

長崎漁港修築工事におけるサンドドレン工法について

北 村 照 喜*

1. まえがき

長崎港の最内奥部で漁港区域に指定されている個処一帯は、粘土層の厚さが4.5m から 16m 位に及ぶ軟弱地盤からなり、港湾構造物を造るのに非常に悪条件の所が多い。この軟弱地盤処理のため、昭和27年日本で初めてのサンドドレン(Sand Drain)工法を採用したのも長崎漁港修築工事であるが、その後に引続き30年から31年にかけて第二回目の工事を行い、ここに発表するものは二回目の工事施工結果である。第一回目は日本で初めてのことであり、非常な不安の中で施工されたが、二回目は1回目及び国内の各処で行われた工事を参考にして、自信をもって進めることが出来たし、またその結果も期待以上の効果を得ることが出来た。

Sand Drain 工法も国内の各種の工事に応用され、いよいよ実用の域に入ったのではないかと考えられる。従って今後は工事の可否を越えて工費の点で、更に一層の工夫と努力を傾けねばならない。

本漁港では昭和23年度から始められた修築工事の中、特に軟弱地盤対策に Sand Drain 工法を採用したが、その第一の目的である圧縮強度を所要強度以上に増加させることが出来、工期の点で満足すべき成果を収め、同工法の驚くべき効果を実証することが出来たので、ここに要点だけを簡単に述べて参考に供したいと思う。

なお工事施工中、特に圧密現象関係の間隙水圧測定等興味深い多くの資料を得たが、紙数の都合上詳しく説明することが出来ないで、今度の報文は工事の概要だけを述べ、個々の詳しい内容は今後逐次発表したいと思う。

図-1 は漁港区域及び Sand Drain 工法を採用した現場平面図である。

2. Sand Drain の設計

2.1 土質状況

土質調査のためのボーリング点を図-1に示し、図-2に現場附近の土質断面図を示す。

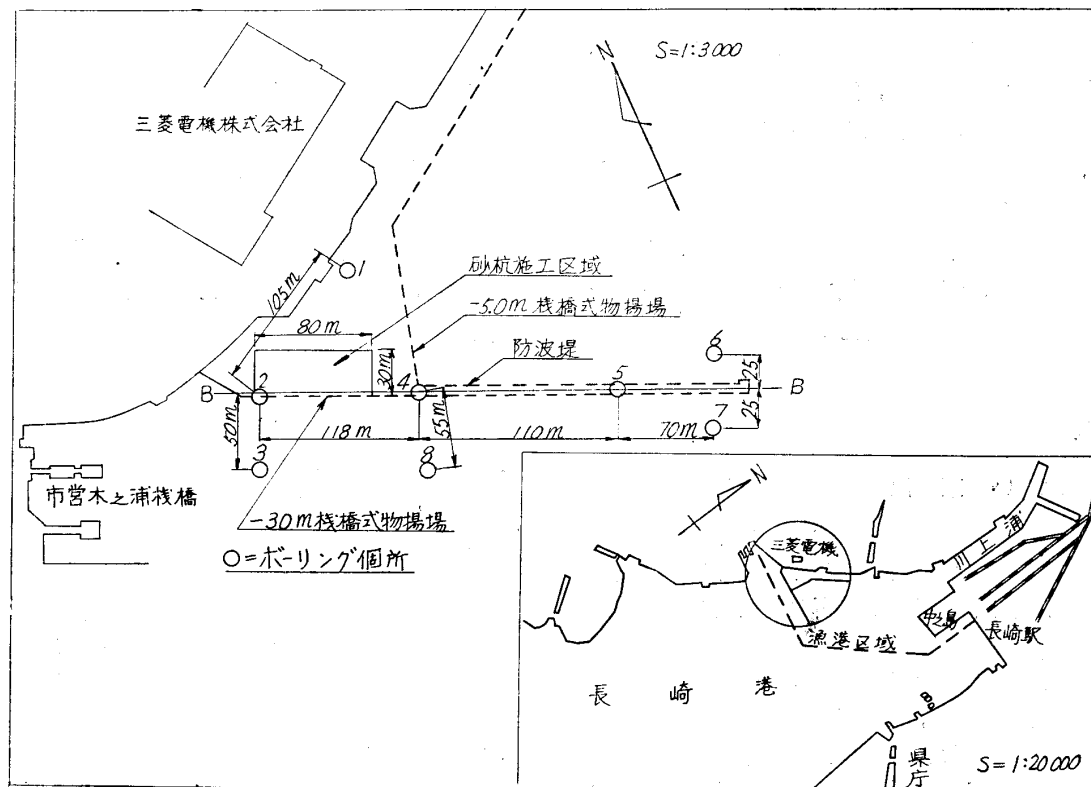


図-1 長崎漁港修築工事計画平面図

*長崎県土木部技師

柱状図によると現場附近一帯は粘土層の厚さが -2.5 m から -18m まで約 15.5m 位もあり、この粘土層は長年月にわたって、港に注ぐ河川から流出堆積した有機土を主成分とし、層中所々に薄い砂層があり、-18m 以下は砂礫層となっている。ボーリングの結果ではこれら砂及び砂礫層には殆んど地下水らしいものは認められなかった。

深度 -5m 位から -15m 位までの間で、土質試験結果から主な数値を拾ってみると、

- 1) 単純圧縮試験による圧縮強度 $q_u \approx 0.24 \text{ kg/cm}^2$
- 2) 間隙比 $e \approx 2.0$
- 3) 自然含水比 $w \approx 65 \sim 100\%$
- 4) 透水係数 $k \approx 1.0 \times 10^{-6} \sim 3.7 \times 10^{-7} \text{ cm/min}$
- 5) 圧密係数(垂直方向)
 $c_v \approx 1.0 \times 10^{-2} \sim 3.0 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{min}$
- 6) 圧縮指数 $c_c \approx 0.5 \sim 0.6$

これら試験結果の中圧密係数は砂杭の間隔・工期をきめる重要な数値で、試験値をそのまま設計に用いると、現場の圧密状況と非常に異なるので、次のようにして水平方向の圧密係数を決定した。即ち過去の漁港工事における結果資料と、本工事の一部施工結果から圧密係数を逆算して、試験値 c_v の約10倍に近い $c_v \approx 1.5 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ が最も現場の圧密状況と一致するように思われたので、この値を採用して設計の基礎資料とした。

2.2 工事計画の概要

以上のような土質状況の場所に新しく埋立をし、そこに岸壁を作るには特殊な工法による外はなく、従って Sand Drain 工法を採用するには好適地と考えられる。

Sand Drain 工法により地盤を改良して、築造しようとする漁港岸壁の計画は、図-3に示すように岸壁の水深を -3m とし、背後を埋立て漁港施設に利用する考えである。構造物は滑動崩壊を極力さけるため、コンクリートパイルを橋脚とする棧橋式にし、背後の埋立部とは土留壁を境界として絶縁されるような断面にして、埋立の基礎には砂杭を打って圧密強化するような断面を選ん

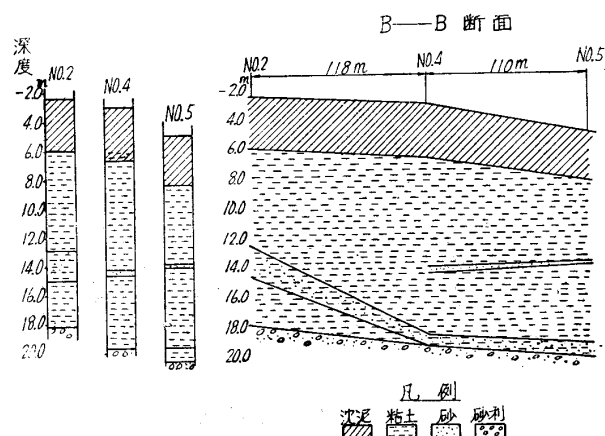


図-2 土質状況図

だ。

2.3 工事の目標

i) 圧縮強度

図-3に示すような標準断面で、円弧滑り面を仮定し計算してみると、滑り面に沿うて必要な粘着力は 0.23 kg/cm^2 となる。しかるに砂杭の施工巾を 30m とすると、滑り面全体にわたって砂杭を打つことにならず、従って粘着力は滑り面中砂杭の施工個処だけが增加し、他の部分は現状のままに止ることになる。所要の粘着力に対し現状のままに粘着力が止る部分の強度は、砂杭施工個処の強度増加で補うものとすれば、砂杭個処の所要粘着力は 0.29 kg/cm^2 となる。今安全率を約 1.2 位にすれば、粘着力は 0.35 kg/cm^2 、圧縮強度の増加目標を 0.7 kg/cm^2 以上にすればよいことになる。

ii) 工期

工期は、昭和30年8月頃から約6カ月で砂杭を打ち終り、後の6カ月位で載荷重をかけ、31年10月頃までに一部載荷重を撤去して、すぐ岸壁を作る予定であった。そのための各段階の載荷重による圧密期間を少なくとも30日から40日位にする必要があるので、前述した土質試験の結果から、圧密度-時間曲線を描いてみると図-4のようになる。この図表中砂杭の径は、砂杭打込鋼管の外径とほぼ同じく約45cmとし、その間隔は正方形にして1.5m、1.7m、2.0m を夫々取って圧密期間を調べてみた。各曲線から90%圧密には夫々30日、45日、80日を要することになり、30日の場合が最も工期の点で妥当と思われるから、砂杭の間隔を1.5mとし、長さ80m、巾30m、の区域に約1100本の砂杭を施工することにした。砂杭の全長は敷砂の天端 -1.5m から -18m まで約16.5m になる。1日8本平均砂杭を打つとすれば、運休日 considering して工期内に施工できる。

iii) 載荷重(圧密荷重)

荷重体としては岸壁用方塊が運搬及び載荷に対して便利であるが、本工事現場にはそれがないので、近くの中から取った小石交りの土砂を、貯で運搬し埋土兼用に利用した。

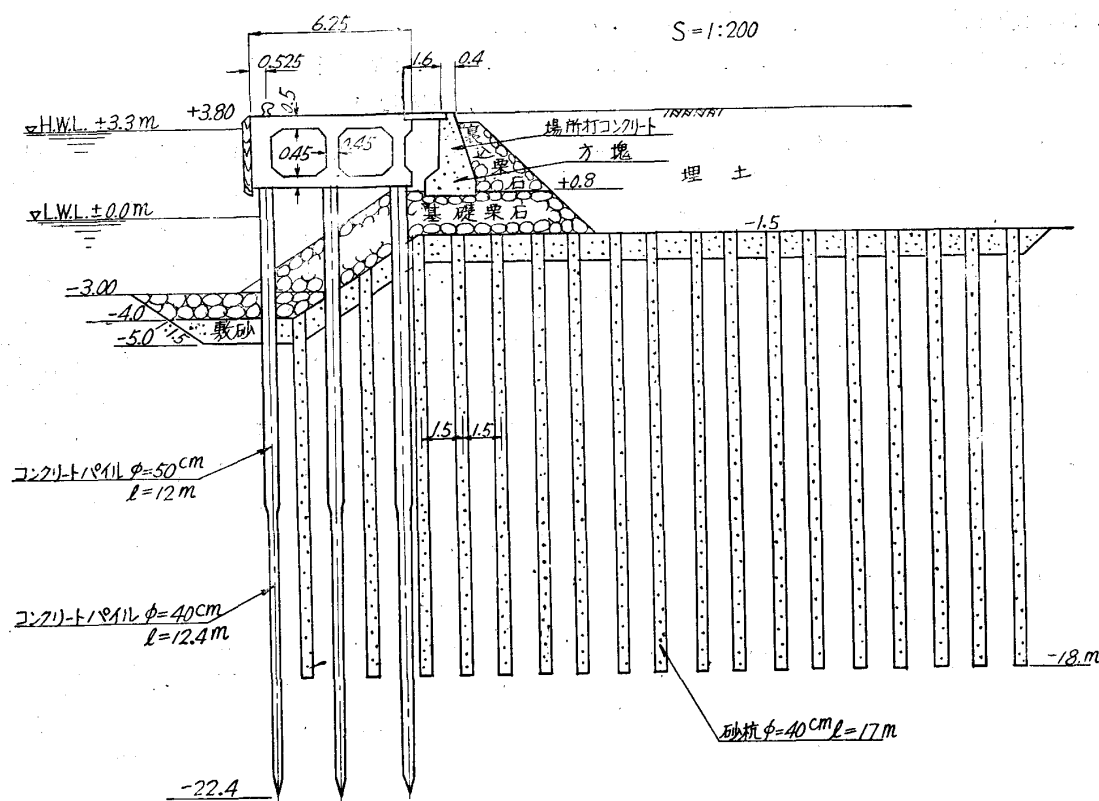
所要粘着力 c を得るのに必要な載荷重強度 p は、

- 1) 圧密による粘着力の増加に関する試験
- 2) 第1回 Sand Drain 工事の結果資料

この二点から検討して、

$$c \approx \frac{p}{3} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

すなわち載荷重強度を所要粘着力の3倍位とれば充分であることがわかった。従って所要の粘着力を 0.35 kg/cm^2 とすれば、現場では -1.5m から +5.5m まで約7mの高さの埋立をしたが、その時の荷重強度は干満潮時を平均して約 9 t/m^2 位であり、これ(+5.5m)



图一3 岸壁標準断面图

までの載荷では所要載荷強度約 $10t/m^2$ に不足するので、この不足は砂杭用の砂を仮置して載荷することにした。又沈下計算の結果、 $10t/m^2$ まで載荷した時粘土層の沈下量は約 $1.8m$ となり、岸壁計画高は $+3.8m$ であるから、埋立後沈下によって計画高近くなるので好都合である。

次に工期の点から高さ約 7m の埋立を 6 カ月位で終るには、少くとも四段階位にわけないと、現地盤の支持力が不足し局部崩壊をおこすおそれがある。今現地盤の支持力 q_a を粘着力 c の値から、次式を用いて計算してみると、

$$q_a = 5.5 \cdot c/s \cdot f = 5.5 \times 0.12/1.5 = 0.44 (\text{kg/cm}^2) \\ = 4.4 (\text{t/m}^2)$$

第一回では $4.4t/m^2$ を載荷できる計算になるが、現場では埋土運搬の都合上から $+1.5m$ まで、約 $3.4t/m^2$ の載荷重をかけることにした。それ以後は粘着力の増加を勘案して、 $+3m$ 、 $+4.5m$ 、 $+5.5m$ の三段階にわけて載荷し、途中、沈下測定及び間隙水圧測定を入念に行って、後述するように工事の安全を期した。(写真-3参照)

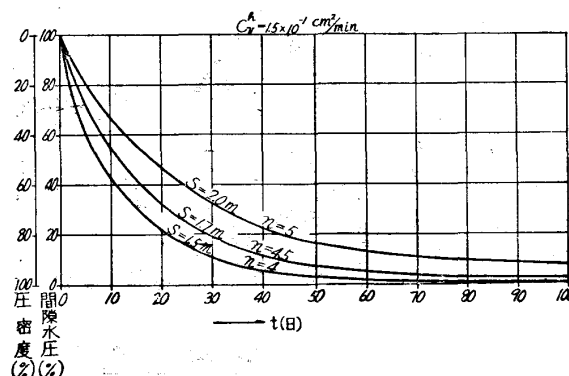
3. 施 工

先づ現地盤(−2.5m)上に、前述した区域に約 1m 厚さの敷砂をした。この敷砂は30年8月から約3ヵ月位ですべて完了し、砂杭施工を終えて第一回目の載荷重をかけたのは、31年1月末であったから、沈下解析及び間隙水

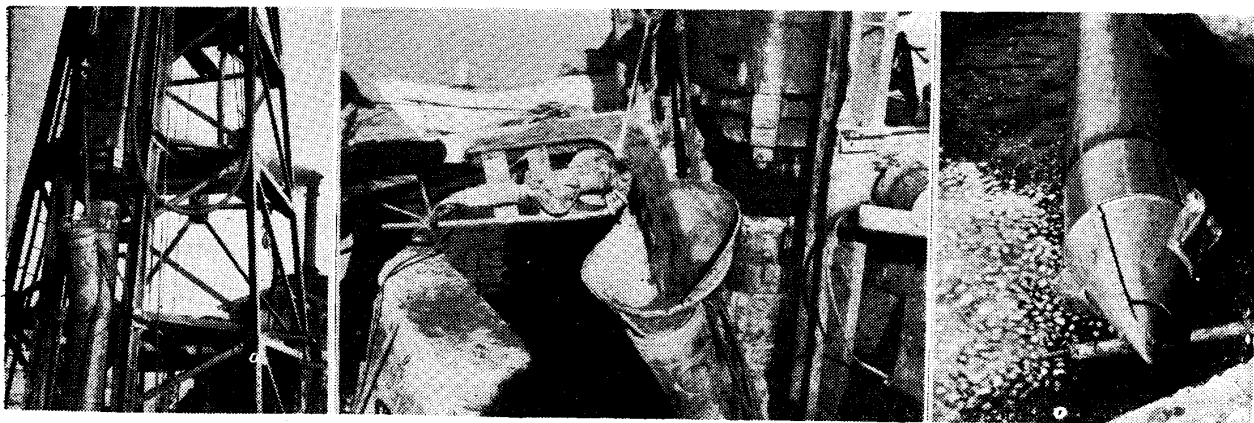
圧測定には、敷砂による圧密はすでに完了していたものとして、この影響は無視したことをここで断っておく。

3.1 砂杭打込作業

砂杭打込には県有杭打船を利用し、外径約 45cm、長さ 17m、の砂杭打込用鋼管に砂を詰めて打込み、所定の深さ -18m 位までに達してから、約 $7\text{kg}/\text{cm}^2$ の Compressed air を送入して、砂を管から落した。現場ではこの砂を管から落すのに非常に苦勞した。砂杭の本来の目的である排水用フィルターとして、適した砂の粒径は小さいので、このような砂を選ぶと砂が管の中に固く詰って、Compressed air を送ってもなかなか落ちが悪く従って砂杭打込の能率が低下する。もし粒径の大きい砂を使用すると上の問題は解決しても、粘土粒子が砂の間に詰まって、砂杭の役目を果さなくなる懼れがあり、こ



圖一4 圧密度—時間曲線圖



写 真-1

ハンマーと砂杭打込管との取付け

砂投入作業

写 真-2

砂杭打込鋼管の沓(閉じた所)

これらの点で砂杭用砂の撰択には大きな問題がある。

打込作業は写真-1によった方がわかりやすいと思う。

漁港修築工事で1回目の Sand Drain 工事中、工費の点で最も問題になったのは、砂杭打込用鋼管に取付ける沓 (Shoe) であったが、本工事では写真-2及び図-5に示すように、鋼管の先端に開閉式の固定沓を取附けた。この沓は砂を粘土層中に打込むときは閉じているが、所定の深さに達し compressed air を送るとこの圧力で開くようになっている。1回取付けておけば、砂杭1000本位打込むのには修理補強する程度で充分耐えるので、第1回目の Sand Drain 工事の時は砂杭1本につき、1個のコンクリート沓を作って、砂杭と共に粘土層中に放置したのに比較して、その製作費及砂杭管の先に取付ける煩雑な手間を考えると、本工事ではすばらしく能率的かつ経済的に作業を進めることができた。

3.2 砂杭打込時間及直接費

打込時間は	船体の移動、定置	5分
(1本当たり)	管の打込	10〃
	砂の投入	10〃
	管の引抜き	8〃
	計	33分

1本当たり平均30分前後となり、1日の打設数は約8本から10本位となった。

直接費は	砂	2,100円 (3.5m ³ × 600円)
(1本当たり)	石炭	700〃
	罐水	35〃
	電力	60〃
	ロープ(ワイヤーマニラ類)	100〃
	木材	22〃
	雑品	13〃
	人件費	900〃
	計	3,930円

4. 圧密状況の考察

4.1 沈下解析

沈下測定には1m角の鉄板の中央にポールを取付け、ポールの先に目盛をして陸上からレベルで測定した。ポールの長さは埋立を完了してからも測定できるように10m位にした。沈下板は敷砂の上に水平に据え、載荷する時ポールが傾かないように補強し、かつ載荷は入念に行った。

粘土層の沈下は敷砂と載荷重の重さによって生ずるのであるが、ここで取扱った沈下量は敷砂に対して測定していないので、載荷重だけによって生じた沈下を解析し

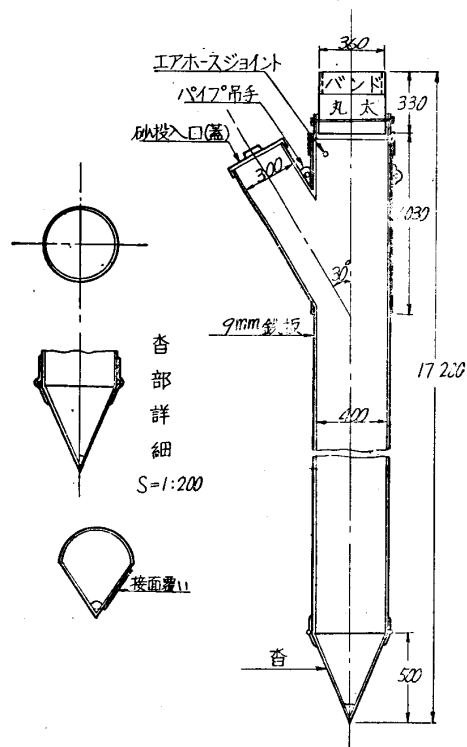


図-5 砂杭打込用鋼管図

て、圧密状況を判定することにした。

沈下測定は2・3日おきに行い、特に圧密荷重をかける時は毎日測定して沈下量一時間曲線を描いた。同時に理

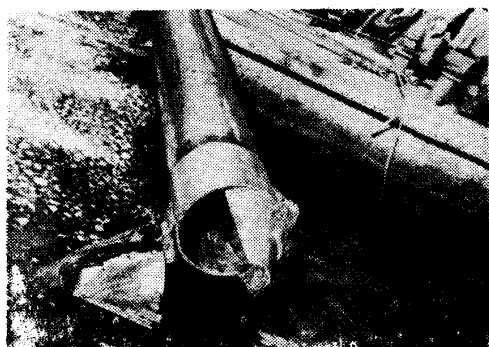


写真-2 砂杭打込鋼管の杓

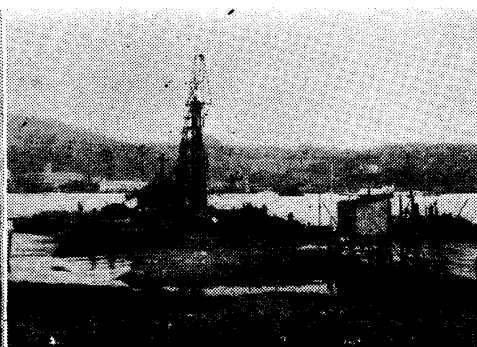


写真-3 圧密荷重用埋立

- (1) 右端の小屋は間隙水圧測定用休憩所
(2) ボールは沈下測定ボール

論解析によって各載荷重、及び予定最終載荷重に対して理論沈下量を算出し、実測沈下量と比較して載荷工事の安全を期した。

次にかかげる図-6は載荷強度 $9t/m^2$ 、即ち $+5.5m$ までの埋立にたいする沈下量-時間曲線である。又同図中の理論沈下曲線は $c_v = 1.5 \times 10^{-1} cm^2/min$ の圧密係数を使って求めた圧密度曲線を、沈下量-時間曲線におきかえたものである。

沈下解析はなかなか難しく、理論沈下量を推定するには載荷重強度の算定が大きな問題となる。載荷重による応力が粘土層に伝播する時は減小するのが普通であり、減小率をどの程度に考えるか簡単には決定できないが、一応 Westergaard の理論を参考として計算し、実測と理論沈下量と比べてみると大体一致するようである。しかしこれは工事を進めるのに参考になる程度のもので、圧密現象を厳密に検討する資料としては不十分である。次に述べる間隙水圧の問題は沈下現象より一歩進んで、圧密現象を究明するに貴重な資料であると思う。

沈下解析に用いた沈下量 $\rho(cm)$ の計算式は、

$$\rho = \frac{H}{1+e} \cdot c_v \cdot \log_{10} \frac{p_0 + \Delta p}{p_0}$$

ここで H =粘土層の厚さ(cm)

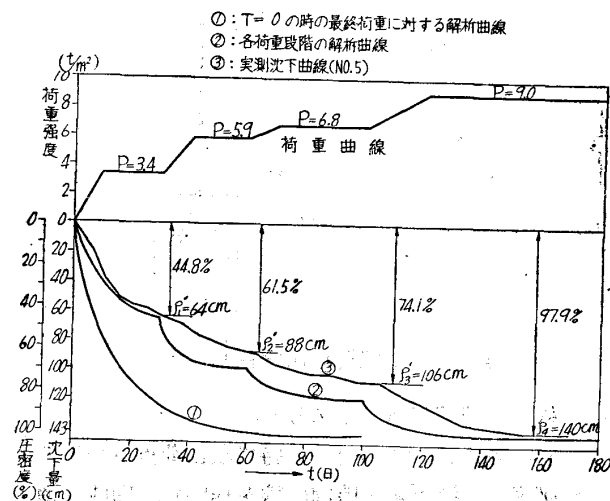


図-6 沈下解析曲線図

$e=p_0$ の時の間隙比

c_v =圧密係数(間隙比-荷重曲線より)

p_0 =圧密前の粘土層の中央部における粒子圧

Δp =載荷重強度

図-6の沈下曲線によって圧密が約90%以上になった時次の載荷重をかけるようにして、工事は何ら支障をきたすことなく順調に進め

ることができた。尚 $9.0t/m^2$ に対して約 $1.2m$ から $1.4m$ 位の沈下を記録し、理論沈下量 $1.43m$ に対しはほぼ近い値となった。

4.2 間隙水圧測定

Sand Drain 工法による工事が行われてから今日まで圧密現象を検討するには主として沈下量の時間変化だけに頼ってきた感が強い。圧密理論の根本から言えば、沈下現象はむしろ本質的なものではなく間隙水圧や土圧などが最も基本的なものである。しかるに今日まで圧密状況を解析するのに、特に海底軟弱地盤の場合沈下現象のみが取扱われてきたのは、沈下量の測定及解析が簡単で工事の安全に対して一応の信頼がおけることと、間隙水圧測定が非常に複雑で困難なことに由来するものと考えられる。しかし現場において圧密現象を理論的に研究し又圧密状況をより確実に把握するためには、どうしても間隙水圧を測定してみなければならないと思う。

本工事で行った観測は決してそのままで満足できるものではなく、定量的に取扱うにはまだ少し不十分ではあるが、種々検討してみるとなかなか興味深い結果を得たので、結論だけをここで述べる。現場で実用化するにはもっと研究し多くの資料を集める必要があり、本工事で得た資料は今なお検討中であるので、この次の報文で詳細を述べることにしたい。

沈下解析の時は載荷期間によって沈下曲線の形が変わってくるので、当然この期間を考慮する必要があったが、工事の安全性から見て省略しても差支えないと思ったので、期間は考えずすべて解析して来た。しかし間隙水圧の場合はかかる大胆なことはできないばかりか、間隙水圧曲線は載荷期間によって全く様々の変化をするので、土と基礎Vol. 4, No. 3 の解析方法によって、解析してみることにした。

図-7は実測間隙水圧曲線と載荷期間を考慮して解析した理論間隙水圧曲線である。ここでかかげた図は第1回の載荷重に対する間隙水圧の変化だけであるが、図によ

ると解析及実測両曲線は驚く程よく一致しており、ただ両曲線のピークの時間的おくれが目立つだけである。複雑な粘土層の圧密状況の説明は次にゆづるとして、この図から定量的にみて次の載荷重の量を決めうるに足る観測結果と考えてもよいと思う。測定が厄介であり又結果資料の取扱も複雑であるが、圧密現象を理解するためには非常に貴重なものと言えよう。

この間隙水圧測定については、その器具の構造、現場装置、測定方法、測定結果及解析など、詳細な報告はこの報文に続いてすぐ発表する予定である。

5. 工事結果の考察

沈下解析及間隙水圧測定によって圧密現象を充分検討しながら、最終載荷重強度を工事目標の $10t/m^2$ 以上に約 $12t/m^2$ 位にした。すなわち埋土の高さを $+6.0m$ とし、その上に砂杭用砂を約 $1.5m$ 位の高さに仮置した。予定以上に載荷したのは、応力伝播による応力の減少を見込んだのと、同時に将来構造物を造る時、一次及二次圧密を想定して、将来の構造物の荷重強度以上に載荷しすなわち precompressed case にしておけば、沈下に対しては安全である。

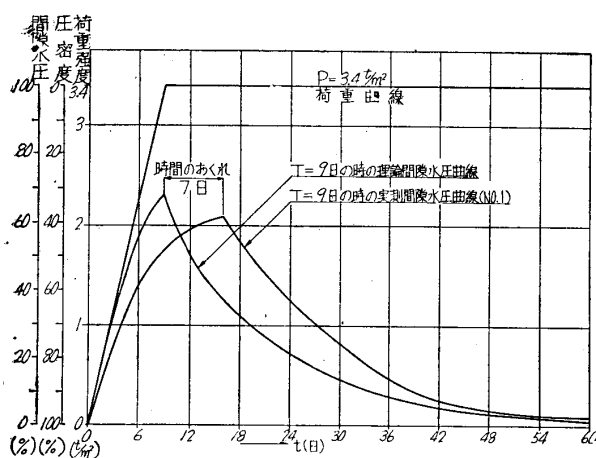


図-7 間隙水圧曲線図

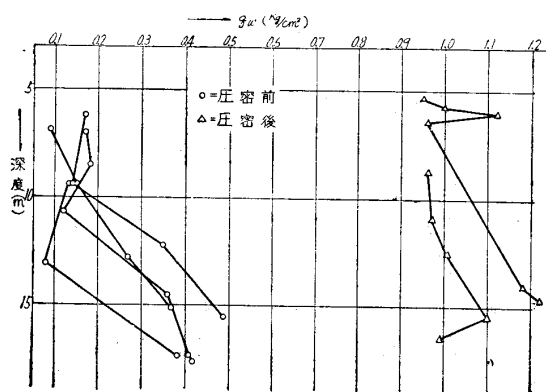


図-8 圧密前後の深度-圧縮強度図

圧密完了後ボーリングし、このボーリングは図-1の No.2 点附近を選び、土質試験した末圧縮強度の増加について調べてみると図-8 のようになり、目標であった $0.7kg/cm^2$ よりはるかに大きな値となっており、圧密効果の驚くべきものが実証された。従って図-3にあげた構造物断面は安全に施工出来、そして安定であることは言うまでもないし、又この断面で不安な棧橋背面の土留壁の沈下も、計算の結果充分安全であることがわかった。

軟弱地盤のため構造物断面のタイプにどんなものを選ぶべきか苦慮したが、こんなに圧縮強度の増加を実証出来ると、構造物断面は工費の点から最も安価なものを採用しても差支えないと思う。

6. 結 び

砂杭工事とその効果を簡単に述べてみたが、Sand Drain 工法の効果は顕著なものがあることを実証できた。しかし工事内容に対して施工上論議すべき点は多々あると思うが、工費についてここで少しふれてみたい。

軟弱地盤改良費としての工費が果して安価であるかどうか甚だ疑問である。軟弱地盤のため Sand Drain 工法のような工事以外には他に全く方法がなく、工費は度外視できる現場は別として、Sand Drain 工法による工事と他の工法による工事とが工費の点で比較検討される時、Sand Drain 工法が有利であるとは現在の段階では言えないのではないかと思います。今後 Sand Drain 工法による工事が各工事に利用され、活用されるか否かはこの工費の点に集約されるのではなからうか。

本工事で要した費用を次にあげて参考に供しようと思う。工事は県の直営であるから、機械器具などの設備費は入れず修理費だけとして、地盤改良費、すなわち敷砂、砂杭打込、圧密荷重用埋立、各種観測、機械器具船舶修理事務及び雑工事、その他の費用を合計して、約 2,500 万円となる。従って長さ 80m、巾 30m、深さ約 16m の粘土塊 $38,400m^3$ を改良するのに、 $650円/m^3$ を要した計算になる。又一部埋立部を含めて法線 1m 当り、31万円という非常に高価な改良費を必要とした。

以上簡単すぎて言い足りぬ点が多いが又次の報文にゆづることにして、読者の御批判を仰ぎたいと思う。

最後に本工事の主なる点を指適すると、

- 1) 砂杭打込用鋼管の沓の改良
- 2) 間隙水圧測定による圧密現象の解析
- 3) 圧縮強度の驚くべき増加