)	1.7-4.5 (2.3)	2.7-2.7 (2.7)	25-30 (28)	83-480 (344)
Stiff to Very stiff clay	23.2-42.0 (30.4)	57.0-80.6 (68.1)	22.2-34.2 (27.2)	1.90-2.00 (1.90)	12-24 (18)	12.0-14.5 (10.6)	-	27-30 (29)	1660-2500 (2122)
Very stiff to Hard Clay	21.2-36.7 (27.3)	33.4-59.3 (42.7)	17.3-24.7 (21.7)	1.90-2.00 (2.00)	27-37 (31)	19.3-19.3 (19.3)	-	28-32 (31)	4200-5710 (4823)
Medium to Very dense Sand	18.8-26.7 (21.4)	-	-	2.20-2.30 (2.10)	33-60 (48)	-	-	37-42 (39)	58000-72000 (68000)

รูปที่ 3.4 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 3



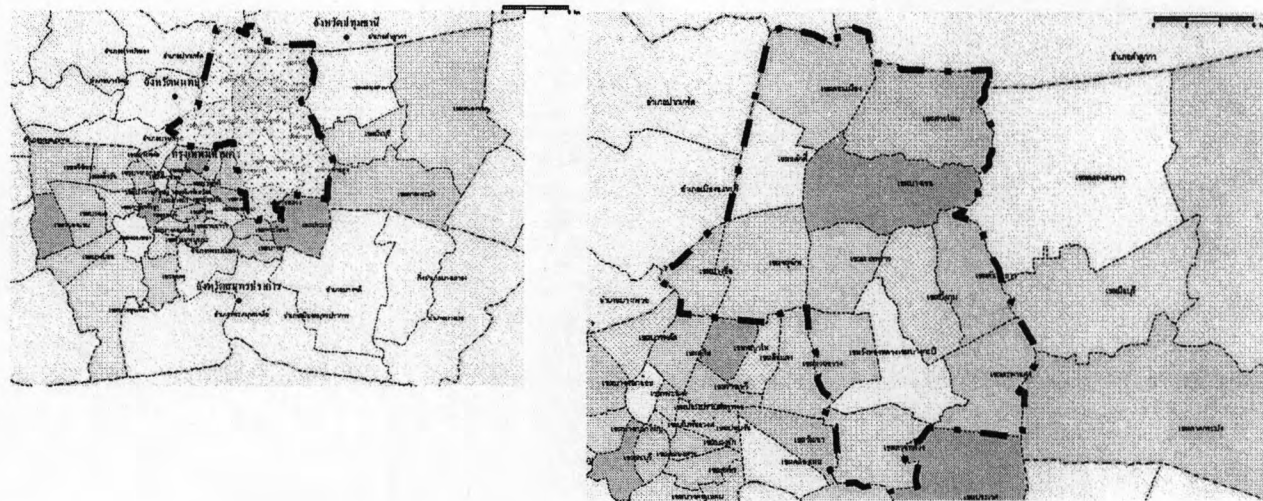
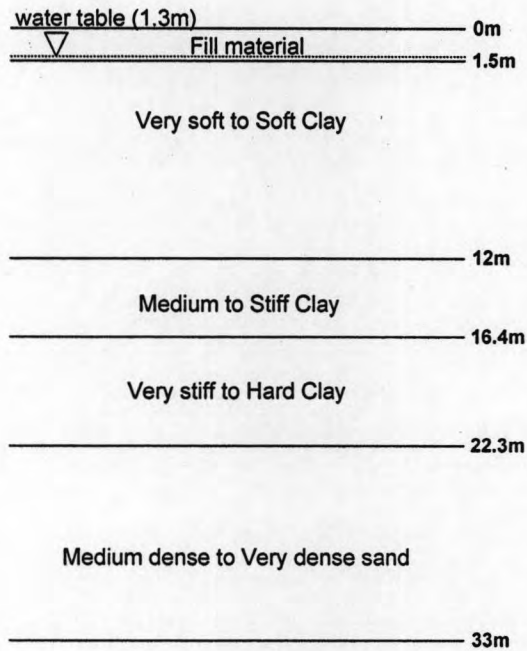
Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Soft Clay	54.5-76.7 (68.2)	60.0-63.0 (61.0)	21.0-32.0 (27.0)	1.60-1.70 (1.50)	-	1.1-1.6 (1.2)	1.0-1.0 (1.0)	27-28 (28)	150-239 (186)
Medium to Stiff Clay	70.0-74.8 (72.4)	57.5-57.5 (57.5)	27.1-27.1 (27.1)	1.60-1.60 (1.60)	-	6.6-6.6 (6.6)	3.5-3.5 (3.5)	28-31 (30)	750-2600 (1320)
Very stiff to Hard Clay	22.3-32.9 (28.7)	49.5-57.0 (47.4)	23.1-27.3 (22.2)	1.90-2.10 (2.00)	21-42 (32)	17.3-17.3 (17.3)	8.9-8.9 (8.9)	29-29 (29)	3825-5720 (4315)
Dense to Very dense Sand	21.3-26.3 (23.3)	-	-	-	41-85 (57)	-	-	36-38 (37)	70000-70000 (70000)

รูปที่ 3.5 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 4



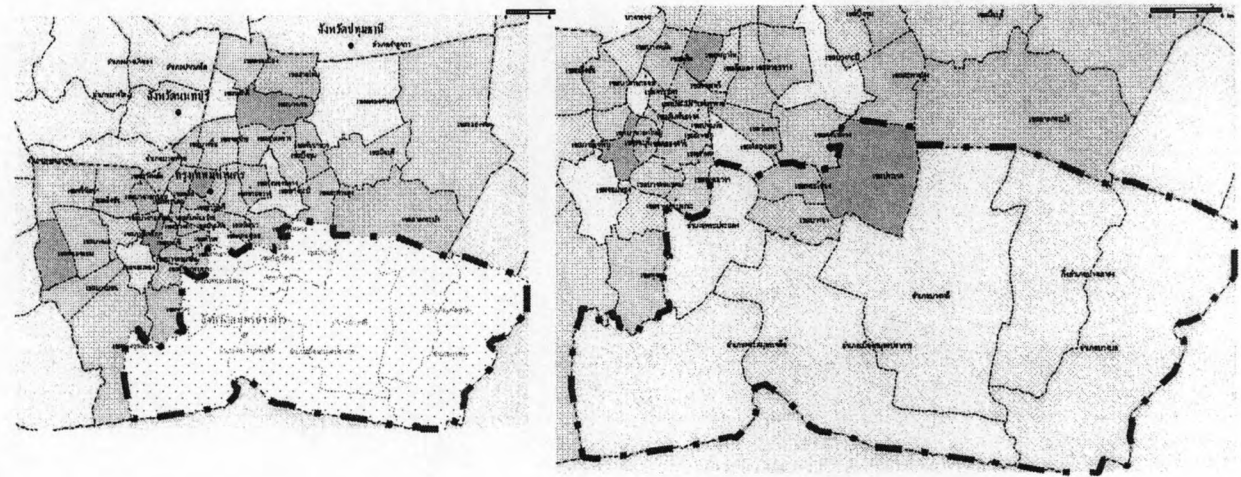
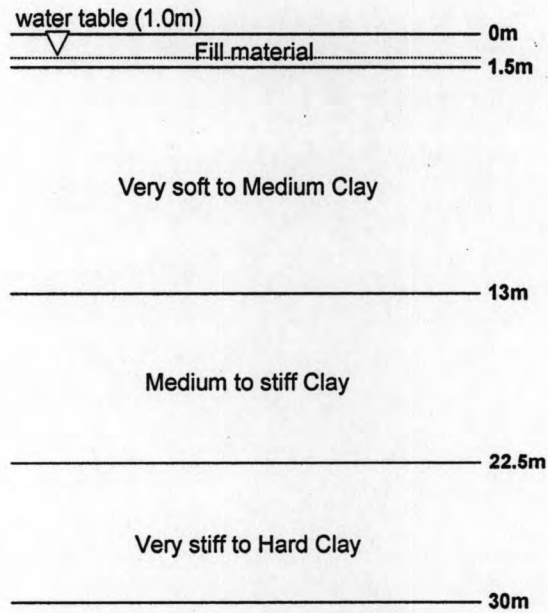
Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Medium Clay	47.8-93.0 (71.8)	50.0-70.3 (64.2)	29.5-34.8 (32.2)	1.50-1.89 (1.63)	-	1.2-4.8 (2.7)	-	29-31 (30)	315-408 (383)
Stiff to Hard Clay	22.3-29.1 (25.9)	44.4-61.2 (52.8)	19.7-32.1 (24.2)	1.78-2.12 (1.95)	15-36 (21)	14.5-14.5 (14.5)	-	27-28 (28)	1580-5950 (3614)
Medium dense to Very Dense sand	19.4-26.2 (23.2)	-	-	1.98-2.09 (2.00)	18-52 (33)	-	-	37-37 (37)	40800-72000 (52000)

รูปที่ 3.6 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 5



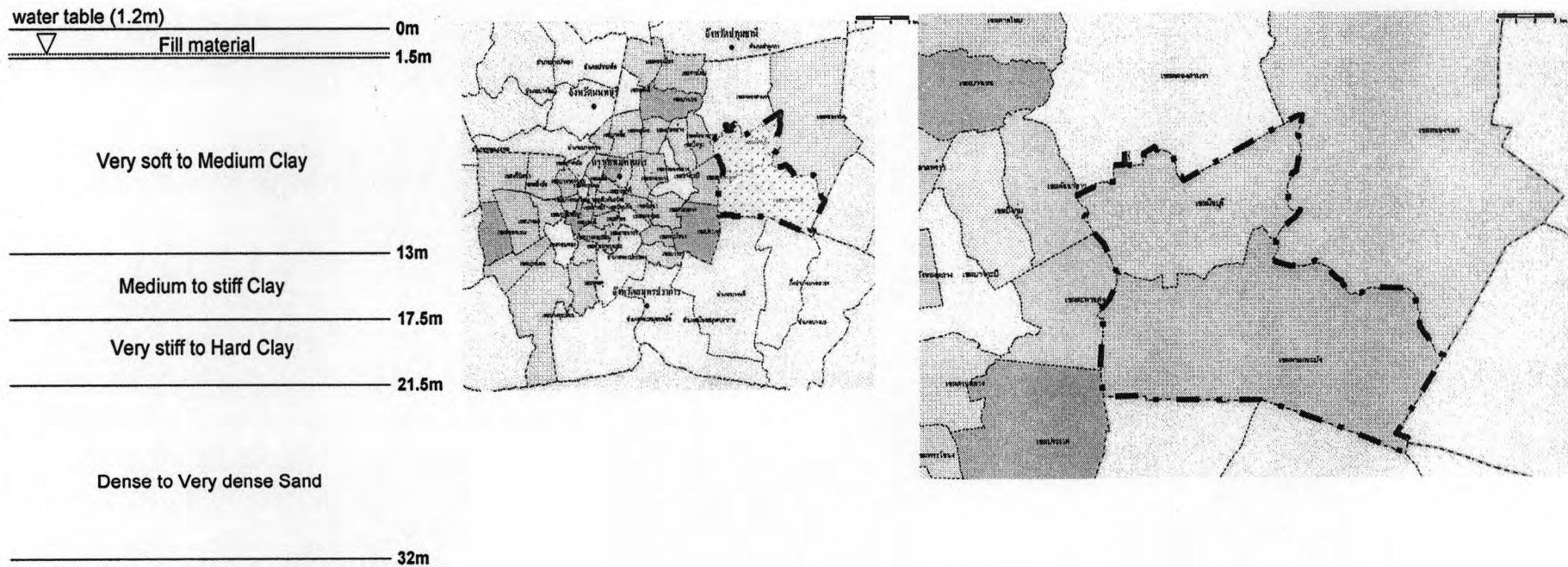
Soil description	W_n (%)	W_l (%)	W_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Soft Clay	29.3-92.8 (64.6)	49.8-82.0 (65.8)	24.2-33.5 (28.3)	1.53-1.90 (1.63)	2-4(3)	1.2-2.9 (1.8)	2.2-3.9 (2.3)	24-29 (27)	247-408 (264)
Medium to Stiff Clay	26.6-57.8 (40.8)	52.8-78.0 (68.3)	20.8-32.9 (27.3)	1.61-1.97 (1.81)	8-14(12)	3.2-7.2 (5.0)	1.9-4.5 (3.6)	24-29 (27)	1580-3400 (2490)
Very stiff to Hard Clay	17.0-39.4 (27.1)	32.9-58.3 (45.4)	17.6-27.2 (22.0)	1.79-2.09 (1.95)	17-41(27)	10.3-20.5 (13.1)	3.8-4.7 (4.2)	30-30 (30)	3230-3400 (3270)
Medium dense to Very dense Sand	12.5-22.7 (18.4)	-	-	1.70-2.14 (1.94)	28-71(48)	-	-	35-41 (37)	52800-95000 (66000)

รูปที่ 3.7 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 6



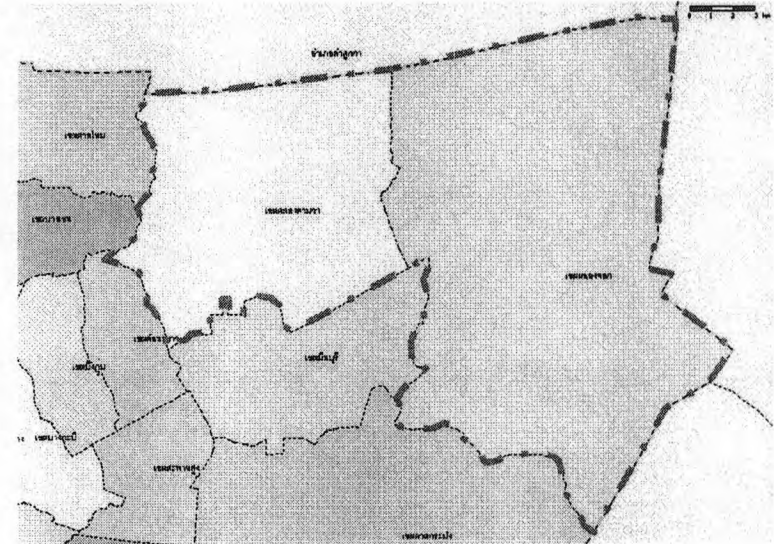
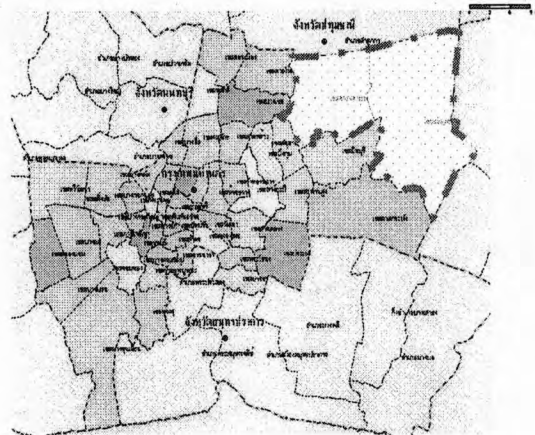
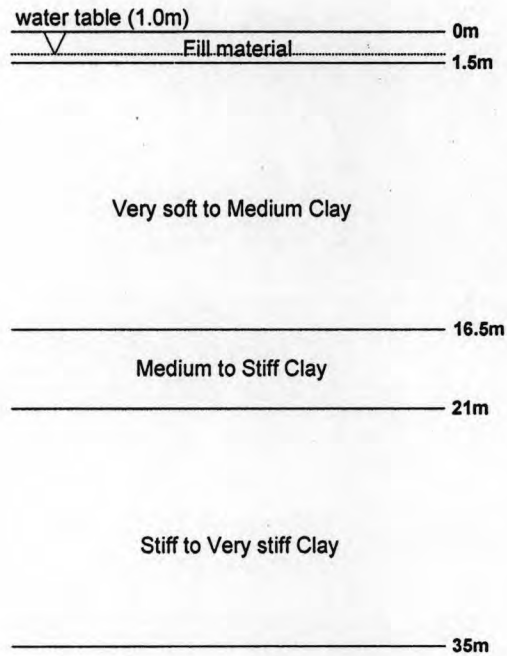
Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Medium Clay	27.1-91.8 (74.6)	65.2-93.0 (79.3)	28.5-35.8 (32.4)	1.24-1.82 (1.55)	-	0.6-2.5 (1.3)	0.9-2.7 (1.9)	25-28 (26)	150-290 (200)
Medium to Stiff Clay	36.1-83.8 (54.8)	56.1-83.3 (68.6)	25.8-38.4 (31.5)	1.52-1.90 (1.71)	8-15 (13)	2.9-10.0 (4.4)	2.4-6.5 (4.0)	25-28 (27)	814-1280 (870)
Very stiff to Hard Clay	18.0-41.5 (26.4)	32.3-89.9 (57.9)	18.5-39.4 (25.7)	1.69-2.15 (1.98)	18-52 (30)	13.2-34.1 (22.1)	-	28-28 (28)	3700-6800 (5535)

รูปที่ 3.8 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 7



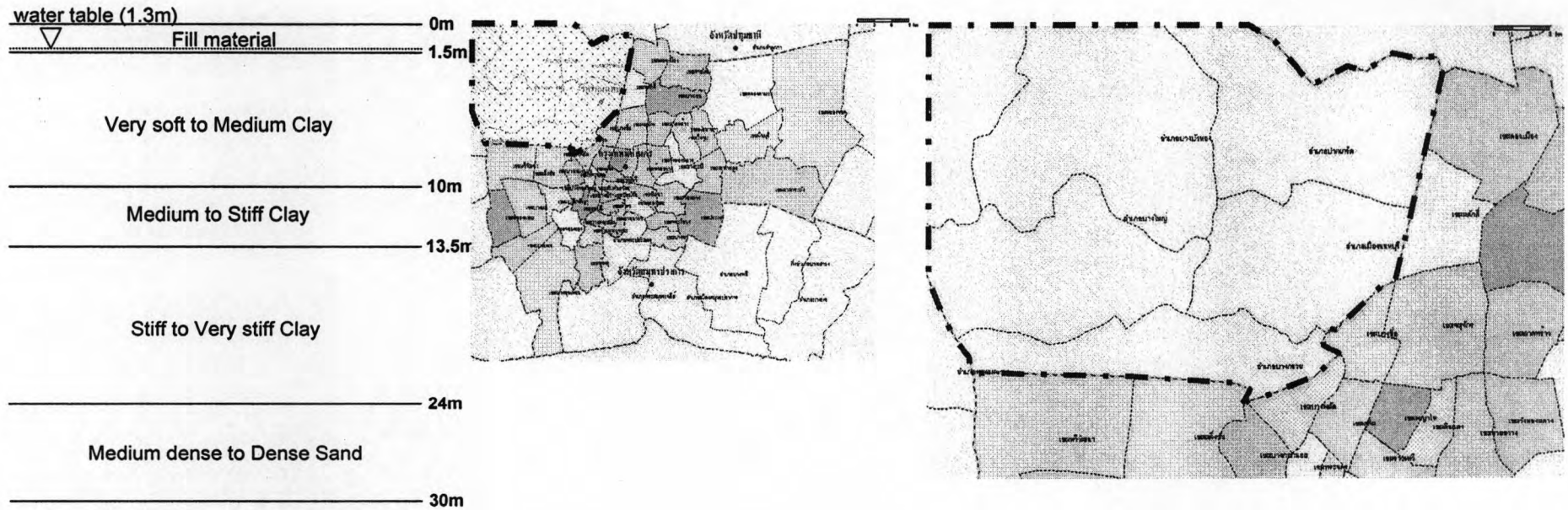
Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Medium Clay	41.0-117.6 (83.3)	53.0-77.4 (61.9)	22.7-35.0 (26.9)	1.39-1.83 (1.54)	5-5 (5)	0.5-3.4 (1.5)	-	25-33 (28)	150-294 (230)
Medium to Stiff Clay	16.0-82.3 (43.8)	52.7-71.5 (62.2)	21.2-34.5 (25.7)	1.60-2.04 (1.78)	7-13 (11)	2.8-7.5 (4.3)	-	28-29 (27)	480-1380 (856)
Very stiff to Hard Clay	15.6-32.5 (43.8)	28.0-50.9 (39.4)	15.3-22.9 (18.7)	1.91-2.09 (2.01)	20-44 (31)	11.1-18.2 (14.5)	-	30-35 (32)	3400-3719 (3619)
Dense to Very dense Sand	12.7-23.3 (19.5)	-	-	1.79-2.07 (1.93)	35-80 (55)	-	-	36-38 (38)	62000-86000 (78000)

รูปที่ 3.9 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 8



Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Medium Clay	25.2-133.4 (78.5)	60.4-62.1 (61.3)	39.1-42.8 (41.0)	1.37-1.97 (1.57)	-	0.8-2.6 (1.6)	-	31-31 (31)	235-235 (235)
Medium to Stiff Clay	23.1-63.4 (33.8)	57.9-78.8 (71)	26.4-48.2 (34.3)	1.60-2.03 (1.89)	8-15 (14)	6.5-10.0 (8.7)	-	27-27 (27)	1745-1745 (1745)
Stiff to Very stiff Clay	15.1-31.7 (23.6)	30.3-30.3 (30.3)	13.7-13.7 (13.7)	1.89-2.15 (2.00)	16-19 (17)	11.5-19.1 (15.4)	-	32-32 (32)	3645-3645 (3645)

รูปที่ 3.10 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 9



Soil description	w_n (%)	w_l (%)	w_p (%)	γ_t (t/m^3)	N (blows/ft)	$s_u(UC)$ (t/m^2)	$s_u(FV)$ (t/m^2)	ϕ' (deg.)	E_u (t/m^2)
Fill material	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Very soft to Medium Clay	30.9-71.9 (50.3)	42.5-68.2 (55.8)	22.2-33.5 (27.5)	1.50-1.80 (1.66)	4-7(5)	1.3-5.0(3.2)	4.9-4.9 (4.9)	27-30 (29)	221-224 (223)
Medium to Stiff Clay	69.2-78.0 (75.0)	16.1-48.1 (26.0)	18.4-31.4 (27.6)	1.41-2.08 (1.61)	10-10 (10)	2.9-8.8 (5.2)	2.6-6.1 (5)	27-30 (29)	1119-1451 (1285)
Stiff to Very stiff Clay	19.6-63.0 (30.0)	20.6-59.6 (35.9)	15.6-29.7 (22.7)	1.52-2.12 (1.94)	15-29(22)	9.3-17.5 (14.4)	-	32-33 (32)	3620-3854 (3737)
Medium dense to Dense Sand	17.4-27.0 (19.8)	-	-	2.00-2.00 (2.00)	28-49 (35)	-	-	36-38 (37)	54000-77000 (62000)

รูปที่ 3.11 ข้อมูลชั้นดินในพื้นที่ที่ 10

3.2 การทรุดตัวเนื่องจากการสูบน้ำบาดาล ที่ระดับความลึกต่างๆจากผิวดิน

3.2.1 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล การเก็บรวบรวมข้อมูลจากหลักรูขุมของกรมทรัพยากรธรณีที่กระจายอยู่ทั่วประเทศซึ่งหลักรูขุมเหล่านั้นจะมีลักษณะเป็นคล้ายเสาคอนกรีตที่มีระดับปลายเสาคอนกรีตที่มีความลึก 1, 10-15, 15-25 และ 20 เมตร โดยจะมีการเก็บข้อมูลทุกปี และได้แสดงตัวอย่างข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งไว้ในตารางที่ 3.4 และตารางที่ 3.5 แสดงหลักรูขุมทั้งหมดที่ใช้อ้างอิงเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาล ส่วนหลักรูขุมอื่นๆแสดงไว้ในภาคผนวก ก

ตารางที่ 3.4 ตัวอย่างข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินที่หลักรูขุมคณะพาณิชย์ศาสตร์ฯ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (BM8) ในพื้นที่ที่ 1

พ.ศ.	ปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ความลึกต่างๆจากผิวดิน, ซม.				ปริมาณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสะสมที่ความลึกต่างๆจากผิวดิน, ซม.			
	20 ม.(BM)	1 ม.	10-15 ม.	15-25 ม.	20 ม. (BM)	1 ม.	10-15 ม.	15-25 ม.
2538	-0.47	-2.22	-0.87	-0.58	-0.47	-2.22	-0.87	-0.58
2539	0.13	-0.99	-0.35	-0.02	-0.34	-3.21	-1.22	-0.60
2541	-1.10	-1.61	-1.51	-1.20	-1.44	-4.82	-2.73	-1.80
2542	-0.06	-1.09	-0.56	-0.13	-1.50	-5.91	-3.29	-1.93
2543	0.30	-1.18	0.04	0.30	-1.20	-7.09	-3.25	-1.63
2544	-0.07	-1.86	-0.41	-0.07	-1.27	-8.95	-3.66	-1.70
2545	0.61	0.43	0.31	0.59	-0.66	-8.52	-3.35	-1.11
2546	-0.73	-1.00	-0.92	-0.72	-1.39	-9.52	-4.27	-1.83
2547	0.03	-2.64	-0.20	0.02	-1.36	-12.16	-4.47	-1.81
2548	-1.14	-2.37	-1.40	-1.17	-2.50	-14.53	-5.87	-2.98

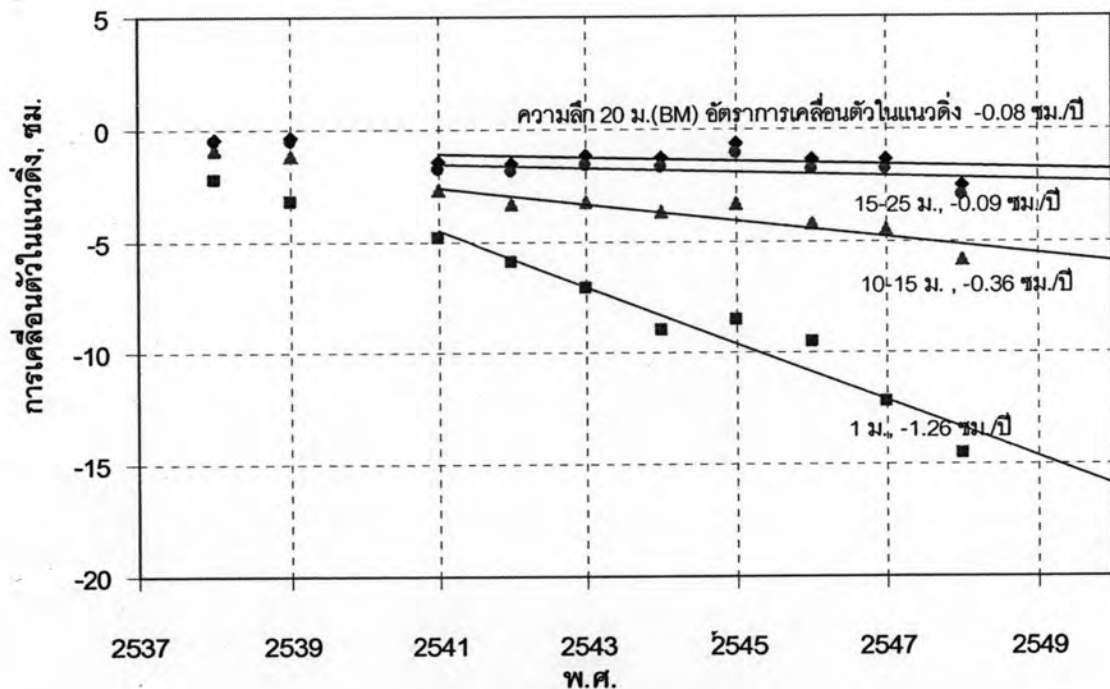
ตารางที่ 3.5 หลักรูขุมทั้งหมดที่ใช้อ้างอิงการทรุดตัวเนื่องมาจากการสูบน้ำบาดาล

พื้นที่ที่	จำนวนหลักรูขุม	ตำแหน่งหลักรูขุม
1	1	คณะพาณิชย์ศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2	1	สำนักงานนโยบายและแผนสิ่งแวดล้อม
3	1	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี บางมด

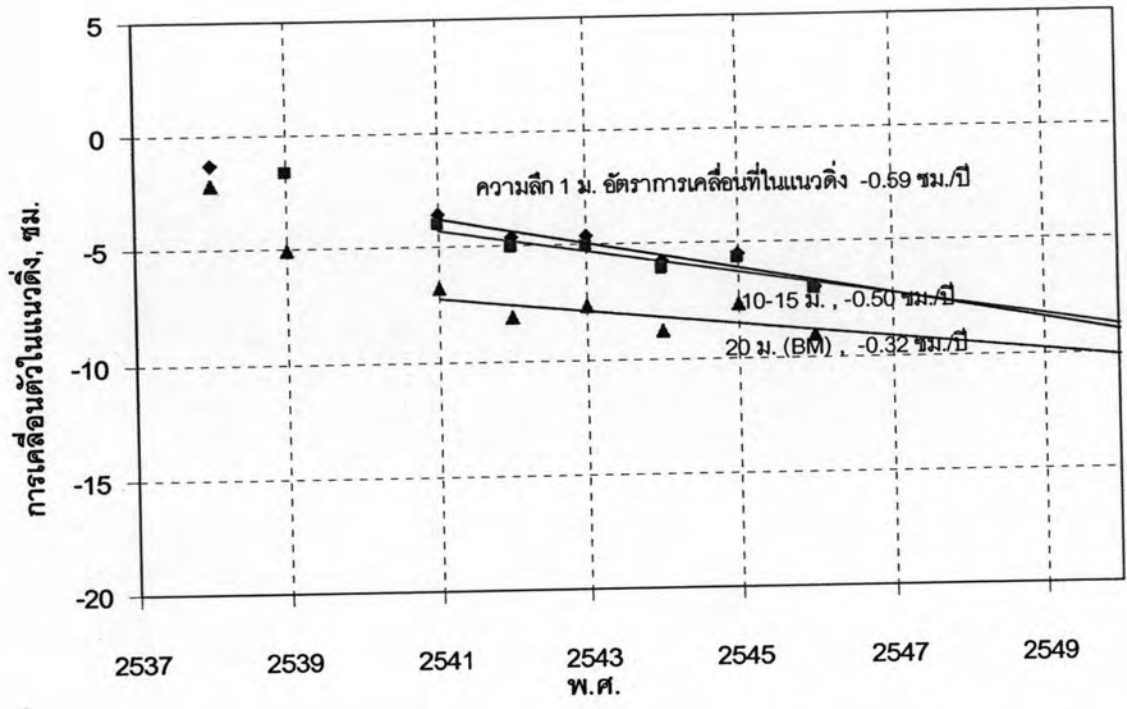
4	1	โรงพยาบาลสมเด็จพระปิ่นเกล้า
5	3	สถานีโทรทัศน์ไทย ที.วี.สี ช่อง 3
		พุทธมณฑล อ.นครชัยศรี ชุมสายฯ เอกชัย บางขุนเทียน
6	6	สถานีกำจัดน้ำเสีย ดอนเมือง
		กรมพัฒนาที่ดิน
		วัดราชบูรณะ (วัดเลียบ)
		มหาวิทยาลัยรามคำแหง หัวหมาก
		คลังพัสดุการเคหะแห่งชาติ คลองจั่น
กองบินตำรวจ รามอินทรา		
7	4	วัดกึ่งแก้ว
		โรงเรียนบางพลีราษฎร์บำรุง อ.บางพลี
		เทศบาลจังหวัดสมุทรปราการ
		โรงเรียนชุมชนบางบ่อ อ.บางบ่อ
8	3	สำนักงานเขตมีนบุรี
		วัดราษฎร์ศรัทธาธรรม อ่อนนุช
		สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9	2	วัดสีชมพู หนองจอก
		วัดราษฎร์บำรุง หนองจอก
10	4	ศาลากลางจังหวัด นนทบุรี
		วัดไทรน้อย อ.ไทรน้อย
		การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย บางกรวย
		กรมชลประทาน ปากเกร็ด

3.2.2 การวิเคราะห์ข้อมูล

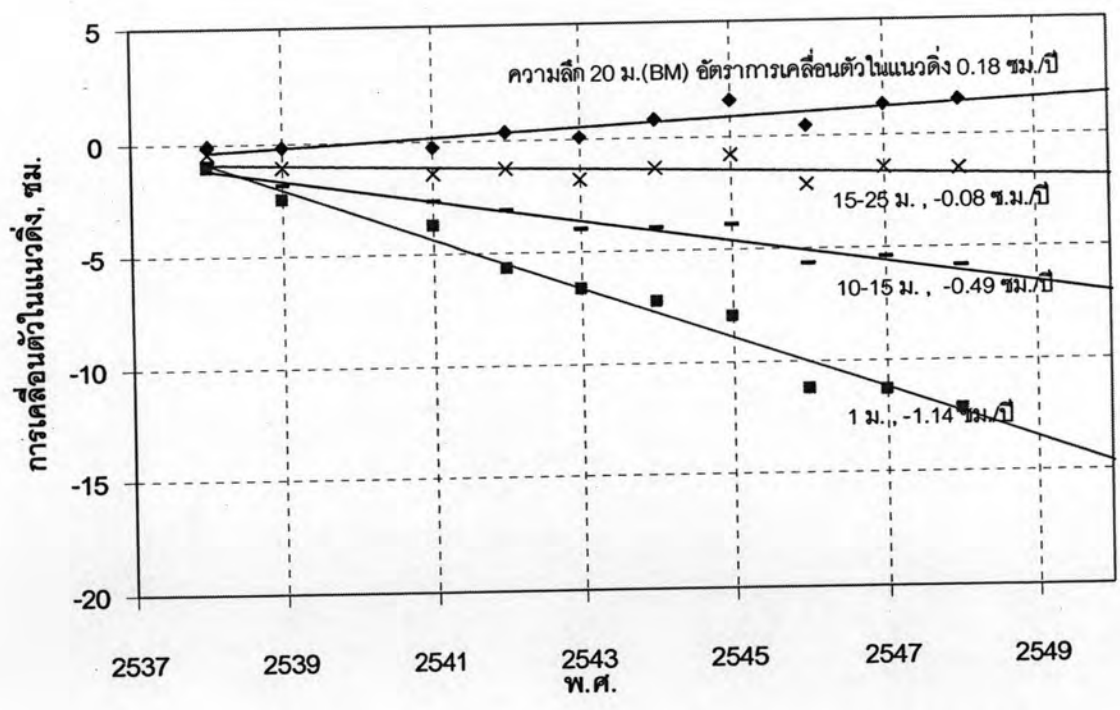
จากข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของดินเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลที่ได้นำมาวิเคราะห์หากราฟโดยการเฉลี่ยข้อมูลการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของหมุดหลักฐานต่างๆ ตามพื้นที่ที่แบ่งไว้ตามหัวข้อ 3.1 แล้วนำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งกับปีที่ทำการบันทึกข้อมูล โดยพิจารณาถึงแนวโน้ม (Trend) ของการเคลื่อนตัว โดยรวมพบว่าแนวโน้มของการเคลื่อนตัวในช่วง 5 ถึง 8 ปี สุดท้ายเป็นไปในทางเดียวกันจึงลากเส้นตรงเฉลี่ย (Base fitted line) ผ่านข้อมูลการเคลื่อนตัวในช่วง 5 ถึง 8 ปี สุดท้ายเพื่อคาดการณ์การเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่จะเกิดขึ้นในอนาคต โดยกราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของแต่ละพื้นที่ที่ได้แสดงในรูปที่ 3.12 ถึง 3.21



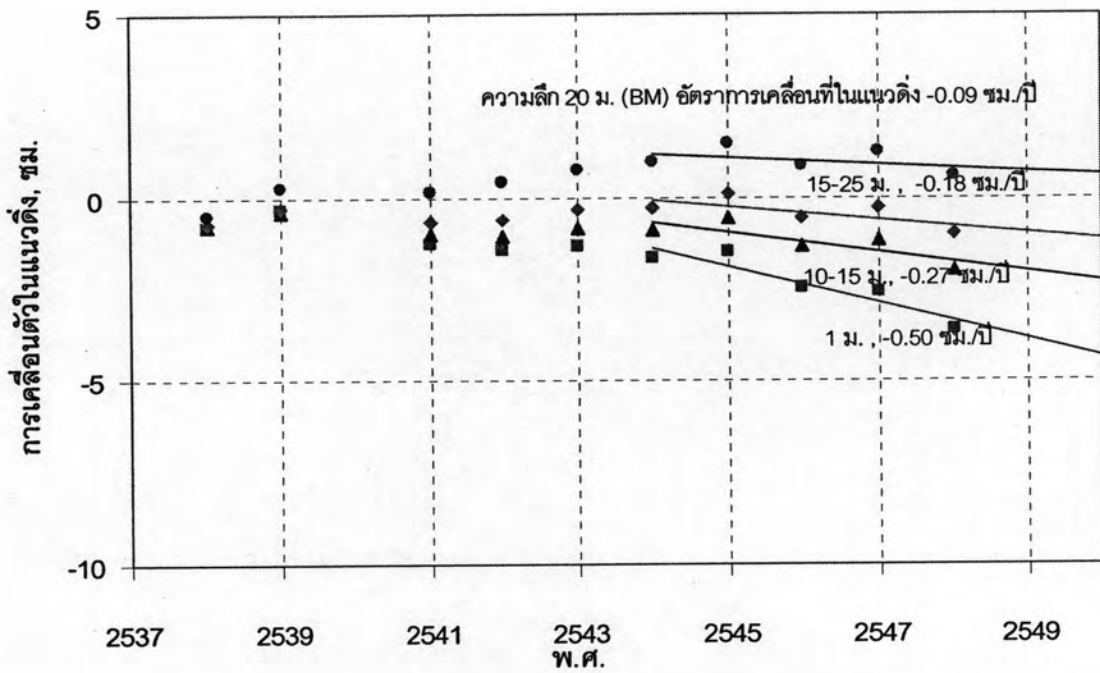
รูปที่ 3.12 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 1



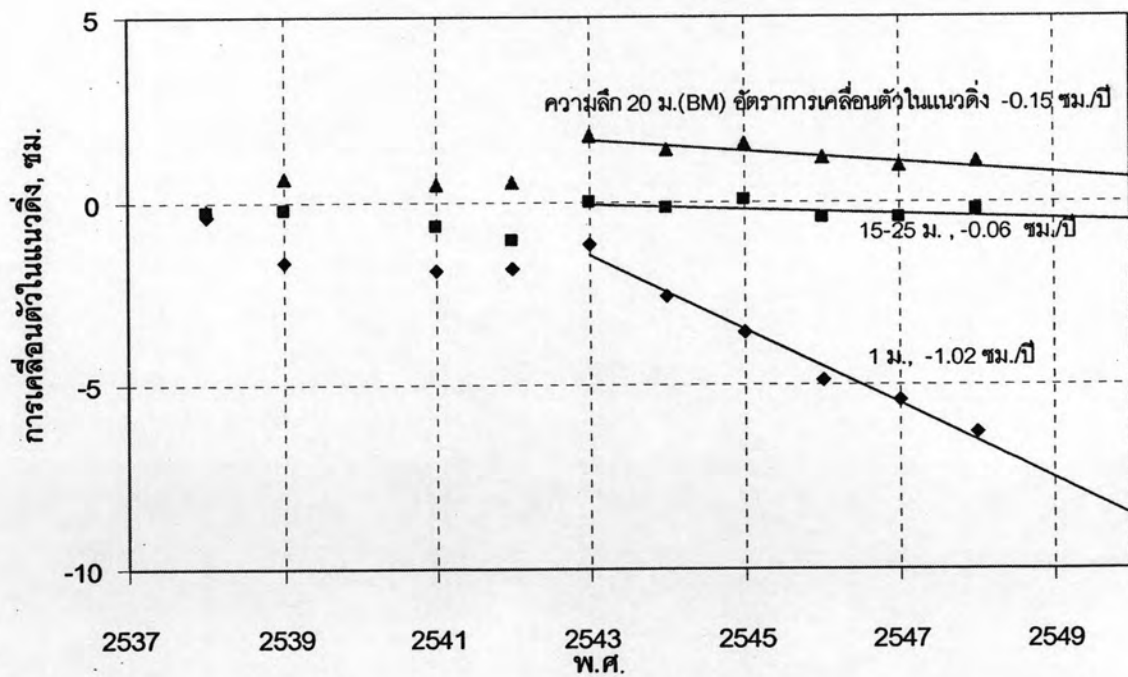
รูปที่ 3.13 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 2



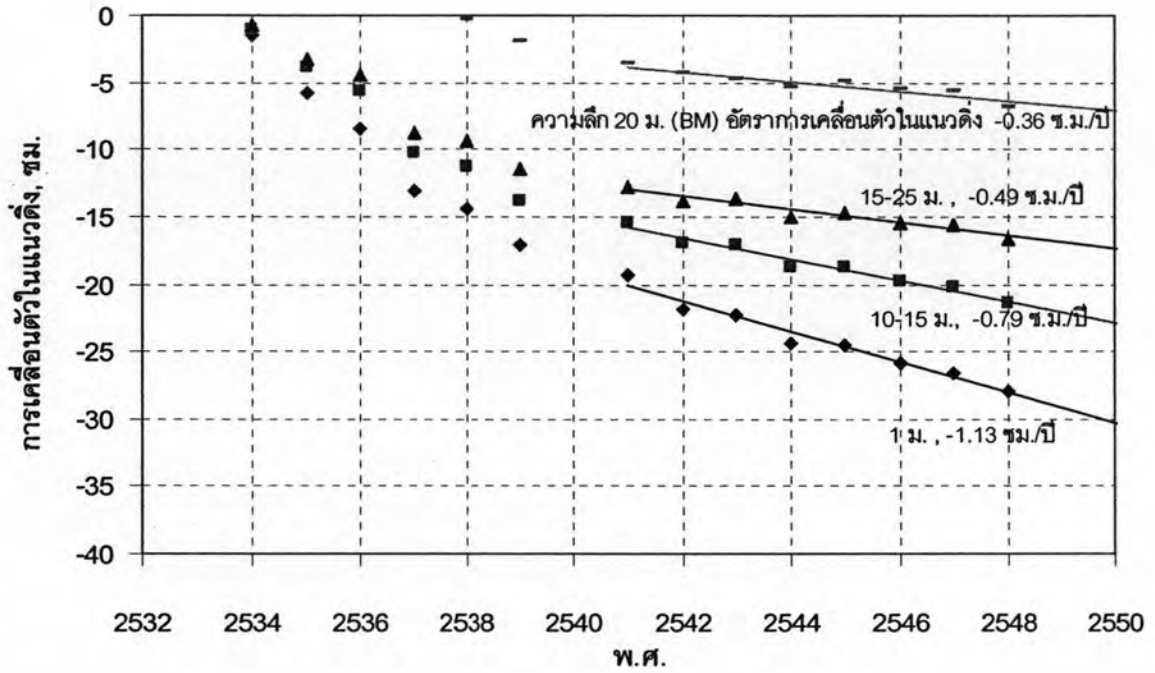
รูปที่ 3.14 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 3



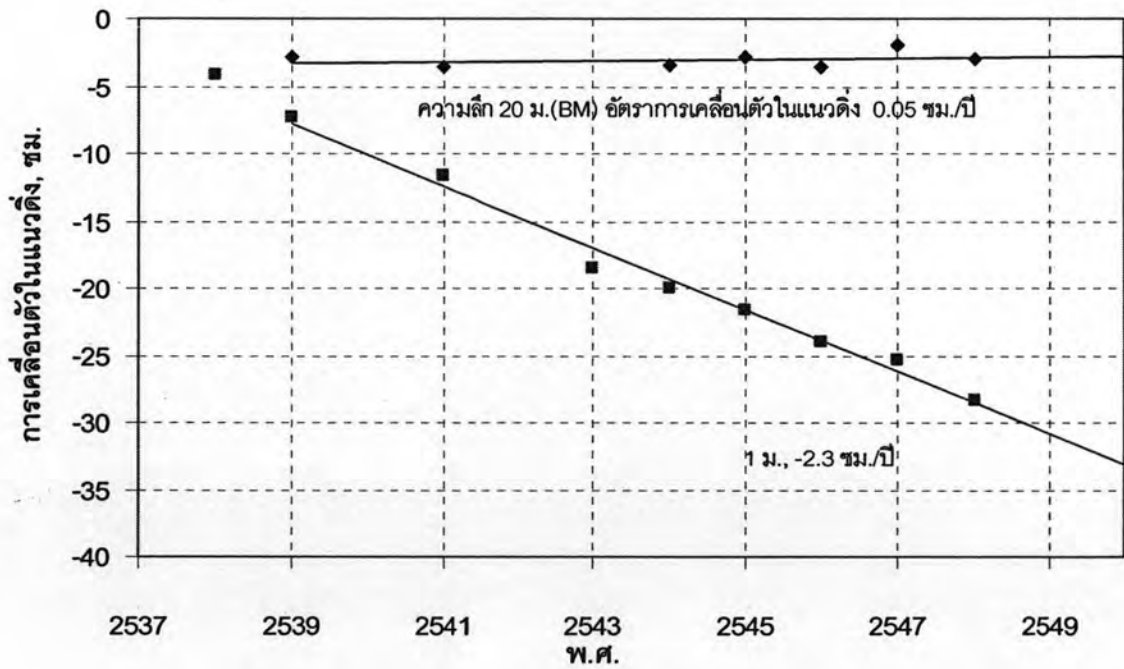
รูปที่ 3.15 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 4



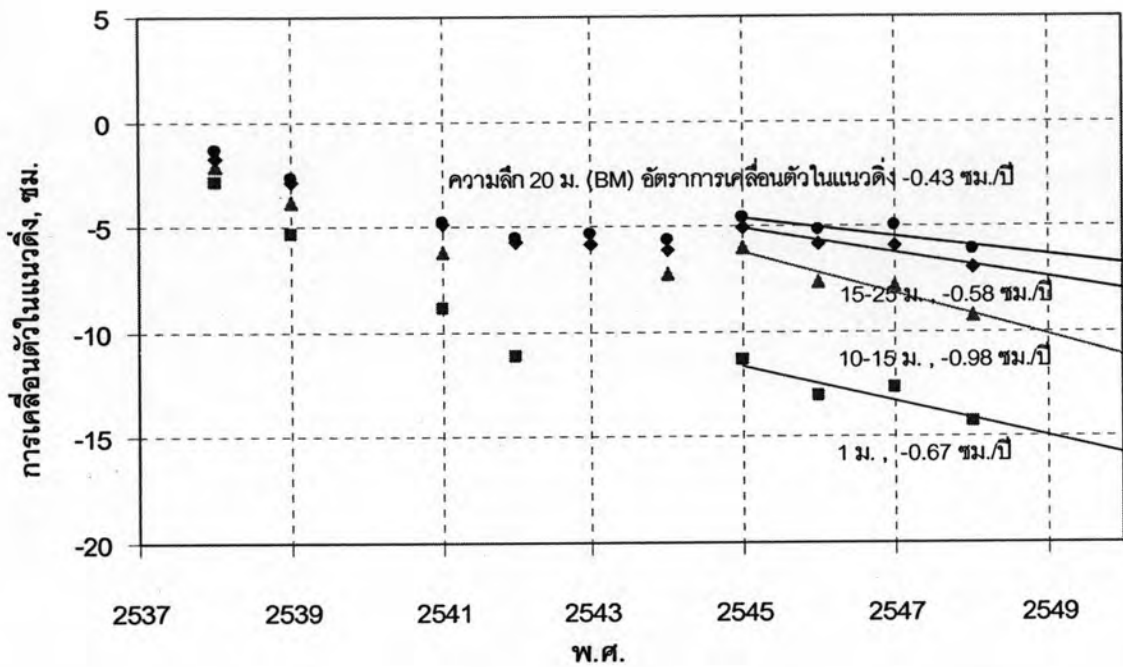
รูปที่ 3.16 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 5



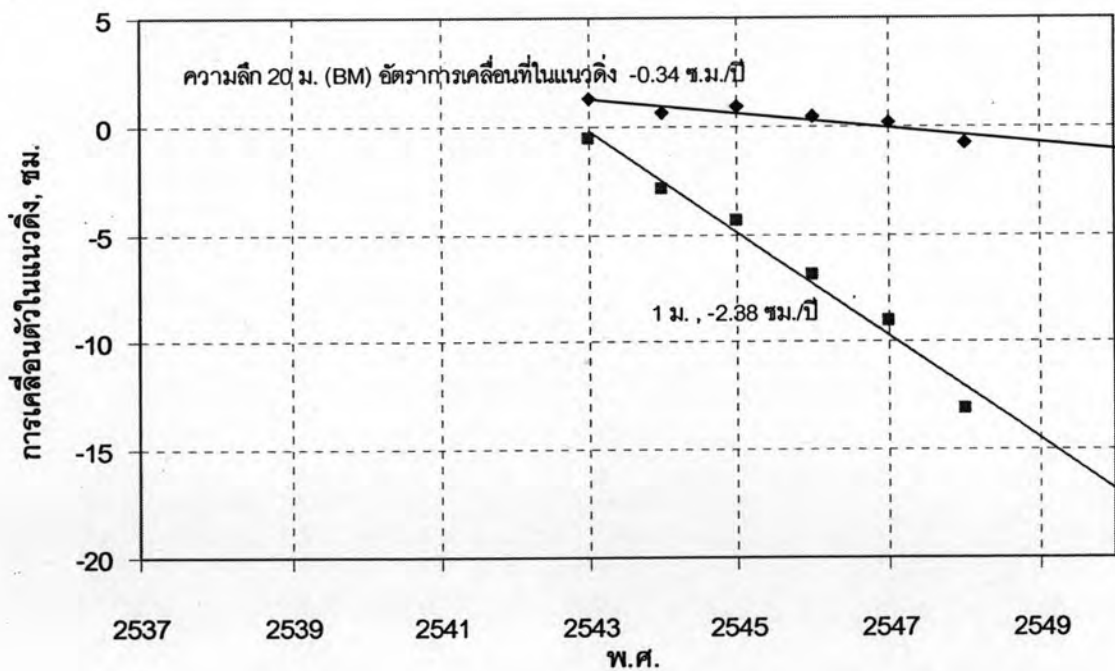
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวดิ่งของดินในพื้นที่ที่ 6



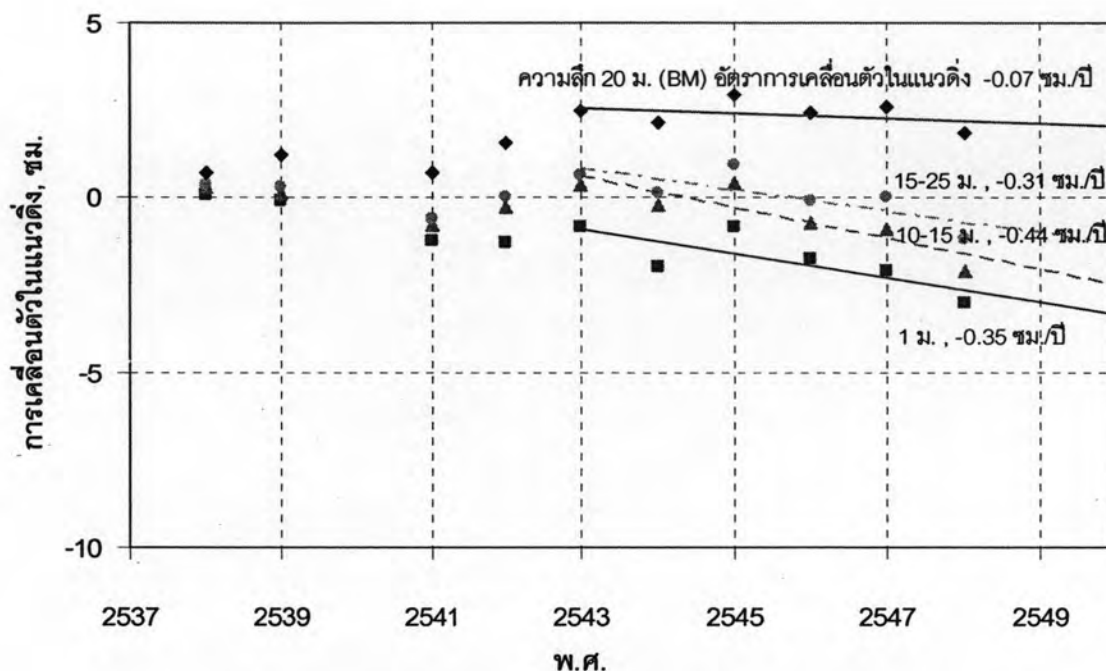
รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวดิ่งของดินในพื้นที่ที่ 7



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวดิ่งของดินในพื้นที่ที่ 8



รูปที่ 3.20 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวดิ่งของดินในพื้นที่ที่ 9



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงการเคลื่อนตัวเฉลี่ยในแนวตั้งของดินในพื้นที่ที่ 10

อัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสะสมที่ความลึกต่างๆ จากผิวดินสามารถสรุปได้ในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 สรุปอัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งโดยเฉลี่ยเนื่องจากการสูบน้ำบาดาลที่ความลึกต่างๆ

พื้นที่ที่	อัตราการเคลื่อนตัวในแนวตั้งสะสมที่ความลึกต่างๆ จากผิวดิน, ซม./ปี			
	1 ม.	10-15 ม.	15-25 ม.	20 ม. (BM)
1	-1.26	-0.37	-0.09	-0.08
2	-0.59	-0.5	-	-0.32
3	-1.14	-0.49	-0.08	0.18
4	-0.50	-0.27	-0.18	-0.09
5	-1.02	-	-0.07	-0.15
6	-1.13	-0.79	-0.49	-0.36

7	-2.30	-	-	0.05
8	-0.83	-0.98	-0.58	-0.43
9	-2.38	-	-	0.34
10	-0.35	-0.44	-0.31	-0.07

หมายเหตุ BM คือหมวดหลักฐาน (Benchmark)
 อัตราการเคลื่อนตัวที่มีค่าเป็นลบ (-) หมายถึง การทรุดตัว (Settlement)
 อัตราการเคลื่อนตัวที่มีค่าเป็นบวก (+) หมายถึง การยกหรือลอยตัว (Heave)

3.3 การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการวิเคราะห์ปัญหาการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้างการก่อสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินในแต่ละรูปแบบด้วย FEM

การวิเคราะห์ปัญหาการทรุดตัวด้วย FEM โดยโปรแกรม Plaxis เนื่องจากโปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายและมีงานวิจัยรองรับหลายงาน โดยโปรแกรมถูกพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกในปี ค.ศ. 1974 โดย Pieter Vermeer จาก Delft University of Technology โดยมีขั้นตอนในการจำลองการก่อสร้างโครงสร้างของท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินแยกแต่ละรูปแบบการก่อสร้างพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ที่จะได้มีดังนี้

3.3.1 Pipe jacking ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนแรกเป็นขั้นตอนก่อนการก่อสร้างในการจำลองการก่อสร้างนั้นจะมีการใสน้ำหนักบรรทุกทุกครั้งที่ 1 ตันต่อตารางเมตรบนผิวดินแล้วปล่อยให้มีการอัดตัวคายน้ำเมื่อการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุด (ในการวิเคราะห์สมมุติว่าการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดเมื่อค่าแรงดันน้ำในโพรงที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรง (Δu) เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของ Δu ที่เกิดขึ้นทั้งหมดหลังจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงจากขั้นตอนการก่อสร้างก่อนทำการอัดตัวคายน้ำ) จะทำการตัดท่อ (Jacking) แล้วขุดดินที่อยู่ในท่อออกแล้วปล่อยให้มีการทรุดตัวเนื่องจากการก่อสร้างจริงจะมีระยะเวลาช่วงหนึ่งก่อนทำการฉีดอัดด้วยน้ำปูนแล้วปล่อยให้เกิดการอัดตัวคายน้ำอีกครั้งหนึ่ง ในการขุดเจาะอุโมงค์สำหรับงาน Pipe jacking สมมุติว่าการสูญเสียปริมาตร (Volume loss) ในการก่อสร้างเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนมีทั้งหมด 6 ขั้นตอนได้แก่

- ก่อนการก่อสร้าง (Preconstruction)

- การดันท่อ (Jacking)
 - การขุดดินออก (Excavation)
 - การท่อดั้วระหว่างการก่อสร้าง (Setting)
 - การฉีดน้ำปูนภายในท่อ (Grouting)
 - การอัดตัวคายน้ (Consolidation)
- } Undrained analysis
- } Drained analysis

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis จะพิจารณาค่าการท่อดั้วสูงสุด (Maximum displacement) ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด (Maximum axial force) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด (Maximum bending moment) และค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear force) โดยผลการวิเคราะห์จะถูกแบ่งกลุ่มตามผลการจำแนกชั้นดิน 10 พื้นที่การแบ่งกลุ่ม ขนาดของท่อแตกต่างกัน 7 ขนาด และรวมถึงระดับความลึกของการก่อสร้างที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

3.3.2 Horizontal Directional Drilling (HDD) ขั้นตอนการจำลองการก่อสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

ขั้นตอนก่อนการก่อสร้างในการจำลองการก่อสร้างนั้นจะมีการใส่น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 ตันต่อตารางเมตรบนผิวดินแล้วปล่อยให้มีการอัดตัวคายน้เมื่อการอัดตัวคายน้สิ้นสุด (ในการวิเคราะห์สมมุติว่าการอัดตัวคายน้สิ้นสุดเมื่อค่าแรงดันน้ำในโพรงที่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรง (Δu) เหลือ 10 เปอร์เซ็นต์ของ Δu ที่เกิดขึ้นทั้งหมดหลังจากการเปลี่ยนแปลงของหน่วยแรงจากขั้นตอนการก่อสร้างก่อนทำการอัดตัวคายน้) จะทำการดันท่อ (Jacking) แล้วขุดดินที่อยู่ในท่อออกแล้วปล่อยให้มีการท่อดั้วเนื่องจากการก่อสร้างจริงจะมีระยะเวลาช่วงหนึ่ง (ในการก่อสร้างด้วยวิธี HDD นั้นไม่มีการฉีดน้ำปูนเข้าไปในท่อ) แล้วปล่อยให้เกิดการอัดตัวคายน้อีกครั้งหนึ่ง ในการขุดเจาะอุโมงค์สำหรับงาน HDD สมมุติว่าการสูญเสียปริมาตร (Volume loss) ในการก่อสร้างเป็น 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดของท่อ ซึ่งสามารถสรุปเป็นขั้นตอนมีทั้งหมด 5 ขั้นตอนได้แก่

- ก่อนการก่อสร้าง (Preconstruction)
 - การดันท่อ (Jacking)
 - การขุดดินออก (Excavation)
 - การท่อดั้วระหว่างก่อสร้าง (Setting)
 - การอัดตัวคายน้ (Consolidation)
- } Undrained analysis
- } Drained analysis

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis จะพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด (Maximum displacement) ค่าแรงในแนวแกนสูงสุด (Maximum axial force) ค่าโมเมนต์ดัดสูงสุด (Maximum bending moment) และค่าแรงเฉือนสูงสุด (Maximum shear force) โดยผลการวิเคราะห์จะถูกแบ่งกลุ่มตามผลการจำแนกชั้นดิน 10 พื้นที่การแบ่งกลุ่ม ชนิดของโครงสร้างที่แตกต่างกัน 3 ชนิด และรวมถึงระดับความลึกของการก่อสร้างที่แตกต่างกัน 5 ระดับ

3.3.3 การขุดเปิดหน้าดิน (Open Cut) เพื่อติดตั้ง Duct bank ชั้นตอนการจำลองการก่อสร้างสามารถอธิบายได้ดังนี้

การขุดเปิดหน้าดินเพื่อทำการติดตั้ง Duct bank วิธีการก่อสร้างจะขึ้นอยู่กับระดับความลึกของโครงสร้างโดยมีระดับความลึก 3 ระดับ ได้แก่ 1.5, 3, และ 5 เมตรจากผิวดิน โดยชั้นตอนการก่อสร้างแต่ละระดับได้แก่

กรณีที่ 1 ระดับความลึกที่ 1.5 เมตรจากผิวดิน

ในการก่อสร้าง Duct bank ที่ระดับความลึกนี้อาจจะไม่จำเป็นต้องมีการติดตั้งกำแพงกันดินซึ่งโดยส่วนมากจะใช้เข็มพืด (Sheet pile) ซึ่งชั้นตอนการก่อสร้างจะเริ่มจากการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 ตันต่อตารางเมตรกระทำที่ผิวดินแล้วให้เกิดการอัดตัวคายน้ำเมื่อสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำแล้วทำการขุดดินออก (Excavation) แล้วทำการก่อสร้าง Duct bank แล้วทำการถมกลับด้วยทรายจากนั้นให้มีการอัดตัวคายน้ำเกิดขึ้น สามารถสรุปได้ 5 ชั้นตอนได้แก่

- | | | |
|--------------------|---|---|
| Undrained analysis | { | ▪ ก่อนการก่อสร้าง (Preconstruction) |
| | | ▪ การขุดดินออก (Excavation) |
| | | ▪ ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน (Install Duct Bank) |
| | | ▪ ถมทรายอัดแน่น (Back Fill Sand) |
| Drained analysis | | ▪ การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) |

กรณีที่ 2 ระดับความลึกที่ 3 เมตรจากผิวดิน

ในการก่อสร้าง Duct bank ที่ระดับความลึกนี้จำเป็นต้องมีการติดตั้งเข็มพืด โดยชั้นตอนก่อนการก่อสร้างทำการให้น้ำหนักบรรทุกคงที่ 1 ตันต่อตารางเมตรที่ผิวดินแล้วทำการติดตั้งเข็มพืด การขุดดินชั้นแรกจะทำหลังจากติดตั้งเข็มพืดเสร็จและขุดที่ความลึก 1 เมตรจากผิวดินแล้วทำการติดตั้งค้ำยัน (Strut) การขุดครั้งที่สองจะขุดถึงระดับ 3 เมตรจากนั้นทำการก่อสร้าง Duct bank แล้วทำการถมกลับด้วยทรายถึงระดับของค้ำยันแล้วทำการถอดค้ำยัน

ออกแล้วทำการถมทรายกลับจนถึงระดับผิวดินแล้วถอดค้ำยันออกแล้วปล่อยให้เกิดการอัดตัวคายน้ำ การสิ้นสุดของการอัดตัวคายน้ำเหมือนกับการก่อสร้างที่ความลึก 1.5 เมตร ซึ่งสามารถสรุปได้ 11 ขั้นตอนได้แก่


- | | | |
|--------------------|---|--|
| Undrained analysis | } | ■ ก่อนการก่อสร้าง (Preconstruction) |
| | | ■ ปักเข็มพีต (Install Sheet Pile) |
| | | ■ ขุดดินชั้นที่ 1 (Excavation Layer 1) |
| | | ■ ติดตั้งค้ำยัน (Install Strut) |
| | | ■ ขุดดินชั้นที่ 2 (Excavation Layer 2) |
| | | ■ ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน (Install Duct Bank) |
| | | ■ ถมทรายอัดแน่นชั้นที่ 2 (Back Fill Sand Layer2) |
| | | ■ ถอดค้ำยัน (Remove Strut) |
| | | ■ ถมทรายอัดแน่นชั้นที่ 1 (Back Fill Sand Layer1) |
| | | ■ ถอดเข็มพีต (Remove Sheet Pile) |
| Drained analysis | | ■ การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation) |

กรณีที่ 3

ระดับความลึกที่ 5 เมตรจากผิวดิน

ในการก่อสร้าง Duct bank ที่ระดับความลึกมีความคล้ายกับการก่อสร้างที่ความลึก 3 เมตรแต่จำเป็นต้องมีค้ำยันสองชั้นซึ่งชั้นที่สองจะติดตั้งที่ระดับความลึก 3 เมตรจากผิวดิน และการถมทรายกลับจะทำสามครั้งในครั้งแรกจะถมจากพื้น Duct bank มาถึงระดับค้ำยันชั้นที่สอง แล้วทำการถอดค้ำยันชั้นที่สองออกแล้วถมทรายถึงค้ำยันชั้นแรกแล้วถอดค้ำยันชั้นแรกออกจึงจะถมทรายถึงผิวดิน ซึ่งสามารถสรุปได้ 15 ขั้นตอนได้แก่

- | | | |
|--------------------|---|--|
| Undrained analysis | } | ■ ก่อนการก่อสร้าง (Preconstruction) |
| | | ■ ปักเข็มพีต (Install sheet pile) |
| | | ■ ขุดดินชั้นที่ 1 (Excavations layer 1) |
| | | ■ ติดตั้งค้ำยัน 1 (Install strut 1) |
| | | ■ ขุดดินชั้นที่ 2 (Excavations layer 2) |
| | | ■ ติดตั้งค้ำยัน 2 (Install strut 2) |
| | | ■ ขุดดินชั้นที่ 3 (Excavation layer 3) |
| | | ■ ก่อสร้างโครงสร้างใต้ดิน (Install Duct Bank) |
| | | ■ ถมทรายอัดแน่นชั้นที่ 3 (Back Fill Sand Layer3) |

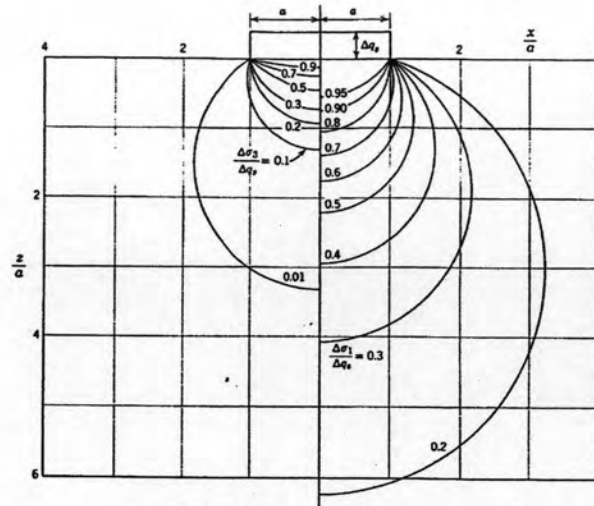
Undrained analysis		■ ถอดค้ำยัน 2 (Remove Strut 2)
		■ ถมทรายอัดแน่นชั้นที่ 2 (Back Fill Sand Layer2)
		■ ถอดค้ำยัน 1 (Remove Strut 1)
		■ ถมทรายอัดแน่นชั้นที่ 1 (Back Fill Sand Layer1)
Undrained analysis	■ ถอดเข็มพืด (Remove Sheet Pile)	
Drained analysis	■ การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)	

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Plaxis จะพิจารณาค่าการทรุดตัวสูงสุด (Maximum displacement) ค่าหน่วยแรงสูงสุดในแนวราบและแนวตั้ง (Maximum horizontal และ vertical stress) โดยผลการวิเคราะห์จะถูกแบ่งกลุ่มตามผลการจำแนกชั้นดิน 10 พื้นที่การแบ่งกลุ่ม ขนาดของโครงสร้าง Duct bank ที่แตกต่างกัน 6 ขนาด และรวมถึงระดับความลึกของการก่อสร้างที่แตกต่างกัน 3 ระดับ

3.4 ตัวอย่างการคำนวณค่าการทรุดค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งโดยการคำนวณด้วยมือ

3.4.1 การประมาณการทรุดตัวทันทีทันใด

ใช้ทฤษฎีอีลาสติก (Elastic theory) โดยใช้สมการของ Christian และ Carrier (1978) สำหรับดินที่มีความเชื่อมแน่น (Cohesive soil) และระดับที่ต่ำสุดที่อยู่ใต้ฐานรากที่ใช้ในการพิจารณาค่าการทรุดตัว Tomlinson และ Boorman (1986, 1995) ได้อ้างถึง EC 7 (Eurocode No. 7) ว่าเมื่อมีน้ำหนักกระทำ (q) กระทำที่ความลึกใดๆ ระดับที่ต่ำสุดที่อยู่ใต้น้ำหนักนั้นที่ใช้ในการพิจารณาค่าการทรุดตัวคือระดับความลึกที่มีค่า 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักกระทำ ($0.2q$) แต่เมื่อดินมีความสามารถในการอัดตัวสูงควรพิจารณาที่ความลึกมากกว่านั้น ดังนั้นในการวิเคราะห์ครั้งนี้จึงเลือกใช้ที่ $0.1q$ ซึ่งคือที่ความลึกเท่ากับ 6.5 เท่าของความกว้างที่สั้นของฐานราก (B) หรือ 6.5B สำหรับน้ำหนักกระทำเป็นแนวยาว (Strip load) ดังแสดงในรูปที่ 3.22 สำหรับคุณสมบัติของชั้นดินในเขตกรุงเทพฯ และปริมาตรความลึก 6.5B นี้อาจกระจายตัวผ่านชั้นดินต่างชนิดกันดังนั้นในการคำนวณจะทำการ Superposition เพื่อหาค่าการทรุดตัวที่เกิดขึ้นจากชั้นดินต่างๆ



รูปที่ 3.22 กระเปราะความเค้นที่เพิ่มขึ้นในกรณีน้ำหนักแบบสม่ำเสมอกระทำเป็นแนวยาว

(Lambe และ Whitman, 1979)

ตัวอย่างการคำนวณการหาค่าการทรุดตัวแบบทันทีทันใด ของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1

ขนาดท่อ (B)	=	0.8	m
รัศมีของอุโมงค์	=	0.4	m
ความลึกของPipe (D)	=	4	m
น้ำหนักของดินที่ขุดออก	=	1.053	t/m ²
น้ำหนักของโครงสร้าง	=	1.190	t/m ²
น้ำหนักสุทธิ (q)	=	0.137	t/m ²
Poisson, ν	=	0.5	
E_d	=	430	t/m ²
6.5 B	=	5.2	m
ระดับของ 0.1q จากกันหุลุม	=	9.2	m
H	=	5.2	m
D/B	=	5	
H/B	=	6.5	
จากกราฟ D/B & μ_0	ได้ μ_0	=	0.88
H/B & $\mu_{1(L/B=1)}$	ได้ μ_1	=	1.16
ρ_e	=	0.0003	m
ค่าการทรุดตัวแบบทันที ทั้งหมดมีค่าเท่ากับ		0.0003	m

3.4.2 การประมาณการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ

ตัวอย่างการหาค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1 ได้แสดงในตารางที่ 3.7
 ตารางที่ 3.7 การหาค่าการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำของท่อ Pipe jacking ของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1

Soil		Depth		ΔL	H_{mid}	Elevation		Unit	$\sigma'_{v [mid]}$	z	$\Delta\sigma$ (3 : 1)	CR	RR	OCR	$\Delta\sigma + \sigma'_{v}$	σ_p	ρ_c
		from	to			from	to										
Layer	Type	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[t/m ³]	[t/m ²]	[m]	[t/m ²]				[t/m ²]	[t/m ²]	[m]
fill		0	1.5	1.5	0.75	0	-1.5	2.00	1.50	0	0			8.9	1.50	13.38	0
Soft to medium clay	Clay	1.5	3	1.5	2.25	-1.5	-3	1.676	3.01	0	0	0.307	0.051	4.5	3.01	13.54	0
Soft to medium clay	Clay	3	4	1	3.5	-3	-4	1.676	3.85	0	0	0.307	0.051	3.4	3.85	13.18	0
Soft to medium clay	Clay	4	4.5	0.5	4.25	-4	-4.5	1.676	4.36	0.25	0.113	0.307	0.051	3.0	4.47	13.22	0.0002844
Soft to medium clay	Clay	4.5	5	0.5	4.75	-4.5	-5	1.676	4.70	0.75	0.084	0.307	0.051	2.8	4.78	13.30	0.0001971
Soft to medium clay	Clay	5	5.5	0.5	5.25	-5	-5.5	1.676	5.04	1.25	0.067	0.307	0.051	2.7	5.10	13.39	0.0001466
Soft to medium clay	Clay	5.5	6	0.5	5.75	-5.5	-6	1.676	5.37	1.75	0.056	0.307	0.051	2.5	5.43	13.51	0.0001143
Soft to medium clay	Clay	6	6.5	0.5	6.25	-6	-6.5	1.676	5.71	2.25	0.048	0.307	0.051	2.4	5.76	13.63	9.204E-05
Soft to medium clay	Clay	6.5	7	0.5	6.75	-6.5	-7	1.676	6.05	2.75	0.042	0.307	0.051	2.3	6.09	13.76	7.595E-05
Soft to medium clay	Clay	7	7.5	0.5	7.25	-7	-7.5	1.676	6.39	3.25	0.037	0.307	0.051	2.2	6.43	13.90	6.388E-05
Soft to medium clay	Clay	7.5	8	0.5	7.75	-7.5	-8	1.676	6.73	3.75	0.033	0.307	0.051	2.1	6.76	14.04	5.457E-05
Soft to medium clay	Clay	8	8.5	0.5	8.25	-8	-8.5	1.676	7.06	4.25	0.030	0.307	0.051	2.0	7.09	14.19	4.72E-05
Soft to medium clay	Clay	8.5	9	0.5	8.75	-8.5	-9	1.676	7.40	4.75	0.028	0.307	0.051	1.9	7.43	14.33	4.127E-05
Soft to medium clay	Clay	9	9.2	0.2	9.1	-9	-9.2	1.676	7.64	5.1	0.026	0.307	0.051	1.9	7.67	14.43	1.511E-05
sum																	0.0011324

3.4.3 การประมาณการทรุดตัวขั้นที่สอง (Secondary consolidation, ρ_s)

ตัวอย่างการหาค่าการทรุดตัวขั้นที่สองของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1 ได้แสดงในตารางที่ 3.8

ตารางที่ 3.8 การหาค่าการทรุดตัวขั้นที่สองของท่อ Pipe jacking ของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 4 เมตรในพื้นที่ที่ 1

Soil		Depth		ΔL	H_{mid}	Elevation		Unit	$\sigma'_{v[mid]}$	z	$\Delta\sigma$	CR	RR	OCR	$\Delta\sigma + \sigma'_v$	C_α	ρ_s		
		from	to			from	to										wieght	(3 : 1)	10
Layer	Type	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[t/m ³]	[t/m ²]	[m]	[t/m ²]				[t/m ²]				
fill		0	1.5	1.5	0.75	0	-1.5	2.00	1.50	0	0			8.9	1.50	0.0000	0	0	0
Soft to medium clay	Clay	1.5	3	1.5	2.25	-1.5	-3	1.676	3.01	0	0	0.307	0.051	4.5	3.01	0.0020	0	0	0
Soft to medium clay	Clay	3	4	1	3.5	-3	-4	1.676	3.85	0	0	0.307	0.051	3.4	3.85	0.0020	0	0	0
Soft to medium clay	Clay	4	4.5	0.5	4.25	-4	-4.5	1.676	4.36	0.25	0.113	0.307	0.051	3.0	4.47	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	4.5	5	0.5	4.75	-4.5	-5	1.676	4.70	0.75	0.084	0.307	0.051	2.8	4.78	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	5	5.5	0.5	5.25	-5	-5.5	1.676	5.04	1.25	0.067	0.307	0.051	2.7	5.10	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	5.5	6	0.5	5.75	-5.5	-6	1.676	5.37	1.75	0.056	0.307	0.051	2.5	5.43	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	6	6.5	0.5	6.25	-6	-6.5	1.676	5.71	2.25	0.048	0.307	0.051	2.4	5.76	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	6.5	7	0.5	6.75	-6.5	-7	1.676	6.05	2.75	0.042	0.307	0.051	2.3	6.09	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	7	7.5	0.5	7.25	-7	-7.5	1.676	6.39	3.25	0.037	0.307	0.051	2.2	6.43	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	7.5	8	0.5	7.75	-7.5	-8	1.676	6.73	3.75	0.033	0.307	0.051	2.1	6.76	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	8	8.5	0.5	8.25	-8	-8.5	1.676	7.06	4.25	0.030	0.307	0.051	2.0	7.09	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	8.5	9	0.5	8.75	-8.5	-9	1.676	7.40	4.75	0.028	0.307	0.051	1.9	7.43	0.0020	0.000778	0.001265	0.001492
Soft to medium clay	Clay	9	9.2	0.2	9.1	-9	-9.2	1.676	7.64	5.1	0.026	0.307	0.051	1.9	7.67	0.0020	0.000311	0.000506	0.000597
sum																	0.008089	0.01316	0.015518

3.4.4 การหาค่า t_{op} (End of primary consolidation)

เนื่องจากการประมาณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งด้วย FEM ในโปรแกรม Plaxis ไม่สามารถหาได้จึงต้องหาด้วยสมการ 2.11 โดยใช้ข้อมูลชั้นดินที่มีอยู่ สมมุติฐานที่ใช้การเปลี่ยนแปลงของความดันน้ำในโพรงเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงในหน่วยแรง (Δu) ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้ให้มีการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดที่ 90 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากการกระจายของน้ำในโพรงเป็นไปได้ยากมากที่น้ำในโพรงจะกระจายได้หมด

Terzaghi, Peck และ Mesri (1996) กล่าวไว้ว่าค่า c_v ของดินว่าในช่วง recompression มีค่าเป็น 2 ถึง 10 เท่าของ c_v ของชั้นดินในช่วง compression ในการวิเคราะห์ในครั้งนี้เลือกใช้ค่า c_v ของดินว่าในช่วง recompression มีค่าเป็น 10 เท่าของ c_v ของชั้นดินในช่วง compression และเนื่องจากวิธีการของ Terzaghi (1925) จำเป็นต้องใช้ค่า c_v เป็นค่าคงที่กับเวลากับความลึก ในการวิเคราะห์เลือกใช้การเฉลี่ยโดยน้ำหนักหมายถึง ถ้าหน่วยน้ำหนักผ่านชั้นดินไหนมากก็ใช้ค่า c_v ของชั้นดินนั้นมากโดยคิดเป็นอัตราส่วนตามความหนาของชั้นดิน ตัวอย่างการคำนวณท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตร ในพื้นที่ที่ 1 และรูปที่ 3.23 เป็นตัวอย่างตารางและรูปประกอบการคำนวณหาค่า t_{op} ของท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตรที่มีการก่อสร้างในพื้นที่ที่ 1

ตัวอย่างการคำนวณ ท่อ Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตรที่มีการก่อสร้างในพื้นที่ที่ 1

เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก (B)	=	0.8	m
ความลึกที่ $0.1q$ (= 6.5B)	=	5.2	m
จากรูปที่ 3.23			
X1	=	4	m
X2	=	1.2	m
หาสัดส่วนของความหนาชั้นดินจากความลึกทั้งหมด 6.5B			
Ratio _{x1}	=	4 / (6.5B)	
	=	4 / 5.2	
	=	0.77	
Ratio _{x2}	=	0.23	

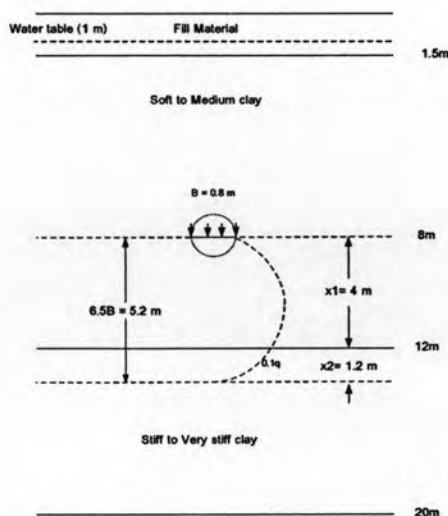
หาค่า c_v เฉลี่ยโดยสมมุติว่ากระเปาะความเค้นที่ $0.1q$ ผ่านชั้นดินเหนียวมากก็ใช้ค่า c_v นั้นมากตามอัตราส่วน จะได้ว่า

$$\begin{aligned}
 C_{vave1} &= \text{Ratio}_{x1} * c_{v1} \\
 &= 0.77 * 13.23 \\
 &= 10.17 \text{ m}^2/\text{year} \\
 C_{vave2} &= 4.43 \text{ m}^2/\text{year} \\
 \text{ค่า } c_v \text{ ที่จะนำไปใช้ในการวิเคราะห์} &= C_{vave1} + C_{vave2} \\
 &= 10.17 + 4.43 \\
 &= 14.60 \text{ m}^2/\text{year} \\
 t_{eop} &= T_v H^2 / c_v \\
 &= 0.848 * 5.2^2 / 14.6 \\
 &= 1.57 \text{ year}
 \end{aligned}$$

การคำนวณหาเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำสามารถสรุปได้ ดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.9 สรุปค่าในการคำนวณหาเวลาสิ้นสุดการอัดตัวคายน้ำ

Layer	LL [%]	c_v [m ² /year]	x_i [m]	ratio	C_{vave} [m ² /year]	t_{eop} [year]
1	64.18	13.23	4.0	0.77	10.17	1.57
2	53.11	19.18	1.2	0.23	4.43	
Sum			5.2	1.00	14.60	



รูปที่ 3.23 ตัวอย่างประกอบกรคำนวณหาค่า t_{eop} ของท่อ 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตรในพื้นที่ที่ 1

3.4.5 การทรุดตัวเนื่องจากการรบกวนดิน และการสูญเสียปริมาตร (Volume loss)

เมื่อดินถูกรบกวนในระหว่างการก่อสร้างอุโมงค์บริเวณที่ดินจะถูกรบกวนมากที่สุดคือขอบของอุโมงค์หรือหลุมเจาะ และการรบกวนนี้จะลดลงตามระยะทางจากขอบของอุโมงค์หรือหลุมเจาะ ในการการวิเคราะห์ด้วย FEM ไม่สามารถคิดผลจากการรบกวนดินได้ นอกจากจะเปลี่ยนคุณสมบัติของดินให้มีความสามารถในการยุบตัวได้มากขึ้น เนื่องจากข้อมูลเกี่ยวกับขนาดของการเปลี่ยนแปลงนี้มีจำนวนจำกัดมาก ในการคำนวณจึงสมมุติให้ดินถูกรบกวนมีความหนาประมาณ 2.5 ซม. โดยรอบบริเวณอุโมงค์หรือหลุมเจาะที่ขุดเจาะด้วยวิธี Pipe jacking และ HDD

ในการวิเคราะห์ครั้งนี้สมมุติให้มีการยุบตัวเชิงปริมาตร (Volumetric strain) ประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์สำหรับการก่อสร้างด้วยวิธี Pipe jacking และ HDD และหาค่าการทรุดตัวได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ความหนาของชั้นดินที่ถูกรบกวน} &= 2.5 \text{ ซม.} \\ \text{ค่าการยุบตัวเชิงปริมาตร} &= 0.025 \cdot 8 / 100 \\ &= 0.002 \text{ ม.} \end{aligned}$$

ส่วนในวิธี Open cut ถือให้การอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดภายในระยะเวลาทำการก่อสร้าง เนื่องจากดินบริเวณที่ถูกรบกวนค่อนข้างบางทำให้การอัดตัวคายน้ำในชั้นต้น (Primary consolidation) สิ้นสุดค่อนข้างเร็ว จึงถือว่าการอัดตัวคายน้ำสิ้นสุดในระยะเวลาทำการก่อสร้าง ดังแสดงในตัวอย่างการหาค่า t_{eop} สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯที่มีความหนา 2.5 ซม. แบบ Single drain โดยมี สรุจัตถ (2540) ได้รวบรวมค่า c_v ในสนามมีค่าประมาณ 150-400 ซม.²/วัน

ตัวอย่างการคำนวณ t_{eop} สำหรับดินเหนียวกรุงเทพฯ มีความหนา 2.5 ซม. แบบ Single drain เมื่อสมมุติให้ระดับการอัดตัวคายน้ำ (Degree of consolidation, U_z) เกิดขึ้น 90 เปอร์เซ็นต์ และ c_v ในสนามมีค่าประมาณ 150-400 ซม.²/วัน

$$\begin{aligned} \text{สำหรับ } c_v &= 150 \text{ ซม.}^2/\text{วัน} \\ \text{จาก } t_{eop} &= T_v H^2 / c_v \\ &= 0.848 \cdot 2.5^2 / 150 \\ &= 0.85 \text{ ชั่วโมง} \\ \text{สำหรับ } c_v &= 400 \text{ ซม.}^2/\text{วัน} \text{ จะได้ค่า } t_{eop} = 0.32 \text{ ชั่วโมง} \end{aligned}$$

ส่วนการทรุดตัวเนื่องจากการสูญเสียปริมาตร (Volume loss) ในหัวข้อที่ 3.3 ได้กล่าวไว้แล้วว่าในโปรแกรม Plaxis สามารถทำการคิดผลที่เกิดจากการสูญเสียปริมาตรได้ แต่ในการคำนวณด้วยมือเราต้องแยกคิดการทรุดตัวเนื่องจากการสูญเสียปริมาตรโดยสมมุติว่าการก่อสร้าง

ด้วยวิธี Pipe jacking และ HDD เกิดขึ้น 1 เปอร์เซ็นต์ของพื้นที่หน้าตัดท่อเนื่องจากการก่อสร้างที่มีการควบคุมการก่อสร้างที่ดีและอุปกรณ์ที่ใช้มีประสิทธิภาพสูงจึงสมมติใช้ค่านี้ โดยสามารถหาได้ว่าเกิดการทรุดตัวขึ้นเท่ากับ $0.0025d$ เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของท่อมีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

3.5 การประยุกต์ใช้ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้างสายไฟฟ้าใต้ดิน

3.5.1 การเคลื่อนตัวทั้งหมดของโครงสร้างในแนวตั้งที่ระยะเวลานาน (Long term condition)

การประมาณการทรุดตัวอันเนื่องมาจากน้ำหนักของโครงสร้างที่กระทำกับดินนั้น จะทำการคิดการทรุดตัวที่เกิดขึ้นแต่ละโครงสร้างแยกกัน จากนั้นจะศึกษาการทรุดตัวที่แตกต่างกันของโครงสร้าง ในการวิเคราะห์การทรุดตัวดังกล่าวจะทำการวิเคราะห์ตามระยะเวลาใช้งาน (Service life) 10 ปี 30 ปี และ 50 ปี ซึ่งจะเป็นการเอาผลการวิเคราะห์จากวิธีการ FEM ในการทรุดตัวแบบทันทีทันใดและการทรุดตัวแบบอัดตัวคายน้ำ ส่วนการทรุดตัวขึ้นที่สองจะใช้ผลจากการคำนวณที่ได้จากสมการของ Terzaghi พร้อมกับการทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาล ตัวอย่างการคำนวณการเคลื่อนตัวในแนวตั้งที่ Long term ของโครงสร้าง Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตร ที่ความลึก 8 เมตร ในพื้นที่ที่ 1 ดังแสดงในตารางที่ 3.10

ตารางที่ 3.10 ค่าการเคลื่อนตัวในแนวตั้งในเงื่อนไข Long term ของโครงสร้าง Pipe jacking ขนาด 0.8 เมตร ที่ความลึก 8 เมตรในพื้นที่ที่ 1

	Time [year]	Settlement [mm]	Dewatering settlement [mm]	Total [mm]
Immediate	0	-4.8	0.0	-4.8
EOP	1.57	-0.7	-12.4	-17.9
Design life	10	-7.1	-78.9	-91.5
	30	-11.4	-236.7	-253.5
	50	-13.3	-394.5	-413.3

หมายเหตุ การเคลื่อนตัวที่เป็น (-) และ (+) หมายถึงเกิดการทรุดตัวและลอยตัวขึ้นของโครงสร้าง ตามลำดับ และค่าการเคลื่อนตัวนี้ยังไม่รวมการทรุดตัวที่เกิดจากการรบกวนดิน

3.5.2 การหาค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้าง

เป็นการประยุกต์หาค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้างท่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินแต่ชนิดเมื่อมีการก่อสร้างเชื่อมต่อกับบ่อพัก เมื่อสมมุติว่าบ่อพักไม่มีการเคลื่อนตัวและระดับอ้างอิงการทรุดตัวของโครงสร้างใกล้เคียงกับพื้นของบ่อพักโดยจากการสมมุติครั้งนี้ การทรุดตัวที่เกิดจากการสูบน้ำบาดาลจะไม่นำมารวมด้วย นั้นหมายถึงเป็นการทรุดตัวของแต่ละโครงสร้าง โดยค่าการทรุดตัวแบบทันทีที่ทันใดและการอัดตัวคายน้ำจะได้จาก FEM ส่วนการทรุดตัวในระยะยาวจะได้จากสมการของ Terzaghi โดยตัวอย่างการคำนวณหาค่าการทรุดตัวได้แสดงการทรุดตัวของโครงสร้าง Pipe jacking ขนาด 0.6 เมตรที่ความลึก 8 เมตรในพื้นที่ที่ 1 ในตารางที่ 3.11

ตารางที่ 3.11 ค่าความแตกต่างการเคลื่อนตัวในแนวตั้งของโครงสร้างท่อ Pipe jacking ขนาด 0.8 เมตรที่ความลึก 8 เมตรในพื้นที่ที่ 1

	Time [year]	Settlement [mm]	Dewatering settlement [mm]	Total [mm]
Immediate	0		0.0	0.0
EOP	1.57	-1.1	0.0	-1.1
Design life	10	-7.1	0.0	-8.2
	30	-11.4	0.0	-12.4
	50	-13.3	0.0	-14.4

หมายเหตุ การเคลื่อนตัวที่เป็น - และ + หมายถึงเกิดการทรุดตัวและลอยตัวขึ้นของโครงสร้าง ตามลำดับ และการทรุดตัวที่แตกต่างจะไม่รวมค่าการทรุดตัวทันทีที่ทันใดด้วย เนื่องจากวิธีการก่อสร้างจริงการทรุดตัวจะนับจากการเชื่อมต่อบ่อร้อยสายไฟฟ้าใต้ดินเข้ากับบ่อพักเรียบร้อยแล้ว ยกเว้นการก่อสร้างด้วยวิธี Open cut