

圧密試験結果の適用と限界

あ ぼ ひ お
網 干 寿 夫*

1. 標準圧密試験と沈下算定法について

粘土地盤が構造物や盛土などの荷重を受ける場合の圧密沈下を算定するために、一般にいわゆる標準圧密試験が行なわれる。この試験は一軸圧密試験、英語では Oedometer Test と呼ばれるものであって、わが国では 1960 年に JIS A 1217 として詳しく規定されている。また 1969 年には土質工学会セン断試験法委員会改訂案が出されて多少の修正を提案している。この試験法の要点、特徴はつぎのとおりである。

- (1) 側面を金属リングで拘束された状態で、一軸方向だけの圧縮と排水で粘土試料を圧密すること。
- (2) 載荷は応力制御 (Stress Control Test) であって、実際の構造物などの載荷速度や荷重強度とは無関係に、一定のステップ荷重を繰返してゆくこと。また各ステップの荷重は 24 時間という定まった時間間隔で、荷重強度を倍増して加えられること。
- (3) 測定される量は一次元沈下量の時間的変化であるが、最終的に表示されるのは、圧密応力-間ゲキ比関係と圧密速度を表わす定数 c_v と圧密応力または間ゲキ比との関係である。

本文ではこのような圧密試験を標準圧密試験または標準試験と呼ぶことにする。

一方、この試験結果を利用して構造物などの圧密沈下を推算する際に用いられる最も普通のプロセスはつぎのとおりである。

- (1) 沈下を求める点を通る鉛直線上において、構造物などにより粘土地盤内に生じる増加応力の分布をブーシネスク (Boussinesq) の弾性理論により求め、その平均値を計算する。
- (2) この平均増加応力に対応する最終沈下量を、圧密応力-間ゲキ比曲線またはこの曲線のコウ配である体積圧縮係数 m_v から計算する。
- (3) つぎに粘土層の排水条件に留意して最大排水距離を定めた上で、平均荷重強度に対応する圧密係数 c_v を用いて、沈下の時間経過を算定する。この際相似則に関する無次元の時間係数としては構造物の載荷、境界条件にかかわらず圧密試験のときと同じような条件に

対して理論計算された値、すなわち $T_{10} = 0.008$, $T_{20} = 0.031, \dots, T_{90} = 0.848$ を用いるのが普通である。

このようにして求められた沈下の予測値、いわゆる理論沈下曲線と、実測沈下とは必ずしも一致しない。というよりは一致する方がむしろ例外的であって、理論計算値は単なる目安にすぎないという評価さえ、実務家の間で常識化しつつあるように思われる。

粘土地盤の圧密沈下はふつう十数年から数十年にわたって継続するので、理論と実測との比較は、このような長期にわたる根気のいる検証を経て始めて明らかにされることである。これらの貴重なデータが、圧密論の初期の時代から最近に至るまでかなりたくさん報告されているにもかかわらず、沈下予測の計算値がどの程度の誤差範囲におさまるものであるか、また誤差の原因は主に何であるかといったような事も、つきつめて考察されていない状態である。

古い時代の、サンプリングや試験法があまり上手でなかった頃のデータは別としても、最近の沈下観測例の報告を通読してみると、この理論計算値が全くでたらめのものではなくて、その予測のむづかしさのわりには意外とよく集めているという印象さえ受けるのである。これは内輪ばなしめいてくるが、もともと設計値を定めるときに、広い範囲にちらばり、また不規則に変化したデータの中から一個の値を選ぶという神わざみたいな操作をしてきているので、沈下実測値が出てレポートにまとめられる際に、もう一度実験値を見直すというプロセスを経ているのではないかと想像される。私どもがサンド・ドレーンなどの地盤改良工法の施工管理に際して、 c_h のとりかたについて、初期の沈下実測値をもとに設計値を修正するようアドバイスするのは、前記と同じたぐいの方法を進めているということであろう。

しかし、それにしても実験値と全くかけはなれた値を用いて計算するわけではないので、これがともかくも実測値とほぼ合うということは、基本的にはテルツァーギ (Terzaghi) を中心とした圧密理論が一応間違っていないということの意味しているものといえよう。

1950 年代にスケンプトン (Skempton) とマクドナルド (MacDonald)¹⁾ が全沈下量について実測値と計算値との比較をグラフにプロットして示したことがあって、筆者もよくその図をあちこちで引用した²⁾。これによれば正規粘

* 工博 広島大学教授 工学部

土の場合には実測値が大きめに、また過圧密粘土では小さく出るといふ傾向はあるにしても、両者相等しい直線を中心に大部分が集まり、その比が0.7~1.5という大まかなちらばりの範囲に分布していることを示していた。最近のデータで同じような図をつくれれば、もっと狭い範囲におさまるだろうという感じがする。しかしここにこのような図を示さないのは、当時に比べ、理論上でもまた実験的にもいろいろなことが明らかになってきて、この誤差の原因が多様多様であることがわかってきたので、その面での整理を経ないと一括して誤差を論じても無意味だからである。確かに巨視的には大体あっているようでもくわしく検討すると、どのようにデータを処理してもとうてい実測値と一致しそうなないケースや、始めの方をあわせると後の方はずれが大きくなって、どうしようもない場合などが非常に多い。

したがって、現段階では理論値の誤差がどのくらいあるかという論議や認識よりは、標準の方法は理論的にどのような問題を含んでいるとか、実験手法自身にも問題点があるということを十分認識して、得られた実測データについて、定性的にはあるが的確な判断を加えるというのが、実務家にとって、より大切な心がまえではないかと思う。

このような観点にたつて、本報文では最近の圧密論の進展のうちから、沈下解析に重要なかわりあいをもつと思われるものをできるだけ取り上げて、その要点について解説することを中心にまとめてみたい。もちろん限られたページ数の内であるから、詳しくはそれぞれ原報文を参照されたい。

2. 粘土の圧密特性と標準試験法の問題点について

最初に標準圧密試験について、試験法そのものにどのような問題点や誤差があるかを考えてみたい。

だれもがまず問題にするのは金属リングと粘土試料の間に発生する側面摩擦の影響である。これについては、ハンスボ (Hansbo)、カニ (Kani)、中瀬、門田³⁾らの研究があって、現在では一応明らかにされている。門田⁴⁾によれば有効応力 σ' で整理したときの金属面の摩擦係数は0.15~0.20であって、標準的な寸法の試料の場合に、側面摩擦のために減少する圧密応力は加えられた荷重の10~20%に達するというのである。つまり10 kg/cm²の圧密荷重を加えても、有効に作用している応力は8 kg/cm²程度になっている。全沈下量を求めるために m_v - σ' 関係を表示することが多いが、実測された沈下ヒズミ $\epsilon_v = m_v \cdot \sigma'$ であるから、 σ' に実効値を使っても m_v が増加して、結果的には m_v - σ' の曲線は変わらないことになる。しかし沈下解析に際しては平均応力に対応する m_v を用いるので、 σ' を圧密圧力そのものをとるか、実効の応力で表示するかで沈下量にかなりの違いが出るはずである。普通には応力

の補正はしないが、この要素では常に沈下量を少なめに見積もるわけである。

側面摩擦の影響は全沈下量よりは圧密沈下の速さの係数 c_v に大きく表われるようである。側面摩擦が働くと、圧密の時間沈下関係は二次圧密のクリープのような時間遅れを生じる。すなわち c_v は正しい値より小さめに出ることになる。門田はこれを理論的に計算しているが、 c_v の変化を定量的に計算する方法は今のところ確立されていない。

つぎに粘土の圧密特性に大きな影響を与えるものとして荷重増加率がある。同じ粘土の試料に荷重増加率を変えて圧密すると、 c_v の値のみならず、沈下曲線の形まで全く変わってしまうことが、多くの研究者によって明らかにされている (Newland, Leonards, Barden)⁵⁾。このうち代表的なデータを図示する。図-1, 2で明らかなように、荷重増加率を小さくすると圧密曲線がテルツァーギ型にならず、クリープ沈下の割合が増大する。図-2のⅡまたはⅢの形の沈下曲線は、圧密降伏応力以下の過圧密領域での圧密の場合にしばしばみられるものであるが、要はこのような沈下をするのは、粘土の骨組構造の強さに比べて、あまり大きくない荷重をかけた場合には、内部に間ゲキ水圧が十分発生せず、沈下曲線がテルツァーギ型よりクリープ型になるわけである。このような場合に無理に合わせて c_v を求めても本来無意味であることはいうまでもない。

荷重増加率は圧密速度だけでなく、 e - σ' 関係にも影響を与えることが知られている。この値が小さいと——特に

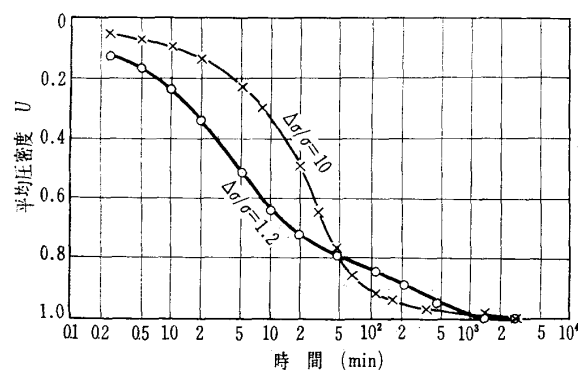


図-1 荷重増加率による圧密沈下曲線の変化 (I)
(Newland および Allely 1960)

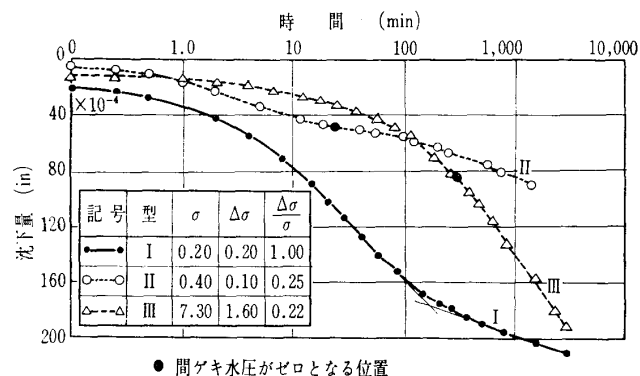


図-2 荷重増加率による圧密沈下曲線の変化 (II)
(Leonard 1961)

0.4 以下になると圧密曲線に大きな変化を与えるとされている。このような問題を避けるため標準試験では荷重増加率を 1.0 に定め、いわゆる倍増ステップ載荷という方法をとっている。しかし現場の構造物荷重は必ずしもそのように大きな増加率をとるとは限らないので、荷重増加が小さい場合には理論通りの沈下を示さないことが予想される。

荷重載荷時間も圧密沈下に重要な影響を与える。これは二次圧密に関連したものであるから、その項で再びふれるが、標準試験において各段階荷重を 24 時間ごとに増やしてゆくというのは、全く便宜的に定められたものであって、現場の載荷条件とは一致しない。この載荷時間間隔を長くしてゆくと、各荷重段階で最終沈下量が大きくなるために、 $e-\sigma'$ 曲線が下へ平行移動することになる。この際圧密降伏応力が小さくなることもよく知られている（図-3）。したがって標準試験の厚さ 2cm の試料に対して 24 時間ごとの載荷というのが、現実の粘土層厚に対してどのような載荷速度になるかをレオロジー学の立場から検討することが必要である。

実験上の問題として重要なものに、圧密降伏応力の決定法がある。従来カサグランデ (A. Casagrande) が提案した方法が一般になじみ深いものになっているが、これについてはグラフ用紙の e のスケールの取り方を変えると、同じデータから異なった値が得られることが証明されて問題となった。セン断試験法委員会案では三笠が提案した方法⁶⁾を採用しているが、一般的にはまだカサグランデの方法がそのまま用いられていることが多いようだし、また委員会案の方法についての批判もまだ出てこない状態である。図-3 でも明らかなように、この値にはもはや先行荷重 (Maximum Past Pressure) という意味はないのであるから、正規圧密か過圧密かということは地質学的考察やその他の方法を加えて判断しなければならないことが明らか

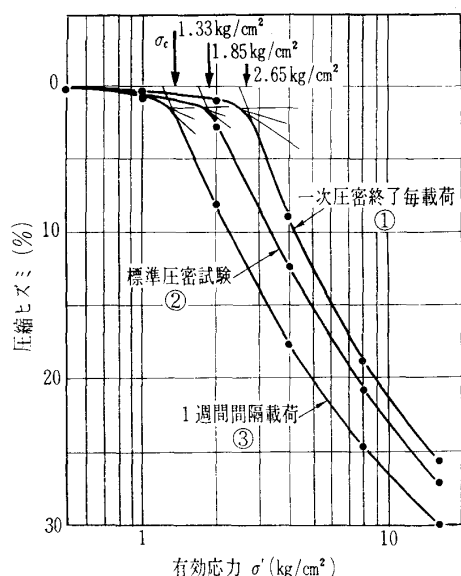


図-3 載荷時間の相違による圧縮曲線の変化 (Crawford 1964)

である。したがって実際問題としてもこの値にそれほど厳密な意味をもたせる必要がないために、新しく提案した方法が面倒がられているような気がする。沈下解析の面からいえば、ある程度過圧密粘土で、荷重があまり小さくなくて、しかも過圧密・正規圧密両域にまたがっている場合など、先行荷重が正確に定められないだけに非常にむづかしいことになる。

圧密試験法自体の問題点として、その他に w とか γ , G などの測定誤差、それから計算される e の値の確からしさ、 c_v 決定のためのカーブ・フィッティングの個人誤差、 $\sqrt{t}$ 法と $\log t$ 法による値の差、などがある。これらの測定誤差のちらばりほどの程度あるかについての実測データはあるが⁷⁾、これらを総合して確率、統計論的に処理したものは少ない。ともかく e などの値はなかなか正確には決めがたい値であるので、あまり厳密にこれらの値にこだわることは意味ないことである。いくつものデータの中から確かしい値を拾い上げていくという判断が最も大切なことであることを強調しておきたい。

3. 一次元圧密論からみた沈下解析法の問題点

構造物や道路のような場合でなく、広い埋立地の沈下のように一次元的計算ができるケースについて、理論的にも従来の標準的な解析法では工合がわるいという、いくつかの重要な問題が明らかとなってきた。

その一つは地盤の不均一性である。テルツァーギが地盤の複雑な構成に言及して「土質力学は精密科学たり得ないだろう」といったのはよく知られたことであるが、彼の圧密論の基本仮定の中に地盤が均一等方性であるとした事について、だれしも当然のことと受けとめていた。ところが電子計算機が発達して複雑な条件に対する数値解が得られるようになって、不均一地盤に対する圧密論ができてみると、この当然自明の理として受けとっていた仮定が、実は大変な誤差の原因であることが明らかとなったのである。

シフマン (Schiffman) とギブソン (Gibson, 1964)⁸⁾ が不均一地盤について数値解を求めた一例を図-4 に示す。この図は k が一定で m_v が不均一に分布する場合の圧密曲線であって、(a) は表面の m_0 に対し中央部の m_0 は 1/10 で

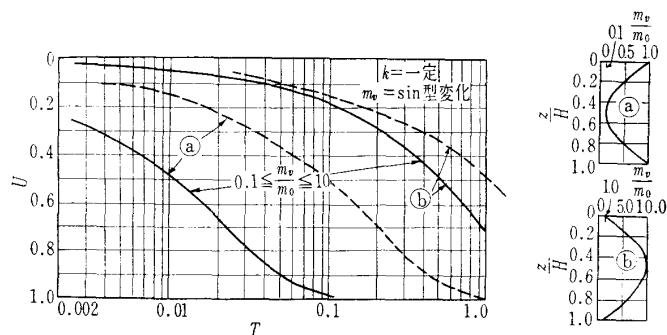


図-4 k = 一定, m_v : sin 形変化の場合 (Schiffman 他 1964)
破線は平均値を用いて均一地盤での計算値

ある場合、また⑥は逆に中央部が軟かくて m_v に対し10倍になった場合である。いずれも両面排水で m_v は $\sin$ 型に分布すると仮定している。圧密沈下の経過がいかに違うかがよくわかると思う。シフマンらは k , m_v が変化するときはその比 c_v がたとえ一定であっても、圧密曲線は全く違った経過をたどることを例示したあと、London Clay の地盤沈下について数値計算をして、従来部分荷重による瞬時沈下 (Immediate Settlement) で説明していた初期の急速な沈下について、一次元載荷の場合でも起こることを示して従来の説にショックを与えた。

London Clay は氷河によって生成された過圧密粘土である。氷河荷重がなくなって、その表面に数mの砂層がタイ積しているが、層厚 30 m のうち表層の 3~5 m が荷重減少によりゆるめられて、図-5 のように k も m_v も下の均一な部分の約5倍くらい大きくなっている。しかしこの比 c_v は下の部分とほとんど変わらず一定とみなしてよいので、従来はこの表層の変化を無視して計算していた。これをシフマンらの理論で数値計算してみると図のように初期の圧密沈下が非常に早く、 c_v を約5倍くらいにしないと合わないことが示された。

このような計算結果からみると、地盤の不均一性の圧密速度に及ぼす影響は非常に大きく、大まかに丸めた設計値による計算結果とは数倍も違うことがありうるということであって、沈下の予測がいかにむづかしいかがよくわかると思う。

三笠⁹⁾ は粘土層が圧密される時、排水面付近は早く圧密されるので k が小さくなるということに着目して、圧密中に k や m_v が変化する場合や、層厚そのものの变化の影響がどのようになるかについて解を求めた。層厚の変化の

表-1 層厚の変化による圧密時間の変化 (三笠 1963)

最終ヒズミ $\bar{\epsilon}_f$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
T_{50}	0.197	0.191	0.183	0.174	0.164	0.149
T_{90}	0.848	0.720	0.599	0.490	0.396	0.309
T_{90}/T_{50}	4.31	4.20	4.05	3.92	3.80	3.68
$T_{50}=0.197$ としたときの誤差(%)	0	3.1	7.7	13.2	20.1	32.2
$T_{90}=0.848$ としたときの誤差(%)	0	17.8	41.6	73.1	114.6	174.4

影響として表-1 のような結果を得ている。地盤が非常に軟弱である場合には重要なファクターとなろう。

その他、圧密特性が異なったいくつかの層があるとき、これを平均化して単一層として計算するという、ごく普通のやりかたについても、多層地盤として数値解析をしてみると、平均値法と全く違った沈下曲線が得られることが多い。またこの種の問題の一例として、排水砂層の透水性が悪かったり、層厚が大きい場合に、排水層の中での動水抵抗のために、粘土層自体の圧密が遅れるというケースもしばしば出てくる重要な問題である。

このように、従来沈下解析に慣用的に使われて不変のものと受取られてきた一次元圧密の $U-T$ 関係は、地盤の不均一性、異方性、載荷の初期条件、境界の排水性、単純化による誤差など、もろもろの条件によって異なった圧密曲線を示すことが明らかにされた。もし $U-T$ 関係をそのままにして沈下曲線を合わせようとする、見掛上 c_v を数倍あるいは数分の一にしないと合わないことが多いのである。このようなわけで、実測沈下と理論値を照合するとき、できるだけ与えられた条件に忠実に合わせた数値解を求めてチェックしないと、単に c_v を操作するだけでは理論と実測値が合ったのか合わないのかよくわからなくなって、せっかくの貴重なデータが今後の圧密論の発展に役立たなくなってしまう。

この項の解析法やデータなどについては別の文献¹⁰⁾などを参照されたい。

4. 二次元・三次元問題への適用性と問題点

粘土層の圧密沈下の問題の大部分は構造物などの建設に伴うものである。この場合載荷幅は粘土層厚に比べて同じくらいか、むしろ小さい方が多い。したがって沈下問題の大部分はいわゆる部分荷重によるものということになる。

しかしこのような二次元・三次元の圧密問題は、理論的にも、また試験法としてもよくわかっていない事が多くて、現段階ではまだ確立された手法はないといってよい。したがって今のところ、この問題の解析法はほとんど標準試験法による圧密定数を基礎にして、これに二次元・三次元の場合のための修正をほどこして用いるというやりかたをとっている。

この項の問題のうち実用上重要なものとして、サンド・

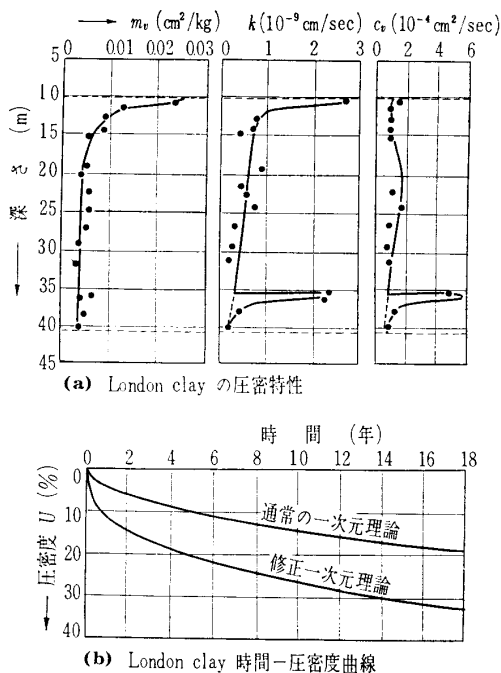


図-5 London Clay の土質特性および時間-圧密度曲線 (Schiffman 他 1964)

ドレーンのような圧密排水による地盤改良工法がある。これについては「土と基礎」の最近の特集号¹¹⁾で論ぜられており、筆者もその総説をまとめたのでここではふれないこととする。

部分荷重による圧密沈下の解析法のうち、最も慣用的に用いられている手法は次のような仮定にたっている。

- (1) 粘土地盤内の応力分布はブーシネスクの弾性論により計算される。
- (2) 粘土層の表面沈下量は、その点を通る鉛直線上における垂直応力 σ_z のみによって一次元的に計算される。したがって、その鉛直線上の σ_z の分布を求め、その平均値に対応する一次元の沈下量となるということである。
- (3) 沈下の時間経過は一次元の標準解析法と同じとするか、せいぜい初期間ゲキ水圧の分布が上記垂直応力分布に近い場合に対する一次元圧密の $U-T$ 関係を使って計算できるとする。

この慣用計算法は標準圧密試験と弾性論的応力計算であるから設計上は便利であるが、理論的背景に欠けるところがあるため実測値との比較にあたってきめ手になりにくく、これでは問題点がつかみにくいということになる。

三次元解析法として次によく出てくるのはスケンプトンの方法であろう。この方法の要点は、

- (1) 粘土層の全沈下量を次の二つに分ける。

$$S = S_i + S_c, \quad S_i = \frac{3}{4} \cdot \frac{qBI\rho}{E}, \quad S_c = \mu \cdot S_{\text{oed}}$$

ここに S_i は即時沈下であって、 $t=0$ の瞬間に非排水状態で側方流動またはセン断変形によって生じる沈下である。また S_c は三次元圧密沈下であって、一次元の沈下量 S_{oed} に修正係数 μ をかけて計算することができる (図-6)。

- (2) この修正係数の算定にあたってスケンプトンの間ゲキ係数 A , B が用いられる。ここに B は飽和粘土

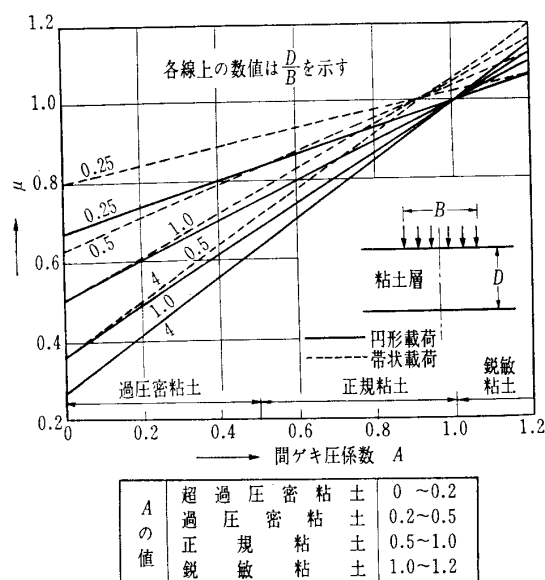


図-6 μ と A の関係 (Scott 1963)

の場合 1.0 であるから問題ないが、 A は三軸応力状態での増加応力成分と発生間ゲキ水圧を結びつける定数で

$$\Delta u = \Delta \sigma_3 + A(\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \quad \dots\dots\dots \text{軸対称の場合}$$

この方法を適用する際の問題点は E と A の値のとりかたであろう。 E は非排水三軸試験のときの σ_1 と ε_1 の曲線のコウ配であるから σ_3 あるいは σ_1/σ_3 の比をいくらにとるかによって異なってくる。したがって二次元または三次元の部分荷重によってどの程度の側方流動を起こすかという問題と直接的に関連があって、この場合に発生する σ_3 の値は単に弾性論からだけでは決められない。現段階ではセン断強さ s_u と一定の関係があるということで $E = \alpha s_u$ とし、この α を実験的に定めておいて用いるという方法が最も実際的のようである。

一方、 A の値は三軸試験で間ゲキ水圧を測定することによって求められるが、これは実は定数ではなくて、荷重強度とともに変化するもので、どの程度の変形に対応する値を用いるかを考えておかなければならない。一般によく表示されている値は破壊時の値 A_f であるから、そのままは用いられない。最もよい方法は応力軌跡に対応する A の変化を曲線で表わし、その中から現実の荷重条件に合った点を選んで定めるという方法であろう。

スケンプトンの方法は圧密進行の速さについては理論考察がされてないので、 $t=0$ の瞬間に S_i が生じ、その後 S_c は一次元圧密の場合と同様に進行するものとして求める。デイビス (Davis) らはスケンプトンの方法を幾分合理的に修正しているが、基本的には差がない。

やはり三次元沈下を問題とするならば、いわゆる三次元圧密論を根本的に洗いなおさなければならないようである。これは三次元の変形であるから、弾性論から類推しても明らかのように、沈下量については E だけでなく二つの弾性定数、すなわちセン断弾性係数 G とポアソン比 ν 、あるいはラーメの定数 λ , μ が最低限必要である。さらに時間経過を表わすために三次元の k または c_v 、あるいは何らかの形のレオロジー定数などがあることはいうまでもない。

三次元の圧密論としては、ビオ (Biot) の系列の理論の方がテルツァーギ-レンドリック (Terzaghi-Rendulic) の熱伝導型の理論よりすぐれていることはほぼ一般に認められたようである。これは今のところ一次元の問題ほど実際に利用できる解が得られていないが、最近種々の研究¹²⁾¹³⁾が行なわれて明るい見通しとなってきたので、近い将来には三次元沈下解析もっと根拠のある計算ができるようになるものと期待される。

したがって、この項の問題の解析法としては実験的には三軸圧密試験、理論的にはビオの系列の圧密解析が中心になるだろうが、実用面には今一步という感じがふっきれない状況である。今後のこの方面の研究に注目されることを望みたい。

5. 二次圧密に関連して

現実の粘土の圧密がテルツァーギ理論と違って、間ゲキ水圧が消散してもなおクリープ的に長時間継続するということは、圧密論研究の初期の頃からよく知られていた。これを二次圧密と名づけて、テイラー (Taylor) や石井らの人達が理論的に研究したのもかなり古い時代のことである。

標準圧密試験の中では、各荷重段階での沈下曲線の形からクリープの沈下の部分を求め、全沈下量中の一次圧密の比率として一次圧密比が定義されていて、荷重強度と一次圧密比の関係が示されることになっている。しかしこの一次密圧比は現実の沈下解析には一般に用いられないし、またその物理的意味も明りょうではない。つまり各荷重段階で24時間を最終状態としたことには特別の意味はないし、またクリープの沈下は間ゲキ水圧が消散している過程、すなわち一般に一次圧密と呼ばれている時間中にもかなり生じているので、この一次圧密比という値は沈下解析とどのようなかわりあいをもっているか明らかでないわけである。せいぜいクリープの沈下が多い土か少ない土かということの目安としてみられる程度であろう。

レオロジー学の立場からいえば、粘土の圧密において有効応力と沈下の関係の本質は、この圧密沈下曲線のシッポの部分にあって、テルツァーギのいう熱伝導型沈下は、その最終の Strain Rate の曲線に達するまでの、間ゲキ水の動水抵抗による時間遅れであるという考え方になる。この時間遅れは一次元理論にあるように層厚の自乗に比例するので、同じ粘土の厚さの異なった層の圧密沈下は模式的にいえば図-7のようになるとされている。

これによれば、層厚が大きいほど一次圧密期間中に含まれて起こるクリープ沈下量が大きいので、いわゆる 100% 圧密終了時の沈下ヒズミ量は層厚が大きいほど大であるということになる。したがって 1~2 cm 厚の試料に 24 時間毎に荷重という標準方法による沈下量計算は現実の 100% 圧密量を少なめに見積もるということになる。また c_v については $c_v = k/m_v \cdot \gamma_w$ から、 m_v が大きくなると c_v が小さくなるので、クリープによって圧密時間はおそくなると

いうことである。

実際に標準試験の試料の直径と厚さの比を変えないで層厚をうんと大きくして、同じ載荷条件で比較してみると、必ずしもこの考え方どおりにはゆかない¹⁴⁾。図-7の中に示したように一次圧密終了時の沈下ヒズミは各層とともに次第に大きくなるが、一直線上には重ならず、予想よりやや小さくなるようである。また c_v は逆に大きくなる傾向があるが、その理由は明らかでない。クリープ曲線のコウ配については、すでに多くの研究者によって明らかにされているように、有効応力に比例して増加する¹⁵⁾¹⁶⁾。図-7の実測沈下曲線の最終部分は同じ有効応力に対するものであるからほぼ平行になっている。

このような実測例からみて、どうやら標準試験の二次圧密に関するデータの中で沈下解析に直接役立ちそうなのは、各段階のクリープ部分のコウ配のようである。これを用いて 24 時間載荷の m_v の最終点から沈下曲線を延長すれば、現実の粘土層の沈下量の上限值が得られるというふうに考えてはどうだろうか。このような計算をするためには従来表示されていなかった有効応力-クリープコウ配 (半対数スケールで) の表示を試験結果の中に加える必要があろう。圧密曲線の時間経過についてはまだ一般的にまとめられる状態ではないが、一般に現場の沈下速度は標準試験から得られる計算値よりはずっと早く進行する場合が多いということを付言するにとどめる¹⁷⁾。

6. 標準試験以外の圧密試験法について

標準試験と沈下解析法の関係についてこれまで述べてきたことで明らかにされたように、標準試験の方法は現場の種々の条件に必ずしもマッチしていないので、それから精度のよい計算値を得ることはおよそ無理であることがわかったと思う。この試験法はふつう常識的に受け入れられているほど現実のモデルとしてのテストにはなっていない。むしろ一軸圧縮強度 q_u と円弧スベリによる安定解析との関係のように、一種の Index Properties であると考えた方がよい。鋼材の引張り試験と構造物の変形や破壊の解析との関係のように、精度のよい結びつきを期待すると失望することになる。これは荷重履歴が違おうと変形特性が違おうはずの粘土を相手にして、現実の載荷条件と全く違った載荷方法をとっていることを考えてみても明らかなことであろう。したがって他のインデックス (たとえば液性限界) 同様に、方法そのものを変えるとこれまでの蓄積された計算値-実測値関係のデータが生かされなくなるので簡単には変えられないが、結果さえほぼ同じものが得られるならば、もっと簡単な方法で求めてもよいのである。

筆者はさきに定率漸増圧密試験 (Constant Loading Rate Consol Test) と称し、荷重を 0 から直線的にあげていって全載荷を 3 時間ばかりで終了する急速試験を提案したが¹⁸⁾、この趣旨は前記の考え方に基づいている。この

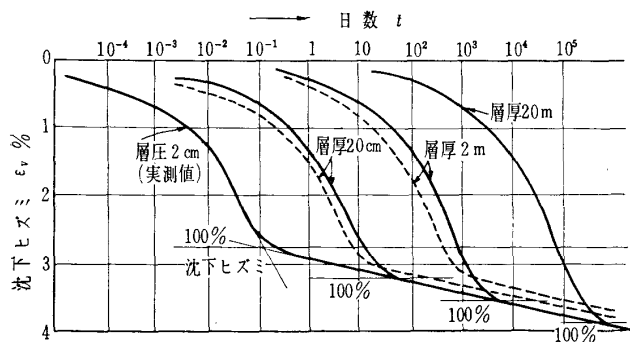


図-7 同一荷重強度に対する層厚と圧密の経過との関係
実線は 2 cm の実測値をもとに推定された圧密曲線
破線はそれに対する実測値

方法だと、従来1週間かかった試験が3時間ですむだけでなく、測定するものが荷重、沈下量、間ゲキ圧であるので、全部容易に自記記録され、完全自動化が可能であるというメリットがある。横道にそれがあるが、人手がたりなくなって物事ができるだけ自動化される時代となったのであるから、土質試験法もこの次の改訂までには完全自動化を研究してほしいものである。そして実用上の必要精度内にはいるならば、試験法のプロセスそのものも自動化しやすいように改める方がよいのではないかと思う。

一方、二次元・三次元の圧密沈下については理論的解析のほうが先決であるが、少なくとも前項で述べたように G と ν (または λ と μ)、それに k または c_v を求める試験がどうしても必要である。現在のところ考えられる方法としては、強度試験に用いられる三軸圧縮試験機を圧密試験むきに改良して、三軸圧密試験によるという方法が最も好ましいものと思われる。

これについて吉国は三軸圧縮試験の試料の外周方向にのみペーパー・ドレーンによる排水を行ない、垂直方向の変形を拘束した状態で($\varepsilon_v=0$)、半径方向に圧密させる方法を提案している¹⁹⁾。測定するのは半径方向のヒズミ ε_h と垂直拘束圧 p_v の変化である。 G と ν は弾性論から次式で表わされる。

$$G = \frac{\Delta p_h - \Delta p_v}{2\varepsilon_h}, \quad \nu = \frac{1\Delta p_v}{2\Delta p_h}$$

ここに Δp_h は圧密のために加えた液圧、 Δp_v はそれによって発生した垂直拘束圧の増加の最終値である。

また c_v は標準圧密類似の方法で、理論時間係数 T_h を使って、実測曲線の50%位置の t から計算されるのである。

7. ま と め

以上標準圧密試験法の問題点と沈下解析との関連性について述べた。粘土の圧密試験によって得られる圧密特性は、その粘土に固有のものではなくて、試験条件によって変わらうものであることを、いくつかの例をあげて明らかにした。

粘土のセン断試験では排水条件によって違った結果が得られるけれども、本来これは土のマスを代表するエレメントの試験でありうるものである。しかし圧密試験は元来エレメントの試験でなくて、一種のモデル・テストであることを強調しておきたい。したがってできるだけ現場の条件に適合した試験を行なうのが筋道であって、標準試験がすべての場合に対して必ずしもよい方法だとはいえない。この意味で標準試験によって得られた圧密特性は、沈下解析に関して単に標準的指数にすぎないと考えて対処しなければならない。

一次元圧密という条件のもとでさえも、従来の標準的解析法は理論的にも問題があることを明らかにした。与えられた試験データをもとに沈下予測をする際に、これらの諸

々の問題点を理解した上で、現場の条件とにらみあわせて設計者の判断で解析に用いるデータを決めなければならないのである。これは単に数多くのデータのちらばりの中から設計値を選び出すという確率統計論的判断とは別のものである。

二次元・三次元の問題については、その数学的困難さのために理論的研究がようやく実を結び始めたばかりであって、今後に期待するところが大きい。しかし理論だけでなく、実験的研究や実測値の解析などもまだまだ十分ではない。二次圧密の問題も全く同様な状態にある。

沈下測定の貴重なデータを圧密論発展に役立たせるためには、単に理論値、実測値の比較でなく、地層や試験データの詳細と、どのようなプロセスで理論計算されたかということを書述しておくことが大切である。このことを特に強調して、実務家各位にお願いしておきたい。

以上は圧密論と沈下解析の問題について、その周辺をとりとめなく徘徊したにとどまったようである。種々の事情のために原稿とりまとめのための時間不足で、文の推敲も最近の研究の引用も十分につくことができなかったことをおわびしたい。

参 考 文 献

- 1) MacDonald, D.H. and Skempton, A.W.: A Survey of Comparisons between Calculated and Observed Settlements of Structures on Clay, Proc. Conf. Correlation between Calcul. and Obser. Stress and Displacements, Instn. Civ. Engrs. (1955) 1, p. 318
- 2) たとえば、土質工学会：土質工学ハンドブック (1965) p. 165
- 3) 網干寿夫：圧密，最上篇，土質力学，技報堂 (1969) p. 452
- 4) Monden, H.: Characteristics of Side Friction in the One-dimensional Consolidation, Soils and Foundations (1969) 9-1, p. 11
- 5) 網干寿夫：圧密，最上篇，土質力学，技報堂 (1969) p. 450
- 6) 土質工学会：改訂「土質試験法」(1969) p. 288
- 7) たとえば、渡辺崇博：圧密時間に関する研究，日本道路公団試験所報告，昭46年度，(1972) p. 61
- 8) Schiffman, R.L. and Gibson, R.E.: Consolidation of Non-homogeneous Clay Layers, Proc. Am. Soc. Civ. Engrs. (1964). 90-SM 5, p. 1
- 9) 三笠正人：軟弱粘土の圧密，鹿島出版会，(1963)
- 10) 前記 網干寿夫：圧密，その他
- 11) 土質工学会誌「土と基礎」軟弱地盤小特集号 (1972) 20-8 p. 5
- 12) 吉国 洋：三次元圧密の基礎理論，土木学会論文報告集 (1972) 201, p. 59
- 13) 山口柏樹，村上幸利：有限粘土層の多次元圧密について，土木学会論文報告集 (1972) 204, p. 71
- 14) 網干寿夫，二井岡均：標準圧密試験におけるスケール・エフェクトに関する模型実験，第7回土質工学研究発表講演集 (1972) p. 375
- 15) 柴田 徹：粘土の圧密に関するレオロジー的考察，土木学会論文集 (1960) p. 69
- 16) Monden, H.: One-dimensional Consolidation Affected by Side Friction Soils and Foundations (1969) 9-1, p. 42
- 17) 網干寿夫：圧密 (1969) p. 464
- 18) Aboshi, H., Yoshikuni, H. and Maruyama, S.: Constant Loading Rate Consolidation Test, Soils and Foundations (1970) 10-1 p. 43
- 19) 吉国 洋：間ゲキ水圧を中心にした圧密論の再構成とその適用 (1973)

(原稿受理 1973.1.30)