

洪積粘土層の圧密沈下メカニズムの検討(2)

A Trial Approach to Constitute a Consolidation Model of Diluvial Clay for Long-Term Settlement(2)

豊饒智樹*・今井五郎**・中野則夫***
BUNYU Tomoki, IMAI Goro and NAKANNO Norio

* (財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

** 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授

*** (財) 沿岸技術研究センター 研究主幹兼特命プロジェクト担当部長

Consolidation processes of a diluvial clay is still difficult to predict, because no satisfactory theory to explain the change in structural cementation and its softening due to consolidation is yet available. In this paper, based on experimental results, a new mathematical model is trially proposed to explain structure-softening consolidation under loading pressures over the consolidation yield stress.

Key Words : consolidation, alluvion, diluvium, cementation

1. はじめに

洪積粘土, 特にセメンテーション効果を有する粘土に対しては, その圧密現象を上手く説明するモデルが確立されていないのが現状である. またそのような粘土の $e - \log p$ は圧密降伏応力 p_c 付近で大きく変化するため, このモデル化を間違えると圧密予測に大きな誤差を生じることとなる.

こうしたことから本研究は, 洪積粘土層の圧密現象を説明できるモデルの開発を目的として行っている. 本稿では昨年報告した平成 14 年度成果に続き, 平成 15 年度の成果について報告する.

2. 本年度検討の概要

平成 15 年度の研究として, 洪積粘土層の長期圧密沈下挙動を予測し得る圧密モデルを構築し, H14 年度に作成したプログラム CONAN II[®] を修正して, 現地実測データに対してその妥当性を検討することとした.

この目的のため, 特定の洪積粘土層を対象として圧縮則を確立することに重点を置き, 定ひずみ速度圧密試験, クリープ試験, 応力緩和試験の 3 種類の実験を, 不攪乱試料およびそれを完全に再構成した試料の両者に対して実施し, 再構成粘土 (セメンテーションの無い状態) と不攪乱粘土 (セメンテーションのある状態) を比較した上で試みの圧密モデルを構成した.

結果的には, 概ねモデルの妥当性は確認できた. また当初の想定外ではあるが, 圧密降伏応力 p_c の意味を明確にするための特殊実験を実施し有益な成果を得たので, その結果についても併せて報告する.

なお, 洪積粘土についてダルシー則が成立するのか, 成立する場合の透水係数 k と間隙比 e の関係はいかなるものになるのか, 更にはその関係が不攪乱試料と再構成試料で同じであるか否かという問題がある. この点につ

いては, 本年度の検討では十分な成果が得られていない.

3. 長期的な地盤挙動予測モデルの検討

3.1 洪積粘土の p_c に関する研究成果

洪積粘土層に圧密が生じるような現地での圧密状態を見ると, 再構成粘土の圧縮曲線の上側に高止まりする現象が見られる場合がある. 有効応力 $\sigma' = p_0$ で安定堆積している粘土は, $\sigma' = p_0$ の有効応力下で発達した土粒子間凝着部の強度 (いわゆる摩擦抵抗を生む強度で, 化学的なセメンテーションとは違う) で結合しているが, この強度は僅かな除荷により消失する性質を有するので, 骨格の構造配列が少しでも攪乱されると全体のバランスを回復するための配列の再構成が起り, $\sigma' = p_0$ の下でもいわゆるクリープ圧縮を生む. そして σ' が p_0 より少しでも大きくなると, その配列構造の変化が各所で起り, 全体的に塑性圧縮が生じることになる. この構造変化に際して粘性が働くので, 構造変化を起こすひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が大きいほど, 構造変化に対する粘性効果が大きく発現し, p_c 値が大きくなる. これが p_c 値に対するひずみ速度効果の原因である.

土粒子間結合が物理的な凝着結合のみでなく, 化学物質の沈積などによるひずみ速度効果を示さない他の結合力が加わるとすると, その結合力を切るための応力 Δp^* 以下の応力増加では, 結合は切れない. 従って, $\sigma' < p_0 + \Delta p^*$ である限りクリープ圧縮も降伏もしない. しかし $\sigma' > p_0 + \Delta p^*$ となると, 化学的セメンテーション結合が切れ始める. それが全て切れてしまうと, 骨格は p_0 の有効応力にしか耐えられないので, 不足の分を間隙水圧の増加によって補うために, 骨格が構造破壊して間隙水が湧き出ることになる. そしてその応力レベルで σ' 値が定値であれば, その余剰間隙水を排出するために大きな速度でクリープ圧縮が生じることになる.

福江²⁾によると、日本縁辺の海底粘土の殆どは、炭酸カルシウム CaCO_3 により土粒子が弱く結合されているとされている。「弱く」の意味は、土粒子の全てが互いに CaCO_3 で結合されるほどには海底粘土中に Ca が多量に存在していなかったということである。即ち、結合部と非結合部が共存している状態にあるものの、全体として結合部の結合力が p_0 を上回る p_c を生んだと理解できる。この場合、非結合部は物理的凝着型の粘性を発揮するであろうから、 p_c 値がひずみ速度効果によって異なる値を示すことになる。このような考えが妥当であるかどうかを検証するためには、次の3点を確認する必要がある。

- ① 洪積層粘土内に CaCO_3 は実在するか。
- ② CaCO_3 が無くなると $p_c = p_0$ となるか。
- ③ CaCO_3 の存在量と、 p_c 値そのものあるいは $(p_c - p_0)$ 値との間には相関があるか。

①と②は洪積粘土層の $p_c > p_0$ が CaCO_3 によるかを確認するための試験である。③は CaCO_3 の存在とセメント効果が確認された上での研究課題であり、本年度は①及び②についての実験を行った。

表-1は、準備した供試体の一覧である。AとBは試料採取深度で22m離れている。Aの生試料A-Iには2.25%質量比の CaCO_3 があるが、Bの生試料B-Iには0.22%しか無い。これらの生試料を一度 p_0 まで再圧密して安定させてから、300kPaまで除荷し、この圧力下で供試体の下から200kPaの水圧で炭酸水を通した。これにより、 CaCO_3 を供試体から除去することができる。

炭酸水500ccを通水した供試体をA-500、1000ccをA-1000などと表示してある。Aでは CaCO_3 が2.25→0.5~0.3%程度へと大きく低下しており、 CaCO_3 が溶解したことを確認できた。一方、元々 CaCO_3 量が0.22%と少ないBでは0.3%程度まで若干増加しているが、殆ど変化なしと考えて良い。

表-1 供試体一覧表

| 試料名 | 試料番号 | 有効土被り圧 p_0 (kPa) | 採取深度CDL (m) |
|-----|-------|--------------------|-------------|
| 試料A | T-94 | 770 | 133 |
| 試料B | TT-78 | 930 | 155 |

| 試料A (A-通水量) | 炭酸カルシウム含有量 (%) | 試料B (B-通水量) | 炭酸カルシウム含有量 (%) |
|-------------|----------------|-------------|----------------|
| A-I | 2.25 | B-I | 0.223 |
| A-500 | 0.516 | B-50 | 0.296 |
| A-700 | 0.454 | B-100 | 0.286 |
| A-1000 | 0.381 | B-200 | 0.268 |

以上のように処理した各供試体を一度有効応力 $\sigma'_v = 300\text{kPa}$ の下で安定化させ、その後 $0.01\%/\text{min}$ のひずみ速度で定ひずみ速度載荷圧密試験を1.5MPaまで実施した。得られた圧縮曲線 $\log f - \log \sigma'$ が図-1(a), (b)である。図中の p_c は三笠法で決定したものであるが、圧縮曲線の形が不明瞭であったり f 値の信頼性に欠けることもあって、詳細な検討に耐える結果になっていない。但し、A試料の場合、 p_c 値が大幅に低下したもののB試料ではあまり変化しなかったということは確認される。

以上の結論は、洪積粘土の $(p_c - p_0)$ 値が CaCO_3 の量と強く関係している、ということを示している。従って、先に示した課題③を追求する価値がある、ということは確認できた。

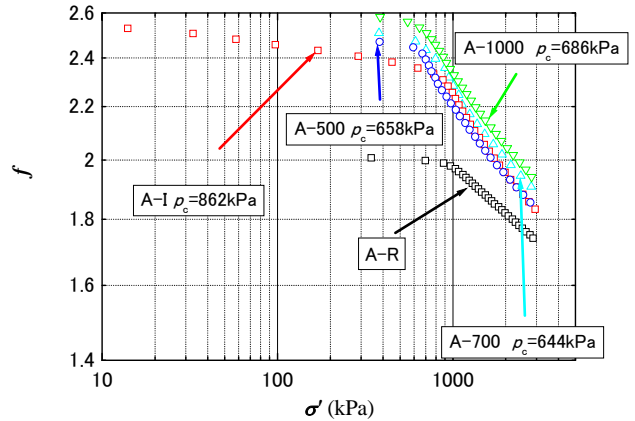


図-1(a) CaCO_3 結合がある場合の実験結果

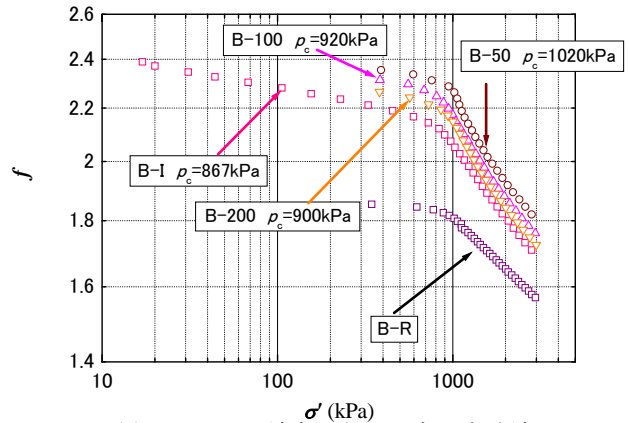


図-1(b) CaCO_3 結合がない場合の実験結果

3.2 洪積粘土の圧縮則に関する研究成果

本研究での作業仮説は、「不攪乱圧縮曲線と再構成圧縮曲線の体積比 f 値の差 (高止まりの程度) が構造の特異性の程度を表す」、というものである。すなわち、「不攪乱構造の特異性を再構成構造を基準として評価する」、という観点に立つ。粘土の基本的な配列構造が K_0 圧密の範囲内でのみ変化しており、他の力学的要因による変化は受けていない場合に、化学的なセメンテーションなどの効果が無かったとするならば、二次圧密の影響のみを受けていると考えて良い。従って、堆積時の環境の下で堆積・圧密し続けた粘土が示す圧縮曲線は、完全再構成粘土の圧縮曲線を基準とするのが妥当である。以上の考え方で、次の2通りの実験を実施した。

① 不攪乱状態の供試体に対して $\log f - \log \sigma' - \log \dot{\epsilon}_n$ 関係を求める。

② 同じ試料を用いて再構成圧密した供試体に対して $\log f - \log \sigma' - \log \dot{\epsilon}_n$ 関係を求める。

ここに、 $\dot{\epsilon}_n$ は自然ひずみ速度である。

不攪乱粘土と再構成粘土の定ひずみ載荷とクリープ載荷の $\log f - \log \sigma'$ 曲線を図-2に示した。凡例のIは不

攪乱試料を、R は再構成試料を指す。これらの線の勾配が C_c^* ($\dot{\epsilon}_n = \text{const.}$ に対する圧縮曲線 $\log f - \log \sigma'$ の勾配) である。

図-3 に示したものが、不攪乱供試体に対するクリープ試験の結果である。横軸の σ' はクリープ圧力、縦軸の ϵ はクリープ開始時を基点とした圧縮ひずみ量である。

いずれの $\epsilon - \sigma'$ 曲線も $p_c (= 766 \text{ kPa})$ よりも大きな $\sigma' (\approx 850 \text{ kPa})$ の付近で最も大きなクリープひずみ量を示している。このデータはクリープ過程における $\log f - \log t$ 曲線から求めたものであるが、同じ曲線上から $\dot{\epsilon}_n$ 値の経時変化が読みとれる ($\dot{\epsilon}_n = -\dot{f}/f$)。そこで、各クリープ圧力 σ' に対して同じ大きさの $\dot{\epsilon}_n$ 値を示す $\log f$ の値を読みとり、 σ' に対してプロットすると図-4 が得られる。 $\dot{\epsilon}_n$ 値の違いに応じてほぼ並行の曲線群となっており、当然のことながら $\dot{\epsilon}_n$ 値が小さいほどより小さな $\log f$ を示す。

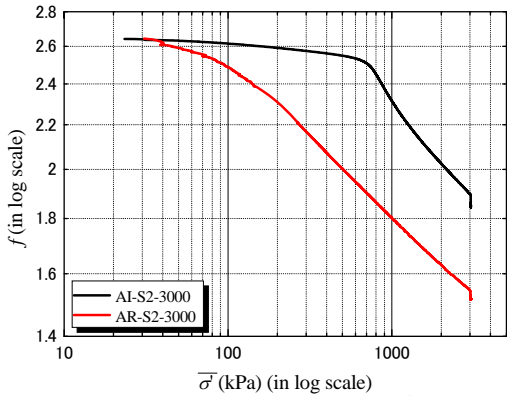


図-2 定ひずみ圧縮曲線

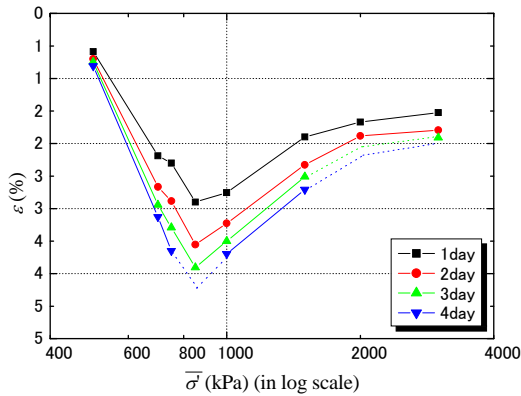


図-3 クリープ量と応力の関係

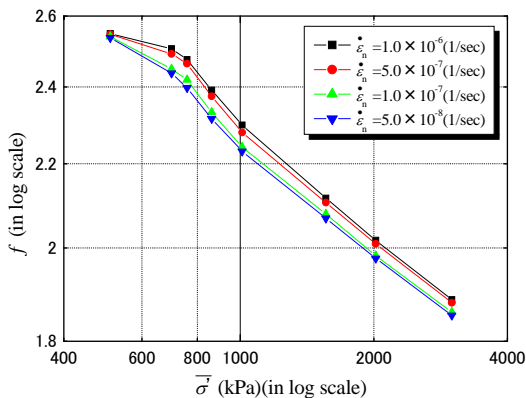


図-4 ひずみ速度一定線

不攪乱試料の状態指標値 Γ_I^* と再構成試料の状態指標値 Γ_R^* の差を Γ_S^* と定義すると、どの σ' に対しても Γ_S^* 値は $\dot{\epsilon}_n$ の低下につれて小さくなるから、この点に着目してデータを整理し、 $\Gamma_S^* \sim \dot{\epsilon}_n$ 関係をごとにまとめ直したのが図-5 である。

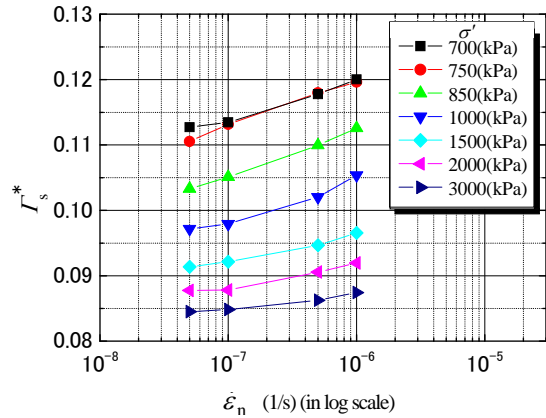


図-5 Γ_S^* と $\dot{\epsilon}_n$ の関係

$\dot{\epsilon}_n$ の大きい範囲を対象外とすると、 $\Gamma_S^* \sim \log \dot{\epsilon}_n$ 関係を線形近似できそうである。そこで次式を仮定する。

$$\Gamma_S^* = \alpha \log \dot{\epsilon}_n + \beta \quad (1)$$

ここで α は Γ_S^* に対するひずみ速度効果を表すパラメータであり、 α が大きいほど図-5 の $\dot{\epsilon}_n$ 一定 $\Gamma_S^* - \sigma'$ 曲線間の幅が広いこと、すなわち速く特異構造が失われていくことを示す。 β は特異構造の程度 (構造の高止まり、あるいは高位さの程度) を表す。当然 β は σ' が大きいほど小さいので、 β は σ' 依存であって完全定数ではない。また $\Gamma_S^* - \log \dot{\epsilon}_n$ の勾配 α も σ' 依存性が見られる。

そこで α, β を σ' に対してプロットしたのが図-6 である。 α も β も強い σ' 依存性を示すパラメータであることが分かる。すなわち $\alpha(\sigma'), \beta(\sigma')$ と考えねばならない。また、その依存性が p_c 付近の σ' を境にして全く異なっていることも知れる。恐らくこの境界 σ' が真の p_c ということになるのだろうが、現段階では不明である。図-6 が示しているもうひとつ大切なことは、 α と β の σ' 依存性が全く同じ (同じ曲線形を示す) ということである。

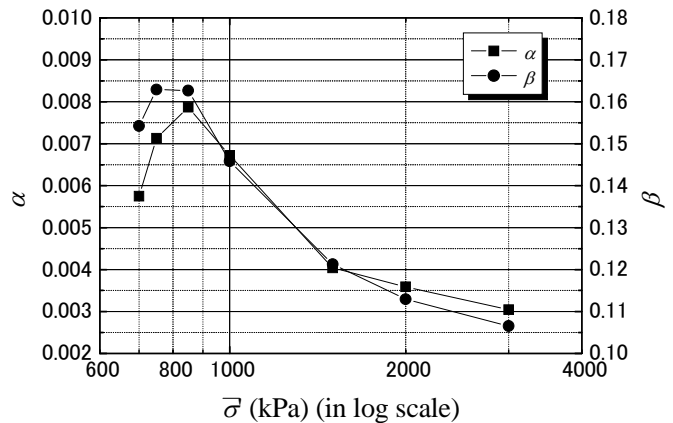


図-6 α, β と σ' の関係

仮定としての圧縮則 $\Gamma_S^* = \alpha \log \dot{\epsilon}_n + \beta$ を用いて整理した結果、 α と β は完全定数ではなくて σ' 依存の $\alpha(\sigma'), \beta(\sigma')$ であることが分かった。すなわち α も β も土質パラメータとはなり得ない。したがって α と β を用いた圧縮則は不完全である。 $\sigma' > p_0$ の範囲で $\alpha - \sigma', \beta - \sigma'$ を簡易な式で定式化すると土質パラメータが決定できるが、その関数の形を特定するためにはもっとしっかりしたデータが必要であるし、 $\sigma' < p_0$ 範囲内のデータが欠けていてその範囲の定式化はできない。そこで、 $\sigma' > p_0$ に限って敢えて $\alpha(\sigma'), \beta(\sigma')$ を用いると不攪乱の圧縮則がどのような形になるかだけを示す。

不攪乱の f 値を f_1 、再構成の f 値を f_R とする。まず再構成粘土に対して

$$\log \frac{\Gamma_R^* - \Gamma_L}{\Gamma_L} = a \log \dot{\epsilon}_n + b \quad (2)$$

すなわち

$$\Gamma_R^* = \log f_R + C_c^* \log \sigma' = \Gamma_L (1 + 10^b \dot{\epsilon}_n^a) \quad (3)$$

また上で与えられたように

$$\Gamma_S^* = \Gamma_I^* - \Gamma_R^* = \alpha(\sigma') \log \dot{\epsilon}_n + \beta(\sigma') \quad (4)$$

すなわち

$$\Gamma_I^* = \Gamma_R^* + \alpha \log \dot{\epsilon}_n + \beta \quad (5)$$

ここで $\Gamma_I^* = \log f_1 + C_c^* \log \sigma'$ 、 $\Gamma_R^* = \Gamma_L (1 + 10^b \dot{\epsilon}_n^a)$ を用いると

$$\log f_1 = -C_c^* \log \sigma' + [\Gamma_L 10^b \dot{\epsilon}_n^a + \alpha(\sigma') \log \dot{\epsilon}_n] + [\Gamma_L + \beta(\sigma')] \quad (6)$$

この式を用いると σ' 、 $\dot{\epsilon}_n$ に対して f 値を計算することは一応できる。しかし、右辺第2項 [] の $\Gamma_L 10^b \dot{\epsilon}_n^a$ と $\alpha \log \dot{\epsilon}_n$ は式の形が全く違うし、第3項 [] の中の2項もそうである。そして更に α, β の中に σ' が入っている。こういった点についてデータを蓄積し改良することが今後必要である。

3.3 圧密特性を考慮した予測モデルの検討

圧密沈下の予測に用いる計算モデルは一般に必ず次の4柱から成り立っている。

- ①質量保存則 : $F_1(\dot{f}, v) = 0$
- ②運動量保存則 : $F_2(v, \sigma') = 0$
- ③透水則 : $F_3(v, \sigma') = 0$
- ④圧縮則 : $F_4(\sigma', f, \dot{f}) = 0$

洪積粘土に対して適切な F_3 式と F_4 式が見つかれば予測モデルが与えられたことになる。透水則として Darcy 則が適用できるのであれば、②と③を合体させた式 $F_{2③}(v, \sigma') = 0$ が求まる。この式中には唯一つの土質パラメータ k が入っており、透水係数を体積比 f の関数として与えれば、①、②、③は確定したことになる。もし Darcy 則が適用できず非線形式となると、②と③を合体して陽解型のひとつの数式にまとめることはできなくなる。また、圧縮則が線形則ならば①②④をまとめてひとつの陽

解型数式にすることができるが、非線形だと不可能である。即ち、透水則と圧縮則の両方が主に線形であるならば、ひとつの支配方程式が得られ、その式の差分形を用いて数値積分ができるが、どちらか一方でも非線形となるとその様な簡易な方法を採用できないため、上記①～④のそれぞれを逐次組み合わせ解いていく coupling 法としての CONAN II が開発されたわけである。

そして圧縮則に関しては、アイソタック則がほぼ適用できることが判明して $F_4(\sigma', f, \dot{\epsilon}) = 0$ の形になることが分かってきたものの、その数式はかなり複雑であって $\sigma', f, \dot{\epsilon}$ のどれをとっても陽解型でない。すなわち、coupling を基礎とした解析手法を採用せざるを得ないことが明確になってきた。

本年度の研究で作業仮説とした「 $\Gamma_S^*(= \Gamma_I^* - \Gamma_R^*)$ が特異構造のパラメータである」を圧密予測モデルに組み込むためには、 Γ_S^* の定義の基本となる再構成粘土 (Γ_R^*) のモデルが確立していなければならぬ。従って、元々はセメンテーションのない正規圧密粘土に対して開発されたものの、まさに再構成粘土に適用し得る圧密プログラム CONAN II を、洪積粘土の圧密予測に耐えられるものにバージョンアップする必要がある。

以上のことから従来の CONAN II を、下記の各要求に応じられるように改善することにした。

- ①境界条件の時間的変化に対応できるようにする。
- ②粘土層の不均質・不均一に対応できるようにする。
- ③粘土層両端面における任意の排水条件に対応できるようにする。
- ④リスク回避フローを導入し、計算の安定化を図る。

ここでは検討の詳細は省略するが、 Γ_S^* を組み込んだ圧密沈下予測モデル構築の準備までが本年度の成果であり、今後データの蓄積を待ち不攪乱粘土に対する簡易な定式化を行う必要がある。

4. まとめ

末文になりましたが、横浜国立大学大学院土木工学教室今井研究室の皆様の方ならぬ御尽力により、この論文を作成することができました。深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Imai, G., Tanaka, Y., and Saegusa, H. : One-dimensional consolidation modeling based on the isotach law for normally consolidated clays, Soils and Foundations, Vol. 43, No. 4, pp. 173-188, 2003.
- 2) 福江正治: 炭酸塩が地盤形成に与える影響, 平成6年度科学研究費補助金(一般研究B) 研究成果報告書, 157, 1995.