

# 圧密沈下の予測と対策工に関わる最近の動向

Recent Research and Development on Prediction and Countermeasures of Consolidation Settlement

大 島 昭 彦 (おおしま あきひこ)

大阪市立大学大学院准教授 工学研究科都市系専攻

## 1. はじめに

圧密とは、狭義には、透水性の低い飽和粘土が静的荷重を受け、間隙水を徐々に排出し、時間遅れを伴って沈下して密度を増加する現象をいう。すなわち、圧密では土の圧縮性（沈下量）と圧密速度（沈下に要する時間）の二つを扱うことになる。沈下予測はもちろんであるが、対策工もこの二つに対するものとなる。

ここでは、まず圧密沈下予測方法の分類を示し、室内圧密試験結果を原位置の粘土層に適用する際の問題点と最近の研究によるその解釈、および最新の圧密沈下予測例を示す。次に沈下対策工の最近の動向、最後に建築分野における動向を示す。なお、圧密沈下予測と対策工に関する最新の知見の詳細は、「土と基礎」に掲載された講座「実務のための圧密沈下予測とその対策技術」（2006.10～2007.3）を参照されたい。

## 2. 圧密沈下予測

### 2.1 予測方法の分類

事前の数値計算に基づく圧密沈下予測方法を表1にまとめた。これ以外に実測沈下量に基づく予測方法（双曲線法、浅岡法、他）もあるが、ここでは除く。

最も一般的な予測方法は、Terzaghi、三笠の熱伝導型圧密方程式（微小ひずみ圧密理論に基づく）の厳密解を当てはめる慣用計算法で、依然として実務で多用されている。これに対して、より一般的な圧密中の層厚変化と圧密係数  $c_v$  変化および自重を考慮できる有限ひずみ圧密理論（三笠、Gibson）があり、沈下量が大きい軟弱な粘土層の沈下予測に用いられる。しかし、これらの理論では粘土骨格の応力～ひずみ関係の時間依存性を考慮していないので、いわゆる二次圧密現象を表すことができない。これによって、室内圧密試験結果を原位置の粘土層に適用する際の問題点が生じている。

一方、二次圧密理論では粘土骨格の粘性を理論に組み

表1 圧密沈下予測方法の分類

予測方法	対象問題	具体的内容
慣用計算法	一次元	微小ひずみ理論（熱伝導型方程式）の厳密解
一次元圧密理論	一次元	有限ひずみ理論（三笠、Gibson）
二次元圧密理論	一次元	弾粘性理論、アイソタック則に基づく理論
多次元圧密理論	多次元	Rendulic 方程式、Biot 方程式、Barron 解
多次元変形解析	多次元	弾塑性、弾粘塑性構成式に基づく有限要素法

込むことによって時間依存性挙動を表現する。中でも圧縮曲線のひずみ速度依存性（アイソタック）挙動の解明が現在最もホットな話題となっている。

以上は、一次元に限定した圧密理論であるが、より一般的な多次元圧密理論がある。しかし最近、弾塑性、弾粘塑性構成式に基づく多次元有限要素法解析が行われることが多い。これでは圧密は結果として粘土骨格の圧縮変形として扱われる。

### 2.2 室内圧密試験結果の適用における問題点

原位置の粘土層の沈下量を算定する際に、我々は当たり前のように室内圧密試験で得た圧縮曲線を用いている。これはこの圧縮曲線上を原位置の粘土もたどるとして扱っていることになるが、本当にそうだろうか。

図1に段階载荷圧密試験による圧縮曲線と正規圧密領域の圧密曲線を重ねて示した。圧縮曲線は24 h 載荷後の点を結んだものであるが、そもそも圧密中の供試体の挙動はこの線上をたどっているだろうか？ 実はたどらない。なぜなら、一般に間隙水圧が消散して有効応力が一定となる過程が一次圧密（図中の圧密曲線の  $f_{100}$  まで）であるが、それ以降の二次圧密では有効応力一定のクリープ過程なので、二次圧密過程で圧縮曲線上を進むことはあり得ず、図の太点線のように一次圧密過程も含めて右に張り出していないと矛盾する。この圧縮曲線はあくまで供試体の24 h 載荷後の位置を表しているにすぎず、原位置の粘土層がその上をたどる保証は全くない。

もう一つ室内圧密試験による圧縮曲線を用いるときに悩ましい問題がある。図2に示すように、初期体積比  $f_0$  の供試体に対して圧密試験を行うと、過圧密領域でも必ず沈下が生じるので、得られた実験圧縮曲線上の有効土被り圧  $p_0$  に対する体積比  $f_{p_0}$  は必ず  $f_0$  よりも小さく

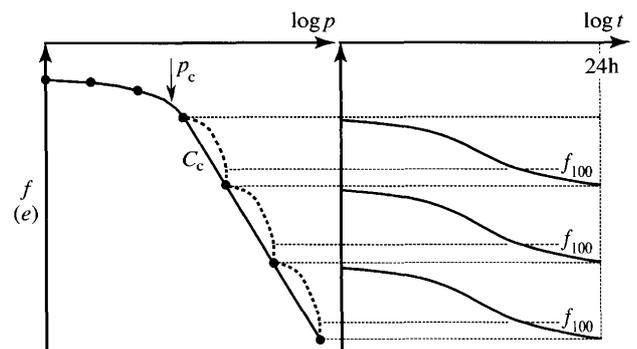
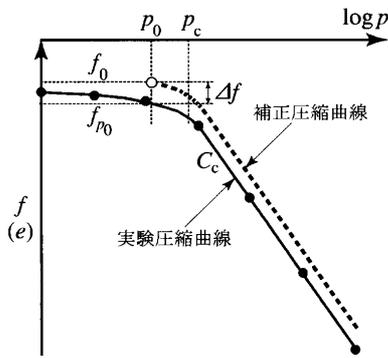
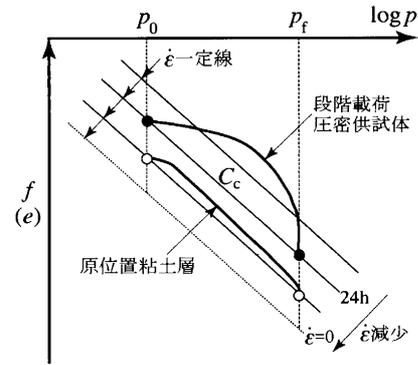


図1 段階载荷圧密試験による圧縮曲線と圧密曲線



図—2 実験圧縮曲線の補正方法の例



図—3 供試体と原位置粘土層の圧縮曲線の違い

なる。原位置の粘土は  $(f_0, p_0)$  で存在しているので、実験値と原位置で初期体積比が  $\Delta f (= f_0 - f_{p0})$  だけずれる。これは試料の応力解放と供試体作製時の乱れによるもので、特に前者は避けられない。この問題を解消するために、「土質試験の方法と解説」<sup>1)</sup>では、図—2の太破線のように  $\Delta f$  だけ実験圧縮曲線を上方に平行移動する補正方法が推奨されている（建築学会の建築基礎構造設計指針でも同様な補正法が採用されている）。この他に Shumertmann<sup>2)</sup>による古典的な補正方法もある。

圧密試験は模型実験であるため、層厚 2 cm の供試体の挙動から層厚 5~20 m (250~1000倍) 程度の原位置粘土層の挙動を予測するためには相似則が必要となる。一般的な Terzaghi, 三笠の熱伝導型圧密方程式では、沈下量に関して  $H$  則、沈下時間に関しては  $H^2$  則が適用できるが、原位置粘土層は粘土骨格の粘性と自重の影響などによってそのとおりにならない。そこで現行の二次圧密を考慮しない圧密理論の下では以下の解釈を行っている。まず、沈下に関しては先の 24 h 載荷の圧縮曲線をたどるとし、原位置粘土層の二次圧密は長期に及ぶ一次圧密中に含まれると考える。時間に関しては一次圧密のみで定義した圧密係数  $c_v$  を用いる。こうすると二次圧密を含む圧縮量に合わせるために  $c_v$  を補正する考え（三笠）が成り立つ。この  $c_v$  補正の必要性およびそれに伴う透水係数  $k$  の算定方法については、現在でも結論が得られていない。

### 2.3 最近の研究成果による解釈

図—1に示したように、一定荷重を受けた粘土供試体の圧密過程での経路は圧縮曲線上をたどらず、右へ張り出す。正確には、図—3に示すように、載荷直後はひずみ速度  $\dot{\epsilon}$  が大きく、粘土骨格の粘性による圧縮抵抗が大きいので右に大きく張り出し、降伏後さらに圧密し、一次圧密終了を迎えて有効応力一定の下で二次圧密に入ると解釈されている<sup>3)</sup>。この間  $\dot{\epsilon}$  は単調に減少していく。定ひずみ速度圧密試験から、 $\dot{\epsilon}$  が速いほど右側に、遅いほど左側に圧縮曲線が位置し、互いに平行になる ( $C_c$  が同じ) ことがわかっている。先の段階載荷圧密試験による圧縮曲線も 24 h 載荷後の  $\dot{\epsilon}$  一定線に対応する。これは、「土の応力~ひずみ関係がひずみ速度ごとに一義的に決まる」というアイソタック (Isotach) 則が成立することを表している。また、これにより圧密降伏応力

$p_c$  のひずみ速度依存性も説明できる。原位置粘土層の圧密時の  $\dot{\epsilon}$  は供試体に比べてかなり小さくなるので、図—3に示すように、その圧縮曲線は下側に位置することになる。

では、粘土骨格の粘性を組み込んだ最近の二次圧密理論では、圧密試験供試体と原位置粘土層の挙動の違いはどのように解釈されるだろうか。

今井によるアイソタック則に基づく二次圧密理論では、粘土層厚と荷重増分比に対する粘性効果が調べられており、層厚が小さいほど、粘土が高塑性であるほど、荷重増分比が小さいほど圧縮曲線の右への張り出しが大きく、二次圧密の割合が大きくなることが報告されている<sup>4)</sup>。逆に言えば、層厚が大きい原位置粘土層で荷重増分比が大きい場合には、右への張り出しは小さく、二次圧密も相対的に小さくなるため、現行の二次圧密を考慮しない予測方法でも大きな違いはないようである。しかしながら、荷重増分比が小さい（載荷圧力が  $p_c$  をわずかに超える）場合には粘性効果が大きくなるため、圧縮性 ( $m_v$ ) や圧密速度 ( $c_v$ ) は 2 cm 供試体による値よりもかなり大きくなり、補正係数を乗じることが必要と報告されている。

一方、この原位置粘土層の挙動を直接調べるために、粘土層の層別沈下と間隙水圧を細かいピッチで測定する試みが最近行われており、その結果から原位置圧縮曲線が求められ、圧密試験結果と対比され、同時に  $p_c$  のひずみ速度依存性が調べられている<sup>5)</sup>。特に擬似過圧密性を示す洪積粘土層（更新世の堆積粘土層）の挙動を探るためには貴重なデータになると思われる。

### 2.4 最新の圧密沈下予測例

関西国際空港島の圧密沈下予測が、現在最先端の取り組みと考えられる。昨年開港した 2 期島は水深 18~20 m で、直下には層厚 20~26 m の沖積粘土層と層厚数百 m に及ぶ洪積層が堆積しており、平均で 18 m の沈下量が予測されている<sup>6)</sup>。何枚かの層から成る洪積粘土層は地史的には正規圧密であるが、年代効果による構造発達によって擬似過圧密性を示すため、圧縮曲線は強いひずみ速度依存性と非線形性を示す。また、このような大深度の粘土層の圧密では、下部ほど荷重増分比が小さくなるので、先に述べた粘性効果が大きくなり、沈下予測が難しくなる。さらに、洪積粘土層の中間砂層が排水層に

なっていないことも問題を複雑にしている。

2期島の圧密沈下予測<sup>6)</sup>は、詳細な地盤調査情報データベース (DB) に基づいて地盤特性と圧密特性を忠実にモデル化し、通常の一次元弾塑性解析による「DBモデル」、最新の考え方である非線形な曲線形状の圧縮曲線と弾・粘塑性モデルを取り入れた「曲線モデル」と呼ばれる手法で行われている。両者とも現在までのところ実測沈下量と非常に良く整合している。ただし、詳細な地盤特性を忠実にモデル化すれば、通常の解析方法でも十分な予測精度を持つことは、自然地盤の不均質性を考慮することの重要性を示唆している。

### 3. 沈下対策工の動向

代表的な沈下対策工として、プレロード工法は沈下促進を、パーティカルドレーン工法は時間短縮を、サンドコンパクションパイル (SCP) 工法や固結工法は沈下抑制をねらったものである。

パーティカルドレーン工法として、サンドドレーン (SD)、プラスチックボードドレーン (PBD)、ファイバードレーンなどが挙げられるが、さらに、地下水位低下工法や真空圧密工法を併用すると、より圧密促進効果が大きくなる。最近の新しい技術として、浚渫粘土層を対象に先端をシールした PBD を打設して地下水低下工法を併用する工法では、沈下後にさらに浚渫粘土を投入できるので、処分場の延命化を図ることができる。また、真空圧密工法の技術が向上し、高い真空圧が保持できるようになっているが、さらに、先端をシールした PBD を用いる方式 (キャップ付ドレーン) は、シール部より上の粘性土を不透水層にできるので、気密シートを使わずに真空圧密を行うことができ、施工の省力化が図られている。

構造物の安定のためには、供用後の残留沈下を小さくするのが望ましい。対策工としてのパーティカルドレーンのピッチを小さくしたり、プレロードを大きく、載荷時間を長くすることによって残留沈下を小さくすることはできるが、初期費用と維持・補修費のバランスを考えて決めることが重要である。

### 4. 建築分野における動向

建築分野では、建築物の規模によらず、地盤の支持力と沈下性状を検討して、基礎形式や対策工を決めるが、実は圧密沈下の検討を最も必要としているのは、件数の最も多い戸建て住宅 (小規模建築物) である。土木分野では、対象土層をサンプリングして圧密試験を行い、その圧密特性を基に沈下予測するのが当たり前であるが、戸建て住宅ではこれが実施されないのが普通である。

建築学会は2008年2月に「小規模建築物基礎設計指針<sup>7)</sup>」を発行した。この指針では、「戸建て住宅の地盤調査にはあまりコストがかけられない」という認識の下、簡易な沈下量算定方法が示されている。すなわち、圧縮

指数  $C_c = 0.01 w_n$  ( $w_n$  は自然含水比)、あるいは体積圧縮係数  $m_v = 10^{-5} w_n^A$ ,  $A = 1.2 - 0.0015(\sigma_0 + \Delta\sigma/2)$  ( $\sigma_0$  は有効上載圧,  $\Delta\sigma$  は増加地中応力)、または  $m_v = 1/(52c) \sim 1/(80c)$  ( $c$  は粘着力) で求めてよいとしている。戸建て住宅では 5~10 cm レベルの沈下量を扱うので、むしろ土木分野よりも沈下予測の精度が要求されるともいえるが、やや乱暴な算定方法と言わざるを得ない。一方、対策工としては、直接基礎の沈下を防止するために、浅層混合処理、深層混合処理、小口径杭などの地盤補強工法を採る。その設計はスウェーデン式サウンディング試験結果を基に行うことが多い (先の  $c$  の算定も)。戸建て住宅を対象とする沈下検討や対策工については、地盤調査方法を含めて地盤工学会が今後取り組むべき課題と考えられる。

### 5. おわりに

圧密沈下予測の実態は、事前予測後に実測沈下量が観測されると、実測値に合わせるように圧密特性を見直し、予測を修正することが多い (その方がそれ以降の予測精度が上がるため)。事前予測が合わない原因は、用いた予測方法 (圧密理論) の不完全さである場合もあるが、自然地盤の不均質性にあることも多い。圧密沈下予測方法のうち、慣用計算法は少なくとも第一近似としてこれからも実務で使われると思われる。事後予測が必要ない純然たる沈下予測が望まれるが、やはり地盤の不均質性があるため、永遠のテーマなのかもしれない。

沈下対策工は、既に様々な手法が開発されているが、今後ともより効果的、効率的な工法の開発と合理的な設計方法の確立が望まれる。

### 参 考 文 献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, 第6編 第3章 土の段階載荷による圧密試験, pp. 379~380, 2000.
- 2) Shumertmann, J. H.: The undisturbed consolidation of clay, Tran. ASCE, Vol. 120, 1955.
- 3) 今井五郎：実務における標準的な圧密試験—その目的・役割と今後—, 土と基礎, Vol. 54, No. 2, pp. 18~21, 2006.
- 4) 今井五郎・森脇武夫・大向直樹：講座「実務のための圧密沈下予測とその対策技術 6. 圧密沈下予測の高精度化に向けて」, 土と基礎, Vol. 55, No. 3, pp. 43~50, 2007.
- 5) 長谷川憲孝・松井 保・田中泰雄・高橋嘉樹・南部光広：神戸空港海底地盤における洪積粘土層の原位置圧密挙動, 土木学会論文集 C, Vol. 62, No. 4, pp. 780~792, 2006.
- 6) Kobayashi, M., Furudoi, T., Suzuki, S. and Watabe, Y.: Modeling of consolidation characteristics of clays for settlement prediction of Kansai International Airport, Proceedings of the symposium on geotechnical aspects of Kansai International Airport, pp. 65~76, 2005.
- 7) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針, 第3章 地盤調査・3.3土質試験, pp. 46~52, 2008.

(原稿受理 2008.6.25)