

圧密における理論と実際

なか せ あき お
中 瀬 明 男*
こ ばやし まさ き
小 林 正 樹**

1. ま え が き

粘土地盤の圧密現象を予測するためには、原地盤より採取した試料を用いて圧密試験を行ない、その結果に基づいて載荷重や地盤条件を考慮して諸定数の値を決定し、これらを圧密理論解に適用する。したがって、圧密現象の予測における理論と実際の関係を検討するには、少なくとも圧密試験と圧密理論の二つの要因について考える必要がある。

実際の工事において問題とする圧密現象は、沈下量とその速さ、土のせん断強さの増加の二つである。また圧密の問題の重要性が大きい場合には、パーチカルドレーンのような圧密促進工法を用いることもある。しかし、ここでは最も基本的な場合として、圧密促進工法を用いない場合の沈下量とその速さについて検討することにした。

上にも述べたように、圧密における理論と実際の関係については、圧密試験に関する要因と適用すべき圧密理論に関するものに分けて考えることが必要と思われる。これら二つの要因を検討するに当たっては、実際の設計業務に関連する諸問題と、より基本的な問題に大別して扱うことにする。

2. 圧密定数値の決定

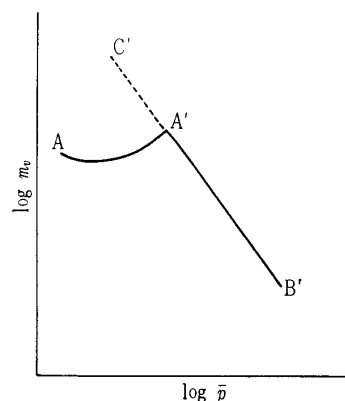
圧密に関する設計で第一に問題となるのは、圧密の計算に用いる諸定数の値を、圧密試験結果からどのようにして決めるかということである。圧密試験結果の解釈と適用については種々の考え方があり、さらに圧密試験結果そのもののばらつきも無視できない場合が多い。したがって圧密定数値の決定は総合的な判断を必要とし、設計業務における困難な問題の一つとなっている。圧密の定数値を機械的に変化させ組み合わせることによって、圧密沈下量と時間の関係をどのようにも描くことができるので、この定数値を決める過程の吟味を抜きにしては理論と実際の比較が意味を持たないといえよう。

圧密沈下の計算を行なう場合には、全圧密沈下量を求め、つぎに時間と圧密沈下量の関係を求める。全圧密沈下量を求める方法としては、体積圧縮係数 m_v あるいは圧縮指数

C_c を用いるものと、圧密試験で求めた $e-\log p$ 曲線をそのまま用いるものなどがある。 C_c を用いる場合は、 $e-\log p$ 曲線が正規圧密領域でも直線とならないような土に対しての適用に問題があり、 $e-\log p$ 曲線を直接用いる場合には初期の間ゲキ比 e_0 の値の決め方に問題がある。 m_v を用いる場合には、圧密圧力によって変化する m_v 値の採用に注意を要する。いずれの方法を用いても計算沈下量は等しいのがたてまえであるが、実際には計算方法によって沈下量は多少とも異なるのが普通である。それぞれの方法による計算の比較を行なった例も報告されている¹⁾。

体積圧縮係数 m_v と平均圧密圧力 $\bar{p}$ の関係は一般に図—1のような形になり、正規圧密領域では $\log m_v$ と $\log \bar{p}$ の関係が直線的となることが知られている。しかし、原地盤よりの試料採取のさいに地中における拘束圧力が解除されることによる影響が現われて、実際の圧密試験においては、正規圧密状態にある地盤の場合でも圧密圧力が有効土カブリ圧よりかなり大きくならなければ $\log m_v$ と $\log \bar{p}$ が直線関係にならない。筆者らの研究によれば、正規圧密した試料を多少膨張させて再圧密を行なった場合、圧密圧力が膨張前の圧力すなわち先行圧密圧力の2～3倍になってはじめて $\log \bar{p}$ と $\log m_v$ が直線関係となる²⁾。

正規圧密状態にあると判断される地盤においても、上に述べたような試料採取の影響は避けられないので、その場合には有効土カブリ圧が図—1のA'点に対応する値より小さくても、沈下量計算に用いる m_v 値は正規圧密領域の直線を延長した直線C'B'から求めるべきであろう。



図—1 体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係

* 工博 運輸省港湾技術研究所土質部長

** 運輸省港湾技術研究所研究員

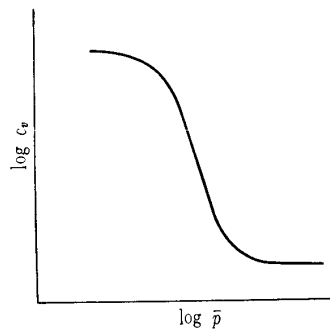


図-2 圧密係数と平均圧密圧力の関係

圧密沈下量と時間の関係を求めるためには圧密係数 c_v の値を用いる。 c_v の値は一般に図-2に描くような傾向を示し、正規圧密領域ではほぼ一定の値となる。この c_v の値も m_v の場合と同様に、 $\bar{p}$ が $p_y^{(3)}$ の2～3倍にならないと正規圧密状態に対応する一定値にならない²⁾。したがって正規圧密状態にあると判断される地盤においては、有効土カブリ圧がほぼ p_y に等しくとも、正規圧密領域において一定となった c_v 値を用いるべきであろう。

圧密係数 c_v の値は体積圧縮係数 m_v と比べて相対的にばらつきが大きく、ほぼ一様と考えられるような地盤においても代表値を決めにくいことが多い。図-3は層厚約15mの軟弱粘土層における圧密試験結果の例である。この地盤は物理試験の結果によればほぼ一様な地盤と考えられているものである。

図-4はある埋立地における原地盤の土層断面を示したものである。この地盤は上部、中間および下部の三つの粘土層から構成されており、上部および下部粘土層はほぼ一様な粘土層で、圧密試験による c_v の値のばらつきもそれほど大きくはない。しかし、中間粘土層は多数の砂レキの薄層を含んでおり、採取試料から圧密試験の供試体を取る位置によって c_v の値が大幅に変化するため、設計 c_v 値を決定することが困難であった。

地盤が正規圧密状態にあるか過圧密状態にあるかを判断

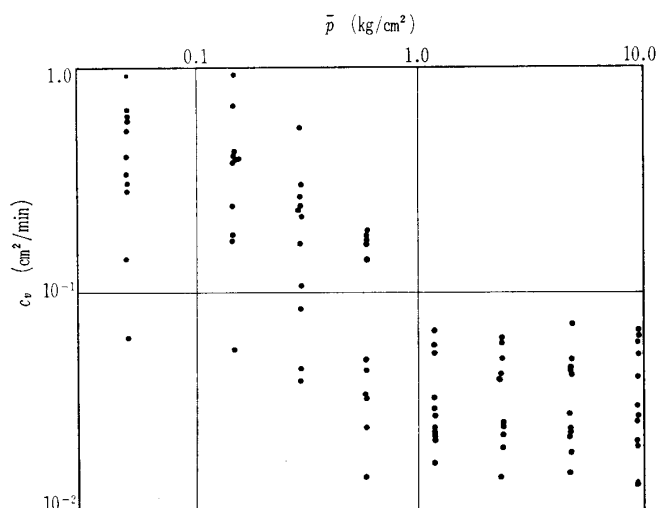


図-3 圧密係数と平均圧密圧力の関係の一例

± 0.0		$\gamma = 1.8 \text{ t/m}^3$ ($w_0 = 12\%$)
盛土	マサ土	$(e = 65\%)$ $G_s = 2.65$
-11.0		$\gamma' = 1.0 \text{ t/m}^3$
上部粘土	チュウ積粘土	$\gamma' = 0.55 \text{ t/m}^3$ ($w_0 \approx 75\%$) $H_0 = 13.0 \text{ m}$
-24.0		
中間土層	上部チュウ積層 洪積層 (砂レキ層に粘土をはさむ)	押しなべて $\gamma' = 0.85 \text{ t/m}^3$ $H_0 = 31 \text{ m}$ (うち、沈下の対象粘土) 5 m
-55.0		
下部粘土	洪積層	$\gamma' = 0.7 \text{ t/m}^3$ ($w_0 \approx 50\%$) $H_0 = 18 \text{ m}$
-78.0		

図-4 土層断面の一例

することも実際上の問題点の一つである。この判断は圧密降伏圧力 $p_y^{(3)}$ と有効土カブリ圧 p_v を比較して、 $p_v = p_y$ ならば正規圧密、 $p_y > p_v$ ならば過圧密とするわけであるが、圧密試験自体の精度、したがって p_y の値の信頼性を考えると、 p_y の深度分布が十分に求められる程度のデータが必要となる。またこの判断のためには圧密試験結果の他に、非排水せん断強度の深度分布も同等の重要性を持つ。非排水せん断強度 c_u の深度分布において地表面で $c_u > 0$ となれば、この深度分布を延長して $c_u = 0$ となる標高と地表面の間の土カブリ圧が $p_y - p_v$ の値を表わすことになる。この判断に対しては物理試験による分類特性は参考にならない。

3. 一次元圧密理論の問題点

粘土地盤の圧密沈下について理論値と実測値を比較した場合、全圧密沈下量に関しては理論値と実測値がほぼ一致するが、時間と沈下量の関係については実測結果が理論値より大幅に速く進行することが認められている⁴⁾。

この原因については現在のところ十分解明されているとはいえないが、これまで一般に用いられてきたテルツァーギの一次元圧密理論の問題点を再検討することが、実際の設計業務においても必要となってくるものと思われる。

テルツァーギの一次元圧密理論の問題点に関する研究は、この理論の基本的仮定の再検討という形で近年行なわれてきている⁵⁾。これらの研究によると、地盤の不均一性が圧密の進行速さを大幅に左右し、テルツァーギの理論では当然とされてきた地盤の均一性という仮定が大きな問題となることが示されている⁶⁾。

実際の地盤では、 c_v と m_v のいずれもが全層にわたって一定であるような均一な地盤は存在しないと思われる。物

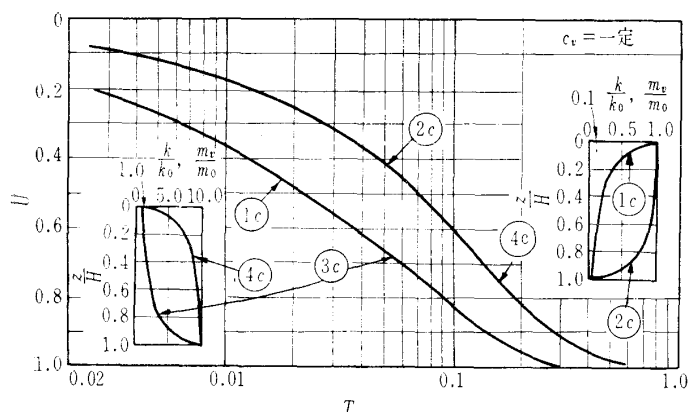


図-5 不均一地盤における圧密度と時間係数の関係の一例
(シフマン他, 1964)

理的性質が様な正規圧密状態の地盤においては、 c_v は一定と考えることができて、 m_v は有効土カブリ圧の増大によって深度とともに減少するのが普通である。

シフマン (Schiffman) らは c_v や m_v が変化している粘土層の圧密の解析を行ない、テルツァーギの理論と比較しており⁷⁾、山口らも同様に不均一地盤における圧密の解析を行なっている⁸⁾。地盤が不均一であれば、平均的な c_v と m_v の値を用いてテルツァーギの理論から計算した結果をこれらの厳密解と比較すべきである。

一例として、 c_v が一定で m_v が深度とともに変化する場合に、シフマンらの求めた圧密度 U と時間係数 T の関係を図-5に示す⁷⁾。この図に見られるように、 c_v が一定であり、 m_v と $\bar{p}$ の関係が一定であるような様な地盤においても、 m_v と $\bar{p}$ の関係の変化状況によって、時間と圧密沈下の関係が異なってくる。さらに c_v も深度とともに変化するような不均一地盤においては、その変化状況に対応する時間と圧密沈下の関係の相違は著しく、 c_v と m_v の平均値を用いた方法によるものとの相違は非常に大きいといえる。

実際の地盤においては、土の圧密特性が深度方向に不連続に変化する多層地盤も多い。この場合に、各層厚を c_v の

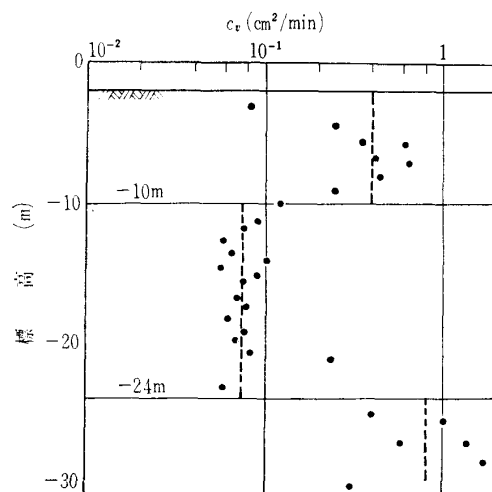


図-6 圧密係数の深度分布 (広島空港)

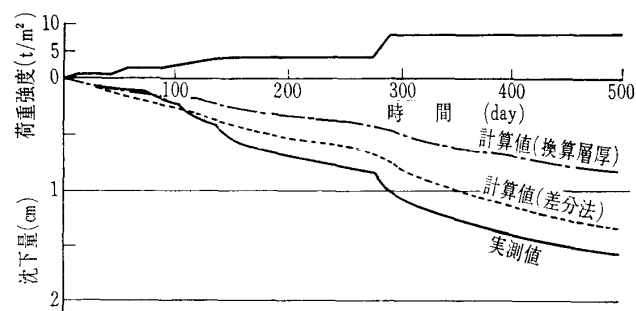


図-7 時間と圧密沈下の関係 (広島空港)

平方根に反比例させることによって、一定の c_v 値を有する単一層に変換して考える換算層厚法⁹⁾が、簡便法として一般に用いられている。このような場合に対しても、深度とともに連続して変化する不均一地盤の場合と同様に厳密解を求めることができる¹⁰⁾。

図-6に示すような c_v の深度分布を有する地盤上に埋立てを行なった場合について、換算層厚法および差分法による厳密解によって計算した時間と圧密沈下の関係を実測値と比較したものが図-7である¹¹⁾。このような地盤に対しては、換算層厚法による計算値は実測値より著しく遅れることが示されているが、差分法による計算値はかなり実測値に近くなっている。

換算層厚法は多層地盤を均一な単一層として考える訳であるが、この場合には各層の成層順序の影響が考慮されていない。すなわち、図-6のような地盤において、三つの層の順序が変わっても計算結果は同じである。しかし、前に述べたように、 c_v あるいは m_v の深度分布に対応して圧密の進行状況は大幅に変化するものであるから、各層の圧密特性の異なる多層地盤の場合には、厳密解による計算値の検討が必要となる。

実際に圧密の計算を行なう必要のある地盤としては均一なものほとんど存在せず、深度とともに圧密特性の変化する不均一地盤あるいは多層地盤が多いと思われる。したがって、テルツァーギの一次元圧密理論をそのまま適用しうる場合はきわめて少ないといえよう。これらの点を考慮せずに計算した理論値と実測値との単なる比較は、実際上意味を持たないとさえいえるであろう。

4. 圧密試験の問題点

現在のところ、テルツァーギ理論を修正した厳密な一次圧密理論を用いた場合でも、理論値と実測値、とりわけ時間と沈下量の関係が精度よく一致するとはいえない。この原因については研究中のものが多いが、そのうちのひとつとして、普通に行なわれる圧密試験の条件が実際の地盤での条件とかなり異なっている点が指摘される。

圧密試験の問題点とその適用と限界についてはすでに報告されているが¹²⁾、ここでは問題点の一つとして層厚の影響について考えてみたい。標準的な圧密試験においては厚

さ 2 cm の供試体を用いるが、実際の地盤で考える層厚と比べると非常に小さいことになる。

土質工学会セン断試験法委員会案による圧密試験法では、 c_v に対する層厚の影響を補正する方法が提案されている³⁾。この考え方によると、層厚が大きくなると一次圧密終了に要する時間が長くなり、したがってクリープによる沈下量が増大し m_v が大きくなる。透水係数 k は層厚によって変化しないので、 $c_v = k/m_v \cdot \gamma_w$ の関係から、層厚が大きくなると m_v が大きくなり、 c_v が小さくなることになる。

しかし、供試体の形状比を一定にして層厚を変化させた圧密試験の結果によれば、層厚の増大に伴って c_v 値が小さくなるとはいえないようである¹³⁾。

ベレ (Berre) らは、側面摩擦を軽減する工夫をした特殊な圧密試験装置を用いて、圧密試験における供試体の厚さの影響を調べている¹⁴⁾。この場合の試験結果の例を図—8 に示す。図に示すように供試体の圧縮ヒズミの他に、供試体底部における間ゲキ水圧の測定を行っており、テルツァーギの理論値を求めるための c_v 値は、底面の間ゲキ水圧の消散から決めている。この c_v 値と圧縮ヒズミのデータから $\sqrt{t}$ 法で求めた c_v 値、ならびに供試体の初期厚さを表—1 に示す。

図—8 および表—1 からわかるように、供試体厚さが小さい場合には、間ゲキ水圧の消散から決めた c_v と圧縮ヒズミから決めた c_v の値には大きな差がある。このことは層厚の小さな供試体における圧密はテルツァーギの理論とかなり異なったものであり、標準圧密試験の結果を層厚の大きな

実際の地盤にそのまま適用するには問題があることを示している。

これまでに行なわれた圧密の理論値と実測値の比較によれば、標準圧密試験で求めた c_v 値を数倍～数 10 倍しないといふ実際の圧密進行速さが説明できない場合が多いようである^{4), 15)}。

現在行なわれている標準圧密試験の供試体寸法およびフィッティングの方法を考えると、ある程度以上の大きさの c_v 値を求めることは困難なように思われる。 c_v 値の大きな土に対しては、フィッティングに用いるべき圧縮量の初期のデータが見過される可能性があるからである。そのような土に対しては、間ゲキ水圧を測定したり、供試体厚さを大きくするなどの対策が必要となってくるであろう。

しかし、層厚の影響をはじめとする圧密試験と実際の地盤の圧密の関係については、今後の研究に期待する部分が大きい。

5. 多次元問題

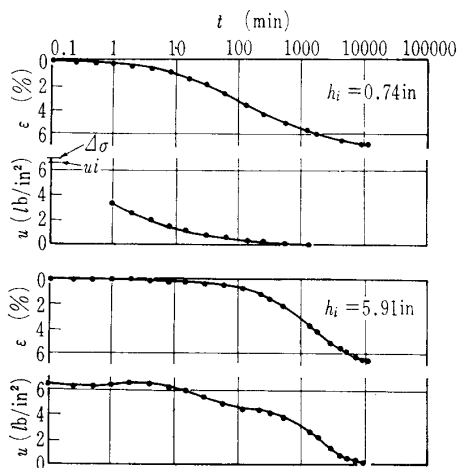
一次元圧密の条件は、粘土層厚に比して広大な区域に載荷が行なわれる場合に成立するもので、実際の問題でそれが成立していると思われるものはむしろ少ないと思われる。多次元問題として考えるべき条件の場合、実際には荷重の分散のみを考えて一次元圧密の理論をそのまま用いることが多いようである。

三次元圧密理論にはビオ (Biot) の系列とテルツァーギ・レンデュリック (Rendulic) の系列の二つがある。テルツァーギ・レンデュリックのものは一次元圧密の方程式を三次元の場合に拡張したものであり、ビオのものは三次元弾性論を用いたより基本的なものとされている。三次元圧密を扱う場合には、テルツァーギ・レンデュリックのものは不十分で、ビオの式によらなければならないことが認識されている¹⁶⁾。

ビオの系列の圧密の基本式は複雑であるため、解析解は限られた簡単な境界条件の場合しか得られていないが、最近の有限要素法 (FEM) の進歩により、広い条件に対して三次元圧密の解が得られるようになった¹⁷⁾。ビオの系列の式は解くことが困難であり、解析解を得る場合にも各種の仮定の相違により結果が異なることが報告されている¹⁸⁾。

デービス (Davis) らはテルツァーギ・レンデュリック式の簡単さに着目し、計算結果の比較から、ビオの式との誤差が実用上無視できることを示している¹⁹⁾。彼等は円形基礎および連続基礎による圧密における時間と圧密度の関係を種々の排水条件に対して求めている。図—9 は両面排水の場合の円形基礎の場合の例である。この図に示されるように、層厚と載荷半径の比が大きくなると、一次元圧密理論による値は誤差が大きくなる。

三次元圧密理論を適用する場合はその定数値を求めることが問題となる。この理論では弾性率 E 、ポアソン比 ν 、



図—8 供試体厚さを変えた圧密試験結果例 (ベレ他, 1972)

表—1 間ゲキ水圧ならびに圧縮ヒズミから決めた c_v 値 (ベレ他, 1972)

供試体の初期厚 (cm)	間ゲキ水圧による c_v (cm ² /min)	圧縮ヒズミによる c_v (cm ² /min)
1.9	1.097	0.018
7.6	0.142	0.026
15.0	0.071	0.045
45.0	0.061	0.060

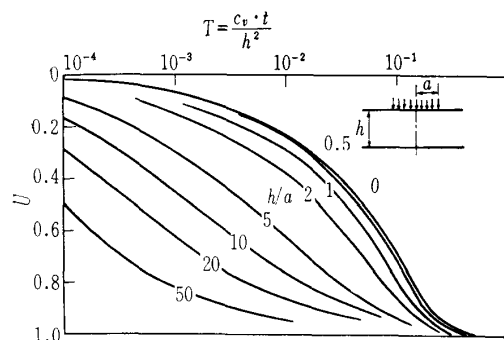


図-9 円形基礎の下における圧密の解 (デービス他, 1972)

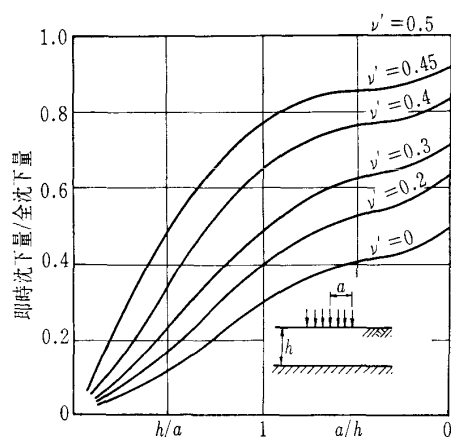


図-10 全沈下量に占める即時沈下量の割合(円形基礎)(デービス他)

透水係数 k が一定であるとしているが、それらの値は圧密中に変化するものである。デービスらは三軸圧縮試験によってそれらの値を調べた結果を報告している¹⁹⁾。この場合、 $t=0$ において即時沈下が生じ、その後圧密沈下が生じるとしている。この結果の一例として、三次元圧密の場合の即時沈下量が全沈下量に占める割合を円形基礎の場合について示したものが図-10である²⁰⁾。この図に見られるように、ポアソン比が 0.5 に近づくに従って、また荷重幅が層厚に比して小さくなるに従って、即時沈下の占める割合が大きくなる。デービスらの測定においては $\nu=0.45$ の値も報告されており、荷重幅がかなり大きい場合でも即時沈下の量が多いことが予想される。

実際の場合には載荷がかなり長時間にわたって行なわれることもあって、即時沈下と圧密沈下を分離して測定できず、この理論の照査が困難であるが、今後は側方変位や間ゲキ水圧の精密な測定を行なって理論の検証を行なうべきであろう。

これまで一般に一次元圧密の速さが理論に比べて非常に大きいという経験は、実際には三次元圧密であり、即時沈下あるいは三次元圧密の速さを考えなければならぬ場合があったのではないと思われる。

多次元圧密に関しては理論がかなり整備されてきている

が、それらに適用すべき定数に関する研究が遅れているといえよう。

6. あとがき

粘土地盤の圧密現象を精度よく予測するためには、解明すべき問題が多い。定量的に把握しにくい試料採取と圧密試験精度の問題、および実際の現象の観測を長期間継続しなければならないという困難さは当分の間消えないと思われるが、事態改善のためには研究成果と実務の間をより密接にすることが必要であろう。

参考文献

- 1) 福岡 保・加納伸郎：圧密沈下計算式の適用方法，土と基礎，Vol. 19, No. 4, 1971
- 2) 中瀬明男・小林正樹・兼近明男：過圧密粘土の圧密特性，港湾技術研究所報告，Vol. 12, No. 1, 1973
- 3) 土質工学会セン断試験法委員会：圧密試験，土質試験法—第1回改訂版—，1969
- 4) 土質工学会誌，土と基礎，一軟弱地盤小特集号— Vol. 20, No. 8, 1972
- 5) 網干寿夫：土の圧密・圧縮に関する諸問題，土と基礎，Vol. 21, No. 10, 1973
- 6) 網干寿夫：圧密，土質力学，技報堂，1969
- 7) R.L. Schiffman and R.E. Gibson: Consolidation of non-homogeneous clay layers, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM5, 1964
- 8) H. Yamaguchi and J. Kimura: On the rigorous solutions in one-dimensional consolidation of non-homogeneous clay layers, Soil and Foundation, Vol. 7, No. 1, 1967
- 9) L.A. Palmer and P.P. Brown: Settlement analysis for areas of continuing subsidence, Proc. 4th ICSMFE, Vol. 1, 1957
- 10) M.B. Abbott: One-dimensional consolidation of multi-layered soils, Geotechnique, Vol. 10, No. 4, 1960
- 11) 中瀬明男・小林正樹：圧密による軟弱地盤の改良効果，土と基礎，Vol. 20, No. 8, 1972
- 12) 網干寿夫：圧密試験結果の適用と限界，土と基礎，Vol. 21, No. 4, 1973
- 13) 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会講演集，1972
- 41) T. Berre and K. Iversen: Oedometer tests with different specimen heights on a clay exhibiting large secondary compression, Geotechnique, Vol. 22, No. 1, 1972
- 15) 持永龍一郎：圧密試験，土質調査試験結果の解釈と適用，土質基礎工学ライブラリー，1968
- 16) 吉国 洋：三次元圧密の基礎理論，土木学会論文報告集，No. 201, 1972
- 17) R.S. Sandhu: Finite element analysis of consolidation and creep, Applications of the FEM in Geotechnical Engineering, 1972
- 18) 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，No. 204, 1972
- 19) E.H. Davis and H.C. Poulos: Rate of settlement under two- and three-dimensional conditions, Geotechnique, Vol. 22, No. 1, 1972
- 20) I.K. Lee et al: Flow of water in saturated soil and rockfill, Soil Mechanics, Selected Topics, Butterworths, 1968

(原稿受理 1973.9.13)