

一次圧密中の二次圧密を考慮した一次元圧密解析

五十嵐大地^{*1}・白子博明^{*2}・杉山太宏^{*3}・赤石勝^{*4}

One-dimensional consolidation analysis taking account of secondary compression during primary consolidation

by

Taichi IGARASHI^{*1}, Hiroaki SHIRAKO^{*2}, Motohiro SUGIYAMA^{*3} and Masaru AKAISHI^{*4}

(Received on Mar. 31, 2004, accepted on May 26, 2004)

Abstract

A practical one-dimensional consolidation analysis technique for predicting the consolidation time curve and the excess pore water pressure dissipation of clays exhibiting secondary compression is described. The constitutive soil model is based on the equation governing the secondary compression rate of decrease in void ratio. This model uses four parameters, namely, C_c^* , C_α , c_v^* and \dot{e}_0 , that can be easily determined from the conventional standard oedometer test to check the validity of the proposed soil model, the consolidation time curves observed in oedometer specimens are compared with those obtained by the analysis. Satisfactory agreement is obtained between the computed behavior and oedometer observations.

Keywords: One-dimensional consolidation, Secondary compression, Clay, Finite difference method

1. 結 言

段階載荷による一次元圧密試験を実施すると、多くの粘性土に時間の対数に比例する二次圧密が観察される。一日間隔で載荷する圧密試験では、二次圧密の継続中に次の段階の荷重が載荷される。載荷前に発生している二次圧密と、載荷後に発生する二次圧密の相互関係は明らかにされていない。例えば、Imaiは分割型圧密試験の結果から有効応力 σ' 一定の $e-\log t$ 曲線の勾配を調べ、クリープ圧縮成分(二次圧密)は一次圧密過程にも存在することを示している¹⁾。しかし、一次圧密中の二次圧密を直接分離して測定できないので、実験によりこの挙動を明確にすることはできない。

仮に、一次圧密が圧密時間10分前後で終了するとした場合、それ以降、次の載荷を行う1440分まで二次圧密が観測される。載荷直前と載荷後1440分の二次圧密速度がほぼ等しいとすれば、一次圧密の終了直後の二次圧密速度はそれらより2桁近く大きく、載荷前に発生している二次圧密は一次圧密の終了頃まで増加していることになる。

一次圧密終了後の過剰間隙水圧はほぼゼロに近く、鉛直応力一定条件下で発生する二次圧密が測定される。有効応力が増加しつつある一次圧密中に発生する二次圧密を、圧密時間と有効応力増分の関数で表現する構成式が提案されている²⁾⁻⁵⁾。しかし、二次圧密を圧密時間の対数として表現する構成式は、圧密時間の原点(origin for time)を定義し得ないため不適切とされており、間隙比速度に着目した二次圧密を含む一次元圧密の構成式が提案されている⁶⁾⁻⁹⁾。鉛直有効応力、間隙比、間隙比速度

の関係に着目した構成式では、一次圧密中の二次圧密を分離して扱わないため、一次圧密中の二次圧密挙動は規定されない。また、一次元圧密方程式自身も間隙比速度を与えるため、構成式で規定する間隙比速度との関連を合理的に説明できない問題点が存在する¹⁰⁾。一次圧密中に発生していると推測される二次圧密を明確に規定することは困難であるが、規定せずに二次圧密量を含む全圧密量を正確に予測できるか明らかでない。一次圧密中に発揮される二次圧密挙動を明確に仮定した構成式の方が、より正確な一次元圧密量ならびに圧密速度の予測法確立に発展すると考えられる。

また、軟弱地盤の一次元圧密解析には、圧密試験結果が広く用いられている。圧密試験結果に基づく現場の圧密量予測は、実用的に大きな不具合はないと考えられている。したがって、現時点では圧密試験における二次圧密を含む一次元圧密挙動を適切に表現し、解析に必要とされる土質定数をより簡単に決定できる構成式が実用的に望ましいと考える。

この報告で著者らは、一次圧密中に発揮される二次圧密による間隙比速度 \dot{e}_s を仮定した一次元圧密解析法を提案する。 \dot{e}_s に関する仮定の妥当性を実験によって検証できないため、圧密試験において測定される圧密量-時間曲線とその再現計算結果の比較から一次圧密中に発生する二次圧密について検討する。

2. 一次元圧密方程式と二次圧密モデル

一次元圧密方程式(1)は、連続条件式とダルシー則から誘導される。

$$\frac{\partial e}{\partial t} (= \dot{e}_p + \dot{e}_s) = (1 + e_0) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{\gamma_w} \cdot \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

*1 工学研究科土木工学専攻博士課程前期

*2 (株)建設企画コンサルタント

*3 工学部土木工学科助教

*4 工学部土木工学科教授

Fig.1 に実線 ($\alpha=1$) で示すような形状の圧密量-時間曲線が、圧密試験でほとんど観察されない。したがって、一次圧密中から新たな圧密荷重による二次圧密が発生していると推測される。

排水面 ($y/H=0$) における間隙比 e の経時変化を Fig.2 に示した。排水面 ($y/H=0$) では載荷直後に一次圧密が終了するため、Fig.2 は二次圧密量のみを経時変化を示しており、この報告の二次圧密モデルの特徴を示すものである。式(4)から明らかなように圧密開始当初、二次圧密量 $\chi=0$ における二次圧密速度 \dot{e}_s は \dot{e}_0 と等しいが、 χ がある一定値 (C_α) を越える頃から時間の対数に比例する \dot{e}_s が計算される。また、Fig.1 の平均圧密量と Fig.2 の $y/H=0$ における圧密量の大きさは、二次圧密領域でほぼ等しくなる。図には示していないが、著者らの提案する二次圧密モデルでは、二次圧密領域において圧密層内各点の圧密量の大きさもすべて等しくなることをその他の計算結果から確認している。

3. 室内試験の再現計算による提案モデルの検討

前章では、提案モデルに必要な土質定数を仮定し、一次圧密中の二次圧密量を規定する二次圧密速度 \dot{e}_0 (係数 α) の影響を検討して提案モデルの特徴を示した。本章では、不攪乱粘土の段階載荷による圧密試験結果に提案モデルを適用した。圧密量-時間曲線の実測値を再現するための係数 α を試行錯誤で決定して、一次圧密中の二次圧密挙動について検討するとともに、提案モデルの問題点についても言及した。

3.1 試料及び実験方法

茨城県日立神田地区、常磐自動車道に隣接する地点からシンウオールサンプリングによって乱されない粘土試料を採取した。粘土層は、深さ 8~23m 間に位置し黒褐色の比較的均質な粘土であり、自然含水比 82~121%、土粒子の密度 2.62~2.69 g/cm³、湿潤密度 1.45~1.55g/cm³、液性限界 96~121%、塑性限界 44~54%である。粘土層上中下部から採取した試料に対し、一日間隔載荷の一般的な圧密試験を実施した。また、粘土層上部から採取した試料に対し、供試体底部で過剰間隙水圧を測定する一次元圧密試験を実施した。供試体の最大排水距離は 1cm で、圧密試験中 98.1kPa のバックプレッシャーを作用させた。

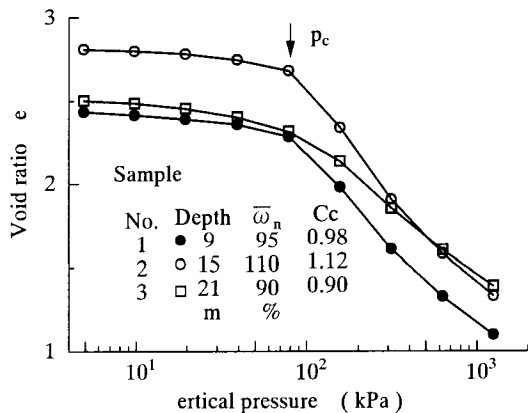


Fig.3 $e \sim \log p$ relations

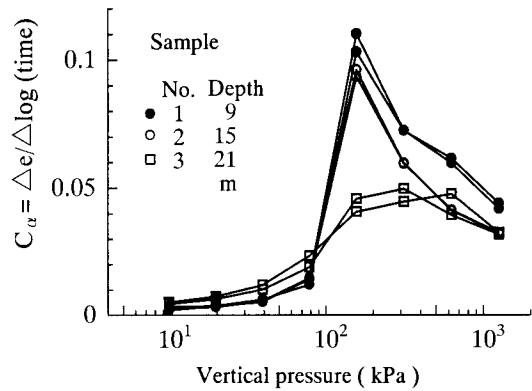


Fig.4 $C_\alpha - \bar{p}$ relations

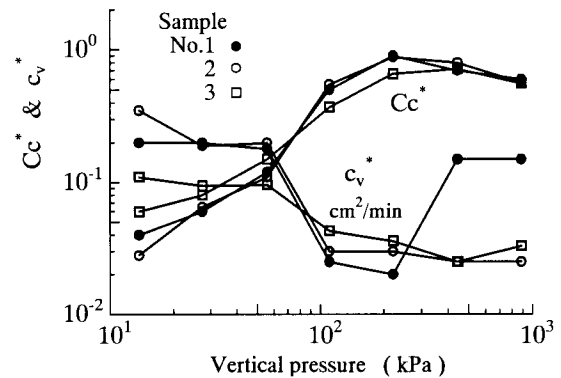


Fig.5 $C_c^* \& c_v^* - \bar{p}$ relations

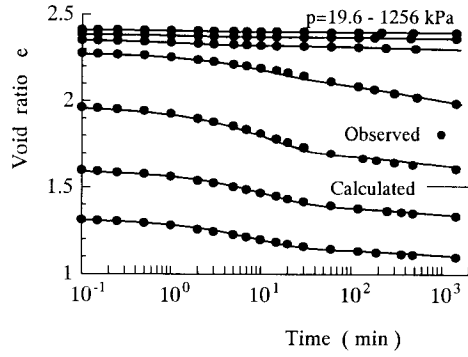
3.2 計算に必要な土質定数

3つの深度から採取した試料の $e \sim \log p$ 曲線を Fig.3 に示した。採取深度は最大で 12m 異なるが、3試料の圧密降伏応力 p_c は、ほぼ 80kPa 付近である。この3試料の圧密試験から一次元圧密解析に必要な土質定数を決定し、圧密試験の再現計算を行う。

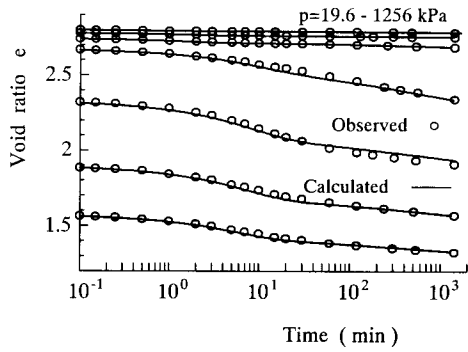
圧密試験における圧密量の経時変化には、二次圧密が含まれている。二次圧密の影響を含まない土質定数を決定することは困難であるが、次の手順で土質定数を求めた。

- 1) 正規圧密領域、過圧密領域によらず圧密時間 120 分以降の間隙比の経時変化は時間の対数に比例していた。120 分以降の圧密量の経時変化から二次圧密係数 C_α を求め、Fig.4 に示した。試料番号 1 と 2 の正規圧密領域における C_α は、鉛直平均応力 \bar{p} によって大きく変化する。計算には、載荷段階毎に大きく異なる \dot{e}_{24} を用いた。 \dot{e}_0 は、実験から決定できないので、式(10)に示すように \dot{e}_{24} の α 倍と仮定した。一次元圧密の再現計算を実施し、二次圧密領域における圧密量-時間曲線の計算結果と実測値との適合度から \dot{e}_0 の採用値を判定した。
- 2) 曲線定規法を用いて圧密係数 c_v^* と圧縮指数 C_c^* を決定した。これらの定数値は、一次圧密中に発生している二次圧密の影響を受ける。影響を小さくするため、圧密度 50% 以前の定規の適合度を重視した。鉛直平均応力 \bar{p} と c_v^* 、 C_c^* の関係を Fig.5 に示した。なお、Fig.3 の $e \sim \log p$ 曲線から求める一般的な圧縮指数 C_c に対し、二次圧密の影響を極力排除した Fig.5 の C_c^* の比 C_c^*/C_c は 0.5~0.6 の範囲となる。

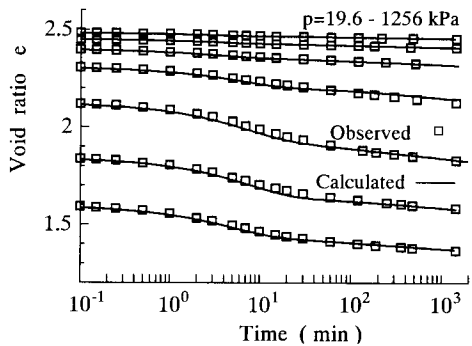
提案する \dot{e}_s モデルは、 \dot{e}_0 の値を合理的に決定できない点が最大の問題点である。しかし、一次圧密中の二次圧密は分離測定できない。一次圧密中の二次圧密挙動を明らかにできない現状



(a) Sample No.1, Depth 9m



(b) Sample No.2, Depth 15m



(c) Sample No.3, Depth 20m

Fig.6 Void ratio vs. time curves

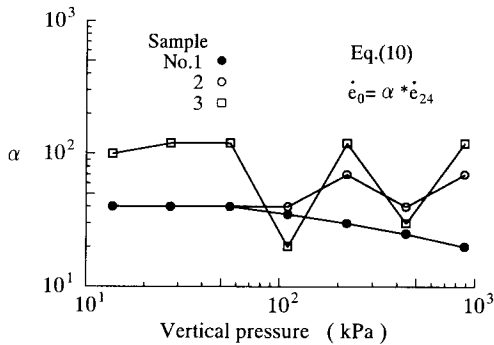


Fig.7 $\alpha - \bar{p}$ relations

では実測値に適合する計算結果を得るため \dot{e}_0 を仮定し、得られた計算結果から一次圧密中の二次圧密挙動を推測することは有用と考えられる。また、土質定数を求めた圧密試験の圧密挙動を再現できることが、提案モデルの最低限必要な条件であろう。

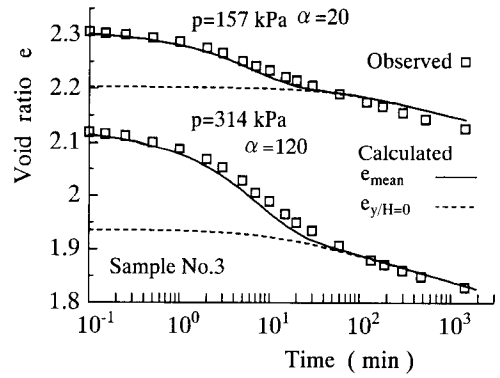


Fig.8 Void ratio vs. time curves (Sample No.3)

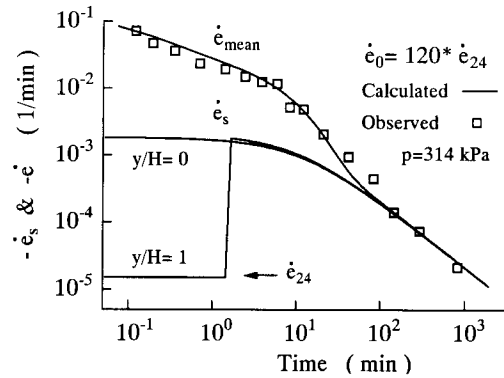


Fig.9 Void ratio rate vs. time curves (Sample No.3)

3.3 圧密量と圧密速度の経時変化

計算結果と実測値が一致するように、試行錯誤によって \dot{e}_0 を決定した提案モデルによる一次元圧密解析結果と実測値を示したのが Fig.6(a), (b), (c)で、 \dot{e}_0 に関する式(10)の係数 α と鉛直平均応力 \bar{p} の関係が Fig.7 である。係数 α の値が大きい、すなわち \dot{e}_0 の値が大きいものほど二次圧密が大きく、発生開始時間が早いことは Fig.2 に示した通りである。3 試料の α 値は 20~120 の範囲にあり、一次圧密末期から二次圧密挙動が顕著になることがわかる。また、正規圧密領域と過圧密領域における α 値の差を Fig.7 からは見出せない。これらの計算結果から判断すると、提案モデルは粘土が正規圧密、過圧密によらず適用できそうである。

\bar{p} の変化に伴い、 α 値が正規圧密領域でかなり変動している試料 No.3 の計算結果から、一次圧密中の二次圧密挙動を示したのが Fig.8 と Fig.9 である。Fig.8 は Fig.6(c) の正規圧密領域における 2 つの荷重段階の圧密量-時間曲線で、実線は平均圧密量、破線は排水面 $y/H=0$ における圧密量を示す。平均圧密量と $y/H=0$ における圧密量の大きさが等しくなる圧密時間は 50 分頃であり、 α 値の影響は小さい。圧密時間 50 分以降で実線と破線で示した圧密量の大きさは等しくなり、時間の対数に比例している。したがって、二次圧密が顕著になるのは一次圧密末期とすることができる。

Fig.9 は、Fig.8 に示した $p=314\text{kPa}$ の測定値から求めた間隙比速度の経時変化と計算結果である。二次圧密による間隙比速度 \dot{e}_s の計算結果も図中に示した。排水面 $y/H=0$ における \dot{e}_s の変化は圧密時間 4 分頃から顕著になるのに対し、非排水面 $y/H=1$ の \dot{e}_s は圧密が始まるまで荷重前の \dot{e}_{24} に等しい。圧密開始 2 分後頃から式(4)による \dot{e}_s が計算されるが、 $y/H=0$ におけるそれと大

きな差はなく、圧密時間 100 分以降の間隙比速度は圧密層内の位置によらず等しくなっている。

以上の提案モデルによる再現計算から、試験した粘土試料の一次圧密中に発生する二次圧密速度 \dot{e}_s は、載荷前の \dot{e}_{24} より 2 桁程度大きくなり、二次圧密は一次圧密末期から顕著になると考えられる。

3.4 提案モデルの問題点

提案モデルには土質定数 c_v^* 、 C_c^* 、 C_α と \dot{e}_0 が必要である。圧密試験の圧密量-時間曲線から c_v^* 、 C_c^* 、 C_α の 3 つの定数は求めているが、 c_v^* と C_c^* 値には二次圧密の影響が含まれており、二次圧密の影響を受けない定数を圧密試験結果から決定することは困難である。また、 \dot{e}_0 は、平均圧密量-時間曲線の再現性から試行錯誤法で決定している。

c_v^* 値を \sqrt{t} 法で決定すれば、異なる C_c^* ならびに \dot{e}_0 値が得られる。曲線定規法の圧密度 50% 以前の定規の適合度から定数を決定した場合と比較し、 \sqrt{t} 法で決定した定数値の方が、二次圧密の影響が大きく、小さな c_v^* 値と大きな C_c^* 値が得られる事となる。

そこで、両方法から決定した定数値を用いて計算した圧密量-時間曲線と実測値を比較した結果を Fig.10 に実線と破線で示した。計算に用いた定数値を Table.2 に示した。体積ひずみ-時間曲線に適合するように \dot{e}_0 値あるいは α 値を設定すると、 c_v^* ならびに C_c^* 値が違っていても実測値に極めて類似した平均圧密量-時間曲線が計算できる。提案法で決定した c_v^* ならびに C_c^* 値の妥当性が失われる。そこで提案法による二次圧密の影響が小さい定数値を採用した間隙水圧の計算結果の方が、より実測値に近いことを示す。

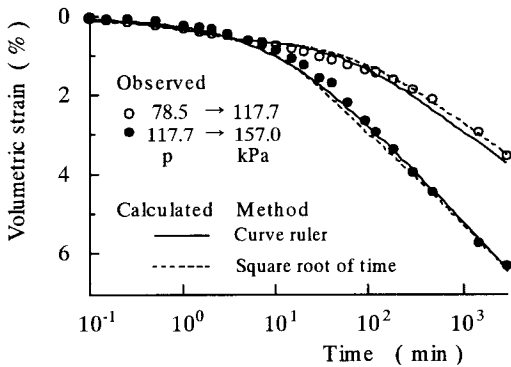


Fig.10 Volumetric strain ~ time curves Sample1

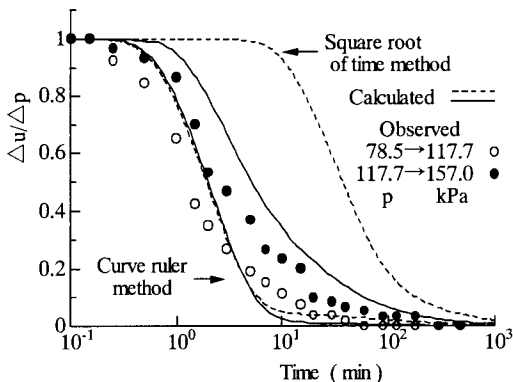


Fig.11 Excess pore pressure ratio ~ time curves Sample1

Table2 Soil constants

P (kPa)	Curve ruler			Square root of time			C_α
	c_v^*	C_c^*	α	c_v^*	C_c^*	α	
78.5-117.7	0.24	0.11	25	0.19	0.12	18	0.062
117.7-157.0	0.12	0.15	100	0.012	0.55	25	0.08

$c_v^* : cm^2/min$

供試体底部で測定した過剰間隙水圧の経時変化と計算結果を比較したのが Fig.11 である。圧密量-時間曲線の測定値への適合度を重視して土質定数を決定しているため、過剰間隙水圧の測定値と計算結果には、かなりの差が認められる。

曲線定規法で決定した定数を用いた図中実線で示す計算結果の方が、 \sqrt{t} 法で求めた定数による計算結果より間隙水圧の測定値に近い。圧密量-時間曲線の測定値への適合度だけでは、二次圧密の影響を受けない c_v^* ならびに C_c^* 値の決定が困難なことを意味するものと考えられる。したがって、今後二次圧密の影響のより小さな土質定数を決定できれば、圧密量-時間曲線だけでなく一次元圧密中の過剰間隙水圧挙動もより正確に計算できる可能性がある。

4. 結 言

二次圧密による間隙比速度を仮定し、一次圧密中から発生する二次圧密を考慮した一次元圧密解析法を提案した。提案モデルによる一次元圧密解析結果から以下の結果が得られた。

- 1) 圧密開始時の二次圧密速度 \dot{e}_0 を大きく設定すると、圧密開始直後から時間の対数に比例する二次圧密が計算できる。を小さく設定すると、一次圧密中に発生する二次圧密が小さくなり、二次圧密が顕著になる圧密時間が遅くなる。
- 2) $\dot{e}_0 = \dot{e}_{24}$ に設定すると、新たな圧密荷重増分による二次圧密は発生せず、載荷前の二次圧密のみ一次圧密中に発生する。圧密試験の圧密時間 24 時間以内に発生する二次圧密は極めて小さく、一次圧密が終了してかなりの圧密時間経過後、二次圧密が顕著になる特異な形状の圧密量-時間曲線が計算される。
- 一次元圧密試験で測定された圧密量-時間曲線と提案する二次圧密モデルを用いた圧密試験の再現計算結果の比較から得られた結果は、以下のとおりである。
- 3) 圧密試験で測定された圧密量-時間曲線から決定した土質定数を用いて、実測値に適合する圧密量-時間曲線が計算可能である。
- 4) 今回試験した粘土の一次圧密中に発生する二次圧密は、一次圧密末期から顕著になる。一次圧密中の二次圧密速度は、載荷前のそれよりも 2 桁程度大きく、新たな圧密荷重による二次圧密は、一次圧密中から発生している。
- 5) 二次圧密の影響の小さな土質定数を用いた提案法により、圧密試験の実測値に近い圧密量と過剰間隙水圧の経時変化が計算可能である。

提案モデルには、一次圧密量で定義する定数が必要であり、この決定法については更に検討が必要である。また、特に計算結果に大きく影響する圧密開始後の二次圧密速度 \dot{e}_0 (係数 α) については、特性の異なる粘性土によりその値を調べて、土質定数的な扱いができるかどうかの確認を行う予定である。

参考文献

- 1) Imai, G: Analytical examinations of the foundations to formulate consolidation phenomena with inherent time-dependence, IS-Hiroshima'95, Keynote Lecture 2, pp.75-120, 1995.
- 2) Mesri, G and Rokhsar, A. : Theory of consolidation for clays, Proc. of ASCE, Vol.100, No.GT8, pp.889-904, 1974.
- 3) Murakami, Y. : A method for estimating the consolidation of normally consolidated clay of some age, Soils and Foundations, Vol.20, No.4, pp.59-69, 1980.
- 4) Yoshikuni, H. et.al. : Elasto-viscous modeling of time- dependent behavior of clay, Proc.ICSMFE X III , New Delhi, India, pp.417-420, 1994.
- 5) 稲田増穂, 赤石勝 : ダイレイタンシーを考慮した一次元圧密解析, 土質工学会論文報告集, Vol.20, No.2, pp.119-127, 1980.
- 6) Nash, D. : Modeling the effects of surcharge to reduce long term settlement of reclamations over soft clays, -a numerical case study-, Soils and Foundations, Vol.41, No.5, pp.1-13, 2001.
- 7) Leroueil, S. et al : Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique, Vol.35, No.2, pp.159-180, 1985.
- 8) Imai, G. and Tang, Y. : A constitutive equation of one-dimensional consolidation derived from inter-connected tests, Soils and Foundations, Vol.32, No.2, pp.83-96, 1992.
- 9) 森脇武夫 : 弾粘性圧密理論を用いた圧密沈下予測, 圧密沈下予測の新しい考え方と手法講習会講演資料, (社)地盤工学会, pp.59-78, 2003.
- 10) Hawley, J.G. and Borin, D.L. : A unified theory for consolidation of clays, Proc.8th ICSMFE, Vol.1, pp.107-119, 1981.
- 11) Sekiguchi, H. and Torihara, M. : Theory of one-dimensional consolidation of clays with consideration of their rheological properties, Soils and Foundations, Vol.16, No.1, pp.27-44, 1976.