

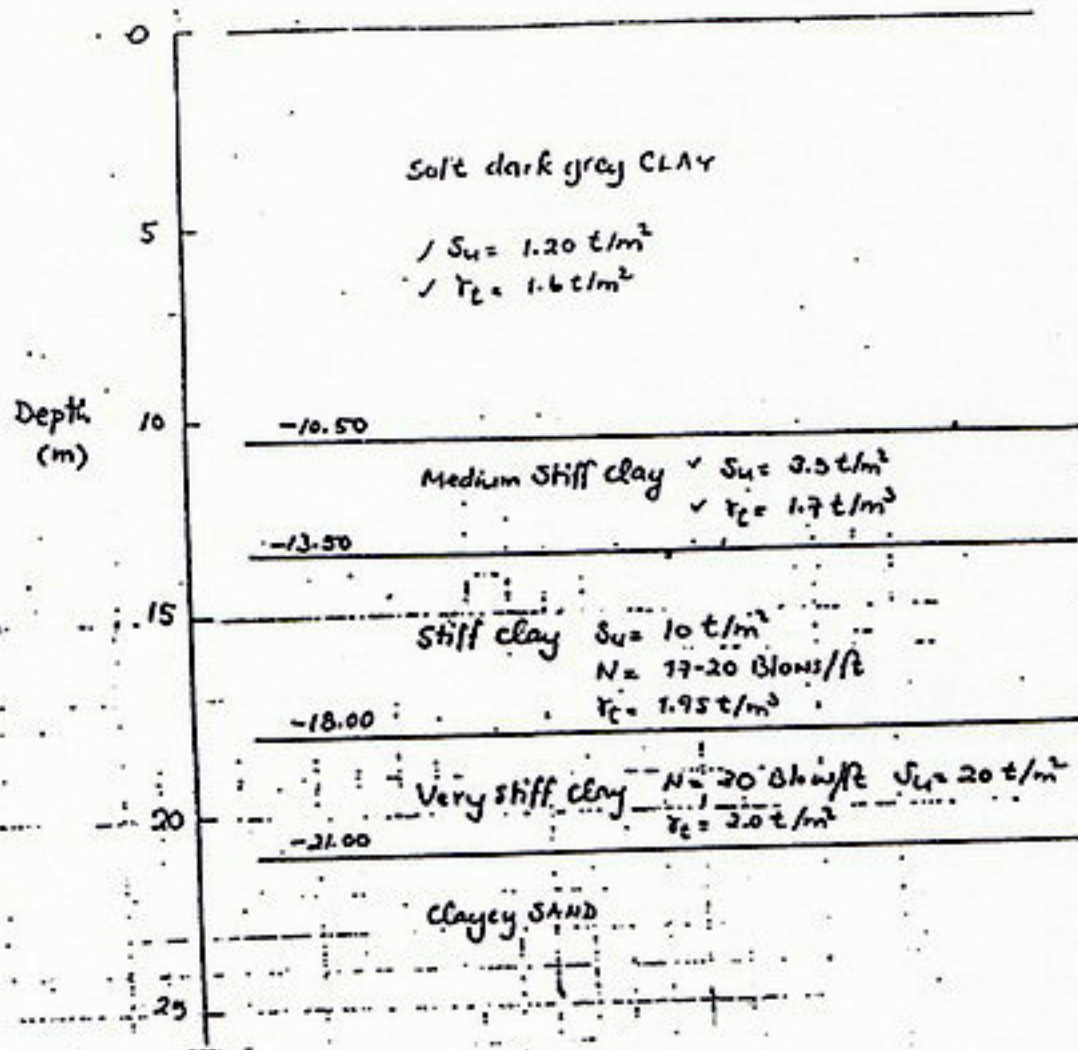
6 Sept 1993

0.5.1002.

Contents

	Page
1. Soil Data	1
2. Typical Excavation Process	2
3. Design of Sheet Pile Excavation System	3
4. Force in The Strut	4
5. Design of Wale	5
6. Design of strut	6
7. Design of Kingpost	6
8. Sheet Pile Deformation	8
9. References	8
Appendix A : Soil investigation Report	9
Appendix B: Construction Sequence	13
Appendix C : Detail of Reference	17

1. SOIL DATA



\* Note: The soil condition is based on the subsoil investigation carried out at Dentist Hospital, Chulalongkorn University, on. 03/09/92. The detail of boring is shown in Appendix.



### 3. Design of Sheet Pile Excavation System

3.1 Check Heave Effect (Use  $L = 16\text{m}$ ,  $H = 5.2\text{m}$ ,  $B_1 = 10.8\text{m}$ )

$$(0.11 + q) B_1 - 2S - \frac{\pi}{4} (0.7 q_u) \leq q_u B_1 \quad (\text{पासु संयुक्त})$$

$$\text{where } S = \frac{1}{2} q_u (4 - q_u / \delta)$$

$$q_u = \text{Unconfined compressive strength} = 2S_u$$

$$q = \text{Surcharge} = 2.0 \text{ t/m}^2$$

U1  $S_{u, \text{ave}}$

ave

$$\text{Average } S_u = \frac{(1.20 \times 10.5) + (3.5 \times 3) + (10 \times 2.3)}{16} = 3.0 \text{ t/m}^2 ; \delta_{\text{ave}} = 1.67 \text{ t/m}^2$$

$$S = \frac{1}{2} \times 2 \times 3 \left( 5.2 - \frac{2 \times 3}{1.67} \right) = 4.90 \quad (\text{संयुक्त संयुक्त})$$

$$\text{Therefore } (1.67 \times 5.2 + 2) \times 10.8 - (2 \times 4.90) - \left( \frac{\pi}{4} \times 10.8 \times 2 \times 3 \right) \leq 2 \times 3 \times 10.8$$

$$4.0 \leq 64.8$$

OK

Thus use sheet pile length = 16.0 m.

3.2 Check Section of Sheet Pile

- For Normal Bracing Sequence (See Construction Sequence in Appendix)

Use surcharge of  $2.0 \text{ t/m}^2$

$$\text{Therefore Bottom Stress} = \frac{H + q - 4S_u}{1.5(4.2) + 3} = \frac{4(1.2)}{1.5} = 7.12 \text{ t/m}^2 \quad (\text{Use SF} = 1.5 \text{ for } S_u)$$

$$\text{Maximum Moment} = \frac{1}{10} \times 7.12 \times (3.45)^2 = 8.5 \text{ t.m}$$

$$\text{Required Section Modulus} = \frac{8.5 \times 10^5}{1400} = 607 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Use sheet pile type III OK ( $Z = 2270 \text{ cm}^3/\text{m}$ )

- For after remove the strut case

Maximum depth  $\approx 2.5$  m

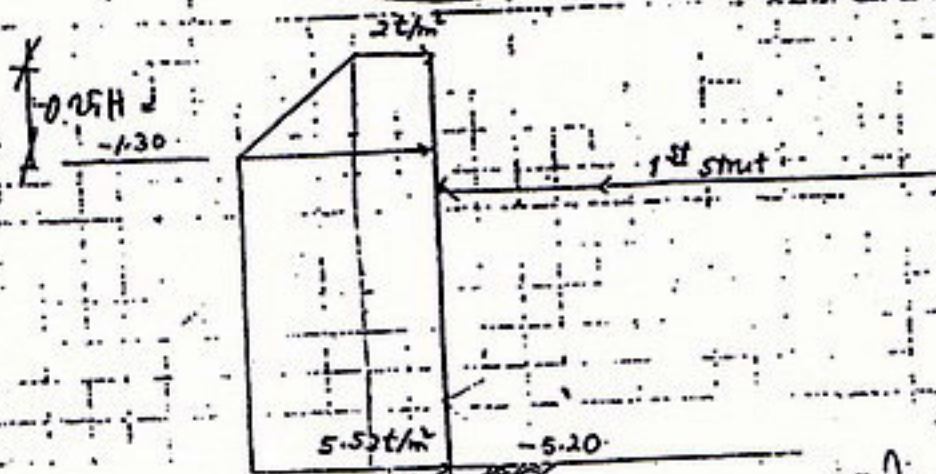
$$\text{Stress at bottom} = 2.8 \text{ t/m}^2 = 1.6(5.2) + 2 - 4(1.2)/1.15$$

$$\text{Maximum Moment} = 2.8 \times 2.5 \times \frac{2.5}{2} = 8.75 \text{ t-m}$$

$$\text{Required section Modulus} = 625 \text{ cm}^3/\text{m}$$

Use sheet pile type II OK ( $Z = 2270 \text{ cm}^3/\text{m}$ )

4. Force in the strut



$$2H + q - 4Su = (1.6 \times 5.2) + 2 - (4 \times 1.2) = 5.52 \text{ t/m} \quad (\text{undiminished } p_s = 2.8 \text{ t/m})$$

Vertical

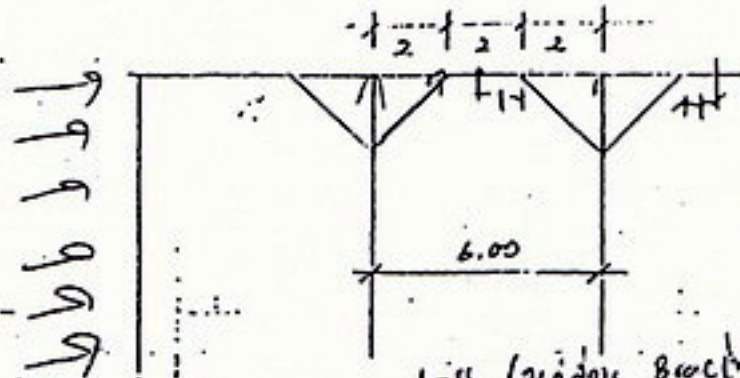
$$p_n = \gamma H \left[ 1 - \frac{qc}{\gamma H} \right] + q$$

$$\text{Force in the strut} = \frac{1}{2} \times 1.30 (2 + 5.52) + (2.9 \times 5.52) = 27 \text{ t/m}$$



### 5. Design of Wale (2. Axial Load + Bending Moment)

Assume Spacing of Strut = 6.00 m



$$\text{Moment} = \frac{1}{10} \times 27 \times 2^3 = 10.8 \text{ t-m}$$

For axial load  $P = (2 \times 27) = 54 \text{ tons}$  (Axial force due to the diagonal corner)

stress due to temperature change =  $0.00011 \times 5 \times 2.1 \times 10^6 = 116 \text{ Rsc}$

For strut design

Try WF 300x300x10x15 mm

$k = 0.00011$

$$\frac{P}{A} = \frac{54 \times 10^3}{119.8} = 451 \text{ Rsc}$$

$$\frac{M}{Z} = \frac{10.8 \times 10^5}{1360} = 794 \text{ Rsc}$$

Section Properties ( $\text{cm}^3$ )

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{451 + 116}{1415} + \frac{794}{1500} = 0.93 < 1.00 \text{ OK}$$

$$F_b = 0.66 F_y$$

If Try Spacing of 7.00 m

$$\frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} = \frac{518 + 116}{1393} + \frac{1038}{1500} = 1.17 > 1.00 \text{ Not OK}$$

Therefore Use Wale Size 300x300x10x15 mm

$$C_c = \sqrt{\frac{211^2 E}{F_y}}, \text{ restriction } F_y = 27.20 \text{ Rsc}$$

$$\text{By } 1010 \quad \frac{KL}{r} \leq C_c \quad \text{If } F_d = \frac{1 - \frac{1}{2} \left( \frac{KL}{r} \right)^2}{C_c}$$

$$F_y \left. \begin{aligned} & \frac{5}{16} + \frac{3}{8} \left( \frac{KL}{r} \right) - \frac{1}{16} \left( \frac{KL}{r} \right)^3 \\ & \frac{1}{16} \left( \frac{KL}{r} \right)^2 \end{aligned} \right\} \text{mit } F_y$$

$$\text{if } \frac{KL}{r} > C_c \quad \text{If } F_d = \frac{0.75 E}{23 \left( \frac{KL}{r} \right)^2}$$



## 6. Design of Strut (Direct axial load)

Assume Platform is separated from strut bracing, therefore loading in the strut is only the axial force

$$\Sigma P = 27 \times 6 = 162 \text{ tons}$$

Try WF 300x300x10x15 mm (94 kg)

$$P_A + P_{ec} = \frac{162 \times 10^3}{17.9 \times 1.3} + 116 = 1156 \text{ ksc}$$

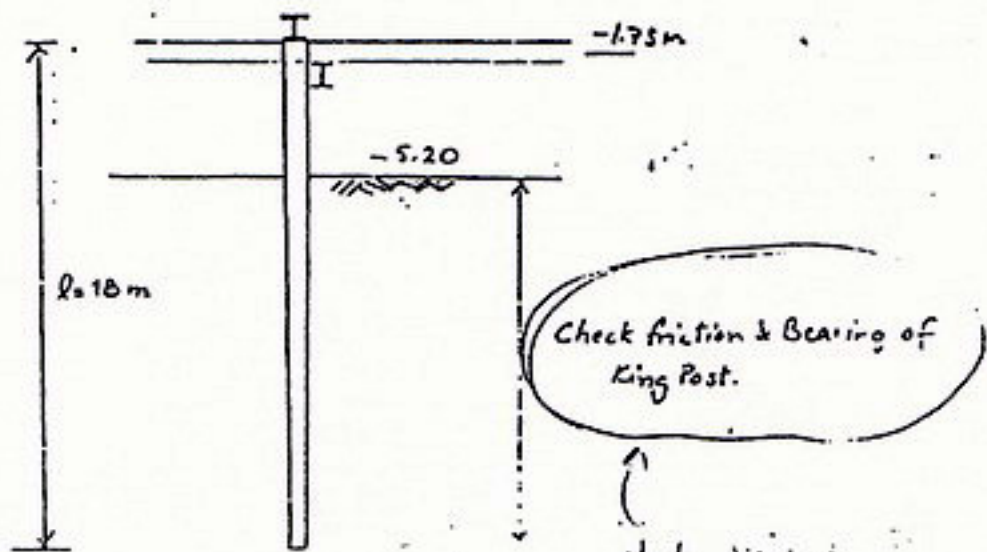
For X-axis,  $\frac{6.0 \times 100}{13.1} = 45.8 \Rightarrow F_{ax} = 1210 \text{ ksc} > 1156 \text{ ksc OK}$

Therefore can use WF 300x300x10x15x94 kg for strut @ 6.0m.

## 7. Design of King Post

Use surcharge = 2.5 t/m<sup>2</sup>

$$\text{Loading on Kingpost} = 2.5 \times \frac{6}{2} \times 6 = 45 \text{ ton}$$



### E. Sheet Pile Deformation

The sheet pile deformation can be estimated from Figure 6 (Teparak, Wanchai, 1993).

$$SF \text{ against leave} \approx 2.36$$

$$\text{Therefore } \frac{\delta_{H(\max)}}{H} = 0.2 - 0.7 \%$$

$$\delta_{H(\max)} = 10.4 \text{ mm to } 36.4 \text{ mm.}$$

(Using preloading in strut)

### 9. References\*

1. ภาณุ วัฒนศิริ (2534): การออกแบบและวิเคราะห์ Sheet Pile สำหรับงานขุดดิน  
และถมดิน, มส. วิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, อ.ท.
2. Teparak, Wanchai (1993): Behaviour of Deep Excavation using sheet Pile  
Bracing System in soft Bangkok clay.

\* See all reference



รายงานผลการเจาะสำรวจดิน ๘

โครงการโรงพยาบาลคณะทันตแพทยศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สูง 15 ชั้น

ถนนอังรีดูนังค์

กรุงเทพมหานคร

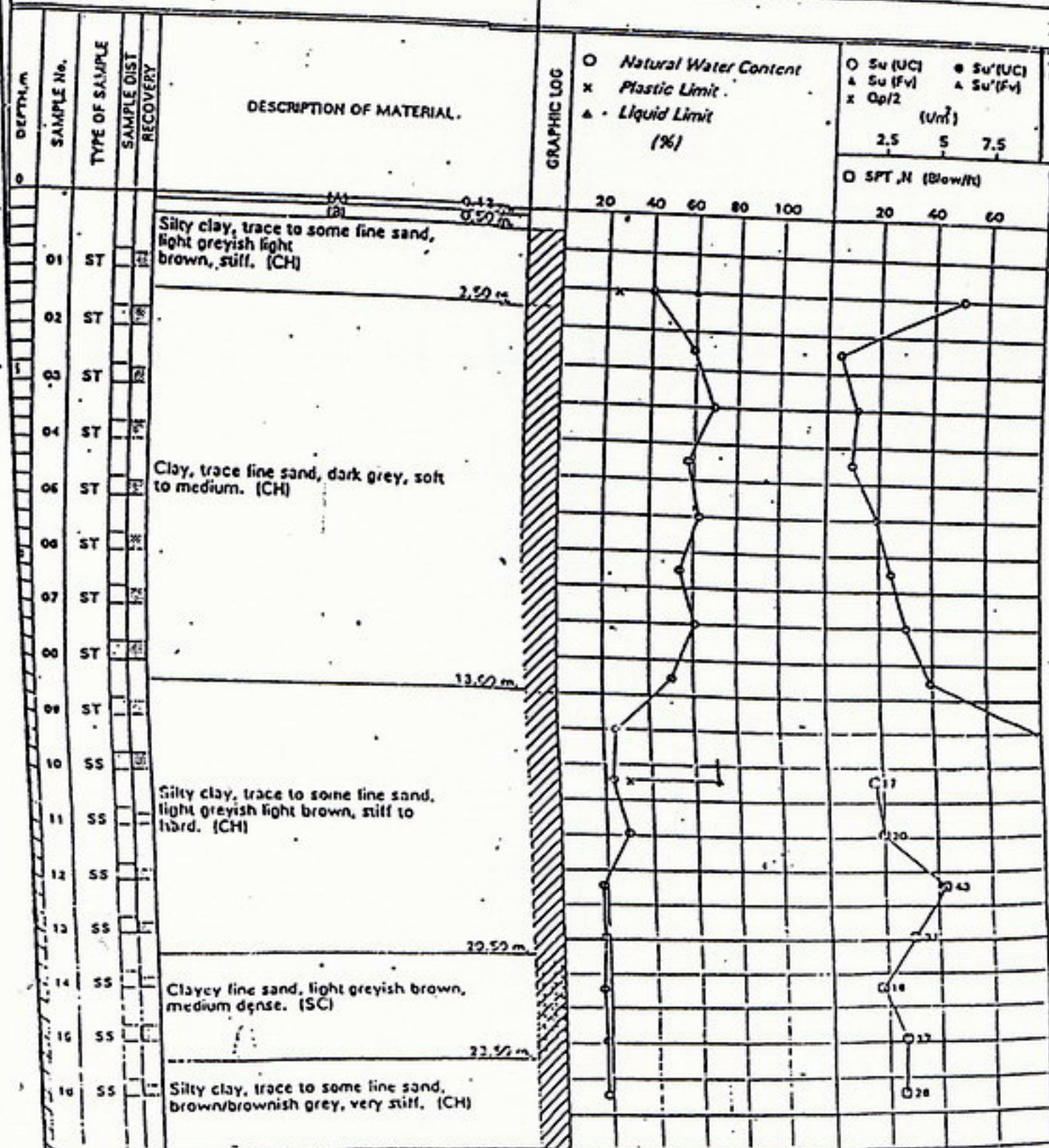


# LOG OF BORING No. BH-1

PROJECT : โครงการขุดเจาะเพื่อทดสอบการทรุด  
ของตอม่อสะพานมิตรภาพไทย-ลาว

LOCATION : ก. อังรีพนังค์ กทม.

OWNER :



**STS ENGINEERING CONSULTANTS CO., LTD.**

BORING STARTED: 14/2/92

RIG. ACKER

WL -1.60 M. 24 HRS. AFTER BORING.

BORING FINISH: 15/2/92

FOREMAN HK

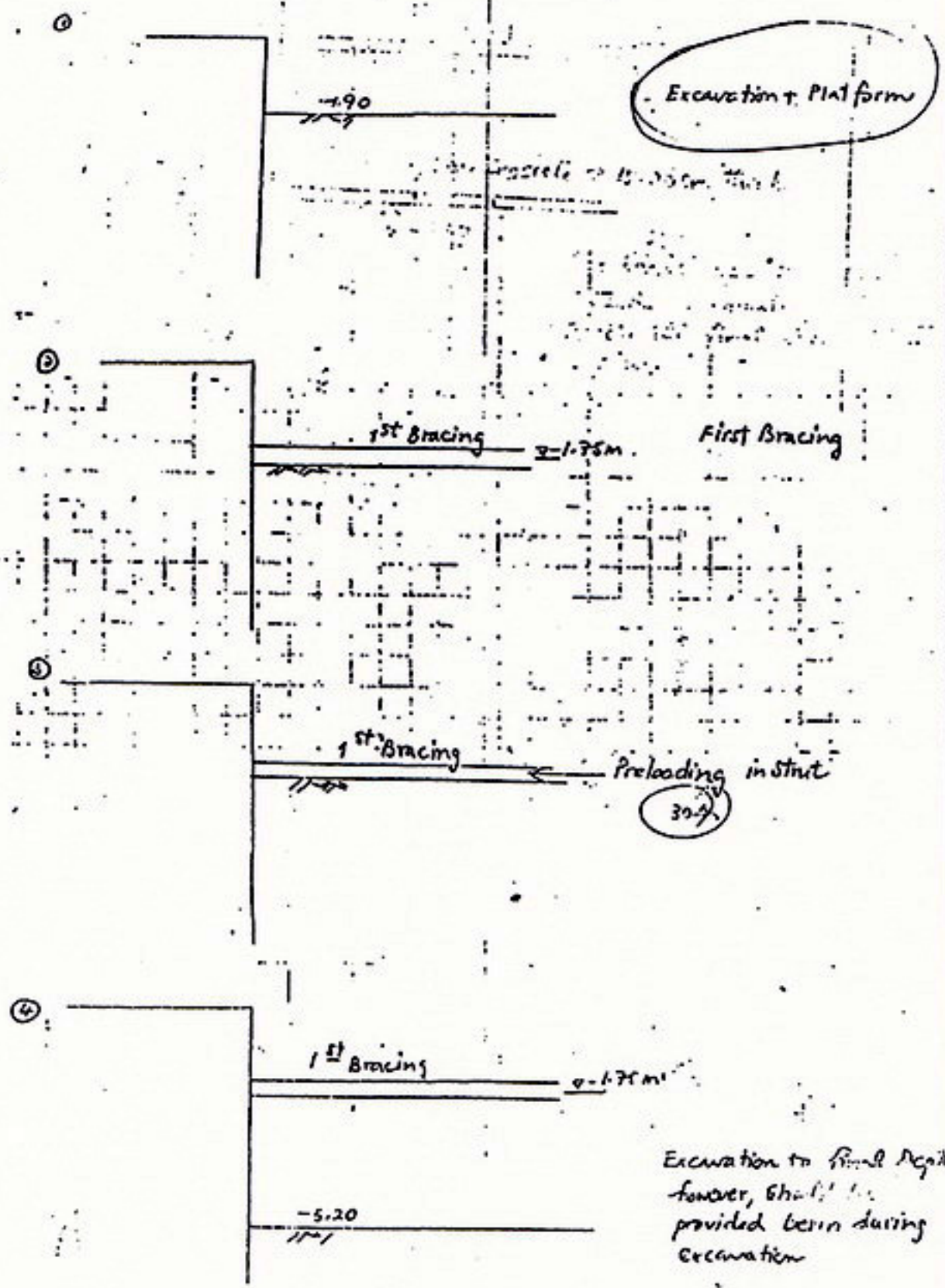
JOB No. 3707



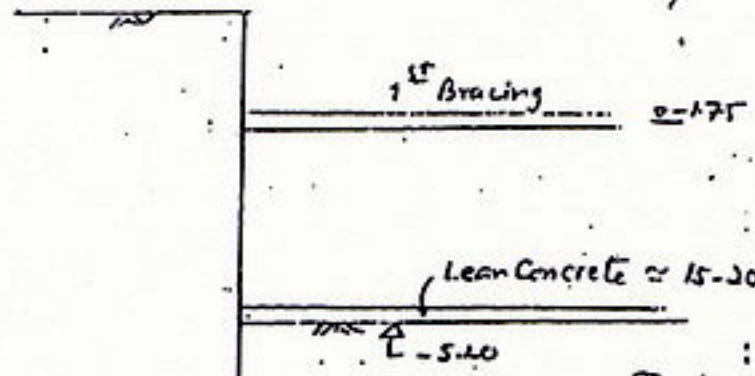




Sequence of construction

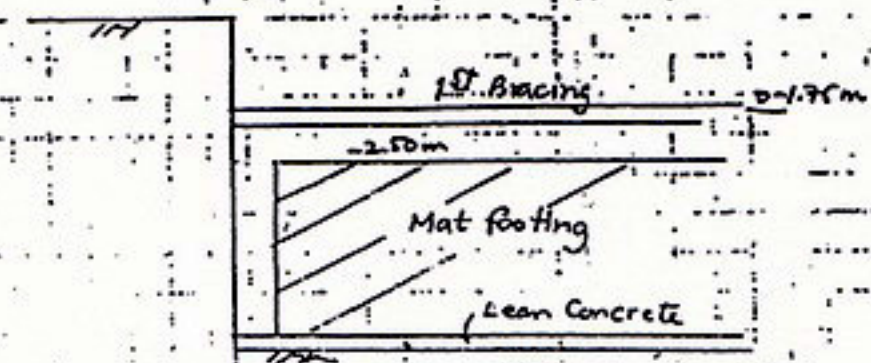


⑥

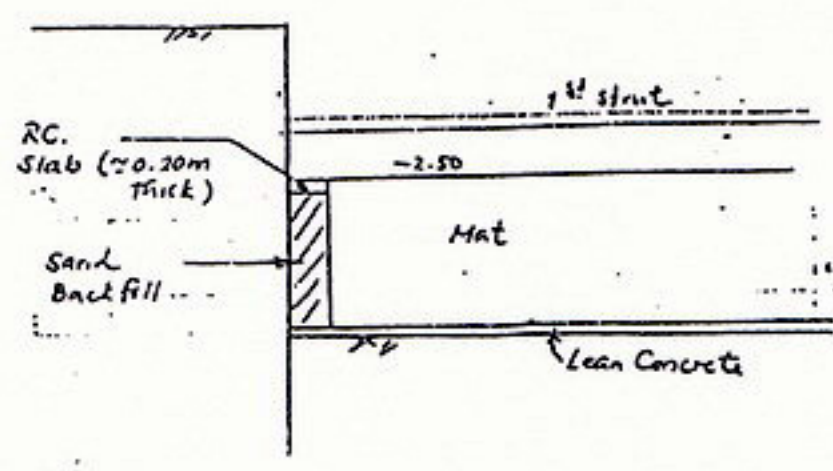


- The Lean Concrete shall be placed immediately after reach the final excavation depth

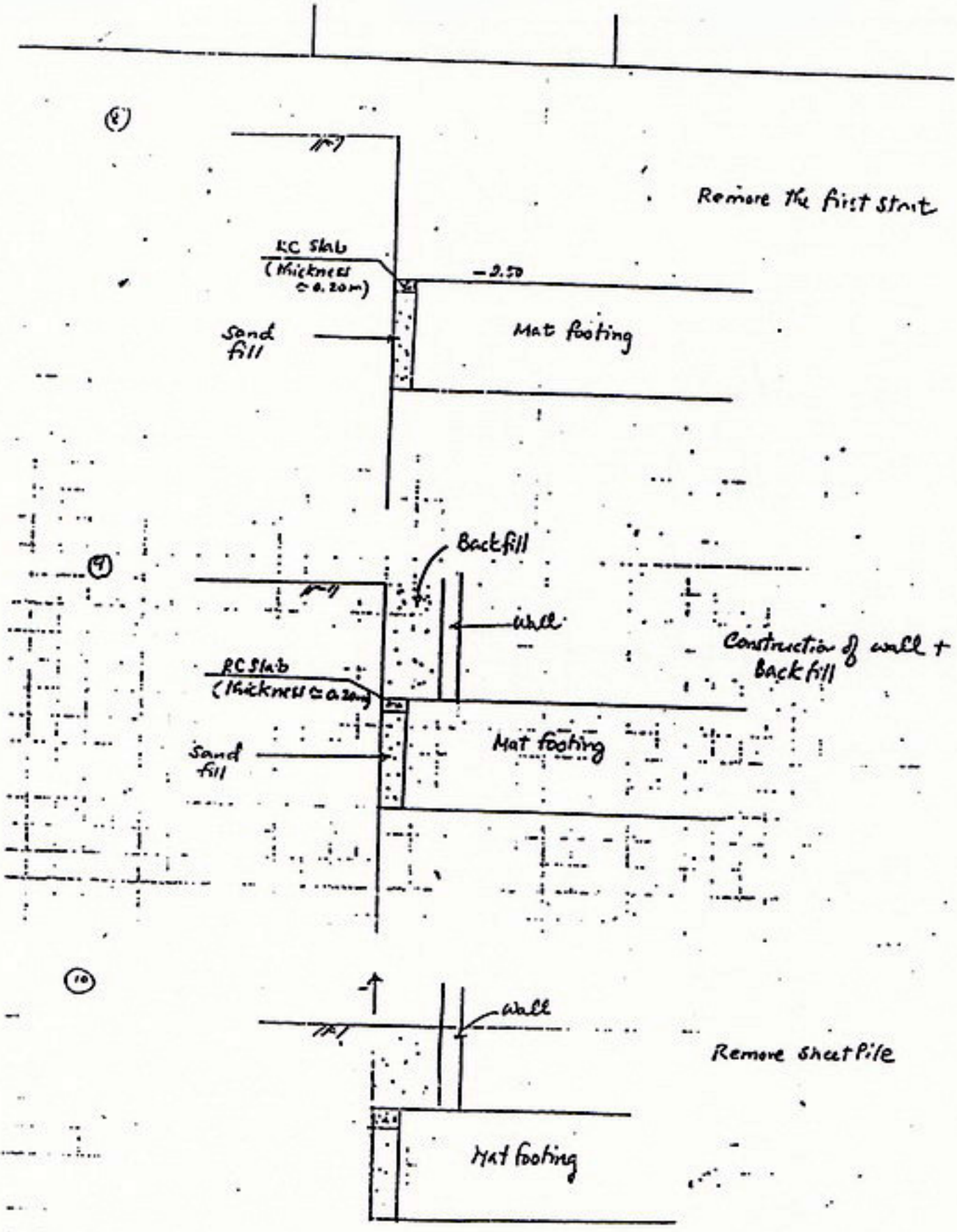
⑥



⑦







Remove the first strait

RC slab  
(thickness ≈ 0.20m)

-2.50

Sand fill

Mat footing

Backfill

wall

Construction of wall +  
Backfill

RC slab  
(thickness ≈ 0.20m)

Sand fill

Mat footing

10

↑

wall

Remove sheet pile

Mat footing

INCLINOMETER No. 117 Date: / / 1994

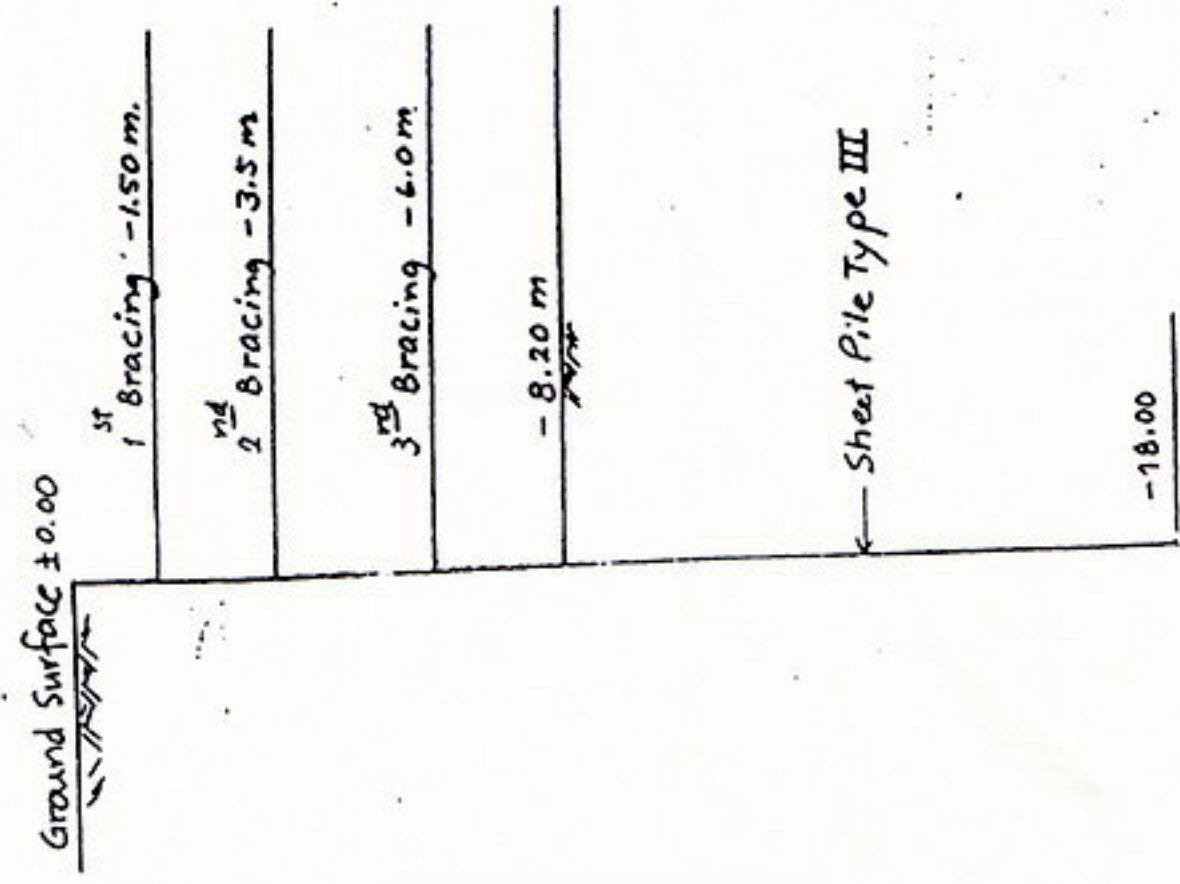
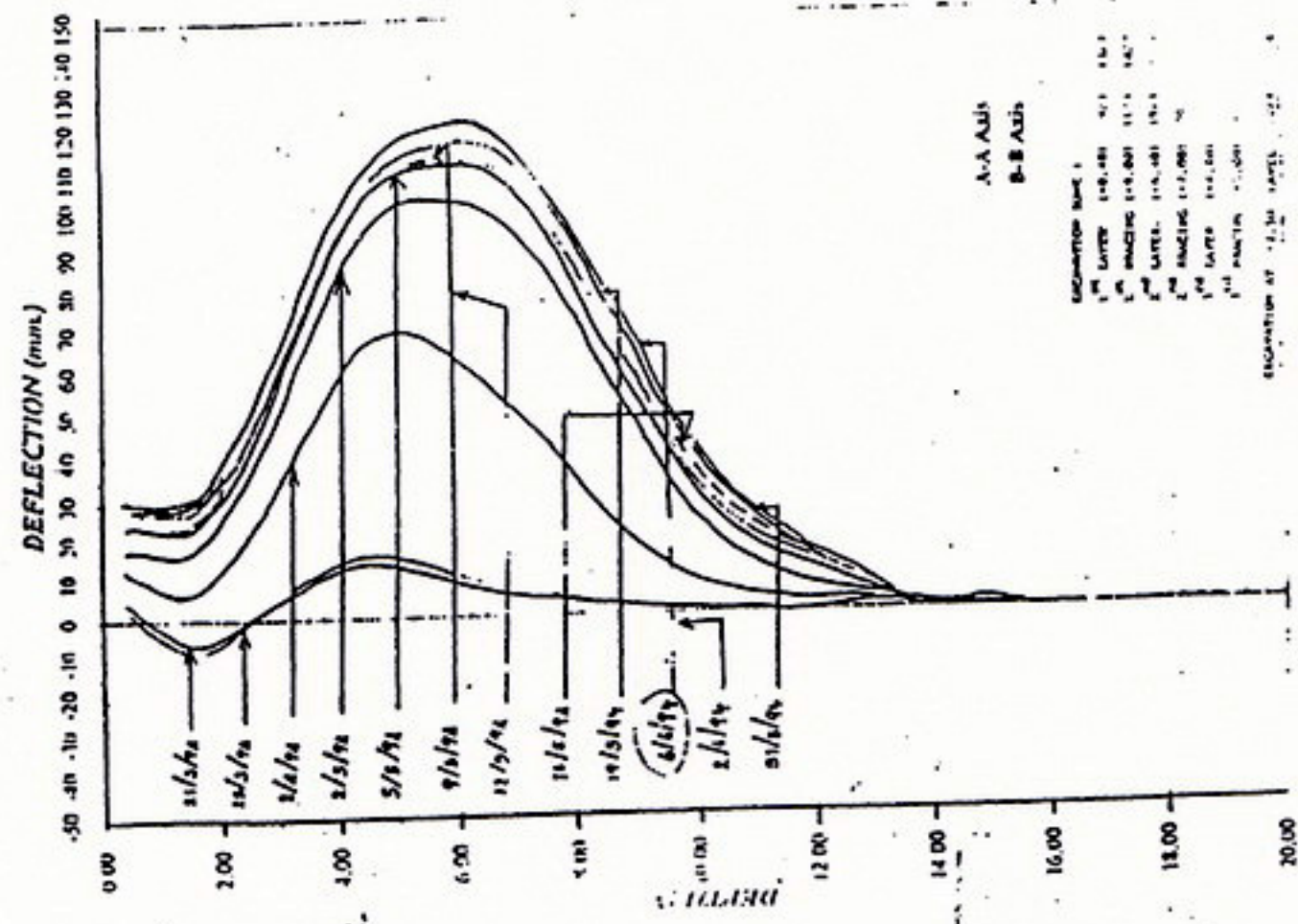


Figure 6 Lateral sheet pile displacement at Thonburi area



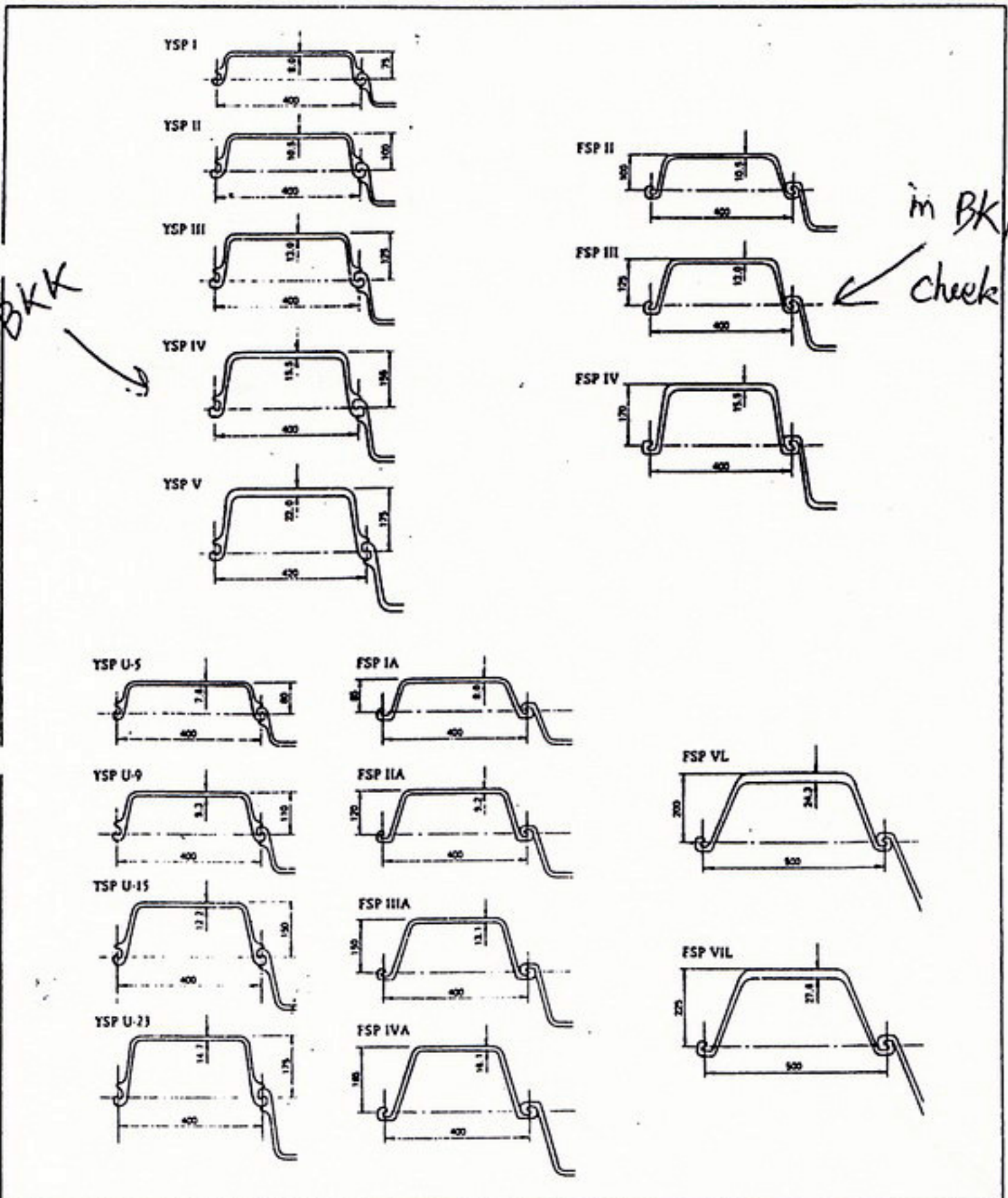
หัวไปยาว 18.00 ซม.

SHAPES

unit: mm

in BKK

in BKK  
check length





STEEL SHEET PILING

sheet pile section

Section	Dimensions			Sectional Area	Weight		Moment of Inertia		Section Modulus	
	w	h	t	per pile	per pile	per wall width	per pile	per wall width	per pile	per wall width
	mm in	mm in	mm in	cm <sup>2</sup> in <sup>2</sup>	kg/m lbs/ft	kg/m <sup>2</sup> lbs/ft <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup> in <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup> /m in <sup>4</sup> /ft	cm <sup>3</sup> in <sup>3</sup>	cm <sup>3</sup> /m in <sup>3</sup> /ft
YSP I	400 15.7	75 2.95	8.0 0.315	46.49 7.206	36.5 24.5	91.2 18.7	429 10.3	3.820 28.0	66.4 4.05	509 9.47
YSP U-5	400 15.7	80 3.15	7.6 0.299	45.21 7.008	35.5 23.9	88.8 18.2	454 10.9	4.220 30.9	64.7 3.95	527 9.80
FSP IA	400 15.7	85 3.35	8.0 0.315	45.21 7.008	35.5 23.9	88.8 18.2	598 14.4	4.500 33.0	88.0 5.37	529 9.84
YSP II	400 15.7	100 3.94	10.5 0.413	61.18 9.483	48.0 32.3	120 24.6	986 23.7	8.690 63.6	121 7.38	869 16.2
FSP II	400 15.7	100 3.94	10.5 0.413	61.18 9.483	48.0 32.3	120 24.6	1,240 29.8	8,740 64.0	152 9.28	874 16.3
YSP U-9	400 15.7	110 4.33	9.3 0.366	55.01 8.527	43.2 29.0	108 22.1	1,070 25.7	9,680 70.9	120 7.32	880 16.4
FSP IIA	400 15.7	120 4.72	9.2 0.362	55.01 8.527	43.2 29.0	108 22.1	1,460 35.1	10,600 77.6	160 9.76	880 16.4
YSP III	400 15.7	125 4.92	13.0 0.512	76.42 11.85	60.0 40.3	150 30.7	1,920 46.1	16,400 120	196 12.0	1,310 24.4
FSP III	400 15.7	125 4.92	13.0 0.512	76.42 11.85	60.0 40.3	150 30.7	2,220 53.3	16,800 123	223 13.6	1,341 24.9
YSP U-15	400 15.7	150 5.91	12.2 0.480	74.40 11.53	58.4 39.2	146 29.9	2,700 64.9	22,800 167	238 14.5	1,520 28.3
FSP IIIA	400 15.7	150 5.91	13.1 0.516	74.40 11.53	58.4 39.2	146 29.9	2,790 67.0	22,800 167	250 15.3	1,520 28.3
YSP IV	400 15.7	155 6.10	15.5 0.610	96.99 15.03	76.1 51.1	190 38.9	3,690 88.7	31,900 234	311 19.0	2,060 38.3
FSP IV	400 15.7	170 6.69	15.5 0.610	96.99 15.03	76.1 51.1	190 38.9	4,670 112	38,600 283	362 22.1	2,270 42.2
YSP U-23	400 15.7	175 6.89	14.7 0.579	94.21 14.60	74.0 49.7	185 37.9	4,180 105	39,400 289	330 20.1	2,250 41.9
FSP IV A	400 15.7	185 7.28	16.1 0.634	94.21 14.60	74.0 49.7	185 37.9	5,300 127	41,600 305	400 24.4	2,250 41.9
YSP V	420 16.5	175 6.89	22.0 0.866	134.0 20.77	105 70.6	250 51.2	5,950 143	55,200 404	433 26.4	3,150 58.6
FSP V L	500 19.7	200 7.87	24.3 0.957	133.8 20.74	105 70.6	210 43.0	7,960 191	63,000 461	520 31.7	3,150 58.6
FSP VI L	500 19.7	225 8.86	27.6 1.09	153.0 23.72	120 80.6	240 49.2	11,400 274	86,000 630	680 41.5	3,820 71.1



# WIDE FLANGE SHAPES

## METRIC SERIES (CONTINUED)

Section Index	Weight	Depth of Section (A)	Flange Width (B)	Thickness		Corner Radius (r)	Sectional Area	Moment of Inertia		Radius of Gyration		Modulus Section
				Web (t <sub>1</sub> )	Flange (t <sub>2</sub> )			I <sub>x</sub>	I <sub>y</sub>	i <sub>x</sub>	i <sub>y</sub>	
mm	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm <sup>2</sup>	cm <sup>4</sup>	cm <sup>4</sup>	cm	cm	cm <sup>3</sup>
400x400	200.0	406	403	16	24	22	254.90	78.000	26.200	17.50	10.10	3.840
	197.0	400	408	21	21	22	250.70	70.900	23.800	16.80	9.75	3.540
	172.0	400	400	13	21	22	218.70	66.600	22.400	17.50	10.10	3.330
	168.0	394	405	18	18	22	214.40	59.700	20.000	16.70	9.65	3.030
	147.0	394	398	11	18	22	186.80	56.100	18.900	17.30	10.10	2.850
	140.0	388	402	15	15	22	178.50	49.000	16.300	16.60	9.54	2.520
400x300	107.0	390	300	10	16	22	136.00	38.700	7.210	16.90	7.28	1.980
	94.3	386	299	9	14	22	120.10	33.700	6.240	16.70	7.21	1.740
400x200	66.0	400	200	8	13	16	84.12	23.700	1.740	16.80	4.54	1.190
	56.6	396	199	7	11	16	72.16	20.000	1.450	16.70	4.48	1.010
350x350	159.0	356	352	14	22	20	202.00	47.600	16.000	15.30	8.90	2.670
	156.0	350	357	19	19	20	198.40	42.800	14.400	14.70	8.53	2.450
	137.0	350	350	12	19	20	173.90	40.300	13.600	15.20	8.84	2.300
	131.0	344	354	16	16	20	166.60	35.300	11.800	14.60	8.43	2.050
	115.0	344	348	10	16	20	146.00	33.300	11.200	15.10	8.78	1.940
	106.0	338	351	13	13	20	135.30	28.200	9.380	14.40	8.33	1.670
350x250	79.7	340	250	9	14	20	101.50	21.700	3.650	14.60	6.00	1.280
	69.2	336	249	8	12	20	88.15	18.500	3.090	14.50	5.92	1.100
350x175	49.6	350	175	7	11	14	63.14	13.600	984	14.70	3.95	775
	41.4	346	174	6	9	14	52.68	11.100	792	14.50	3.88	641
300x300	106.0	304	301	11	17	18	134.80	23.400	7.730	13.20	7.57	1.540
	106.0	300	305	15	15	18	134.80	21.500	7.100	12.60	7.26	1.440
	94.0	300	300	10	15	18	119.80	20.400	6.750	13.10	7.51	1.360
	87.0	298	299	9	14	18	110.80	18.800	6.240	13.00	7.51	1.270
	84.5	294	302	12	12	18	107.70	16.900	5.520	12.50	7.16	1.150
300x200	65.4	298	201	9	14	18	83.36	13.300	1.900	12.60	4.77	893
	56.8	294	200	8	12	18	72.38	11.300	1.600	12.50	4.71	771
300x150	36.7	300	150	6.5	9	13	46.78	7.210	508	12.40	3.29	481
	32.0	298	149	5.5	8	13	40.80	6.320	442	12.40	3.29	424

Con



หน่วยแรงอัดที่ยอมให้

กำลังจุดกดจากของเหล็ก 2520 กก. ต่อตาราง ซม. โมดูลัสยืดหยุ่น  $2.04 \times 10^6$  กก. ต่อตาราง ซม.

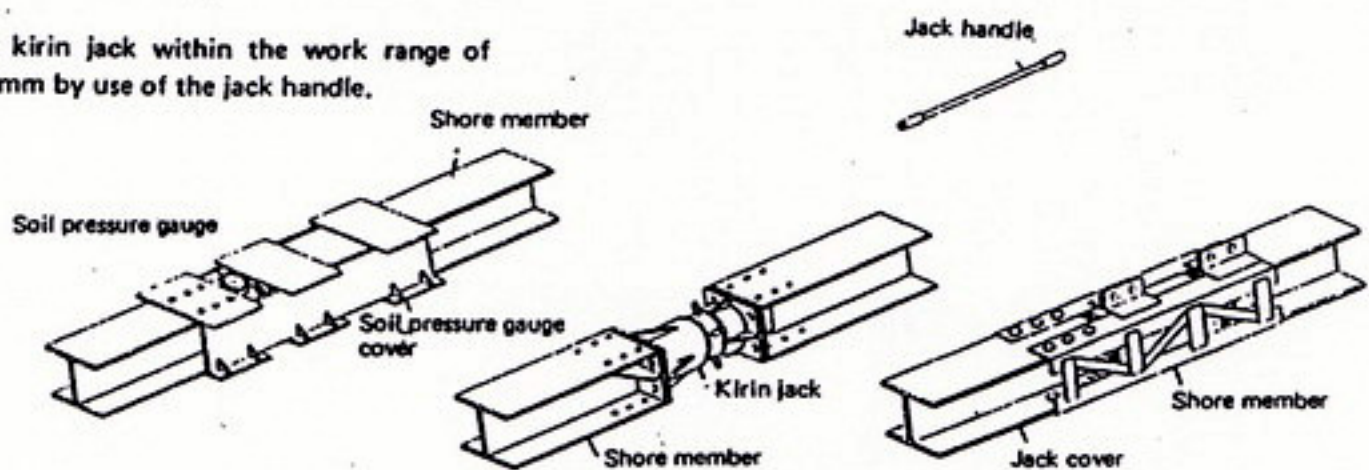
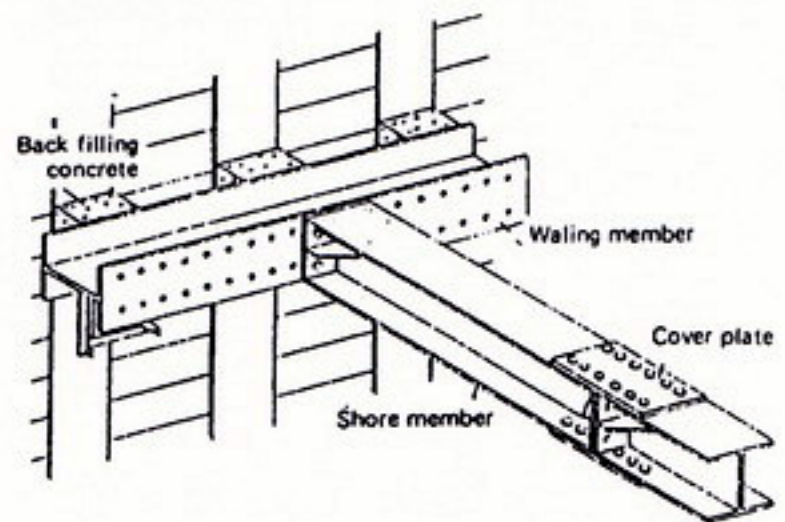
Main and Secondary Members Kl/r not over 120						Main Members kl/r 121 to 200				Secondary Members* l/r 121 to 200			
Kl/r	Fa kg./cm <sup>2</sup>	Kl/r	Fa kg./cm <sup>2</sup>	Kl/r	Fa kg./cm <sup>2</sup>	Kl/r	Fa kg./cm <sup>2</sup>	Kl/r	Fa kg./cm <sup>2</sup>	l/r	Fas kg./cm <sup>2</sup>	l/r	Fas kg./cm <sup>2</sup>
1	1509.3	41	1338.2	81	1068.6	121	712.6	161	405.3	121	716.2	161	509.8
2	1506.5	42	1332.6	82	1060.7	122	702.5	162	400.3	122	709.6	162	506.7
3	1503.6	43	1326.9	83	1052.8	123	692.4	163	395.4	123	703.0	163	503.7
4	1500.6	44	1321.1	84	1044.9	124	682.2	164	390.6	124	696.1	164	500.7
5	1497.5	45	1315.3	85	1036.9	125	671.9	165	385.9	125	689.1	165	497.9
6	1494.4	46	1309.4	86	1028.8	126	661.6	166	381.2	126	682.0	166	495.1
7	1491.1	47	1303.5	87	1020.7	127	651.3	167	376.7	127	675.0	167	492.4
8	1487.8	48	1297.5	88	1012.6	128	641.2	168	372.2	128	667.9	168	489.7
9	1484.4	49	1291.4	89	1004.4	129	631.3	169	367.8	129	661.0	169	487.2
10	1481.0	50	1285.3	90	996.1	130	621.6	170	363.5	130	654.3	170	484.6
11	1477.4	51	1279.1	91	987.8	131	612.1	171	359.2	131	647.8	171	482.2
12	1473.8	52	1272.9	92	979.4	132	602.9	172	355.1	132	641.4	172	479.8
13	1470.1	53	1266.6	93	971.0	133	593.9	173	351.0	133	635.1	173	477.5
14	1466.3	54	1260.3	94	962.5	134	585.0	174	347.0	134	629.1	174	475.3
15	1462.5	55	1253.9	95	954.0	135	576.4	175	343.0	135	623.1	175	473.1
16	1458.6	56	1247.4	96	945.4	136	568.0	176	339.1	136	617.3	176	471.0
17	1454.6	57	1240.9	97	936.8	137	559.7	177	335.3	137	611.7	177	469.0
18	1450.5	58	1234.3	98	928.1	138	551.6	178	331.5	138	606.2	178	467.0
19	1446.4	59	1227.7	99	919.4	139	543.7	179	327.9	139	600.8	179	465.0
20	1442.2	60	1221.0	100	910.6	140	536.0	180	324.2	140	595.5	180	463.2
21	1437.9	61	1214.3	101	901.7	141	528.4	181	320.7	141	590.4	181	461.4
22	1433.5	62	1207.5	102	892.8	142	521.0	182	317.1	142	585.4	182	459.6
23	1429.1	63	1200.7	103	883.8	143	513.7	183	313.7	143	580.5	183	457.9
24	1424.6	64	1193.8	104	874.8	144	506.6	184	310.3	144	575.7	184	456.3
25	1420.1	65	1186.9	105	865.7	145	499.6	185	307.0	145	571.0	185	454.7
26	1415.4	66	1179.9	106	856.6	146	492.8	186	303.6	146	566.4	186	453.2
27	1410.7	67	1172.8	107	847.4	147	486.1	187	300.4	147	562.0	187	451.7
28	1406.0	68	1165.7	108	838.2	148	479.6	188	297.2	148	557.7	188	450.3
29	1401.2	69	1158.6	109	828.9	149	473.2	189	294.1	149	553.4	189	449.0
30	1396.3	70	1151.4	110	819.5	150	466.9	190	291.0	150	549.3	190	447.7
31	1391.3	71	1144.1	111	810.1	151	460.7	191	288.0	151	545.2	191	446.4
32	1386.3	72	1136.8	112	800.6	152	454.7	192	285.0	152	541.3	192	445.3
33	1381.2	73	1129.4	113	791.1	153	448.7	193	282.0	153	537.4	193	444.1
34	1376.0	74	1122.0	114	781.5	154	442.9	194	279.1	154	533.7	194	443.0
35	1370.3	75	1114.5	115	771.8	155	437.2	195	276.3	155	530.0	195	442.0
36	1365.5	76	1107.0	116	762.1	156	431.7	196	273.5	156	526.4	196	441.0
37	1360.2	77	1099.4	117	752.3	157	426.2	197	270.7	157	522.9	197	440.1
38	1354.8	78	1091.8	118	742.5	158	420.8	198	268.0	158	519.5	198	439.3
39	1349.3	79	1084.1	119	732.6	159	415.5	199	265.3	159	516.2	199	438.5
40	1343.8	80	1076.4	120	722.6	160	410.3	200	262.6	160	512.9	200	437.7

\*K taken as 1.0 for Secondary members.  
Note:  $C_c = 126.4$ .



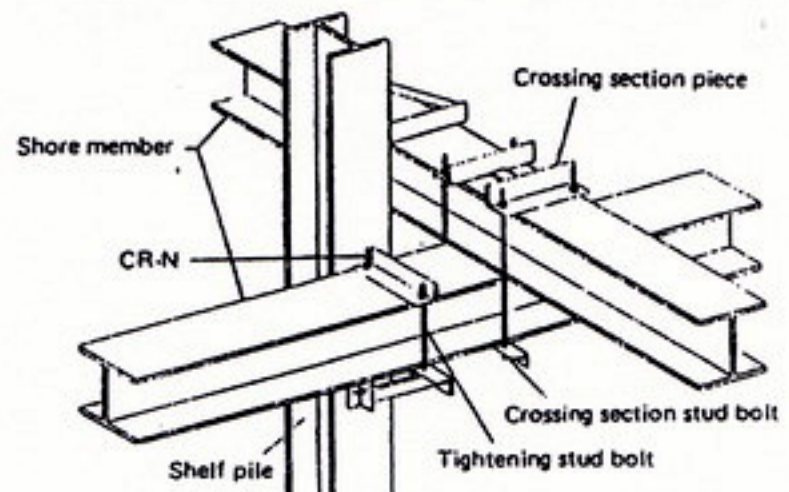
## ASSEMBLY OF STRUT

1. Carry out the installation and assembly in the order lower then upper stages.
2. Mount the members in alignment to the specified center.
3. In case a large deviation is needed due to the position of the support pile, examine the span division possibility.
4. It is desirable to fix temporarily the cover plate at the lower side before the strut is installed.
5. Refer to the assembly drawing and incorporate the kirin jack soil pressure gauge and the box soil pressure gauge.
6. If the shortage of the shore length is less than 50 cm, add the auxiliary piece and extend the kirin jack.
7. Adjust the kirin jack within the work range of 450 ~ 600 mm by use of the jack handle.



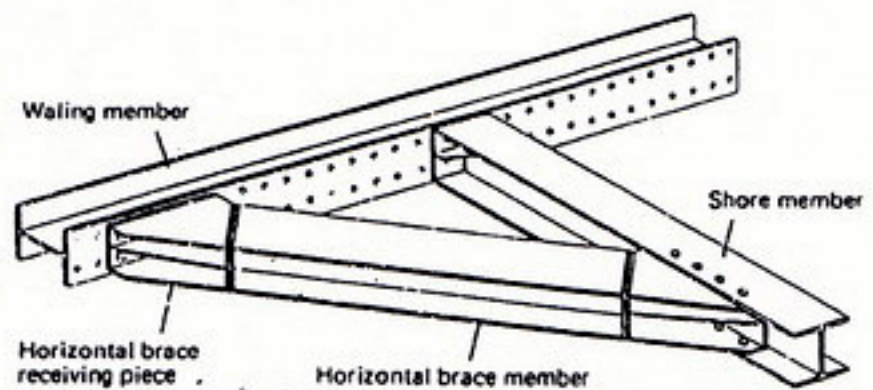
## FIXING OF STRUT

1. Check the centering position of the strut. If necessary, modify it.
2. Drill holes in the strut bracket and apply the tightening stud bolts and fix the lower beam.
3. Apply the crossing section piece and stud bolts and fix the cross section of the upper and lower stage struts. Make this arrangement at every crossing.
4. Before the jack-up is applied, set the stud bolts tentatively (rather loosely), then retighten them firmly after the jack-up.



## MOUNTING OF HORIZONTAL BRACE RECEIVING BEAM

1. Mount tentatively the horizontal brace receiving piece by use of the bolts.
2. Set the strut side on the strut flange and adjust the position of holes at the waling and strut sides.
3. Insert the bolts to the waling/horizontal brace receiving piece and the strut/horizontal brace receiving piece. Retighten them firmly.
4. In case a gap is found between the horizontal brace and horizontal brace receiving piece, insert the liner and retighten the bolts firmly.



525



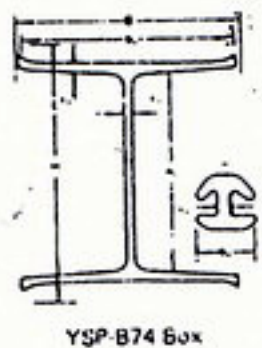
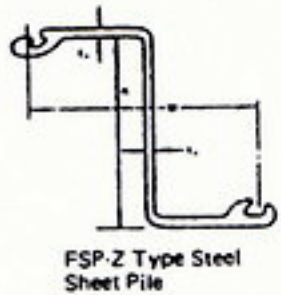
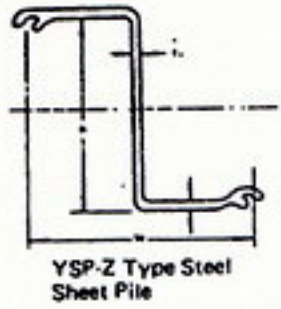
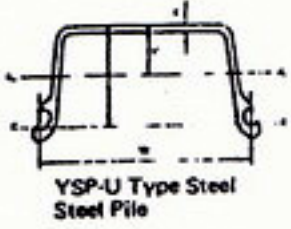
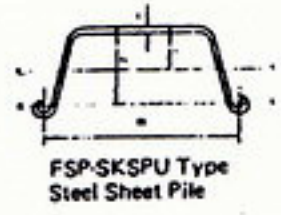
# STEEL SHEET PILE

## Principal Uses:

- (1) Retaining of earth in underground burying work for water supply, sewerage, gas supply, underground passage, utility tunnel, etc.
- (2) Cofferdam for river embankment, bridge and dam.
- (3) Cofferdam for sea embankment, breakwater, lighthouse and ship mooring post.
- (4) Temporary cofferdam for agricultural waterway and industrial waterway.
- (5) Retaining of earth in earth excavation for general building construction.

U Shaped Steel Sheet Pile: Dimensions and Sectional Properties

Company Name	Type	Category	Dimensions				Sectional Area per Sheet (cm <sup>2</sup> )	Weight		Second Moment of Area		Section Modulus		Steel Quality			
			w (mm)	h (mm)	t <sub>1</sub> (mm)	t <sub>2</sub> (mm)		Per Sheet (kg/m)	Per Meter of Wall Width (kg/m <sup>2</sup> )	Per Sheet (cm <sup>4</sup> )	Per Meter of Wall Width (cm <sup>4</sup> )	Per Sheet (cm <sup>3</sup> )	Per Meter of Wall Width (cm <sup>3</sup> /m)				
Nippon Steel Corporation	U Type Steel Sheet Pile	FSP-IA	400	85.0	8.0		45.21	35.5	88.8	598	4,500	88.0	529	SY 30 or SY 40			
		YSP-I	400	75.0	8.0		45.46	36.5	91.2	420	3,820	86.4	500				
		FSP-II	400	100.0	10.5		61.18	48.0	120.0	1,240	8,740	152.0	874				
		FSP-IIA	400	120.0	8.2		55.01	43.2	108.0	1,400	10,800	160.0	880				
		YSP-II	400	100.0	10.5		61.18	48.0	120.0	986	8,890	121.0	800				
		FSP-III	400	125.0	13.0		76.42	60.0	150.0	2,220	16,800	223.0	1,340				
		FSP-IIIA	400	150.0	13.1		74.40	58.4	146.0	2,790	22,800	250.0	1,520				
		YSP-III	400	125.0	13.0		76.42	60.0	150.0	1,820	16,400	198.0	1,210				
		FSP-IV	400	170.0	15.5		96.89	76.1	190.0	4,870	38,600	362.0	2,270				
		FSP-IVA	400	185.0	16.1		94.21	74.0	185.0	5,300	41,800	400.0	2,250				
		YSP-IV	400	155.0	15.5		96.89	76.1	190.0	3,880	31,900	311.0	2,060				
		FSP-V <sub>L</sub>	500	200.0	24.3		133.8	105.0	210.0	7,960	63,000	520.0	3,150				
		Sumitomo Metal Industries, Ltd.	Z Type Steel Sheet Pile	YSP-Z-14	400	235.0	9.4	8.2	66.06	51.9	130.0	8,480	16,200		552.0	1,280	SY 30 or SY 40
				YSP-Z-25	400	305.0	13.0	9.6	84.32	74.0	185.0	15,300	36,300		1,000.0	2,510	
YSP-Z-32	400			344.0	14.2	10.4	107.7	84.5	211.0	22,000	55,000	1,280.0	3,200				
YSP-Z-38	400			384.0	17.2	11.4	122.2	96.0	240.0	27,700	69,200	1,520.0	3,800				
YSP-Z-45	400			380.0	21.5	12.5	148.2	116	290.0	37,900	82,200	1,820.0	4,550				
FSP-Z-45	400			367.0	21.9	13.2	148.2	116	290.0	33,400	83,500	1,820.0	4,550				
Sumitomo Metal Industries, Ltd.	U Type Steel Sheet Pile	SKSP-2	400	100.0	10.5		61.18	48.0	120.0	1,240	8,740	152.0	874	SY 30 or SY 40			
		SKSP-3	400	125.0	13.0		76.42	60.0	150.0	2,220	16,800	223.0	1,340				
		SKSP-4	400	170.0	15.5		96.89	76.1	190.0	4,870	38,600	362.0	2,270				



Box Type Steel Sheet Pile - YSPB-74 Manufactured by Nippon Steel Corporation

Body	Dimensions (mm)						Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Weight (kg/m)	Joint	Dimensions (mm)			Sectional Area (cm <sup>2</sup> )	Weight (kg/m)
	H	B	d <sub>1</sub>	h <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>				d <sub>2</sub>	h <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>		
	486	420	400	410	10	13.5	16.50	130		67	64	14	22.99	18.0

Possible Driving Length of Steel Sheet Pile

Type	N Value		10		20		30		40		50	
	No. of Sheets		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
II.			17		10		7					
III. Z-14			16	23	14	20	12	16	9	14		
IV. Z-25			22	<u>25</u>	20	25	17	22	15	20		
V. Z-38			25	<u>25</u>	24	<u>25</u>	20	<u>25</u>	18	25	12	21
VI. Z-45				<u>25</u>		<u>25</u>		<u>25</u>		<u>25</u>		23

- Notes: (1) The underlined portions will become more than 25 m from the calculation. However, because of difficulties in transportation and handling, the length was limited to 25 m.  
 (2) Z type steel sheet piles are driven in two sheets as a rule.



# PRELOAD METHOD FOR EARTH HOLDING

[Solution for Subsidence of Surrounding Ground in Earth Holding Underground Work]

## Preload Method

While the inward movement of the earth holding walls are prevented by earth holding work made of steel or reinforced concrete, axial force due to soil pressure will act on this earth holding work, elastic compressive strain, and creeping strain or contraction due to contacting slackness of joints will be generated. In addition to contraction of shores themselves, there will be movement of the earth holding walls, such as flexure of the walls.

Subsidence of the surrounding ground will be caused by these factors, and when the subsidence exceeds a certain limit there will arise the possibility of accident.

The conventional method of giving an axial force to the shore had been called the pretest method or the shore prestress method, where an axial force of 5 to 10 tons is given by Kirin jack or oil jack; thereby removing slackness in the shore joints in the preload method for earth holding the shore is loaded with pressure by pneumatic jack prior to excavation, thereby pressing the earth holding wall outwards, and then excavation is started. By this method, even if soil pressure acts on the earth holding wall due to excavation, such pressure will be offset by the degree of the pressure preloaded by the jack. Accordingly, elastic compression of shore, contacting slackness of joints, etc. will be prevented, bending moment generated in the earth holding wall will be reduced and flexure will decrease, resulting in smaller ground subsidence.

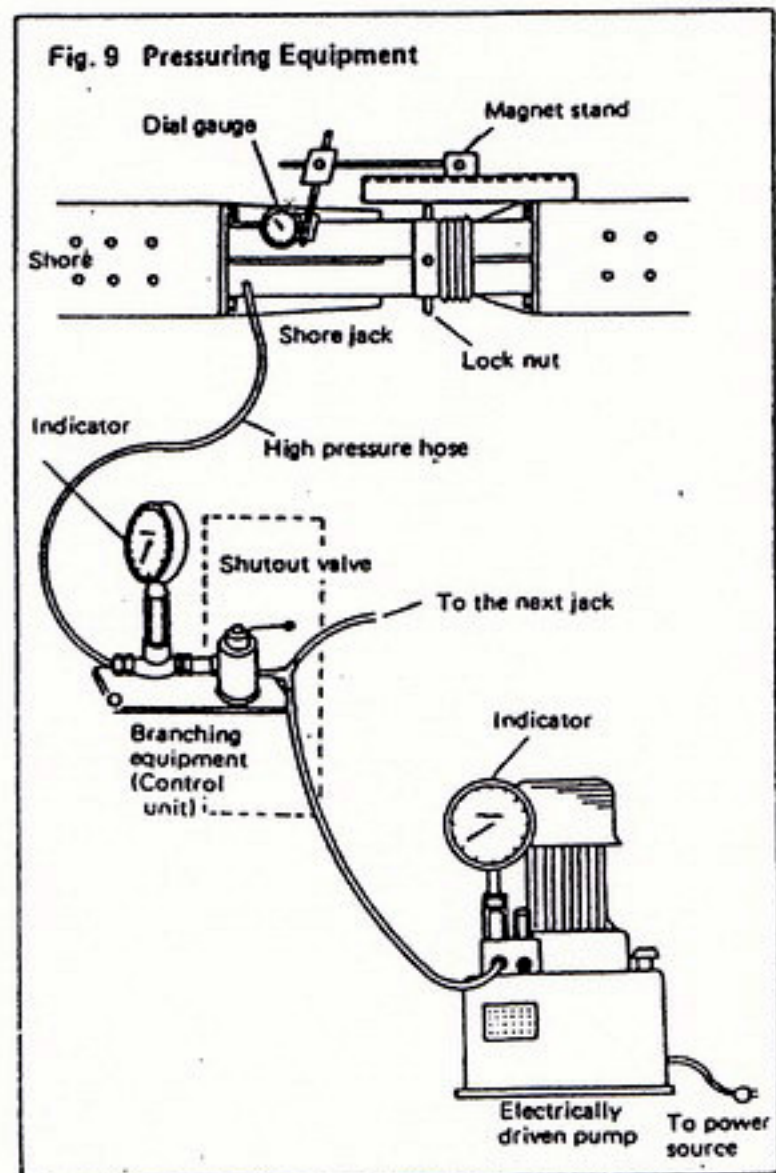
## Advantages of Preload Method

In conventional methods, the soil pressure will act after completing the excavation as a next phase after the installation of shores, thereby causing the earth holding walls to deflect inward. By this action the shores will be compressed and will resist as axial force. Introduction of preload into shores will make flexure of the earth holding walls quite small. Because the excavation can be started after pushing the earth holding walls outward by introducing axial force into shores. These shores would have been generated by deflection in the earth holding walls due to the excavation as a next phase after excavation to the depth at which shores will be installed. As a result, rigidity of the earth holding framework as a whole will be increased, and the earth holding walls will have less flexure even if materials of low rigidity are used, and subsidence in the surrounding ground will become less. Additionally, there is no need to increase the axial force acting on shores by adopting the preload method. Although introduction of such large axial force into shores will require prudent planning and precise construction work, if the preload method is adopted, it is possible to considerably prevent subsidence in the surrounding ground caused by flexure of the earth holding walls, to increase rigidity of the steel earth holding work as a whole, to reduce the number of braces, etc. to be provided in the horizontal plane, and also to provide a larger working space. On account of these advantages, efficiency in the excavation work as well as other related work will be increased.

## Field Conditions for Use of Preload Method

This method is most suitable for excavation in areas where subsidence of surrounding ground is expected due to excavation, or where damages may possibly be generated by flexure in the earth holding walls.

- Large scale construction site in city area with weak soil layers.
- Construction site where hard ground is situated underneath weak ground, and the excavation is to be made through both layers.
- Construction site where foundation piles are driven in advance by earth drill, etc. immediately next to the earth holding walls.
- Construction site where important buildings are in the periphery of the site, and where the earth holding walls are of H steel sheet pile type.
- Construction site where center of peripheral columns are designed to be located fully occupying the site and the structure is of steel frame from the basement floor.









## การออกแบบกำแพงกันดิน Sheet Pile สำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ

โดย ดร.วันชัย เทพวิรัช  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1. บทนำ

การออกแบบกำแพงกันดินประเภทต่าง ๆ มีข้อจำกัดมากมายขึ้นกับสภาพของชั้นดิน ปริมาณการเคลื่อนตัวของดินด้านข้าง ปริมาณการทรุดตัวของดินโดยรวม รวมถึงความสามารถในเชิงปฏิบัติและราคาของระบบกำแพงประเภทนั้น ๆ ในส่วนของ การออกแบบกำแพงกันดิน Sheet Pile นั้น สิ่งแรกที่ผู้ออกแบบต้องเข้าใจคือ ปัญหาต่าง ๆ ที่อาจจะมีโอกาสเกิดขึ้น รวมถึงต้องทราบถึงโอกาส รูปแบบและกลไกของการวิบัติ จากนั้นผู้ออกแบบจึงออกแบบ Sheet Pile และระบบค้ำยัน (Bracing System) ในภาวะการปัจจุบันการขุดดินเพื่อก่อสร้าง ห้องใต้ดิน หรือ ขุดทำฐานราก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่กรุงเทพฯที่มีมากขึ้น การขุดดินเพื่อทำห้องใต้ดินดังกล่าวปัจจุบันลึกมากขึ้นถึงประมาณ 20 เมตร Sheet Pile และระบบค้ำยัน เป็นกำแพงกันดินชนิด Flexible Wall ที่สามารถนำมาใช้ได้สำหรับงานขุดดินที่มีความลึกระดับหนึ่งประมาณ 10-11 เมตรเท่านั้น หากลึกมากกว่านี้ ต้องมีการประยุกต์ใช้ระบบกำแพงกันดินประเภทอื่น ๆ เช่น Soldier Piles and Lagging (Berlin Walls) ดังแสดงในรูปที่ 1, Slurry trench diaphragm wall, Prefabricated diaphragm wall หรือ Bored Pile Wall (Secant Pile Wall).

บทความนี้จะเน้นการออกแบบกำแพงกันดิน Sheet Pile และระบบค้ำยันสำหรับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยคำนึงถึงรูปแบบการวิบัติ, การคำนวณแรงดันดินด้านข้าง การวิเคราะห์ความยาวของ Sheet Pile ความแข็งแรงของ Sheet Pile และระบบค้ำยัน รวมถึงการประมาณปริมาณการเคลื่อนตัวของดินด้านข้าง Sheet Pile อันจะมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยรอบ

### 2. ข้อจำกัดของการใช้ Sheet Pile ระบบ Brace Cut สำหรับงานขุดในกรุงเทพฯ

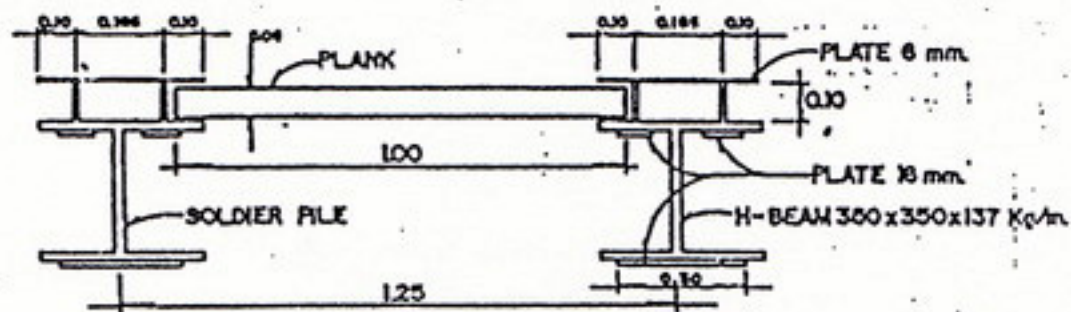
การเลือกใช้ Sheet Pile ระบบ Brace Cut ในดินเหนียวอ่อน (Soft Bangkok Clay) จำเป็นต้องคำนึงถึงข้อจำกัดดังนี้

- 2.1 Sheet Pile ต้องสามารถต้านแรงกระทำด้านข้างจากดิน แรงดันน้ำ Surcharge โดยปราศจากการเกิด Buckling ใน Sheet Pile
- 2.2 โครงสร้างของระบบ Bracing ต้องแข็งแรงเพียงพอที่จะต้านรับ Buckling และระบบ Bracing ต้องต้านทานการเคลื่อนตัวทั้งในแนวด้านข้างและแนวตั้ง
- 2.3 Bracing ต้องจัดวางให้กว้างเพียงพอที่จะสามารถปฏิบัติงานทั้งการขุดและการขนส่งวัสดุ



- 2.4 เมื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบ ควรใช้ระบบ Preload หรือ Jacking กับ strut
- 2.9 Bracing ต้องสามารถเปลี่ยนแปลงให้สามารถถ่ายน้ำหนักไปยังโครงสร้างถาวร และต้องไม่ทำให้โครงสร้างถาวรได้รับอันตราย
- 2.6 Sheet Pile ควรจะสามารถถอนขึ้นมาใช้ได้อีก (Re-use)

สำหรับงานจุดที่ลึกมากเช่นมากกว่า 9 เมตร ควรติดตั้งเครื่องมือวัดการเคลื่อนตัวของดิน เช่น Inclinator เพื่อตรวจสอบและป้องกันการเกิดการเคลื่อนตัวของดิน



รูปที่ 1 Soldier pile and lagging wall (Berlin Wall)

### 3. การคำนวณแรงดันด้านข้าง

ในการคำนวณแรงดันด้านข้าง ของระบบกำแพงกันดินชนิด Sheet Pile with brace cut ซึ่งประกอบด้วยแรงดันจากมวลดิน ถ่ายผ่านเว็คดิน และแรงดันน้ำ เข้าสู่ Sheet Pile จำเป็นต้องทราบถึงรูปแบบการวิบัติ เพื่อนำไปสู่การจำลองชนิดของการคำนวณ (Model Simulation) ให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง ระบบ Bracing Cut Sheet Pile แสดงในรูปที่ 2. การออกแบบจำเป็นต้องทราบขนาดของหน่วยแรงดันแนวหน้าข้างของดิน (Total horizontal stress) การเกิด heave เนื่องจากการลดน้ำหนักของดินบริเวณจุดคั่น และเสถียรภาพของระบบ Sheet Pile ทั้งหมด (overall stability) การวิบัติที่อาจเกิดขึ้นคือ (a) Sheet Pile ระบบนี้คือ การเกิด heave ในบริเวณพื้นที่จุดคั่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งในโครงการที่พื้นที่การขุดเป็นบริเวณกว้าง และการเกิดการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบ Sheet Pile ในกรณีที่เกิดการเคลื่อนตัวมาก จำเป็นต้องใช้ระบบกำแพงกันดินที่แข็งแรงกว่า

แนวกันดินด้านข้างของ Sheet Pile Brace Cut หรือ Flexible brace cut ได้เคยสรุปโดย ดร. สุวฉัตร (2530) รูปที่ 3 แสดงสถานการณ์การเคลื่อนตัวของกำแพง Sheet Pile



และสภาพหน่วยแรงคาน้ำดันด้านข้างของ Sheet Pile หรือ Flexible สำหรับดินทราย (รูป a) และสำหรับ soft clay (รูป b) หน่วยแรงคาน้ำดันข้างของดินจะขึ้นกับการเคลื่อนตัวของ ก้านแนวดิ่งแสดงในรูปที่ 4 ในกรณีการก่อสร้างที่ค้ำยันอยู่เนื่องระดับเดียวใกล้ผิวดิน หน่วยแรงคาน้ำดันข้างจะมีค่าใกล้เคียงกับหน่วยแรงคาน้ำดันในสภาวะ Active ถ้ามีจุดค้ำยันอยู่หลายระดับ หน่วยแรงคาน้ำดันคาน้ำดันข้างจะน้อยกว่าในสภาวะ Active ที่วิเคราะห์โดยวิธีของ Rankine อันเนื่องมาจาก ผล Arching ที่ก้านแนวดิ่ง Sheet Pile ซึ่งจะทำให้ค่า Vertical Stress น้อยกว่าทฤษฎีของ Rankine อย่างไรก็ตามสำหรับหน่วยแรงคาน้ำดันคาน้ำดันแนวดิ่งหรือ strut จะสูงกว่าสภาวะ Active แต่จะไม่สูงกว่าในสภาวะสถิตย์ (At rest) ในสภาวะความเป็นจริงก่อนการขุดจะมีการ Preload ที่ค้ำยัน ขนาดของ Preload ที่ใช้ค้ำยันไม่สูงเกินไปจนกระทั่งกระทบต่อสภาวะคาน้ำดันคาน้ำดันข้าง อย่างไรก็ตามในการที่ Preload อาจจะทำให้แรงคาน้ำดันคาน้ำดันข้างสูงกว่าสภาวะ At rest ใ้แต่จะน้อยกว่าในสภาวะคาน้ำดันแบบ Passive

ตารางที่ 1 แสดงการคาดคะเนหน่วยแรงคาน้ำดันข้างเฉพาะสำหรับดินเหนียวโดย ใช้หลักการของ Rankine โดยปกติสำหรับกรณีดินเหนียว จะพิจารณาเป็นกรณีอิ่มตัว (Saturated condition) และเมื่อ Sheet Pile ค้ำยันการขุด ค่า Shear Strength และแรงคาน้ำดันจะเปลี่ยนแปลงตามเวลา กรณี Undrain นั้น จะเกิดขึ้นในเวลาสั้นหลังจากการ ขุดดินเสร็จ (Short term after Construction) ส่วนกรณี Drain นั้นจะเกิดขึ้นเมื่อถึง ช่วงเวลาหนึ่งหลังการขุดดิน (Longterm after Construction) โดยต้องไม่มีคนกดหนัก ในช่วงนั้น ค่า  $K_a$  และ  $K_p$  สำหรับทั้งกรณี Short term และ Longterm ได้สรุปแสดงใน ตารางที่ 1 อนึ่งในกรณี Active ของ Cohesive Soil จะเกิด Tension Crack ซึ่งเป็นผลเนื่องจากการเกิดการเคลื่อนตัวของก้านแนวดิ่ง (Wall Deflection) ซึ่งคาน้ำดันบริเวณ Tension crack นี้ จะไม่มี Shear Strength และ  $P_a = 0$  ความสูงของ tension crack คำนวณโดยกำหนดให้  $\sigma = 0$  ซึ่งจะทำให้

$$H_1 = 2c / \gamma_b \tan \phi_c \quad \text{สำหรับกรณี Drain case และ}$$

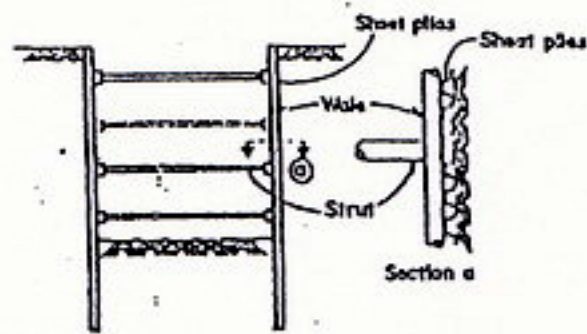
$$H_1 = 2S_u / \gamma_c \quad \text{สำหรับกรณี Undrain Case}$$

(หมายเหตุ  $\gamma_b = \text{buoyant unit weight}$ ,  $[\gamma_b = (\gamma_c - \gamma_w)]$  )

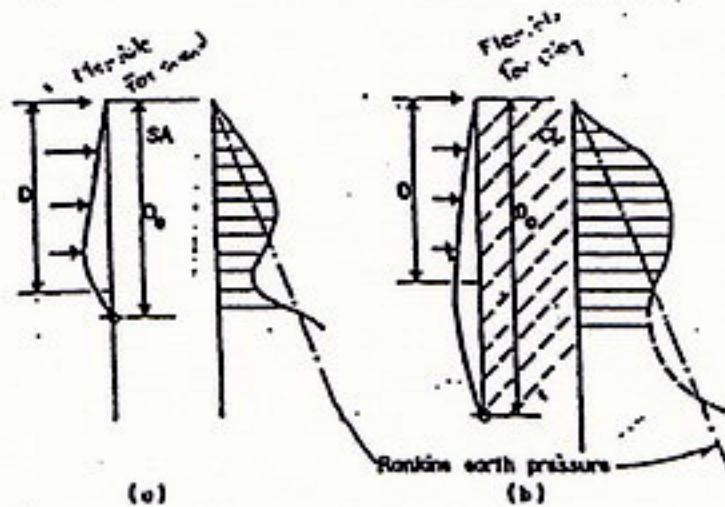
การคาดคะเนแรงคาน้ำดันข้างของ Sheet Pile ชนิด Brace Cut จะคาดคะเน ได้ยากถ้าหาก การคาดคะเนหน่วยแรงคาน้ำดันข้างนี้ ส่วนใหญ่นิยมใช้วิธี Empirical โดยอาศัยข้อมูลจากการวัดแรงใน Strut ในสนาม และรวบรวมแรงใน Strut ทั้งหมดเข้าด้วยกัน จากนั้นแบ่งสมทบเป็นแนวคาน้ำดันข้างของดินเพื่อให้ครอบคลุมทุกกรณี Diagram ของหน่วยแรงคาน้ำดันคาน้ำดันข้างที่นิยมใช้มากที่สุดเป็น Diagram ที่เสนอโดย Terzaghi and Peck (1967) ดังแสดง ในรูปที่ 5 Diagram นี้ได้มาจากการก่อสร้าง Brace Cut ที่มีสภาวะ ดังนี้

1. รางขุดลึกมากกว่า 6 เมตร
2. ระดับน้ำบาดาลในทรายอยู่ต่ำกว่าระดับชั้นขุด

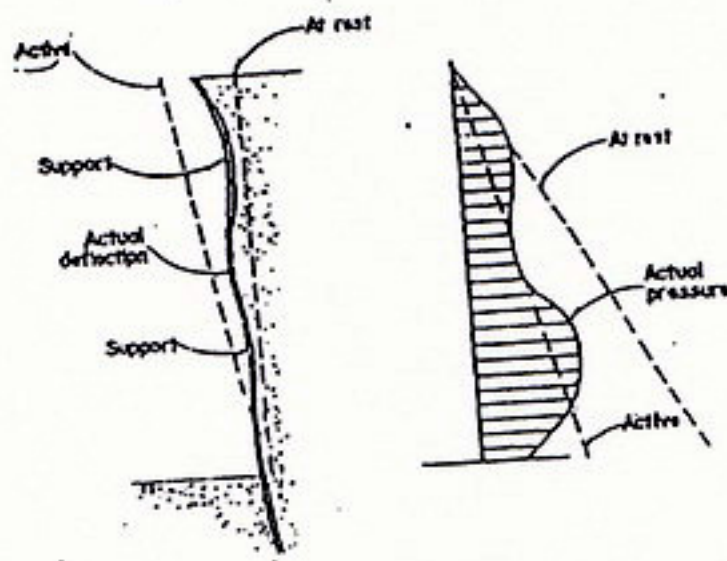




รูปที่ 2 การคำนวณระบบ Sheet Pile แบบ Brace Cut.



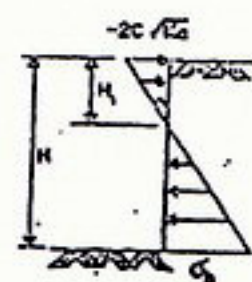
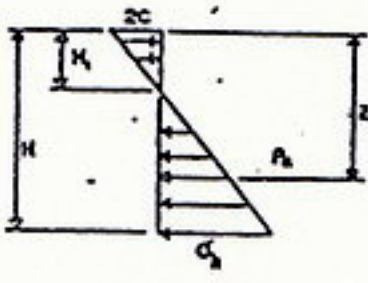
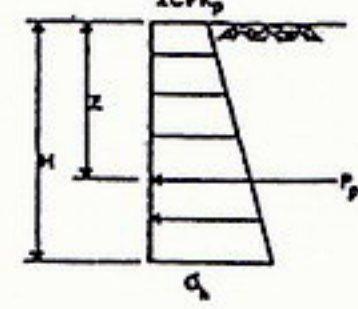

รูปที่ 3 สภาพการเคลื่อนตัวของกำแพง Sheet Pile และการกระจายของแรงดันดิน (a) สำหรับทรายและ (b) สำหรับดินเหนียว



รูปที่ 4 พหุคูณความสัมพันธ์ของค่าพิกัดการเคลื่อนตัวของกำแพง



ตารางที่ 1 แนวคิดค่าแรงของ Rankine สำหรับดินเหนียว

Condition	Pressure distribution	pressure at depth
1 Cohesive Soil drained Condition, active State		$\sigma_h = \gamma_c z K_a - 2c\sqrt{K_a}$ where $K_a = \tan^2(45^\circ - \phi/2) - \frac{2c}{\sigma'_v} \tan(45^\circ - \phi/2)$ $\gamma_c = \gamma_b + \gamma_w$ $H_1 = \text{Tension Crack}$
2 Cohesive Soil undrained Condition, $\phi = 0$ active State		$\sigma_h = \gamma z - 2s_u$ where $s_u$ - undrained shear strength $K_a = 1 - 2s_u/\gamma h$ $H_1 = 2s_u/\gamma_c$
3 Cohesive Soil drained Condition passive state		$\sigma_h = \gamma_c z K_p + 2c\sqrt{K_p}$ where $K_p = \tan^2(45^\circ + \phi/2) + \frac{2c}{\sigma'_v} \tan(45^\circ + \phi/2)$
4 Cohesive Soil undrained Condition, $\phi = 0$ passive state		$\sigma_h = \gamma z + 2s_u$ where $K_p = 1 + 2s_u/\gamma h$

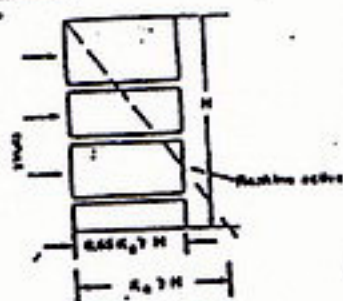


**PRESSURE DISTRIBUTION**

for Sands  
 $K_a = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi}$   
 $K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi}$   
 Add groundwater pressures where groundwater is above the base of the excavation

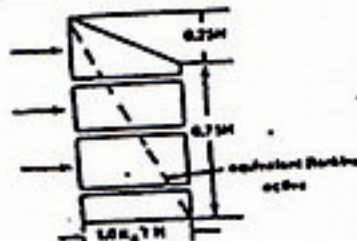
**TOTAL FORCE**

$F_a = \text{isoperoid} = 0.61 K_a \gamma H^2$   
 $F_p = \text{Rankine} = 0.30 K_p \gamma H^2$   
 $F_a/F_p = 1.38$



(b) Soft to medium clays ( $N \geq 3-6$ )  
 $K_a = 1 - \frac{2c}{\gamma H} = 1 - \frac{2c}{\gamma H}$   
 $m = 1.0$  except where cut is underlain by deep soft normally consolidated clay, when  $m = 0.4$

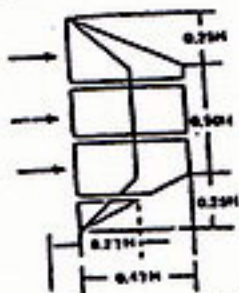
$m = 1.0$   
 $F_a = 0.175 \gamma H^2 (1 - \frac{2c}{\gamma H})$   
 $F_p = 0.30 \gamma H^2 (1 - \frac{2c}{\gamma H})$   
 $F_a/F_p = 1.73$



$m = 0.4 \rightsquigarrow$  no cut is underlain by deep soft normally consolidated

(c) Soil clays:  
 For  $N < 4$  (for  $4 < N < 6$ , use the larger of diagrams (b) and (c))

$F_a = 0.15 \gamma H^2$  to  $0.30 \gamma H^2$   
 $F_p/N = 4, F_p = 0$   
 $N < 4, F_p < 0$   
 Note: equivalent Rankine active = 0.



\*For clays, base the selection on  $N = \frac{2c}{\gamma H}$

$N = \frac{2c}{\gamma H}$   
 $C_u$

รูปที่ 5 Earth Pressure Diagram สำหรับดินหลายประเภท สำหรับงาน Brace Cut



- ๓. ทิวแนวแรงที่ใช้เนื่องทิวแรงใน Strut
- ๔. ทิวแนวแรงที่ใช้ Drained condition และ ทิวดินเหนียวใช้ Undrained Condition
- ๕. ในดินเหนียว ค่า  $H = \frac{c}{\gamma H/c}$  ควรจะน้อยกว่า 6 เพื่อให้เกิดการเคลื่อนตัวน้อย
- ๖. เสถียรภาพของการขุดค้นคือแยกตรวจสอบ

ในการวิเคราะห์แรงกระทำใน Strut ดังกล่าวสามารถคำนวณได้จากอีกตอนดังนี้ :

1. รัศมีของ Strut คำนวณหาค่าก่อนที่จะขุดดินถึงระดับความลึกที่อาจเกิดการร้าว Tension crack หรือ  $Z = 2C/\gamma$
2. ใ้แบ่งทิวแรงคานตามชนิดของดิน โดยคำนวณที่จุดกึ่งกลางระหว่างค้ำ Strut
3. แรงคานใน Strut พิจารณาที่ของทิวแรงในข้อ 2

ในการเลือกใช้ทิวแรงคานดินข้างข้างที่ใด ทฤษฎี Rankine และโดย diagram ที่เสนอโดย Terzaghi & Peck นั้น ควรพิจารณาถึงสภาพความเป็นจริงในสนาม เช่น ระบบ preload ใน strut ที่ใช้ การควบคุมสภาพการทำงานใน site ว่าจะสามารถแทนด้วย Active case ของ Rankine ได้หรือไม่ ในส่วนของ Diagram ที่เสนอโดย Terzaghi & Peck นั้น บางกรณีค่อนข้างจะ Conservative แต่สามารถครอบคลุมได้ทุกกรณีของสนามแรงกระทำ

นอกจากแรงกระทำด้านข้างของดินที่กล่าวแล้ว สิ่งที่ต้องคำนึงถึงควบคู่ไปคือ Surchage ที่อาจจะเกิดขึ้นในโครงการ เช่น จากกาถมส่งวัสดุ น้ำหนักของโครงสร้างหรืออาคารที่วางอยู่บนฐานรากเข็มสั้น หรือฐานรากแผ่ ดังแสดงในรูปที่ 6 อนาคตของแรงกระทำด้านข้างจะขึ้นกับชนิดของ Surchage ที่กระทำ ซึ่งสามารถแยกได้เป็นกรณีดังนี้

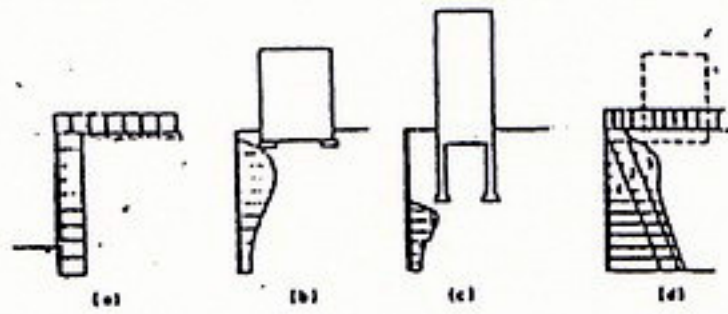
1. Uniform Loading คือ น้ำหนักเนื่องจากน้ำหนักดิน (earth surcharge) หรือ Embankment การคำนวณจะใช้

$$\sigma_h = \sigma_{h1} + \Delta\sigma_h$$

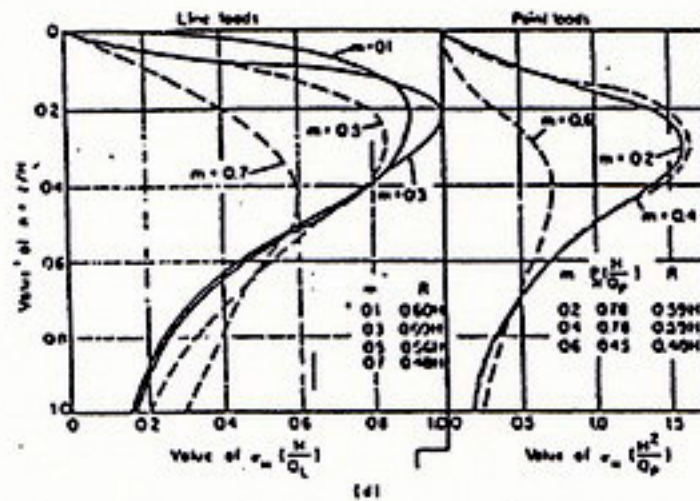
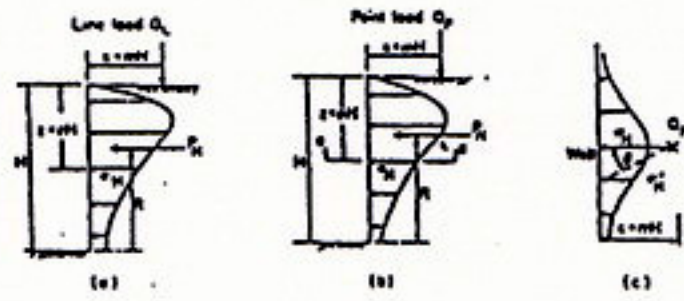
โดย  $\Delta\sigma_h = \gamma K_a$  โดย  $q = \text{Surcharge Load}$

2. Line Load คือ น้ำหนักจาก highway หรือ ฐานรากอาคารที่ต่อเนื่องกัน รูปแบบการกระจายแรงคานด้านข้างแสดงในรูปที่ 7(a) และ 7(d)
3. Point Load คือ น้ำหนักกระทำจากเครื่องจักร เช่น Crane รูปแบบการกระจายแรงคานด้านข้างแสดงในรูปที่ 7(b) และ 7(d)
4. Buried Load คือ น้ำหนักกระทำจากฐานรากของอาคารใกล้โครงการรูปแบบการกระจายแรงคานด้านข้างแสดงในรูปที่ 7(c) และ 7(d)





รูปที่ 6 การกระจายแรงดันดินข้างขึ้นเนื่องจาก Surcharge หลายประเภท  
 (a) excavation earth or uniform surcharge (b) building on shallow foundations ; (c) building on deep foundation ; และ (d) additional of lateral pressure



รูปที่ 7 หน่วยแรงดันดินข้างขึ้นเนื่องจาก line load และ point load โดยอ้างถึงจาก Boussinesq equation และ modify ด้วยประสบการณ์ (a) distribution from line load (b) distribution from point load และ (c) distribution from point load ; and (d) parameter n and m (After Terzaghi 1944 from HAVFAC 1992)



#### 4. การออกแบบ Sheet Pile ระบบ Bracing-Cut

การออกแบบระบบ Bracing Cut Flexible wall จะประกอบด้วยส่วนใด ๆ  
ส่วนใด ๆ Sheet Pile, Wale, Strut และ KingPost ในการวิเคราะห์ brace  
excavation นั้นจำเป็นต้องวิเคราะห์ทั้งระบบอันประกอบด้วย

- ✓ - แรงดันน้ำกระทำกับ Sheet Pile
- ✓ - แรงดันดินกระทำกับ Sheet Pile
- ✓ - แรงกระทำใน Strut
- ✓ - การเคลื่อนตัวของกำแพง
- ✓ - การเคลื่อนตัวของค้ำยัน
- ✓ - การวิเคราะห์เสถียรภาพของทั้งระบบ

##### 4.1 การออกแบบ Sheet Pile

การออกแบบ Sheet Pile สามารถแบ่งเป็น 2 ประเด็นหลัก ๆ คือ การหา  
ความยาวของ Sheet Pile ที่สามารถป้องกันการเกิด heave และการหาขนาด section  
หรือชนิดของ Sheet Pile ในส่วนของการวิเคราะห์ Heave Effect นั้น จะขึ้นกับความ  
กว้างของพื้นที่ของการขุดเทียบกับความลึกของการขุด คือ Narrow Cut หรือ Trench  
Excavation และ Deep brace cut ดังแสดงในรูปที่ 8 ในการขุด Narrow Cut จะใช้  
วิธีการตรวจสอบ Safety factor ต่อการเกิด bottom heave ซึ่งเสนอโดย Bjerrum  
and Eide (1956)

$$FS = \frac{N_c S_u}{(\gamma H + q)}$$

เมื่อ  $q$  = surcharge ภาย ๆ บริเวณการขุด

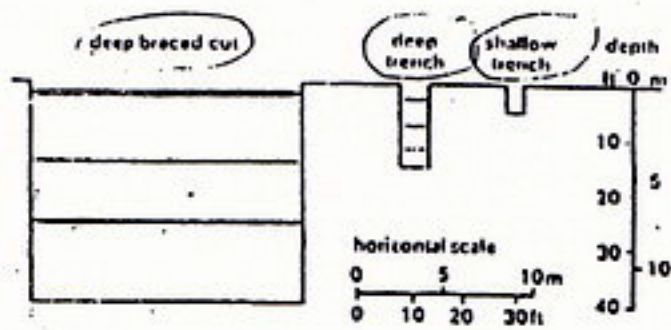
$S_u$  = Shear strength

$N_c$  = Stability Number แสดงในรูปที่ 9

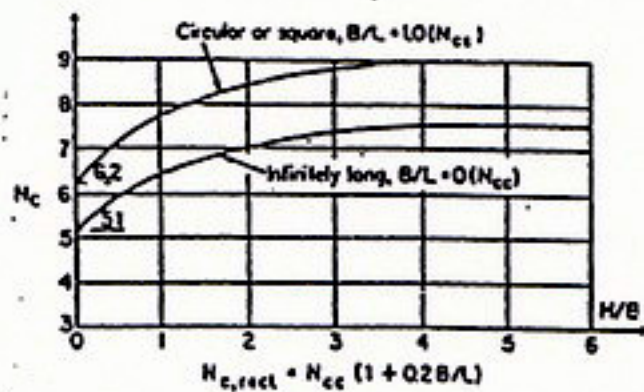
ในการขุด Deep brace cut การคำนวณความยาวของ Sheet Pile เพื่อ  
คำนวณการเกิด heave จะใช้การ Balance แรง ดังแสดงในรูปที่ 10

การหาค่าแรงเฉือนที่หน้าตัด Free body diagram น้ำหนักของดินในส่วน abcd  
สามารถจะเคลื่อนลงด้านล่างในขณะที่ Shear resistance,  $S$  จะยึดเอาไว้ด้านบน

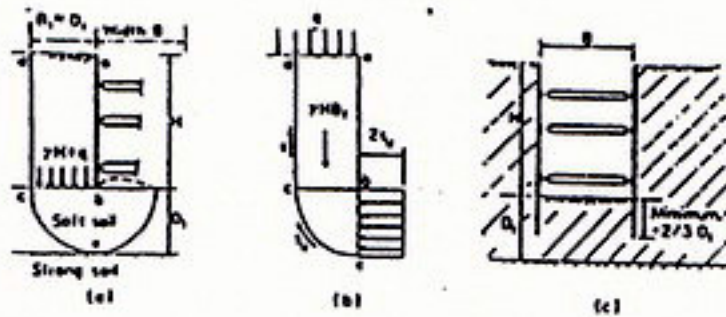




0 Diagram แสดงถึงขนาดและชนิดของงานขุด (After Hurrell & Atlewell (1984))



9 ค่า Stability Number  $N_c$  สำหรับการวิเคราะห์ heave ของงาน Braced excavation (After Bjerrum & Elde, 1956)



10 การเกิด Bottom heave ใน Soft Clay (a) braced wall in soft clay with bottom heave (b) free body diagram and (c) การเกิด Bottom heave Sheet Pile การจะสามารถป้องกันการเกิด heave



$$Q = H_1 S_u - H_2 S_u$$

เมื่อ  $H_1$  = Tension zone =  $2S_u/\gamma$  เมื่อจักรูเบนแล้วจะได้

$$S = \frac{1}{2} q_u (H - q_u/\gamma) \quad \text{-----(1)}$$

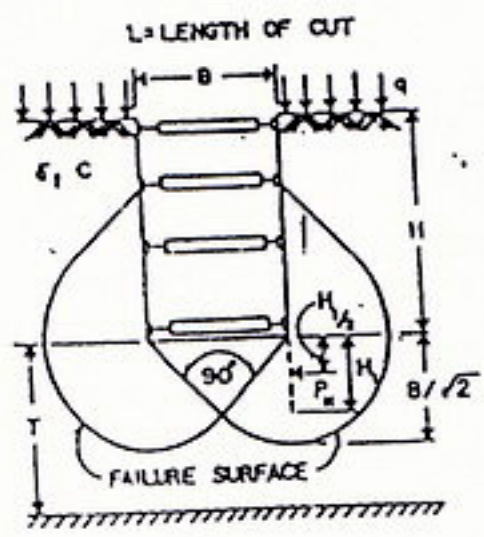
เมื่อ  $q_u$  = unconfined compressive strength =  $2S_u$

เมื่อนิจารค่าน้ำหนักของดินที่ Slide ลงมา abcd รวมกับน้ำหนัก surcharge  $q$  ซึ่งจะต้านทานด้วย shear resistance,  $S$  บนผิว cd และด้วย cohesive resistance  $S_u$  บนผิว ce และแรง Passive pressure บนผิว be โดยไม่คำนึงถึงน้ำหนักดินใต้เส้น bc และบริเวณทั้งสองข้างของเส้น be ค่า Net. passive earth pressure มีค่าเท่ากับ  $q_u = 2S_u$  เมื่อนิจารหา Moment รอบจุด b จะได้

$$(H+q)B_1 - 2S - \frac{\pi}{2} B_1 q_u \leq q_u B_1 \quad \text{-----(2)}$$

ความยาวของ Sheet Pile ควรลดลงไปไม่น้อยกว่า (2/3) D1 หรือ (2/3) B1 วิธีการคำนวณนี้จะเหมาะสมสำหรับกรณีที่มีความกว้างของการขุดดินจะต้องกว้างกว่าความลึกของการขุด

การวิเคราะห์ความยาวของ Sheet Pile เพื่อป้องกันการเกิด heave อาจจะใช้ empirical formula เสนอโดย NAVFAC DM7 (1974) โดยมีข้อกำหนดว่าค่า Safety factor น้อยกว่า 1.5 ดังแสดงในรูปที่ 11



If Safety Factor is less than 1.5 sheet pile must be carried below base of cut. to insure the stability

$$\text{If } H_1 > \frac{2}{3} \frac{B}{\sqrt{2}} ; P_H = 0.7 (\gamma H B - 1.4 C H - \pi C B)$$

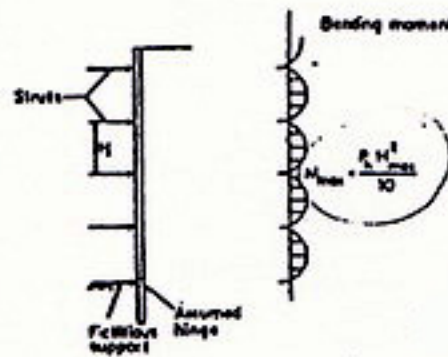
$$\text{If } H_1 < \frac{2}{3} \frac{B}{\sqrt{2}} ; P_H = 1.5 H_1 (\gamma H - \frac{1.4 C H - \pi C}{B})$$

รูปที่ 11 การหาความยาวของ Sheet Pile เพื่อป้องกัน heave สำหรับดินเหนียว (After NAVFAC DM7, 1974)



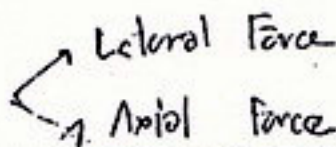
ในความเห็นของผู้เขียน พบว่า การหาความยาวของ Sheet Pile โดยใช้สมการ 1 และ 2 จะเหมาะสมและสะดวกต่อการวิเคราะห์ อย่างไรก็ตามความยาวของ Sheet Pile ควรตกลงลงไปถึงดินแข็ง

การหา Section ของ Sheet Pile จะกำหนดหาจากค่า Section Modulus ที่ได้จากการคำนวณค่า Maximum Moment ที่อาจจะเกิดขึ้นใน Sheet Pile ค่า Maximum Moment สามารถประมาณได้โดยใช้ แรงกระทำค้ำข้าง หรือ Diagram ที่เสนอโดย Brzaghli & Peck (1967) ซึ่งมีค่าประมาณได้ดังแสดงในรูปที่ 12 Maximum Moment ของ Sheet Pile จะขึ้นกับระดับและระยะของการ Bracing ซึ่งจะต้องจัดให้เหมาะสมกับแผนการก่อสร้าง



รูปที่ 12 การออกแบบขนาดของ Sheet Pile ในกรณี Continuous span

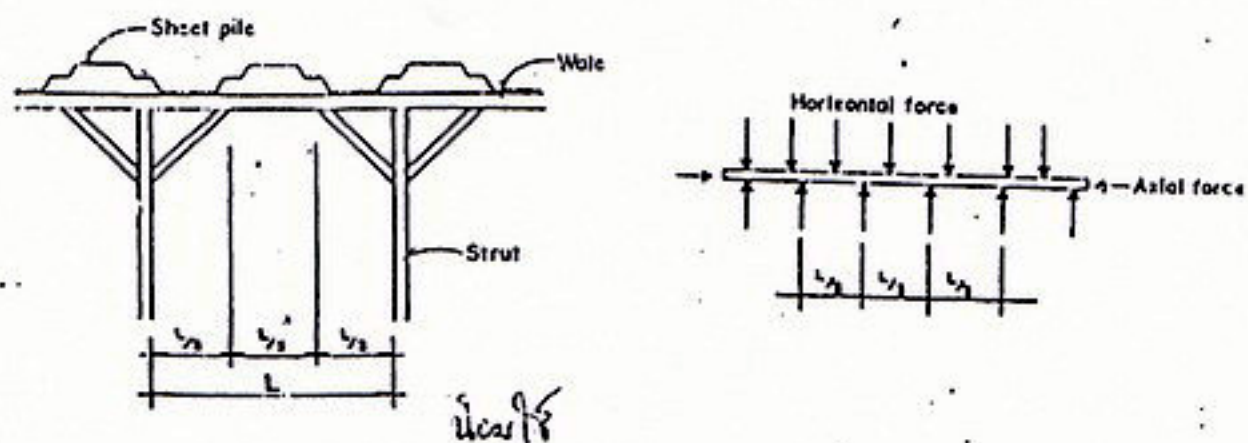
#### 4.2 การออกแบบ Wale



Wale จะออกแบบเพื่อให้ต้านแรงดันค้ำข้างจาก Sheet Pile ซึ่งจะถ่ายแรงเป็น Uniform horizontal force เข้าสู่ Wale Wale ส่วนใหญ่จะเป็นเหล็ก H-beam และขาดลอดเพื่อให้การถ่ายแรงได้สมบูรณ์ นอกจาก Moment จากแรงดันค้ำข้างแล้ว ยังมีแรง Axial force ใน Wale เกิดขึ้นด้วยเนื่องจากแรงกระทำจากจุดค้ำข้างจากบริเวณใกล้เคียงกัน ดังนั้น การออกแบบเนื้อหาของของ Wale จะคำนวณโดยให้ Wale มีความยาวต่อเนื่องกันรวมทั้ง Lateral force และ Axial force ดังแสดงในรูปที่ 13 ขนาดของ Wale จะเปลี่ยนแปลงขึ้นกับระยะของ Bracing หรือระยะห่างของ Strut ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะพยายามจำกัดให้ระยะห่างของ Strut สั้นลงโดยใช้กำลังรับจาก Strut เป็นรูปตัว Y ดังแสดงใน

รูปที่ 13





รูปที่ 13 รูปแบบการวิเคราะห์หาขนาด Wale เนื่องรับ Horizontal force จากแรงดันดิน และ Axial force จากแรงกระทำต่อเนื่องบริเวณเปิดขั้วขุด

ขุด รัด กับ พลาตฟอร์ม

#### 4.3 การออกแบบ Strut

รัดกับดิน

การออกแบบ Strut จะแยกออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนของ Strut ระดับบนสุด และส่วน Strut ระดับล่าง ๆ ในส่วนของ Strut ระดับล่าง ๆ ยกเว้นที่ระดับบนสุดจะออกแบบให้รับแรงจากแรงดันดินในแนว Axial force เท่านั้น แต่ในส่วนของ Strut ระดับบนสุด นอกจากจะออกแบบให้รับ Axial force แล้วยังต้องรับน้ำหนักจาก Platform ที่จัดทำเพื่อให้เครื่องจักรเข้ามาทำการขุดดิน และขนส่งดินออกนอกโครงการ การประมาณแรงกระทำใน Strut สามารถประมาณได้จาก Diagram ที่เสนอโดย Terzaghi & Peck ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยแบ่งแรงดันดินออกแบบช่วง ๆ บริเวณ ๗ จุดกึ่งกลางของระดับ Strut

Strut ต้องออกแบบให้รัดยึดเพื่อป้องกันการเกิดการโก่งซึ่งจุดที่จะยึดคือจุดที่ติดตั้ง KingPost โดยกำหนดในรูปของ  $1/r$  เมื่อหาตำแหน่งที่จะติดตั้ง KingPost ทั้งในแนวตั้งฉากและในแนวเดี่ยวกั้นแนวของ Strut ระยะของ KingPost หรือจุดยึดค้ำทางนี้ของหน้าเครื่องจักรสามารถทำงานได้ดี เช่นประมาณ 5-6 เมตร

#### 4.4 การออกแบบ KingPost

รับน้ำหนักจาก platform

ยึด strut

การออกแบบ KingPost จะกำหนดระยะห่างจากการคำนวณไว้ใน Strut การวาง KingPost อาจแบ่งได้เป็น 2 ระบบ คือ KingPost สำหรับน้ำหนักจาก Platform และ KingPost สำหรับยึด Strut ในกรณีพื้นฐานมักเป็นฐานรากแบบ Isolate การใช้ KingPost ของ Platform แยกจาก KingPost ของ Strut จะสะดวกกว่า เพราะนอกจาก Strut ของ Platform จะสามารถถอดเข้ามาใช้ใหม่ได้เมื่อเสร็จโครงการแล้ว ยังไม่ต้องคำนึงถึงการทุบตัวที่เสกต่างกับของ KingPost และ Platform ว่าจะมีผลต่อ Strut หรือไม่ เนื่องเพราะแยกส่วนแล้ว



ในการที่ฐานรากของอาคารเป็น Mat foundation การใช้ KingPost สำหรับ Platform แยกจาก KingPost ยึด Strut จะสิ้นเปลืองมาก เนื่องจาก KingPost ของ Platform ค้ำยันทั้งเพราะจะอยู่ใน Mat foundation ไม่สามารถยกขึ้นได้ ทำให้กินเปลืองมากขึ้น จึงทำให้นิยมออกแบบ KingPost สำหรับ Platform ให้เป็นตัวเดียวกับ KingPost ที่ใช้ยึด Strut แต่ปัญหาเกี่ยวกับการทรุดตัวของ KingPost ในส่วนของ Platform อาจจะทำให้เกิดการจุก Strut ลงทำให้เกิด Moment ขึ้นใน Strut ดังนั้นในการใช้ค้ำยันปริมาณการทรุดตัวเพื่อตรวจสอบ Differential Settlement

การออกแบบ KingPost จะออกแบบให้รับแรงเฉพาะในแนวแกนคือ น้ำหนักจาก Surcharge ของ Platform เท่านั้น หลักการคำนวณใช้หลักการเช่นเดียวกับการออกแบบวงเสียดทานผิวของเสาเข็ม โดยไม่คำนึงถึงแรงค้ำปลายเสาเข็ม ซึ่งค้ำน้อยมาก ระยะของแรงเสียดทานของ KingPost จะคำนวณเฉพาะในส่วนที่ลึกต่ำกว่าระดับขุดเท่านั้น การคำนวณสามารถคำนวณได้จาก

$$Q_u = p (\alpha S_u \Delta L)$$

$Q_u$  = Ultimate Skin friction

$p$  = เส้นรอบรูปของหน้าตัดของ KingPost

$\alpha$  = adhesive factor

$S_u$  = Shear strength

$\Delta L$  = ความยาวของ KingPost ในแต่ละชั้นดิน

ความยาวของ KingPost จะคำนวณโดยให้สามารถรับน้ำหนักบรรทุกจาก platform โดยใช้ Safety factor ประมาณ 1.2-1.5 จากค่า Ultimate skin friction ที่คำนวณได้ข้างต้น

การออกแบบระบบ Bracing ที่ Strut, Wale และ KingPost คำนวณแล้วข้างต้น ในแง่ปฏิบัติจะมีการเปลี่ยนแปลงบ้าง เพื่อให้สามารถทำการก่อสร้างได้ เช่น การจัดวาง Strut, ตัวยึดที่เชื่อมค้ำแห่งของเสาของโครงสร้าง ค้ำแห่งของ KingPost ต้องไม่ตรงกับค้ำแห่งเสาเข็มจึงจะทำให้ระยะห่างของ Strut เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยไปจากที่ได้ออกแบบไว้

##### 5. การวิเคราะห์การเคลื่อนตัวของ Sheet Pile และของค้ำรอบโพรงการ

ปัญหาเกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของค้ำรอบโครงสร้าง และการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile เป็นที่ทราบกันดีว่าจะเกิดขึ้นสูงมาก การป้องกันที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ การใช้ระบบ Preload หรือ Prestress ใน Strut ก่อนดำเนินการขุดดิน นอกจากระบบ Preload ใน Strut แล้ว ขั้นตอนการท้าวานหรือการขุดจะสามารถควบคุมการเคลื่อนตัวได้ วิธีการที่



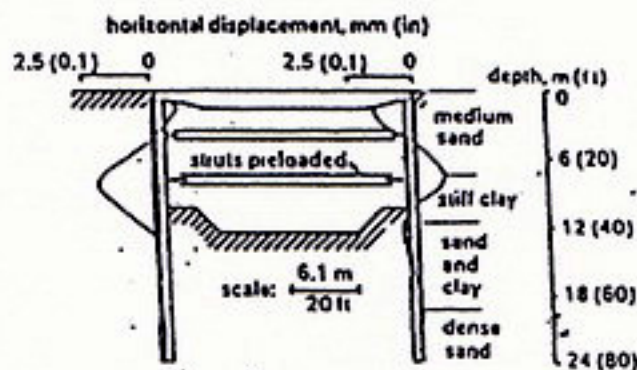
การขุดดินเฉพาะในส่วนบริเวณกลางโครงการก่อน จากนั้นจึงวาง Strut กับ KingPost ในส่วนของการต่อ Strut ให้ต่อเนื่องกันจะทำการขุดเป็น Trench เนื้อต่อ Strut ให้ค้ำยันตลอด จากนั้นทำการ Preload แล้วจึงจะขุดดินในส่วนที่อยู่ระหว่าง Strut แนว Preload ที่จะใช้ใน Strut นั้น สามารถคำนวณได้จากที่กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.3 อย่างไรก็ตามแนว Preload นี้จะไม่กระทำเท่ากันแรงที่ออกแบบไว้ เนื่องด้วยจะทำให้เกิดแรงต้านหรือแรงดันดินค้ำข้างสูงกว่าค่า Active หรืออาจจะสูงกว่ากรณี At Rest. Hurrell & Attlewell (1984) ได้แนะนำว่า ค่า Preload ที่กระทำควรอยู่ระหว่าง 40-70% (หรือประมาณ 50%) ของ Design Load เมื่อกระทำให้โครงสร้างแข็งแรงเพียงพอที่จะป้องกันการเคลื่อนตัวของกำแพงและการเคลื่อนตัวของกำแพงและ load response อันเนื่องจากการกระทำ Preloading แสดงในรูปที่ 14 ซึ่งเสนอโดย O'Rourke (1981)

ค่า effective stiffness,  $K_{eff}$  ของ Strut ที่กระทำ Preload สามารถประมาณได้จาก

$$K_{eff} = P_s / \Delta s$$

เมื่อ  $P_s$  = แรง Preload เฉลี่ยใน Strut

$\Delta s$  = ปริมาณการเคลื่อนตัวของ Strut โดยเฉลี่ย



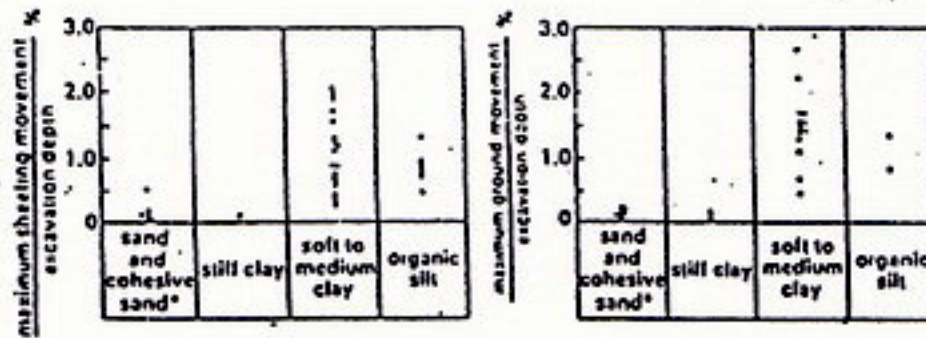
รูปที่ 14 การเคลื่อนตัวของกำแพงเมื่อกระทำ Preload ใน Strut (After O'Rourke, 1981)

#### การประมาณการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile และการเคลื่อนตัวของอากัน

การเคลื่อนตัวของ Sheet Pile และการเคลื่อนตัวของดินสามารถประมาณได้ 2 วิธี คือ วิธี Empirical และวิธี Numerical ในส่วนของวิธี Empirical จะประมาณจากการเก็บรวบรวมข้อมูลการวัดในสนามหลาย ๆ โครงการ รูปที่ 15 แสดงปริมาณการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile และปริมาณการเคลื่อนตัวของอากันเทียบกับความลึกของกำแพง ซึ่งรวบรวมเสนอโดย Park (1969) และ D'Oppolonia, 1971. อย่างไรก็ตามปริมาณการเคลื่อน

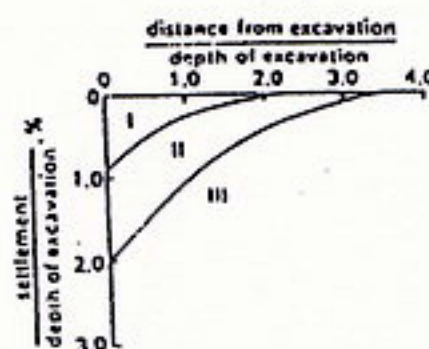


หัวของ Sheet Pile จะขึ้นกับปัจจัยหลายประเภท เช่น ระยะห่าง (spacing) ของ Strut, ความลึกของการขุดต่ำกว่าระดับ bracing ก่อนที่จะติดตั้ง brace ตัวใหม่, ระยะเวลาที่ใช้ในการขุดและการติดตั้ง Strut, รวมถึงน้ำหนักของการ preloading ใน Strut และรายละเอียดขั้นตอนการขุด



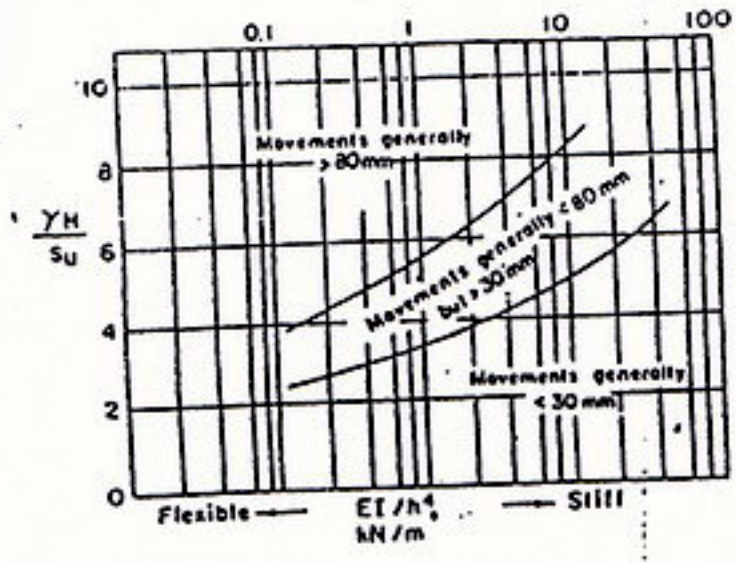
รูปที่ 15 ปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงและดินจากงานขุด (ข้อมูลจาก Peck (1969) และ D'Appoloma (1971))

Peck (1969) ได้เสนอวิธีการประมาณการเคลื่อนตัวของกำแพงและดินโดยรอบสำหรับงาน open cut ในดินเหนียว ดังแสดงในรูปที่ 16 การเคลื่อนตัวที่มากที่สุดของ Sheet Pile และปริมาณการทรุดตัวของบริเวณผิวดินทั่ว ๆ ไป จะมีค่าประมาณ 1x ถึง 2x ของความลึกการขุด นอกจากนี้แล้ว Goldberg et al (1976) ได้เสนอวิธีการประมาณการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile โดยคำนึงถึง Stiffness ของกำแพง และ Stiffness ของระบบค้ำยัน ดังแสดงในรูปที่ 17 EI คือ Stiffness ของกำแพง, ในขณะที่ย h คือ ระยะระหว่างจุด Support ผลของการเกิดการเคลื่อนตัวเสนอในรูปของ Stability Number ซึ่งเท่ากับ  $\gamma H/S_u$



รูปที่ 16 ปริมาณการเคลื่อนตัวและ Settlement สำหรับงาน Open Cut ในดินเหนียว (After Peck, 1969)





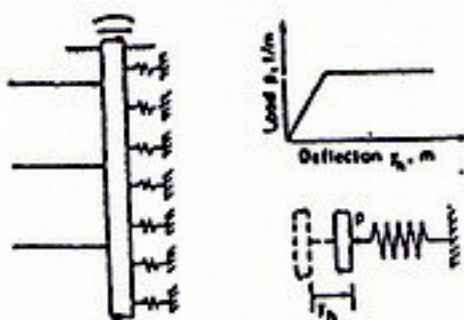
รูปที่ 17 ปริมาณการเคลื่อนตัวของค้ำข้างรองรับกำหนดและผลเนื่องจาก Stiffness ของค้ำแนง และ Supporting spacing (Goldberg, et. al 1976)

การประมาณการเคลื่อนตัวโดยวิธี Numerical จะสามารถประมาณได้โดยใช้ concept ของ Beam-on-an-Elastic Foundation วิธีการวิเคราะห์จะแบ่งส่วนของ Sheet Pile ออกเป็น Spring Segments ดังแสดงในรูปที่ 18 โดยในแต่ละ Spring segments จะเกิด lateral deflection,  $y$ , และ Soil resistance,  $p$ . การวิเคราะห์อาร์จะใช้ four order differential equation โดยกำหนดให้ soil reaction แทนด้วย line load ดังนี้



$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{dy}{dx^2} + p = 0$$

- $P_x$  = axial load on sheet pile โดยทั่ว ๆ ไปจะเท่ากับศูนย์  
 $y$  = lateral deflection ของ Sheet pile ที่จุด  $x$   
 $p$  = soil reaction  
 =  $-k_h x$  ( $k_h$  = Horizontal modulus of subgrade reaction)  
 $EI$  = flexural rigidity of pile



รูปที่ 18 Design principle สำหรับการออกแบบรับ Lateral force โดยมี Boundary conditions คือ horizontal force, bending moment, angle of rotation และ degree of restraining

ในการตีpile การ Preload และทำการยึด Strut ไม่ให้เกิดการ movement อาจจะช่วยลดการเคลื่อนตัวของ Sheet pile ได้ โดยจากประสบการณ์ของผู้เขียนพบว่า การวิเคราะห์โดยกำหนดให้จุด Strut เป็น pin ไม่มีการเกิด deflection จะสามารถควบคุมปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพง Sheet pile ให้อยู่ในอัตราส่วนประมาณ 15-25% ของที่ปรากฏได้จากวิธี empirical ที่เสนอในรูปที่ 17 ดังนั้นการกำหนดอันตรกิริยา preload และขนาดของ preload ตลอดจน workmanship จะมีผลต่อการวิเคราะห์ปริมาณการเคลื่อนตัวของกำแพง



## 6. บทสรุป

บทความนี้ประกอบด้วยหลักการและขั้นตอนการออกแบบ Sheet Pile ระบบ Brace cut อันประกอบด้วย Sheet Pile, Wall, Strut และ KingPost การออกแบบส่วนประกอบเหล่านี้มีข้อกำหนดมากมาย การเลือกใช้ทฤษฎีและข้อกำหนดที่ถูกต้องจะทำให้การออกแบบปลอดภัย และประหยัด อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ Shear Strength ของดินมีส่วนสำคัญมากในการคำนวณแรงกระทำด้านข้างซึ่งเคยสรุปไว้แล้วโดย ดร.สุรฉัตร (2530) การใช้ระบบ Preload ใน Strut ได้กล่าวโดยสังเขปเพื่อควบคุมการเคลื่อนตัวของ Sheet Pile การประมาณปริมาณการเคลื่อนตัวของดินโดยรอบโครงการ สามารถประมาณได้โดยอาศัย Empirical และ Numerical formula แต่การควบคุมการเคลื่อนตัวของทั้ง Sheet Pile และของดินโดยรอบจะขึ้นกับขั้นตอนการก่อสร้างและ workmanship เป็นส่วนใหญ่

## 7. เอกสารอ้างอิง

- Ejerrum, L and Eide, O. (1956) : Stability of Strutted excavations in clay, *Geotechnique* 6(1).
- D'Appolonia, D.J. (1971) Effect of foundation construction on nearby structure, Proc. 4<sup>th</sup> Panam Conf. Soil Mech. Found., Engl, Puerto Rico.
- Goldberg, D.T, Jaworski, W.E and Gordon, H.D (1976) : Lateral support systems and underpinning, Vol 1. Design & Construction., Federal Highway Administration.
- Hurrell, H.R. and Attewell, P.B. (1964) : Deep trench and excavation in Soil, Chapter 4 of Ground movements and their effects on structures, Surrey University Press.
- NAVFAC DM7 (1974) : Design Manual Soil mechanics, Foundations, and Earth Structures, Dept. of the NAVY.
- O'Rourke, T.D. (1981) Ground movements caused by braced excavation, *J. Geotech, Eng.Div., ASCE*, 107 (OT9).
- Peck, R.B (1969) Deep excavation and tunnelling in soft ground, Proc. of 7 ICSMFE, Mexico.
- Terzaghi, K. and Peck, P. (1967) : Soil mechanics in Engineering practice, John Wiley and Son.

ศรจักร สันทัศน์ (2530) การคำนวณแรงดันด้านรับและข้อมูลในการออกแบบการวิเคราะ  
ทางวิชาการเรื่องการออกแบบและก่อสร้าง Sheet Pile, ๖๙๓.