

仙台火力発電所 岸壁地区貯炭場地盤改良工事について

東北電力 K.K. 仙台火力発電所建設所

鳥 居 良 明

ま え が き

仙台火力発電所は近年著しく増加の傾向を示している東北地区の電力需要に対処して、東北電力の系統火力発電所として、昭和32年々月に建設が着手され、1号機175MWは既に昨年11月1日より営業運転に入っており、2号機175MWも近く発電開始の状況である。

発電所の敷地は塩釜港の外港部代ヶ崎浜と航路との向の約170,000 m²の海面を埋立して造成されたものであり、在来 of 海底土砂は非常に軟弱な冲積粘土が厚く堆積している。貯炭場は発電所本館北側、航路寄りの約38,000 m²の面積で有効貯炭容量は175,000 ton、計画最大貯炭高は10 m (10 t/m²) であり、この貯炭載荷に必要な岸壁地区地盤の剪断強度は3~3.5 t/m² であるが、在来 of 海底地盤は大略2 t/m² に過ぎない。これがため昨昭和34年2月より、貯炭開始の6月初旬を目標にサンドドレーン、ウエルポイント併用工法を採用して面積約4700 m² の地盤改良工事を実施した。

本工事はサンドパイル設置にウォータージェット穿孔法を用い、又圧密圧力の一部にウエルポイントに依る地下水低下法を利用して、比較的短期間に所期の効果を挙げ得たので、ここにその工事概要を報告して御参考に供したい。

§.1 土 質 の 概 要

塩釜港一帯は元来沈降海岸と云われているが、地盤改良区域内

で工事以前に実施した3ヶ所のボーリング及び2本のシンオー
ルサンプリングによる土質調査の概要は次の如くである。

即ち基準標高を塩釜港基準水面 (SP) に採ると、柱状図によ
れば敷地の埋立高さは $SP + 3.5m$ で、在来海底面は $SP - 2.0$
 m であり、この間の埋立土砂はシルト質砂である。この海底面下
約 $2m$ の厚さは漂砂の層であり、この砂層の下は貝殻交りのシル
ト質粘土ローム乃至シルト質ロームの層が約 $1m \sim 1.5m$ の厚
さで岩盤上に堆積している。

この粘土層の土性試験結果は大略次の如くである。

a) 物理的性質

粒子比重 ; G	$2.39 \sim 2.66$	平均	2.46
含水比 ; $w\%$	$78.3 \sim 115.1$	"	100
間隙比 ; e	$2.08 \sim 2.84$	"	2.48
粘土分析 ; 粘土	$30\% \sim 7\%$	シルト	$60\% \sim 53\%$
	砂		$10\% \sim 40\%$

液性限界 ; $Lw\%$	$44.3 \sim 85.3$	平均	65.2
塑性限界 ; $Pw\%$	$20.0 \sim 36.0$	"	29.1
塑性指数 ; PI	$22.4 \sim 51.3$	"	36.1

A C 法 ; 大体 CH に属し A 線に沿っている。

b) 圧縮, 剪断試験

圧縮強度 ; q_u	kg/cm^2	$0.026 \sim 0.591$	平均	0.395
粘着力 ; C	kg/cm^2	$0.07 \sim 0.26$	"	0.204
鋭敏比 ;		$(8 \sim 12)$	推定値である	
内部摩擦角 ; ϕ		$1^\circ 30' \sim 14^\circ 20'$		

c) 圧密試験

先行荷重 ; P_0	kg/cm^2	$0.4 \sim 0.9$	平均	0.61
圧縮指数 ; C_c		$0.83 \sim 1.05$	"	0.90
圧密係数 ; C_u	cm^2/sec	$2.39 \times 10^{-4} \sim 5.17 \times 10^{-4}$	"	3.7×10^{-4}

以上の試験結果よりこの粘土層の含水比は極めて大きいと云う
ことはないが、液性限界を大きく越しており、加えて超鋭敏な粘

土であることから地盤改良に当っては特に地盤を攪乱させない工法の採用が必要な土質であった。

§.2 地盤改良計画

石炭載荷を行った場合の円弧滑り面を種々検討した結果、図2-1の様な半径100mの円弧が最も危険となった。然し乍ら図に示す岸壁前後面6mの面は既に昭32年12月より昭和33年々月にかけてサンドドレーン工事を実施しているので、今回の改良区域はこれに接続する貯炭場側の中30mとした。

前述の円弧滑り面で安全率 $F_s = 1.2$ とした場合の粘土層の必要剪断強度は内部摩擦角を無視すると、粘着力は $c = 3.5 \text{ t/m}^2$ となる。従つて施工期間を考慮して6月初旬の貯炭開始時期に於いて、圧密期間2ヶ月にて $c = 3 \text{ t/m}^2$ ($F_s = 1.0$)、圧密完了時の目標粘着力は 3.5 t/m^2 を得る計画で、サンドドレーン改良工事を実施することとした。

§.3 設計概要

前記土質試験の結果を勘案して、全改良区域に於ける粘土層中央部の平均的な粘土を想定して設計を進めることとした。

a) 圧密圧及び圧密率の決定

先行荷重 $P_0 = 6.1 \text{ t/m}^2$ 、圧縮指数 $C_c = 0.9$ 、 $e = 2.48$ 、 $e_0 = 2.30$ の平均値を基にした図3-1の $e - \log P$ 曲線をもつて、粘土層中央部の代表的な曲線とした。粘着力 c と荷重強度 P との比は実験結果によれば平均0.3であるが、前回の工事実績を勘案して安全側に0.25とした。 e と P との関係も図3-1に示してある。この曲線より目標粘着力 3 t/m^2 に対する間隙比は $e_1 = 2.05$ であり、これは100%圧密で $P = 16 \text{ t/m}^2$ 、 $e_3 = 1.94$ の70%に相当する。又 $c = 3.5 \text{ t/m}^2$ に対しては $e_2 = 1.98$ で、これは90%圧密となる。従つて粘土層は平均圧密圧 16 t/m^2 で圧密率70%及び90%の時の粘着力は、

夫々 $C = 3 \text{ t/m}^2$ 及び 3.5 t/m^2 となる設計である。

b) 圧密荷重

粘土層中央部の圧密圧 4 t/m^2 を得るためには図 3-2 の深度 — 荷重曲線に示す如く、地盤上に 9 t/m^2 の載荷を必要とすることになるが、本地点に於ては、この荷重を一時に載荷することは地盤のじり破壊を生ずる危険があり、又工期の点より段階的に載荷を行うことが不可能であることから、地下水位の低下による圧密圧と盛土載荷とで加圧することにした。

この地下水位を低下させることはサンドパイル内部の水圧をそれだけ低下せしめて、粘土内部の空隙水圧との差を高めて、粘土の圧密を促進させることであり、粘土に対してはそれだけ見掛の空隙水圧が上昇することとなり、圧密圧を直接加えたときとの結果が得られるものである。幸い本地点に於ては粘土層上部に在来の海底砂層が存在し、又埋立土砂もシルト質砂で透水係数は小さいがウエルポイントが可能であるので、在来地下水位 $SP + 2.0 \text{ m}$ を $SP - 1.50 \text{ m}$ 返ウエルポイント工を採用して低下せしめ、残りの不足分 3.5 t/m^2 は盛土載荷によることにした。

c) サンドパイルの径、間隔及び圧密時間

サンドパイルの径及び間隔は種々検討の結果、径 (d_w) = 25 cm 、間隔 (d_e) = 150 cm と決定した。サンドパイルの総数は施工区域 $4,700 \text{ m}^2$ に対して $2,080$ 本となる。

圧密時間と圧密率の関係は次式、

$$t = \frac{d_e^2 \times T}{C_v}$$

茲に t ; 圧密時間, C_v ; 圧密係数 (水平方向)

T ; 時間係数, d_e ; サンドパイル間隔

$$\text{より } t = \frac{150^2 \times T}{4.5 \times 10^{-2}} \doteq 5 \times 10^5 \times T \text{ (min)}$$

(C_v は鉛直方向の 2 倍をとって水平方向のものとした)

但し、 T は $\tau = \frac{de}{dw} = \frac{150}{25} = 6$ に対する時間係数で、

次の値である。

圧密率 U	10%	30%	50%	70%	90%
時間係数 T	0.008	0.04	0.08	0.17	0.32

次に粘土中央部の圧密率と間隙水圧との関係は水頭を示した次表より圧密率 $U = 0\%$ にて $SP + 2.0$ m, 圧密率 100% にて $SP - 1.50$ mである。

表

条 件	変 化 量	水 頭
埋 立 前		$SP + 2.0$
埋土土砂によって生じた過剰水圧	4.7 t/m^2	" $+ 4.7$
工事直前までの自然圧密による減少	$- 1.5$ "	" $+ 5.2$
載荷重による過剰間隙水圧	2.8 "	" $+ 8.0$
地下水低下により	$- 9.5$	" $- 1.50$

又、圧密沈下量は粘土層の厚さを 1.5 m とすれば圧密率 70% 及び 90% で夫々 110 cm 及び 145 cm 程度である。

これらの関係は図 3-3 の圧密進行曲線に示す通りである。

§.4 工事施工の概要

a) サンドパイル工事

埋立土砂の表土 1 m は橋外より運搬した出土で地盤拵がしてあるので、ジェットによるサンドパイルの施工は転石にあたって困難であるので、工事に先だつてこの表土を掘削除去した。サンドパイル工は $3' \times 4$ 段, 20 HP のタービンポンプ, 高さ 8 m のジェット打込櫓及び長さ 1.2 m, 外径 25 cm の先端ノズルに連結される長さ 5.5 m の $\phi 2'$, $\phi 3'$ 及び $\phi 4'$ の鋼管 3 本による全長 18 m のジェット送水用伸縮管を一組とする特許中央開発 KK 式打込設備により、打込櫓を計画位置に布

設された 9 kg レール上に固定して、海水によるウォータージェットにより岩盤迄穿孔した。

工事設計図及び使用機械一覽表は図 4 - 1, 2, 3 に示す通りである。又、当初心配された穿孔ジェットによる排泥流の処理は図 4 - 4 に示す仮設備により灰捨地に放流した。

上記のサンドパイルの形成に当って、上部 6.5 m は砂質土であるからこの部分は $D = 10^\circ$, $L = 6 m$ のケーシングパイプをウォータージェットにより打込んで孔壁の崩壊に備えた。粘土層の孔壁が崩壊する場合は、岩盤迄ケーシングを挿入しなければならないが、幸い水洗の状況及び孔径測定結果より崩壊の恐れがないことが判明したので、ノーケーシングとし、穿孔完了後 10 数分放置してジェットを撤去し、砂を人力により徐々に投入して最後に上部のケーシングパイプを引抜いて作業を完了した。サンドパイルは地下にあるので、直接その状況を確認出来ないが、孔内水洗により排出されるスライム及び流出水の透明度より推定して、充分満足な穿孔をしているものと思われ、又、投入砂の量が計算値より $2 \sim 4$ 割方増加している事より、サンドパイルの径が設計よりもやや大きめに形成されていると考えられる。

サンドパイル設置の実績は当初の計画 70 本/day に対して、埋立地盤内の状況及び昼夜兼行による機械の故障等により最低 10 本/day, 最高 86 本/day, 平均 53.5 本/day であり、使用機械台数 5 台で、1 台当りの 1 日 (24 時間) 平均打込本数は 10.7 本であった。尚、全本数 $2,080$ 本の稼働日数は 39 日間を要した。

b) ウェルポイント工事

ウェルポイント工事は既に一般化され施工についても別に変った事はないが、サンドパイル形成に層接してサンドパイル中にウェルポイントを設置した。図 4 - 1, 4 - 2 に示す様に、全区域を 2 ブロックに分け、設置完了区域より逐次揚水を開始

した。工事規模はウェルポイント $\phi 98$ 本、 $\phi 100$ ヘッダーパイプ延長 30.2 m、 $\phi 100$ ヘッダーパイプ延長 30.2 mであり、当初現場に於ける既往の実験結果より水位低下については危懼されたが、予想より地下水は良好に低下した。各ポンプステージは $\phi 100$ ビューガルノ台に対し 2×2 「ヴァキュームポンプ」 2 台で排水量は 200 l/min程度であった。尚、中央部の $\phi 100$ ヘッダーラインは所定水位低下後直ちに撤去して、 50 cm厚の敷砂工を実施した後載荷工を実施した。

c) 工事工程表

本工事の約定、実績工程は図4-5に示す通りである。

8.5 調査観測並びに結果の検討

工事期間中地下水位の低下状況、圧密進行状況及び粘着力の増加を測定し改良の進む状況を判断して、当初計画に対処出来る様にした。

図5-1の調査工事位置図に示す様に各区域別に地下水位の観測井、圧密状況判断のために沈下板及びピエゾメーターを設置し、又粘着力増加測定用としてベーンシヤーテスト及びスエーデン貫入試験を現場に於て行った。

これらの観測資料及び試験結果の内、代表的なNo. 2ブロックの水位低下曲線、地盤沈下曲線及び間隙水圧変動曲線を一括して図5-2に示す。又、ベーンテスト及びスエーデンテストの結果は、夫々図5-3、5-4に示す如くである。

図5-2の地盤改良状況を一表にして計画と実測の数値を示せば次の如くである。

尚、No. 2ブロックの粘土厚は設計の 1.5 mに対して 1.1 mであったので、設計値を換算して比較する。

計 画 - 観 測 値 比 較 表

項 目	記 号 単 位	当 初	6 月 初		7 月 初		9 月 末		備 考
			計 画	実 測	計 画	実 測	計 画	実 測	
地下水位	S P (m)	+2.0	-1.50	-1.50	-1.50	-0.7	-1.5	+1.0	*8月末ウエルポイント停止
間隙水圧	S P (m)	* (+5.2) +8.0	+1.4	+0.1	+0.5	-0.2	-0.5	+1.4	*サンドパイル施工前 △ウエルポイント停止による
地盤沈下	m	0	1.10		1.35		1.45		粘土層 65 m 厚で計算
			0.83	0.75	0.99	0.85	1.05	1.05	全上 11 m 厚に換算
圧 密 率	$\bar{U}$ %		70	83	84	87	90	(90)	圧密進行曲線図参照
剪断強度	C kg/cm ²	0.215	0.30	0.36	0.325	0.405	0.35	-	ベーンテスト結果の 平均値

上記の表で、6月初めの圧密率が計画値よりも相当大きく出ているのは、計画は4月より圧密を開始して2ヶ月後の6月初で70%の圧密が進行する設計であるが、実際には施工以前の間隙水圧が埋立土砂による過剰間隙水圧のためSP+5.2mに上昇して居り、従ってサンドパイル設置と共に圧密沈下を起しており、設計の圧密圧が100%作用した4月初めに於ては、30%の圧密が既に進んでいたためである。又、間隙水圧と地盤沈下量及び圧密率との相互関係に於て、計画数値と若干相違を来たしているが、これは計画に使用したCc、Cr、e等の値が、実際の粘土のそれと多少異っていたためであり、粘土層11mに反ぶ地盤に対しては計画値と実測値とがよく一致していると言えるであろう。

上記現場試験の他に6月上旬より施工区域内外に於てノ8ヶ所のボーリングを実施し各ヶ所8本当りのシンオールサンプリングによりソイルテストを実施して土質改良状況を確認した結

果からも、上記の現場観測並びに試験の妥当性が判明した。然し乍ら ϕ_u 及び c の値についてはベーンテスト、スエーデンテストの結果から予想した値よりも少々低い $c = 0.2 \sim 0.3$, $\phi_u = 0.4 \sim 0.5$ の値が出た。これは事前調査の場合と全様に、粘土が余りにも鋭敏なため、サンプリング及び試験の過程において若干の攪乱が避けられなかったことによるもので、この事は一軸圧縮試験の応力-歪曲線の形にもよく現れている。

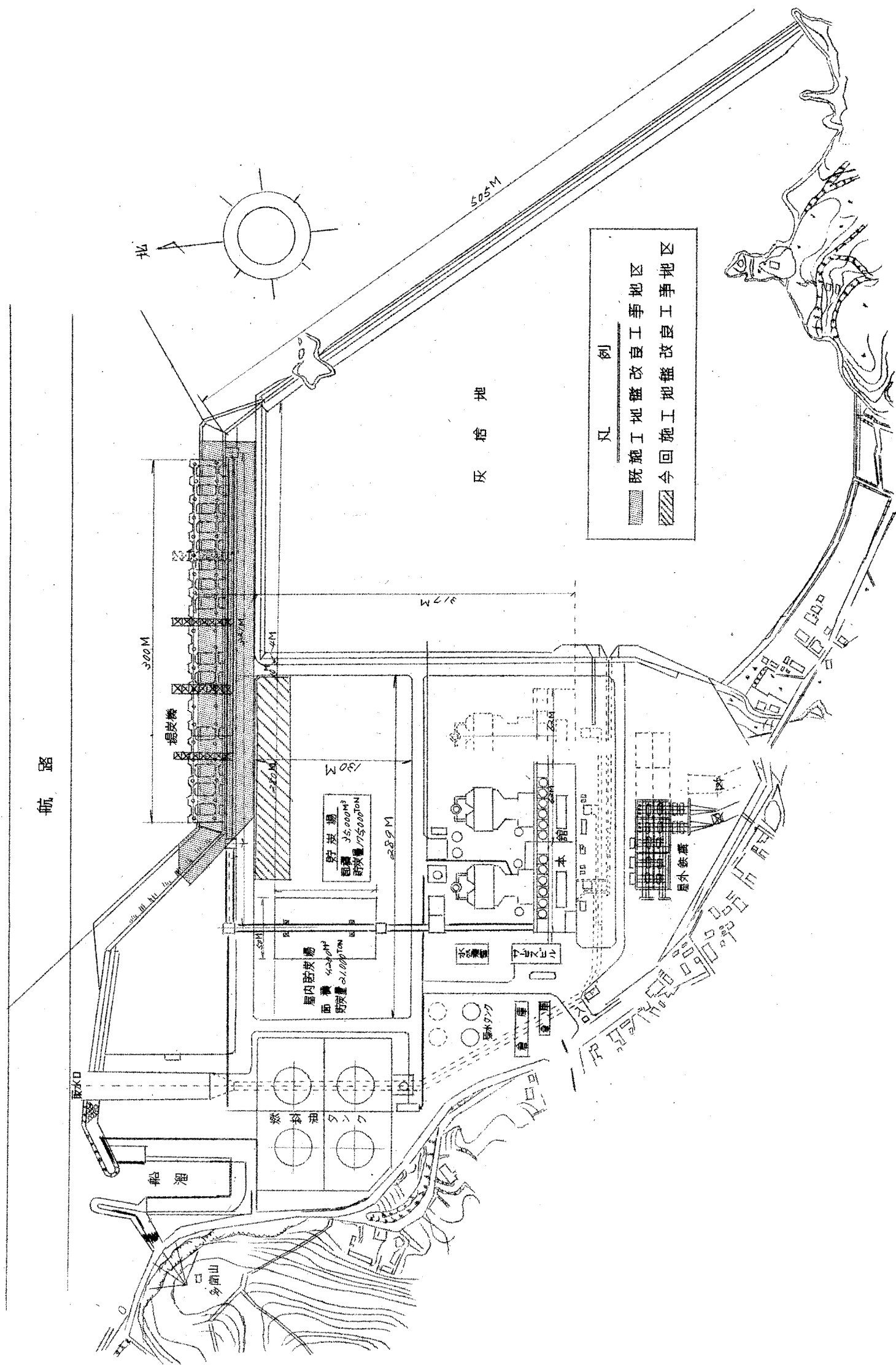
従って、超鋭敏な粘土の粘着力については現場試験の結果に重点を置いて考えるべきであり、観測による誤差を考慮して若干割引いて考えても、所期の粘着力が得られたものと判断される。

む す び

本工事は所期の目的を充分達成したものであるが、隣接地点で前年行ったペデラによる鋼管打込式のサンドドレーン地域は未だ粘着力の恢復が認められない。これはこの現場のような超鋭敏な粘土地盤に対しては特に自然状態を攪乱させないことが強く要望される事を示している。又、本工事で採用したウェルポイントによる地下水低下による圧密圧は 100% 計算通り作用するものであり、工期の短い軟弱地盤改良工事に於ては極めて有利であり、現場の状態によつては真空効果をも期待出来ることであろう。今回のこのような工事に於て、鋭敏な粘土に対しては現場試験の必要を痛感した。出来得る限りの現場観測及び試験の実施を強調してむすびとする。

最後に、本工事の御指導を戴いた東北大学河上教授、並びに計画施工に當つて並々ならぬ努力をして戴いた中央開発 KK 戸部技師をはじめ現場の工事関係者に深く感謝の意を捧げる次第である。

図 1 仙台火力発電所構内一般平面図



通志校勘記

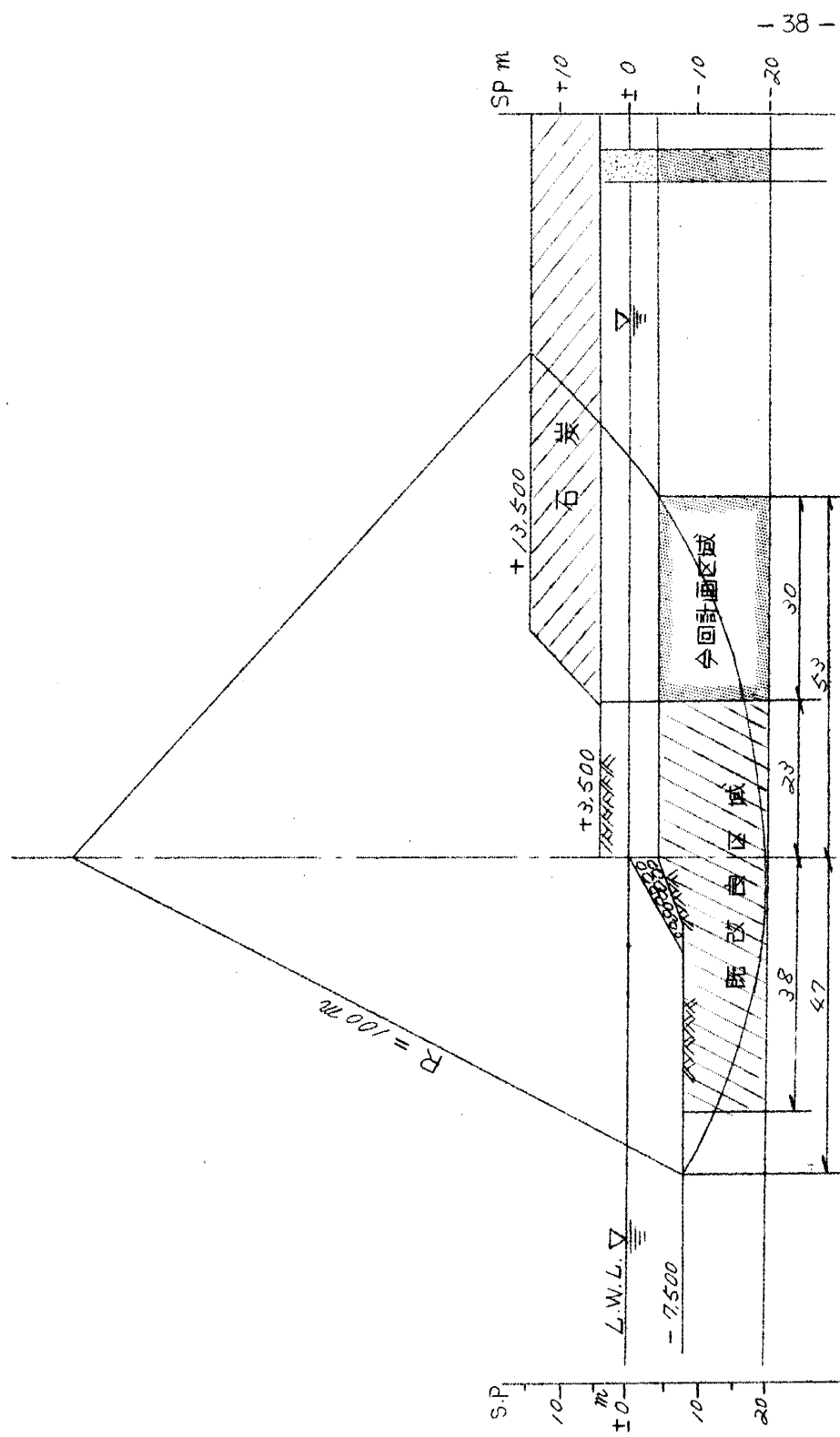
$$S = \frac{1}{1.000}$$


図 3 - 1 圧密試験：荷重強度－間隙比曲線

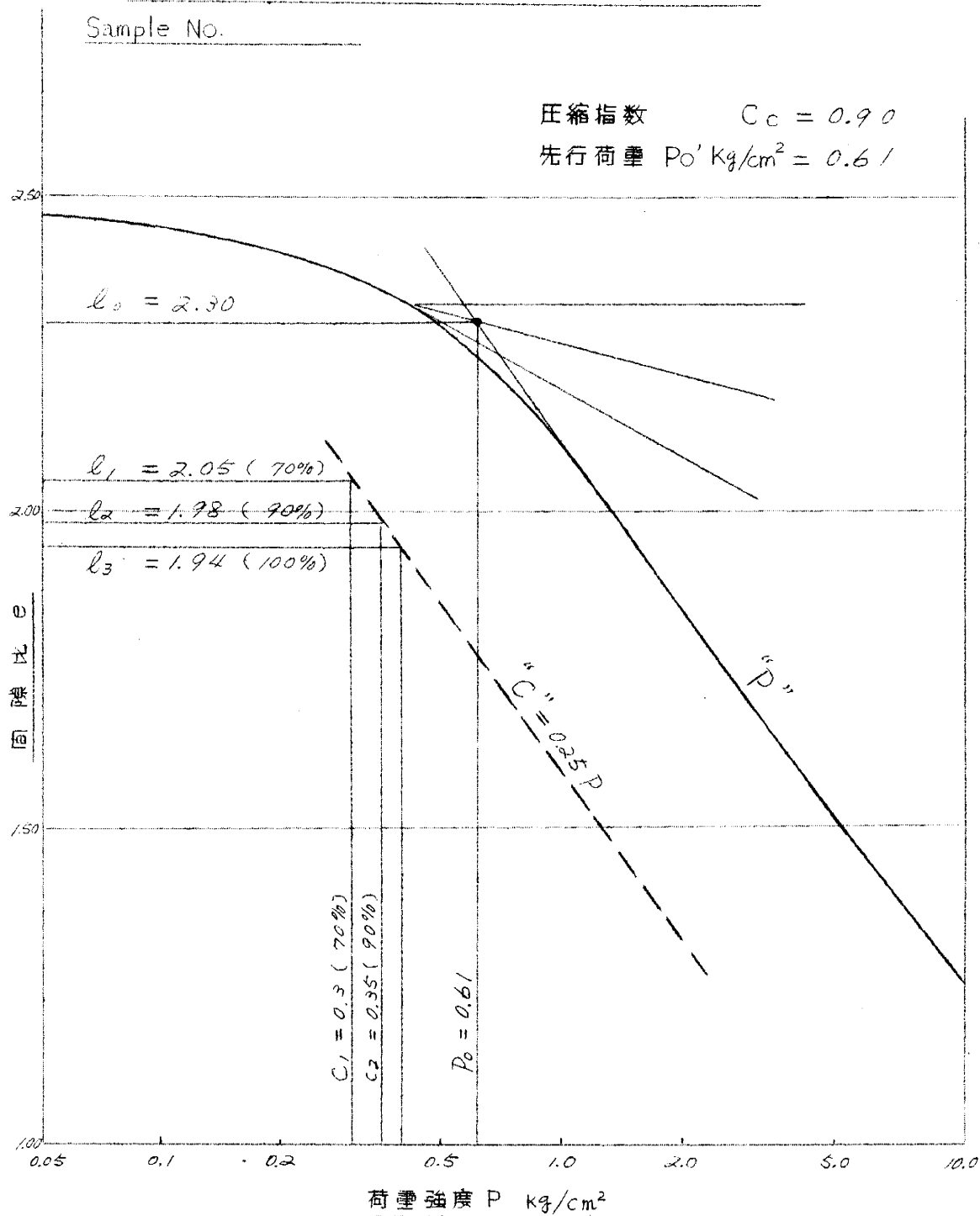


図 3-2 深 度 - 有 効 圧 曲 線

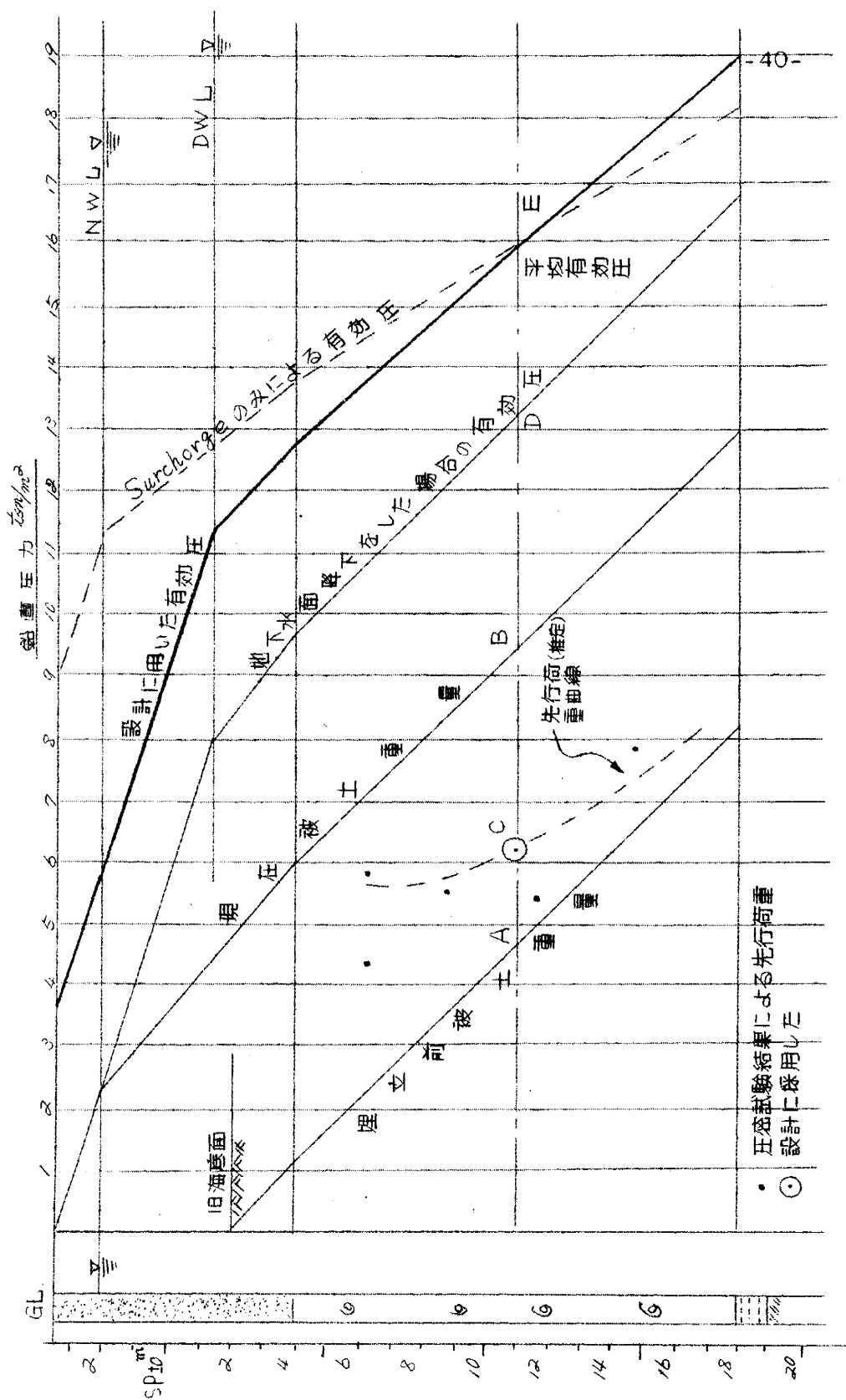


図 3-3 圧縮進行曲線

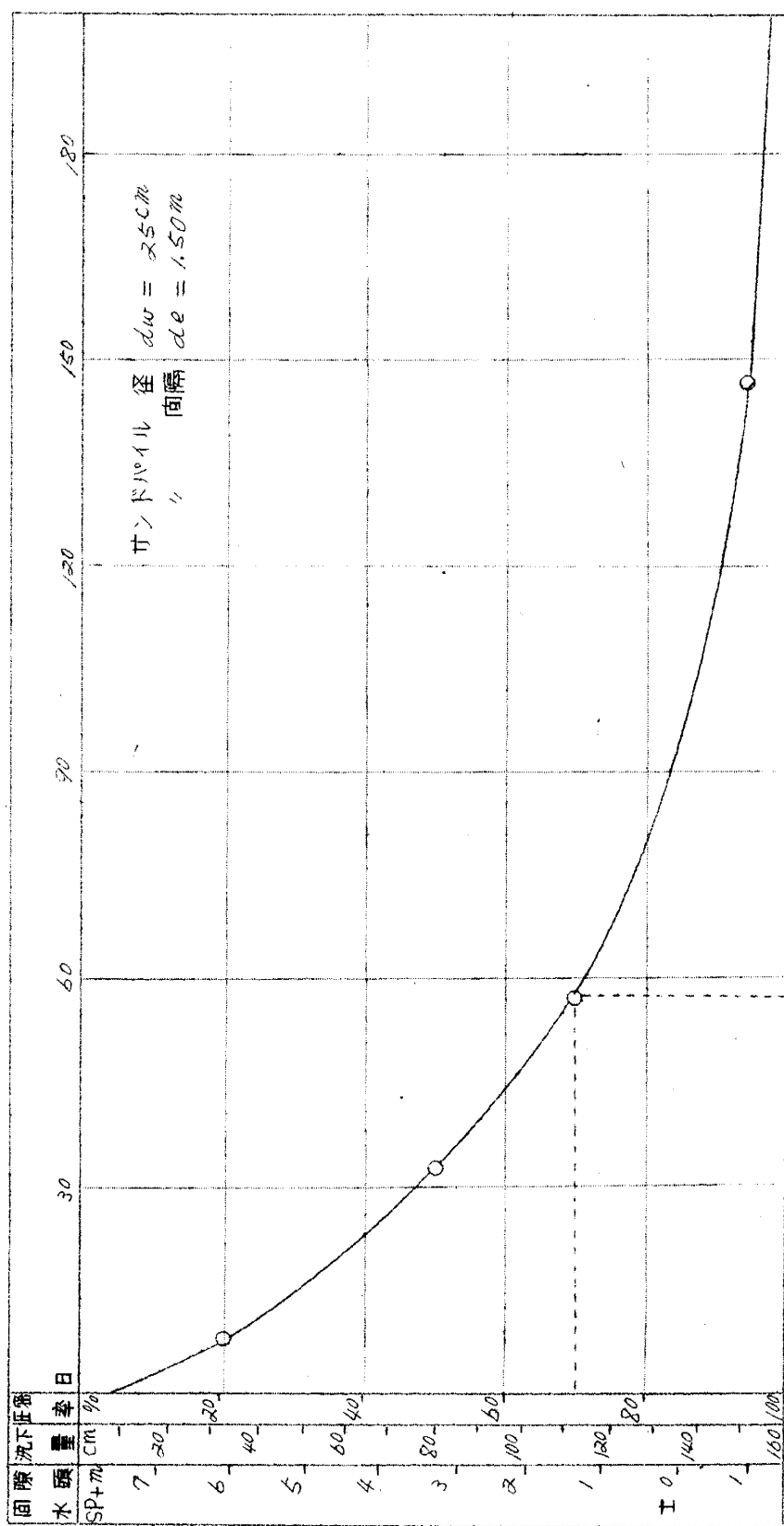
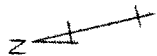


図 4-1 サンドドレーン、ウエルポイント工事平面図 S=1/1,000



航路側

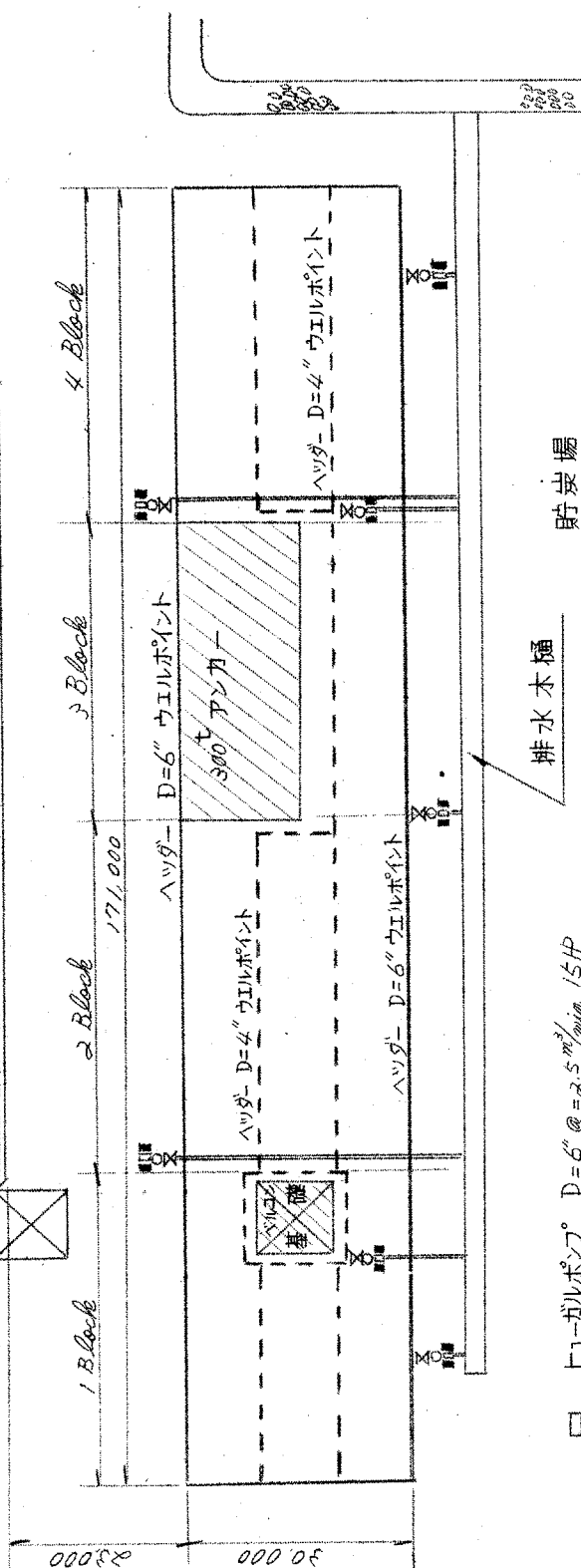
岸壁延長 300,000 M

ウエルポイント主要機材内訳

品名	規格	数量	単位	品名	規格	数量	単位
ウエルポイント	D=2" t=1/8"	498	本	ハッドカッピング	D=4"	81	ヶ
パイプバリエイ	D=1 1/2" L=5.5'	498	組	セパレータタンク	中冊式	7	ヶ
スイングジョイント	D=1 1/2"	498	組	ヒューガルポンプ	D=6" Q=2.5 m ³ /min 15 HP	7	ヶ
ハッドバリエイ	D=6"	402	米	ウァキュームポンプ	D=2 1/2" Q=3 m ³ /min 10 HP	13	台
"	D=4" 1/2"	342	米	デリバリーパイプ	D=6" 20 HP	250	米
ゲートバルブ	D=6"	24	ヶ	ジェットポンプ	D=3" 4st	2	台
"	D=4"	12	ヶ		Q=0.5 m ³ /min		
ハッドカッピング	D=6"	222	ヶ	水位観測用具		1	式

サンドドレーン工事主要機材内訳

品名	規格	単位	数量	摘要
槽	鉄骨型 H=7'	基	6	集動5基予備/基
ウインチ	復動 1/5 HP			
ウエルポンプ	D=3" 4st Q=0.5 m ³ /min 20 HP		6	
サクションホース	D=3" L=5'		12	
ヒューガルポンプ	D=6" 15 HP Q=2.5 m ³ /min		2	給水用
サクションホース	D=6" L=5'		4	7-バルブ付み
給水パイプ	D=6"			
"	D=3"			
同上継手	"			
パイプタイコッド	D=2" L=38"	米	300	5基 x 60m
"			60	ウエルポンプ用
シエットホース	D=2" L=18'		30	1基5本 6基分
ケーシング	D=2 1/2" L=6'	本	5	
"		"	10	
ホッパー			5	
荷車		台	6	
ノズル			6	
レール		米	250	布設用
操作用具		組	6	



- ヒューガルポンプ D=6" @ 2.5 m³/min 15 HP
- ウァキュームポンプ D=2 1/2" @ 3.0 m³/min 10 HP

図 4-2 サンドパイル、ウエルポイント工事断面図

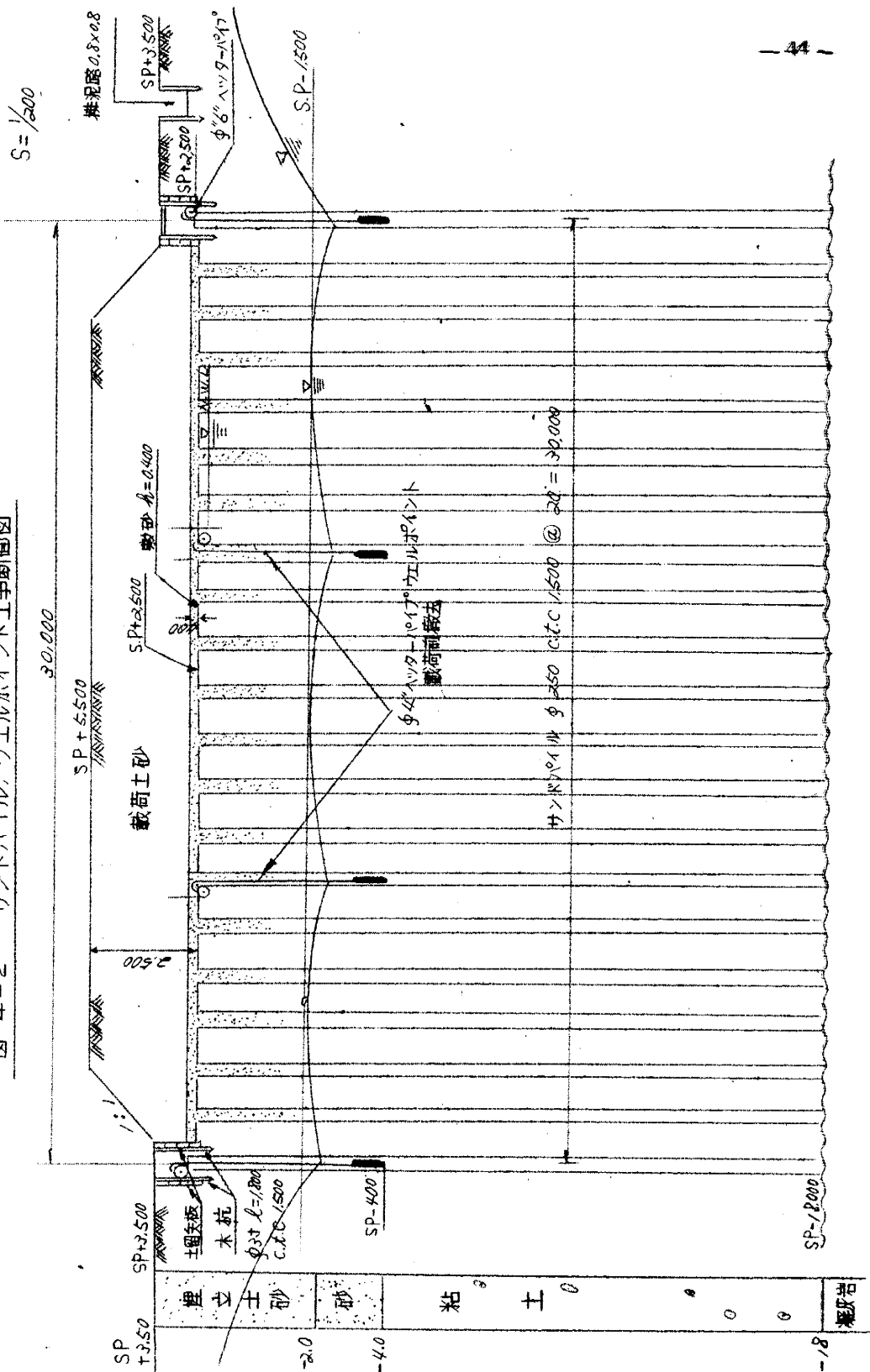


図 4-5 貯炭場地盤改良工事, 約定, 実績工程表

34-10-1

45

約定工程
 実績工程

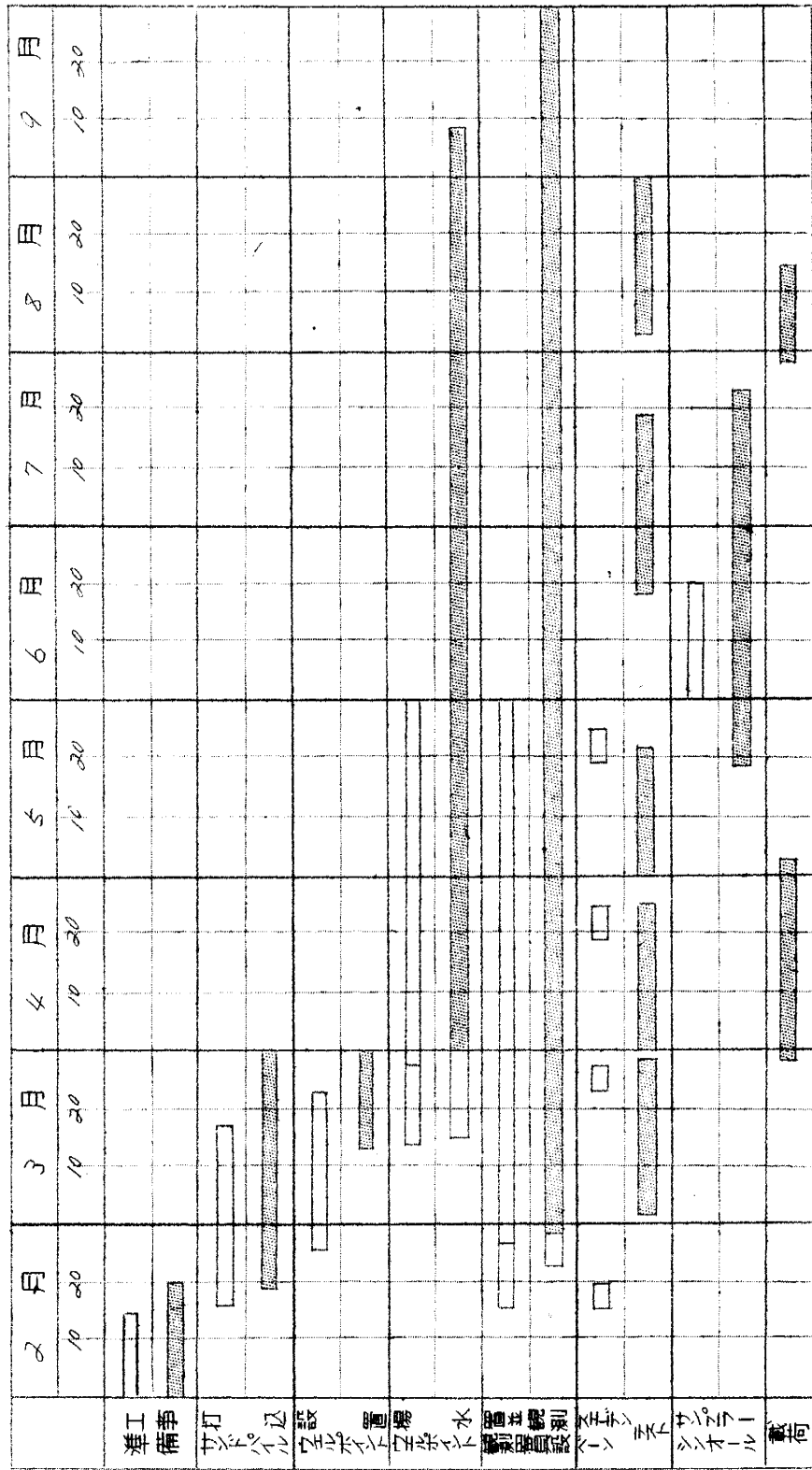


図.5-1 調査工事位置図 $S = 1/1,000$

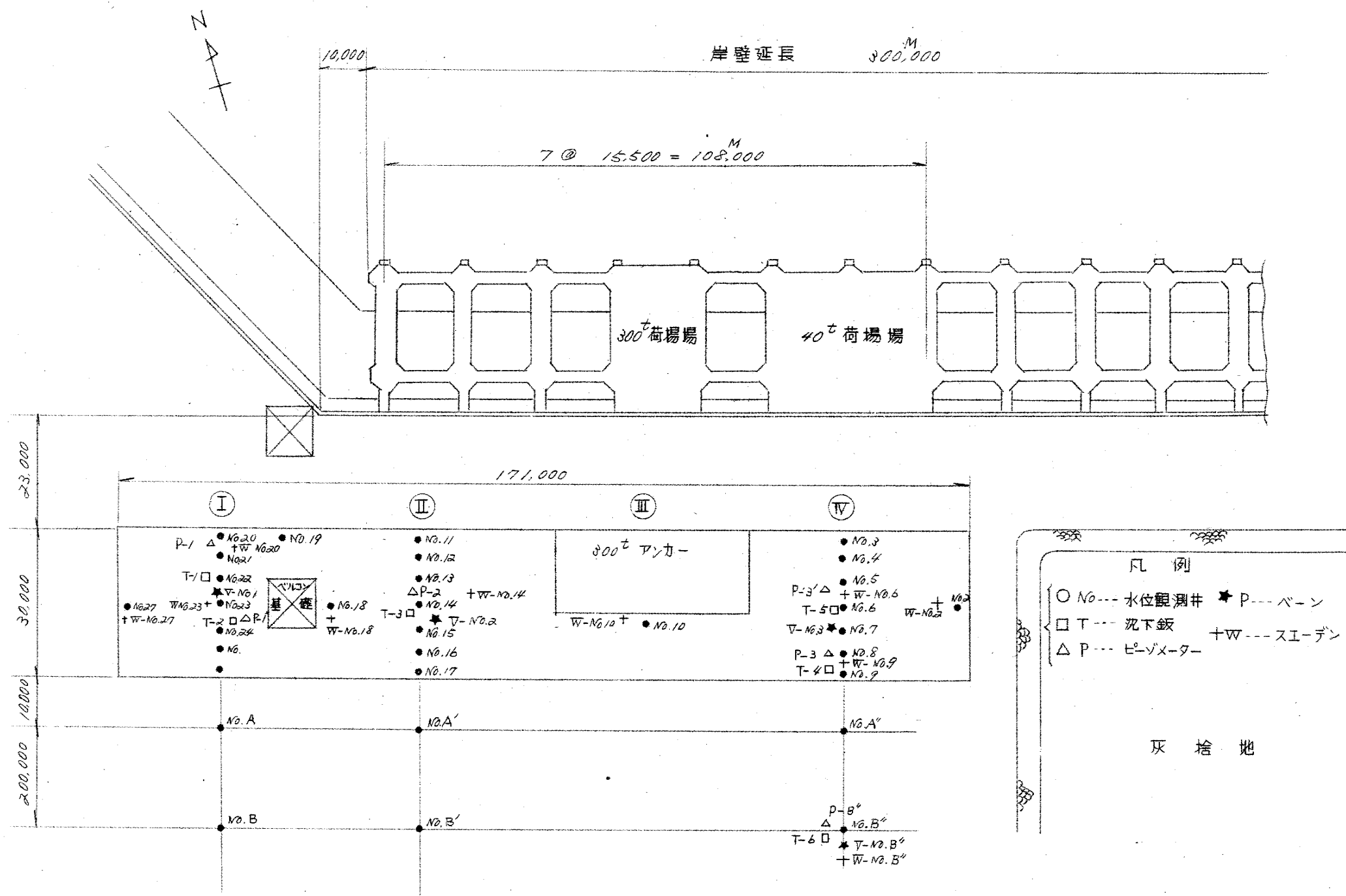


図 5-2 下水位間隙水圧

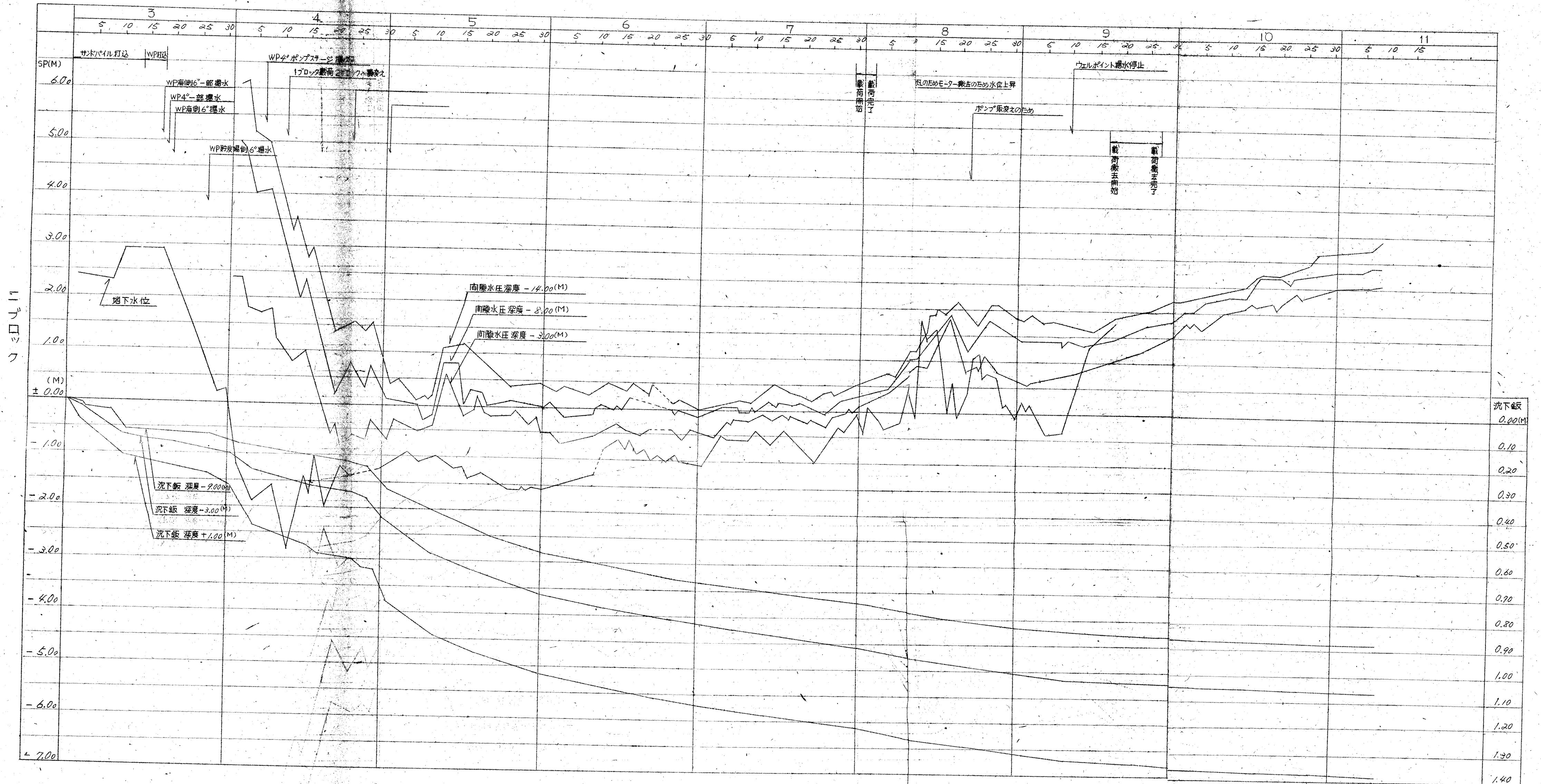


図 5-3 仙台火力貯炭場 Vane Test V-No.1

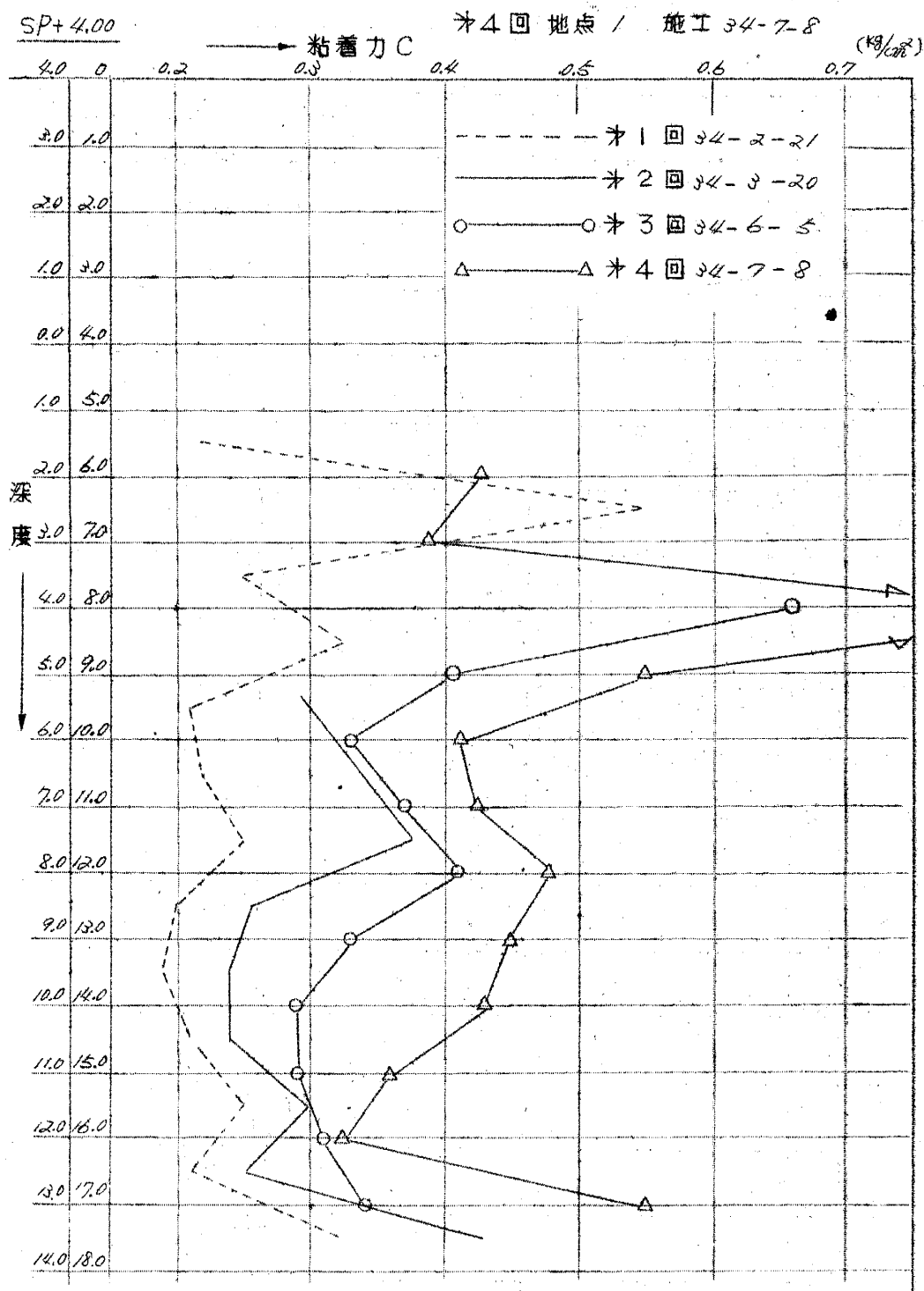


図 5 - 4 仙台火力貯炭場 Swedish Sounding Test

