

二次圧密モデルに関する一考察

吉富 隆弘^{*1} 赤石 勝^{*2} 杉山 太宏^{*3}

A Model for Evaluating Secondary Consolidation

by

Takahiro YOSHIDOMI^{*1}, Masaru AKAISHI^{*2} and Motohiro SUGIYAMA^{*3}

(Received on April 3, 2018 and accepted on May 10, 2018)

Abstract

In actual designs, long-term settlement which is thought to be caused by secondary consolidation, is rarely considered. However, there are many cases where countermeasures against differential settlement are necessary due to long-term subsidence of soft ground. In this paper, laboratory test results and long-term subsidence behavior of actual ground are examined by existing three kind of secondary consolidation models.

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

1. 緒 言

軟弱地盤上の盛土によって発生する長期沈下と二次圧密の関係が、古くより検討されている。室内圧密試験で観察される二次圧密挙動は、層厚の大きな実地盤では長期間にわたる一次圧密中に包含されて、実験室のように分離しては表れないと考えられてきた^{1),2)}。実務では、二次圧密に起因すると考えられる長期沈下を考慮することは少ない。しかし、軟弱地盤の長期沈下で不等沈下対策が必要とされる場合もある³⁾。

室内圧密試験で観察される二次圧密挙動は、片対数紙上で直線関係になることが多いが、軟弱地盤上の盛土による長期沈下の観測事例では、沈下速度が減少し最終沈下量に収束する場合もある³⁾。室内圧密試験でも二次圧密係数が圧密時間とともに減少する実験結果が報告されている^{4,5)}。

常磐自動車道神田地区のサンドドレーン施工区域の長期沈下挙動は、圧密沈下が促進され、施工後1000日前後から二次圧密領域に入っていると考えられる³⁾。二次圧密係数は時間とともに減少し、近い将来最終沈下量に収束する可能性がある。このような長期沈下挙動をある程度の精度で事前に予測できれば、不等沈下対策上有用である。この報告は、既往の二次圧密モデル⁶⁾を用いて得られた計算結果と、既往の室内試験ならびに実地盤での計測データを比較することで、モデルの適応性について検証したものである。

2. 二次圧密に関する既往の研究

二次圧密に関する既往の研究において、例えば、Suklje, Murakami, Mesri and Choi, Yin and Graham, Nashらは、二次圧密速度を時間の関数として表す式(1)を採用している。式(1)では、二次圧密は時間の対数に比例して収束することなく無限に継続する。また、式(1)を積分して二次圧密量を求める最大の問題点は、二次圧密の発生開始時間を仮定することである⁷⁻¹¹⁾。Sukljeの提案する図解法(Isotaches method)では、圧密量-時間曲線の形状から一次圧密終了時間を求め、二次圧密は一次圧密終了後に発生すると仮定される。しかし、Sukljeの研究以前からTaylorは一次圧密中に発生する二次圧密を無視できないと考えていた¹²⁾。一次元圧密試験では、一次圧密量と二次圧密量を分離測定できないので、一次圧密中に発生する二次圧密挙動は明確にできない。したがって、一次圧密中の二次圧密挙動の評価は推測の域を出ない。

式(2)で表す二次圧密速度は、ある時間までに発生した二次圧密量に影響され、式(1)と異なり時間の関数ではない。一次・二次圧密量を仮定することで、一次圧密中に発生する二次圧密の初期速度が決定できる^{6,13)}。しかし、式(2)で表す二次圧密挙動は直線性を示し、式(1)とほぼ同じ結果を与える。

$$\dot{v}_s = \alpha / t \quad (1)$$

$$\dot{v}_s = \dot{v}_i \cdot \exp(-v_s / \alpha) \quad (2)$$

ここに、 v_s は二次圧密量、 \dot{v}_s は二次圧密速度で上付きの“・”は速度、下付き添え字 s は二次圧密を意味する。 α は体積ひずみで定義された二次圧密係数、 t は時間、 \dot{v}_i は二次圧密の初期速度である。

*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

*2 東海大学名誉教授

*3 工学部土木工学科教授

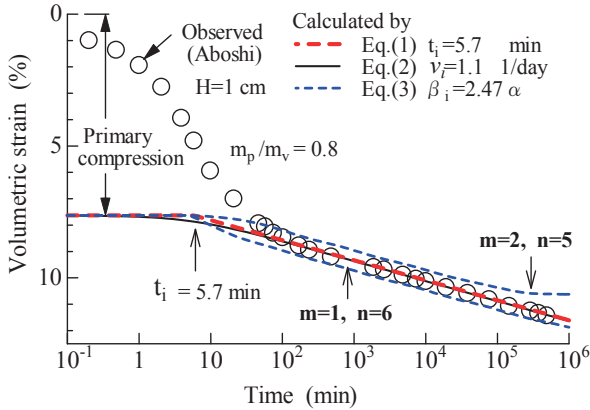


Fig. 1 Consolidation time curves observed by Aboshi²⁰⁾ and its calculation results ($H=1$ cm).

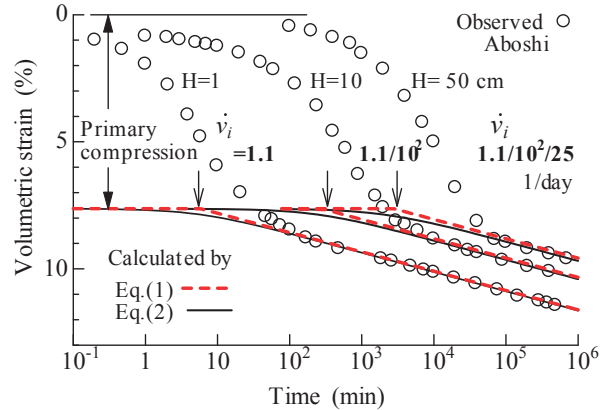


Fig. 2 Consolidation time curves observed by Aboshi²⁰⁾ and its calculation results ($H=1\sim 50$ cm).

この論文では、赤井・佐野⁴⁾やTanaka⁵⁾の研究成果ならびに現場における観測結果のように、片対数紙上にプロットされた圧密量時間関係に直線性が認められず、二次圧密係数が次第に減少する式(1)、式(2)では再現不可能な二次圧密挙動を式(3)で表現し、その適用性を検討する¹⁴⁾。式(3)では、定数 n の設定により長期間にわたる二次圧密がある一定値に収束する。また、定数 m の設定で一次圧密中の二次圧密の発生が制御される。さらに、二次圧密量の程度に関係する定数 β_i を有効応力の関数とすることも可能である。

$$\dot{v}_s = \sum_{i=m}^n \frac{\beta_i}{10^i} \exp\left(\frac{-t}{10^i}\right) \quad (3)$$

3. 実験ならびに計算結果と考察

3.1 二次圧密モデルの定数決定法とその計算結果

Fig. 1は、網干が行った長期圧密試験結果¹⁵⁾ ($H=1$ cm) に対して、提案されている式(1)～(3)の二次圧密モデルで再現計算を行った結果である。○印は網干の圧密試験結果、式(1)による二次圧密量のみ計算結果が太破線、式(2)の結果が黒実線、式(3)の結果が細破線である。本項では、3つの二次圧密モデルの仮定や計算に必要な定数の決定法について、網干の試験結果を例に以下説明する。まず、全てに共通な点として、

- 1) 二次圧密領域の任意時間 (=1440 分) の全圧密量から一般的な体積圧縮係数 m_v を決定し、一次圧密量で定義する体積圧縮係数 m_p を仮定する。Fig.1 では $m_p/m_v=0.8$ とした。
- 2) 二次圧密領域と考える圧密量-時間曲線の直線部の勾配、二次圧密係数 $\alpha=0.0033$ を求める。
式(1)と式(3)では、二次圧密開始時間 t_i 以降に二次圧密が発生すると仮定して、
- 3) m_p に対応するひずみ量 (Fig.1 では 7.6 %) と二次圧密係数を求めた直線の交点を二次圧密開始時間として $t_i=5.7$ min を求める。
- 4) 式(3)の定数 m は二次圧密係数 α を調整して仮定し、定数 n の設定によって二次圧密の継続時間が決まる。

また、定数 β_i は試行計算により $2.47 \times \alpha$ と仮定した。式(2)の二次圧密の初期速度 \dot{v}_i は、
5) 圧密時間 1440 分における二次圧密速度 $\dot{v}_s = (\alpha/t) = 0.0033/1$ (1/day) と二次圧密量 $\Delta v_s = 0.0192$ を式(2)に代入し、 $\dot{v}_i=1.1$ (1/day) を求める。

以上のような仮定のもと、式(1)、式(2)による計算結果は互いにほぼ等しい計算結果を与え、実測値ともほぼ一致している。一方、式(3)では、定数 m と n をそれぞれ 1 と 6 に設定すると計算終了時の二次圧密量が若干過大に、2 と 5 とすると二次圧密量が若干過小に計算されて、図中に矢印で示す圧密時間でほぼ一定の二次圧密量に収束している。式(3)では、定数の設定で二次圧密量に変動するが、ある圧密時間で二次圧密が一定値に収束する場合には利用できそうである。

3.2 最大排水距離の変化と一次圧密初期の二次圧密挙動

Fig. 2は、排水距離の異なる網干の実験結果 ($H=1$ cm, 10 cm と 50 cm) を式(1)と(2)で計算した二次圧密量の経時変化である。図の計算では、二次圧密の発生時間 t_i と \dot{v}_i を最大排水距離 H の二乗に比例させたことで、計算値は実測値とよく合っている。式(2)とほぼ同じ形の関口・太田モデルの \dot{v}_0 ¹⁶⁾ は、排水距離によらず一定値 $10^{-6} \sim 10^{-7}$ (1/day) とされている³⁾。式(2)では、二次圧密の初期速度に対する考え方と一次圧密量で定義する圧縮指数や体積圧縮係数を用いるべきとする点が、関口・太田モデルとは異なる点である。

3.3 二次圧密係数が変化する場合のモデル適用性の検証

Fig. 3は、大阪湾のMa12, 13 に対して行われた長期一次元圧密試験の結果である¹⁷⁾。いずれも正規圧密領域のもので圧密時間 100 分以降を二次圧密領域とみると、1 ログサイクルあたりで求めたひずみによる二次圧密係数 α は図に記載した数値のように減少し、一定値とはならない。

Fig. 4の圧密量-時間曲線は、赤井・佐野が実施した長期 K_0 圧密試験の結果で、 K_0 値の経時変化も併せて示している⁴⁾。Fig. 3と同様、二次圧密領域の圧密量-時間曲線には直線性が認められない。このため、点線で示す

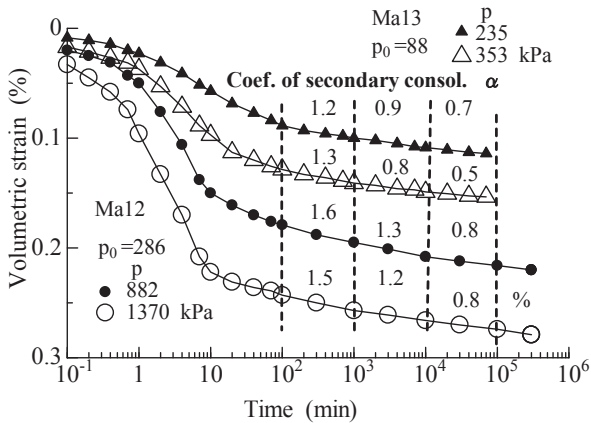


Fig. 3 Consolidation time curves observed by Watabe et. al.¹⁷⁾

式 (1) で計算した二次圧密の経時変化は、 10^4 分以降時間経過とともに大きくなっていく。また、 10^4 分以降では K_0 値の増加が測定されている。赤井・佐野は、この二次圧密中の K_0 値の増加が二次圧密係数 α 減少の要因と指摘している。

Fig. 5 は、赤井・佐野による Fig. 4 の試験結果を式 (2) と式 (3) でそれぞれ計算した結果である。定数 β_1 を一定とした式 (3) による計算結果は、二次圧密領域における α の減少、一定沈下量への収束傾向を示しているが、二次圧密中の K_0 値の増加とは無関係である。 K_0 圧密条件下の二次圧密予測も考えるには、二次圧密速度と有効応力変化の関係や一次元圧密中の K_0 値の増加と二次圧密速度の関係を明確にすることが必要と考える。その試みとして、式 (3) の定数 β_1 を有効応力依存とすることが可能である。

4. 常磐自動車道神田地区の長期沈下と二次圧密挙動

3 章までの検討結果をもとに、本章では実地盤を対象に検討を行う。サンプリングした地盤を対象に圧密試験を実施して、既存の圧密モデルによる計算結果と比較検討する。

4.1 神田地区の地盤沈下の概要

Fig. 6 は、常磐自動車道神田地区において観測された長期沈下の例である。図中に□と○印で示した長期沈下量ならびに長期沈下速度が、その他の地点と比較してかなり小さいことがわかる。○印は試験盛土工事でサンドドレーンが施工されていること（試験盛土 B 工区）、無処理で施工された□印（試験盛土 A 工区）では軟弱層の厚さがその他の地点の半分程度であることが、長期沈下を含めた圧密沈下促進に影響しているためと考えられる。

4.2 圧密試験結果を利用した現場沈下量の評価

試験盛土に隣接する地盤で土質試験用試料をシンウォールサンプリングした。Fig. 7 は、試験盛土施工前後の含水比の深度方向分布を比較したもので、深度 10 m 以

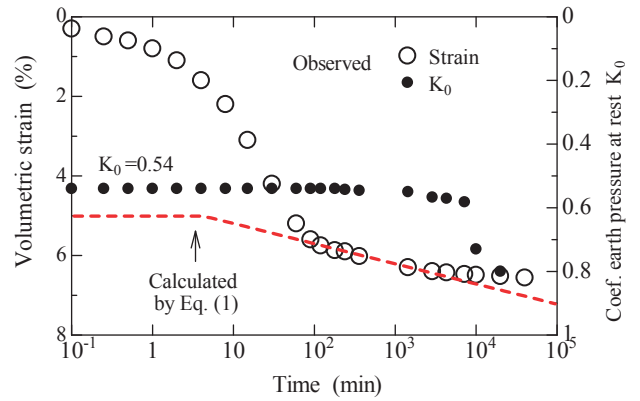


Fig. 4 Consolidation time curves of K_0 consolidation test observed by Akai and Sano⁴⁾ and its calculation result (calculated by Eq.(1)).

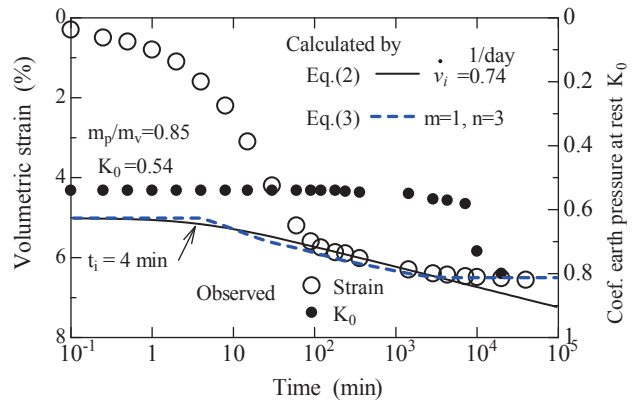


Fig. 5 Consolidation time curves of K_0 consolidation test observed by Akai and Sano⁴⁾ and its calculation result (calculated by Eq.(2)&(3)).

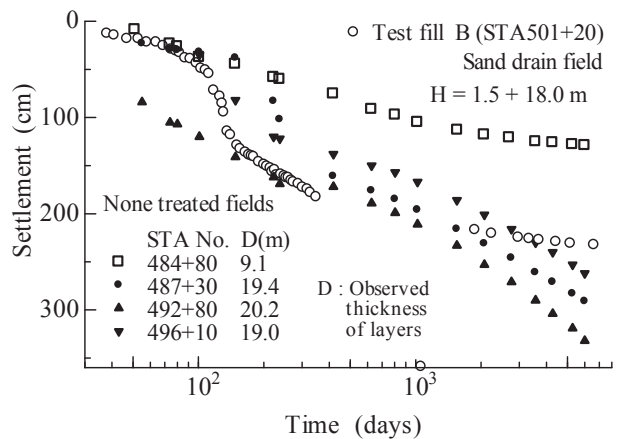


Fig. 6 Examples of long term settlements measured in the Hitachi district of Joban Expressway.

深に関しては両地点の地盤構成に大きな違いがないと判断される。乱れの少ない試料に対して行った標準圧密試験から、深度 9.5~21.5 m の圧密降伏応力 p_c は 100~160 kPa であった。この p_c 付近から盛土荷重 $\Delta p \approx 160$ kPa に近い荷重段階 ($p=78-157$ kPa と $p=157-314$ kPa) の圧密

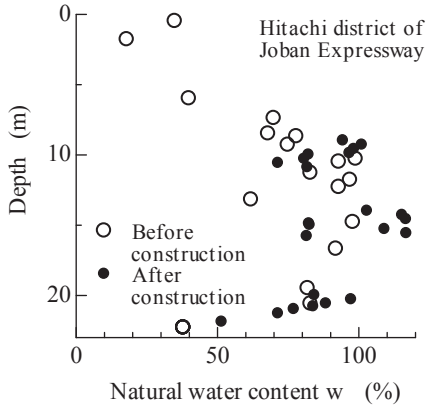


Fig. 7 Comparison of water content distribution in the depth direction of sampling site.

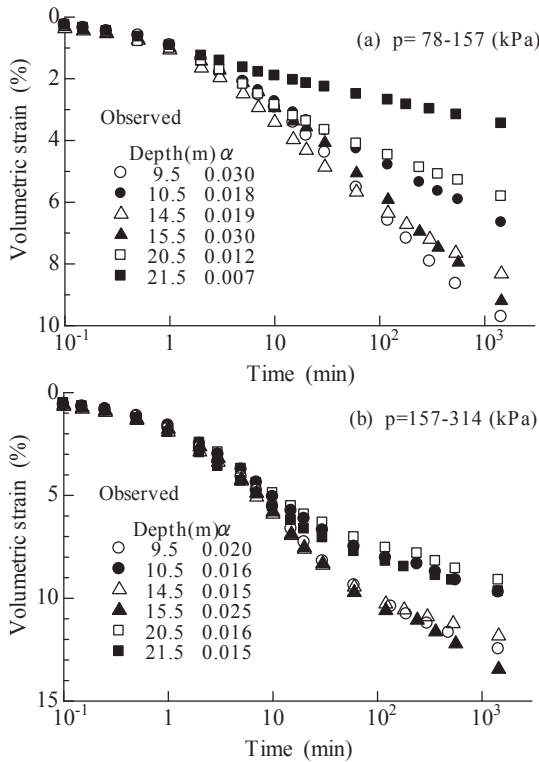


Fig. 8 Result of consolidation tests close to embankment load.

量-時間曲線を示したのが Fig. 8 (a), (b)である。Fig. 8(a)の p_c 付近への荷重となる圧密圧力 $p=157$ kPa では、圧密曲線の形状、圧密量ならびに α が採取深度によって異なっている。一方、圧密降伏応力を超える Fig. 8(b)では、ひずみ量も増加し圧密曲線の形状がいずれも典型的な逆S字型になり、正規圧密領域にあることがわかる。

これらの試験結果をもとに、直径 40 cm、有効径 2 m のサンドドレーンが正方形配置された試験盛土 B 地点の圧密沈下計算を行う。この地点には表層付近 1.5m に粘土層(Ac1)が存在するが、この層を除いた深度 5.7 m から 23.7 m の 18 m を沈下計算の対象層とした。このうち上層部の 9 m にサンドドレーンが施工されている。Fig.9 は、約 20 年にわたって観測された試験盛土 B 地点の沈

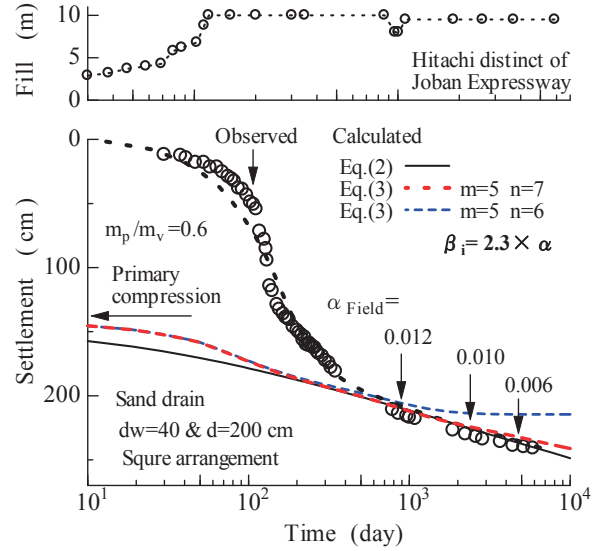


Fig. 9 Examples of long term settlements measured in the Hitachi district of Joban Expressway.

Table 3 Soil constants for 1-D calculation.

| Depth m | $m_v (\times 10^{-4})$ kPa ⁻¹ | α % | c_v cm ² /min | \dot{v}_i 1/day | m_p/m_v |
|------------|---|---------------|-------------------------------|----------------------|-----------|
| 5.7~9.8 | 12.6 | 1.3 | 0.02 | 6.9 | 0.6 |
| 9.8~13 | 7.35 | 0.66 | 0.04 | 200 | |
| 13~17 | 8.95 | 0.76 | 0.03 | 160 | |
| 17~20 | 9.46 | 1.1 | 0.03 | 5.6 | |
| 20~21.2 | 6.31 | 0.59 | 0.05 | 11 | |
| 21.2~23.7 | 6.15 | 0.59 | 0.1 | 5.1 | |

下量-時間曲線である。この場所の長期沈下速度 α_{field} は図のように圧密時間とともに減少し、一定値に収束してゆく傾向が観察されている。式 (2) と式 (3) による試験盛土 B の長期沈下量 (二次圧密量) の再現計算に先立ち、Table 3 に示した圧密定数 (m_v, α, c_v) により各標準圧密試験の再現計算を行って係数 m_p と \dot{v}_i 値を決定した。この二次圧密の初期速度 \dot{v}_i をサンドドレーンが施工された実地盤の長期沈下予測に利用する際、変更方法およびその必要性を検討した事例は見当たらない。しかし、この地区の試験盛土 A (無処理) と試験盛土 B (サンドドレーン施工) は、竜田らによって詳細な沈下検討が行われている³⁾。その中では、二次圧密の初期速度を全ての粘土層で 5×10^{-5} 1/day 程度に設定することで実測沈下量を再現できると報告している。

Fig. 9 のように実地盤の長期沈下挙動を計算する際、最も苦慮するのは、室内圧密試験で観測された 1 日後の全圧密量が現場でいつ発生すると仮定すべきかという点である。Fig. 9 の計算では、それを 5000 日後とした。この仮定により、Table 3 に示した式 (2) の二次圧密の初期速度 \dot{v}_i を 5000 日で除した値で計算した沈下量-時間曲線が、片対数紙上で直線となる Fig.9 内の実線である。式(3)では、各層の定数 β_i を全て $2.3 \times \alpha$ として、定数 $m=5$,

n は 6 と 7 とした計算例を破線で示した。 $n=7$ とした計算結果が実験値に近いが、 β_1 を調整することでより実測に近づけることも可能である。

今回の検討では、一次圧密量を仮定した二次圧密量の経時変化のみで二次圧密を議論したが、 Fig. 9 では、バロンの圧密方程式に二次圧密モデル（式（2））を利用を考慮した圧密方程式を利用して全圧密量－時間関係が計算できる。 Fig. 9 内の黒い太い破線がその結果で、二次圧密領域の直線性を除いては多層地盤の沈下挙動を上手くとらえている。ただし、「5000 日」とした根拠など、検討すべき事項も残されている。

5. 結 言

二次圧密係数が圧密時間とともに減少する室内圧密試験の結果や、軟弱地盤上の盛土による長期沈下速度が減少し最終沈下量に収束するような実地盤の観測結果を説明するために、著者らが提案している二次圧密モデルの適用性を検討した。モデルの検証には、排水距離の異なる一次元圧密試験、 K_0 圧密試験ならびに実地盤の観測結果を対象とした。得られた結果は以下のように要約される。

- 1) 二次圧密が時間の対数に比例する圧密モデル（式（1）、（2））では、標準圧密試験で測定された二次圧密係数から、一次圧密中の二次圧密発生開始時間あるいは二次圧密の初期速度を決める。両モデルでは、一次圧密量を適切に仮定することで、一次元圧密試験結果への適用性が確認された。
- 2) 排水距離が大きい場合には、標準圧密試験で得られた 1 日後の全圧密量が圧密時間に関する最大排水距離の二乗則に従うと仮定することで、モデルの適用性を確認した。
- 3) 二次圧密係数が時間とともに低減する実験結果ならびに現場データを再現するために利用した二次圧密モデルも、適切な定数の採用によって良好な計算結果が得られた。長期の圧密期間により沈下が収束するような現場への適用性が確認された。

謝辞：本研究に利用した常磐自動車道神田地区長期沈下時間関係の測定値をご提供頂いた NEXCO 東日本株式会社（旧道路公団）関係各位に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 竹嶋正勝；軟弱地盤盛土における長期沈下に関する二三の知見，土と基礎，Vol.27, No.3, pp.37-44, (1979).
- 2) 土質工学会編：土質工学ハンドブック，6 章土の圧縮と圧密，pp.147, (1965).

- 3) 竜田尚希，稲垣太浩，三島信雄，藤山哲雄，石黒健，太田秀樹：軟弱地盤上の道路盛土の供用後長期変形挙動予測と性能設計への応用，土木学会論文集，No.743, pp.173-187, (2003).
- 4) 赤井浩一，佐野郁夫：二次圧密における粘性土の状態変化，土木学会論文集，No.364, pp.123~131, 1985.
- 5) Tanaka,H. : Consolidation behavior of normally soils around pc value, -Long term consolidation test-, Soils and Foundations, Vol.45, No.3, pp.83-95, (2005).
- 6) 白子博明，赤石勝，杉山太宏，外崎明：一次圧密中の二次圧密の推定，土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp.565-570, (2008).
- 7) Suklje,L. : The analysis of the consolidation process by the Isotaches methods, Proc., 4th ICSMFE, London, Vol.1, pp.200-206, (1957).
- 8) Murakami,Y. : A method for estimating the consolidation of a normally consolidated clay of some age, Soils and Foundations, Vol.20, No.4, pp.83-93, (1980).
- 9) Mesri,G. and Choi,Y.K. : Settlement analysis of embankments on soft clays, Proc., ASCE, Vol.111, No.4, (1984).
- 10) Yin,J.H. and Graham,J. : Elasto visco-plastic modeling of one-dimensional consolidation, Geotechnique, Vol.46, No.3, pp.515-527, (1996).
- 11) Nash,D. : Modelling the effects of surcharge to reduce long term settlement of reclamation over soft clays, Soils and Foundations, Vol.41, No.5, pp.1-13, (2001).
- 12) Taylor,D.W. : Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley and Sons, New York, (1948).
- 13) 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).
- 14) 白子博明，向後隆道，赤石勝，稲田倍穂：レオロジーモデルを用いた二次圧密の予測，東海大学工学部紀要，Vol.23, No.2, pp.84-94, (1983).
- 15) Aboshi,H : An experimental investigation on the similitude in the consolidation of a soft clay, including the secondary creep settlement, Proc. 8th ICSMFE, Vol.4, No.3, pp.88-89, (1973).
- 16) Sekiguchi, H. and Ohta, H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, Proc. 9th ICSMFE, Specialty Session 9, Tokyo, pp.229-237, (1987).
- 17) 渡部要一他：大阪湾粘土の圧密沈下挙動に対するアイソタックによる土～水連成解析，第 43 回地盤工学会研究発表会講演概要集，No.425, pp.849-850, (2008).