

粘性土の圧縮と圧密に関する研究の現状と問題点

State-of-the-art Studies on the Compression and Consolidation of Clayey Soils

吉國 洋	Hiroshi YOSHIKUNI	広島工業大学教授
八嶋 厚	Atsushi YASHIMA	岐阜大学工学部助教授
清水正喜	Masayoshi SHIMIZU	鳥取大学工学部助教授
三村 衛	Mamoru MIMURA	京都大学防災研究所助教授
田中洋行	Hiroyuki TANAKA	運輸省港湾技術研究所室長

J. Frontard が粘性土の圧縮と圧密に関する研究発表を行なって以来 80 数年が経過し、数多くの知見が得られた。そして確かに多くの問題が解決されたけれども、また新しい問題が持ちあがり、ある意味で昏迷の度合いが深められた感がある。この昏迷から抜け出し、21 世紀に向けての圧密研究の有り様を討議するために、1995 年、広島で粘性土の圧縮と圧密に関する国際シンポジウム (IS-Hiroshima'95) が開かれた。本論文はその報告である。

シンポジウムは次の 3 つのテーマで行われた：

テーマ 1：粘性土の圧縮および圧密特性の測定

テーマ 2：粘性土の圧縮圧密挙動と圧密理論

テーマ 3：圧密沈下を伴うケーススタディー

また近年、幾度となく熱心な討論が行われているにもかかわらず、解決を見えていない問題がある。それはアイソタッチ (Isotache) 問題であり、この問題に特に焦点を当てた特別討議 (Consolidation Talk) が行われた。IS-Hiroshima'95 では、その他、圧密研究の現況報告や特別講演などいくつかの企画が実行されたが、ここでは上述の 3 テーマと特別討議の Consolidation Talk について報告することにした。

執筆者はそれぞれ次のようで、テーマ 1 を八嶋厚が、テーマ 2 を清水正喜と三村衛が、テーマ 3 を田中洋行が、そして Consolidation Talk を吉國洋がそれぞれ担当し執筆した。執筆の方針としては、IS-Hiroshima で討議された問題を中心に、できるだけ執筆者の個性を發揮し、圧縮と圧密の研究の現状を報告することにした。(吉國記)

(編集委員会注：本文中、引用文献が IS-Hiroshima'95 に所収の場合には著者名のみを、その他の文献の場合には著者名と発表年を記した。)

1. 特別討議：Consolidation Talk

1. Special discussion: Consolidation Talk

吉國 洋 Hiroshi YOSHIKUNI 広島工業大学教授



IS-Hiroshima の特別企画として行われた Consolidation Talk の話題提供者の G. Mesri と S. Leroueil の主張を紹介するとともに、それらの主張の問題点を検討した。

キーワード：圧密、一次圧密、二次圧密 (IGC: D-5)

1.1 はじめに

現在の慣用圧密沈下推定法では、周知のように線形弾性圧密理論に基づいて試験法や解析法が組み立てられている。そこでは、多くの粘土が何がしかのクリー

プ挙動を示すことは認めるけれど、排水に伴う粘土層の圧縮の遅延が卓越する一次圧密過程ではクリープは発生しないとして解析されている。一次圧密過程でもクリープは発生していると考えるのは自然であり、圧密研究が始まって以来の関心事でもあるけれど、慣用

圧密解析法では、弾性圧密定数を調整する事によってクリープの影響が処理され、これが圧密解析の重大な問題と見なされることはなかった。

しかし、1950年代末に広がったIsotacheの考え方は、粘土層の厚さの増加とともに、一次圧密沈下量も増加をしようとするもので、慣用圧密計算法の存亡に係わる重大事であった。そのため、圧密研究に大きな衝撃を与え、論争を巻き起こした。その論争が十分に落ち着いたまま、今日もお続けられている。その代表的論争者はG. MesriとS. Leroueilであって、前者は、一次圧密の沈下量が層厚によって変わらないと主張し、後者は変わると主張している。この二人の討論は幾度となく行われたけれど、明快な決着を見ていないし、周辺研究者にもどこに問題があるのか、十分伝わっていない。その点を明らかにし、圧密研究の方向づけをするために、国際シンポジウムIS-Hiroshimaの主要企画としてConsolidation Talkは企画された。ここでは、IS-Hiroshimaのプロシーディングス、Vol. 2に収録された二人の論文(Leroueil; Mesri et al.)を参照しながら、問題の所在を考えたい。

なお、同論文の式や図の引用においては、同論文の式および図面番号をそのまま用いた。そしてMesriならば、式(M-1)とか図M-1のように、Leroueilならば、式(L-1)とか図L-1のように表した。また紙面の制限もあってすべての図式を再掲できないので、代表的な図のみを掲げた。できるだけ同論文を傍らに置いて読んで頂きたい。

1.2 Mesriの主張

Mesriの主張はつぎのことに立脚している。すなわち、一次圧密完了時点(End of Primary, Mesriにならって以下EOPと記述する)の間隙比はある有効応力のもとで粘土層の厚さに関係なく一定であると見なせる。すなわち、そこには単一の圧縮曲線つまり間隙比と有効応力の関係が存在すると仮定した。この圧縮曲線をEOP圧縮曲線と呼び、室内圧密試験で決定することができるとした。

単一の圧縮曲線の仮定は粘土を弾性体と見なしたことと同義であり、一次圧密過程でクリープは発生しないことになる。しかし、Mesriは一次圧密過程でのクリープの存在を否定したわけではない。クリープは存在するけれど、EOP圧縮曲線は単一であると主張している。これは常識的に言えば、力学的矛盾である。ただ、圧縮曲線にEOPの修飾語が付くところに紛らわしさがある。そこで、不透明な部分を明らかにするためにMesriの論文(Mesri et al.)にしたがって検討したい。

Mesriは式(M-4)：

$$\frac{de}{dt} = \left[\frac{\partial e}{\partial \sigma'_v} \right]_t \frac{d\sigma'_v}{dt} + \left[\frac{\partial e}{\partial t} \right]_{\sigma'_v} \quad (M-4)$$

を構成方程式と呼び、この式を基本にして圧密過程を解析している。同式の右辺第1項は有効応力の変化に対応して生じる非時間依存性の増分であり、第2項は有効応力一定のもとでの時間依存性の増分である。

Mesriは同式の二つの微係数をパラメータと呼び、模型実験や現場実験から二次圧密係数や圧縮指数を参考にして試行錯誤法で決めている。こうして得られた結果が図M-13(a)から図M-16に示されている(図1.1参照)。こうして得られた二つのパラメータを使っの圧密解析結果は沈下量やひずみ速度などの実測値と極めて良好な一致を見た報告している。しかし、二つのパラメータは一定ではなく圧密の進行とともに変化するので、特定は容易ではないとも述べている。

そこで、Mesriが構成方程式(間隙比-有効応力-時間関係の意味で使われている)と呼ぶ式(M-4)は、基本的に全微分方程式であって、非時間依存性と時間依存性挙動をする現象ならどんな現象にも適用可能である。そして、同式を要素試験(試料内の応力やひずみ状態が一樣)結果に適用した場合には、同式が構成方程式になる可能性がある。しかし、Mesriが行ったように、模型実験(位置的に応力やひずみの状態が異なる)に適用したのでは、構成方程式は得られない。特に、一次圧密過程のように、排水という土の骨組み以外の時間依存性現象を併せもつ現象に適用すると、それは、ある特定の境界条件のもとにおける各位置と各時刻の微係数を決めたに過ぎない。得られた結果を普遍化し、異なった境界条件の圧密解析に適用することはできない。このことは、図M-15や図M-16が物語っており、各微係数の値は排水面付近の要素と非排水面付近の要素とで異なっている(図1.1)。同じ粘土でありながら、位置によって値が変わるとすれば、それは構成式のパラメータになり得ない量である。

Mesriは、得られたパラメータを使った解析結果と実測結果とを比較し、図M-11、M-12、M-17(a)、(b)およびM-18(a)、(b)に見られるように、両者はよく一致したとし、圧密解析の理論的確さを強調している(図1.2参照)。しかし、Mesriの行った操作は、実測データからある手法で二つのパラメータを抽出し、それをまた元の量に還元したに過ぎない。

上述のように、Mesriの主張の理論的部分は十分な説得力を持たないけれど、図M-1(a)、(b)、(c)や図M-10に示された多くの実験室や現場における観測データをも

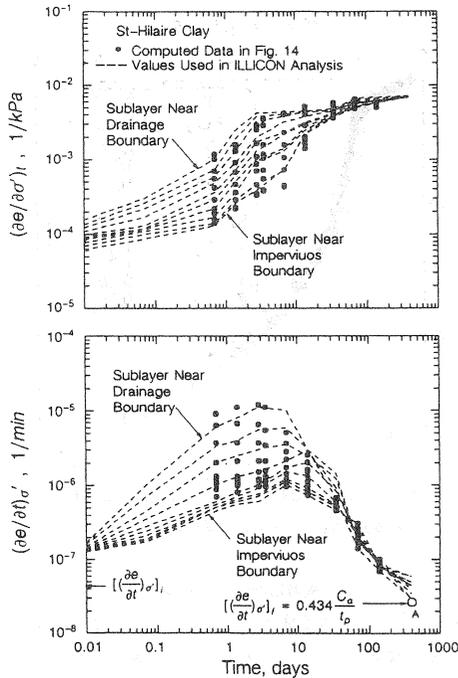


図1.1：圧力増分(97kPa→138kPa)に対する、一次圧密時の圧縮性パラメータ。Mesri et al.のFig.16.

とにした実証的説明は、慣用圧密解析法に致命的問題はないとするMesriの主張を十分に背首させるものであり、同調する研究者も多く、その工学的意義は大きい。

1.3 Leroueilの主張

Leroueilは主として実験室における知見をもとに、粘土の圧縮曲線はひずみ速度と温度に依存するとし、式(L-4)：

$$R(\sigma'_v, \varepsilon_v, \dot{\varepsilon}_v, T) = 0 \quad (L-4)$$

に見られるように、有効応力-ひずみ-ひずみ速度-温度にユニークな関係が存在するとし、また式(L-5)：

$$\sigma'_p = f(\dot{\varepsilon}_v, T) \quad (L-5)$$

および図L-1(a) (図1.3) に示されているように、圧密降伏応力はひずみ速度と温度によって決まるとしている。さらに、有効応力を圧密降伏応力で正規化すると、式(L-6)：

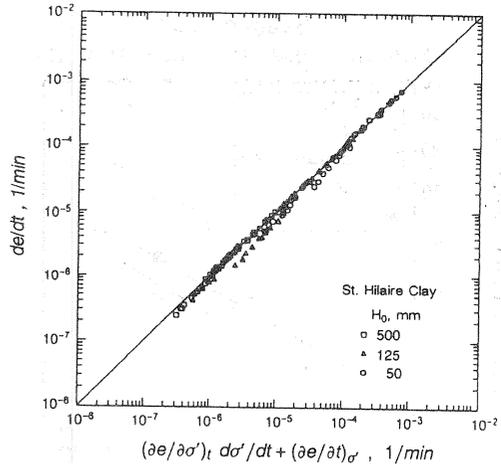


図1.2：構成式(M-4)の正当性を評価するための圧縮性データ；St.Hilaire粘土。Mesri et al.のFig.12.

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_p(\dot{\varepsilon}_v, T)} = g(\varepsilon_v) \quad (L-6)$$

および図L-1(b) (図1.4) に見られるように単一な圧縮曲線で表せることを示した。圧縮曲線に与える温度の影響は、Mesriの方で考えていないので、この議論から除外すると、上述のことは、それぞれ式(L-1)、(L-2)および(L-3)となる：

$$R(\sigma'_v, \varepsilon_v, \dot{\varepsilon}_v) = 0 \quad (L-1)$$

$$\sigma'_p = f(\dot{\varepsilon}_v) \quad (L-2)$$

$$\frac{\sigma'_v}{\sigma'_p(\dot{\varepsilon}_v)} = g(\varepsilon_v) \quad (L-3)$$

こうしたひずみ速度が圧縮曲線に与える影響を強く意識した取り扱い、聞く者に斬新な印象を与え、この考えに同調する研究者は多い。

ただ、これらの表式の拠り所である実験室データは十分に示されているけれど、式(L-1)から式(L-3)に見られるように、その具体的形が示されていない。式(L-1)を満たすレオロジーモデルは幾つか考えられるけれど、Leroueilがどのようなモデルを考えているのか具体的には明らかではない。結果として圧密方程式が見えてきていない。そのためか、Leroueilによる予測圧密沈下量はMesriのEOP圧縮曲線による予測沈下量との定性的相対比較の形で示されている。これでは他者がその妥当性を吟味するための議論に参加することはできない。ここにこの問題の議論が長引く理由が

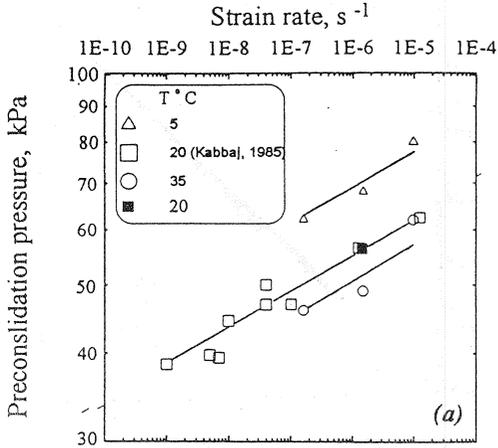


図1.3: ひずみ速度と温度の関数としての先行圧密圧力 (Berthierville粘土). LeroueilのFig.1(a).

あるように思える。厳しく言えば、一つの圧密理論として十分完結していない。早急に圧密方程式が提示され、両解析法の示す予測沈下量にどのような差があるのかが明らかにされねばならない。

1.4 あとがき

以上、MesriとLeroueilの主張を検討してきたが、Isotache問題に対する明快な結論に達することはできなかった。Leroueilの結論によれば、EOP圧縮曲線による方法は最小予測沈下を与え、Leroueilのひずみ速度を考慮した方法は最大の予測沈下を与えるという。これはLeroueilの結論をまっまでもないことであるが、現実にはその中間的沈下量が穏当な予測と考える。この点、現行の慣用圧密解析法で採用される圧縮曲線は、幾らかの二次圧密が含まれており、EOP圧縮曲線より幾分大き目の予測沈下を与えるので、現行の慣用圧密解析法による沈下予測に大きな齟齬を生じる可能性は小さいとの感触が得られた。

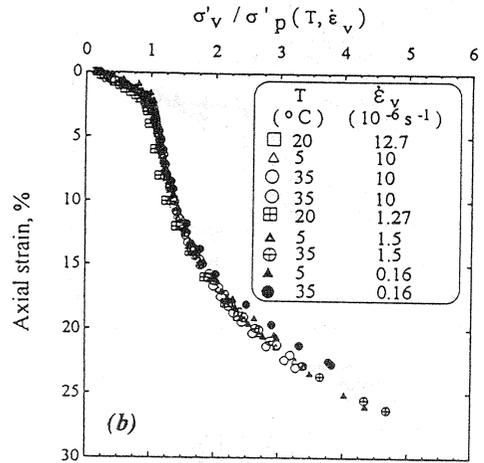


図1.4: Berthierville粘土における正規化された有効応力とひずみの関係. LeroueilのFig.1(b).

しかし、これは荷重増加率が1前後で、比較的急速に載荷されるケースで確かめられたことであって、荷重増加率が極端に小さいまたは大きい場合や漸増載荷の場合には、その適用性が十分確かめられているわけではない。さらには、一次圧密過程での部分除荷後の沈下予測などはこれからの問題である。こうした問題を幅広く解析するためには、Leroueilやその他の人々が主張するように、ひずみ速度を考慮した圧密理論とそれに付随する圧密試験法の確立が求められる。

参考文献

- Leroueil, S. (1995): Could it be that clays have no unique way of behaving during consolidation?, Proceedings of the Int. Symposium on the Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS- Hiroshima'95, Vol.2, Balkema, pp.1039-1048.
- Mesri, G., Shahien, M. & Feng, T.W. (1995): Compressibility parameters during primary consolidation, Proc. Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, IS-Hiroshima'95, Vol. 2, Balkema, pp.1021-1037.

2. 粘性土の圧縮および圧密特性の測定 (テーマ1)

2. Theme-1: Measurement of Compression and Consolidation of Clayey Soils

八嶋 厚 Atsushi YASHIMA 岐阜大学工学部助教授



本論文は、IS-Hiroshima におけるテーマ1「粘性土の圧縮および圧密特性の測定」において取り上げられた研究の現状を紹介するものである。総計 50 編の論文がテーマ1に採択されているが、それらすべての論文について言及することは紙面の都合上不可能であるので、重要と思われる項目のみを全く主観的に抽出して説明を加えた。

キーワード：粘性土、圧密、圧縮、室内実験

2.1 Oral Session の概要

Oral Session では、50 編の論文の中から 11 編が口頭発表論文として選ばれた。11 編の論文のキーワードを抽出すると、それらがそのまま 50 編全体の研究内容を説明しており、口頭発表論文として適切な選択がなされたことが理解できる。11 編の発表順にキーワードを列挙すると以下のようである。

- ・定ひずみ速度圧密試験 (Almeida et al., Matsuda & Nagatani)
- ・繰り返し荷重下の圧密 (Kono et al.)
- ・ピートの圧密 (Oikawa et al.)
- ・高圧力領域での圧密 (Al Mukhtar)
- ・圧密中の内部構造変化 (Sato et al.)
- ・クリープ挙動 (Thorsen)
- ・プレローディング (Kamao et al.)
- ・ドレーン材の効果 (Kitazume et al.)
- ・間隙水のマイグレーション (Sugie et al.)
- ・新しい実験装置の開発 (Zhusupbekov et al.)

口頭発表の後、session co-chairman の名古屋工業大学中井照夫教授より、「軟弱地盤の変形と破壊の予測の難しさ」と題するまとめがあった。中井はそのなかで、上記のキーワード以外に、予測すべき問題の境界条件の設定の難しさ、地盤の不均質性、地盤の異質性などを取り上げ、さらなる研究の必要性を強調した。

2.2 テーマ1に関する研究の現状

(1) 粘土の圧密挙動におけるひずみ速度・温度の影響標準圧密試験に代わって、定ひずみ速度圧密試験が行われている (Akagi & Komiya, Almeida et al., Matsuda & Nagatani, Yildirim & Okuden)。ひずみ速度が大きくなれば、得られる圧密降伏応力も大きくなる。この現象は、粘土骨格の粘性によるものだけでなく、間隙水の移動を伴う挙動として理解する必要

がある。定ひずみ速度圧密試験においては、供試体内の間隙水圧分布を放物線形状と仮定して平均的な有効応力を算定しているが、ひずみ速度がある程度大きくなると、みかけの圧密降伏応力近くでは、排水面近傍の間隙水圧分布がかならずしも放物線形状となっていないとの指摘もある (八嶋ら, 1996)。八嶋らは、熱弾粘塑性モデルを用いた定ひずみ速度圧密試験のシミュレーションにおいて (温度 5℃、ひずみ速度 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$)、図 2.2 の結果を得ている。間隙水圧分布の放物線形状を仮定して得られた見かけの圧密降伏応力 (81kPa) の付近では、供試体上面の排水境界近傍では、大きな有効応力が、また供試体底面の非排水境界近傍では、小さな有効応力が発揮されていることがわかる。粘土は正規圧密領域に入ると、圧縮性が大きくなるので、見かけの圧密降伏応力近傍では、供試体の上部と下部で圧縮性に大きな違いが生じる。このため、供試体内の間隙水圧分布が放物線形状でなくなる。また、Almeida et al. の指摘にもあるように、ことさらに小さいひずみ速度では、圧密挙動にクリープの挙動がかなり含まれてしまい、圧密降伏応力を過小評価してしまう危険性がある、したがって、採用できるひずみ速度には、粘土骨格の粘性と透水係数から当然適用範囲があるべきである。

温度を上昇させることにより (ただし 100℃までの議論)、粘土骨格および間隙水の粘性は低下する。したがって、同じひずみ速度のもとでも、高い温度環境においては、計測される圧密降伏応力は小さくなる (Akagi & Komiya, Moritz, Moriwaki et al.)。特に間隙水の粘性は温度に敏感で、たとえば温度を 5℃から 35℃に上げると、水の粘性は約半分ほど低下する。異なる温度環境下における定ひずみ速度圧密試験の結果を解釈するとき、粘土骨格の粘性だけに注目すべきではなく、実験そのものを間隙水の流れを伴う境界値問題としてとらえる必要がある。

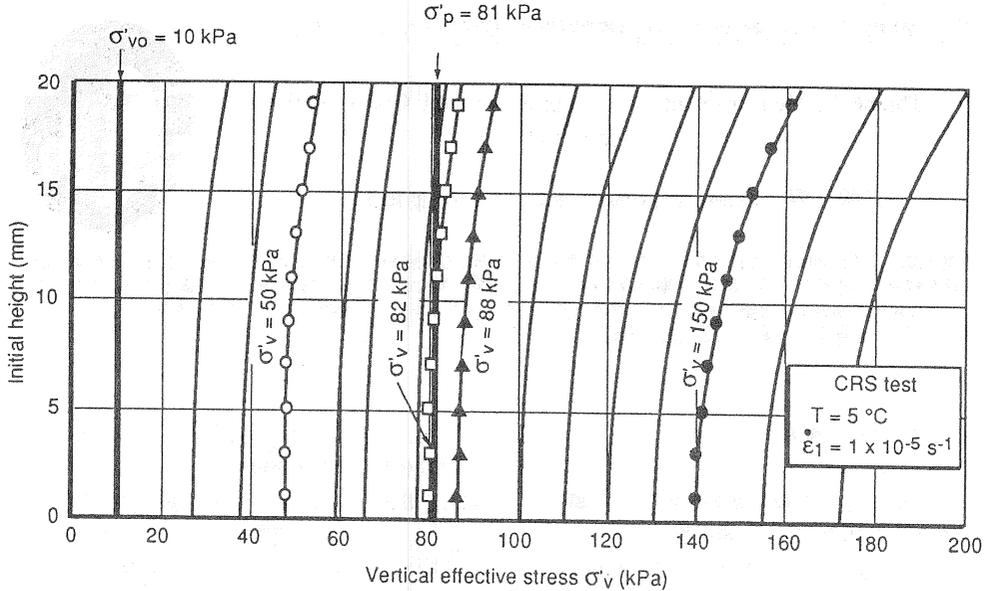


図 2.1 定ひずみ速度圧密試験による供試体中の鉛直有効応力分布の変化 (八嶋ら, 1996)

粘土の圧密挙動におけるひずみ速度・温度の影響を理解するために、図 2.2 を用意した。これは、Boudali et al. (1994) が、カナダの Berthierville 粘土を対象に実施した実験結果をとりまとめたものである。ひずみ速度の増加と温度低下にともなって、圧密降伏応力が増加していく様子がよく理解できる。このように、異なるひずみ速度、異なる温度のもとで圧密試験が可能となってきた。

(2) 特殊荷重下での圧密挙動

粘土地盤に作用する外力を考えると、地下水変動、地震、海洋波浪、交通荷重等の繰返し荷重も考慮する必要がある。本セッションにおいても、Kono et al.、Moriwaki et al.、Olivares & Silvestri、Takemura et al. が繰返し荷重下での圧密実験を紹介している。この研究の現状については、Yasuhara が本国際会議の

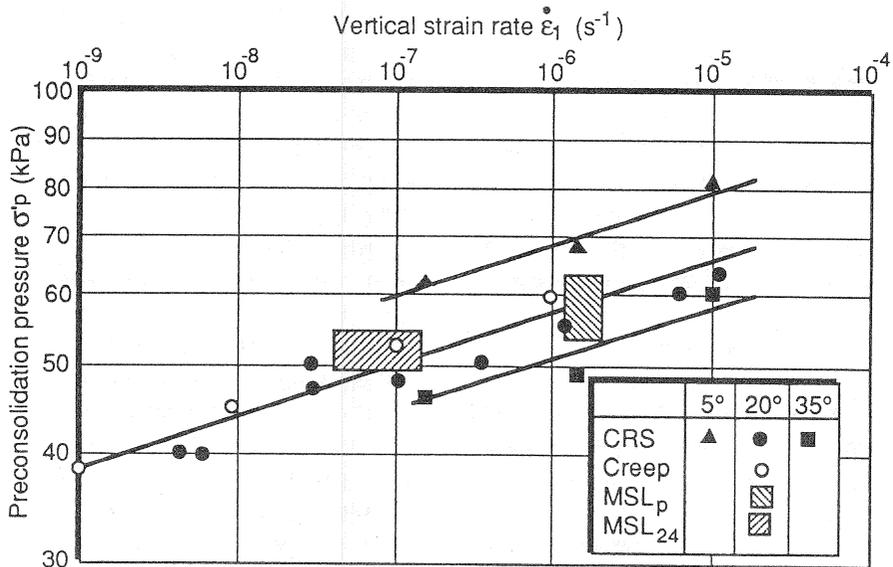


図 2.2 圧密降伏応力とひずみ速度・温度との関係 (Boudali et al., 1994)

State of the art report の中で詳しく議論している。Yasuhara のまとめを紹介すると以下のようである。

- 1) 繰返し荷重下での軟弱地盤の沈下は、2次元・3次元的な「破壊に至る」変形と、1次元的な「破壊しない」変形に分類して考えた方がよい。
- 2) 1次元沈下の予測においては、繰返し荷重下における二次圧密を考慮する必要がある。
- 3) 2・3次元変形の予測においては、二次圧密に加えて排水効果をどのように評価するか重要である。

放射性廃棄物貯蔵に関連して、非常に高い応力レベルでの圧密試験が実施されている (Al Mukhtar)。図 2.3 に不飽和カオリンの圧密試験の結果を示す。この図からもわかるように、10 MPa といった大きな応力のもとで圧密挙動の研究が実施されていることがわかる。日本においても、ポートアイランドや関西空港埋立の事例で周知のように、従来支持地盤と考えられていた洪積粘土の圧密挙動が注目されている。このような実験の実施においては、高応力レベルの実験が可能な装置の開発が必要となる。

(3) 新しい実験装置の開発

複雑な応力経路下の圧密挙動を把握するため (Bizzarri et al., Zhusupbekov et al.)、1次元圧密中の側方応力の変化を計測するため (Bouazza & Wood, Song et al.)、高圧力下の圧密挙動を把握するため (Al Mukhtar)、過圧密粘土のダイレイタンス特性を把握するため (Hattab & Hicher) に、多くの研究者がそれぞれの実験室において、装置の改良・開発を行っている。

供試体内の過剰間隙水圧が消散した定常状態では、圧密供試体に作用する鉛直荷重と鉛直変位の関係を用いて、要素試験としての応力-ひずみ関係が導かれる。しかしながら、過剰間隙水圧が残留する非定常過程においては、1次元圧密挙動は境界値問題となる。境界値問題を解析する手法の妥当性を検証するためには、鉛直荷重と鉛直変位だけの情報量では不十分であり、供試体内の有効応力・ひずみの分布、側方応力の変化といった従来計測されていなかった力学量の計測が重要となってくる。Song et al. は、図 2.4 にみられるような特殊な圧密装置を開発し、側方応力と間隙水圧

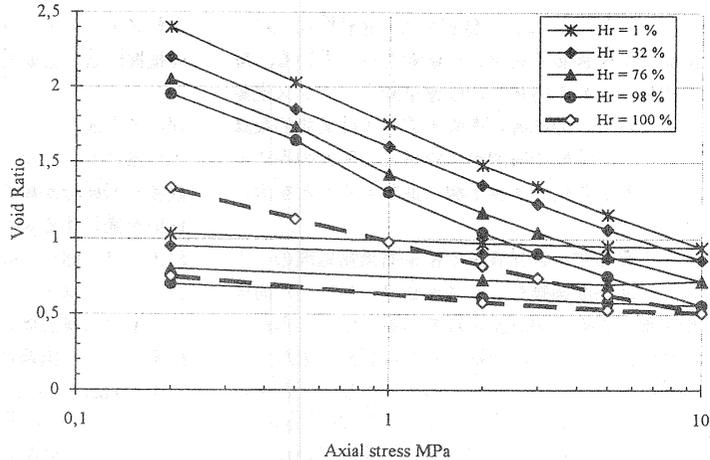


図 2.3 高応力レベルの不飽和カオリンの圧密試験結果 (Al Mukhtar)

の計測を試みている。共同研究者の軽部は、長期間にわたって実験装置の改良・開発に取り組んでいるこの分野の第一人者であるが、彼をもってしても、新しい力学量の高精度測定は容易でないようである。

(4) 特殊土の圧密挙動

従来、圧密に関する研究といえば、不攪乱もしくは繰返し沖積粘土に関するものがほとんどであった。本会議においては、これに加え、近年の社会的要請から、特殊土・産廃土に対する圧密問題への取り組みが紹介されている。

Matsuo および Oikawa et al. は代表的な特殊土であるピートの圧密実験を実施している。ピートは、非常に大きな二次圧密特性を有することが知られている。両研究ともこの二次圧密特性に焦点を絞った研究を展

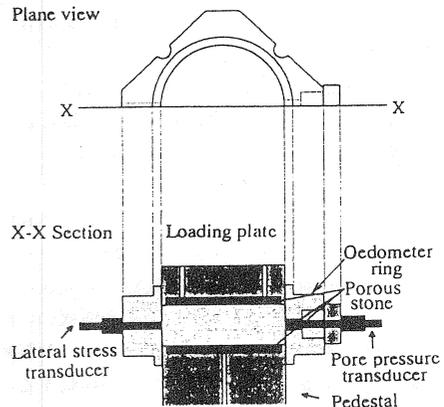


図 2.4: 側方応力と間隙水圧を計測するための新しい圧密装置 (Song et al.)

開している。Suzuki は、不飽和土の圧密特性について自ら開発した実験装置を用いた研究を行っている。地盤防災の観点から不飽和土の圧密挙動（コラプス現象等に代表される）の把握とそのモデル化は緊急的な課題である。この分野の研究が実験事実の把握のみにとどまらず、モデル化と実務予測に進展することを大いに期待したい。

日本のみならず、世界各国で産業廃棄物処理の一手法として、産業廃棄物もしくは家庭ゴミを用いた海洋埋立や谷部での埋立が実施されている。埋立てられた産業廃棄物は、いつしか地盤としての役割を果たすようになる。したがって、これらの人工地盤の圧密挙動を把握しておく必要がある。このような地盤においては、進行的沈下（あえて圧密という言葉を使わなかった）の予測と強度の増加といった力学問題を論じるだけでなく、人工地盤から放出される各種液体、気体等の物質の移動についても考慮する必要がある。この種の問題は地盤の力学と環境の相互作用の問題であり、今後の研究の進展が大いに期待される。Suthaker & Scott は代表的な産廃土の一つである廃油土のクリープ挙動に関する実験的研究を実施している。日本ではなじみの薄い廃油土であるが、圧密クリープの解釈には、従来の圧密理論が使われていることが興味深い。

(5) 圧密過程と内部構造変化

圧密の進行によって粘土の間隙が減少する。この巨視的な挙動は誰もが知っている。それでは、この過程において、粘土内部の個々の間隙はどのように形状変化し、粘土鉱物の組み合わせはどのように変化しているのだろうか。

Kate は、圧密中の内部構造変化を電気抵抗によって間接的に調べ、間隙の減少と電気抵抗の増加に一意的な関係があることを見いだしている。粘土供試体内部の間隙水の減少により電気抵抗が増大していくことは物理的によく理解できる。Kate は、電気抵抗といったマクロな情報だけでなく、走査型電子顕微鏡による内部構造情報と関連づけながら研究を進めている。今後の研究の発展が大いに期待される。

一方、Sato et al. は、水銀圧入法を用いた間隙径分布の測定を行っている。マクロな間隙というイメージではなく、間隙径分布、閉じた間隙、開放された間隙といった、ミクロレベルでの内部構造情報の収集を目指している。特に圧密によって、どのような間隙が圧縮され、またどのような間隙から水が移動するのが明らかとなれば、それらの情報はマクロな力学量へも反映されよう。二次圧密は、間隙水圧が消散した後継続する圧縮挙動である。このとき、粘土内部で何

が起きているのかを理解するためにも、内部構造変化の把握はぜひ必要である。

(6) その他

本会議においては、これら以外にも圧密実験に関する数多くの研究が紹介された。模型実験においては、相似則を満足する遠心力載荷装置を用いた研究が紹介されている (Hitachi et al., Takemura et al., Xie et al.)。また、プレローディング工法を用いた埋立・盛土の設計確立のための室内実験と沈下予測式の提案といった実務に直接結びついた研究も紹介されている (Kamao et al., Kassem et al., Yoshikuni et al.)。これらの研究の詳細については、本会議のプロシーディングを参照していただきたい。

2.3 おわりに

以上みてきたように圧密試験はどんどん高度化・緻密化している。従来要素試験と仮定して整理していた力学量に加え、実験中のさまざまな非定常な力学・物理量を計測しようとする機運がある。実験の緻密化は、「圧密は境界値問題である」という中井の主張を肯定化する方向に働くのであろうか。それとも、簡便的な実験式の精度向上を目指すのであろうか。個人的には、次のように考える。実務的には簡便沈下予測手法の改良がはかられ、研究的には境界値問題の解法の高度化がはかられ、最終的には両者が有機的に結びつく環境が整えばなど。

最後に、セッションサマリーとして行われた中井のまとめでは、「圧密は境界値問題である」という論点が貫かれている。これに興味のある読者は、Asaoka による Keynote Lecture を読まれるとよからう。そこでも終始一貫として、圧密は「土と水の連成問題である」とした議論が華麗に展開されている。

参考文献

- Proceedings of IS-Hiroshima'95, Vols.1 and 2 (Balkema, 1995)に所収の論文:
 Akagi, H. & Komiya, K.: Constant rate of strain consolidation properties of clayey soil at high temperature, pp.3-8.
 Al Muktar, M.: Coupling phenomena of hydraulic and mechanical stress in low porosity clays, pp.15-20.
 Almeida, M. S. S., Martins, I.S.M. & Calvalho, S. R. L.: Constant rate of strain consolidation on very soft clays, pp.9-14
 Asaoka, A.: Consolidation and swelling of saturated clay near/at critical state, pp.949-976
 Bizzari, A., Allersma, H.G.B. & Koehorst, B.A.N.: Preliminary tests on soft clay with a biaxial apparatus, pp.27-32.

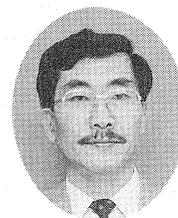
- Bouazza, A. & Muir-Wood, D. : Measurement of lateral stress in a hydraulic oedometer, pp.33-36.
- Hattab, M. & Hicher, P.Y. : Experimental study of the dilatancy in overconsolidated clay, pp.57-62.
- Hitachi, S., Shiomi, M., Ikeda, N., Kitazume, M. & Fukuda, N. : Centrifuge model tests of differential settlement on soft ground with underground steel-pipe piles, pp.63-68.
- Kamao, S., Yamada, K., Satoh, F. & Aita, K. : Characteristics of long-term resettlement of soft ground after removal of the preload, pp.75-78.
- Kasem, A.M., Pradham, T.B.S. & Imai, G. : The effect of preloading duration on control of residual settlement, pp. 79-86.
- Kate, J.M. : Consolidation and electrical resistivity behaviour of clays, pp.87-92.
- Kitazume, M., Hitachi, S., Shiomi, M. & Ikeda, N. : Field test on consolidation of improved ground by fabric packed sand drain, pp.249-254
- Kono, T., Ochiai, H., Omine, K. & Tukamoto, Y. : Consolidation behavior of clay under cyclic loading, pp.111-116.
- Matsuda, H. & Nagatani, T. : Consolidation tests with constant rate of loading by separate-type consolidometer, pp.123-128.
- Matsuo, K. : Secondary consolidation behavior of peat, pp.129-134.
- Moritz, L. : Geotechnical properties of clay at elevated temperatures, pp.267-272.
- Moriwaki, T., Yoshikuni, H., Nagai, O. & Nago, M. : Cyclic consolidation characteristic of clay reconsolidated at high temperature, pp.135-142.
- Oikawa, H., Vaid, Y.P. & Ishikawa, G. : Settlement rates during one-dimensional consolidation of peat, pp.149-154.
- Oliveiras, L. & Silvestri, F. : Observations on the pre-and post-cyclic compression and stiffness properties of a reconstituted high plasticity clay, pp.155-160.
- Sato, T., Sakuragi, N. & Kuwayama, T. : Characterization of pore size distribution affected by laboratory consolidation, pp.161-164.
- Song, L., Fujiwara, T., Karube, D. : Lateral stress and pore pressure behaviour in oedometer test, pp.177-182.
- Sugie, S., Iizuka, A. & Ohta, H. : Pore water migration during plane strain triaxial tests, pp. 189-194.
- Suthaker, N.N. & Scott, J.D. : Creep behavior of oil sand fine tails, pp.195-200.
- Suzuki, H. : Elasto-plastic behavior of unsaturated clay in suction-controlled oedometer tests, pp.201-204.
- Takemura, J., Okamura, M., Hiro-oka, A., Kimura, T. & Kawasaki, M. : Consolidation behaviour of soft clay overlain by sand under circular loading, pp.205-210.
- Thorsen, G. : Preconsolidation pressure and creep settlements - Estimations based on results of oedometer tests, pp.287-292.
- Xie, Y.L., Rao, X.B., Pan, Q.Y. & Zeng, G.X. : Centrifugal testing applied to consolidation behavior of soft clay ground under highway embankment, pp.217-220.
- Yasuhara, K. : Consolidation and settlement under cyclic loading, pp.979-1001
- Yildirim, H. & Okdem, F. : Constant rate of strain consolidation tests, pp.227-232.
- Yoshikuni, H., Moriwaki, T., Ikegami, S. & Nishiumi, H. : Rebound due to partial unloading and subsequent recompression behaviour in 1-D consolidation, pp.233-238.
- Zhusupbekov, A.Z., Jousoupbekova, V.V., Sarsekenov, M.E. & Amirchanov, E.A. : Laboratory tests of compression and consolidation of clayey undermining soils by new testing devices, pp.245-248.
- その他の論文：
Boudali, M., Leroueil, S. and Srinivasa Murthy, B.R. (1994): Viscous behaviour of natural clays, Proc. 13th ICSMFE, New Delhi, Vol.1, pp.411-416.
八嶋厚, 岡二三生, Leroueil, S. & Guntoro, I. (1996): 自然粘土の温度依存粘性挙動と一次元圧密特性, 第8回地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会中部支部, pp.79-84.

3. 粘性土の圧縮・圧密挙動と理論 (テーマ2)

— その1 —

3. Theme-2 : Consolidation Theory - Part 1 -

清水正喜 Mmasayoshi SHIMIZU 鳥取大学工学部助教授



Oral Session 2 において座長の提起した問題を紹介し、口頭発表論文の要約を述べる。次いで、テーマ2に分類された研究をキーワードで分類する。最後に、定ひずみ速度圧密試験の結果の整理法に関する私見を述べる。

キーワード：一次圧密, 二次圧密, 定ひずみ速度圧密試験, 有限変形, 圧密係数 (IGC : E5)

3.1 はじめに

Oral Session 2では、7編の論文が口頭発表された。

座長 (den Haan, Delft Geotechnics, Netherlands) が口頭発表に先立って、一次元圧縮・圧密の範疇における三つの問題を提起した。口頭発表後、副座長 (Indraratna, University Wollongong, Australia) が

口頭発表論文の総括をした。(経過および質疑応答の詳細はプロシーディングス第2巻(pp.1059-61)に記した)

テーマ2に分類された論文は50編ある。これらすべての論文に言及することは筆者の力量を越えている。本稿では、極めて限られた範囲の問題しか扱えないことを断っておきたい。

はじめに、座長の提起した問題とそれに関連する研究を紹介する。次いで、圧縮特性における年代効果について述べ、最後に定ひずみ速度圧密試験の問題点を指摘したい。尚、座長の提起した問題は written discussion としてプロシーディングス第2巻に記されている(den Haan)。

3.2 1次元圧縮・圧密に関わる三つの問題

座長は次の3つの問題についてコメントした：(1) $e-\log \sigma'$ 関係の非線型性の取扱い；(2) 一次圧密と二次圧密の用語法；(3) 応力-ひずみ-ひずみ速度関係に対する2つのアプローチ。

(1) $e-\log \sigma'$ 関係の非線型性の取扱い方と解釈

第1の問題は、 $e-\log \sigma'$ 関係が処女圧縮領域で非線型になる現象、換言すれば、圧密降伏応力 p_c を少し越えたところで $e-\log \sigma'$ 関係が下に凸になるような現象の扱い方とその解釈に関係している。den Haan は、次の関係：

$$f = f_1(\sigma'_v - p_s) - b \quad (3.1)$$

を用いることによって現象を線型化できることを主張した。ここに、 f は体積比、 f_1 、 p_s 、 b は土によって決まる定数。この式は現象を単に線形化するだけでなくパラメータが土の物理的性質を反映していることに意義がある。例えば、パラメータ p_s は土が脆性的でない場合には0、脆性を示す場合には正の値をとる。固結していない土、溶脱を受けていない土、ピート、有機質土などは脆性を示さないが、カナダの Champlain Clay、熱帯残積土、海成粘土などは脆性を示す。

非線型の圧縮曲線 ($e-\log p$ 曲線) は、一つのパラメータでは表現できない。しかし、通常、圧縮指数 C_c の一つの値で圧縮特性を評価する傾向がある。den Haan の考えは、三笠によって提唱された「高位の構造」、「低位の構造」の概念に通じており、構造の発達程度を定量的に評価できる点で有用だと思われる。Suzuki et al. らも、圧縮曲線の非線型性に注目し、 $p/p_c > 5$ の応力域での C_c はその土の物理的的性質であり、 $p/p_c < 5$ の領域の C_c はその土の構造と物理的性質を表すものと解釈している。

(2) 一次圧密と二次圧密の用語法

primary (一次) および secondary (二次) という言葉は文字通り解釈すると順序の意味を表すものであるので、本来の意味(即ち、一次圧密は有効応力の変化に起因する圧密、二次圧密はと有効応力が一定になってからの圧密)が適切に表現できるように、呼び方を変えてはどうかという提案である。いわゆる一次圧密に対して 'direct'、二次圧密に対しては 'secular' (または 'creep') という用語を推奨した (secular に対する適切な日本語が見あたらない)。なお、この用語は Buisman が第1回国際土質基礎工学会議で用いたとのことである。

現行の用語は確かに土質力学初学者の誤解を招く用語ではある。しかし、定着した用語でもあり、むしろ変更しない方が混乱を招かないのではないだろうか。

なお、Leonards & Dechamps も用語に関して混乱があることを指摘し、注意を促している。

(3) 応力-ひずみ-ひずみ速度関係に対する2つのアプローチ

時間依存型 (Viscid) 構成モデルとして応力-ひずみ-ひずみ速度関係の唯一性を仮定する場合、ひずみ速度を全ひずみ ('direct' と 'secular' の和) 速度とするか、それとも 'secular' のひずみ速度とするか、二つのアプローチがあるが、後者の方が適用性に優れているという主張である。

全ひずみ速度は一次圧密時のひずみ速度を含むので土の構成的性質以外の条件、例えば層厚など、を含んでいるから、構成関係の変数としてのひずみ速度はやはり二次圧縮速度に相当するひずみ速度が適切であろう。なお、Tang & Imai は、全ひずみ速度を用いて時間依存型構成モデルを定式化し、Isotache 問題を議論している。

時間依存型構成モデルを1次元圧密試験のデータに基づいて定式化する場合、全ひずみからクリープひずみを如何に分離して評価するかが重要な問題になる。例えば、一次圧密終了後の $e-\log t$ の直線性、即ち、二次圧縮速度 C_{α} を用いてクリープひずみ速度を評価することがよく行われるが (Trankjaer)、実時間に関するパラメータ (基準時間) が入ってくるので、取扱いが困難になる。

3.3 圧縮特性

不攪乱粘性土はその堆積環境(堆積期間、上載圧など)に応じた性質を有している。その性質のうち繰り返すことによって消滅する性質を広い意味で年代効果と呼ぶことにしよう。

1次元圧縮試験の結果得られる $e-\log p$ 曲線において圧縮指数が急に大きくなる時の圧密圧力をわが国で

は圧密降伏応力 (p_c) と呼んでいる。文字通り圧縮性に関して降伏 (圧縮抵抗が急減) する圧力であり、現象を忠実に表現した呼び方である。土が理想的な弾塑性体であれば、 p_c が先行圧密圧力 (p_0 ; 過去に受けた最大の圧密圧力) に等しくなるだろう。しかし、 p_c はその土の履歴 (堆積時間, 載荷速度, 載荷時間や温度) に強く依存していて、通常の不攪乱試料では $p_c > p_0$ となる (従って p_c のことを疑似 (pseudo) または準 (quasi) 先行圧密圧力と呼ぶこともある)。この現象は年代効果の一つである。

圧密降伏応力 p_c に及ぼす種々の要因に関するこれまでの研究が Leonards & Deschamp によって総括されている。Matsui & Sakagami は大阪層群を構成する粘土の p_c について地質学的な履歴を考慮して考察している。

先に述べたように、圧密圧力 p が p_c を越えたときに圧縮指数 C_c が急増して p が十分大きくなると C_c が次第に小さくなる。従って、 $e - \log p$ 曲線が下に凸になるような現象がみられる。この現象は繰り返して予備圧密して作製した試料を標準的な段階載荷の方法で試験したときには見られないので一種の年代効果である。 $e - \log p$ 曲線が下に凸になるのはその土が有している、圧縮に抵抗する構造が p_c 付近の荷重によって破壊されるためであると考えられている (Suzuki et al.; den Haan)

Fukue は堆積時に形成される $e - p$ 関係を統計力学の手法を援用して理論的に導いている。Tsuchida & Gomyo は、液性限界を主要なパラメータとする、 $e - \log p$ 関係の統一された形を提案した。また、 $e - \log p$ 関係には堆積時の波浪や潮汐の条件も影響すると述べている。Saxena et al. は、 C_c を推定するためにこれまでに提案された 18 個の経験式の適用性を検討している。Suzuki et al. は、経験式を用いて自然含水比または液性限界から C_c を推定し、実測値と比較することによって、試料の構造の発達程度を論じた。

3.4 定ひずみ速度圧密試験に関する問題

定ひずみ速度圧密試験は急速圧密試験の一つであり、我が国においても試験方法および結果の解析方法が標準化されている。テーマ 2 に分類された研究の中にもこの試験を実施している研究が多い。Suzuki et al. は圧縮・圧密特性における種々の要因の影響を調べるために行っている。また、Shimizu et al. と Moriwaki et al. は試験結果から圧縮・圧密特性を決定する方法を検討した。ここでは筆者の研究 (Shimizu et al.; Shimizu (1996)) に基づいて、定ひずみ速度圧密試験の問題点を指摘する。

我が国のみならず諸外国においても、Wissa et al. (1971) の理論と方法に基づいて、定ひずみ速度圧密試験の方法を規定している。Wissa et al. は三笠 (Mikasa,

1965) の導いた支配方程式を定ひずみ速度圧密試験時の初期・境界条件で解析的に解き、解の特性を利用して圧縮と圧密に関する試料の性質を決定する方法を提案した。

用いられた支配方程式は微小変形を仮定して定式化され、微分方程式の線形化のために c_v が一定と仮定されている。得られた解には、試験開始からある時間経過すると「定常状態」が達せられるという特性がある。定常状態ではひずみの時間的変化率が供試体のどの場所でも同じ (一定値) になる。この性質を利用して圧縮・圧密に関する性質が決定できる。微小変形の仮定が定ひずみ速度圧密試験時の挙動、特に定常状態の実現可能性と定常状態での間隙水圧挙動について、また圧縮・圧密特性決定のための基準方法の妥当性について述べたい。

微小変形の仮定は定ひずみ速度圧密試験時の挙動にどのような影響を与えるだろうか。微小変形の仮定を設けた場合と設けない場合 (有限変形) について、仮定した構成関係を有する土の定ひずみ速度圧密試験を有限要素解析によってシミュレーションした (Shimizu, 1996)。

図 3.1 に c_v 一定、 m_v 一定、 k 一定の構成モデルに対するシミュレーション結果を示す。図において q は軸方向圧縮応力、 d は鉛直変位、 p_0 は供試体底面間隙水圧である。図から、圧縮の極めて初期の間を除いて、微小変形を仮定した場合 (small strain) としない場合 (large strain) とで挙動が大きく違っていることがわかる。特に微小変形を仮定した場合にのみ p_0 が一定値になる現象が見られる。理論解では定常状態に達すると (m_v が一定の場合に) p_0 は一定になる。有限変形ではこの状態が見られない。なお、微小変形理論において c_v が一定であれば定常状態は達せられるが、そのとき m_v または k が一定でなければ p_0 は一定にならない。従って試験結果において定常状態を判断することができない (図 3.2)。

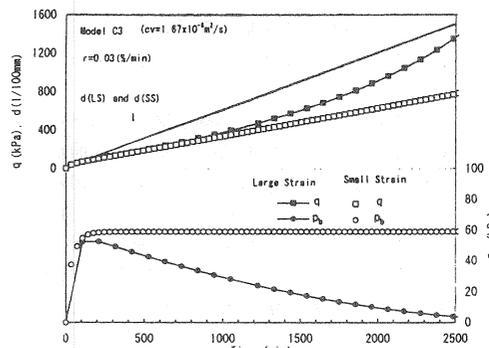


図 3.1: 定ひずみ速度圧密試験の数値シミュレーション結果。 c_v 一定、 m_v 一定、 k 一定構成モデル。(Shimizu, 1996)

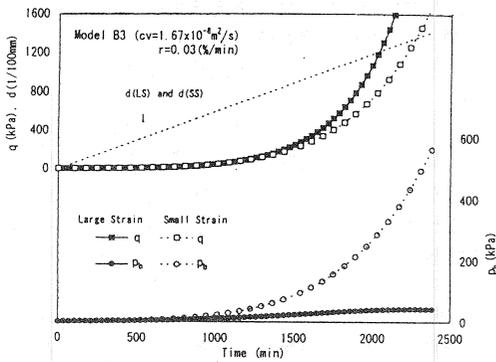


図 3.2: 定ひずみ速度圧密試験の数値シミュレーション結果. c_v 一定, m_v 変動構成モデル. (Shimizu, 1996)

基準で定められた方法で試料の真の圧縮・圧密特性 (c_v , m_v , k) を定めることができるだろうか. このような目的から, 仮定した構成モデルに対する有限変形数値試験結果を基準の方法で解析して圧縮圧密特性を決定し, 仮定した特性と比較した (shimizu et al.). 結果の一例を図 3.3 に示す. この例の構成モデルは図 3.1 のモデルと同じ性質を有している. 基準の方法で決定された c_v と k は, 有効応力 σ' が 10kPa を越えたあたりから仮定した c_v と k と異なっていることがわかる.

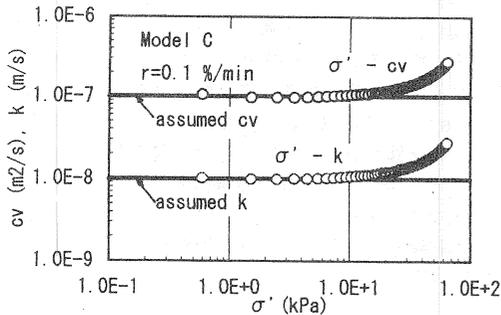


図 3.3: 定ひずみ速度圧密試験の数値シミュレーション結果から決定した c_v と k (Shimizu et al.).

以上のことから, ① c_v 一定の構成関係を有する土では微小変形の仮定を設けた場合にのみ定常状態が達せられる. 定常状態では, m_v (または k) が一定のときに p_b は一定になるが, m_v (または k) が一定でないときには p_b は一定にならない; ② c_v が一定であるような, 理論で仮定された性質を有する土でも, 微小変形を仮定した基準の方法では真の構成関係を推定することは困難である.

ここに示した問題の外に, 土のもつ真の時間依存性の性質 (viscid nature) の影響が未解明である. この影響は, 真の時間依存性を表現できる構成モデルを用い

た数値シミュレーション手法によって定量的な評価が可能となると思われる.

3.5 おわりに

Terzaghi の圧密理論が発表されて 75 年が経過した. この理論の適用範囲は限られている. 圧密に関する理論的研究の歴史は, Terzaghi 理論が適用できない問題を如何にして解くか, という目的のために行われてきたと言っても過言ではないだろう. 筆者は, 当初, 対象とする 50 編の論文を Terzaghi 理論で設けられた前提条件や仮定と照らし合わせて整理して紹介する構想を持った. しかし, 問題が余りにも多岐にわたっておりとても手におえるものではないことを悟った. その結果, 本稿のような非常に偏った内容になった.

最後に, 乱さない土の圧縮特性は繰り返し予備圧密して作製した試料のそれとは異なること, 定ひずみ速度圧密試験はまだ完成された方法とは言い難いことを強調しておきたい.

参考文献

- Proc. IS-Hiroshima'95, Vols.1 and 2 (Balkema, 1995)
 に掲載の文献
 den Haan, E. J.: Generalization of the stress, strain and time measures of soil compression, pp.513-518.
 den Haan, E. J.: Some remarks on consolidation theory, pp.1087-1090.
 Fukue, M.: Approach to compression law of soil, pp.321-328.
 Leonards, G. A. & Deschamps, R. J.: Origin and significance of the quasi-preconsolidation pressure in clay soils, pp.341-349.
 Matsui, T. & Sakagami, T.: Fundamental consolidation behavior of aged clay in relation to geological history, pp.531-536.
 Saxena, K. R., Ramaswamy, C. V., Ramanuja Swamy, A. S. & Srinivasulu, G. T.: Estimation of compression index using empirical relationship, pp.549-554.
 Shimizu, M., Narahara, T. & Umetni, A.: Scrutiny of a method for determining consolidation properties from CRS consolidation tests, pp.555-560.
 Suzuki, K., Hanzawa, H. & Tang, Y.: Evaluation of compressibility of aged marine clay, pp.587-592.
 Tang, Y. X. & Imai, G.: A constitutive relation with creep and its application to numerical analysis of one-dimensional consolidation, pp.465-472.
 Thuchida, T. & Gomyo, M.: Unified model of e-logp relationship with the consideration of the effect of initial void ratio, pp.379-384.
 Trankjær, H.: Deformation of a slightly preconsolidation clay soil, pp.373-378.
 Yoshikuni, H., Moriwaki, T., Ikegami, S. & Xo, T.: Direct determination of permeability of clay from constant rate of strain consolidation tests, pp.609-616.
 それ以外の文献
 Mikasa, M. (1965): Discussion, Proc. of 6th ISMFE, Vol.3, pp.459-460.

Shimizu, M. (1996): Large and small strain FE analyses of CRS consolidation tests of soft marine clays, Proc. of the Sixth Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Vol.1, pp.424-430.

Wissa, A. E. Z., Christian, J. T., Davis, E. H. and Heiberg, S.

(1971): Consolidation under constant rates of strain, J. Soil Mech. and Found. Eng. Division, Proc. ASCE, Vol.87, SM10, pp. 1393-1413.

4. 粘性土の圧縮・圧密挙動と理論 (テーマ2) —その2—

Theme-2: Consolidation Theory —Part 1—

三村 衛 Mamoru MIMURA 京大防災研究所助教授



本報文は IS-Hiroshima'95 における Oral Session 3 「粘性土の圧縮・圧密挙動と理論」において取り上げられた論文を中心としてこの分野の研究の現状を紹介するものである。本セッションでは7編が口頭発表論文として採択された。これら7編の論文は実行委員会がこの分野の研究を代表する価値の高いものとして採択したものであると考えられるので、ここではこの研究分野の現状を包括的に概観する、いわゆる State-of-the-art report の代わりに口頭発表された論文について個々に紹介することによって現況報告としたい。さらに圧縮・圧密に関わる工学的な問題と今後の課題について簡単に展望する。

キーワード：粘性土、圧密、圧縮、室内試験、沈下、(IGC : E5)

4.1 セッションの概要

テーマ2：粘性土の圧縮・圧密挙動と理論は51編の論文から成っており、さらに2つの Oral Session に分かれている。内容は多岐にわたっており、理論的アプローチ、室内実験に基づく研究、数値解析による研究が報告されている。取り扱われている材料を列挙してみると、通常の塑性的な粘性土の他に、超軟弱スラリー、浚渫スラッジ、ピート、鉾砕、亀裂性粘土、砂質粘土、膨脹性粘土など、硬質土を除くほぼすべての土を網羅していることがわかる。関係するすべての論文の内容について言及することは紙面の容量を越えているので、次章で Oral Session 3 で口頭発表された論文の概要とディスカッションの内容を簡単に説明することによって当セッションに含まれる研究の現況報告とする。なお個別の論文については論文集を参照されたい。

4.2 発表論文の内容とディスカッション

(1) Gonçalves

2つの Rheological Model が圧密理論を説明するために選ばれ、Cosipa 地域の練返した粘土に適用された。著者は「粘性ファクター」を考慮したモデルが最も粘土の挙動を正しく表現できると結論づけている。これ

に対して粘性パラメータ（この研究では n, b で表わされる）の合理的な決定方法についてのディスカッションが行われた。著者は理論曲線と実験結果をベストフィットさせる値をパラメータに与えることによって決定されるとしている。この種の問題は構成モデルと実験に関わる研究では永遠のテーマであり、どこまで合理的にパラメータを決定できるかが普遍的な構成モデル確立の鍵であろう。そのためには、やはり土の挙動のメカニズムを正しく評価する以外に近道はないということを再認識させる質疑応答であった。

(2) Hyodo & Yasuhara

長期繰返しせん断条件下における粘土の部分排水挙動を評価することを目的として、Terzaghi のモデルに Induced Pore Pressure の概念を導入したモデルを提案し、このモデルが部分排水条件下における粘土のせん断ひずみの変化と過剰間隙水圧の発生・消散過程を説明できることを示している。著者はこの結果に基づき、繰返し条件下における粘土の長期沈下、安定問題に対して提案モデルが非常に有用であるとしている。これに対するディスカッションとして、要素レベルの部分排水特性と現地盤における境界条件の関係が問題となった。室内要素試験に排水という境界条件に関わるファクターを導入することの是非と意味、さらには境界値問題としての圧密現象との関係をどのように説明す

るのが問われている現状が明らかとなった。

(3) Mikasa & Takada

三笠の圧密理論に基づいて、均質一様粘土地盤だけではなく、圧密パラメータが深度方向に変化するような地盤の圧密現象を説明できるような一般性を持ったモデルが提案された。特に圧密係数 c_v に着目している。現場計測結果によると、標準圧密試験から求めた圧密係数 c_v を用いて計算される圧密速度に比べて、実測沈下が早く進行するという報告が多い。著者はこの原因を原位置地盤においては高排水性の層が粘土層内に存在することにあるとしている。

(4) Sereviratne et al.

本研究は、鉋砕の圧密挙動を気候変動と排水条件をパラメータとしてパラメトリック計算を行ったものである。水の蒸発速度が鉋砕堆積物の物性に大きく影響し、この速度が小さいと地表面は柔らかいままであるのに対し、蒸発速度が大きいと表面に硬いクラスト層が形成される。著者は、これは主として蒸発速度が大きい場合に鉋砕堆積物表面近傍でサクションが大きくなることに起因するとしている。鉋砕は我が国ではあまり精力的に研究されているテーマとはいえないが、非常に細粒であるため圧密沈下が問題となるのは当然であるが、粒径からは液状化しにくい材料に属するにもかかわらず、液状化による被害事例が報告されており、動的性質についても十分な研究が求められる材料である。

(5) Matsui & Sakagami

地質的履歴関連した年代効果のある粘土の圧密特性について報告された。著者は特に圧密降伏応力に着目し、地盤の堆積曲線が非常に大きな影響を及ぼす要因であることを示している。また新たに定義された基準圧縮線（堆積曲線）の概念に基づいて年代効果を有する粘土の圧密降伏応力が説明された。これに対して、二次圧縮指数が応力状態、応力増分、実験方法によらず一定であるのかどうかという点がディスカッションの中心となり、一次圧密中に二次圧密が生じているのか否かという古くから議論されている問題を含めて、長期圧密の問題がまだまだ解決されてはいないことが明らかとなった。

(6) Parkin

速度法 (Velocity Method) は土の沈下～時間関係、圧密係数の評価に対して従来法よりも優れた手法であり、過剰間隙水圧速度、二次圧密特性といった現象も的確

に評価できることが報告されている。著者は排水境界近傍における高い有効応力の発生によって半径方向の圧密が生じ、それに起因する地盤内応力の不均質が引き起こされるという点に注目して議論を展開している。

(7) Wichman et al.

超軟弱な浚渫スラッジの土質パラメータを正確に把握するために、25kPaの水頭荷重を鉛直方向に作用させる圧密試験システムであるHYDCONによって高含水状態の粘土の応力ひずみ関係、透水係数～間隙比関係を実験的に明らかにしている。また有限ひずみによる解析手法であるFSConbagによって有限変形パラメータを設定し、浚渫スラッジのような流動性の高い材料の土質パラメータの合理的な決定と管理を行っている。

以上7編の口頭発表論文とそれに関わるディスカッションの内容について概説したが、粘土の堆積環境の重要性が論文と討議から指摘された。運搬されてきた粘土粒子が水中で堆積し、長い時間をかけて構造骨格を形作っていく中からその環境特有の物性が生み出されるため、特に年代効果を受けた粘土ではこの点を軽視できない。そうした意味からも高含水状態の超軟弱粘土の自重圧密特性、言い換えると堆積初期に該当する過程で粘土に何が起きているのかという問題が非常に重要な意味を持ってくると考えられる。セッションにこのテーマに関連する論文が散見されたのも至極当然のことであろう。

次に圧密に限らないが、土の応力ひずみ関係を規定する構成モデルに関する研究もいくつか報告されている。この分野における問題は、常に、実測された土の挙動をうまく説明しようとするあまりパラメータの数が増えていくという点である。パラメータを増やせば何とか実測値にフィッティングさせることができるが、そのパラメータの物理的意味があいまいであれば、載荷条件、境界条件などが変化に対してたちどころに整合性を失ってしまうことになる。室内要素試験レベルでさえこのような状態では、現場の問題に対して甚だ心許ない限りである。その意味で、Takadaの発表(前出(3))で指摘された従来法で求めた透水係数をそのまま沈下計算に用いると実測沈下の沈下速度に比べて遅れることが多いという事実も、透水係数を求める試験法の妥当性、地盤の不均質性も含めた現地盤材料と室内試験用試料との対応性、採取試料の品質など、原因となりそうな問題はいくつもあろう。目前の実測値へのフィッティングも意味が無くはないが、上記のような本質的な問題に対して真摯に応える姿勢が必要なのではないだろうか。

4.3 圧密に関わる問題点と工学的問題へのアプローチ

前章では本セッションで行われた口頭発表論文の概要と関連したディスカッションを紹介した。これら一連の議論から、未解決の問題、さらに今後問題になると思われるテーマについて筆者の考えを以下に述べてみたい。

(1) 超軟弱粘性土の力学特性に関する研究

圧密理論は粘土が形を保ちうる状態での変形、いわゆる塑性状態にある粘土の挙動を表現するものである。しかしながら、粘土は細かい粒子が長い時間をかけて堆積して生成された材料であり、その続成作用によって年代効果を受けた粘土は若齢粘土とは異なった性質を持つことが知られている。蔽密に言えば、自重堆積過程に起こる物理・化学的な反応によってその後の材料特性が規定されるわけであり、こうした観点に立てば、Matsui & Sakagami の論文（前出 (5)）にあるような、いわゆる基準堆積線といった概念が考えられるのは当然であり、Wichman et al.（前出 (7)）の論文で行われている浚渫スラッジの土質パラメータに関する研究や Sils による高含水状態の粘土の自重圧密特性の研究の重要性が再認識されるべきであろう。

(2) 構造骨格を有した洪積粘土の力学特性に関する研究

次に関西国際空港の建設に際して問題となった洪積粘土の長期沈下について考えてみよう。まず洪積粘土の物性を知る上で難しい問題は、これらの粘土が地盤のかなり深部に存在することがある。このため原位置における拘束圧が高く、サンプリング時に激しい応力解放が不可避である。応力解放を受けると粘土は膨張側に変形するが、引張に対して抵抗力のない粘土は容易に引張破壊してしまい、原位置の状態を保つことができない。こうしたいわゆる「破壊した試料」を使った試験では乱れの影響を強く受ける過圧密領域や降伏応力近傍の挙動を正しく再現できない。現在のサンプリング手法ではこの点が避けられないために、原位置における洪積粘土の特性を的確に評価できない可能性が高い。類似の材料として世界を見渡すと、カナダの後氷粘土が一つの候補となりうる。この粘土は氷河の後退によってできた過圧密粘土であり、やはり構造骨格が発達した材料であるという点で共通しており、幸いなことに地表面近くに存在するため、応力解放の度合いが小さいという利点がある。したがってサンプリング

時の応力解放による攪乱の影響が少なく、比較的原位置の状態を保った試料を採取することが可能である。こうした粘土の特性に関する研究 (Leroueil et al.) によれば、塑性降伏に至るまでは変形量が非常に小さいものの、一旦降伏すると間隙比の劇的な減少が生じ、降伏直後の $e - \log p$ 関係が下に凸の特異な形状を示すことがわかっている。これは構造骨格が塑性降伏によって著しく劣化し、大きな体積圧縮が生じるためであると考えられる。堆積年代が古く、続成作用を強く受けた洪積粘土もこのような特性を有していると考えられるので、応力解放の影響を除去できるようなサンプリング方法が開発されれば、室内試験によって原位置の応力ひずみ関係を正しく把握することができる。このために、新しいサンプリング方法、また原位置試験を用いる方法などブレイクスルーが求められる。

(3) 圧密は要素問題なのか／境界値問題なのか？

最後に圧密は独自の閉じた力学体系を持ったモデルなのか、境界値問題なのかという問題がある。従来要素試験として取り扱われてきた室内土質試験が、真に要素試験であるのかという問いかけが近年国内外からなされてきている。間隙比が変化しない非排水三軸圧縮試験でさえ、実験中に要素の内部で応力とひずみの分布が必ずしも一様ではないという研究成果も報告されており、せん断帯の発生や分岐問題を取り扱うために、室内試験を境界値問題として有限要素法によってシミュレートするのが当然のアプローチとして行われるようになってきている。こうした研究成果を踏まえた上で、水の流れを伴う圧密現象をどう評価するのかという点について各研究者間の真摯な議論が期待される。

4.4 おわりに

粘性土の圧縮と圧密をテーマとした IS-Hiroshima'95 は国内外から多くの研究者が論文とともに集い、活発で有意義な議論を戦わせ、この問題が未解決領域を多く有していること、そして世界各国で軟弱地盤の変形と安定問題が人々を悩ませていることを再認識させてくれた。古くて新しい問題である「圧密」の研究は一段と高度化・精緻化している。その一方で従来の枠組みでは対応できないような問題が現われ、理論の改良、新しい理論体系の模索が進められている。圧密研究の今後がどのような道をたどるのか、筆者にそれを的確に予測する力量はないが、いずれにしても、「圧密は要素レベルの問題なのか、それとも境界値問題なのか」という問いかけと、アカデミズムとプラグマティズムとの平衡感覚を意識しながら、高度で精緻な研究

を進めていくという姿勢が求められていることは確かである。

参考文献

Proc. of IS-Hiroshima'95, Vols.1 and 2 (Balkema, 1995) に掲載の文献

Gonçalves, H.H.S. (1995): A new method to determine the consolidation's settlement, Vol.1, pp.411-416.

Hyodo, M. and Yasuhara, K. (1995): Partially drained cyclic behavior of clay, Vol.1, pp.417-422.

Mikasa, M. and Takada, N. (1995): Nonlinear consolidation theory for non homogeneous soil layers, Vol.1, pp.447-452.

Seneviratne, H.N., Newson, T.A., Fahey, M. and Fujiyasu, Y. (1995): Some Factors influencing the consolidation behaviour of mine tailings, Vol.1, pp.459-464.

Matsui, T. and Sakagami, T. (1995): Fundamental consolidation behavior of aged clays in relation to geological history, Vol.1, pp.531-536.

Parkin, A.K. (1995): Consolidation analysis by the velocity method, Vol.1, pp.543-548.

Wichman, B., Thorborg, B., Greeuw, G., van Essen, H. and Opstal, A. (1995): Determination of consolidation parameters for sludge with different characteristics, Vol.1, pp.597-601.

Sills, G.C. (1995): Time dependent processes in soil consolidation, Vol.2, pp.875-890.

その他の文献

Leroueil, S., Kabbaj, F., Tavenas, F. and Bouchard, R. (1985): Stress-strain-strain rate relation for compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique, Vol.35, No.2, pp.159-180.

5. 圧密沈下を伴うケーススタディー (テーマ3)

5. Theme-3 : Case Histories and Their Implications

田中洋行 Hiroyuki TANAKA 運輸省港湾技術研究所室長



テーマ3で取り扱われている課題を6つに整理し、各課題に対する筆者の見解を述べた。

キーワード：圧密沈下、室内試験、沈下予測、(IGC : E5)

5.1 はじめに

この章の原稿依頼が来て、改めてテーマ3に寄せられた論文を読み直してみた。このテーマの論文には、筆者が羽田を実際に設計する際に感じた疑問、あるいは学生時代から今でも感じている、現在の圧密体系では説明できない不思議な現象が多々あることに改めて気が付いた。私なりに、テーマ3で取り扱われている課題を6つに整理した。

5.2 テーマ3で扱われた課題

(1) 無改良地盤の圧密沈下

無改良地盤の圧密沈下は、現在の設計方法から求められるよりも何倍も早いようである。本当に、直径 60mm 厚さ 20mm の小さな小さな供試体から、何十mもの層厚を有する実際の地盤の圧密現象を求めることができるのだろうか？

これに関するトピックスに、有名なサンドドレーン

無効論と有用論がある。これは、道路公団が行った試験盛り土の沈下データが発端であった。すなわち、ドレーンの打った改良区間と無改良区間とでは、沈下速度に違いが認められなかった。これによって、ドレーン無効論が陸側から出された。一方、海上工事ではドレーンが有効に働いているとの報告がなされ、海と陸とでドレーンの有効性を巡って論議が交わされた。これについては、ドレーンを打設していない所では、盛土による強度の増加が遅いので側方流動が生じ、見かけ上、沈下速度が速いとの解釈で決着をみた。しかし、このような二次元効果がなく一次元圧密とみなされる場合においても、無改良の場合には圧密試験から予測される沈下より早いとするデータが多い。その理由として、通常使われている試料の寸法では小さすぎて土の構造を表していないため、実際の地盤より圧密係数 c_v を小さく見積もるとの意見である。特に泥炭などを取り扱う場合にこの意見が強い。

室内試験の結果をあまり信用しないで、適宜沈下量を見ながら圧密定数を変える方法が実務の世界でしば

しば行われている。また、室内試験を始めから無視して解析を行っている論文も提出されている。しかし、地盤工学の王道ともいえるべき最終的な姿は、やはり室内試験のデータを使って、できるだけ沈下を予測していくという姿勢は忘れてはいけないと思われる。

(2) パーチカドレーン

逆に地盤改良を行うと、計算される沈下速度より遅くなる。その理由としてパーチカドレーンの打設によるスミアーが挙げられるが、どれほど実際の挙動を説明できるのか？

今回はこのスミアーに関する論文は一編であり、しかも圧密速度ではなくて沈下量に論点を置いている。しかし、圧密の分野において、このスミアーは永遠の課題であろう。

(3) 圧密沈下の数値解析

高等な構成方程式による地盤解析（数値解析に弱い人間のいやみ）を行うと、鉛直方向の沈下は何とかあわせることができるが、水平方向の変形はかなり大きく計算される。今使っている構成方程式に致命的な欠陥があるのではないかな？

近接施工が多い大都市では、鉛直方向の沈下とともに横方向の地盤の変形が大きな問題となる。この横方向の変形を予測する方法は、過去のデータを基にした経験的な方法以外は、今のところFEMによる数値解析しかない。しかし、この方法では鉛直方向の沈下は、地盤の定数をいじって”何とかあわせることができた”としても、横方向は著しく過大に計算されるのが普通である。この傾向はいかなるモデルに立脚した解析方法でも同様である。第三者としての私の感想は、“今使われているモデル（計算方法も含めて）で何か重要なこと、しかも極めて基本的なことを忘れていないか？”である。

(4) 圧密荷重が圧密降伏応力より小さい場合

圧密荷重が地盤の圧密降伏応力よりかなり小さい場合には、現行の設計方法では実際の沈下量をかなり大きく計算する。(1)の問題と関連して、現在の圧密試験がこの問題に対してどれほど有効なのか？

圧密降伏応力を越えるような場合の沈下の絶対量は、現在の設計方法でそこそこに見積もることができる。これは、多くの研究者にとって共通認識であろう。しかし、圧密降伏応力より小さな場合には、計算値が実際の値を大きく上回ることが多い。これは、圧密供試体端面の不陸により、沈下量を大きく見積もるためと

思われる。現在、微小ひずみ下での測定方法が著しい改善が見られ、圧密の分野にもその技術が取り入れられものと思われる。

(5) 繰り返し荷重による圧密沈下

現在の計算方法で算出すると、沈下量がわずか、あるいは生じるはずがないのに、実際にはかなりの沈下が生じ、しかもそれが長時間続くといった現象が我々の周りには多い。これを解明する理論として現在注目されているのに、荷重の繰り返し効果がある。すなわち、波や交通荷重による沈下である。しかし、これを沈下の原因とするには、変動荷重自体、非常に小さいのでピンとこないのが正直なところである、もう一つの答えは、昔から多くの研究者によって研究されている二次圧密である。これは、その現象が長時間に渡るため、未だ不明な点が多い。しかし、この方面に関するデータも蓄積され、新たな知見も得られている。

(6) 不同沈下

広大な地域を埋め立てる場合には、不同沈下が重要である。設計する側としては、どれほどになるかをラフな数字でもよいから知りたい。

絶対沈下量も大事であるが、多くの場合には不同沈下が問題となる。本来、地盤が一樣で圧密荷重および載荷時期が同じであれば、不同沈下は生じない。しかし、埋立時期の違いや地盤の非一様性のために、不同沈下が生じる。逆に、これら2つの条件だけで不同沈下が本当に生じるのか否かについても、おもしろい課題である。現在の不同沈下を予測する方法は、過去の事例を解析する方法や、確率論によるものがある。いずれにしても、このテーマは空港などの平坦性を要求される施設の建設にとって必要不可欠な技術課題である。

5.3 おわりに

言い訳がましいが、私は圧密の専門家ではない。圧密の問題に携わったのは、以前に羽田空港の沖合展開事業に設計の分野から担当したのと、私の現在の研究のテーマである原位置試験の観点からである。したがって、この章を書くに当たって、私の不勉強から生じた勘違いや、圧密の分野の研究者に対する注文めいた書き方になってしまったかも知れない。勘弁していただきたい。