



圧密沈下を考える

5. 海底粘土地盤

こ ばやし まさ き
小 林 正 樹*

5.1 ま え が き

今回は、海底粘土地盤の圧密沈下について考えてみる訳であるが、その場合、海底粘土地盤とはどのような地盤を意味するのかを決めておく必要があろう。海底粘土地盤とは、文字通りに海底の粘土地盤を表すことになる。しかし、海底の粘土地盤でも各種のものが存在するであろうし、すべての海底粘土地盤に適用できるような圧密沈下の一般論をここで行うのは不可能といえる。

海底粘土地盤は一般的に、軟弱で均一なものが多いと考えられる。従って、ここでは、海底粘土地盤のうちでも比較的軟弱で様なものを対象として、圧密沈下解析上の問題点について検討を行うこととする。

軟弱な地盤では、正規圧密状態に近いものが多いので、今回の対象となるのは正規圧密状態の地盤が中心となる。正規圧密領域における圧密沈下量は過圧密領域における沈下量よりはるかに大きい。従って、実際の圧密沈下を問題にする際には、正規圧密領域での圧密沈下が問題となることが多い。今回とり上げる海底粘土地盤を正規圧密状態のものとしたことは、このような観点からも正当化されるであろう。

又、海底の粘土地盤は陸の粘土地盤と比較して、サンドシームなどの存在が少なく様な粘土とみなせることが多い。従って、海底粘土地盤として様な粘土を対象とするのも許されるであろう。ただし、自然の海底粘土地盤においては、深度方向に粘土層の性質が変化するような、いわゆる成層地盤、あるいは不均一地盤とよばれるものが多い。そういう地盤も、それぞれの粘土層が様なであれば、各粘土層の圧密定数などが比較的容易に決定できる。従って、今回は、このように深度方向に粘土層の性質が変化するようなものについても考えてみることにする。

海底粘土地盤の圧密沈下について考えて行く場合には、実際の例をあげて、その中から問題点を抽出して行くのが理解を深めると考えられる。従って、ここでは海底粘土地盤の圧密が問題となった二つの例に関する検討結果を説明して行くこととする。ここで選んだ二つの例のうちの一つは、一次元圧密の実例として考えて良いものであり、もう

一つは、三次元圧密の例として考えられるものである。しかも、この二つの例においては、一部の区域にサンドドレーンを施工しており、サンドドレーンの有無による沈下の比較という興味深いデータも得られている。この二つの実例の報告により、現在の段階での海底粘土地盤の圧密沈下解析の問題点などが多少なりとも紹介できると思われる。

5.2 一次元圧密沈下の実例

5.2.1 工事の概要及び実測沈下量

海面を埋め立て、大規模な土地造成を行うような場合は、埋立て地の中央部分での沈下は鉛直方向のみに生じ、一次元圧密として考えて良いと思われる。このような例として、空港の拡張のための埋立て工事の沈下の例について調べてみることにする。ここでとり上げる例は、図-5.1に示されるように、既設の護岸に接して、250m×520mの埋立てを行ったものである¹⁾。地盤条件としては、海底面から20m以上にわたって軟弱な粘性土層が存在することが分かっていた。従って、構造的に最も重要と考えられるような場所、すなわち、滑走路及び新設護岸の部分は、地盤改良を施工している。ここで用いた地盤改良工法は、サンドドレーン工法である。図-5.1と図-5.2にサンドドレーンを施工した部分を斜線で示している。

この地点の地盤の性質を示すために、図-5.3に土質試験の結果の一例を示す。この図より分かるように、ここで

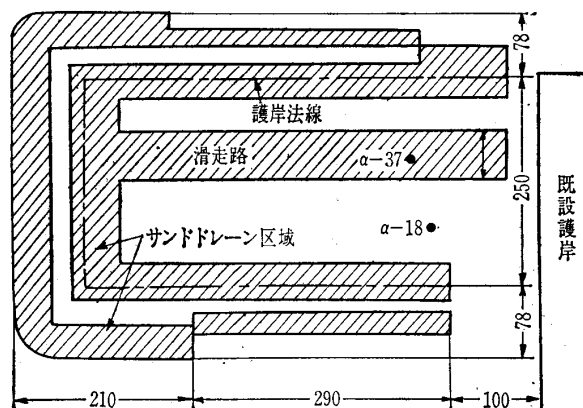
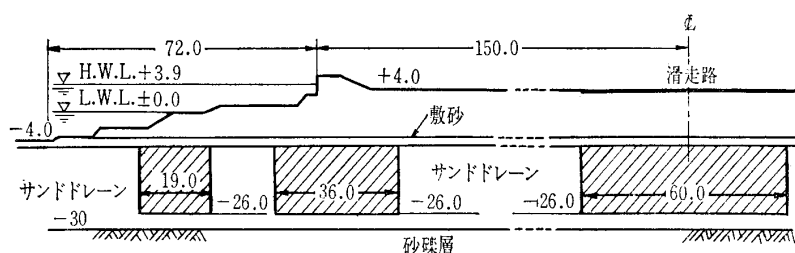
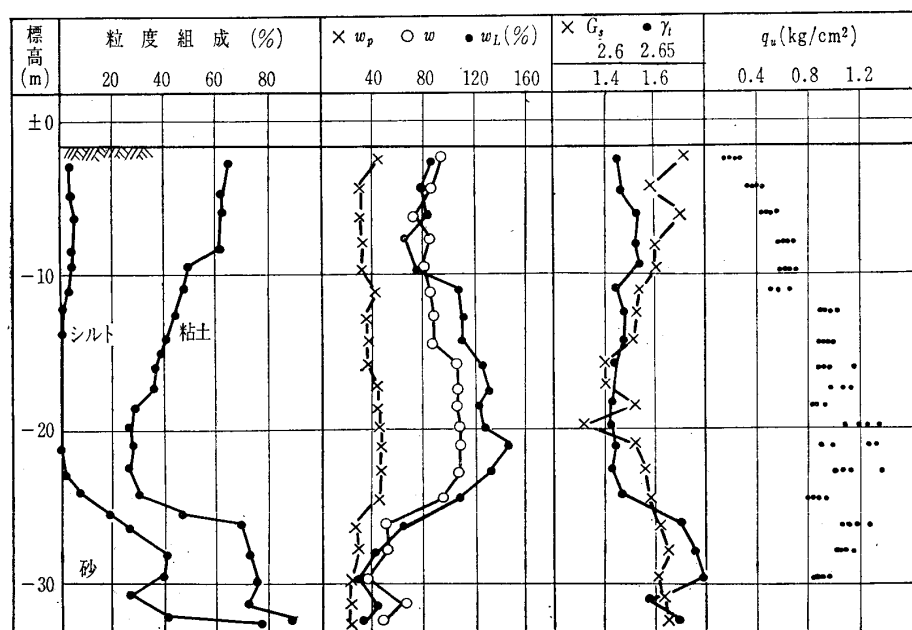


図-5.1 空港拡張工事平面図

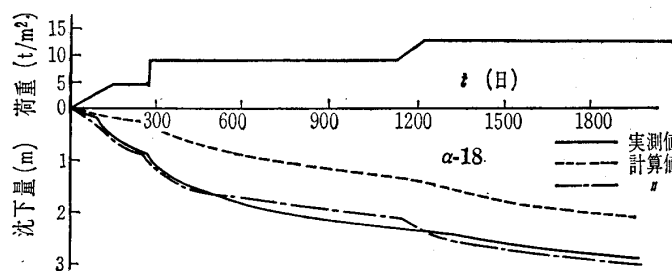
*運輸省港湾技術研究所 土質部土性研究室長



図—5.2 空港拡張工事断面図



図—5.3 土質試験結果一覧図



図—5.4 α-18地点における沈下記録

の粘性土層は深度方向に変化がみられる。海底面から-10m付近までは、シルト分が多く、塑性指数 I_p が40程度の粘性土である。-10~-25mの粘性土は、粘土分が多くなり、塑性指数も80程度と大きくなっている。-25~-32mの層は、砂分が多くなり、塑性指数もかなり小さい低塑性の粘性土層となっている。

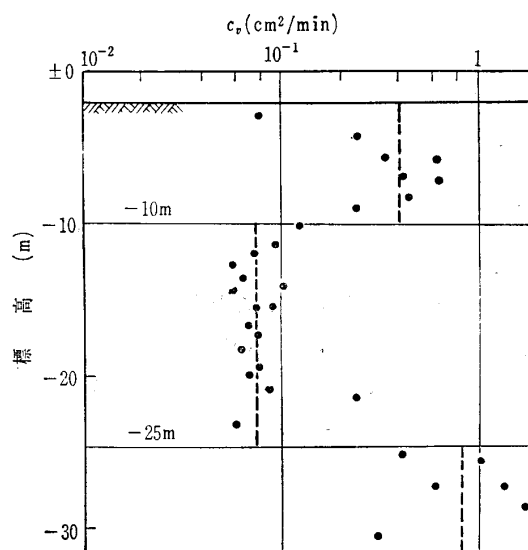
埋立て荷重による圧密沈下量を測定するために、海底面に沈下板を設置して計測を行った。この結果から得られた沈下の実測値と計算値を比較してみたのが図—5.4である。比較を行った地点は図—5.1の平面図でα-18と示された点であり、地盤改良は施工されていない。図—5.4には、実測値が実線で示され、計算値が破線と一点鎖線で示され

ている。この場合、破線の計算値が通常の圧密計算法を用いた結果である。

ここで通常の圧密計算と呼ぶ方法では、最終圧密沈下量を体積圧縮係数 m_v から求め、沈下量と時間の関係は換算層厚法を用いている。 m_v の値は圧密圧力 $\bar{p}$ によって変化するが、正規圧密状態に達すると、 $\log m_v$ と $\log \bar{p}$ の関係は直線とみなせるようになる。今回の粘性土地盤においては、圧密降伏応力と土かぶり圧力がほぼ等しく、正規圧密地盤と考えられた。従って、 m_v の値としては、その直線部分から、それぞれの圧密圧力 $\bar{p}$ に対応するものを求めた。

圧密係数 c_v も同様に正規圧密状態での値を用いた。 c_v の値を深度方向にプロットすると、図—5.5 のようになる。こ

の結果は、図—5.3の土質試験の結果と対応していて興味深い。すなわち、粘土分の量、塑性指数の大小によって c_v の値が変化し、中間の粘土層で c_v が最も小さく、上部粘性土層、下部粘性土層の順で c_v が大きくなっている。従って、圧密計算においては、図—5.5に示されるように、



図—5.5 圧密係数の深度分布

粘性土層を三つに分け、それぞれの c_v の値として破線で示される値を用いた。このように c_v の値が深度方向に変化するような地盤に対しては、テルツァーギ (Terzaghi) の一次元圧密理論をそのまま適用することはできない。ここでは、このような不均一な地盤に対する簡便法として提案されている換算層厚法²⁾を用いた。この方法は、 c_v の異なる層がある単一の c_v を持つ層として計算するために、層厚を変換するものである。例えば、三つの粘性土層があり、それぞれの c_v の値及び層厚を c_{v1} , c_{v2} , c_{v3} , H_1 , H_2 , H_3 とする。この方法では、このような不均一な粘性土地盤を、圧密係数が c_{v1} で、層厚が H' である均一な粘性土層として計算を行う。ただし、 H' は換算後の層厚であり、 $H' = H_1 + H_2\sqrt{c_{v1}/c_{v2}} + H_3\sqrt{c_{v1}/c_{v3}}$ で求められる。

図-5.4には、このようにして求められた計算値を破線で示している。この図より分かるように、実測値と計算値は大きな差を示し、実測沈下量が計算値に比べて非常に速く進行している。このような傾向は、陸上の盛土などの場合にしばしばみられるものとされている。

5.2.2 沈下解析の再検討

それでは次に、なぜこのように実測沈下量と計算値に大きな差が生じるのかについて検討を行うこととする。

ここで沈下を比較した $\alpha-18$ の地点は護岸からかなり離れ、沈下の状況はほぼ一次元と考えられ通常の一次元圧密理論が適用可能と思われる。従って、このように実測値と計算値に相違が生じる原因として、圧密定数、特に圧密係数 c_v の値が精度良く求められていないのではないかと、ということが考えられる。

圧密係数 c_v の値は標準圧密試験結果から求められる。その際には、沈下と時間の関係から $\sqrt{t}$ 法などのフィッティング方法を用いる。 c_v の値が非常に大きい土では、圧密沈下が非常に速く進行する。従って、圧密試験で通常行っているような測定時間間隔では、測定を開始した時点で圧密がかなり進行していることが考えられる。このような場合の c_v の値が正確かどうかを検討するためには、排水長さを長くしたり、間隙水圧を測定するなどの特殊な圧密試験が必要となる。

このような観点から、圧密係数 c_v を再検討するための一連の試験を行った。その結果によると、図-5.5の c_v の値のうち、中間の粘土層は問題がみられなかった。しかし、上部と下部の粘性土層に関しては、標準圧密試験の c_v の値が過小であった。実際の c_v の値は上部粘性土層では $1 \text{ cm}^2/\text{min}$ 、下部粘性土層では $10 \text{ cm}^2/\text{min}$ 程度であることが確認された。このように、 c_v が大きい土に対して標準圧密試験の c_v の値が小さすぎるのは一般的傾向である。従って、 c_v の値がある程度以上大きくなった場合には、排水長さを大きくするか、間隙水圧測定を伴う特殊な圧密試験などにより再検討する必要がある。この場合、 c_v がどの程度以上大きくなると標準圧密試験の値に問題が生じ

るかという点は難しい問題である。その一つの目安として、ロウ³⁾ (Rowe) は c_v が $0.18 \text{ cm}^2/\text{min}$ 以上になると実測沈下量が計算値に比較して非常に速く進行すると報告している。この報告や今回の例などをみると c_v が 0.2 以上の土に関しては要再検討ということもいえるかもしれない。

今回行った計算においては、 c_v の値の問題点の外にもう一つ、不均一な地盤に対する圧密計算の問題点が考えられる。ここで用いた換算層厚法では、三つの異なる c_v からなる不均一地盤を層厚を換算することにより、均一地盤として計算している。このような考え方が、はたしてどの程度の誤差を圧密計算に与えるものか考えてみる。例えば、二つの異なる粘土層からなる不均一地盤について換算層厚法を適用したとする。この場合、排水条件は上面のみ排水面とする。ここで、二つの場合について考えることとする。まず、最初の場合は、上層の c_v が大きく、次の場合では下層の方が c_v が大きいとする。換算層厚法では、層の順序に関係なく一定の換算層厚を与えるので、二つの場合に対して、圧密の速さは全く同じことになる。しかし、実際の圧密現象を考えると、排水面の近くに圧密係数の大きな粘性土があるか、圧密係数の小さい粘性土があるかによって、圧密の速さには大きな相違が生じることが予想される。

このような不均一地盤に対して圧密度と時間の関係を求めるためには、差分法⁴⁾や有限要素法などによる数値解法を用いなければならない。実際にこのような数値解法によると、層の順序によって、結果に非常に大きな差が生じる。従って、不均一地盤の圧密度を求めるためには、これらの数値解法が必要となる。

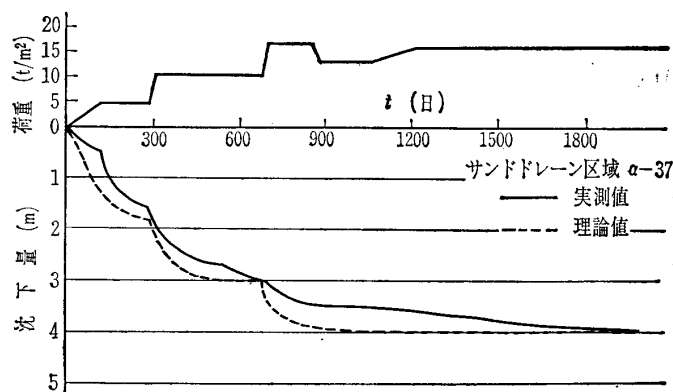
今回の $\alpha-18$ 地点での沈下について、このような観点から、新しく見直した c_v を用い、さらに、差分法による数値解法によって成層状態を考慮した解析を行い再検討した。その結果が図-5.4の一点鎖線で示すものである。この再検討の結果は実測値と非常に良い一致をしており、一次元圧密解析における、 c_v の大きな土に対する再検討と不均一地盤に対する厳密な検討の重要性を証明している。

5.2.3 サンドドレーンを施工した場合の沈下

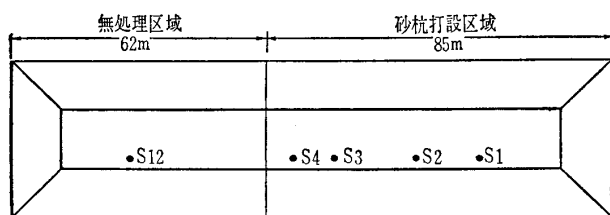
サンドドレーンを施工した場合の沈下については、図-5.1の平面図に示す $\alpha-37$ 地点での記録について調べてみる。この地点も護岸からかなり離れていて、沈下は鉛直方向のみと考えられる。この地点における沈下の実測値と計算値を比較したものが図-5.6である。この図をみると、実測値は計算値より遅れているような傾向がある。ただし、ここでの計算では、前述の c_v の値の見直しは行っていない。従って、上部粘性土層と下部粘性土層の c_v を再検討した値で再計算すると、実測値と計算値が更に離れることになる。

サンドドレーンの場合には、計算法のもつ問題点として一次元圧密の場合には存在しないようなものがある。それ

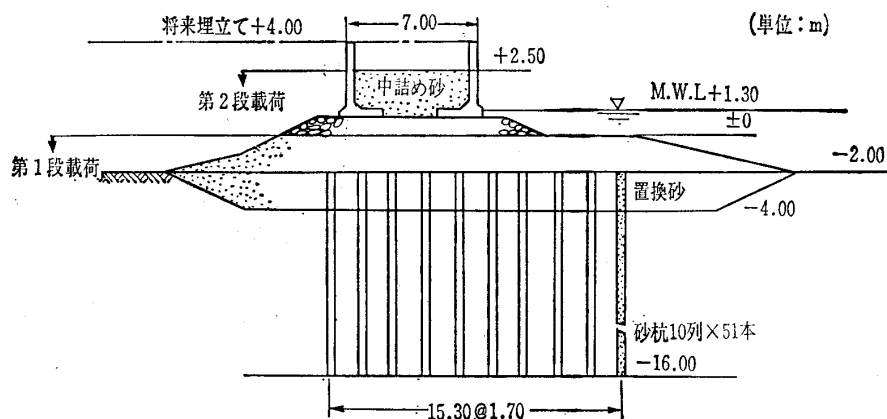
講座



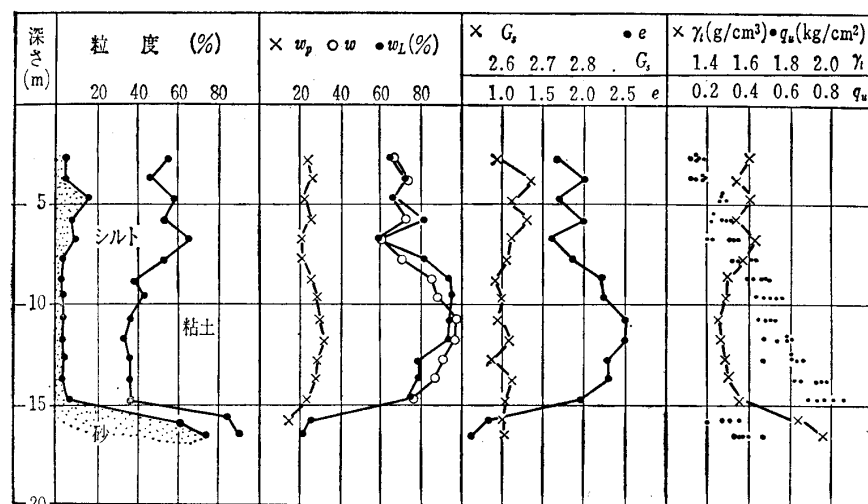
図—5.6 α—37地点における沈下記録



図—5.7 実験区域平面図



図—5.8 試験工事標準断面図



図—5.9 土質試験結果

らは、水平方向の圧密係数の値、サンドパイルを打設することによる粘土のかく乱の影響、ドレーン内の水頭損失、サンドパイルの剛性が大きいための複合地盤の効果などである。これらの点は今後の課題であり、現在の段階では、サンドドレーンを施工した場合の沈下計算法は通常の方法によらざるを得ないといえる。

なお、今回の場合、サンドドレーンを施工した場合と施工しない場合の実測沈下量を比較すると有意な差がみられた。特にこれは、空港建設終了後の残留沈下量の相違において顕著であった。その残留沈下量の差によって、滑走路部分が周辺の無処理区域に引きずられ、滑走路の舗装に多くのクラックが生じた。

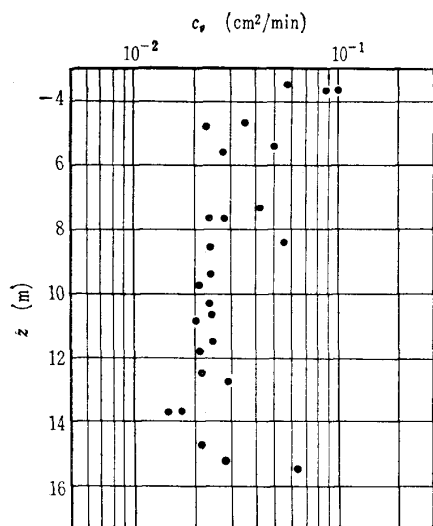
5.3 三次元圧密沈下の実例

ここでとり上げるのは、埋立て地の護岸を建設する際に観測された圧密沈下の例である⁵⁾。このような場合は、荷重がある狭い部分にしか載荷されず、一次元圧密状態とは考えられない。今回の例は、図—5.7の平面図及び図—5.8の断面図に示されるような護岸建設工事における沈下解析である。この区域は、締固め砂杭工法の効果を調べるため

に、護岸の一部分に試験的に設けたものであり、そのための各種の計測を行った。図—5.8の断面図に示されるように、第一段载荷は−2mから±0mまでの盛砂で行い、第二段载荷はその上の捨石、ブロック、中詰め砂によるものである。

この地点での地盤の状況は、−2mの海底面から−16mまで軟弱な粘性土層がみられ、それ以深は砂層となっている。図—5.9に代表的な土質試験結果の例を示す。圧密係数 c_v の値の深度分布をプロットしたものが図—5.10である。この図に示されるように、表層付近ではやや c_v の値が大きくなってはいるが、全般的にみると、この地点の c_v の値はほぼ一様とみなしてもよいと考えられる。

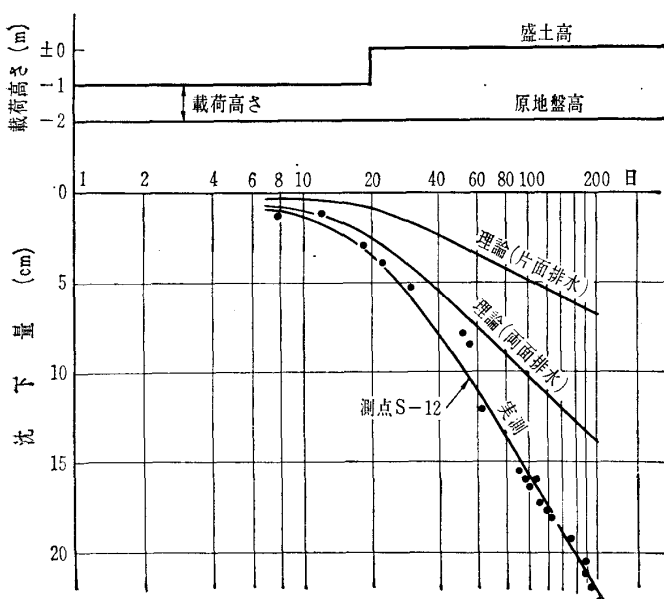
実際にこの護岸を建設した際に、どのような沈下が時間の進行に伴って生じたかを示したものが図—5.11である。この図には、図—5.7の平面図で示される5箇所の沈下板による値がプロットされている。図中でS—1～S—4は締固め砂杭工法を施工した区域の沈下板であり、S—12は無処理区域の沈下板である。ここで施工した砂杭は、直径60cm、間隔1.7mである。設計



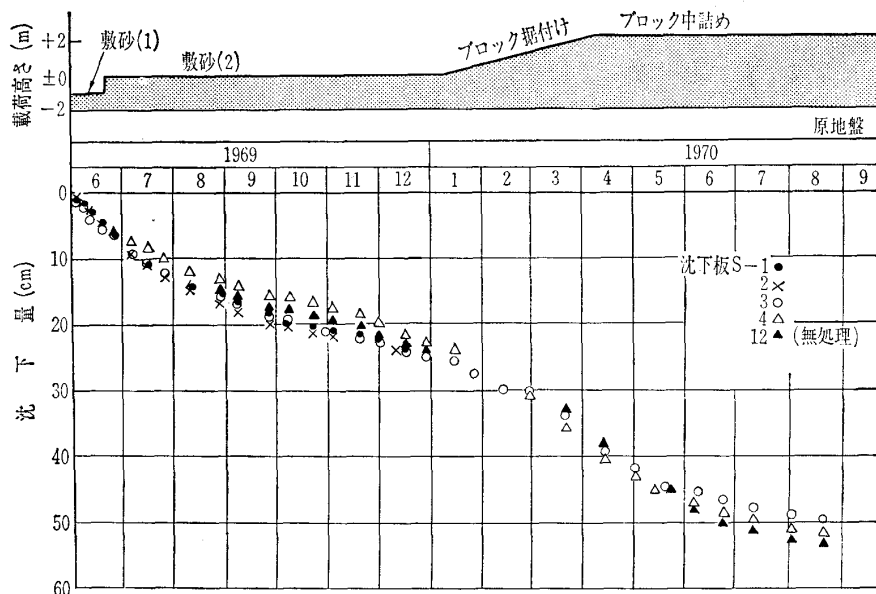
図—5.10 圧密係数の深度分布

上は砂杭打設区域での沈下と無処理区域の沈下の速さに大きな差が生じることが予想された。しかし、実際に観測された沈下量には、砂杭施工の差はほとんどみられない。陸上の盛土においても、沈下がサンドドレーンの施工の有無によってほとんど変わらないという報告が多い⁶⁾。今回の例もこのような例と対応していると考えられ興味深い。

このような一次元圧密とは考えられないような沈下現象を解析するためには、本来は、三次元圧密理論を用いなければならない。しかし、現在の段階では、三次元圧密理論として工学的な実用性を持つものはないといっても過言ではないであろう。従って、今回のように荷重が三次元的に



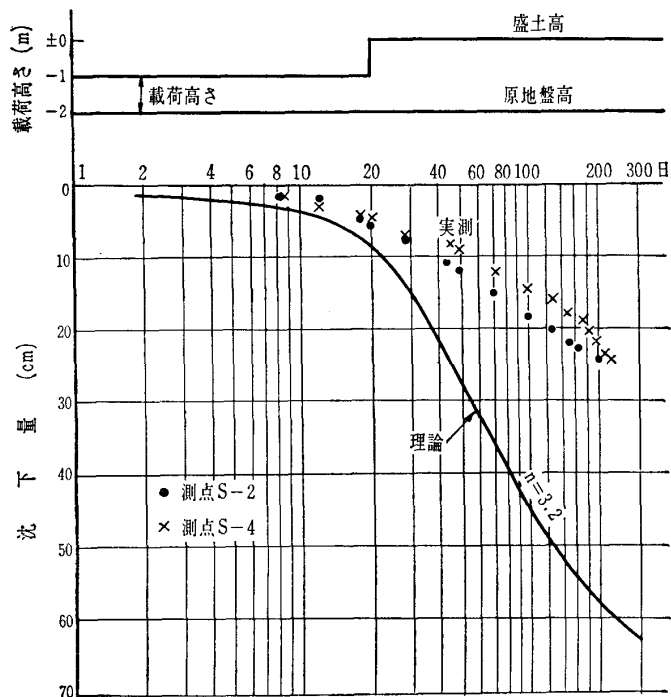
図—5.12 沈下の解析（無処理区域）



図—5.11 沈下の観測結果

るような水平方向の変位が生じるような場合にも、一次元圧密理論を適用しているのが実状である。

図—5.12及び図—5.13は一次元圧密理論をそのまま適用して、圧密沈下解析を行って実測値と比較したものである。図—5.12は無処理区域の実測沈下量と計算沈下量の比較である。ここで行った比較は、図—5.8で示した断面図での—2 mから±0 mまでの第一段荷重による沈下量のみである。計算においては、応力分散を無視している。図—5.12から分かるように、実測沈下は計算値よりかなり大きくなっている。図—5.13は砂杭打設区域における実測値と計算値の比較である。この図をみると、地盤改良を行った場合は無処理の場合とは反対傾向であり、計算値の方が実測値



図—5.13 沈下の解析（砂杭打設区域）

講座

より大きくなっている。

5.4 ま と め

ここでは、海底粘土地盤の圧密沈下の問題点を二つの実例について述べることによって紹介してきた。もちろん、このように限られた二例のみから海底粘土地盤の圧密沈下に関する結論的なものを導き出すのは無理といえよう。しかし、今回説明した例からいくつかの点が明らかになってきたともいえる。

まず、一次元圧密と考えられるような場合の圧密沈下解析の精度は、以下の二点を考慮することにより改善できる。一点目は、圧密係数 c_v の値が正しいかどうかを再検討することである。この点は特に、 c_v の値が大きい土 ($c_v=0.2 \text{ cm}^2/\text{min}$ 以上) のものに対して重要となってくるであろう。二点目は、実際の粘性土層の不均一性を十分考慮して、差分法などにより数値計算を行うことである。この点は、排水面に近い表面付近の粘性土層の圧密係数が大きい場合に大きな要素となってくる。自然の海底粘土地盤においては、海底面付近は圧縮性が大きいのが常であり、圧密係数が大きいことも多い。この場合は、表面付近の粘性土層の沈下が非常に速く進行し、沈下量の値も大きい。従って、地盤を一樣として圧密沈下計算を行うと、表層の沈下量を過小に評価してしまうことになる。不均一地盤の計算を行うためには、数値解析が必要となるので計算機が必要となってくる。しかし、この計算そのものはそれほど複雑なものではなく、プログラムの組める簡単な電卓などでも処理可能と思われる。

荷重が局部的に載荷される三次元圧密状態の場合は、現在の段階では圧密沈下解析は困難である。その原因としては、三次元圧密理論として十分に確立され、工学的にも実証されたものがないことがあげられる。このような場合に、一次元圧密理論を適用した場合にどのような信頼性があるかという点も十分に分かっていないといえる。

今回調べた二つの例からは以上のことがいえよう。しかし、海底粘土地盤の圧密沈下に関しても、多くの未解決問題が残されているのが現状である。従って、ここでは触れられなかった問題点も多い。結局、このような問題点のある実状で圧密沈下を考えるためには、工学的判断が非常に重要な要素となってくる。そのためには、十分に管理された現地観測データと十分に吟味された計算値の比較検討が最も重要となるであろう。

参 考 文 献

- 1) 小林正樹・松本一明・奥村樹郎(1970): 広島空港における圧密沈下現象の解析, 第20回土質工学シンポジウム
- 2) Palmer, L. A. and P. P. Brown(1957): Settlement Analysis for Areas of Continuing Subsidence, Proc. 4th ICSMFE, Vol.1
- 3) Rowe, P. W. (1968): The Influence of Geological Features of Clay Deposits on the Design and Performance of Sand Drains, Supplement to the Proc. ICE
- 4) Scott, R. F. (1963): Principles of Soil Mechanics, Addison-Wesley
- 5) 木庭宏美・堀江宏保(1971): 砂杭を打設した粘性土地盤の挙動, 港湾技術研究所報告, Vol.10, No.3
- 6) 土と基礎—軟弱地盤特集号— Vol.20, No.8 (1972)
(原稿受理 1979. 3. 29)

昭和53年度 土質工学会会員名簿販売のお知らせ

標記名簿を昨年11月に発行し、希望者に販売しております。ふるってお申込みください。

記

価 格：定価 5,000円 会員特価 2,000円 送 料 240円

掲 載 内 容：

1. 定款, 規則, 学会賞規程, 支部規程, 学会略史, 歴代会長, 名誉会員, 各年度末会員数, 役員, 参与, 支部役員, 支部一覧表, 委員等, 事務局職員, 土質工学会賞受賞者
2. 正会員, 学生会員, 国際会員の氏名, 卒業学校と年次, 勤務先, 同電話番号, 自宅住所(郵便番号), 同電話番号
氏名の配列に工夫をこらし自宅電話番号を追加するなど, 前回より改善しております
3. 特別会員の会員名, 資格級, 郵便番号, 所在地, 電話番号
4. 職場班の班番号, 班長名, 機関名(班名称), 郵便番号, 所在地, 電話番号

全体の頁数：B5判 420頁

申 込 方 法：代金を添えて下記へお申込みください。

〒101 東京都千代田区神田淡路町2-23 菅山ビル

社団法人土質工学会販売係

電話 03-251-7661