

# 洪積粘土層の圧密沈下メカニズムの検討

## A Trial Approach to Constitute a Consolidation Model of diluvial Clay for Long-Term Settlement

豊饒智樹\*・今井五郎\*\*・中野則夫\*\*\*・中野勉\*\*\*\*

BUNYU Tomoki, IMAI Goro, NAKANO Norio and NAKANO Tsutomu

\* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員  
\*\* 横浜国立大学大学院 教授

\*\*\* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部特命プロジェクト担当部長

\*\*\*\* JICAベトナム事務所 (前 (財) 沿岸開発技術研究センター 理事)

Consolidation processes of diluvial clay layers is difficult to estimate, because no complete theory to explain the change in structural cementation and it's softening due to consolidation is yet available. In this paper, a trial approach to constitute such a model is reported.

Key Words : consolidation, alluvion, diluvium, cementation

### 1. はじめに

大深度に位置する洪積粘土層は、地盤改良が困難であるため、極力洪積層の沈下が問題とならないように配慮しながら開発が行われる。しかし、沿岸域から沖合に開発域が推移し、大水深の埋立を行う場合、洪積層における圧密が不可避な場合があるため、その場合には洪積層の沈下量を予測する必要がある。また、工費は沈下の規模に大きく左右されることから、より正確な予測をする必要がある。

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。本稿では平成 14 年度の成果について報告する。

### 2. 粘性土の圧密特性

沿岸域に分布する第四紀地層は、地質学的には沖積世・洪積世に区分されており、我が国では第四紀洪積世(即ち更新世:氷河時代, 約 200 万年前~1 万年前)に堆積した地層を「洪積層」と呼び、第四紀沖積世(即ち完新世:後氷期, 1 万年前~現在)に堆積した地層を「沖積層」と呼ぶのが一般的である。本報告においては、「沖積粘土層」、「洪積粘土層」の表記を用いるものとする。

洪積粘土層と沖積粘土層の地質学的特徴とは別に、各々の圧密現象にはそれぞれに特有の問題がある。沖積層には地盤改良が施され、圧密時間が大幅に短縮される。またその地盤内に存在する介在砂層は局所的な間隙水の排水を助長し圧密速度を高めるのに対し、ヴァーチカルドレーンによる在来粘土層の攪乱によりいわゆるスミアゾーンが形成され、圧密を遅らせる。一方、洪積層では载荷による沈下が長期に及び、その圧密挙動は複雑となり整合的な解釈が困難である。 $\Delta p = p_c - p_0$  は、いわゆるセメンテーションとして理解されており、 $\sigma' > p_c$

の応力レベルではこのセメンテーションによる土粒子間結合がゆるむので、圧密降伏して大きな圧縮を生み出して別の  $e - \log p$  関係を辿ることになる、とされている。ここに、 $\sigma'$  は有効応力、 $p_c$  は圧密降伏応力、 $p_0$  は先行圧密応力である。

しかし、現状としては洪積粘土層における沈下現象を説明するモデルは確立されていない。現在提唱されている理論体系は以下 2 つに大分される。

- ① 粘土の骨格(粒子集合体)が構造粘性を有する。
- ② " " " " " 有しない。

いずれの立場の場合についても、粘土地盤の時間依存的力学特性を説明することは可能である。前者では粘土粒子表面の吸着水の物理特性に由来する粘性にその根拠を置いており、後者では粘土粒子の骨格自体が構造軟化を起こす弾塑性体としている。

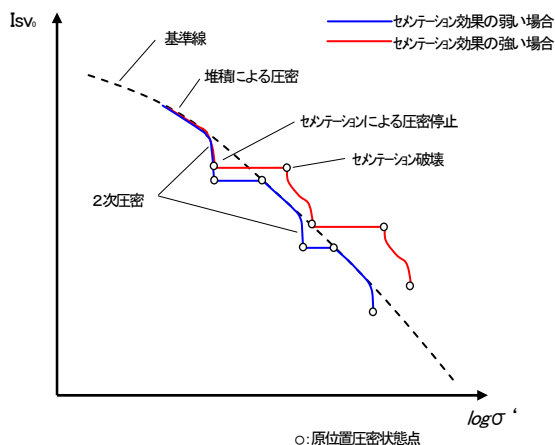


図-1 原位置での圧密状態の違いをセメンテーション効果との関係で説明する推論モデル

図-1 は、セメンテーション効果の大小による現位置圧密状態の違いを模式的に示したものである。 $I_{sv0}$  は体積比指数であり、基準線はその定義からセメンテーション

のない正規圧密粘土が  $\sigma'$  の増加に対して構造を変化させていくときの安定  $f$  値 (体積比) を示す。したがって、堆積中あるいは対象粘土層が更にその上に堆積物を載せていく過程での間隙比と有効応力の関係、 $e-\sigma'$  関係が基準線である。セメンテーション効果の弱い粘土では、堆積が中止して二次圧密過程に移行すると現位置圧密状態 (○印) は  $\sigma'$  一定の下で基準線の下側へ下降する。

他方セメンテーション効果の強い粘土の場合、セメンテーションは構造変化の途中では生じにくく、二次圧密がかなり進んだ段階で作用し、そのような粘土に新しい上載荷重が加わると、セメンテーションが破壊し始めるまでは構造が温存されて殆ど圧密しないままに  $\sigma'$  だけが増加する。しかしセメンテーションがゆるみ始めると圧縮し始めて  $\sigma'$  が最終値に達するまで圧縮する。もしセメンテーションが完全に切れていけば基準線上で安定して、二次圧密段階に移行するはずであるが、結合構造の一部が残存するために基準線とは別構造の粘土になり基準線の上側で二次圧密に移行していくものと推察される。

また、多くの洪積粘土の見かけの圧密降伏応力  $p_c$  は一般に現位置における有効上載圧  $p_0$  より大きい。ここで見かけの圧密降伏応力  $p_c$  とは、何らかの条件下で圧縮挙動が急変する時点での有効圧縮応力であり、真の圧密降伏応力  $p_c^*$  は、セメンテーション構造が破壊し始めてさらにそれ以上の応力増大に対して構造が急激に変化していく限界の有効応力を指す。ひずみ速度依存性のある粘土においては、 $p_0 < p_c^* < p_c$  であり、この  $p_c^*$  を実験的に求めることが重要な課題である。

### 3. 洪積粘土における圧密モデルの構想

2. で述べたように、洪積粘土層の長期圧密現象を良く説明出来る数値解析モデルは未だ確立されていない。ここでは、将来的にこのようなモデルのベースとなる可能性のある、セメンテーションの無い場合の正規圧密粘土の圧密現象を説明する今井モデルの概要と、今後このようなモデルを構築するための構想について述べる。

#### 3.1 今井式の適用について

今井モデルは、セメンテーションは無いが二次圧密を受けてよい正規圧密粘土に対するアイソタク型の圧縮則  $f(f, \sigma', \dot{\epsilon}_n) = 0$  と、ダルシー則  $v = ki$  における透水係数  $k$  の大きさが圧密に応じて変化することを考慮に入れたモデルであり、有限ひずみ・非線形・時間依存型のモデルである。また、ひずみ  $\epsilon$  はある圧縮状態から別の圧縮状態までの圧縮量を初期の圧縮状態から相対的な割合で表現するものであり、相対量である。従って、今井モデルでは圧密状態を絶対量で表現するため、体積比  $f(i+e)$  が用いられる。次に応力レベルについては有効応力  $\sigma'$  が用いられる。また、粘性効果を圧縮則に導入す

るための量として、自然ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_n$  が用いられる。  $\epsilon_n$  は工学ひずみ  $\epsilon$  と異なり、圧縮の基準を現時点におくもので、絶対量である。その絶対量の経時変化分を時間変化  $\Delta t$  で除したものが  $\dot{\epsilon}_n$  であり、  $\dot{\epsilon}_n$  は絶対量である。即ち、今井モデルにおける圧縮則は、  $f-\sigma'-\dot{\epsilon}_n$  関係で表現される。

見かけの圧密降伏応力  $p_c$  を上回る有効応力  $\sigma'$  の下では、  $f-\sigma'-\dot{\epsilon}_n$  関係が与えられた粘土に固有に決まる。したがって圧密状態  $F(f, \sigma', \dot{\epsilon}_n)$  を  $f$ 、  $\sigma'$  及び  $\dot{\epsilon}_n$  を座標軸とする三次元空間にプロットすると、その固有の関係  $F(f, \sigma', \dot{\epsilon}_n) = 0$  は1枚の面で表現され、圧密の状態は  $\sigma' > p_c$  の範囲では必ず、その面上を移動する。図-2 に示した state surface (状態曲面) がそれであり、点Sは圧密が始まる点を意味し、そこからそれまでの  $\dot{\epsilon}_n$  と同じ大きさで圧密されると  $S \rightarrow E$ 、S点の  $\sigma'$  で二次圧密されると  $S \rightarrow C$ 、応力緩和を受けると  $f$  一定で  $S \rightarrow R$  のように状態点が移動していく。ただし、これらの変化は  $\dot{\epsilon}_n$  が急激に変化しない場合であり、  $\sigma$  増に伴い  $\dot{\epsilon}_n$  が急増すると、状態点は状態曲面から飛び出す。その時の状態曲面上に戻ろうとする経路が  $S \rightarrow Y$  であり、Y点は  $\dot{\epsilon}_n$  依存効果を有する見かけの圧密降伏点である。Y点に着陸した状態点は、  $\dot{\epsilon}_n$  値の急変がない限り状態曲面上を準静的に移動していく。

つまり、今井モデルでは一次圧密と二次圧密の概念区分がなく、降伏前と降伏後の区別のみが歴然としており、長期圧密過程を自動的に計算することができる。

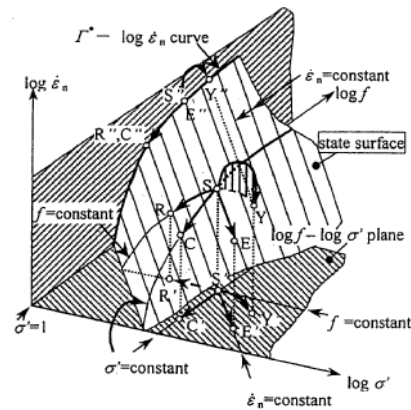


図-2 一次元圧密の状態曲面

状態指数  $\Gamma = e + C_c \log \sigma'$  を定義すると、  $e$  と  $f$  は同等であるから、図-3 に示す状態曲面上の  $\dot{\epsilon}_n$  一定線を  $\log f - \log \sigma'$  面に投影したものが得られる。

$$\log \frac{\Gamma^* - \Gamma_L}{\Gamma_L} = a \log \dot{\epsilon}_n + b \quad (1)$$

この式で、  $\Gamma_L$  は  $\Gamma^*$  の取り得る最低値である。この  $\Gamma_L$  を仮定して  $\log(\Gamma^* - \Gamma_L) / \Gamma_L - \log \dot{\epsilon}_n$  関係をプロットし、最適フィッティングの  $\Gamma_L$  を正解として  $a$  と  $b$  の値を決める。

次に、  $S \rightarrow Y \rightarrow C$  の過程は、降伏点に近づくにつれて粘

塑性効果をより強く受けるために、 $\log f - \log \sigma'$  曲線の接線勾配  $C_t$  値が徐々に大きくなる。今井モデルではこれを次式で表現している。

$$C_t = \frac{C_c^*}{1 + \mu \Delta \dot{\epsilon}} \left[ \frac{-\Delta(\log f)}{\Delta(\log \sigma')} \right] \quad (2)$$

$\mu$  は定数(=40)で、 $\Delta \dot{\epsilon}$  は降伏前の任意点 C における  $\log \dot{\epsilon}$  の値と、そのときの  $(f, \dot{\sigma})$  に対応する状態曲面上の  $\log \dot{\epsilon}$  の値の差であり、降伏が近づくとつれて  $\Delta \dot{\epsilon}$  値はゼロに収束し、 $C_t$  値は自動的に  $C_c^*$  値に近づいていく。

このような降伏前の圧縮則の定式化は、弾性成分と粘塑性成分を分解しない考え方によるものであり、一般的でない。降伏前の圧縮則は圧密過程全般にさほどの強い影響を与えないので、弾性成分と粘塑性成分に分け、後者を降伏後のそれに一致させるという弾・粘塑性モデルに修正する方が良いと考えられる。

上述の圧縮則を用いて数値計算を実施するには、圧縮則以外にも他の法則が必要である。圧密は骨格の圧縮と間隙水の透水の組合せ現象であるから、圧縮に伴って透水性が低下することを考慮しなければならない。一般に  $e - \log k$  の直線性が仮定されているが、今井モデルでは高含水比域での透水性も考慮して次式を採用している。

$$\log f = C_k^* \log k + K^* \quad (3)$$

即ち  $\log f - \log k$  の直線性を仮定する。この式の適用度の高さは過去の実験データで多く実証されている。土質定数としての  $C_k^*$  と  $K^*$  の値を求めるためには、段階載荷圧密試験の各段階の最終時 1 時間を使って変水位透水試験を圧密載荷したまま実施すればよい。 $C_k^*$  と  $K^*$  の値を与えれば  $k$  値は圧密中の変化していく  $f$  値に対応して自動的に計算されていくことになる。

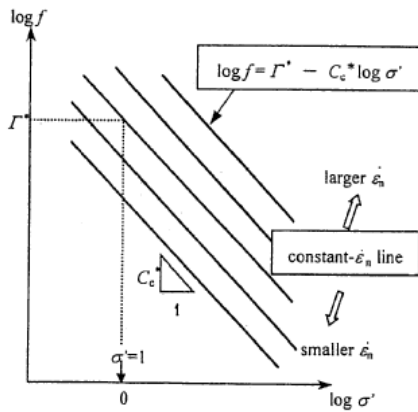


図-3  $\log f - \log \sigma'$  の直線性に基づく勾配  $C_c^*$  と状態指数  $\Gamma_c^*$  の定義

圧縮性 ( $C_c^*, \Gamma_c, a, b, c$ ) と透水性 ( $C_k^*, K^*$ ) が求まると、粘土の個性が与えられたことになる。その他に圧密計算で必要とされる法則は物理学の場の方程式であり、運動量の保存則と質量の保存則の 2 つである。圧密はゆっくりした現象なので加速度項を考えない。その場合の

運動量の保存則は単なる釣り合い式となる。骨格に働く力は土粒子間を伝わる面力としての有効応力  $\sigma'$  と流水から骨格が受ける体積力としての浸透力 (透水力)  $j = \gamma_w i = \gamma_w v / k$ 、そして水中の骨格に体積力として働く水中単位重量  $\gamma' = (\gamma_s - \gamma_w) / f$  の 3 者のみである。これらの釣り合い式は次のとおりである。

$$v = \frac{k}{\gamma_w f} \left[ \frac{\partial \sigma'}{\partial z} + \gamma'_s \right] \quad (4)$$

ここで  $\gamma'_s = (\gamma_s - \gamma_w)$  であり、この式にはダルシー則が既に組み込まれている。

質量保存則は次式で与えられる。

$$-\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial z} \quad (5)$$

以上の 2 式で  $z$  は実際の粘土層の厚み (または位置)  $\Delta H$  を示すものではなく、土粒子が占める実質厚さ  $\Delta z = \Delta H / f$  で定義される量である。時間と共に  $\Delta H$  は変化するが  $\Delta z$  は不変である。

今井モデルでは圧縮則として  $F(f, \sigma', \dot{\epsilon}_n) = 0$  を用いているので、 $f, \sigma', \dot{\epsilon}_n$  の 3 量を  $z$  と  $t$  の関数と考える。すなわち  $f(z, t), \sigma'(z, t), \dot{\epsilon}_n(z, t)$  である。一方、水の動きは  $v(z, t)$  のみで代表している。したがって  $f, \sigma', \dot{\epsilon}_n, v$  の 4 量が  $(z, t)$  の関数である。しかし式は圧縮則  $F(f, \sigma', \dot{\epsilon}_n) = 0$ 、釣り合い則  $G(v, f, \sigma') = 0$ 、保存則  $H(f, v) = 0$  の 3 つのみであるから解けないように見えるが、 $\dot{\epsilon}_n = -\dot{f} / f = -\partial(\ln f) / \partial t$  であるから、 $\dot{\epsilon}_n$  は実際には  $f(z, t)$  と結びついている。したがって  $t$  後の  $f$  値を仮定し、上記 3 法則を満たすような  $f$  の収束解を見出すことによって、計算を時間軸方向に進めることができる。空間座標軸方向への計算の進め方は、分割層境界面で  $\sigma'$  と  $v$  の値がそれぞれ連続するという原則のみを適用する。

このような理論の基に構築されたプログラムが CONAN II であり、この計算結果<sup>2)</sup>では、10m 程度の層厚の挙動までは説明出来そうである。今後洪積粘土にこのプログラムを発展的に適用するためには、降伏前の圧縮則を弾性成分と塑性成分に分け、後者を降伏後のそれに一致させる弾・塑性モデルへの修正等が必要である。

### 3.2 洪積粘土における圧密モデルの構想

2. で述べたように、洪積粘土の圧縮則は複雑でその統一的な解釈が困難な状況にある。しかし、様々な角度からの研究がなされてきたことにより、基本的には間違っていないと判断される圧縮則の大体の描像を構想できる。以下にその構想を示し、過去の研究成果に基づく検討を加える。

- ① 真の圧密降伏応力と想定される  $p_c^*$  を境として、 $\sigma' < p_c^*$  側と  $\sigma' > p_c^*$  側とで圧縮則に大きな違いが見られる。
- ②  $\sigma' < p_c^*$  側では  $\dot{\epsilon}$  の影響は小さく、 $\sigma' = p_0$  付近

では $\dot{\epsilon}$ の影響は殆どない。

- ③  $\sigma' > p_c^*$  側では $\dot{\epsilon}$ の影響が大きく、 $\dot{\epsilon}$ 一定の $\epsilon - \sigma'$ 線はほぼ平行である。

この特徴がセメンテーション効果を強く受けた粘土に特有のものであるのか、現時点では確認されていない。このような観点での実験の実施とこれによるデータの蓄積が重要である。

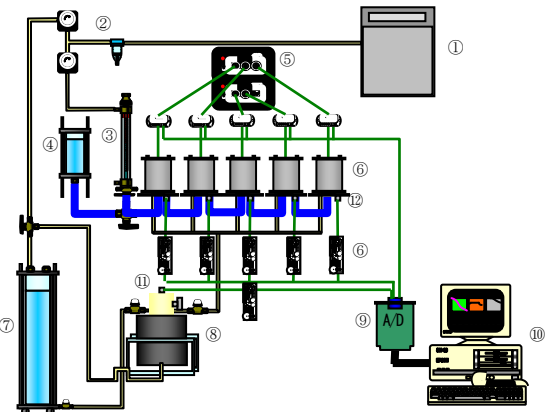
#### 4. 実験装置の開発

本研究では、 $\sigma' > p_c$ の領域における圧密メカニズムの解明が必要かつ重要であることから、以下のような分割型高圧圧密試験装置の開発を行った。

##### 4.1 システムの概要

洪積粘土の圧密挙動を室内実験において検討するに当たり、図-4に示すような実験システムの構築を行った。装置は、(独)港湾空港技術研究所で使用している分割型高圧試験装置を参考にして製作した。装置の主な特徴は以下のとおりである。

- ① 4Mpa程度までの高圧試験が可能である。
- ② 供試体圧縮量を試験器外部で計測出来る。
- ③ べろラム型載荷方式により供試体密閉を簡易化した。



①コンプレッサー、②レギュレーター、③ピュレット、④通水用脱気タンク、⑤ギャップセンサー、⑥中容量分割型圧密試験装置、⑦セル水タンク、⑧増圧機、⑨A/Dコンバーター、⑩パーソナルコンピューター、⑪セル圧計、⑫背圧計

図-4 実験システム概念図

##### 4.2 圧密装置の作動実験

表-1に、作動実験に使用した試料の物理特性を、表-2に試験ケースを示す。

表-1 試料の物理特性

	MM粘土
土粒子密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.68
液性限界 $w_L$ (%)	94
塑性限界 $w_p$ (%)	49
塑性指数 $I_p$ (%)	45

表-2 試験ケース

	ケース 1(kPa)	ケース 2(kPa)
1	0→100	0→100
2	100→200	100→200
3	200→400 ~	200→400
4	~ 400→800	400→800
5	800→1600	800→1600
6	1600→0	1600→3200

図-5に $f - \log_{10} p$ 関係図を示す。これを見ると良い線形の相関となっており良好な載荷を行うことが出来ると言える。

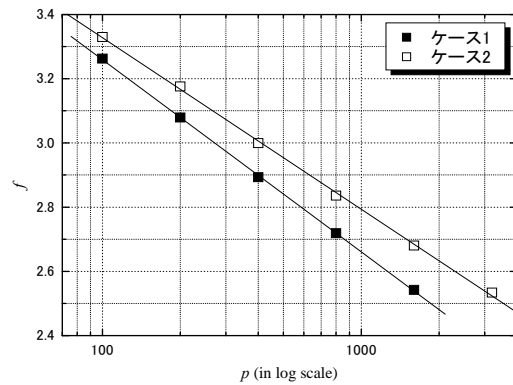


図-5  $f - \log_{10} p$  関係図

#### 5. 今後の課題

以上のように、圧密モデルを構築するための構想と、それを検証するための室内実験システムは概ね整った。次年度以降は解析モデルを構築するための室内実験と、これを基にしたシミュレーションシステムの構築を行う予定である。重要な検討課題は以下のとおりである。

- ①  $\sigma' < p_c^*$ の範囲での $\epsilon - \sigma' - \dot{\epsilon}$ 特性の照査
- ②  $\sigma' > p_c^*$ の範囲での $\epsilon - \sigma' - \dot{\epsilon}$ 特性の照査
- ③  $\sigma' = p_c^*$ 付近における構造のゆるみの考え方

#### 参考文献

- 1) 今井五郎：アイソタック則に基づく新しい圧密理論とその適用方法／地盤工学会テキスト（圧密沈下予測の新しい考え方と手法講習会），2002。
- 2) Imai, G., Tanaka, Y., and Saegusa, H. : One-dimensional consolidation modeling based on the isotach law for normally consolidated clays, Soils and Foundations, Special Issues, 2003.