

[討議・回答]

川崎 了
西 好一 共著
岡本敏郎

「圧密履歴を考慮した大深度堆積地盤の力学的特性に関する考察」への討議・回答

(土木学会論文集 No.589/III-42, 1998年3月掲載)

▶ 討議者 (Discussion) —

龍岡文夫 (東京大学)
Fumio TATSUOKA

本論文は、かつて無い大深度から堆積軟岩を採取して圧密試験・三軸圧縮試験等の室内試験を系統的に行った大変貴重な研究の結果をとりまとめている。しかしながら、各種の年代効果 (ageing effects) あるいは統成作用(diagenesis effects) が著しいと思われる堆積軟岩の変形・強度特性に対して「年代効果を含まない過圧密粘土の力学特性モデル」を適用している。このため、各種の地盤材料の力学特性を広く扱う際に重要な要因となる年代効果の意義が、背後に隠れてしまっている。

つまり、一度も浸食過程がなく機械的過圧密応力履歴を受けたことのない沖積粘性土でさえも、図-1に模式的に示すように、不攪乱試料を用いた室内での圧密試験では「現在の有効上載圧 σ_v' よりも大きい圧密降伏応力 p_c' 」が観察されるのが一般的である [例えは文献1), 2)]. 1.0を越える過圧密比 p_c'/σ_v' が得られるのは、原位置における年代効果、つまり

- a) 長期に亘る二次圧密による密度の増加 (compaction) (図-1での①→②の過程),
- b) セメンテイションがない場合で、密度の増加では説明できない何らかの年代効果による粒子構造の安定化による構造化 (structuration),
- c) 粒子間のセメンテイション (cementationあるいはbonding) による構造化,

の要因のためである、と理解されている^{1), 2)}。上記a)の要因は、「クリープ変形による塑性体積及びせん断变形の進行の要因」とも解釈できる。仮に要因a)だけが存在するとした場合、機械的に正規圧密された状態(図-1での②の状態)で現在の有効上載圧が $(\sigma_v')_{NC}$ である場合でも、圧密試験で観察される圧密降伏応力は $(p_c')^*$ (図-1での③) は、 $(\sigma_v')_{NC}$ よりも大きくなる (注: 圧密降伏応力 $(p_c')^*$ および

p_c' の値は、圧密試験でのひずみ速度等の試験条件に支配されるが、本討議ではこの点には触れない)。a), b), c) の全ての要因、あるいはa) とb) の要因が存在する通常の場合は、圧密試験で観察される圧密降伏応力は $(p_c')^*$ よりもさらに大きくなり、 p_c' となる (図-1での④)。浸食作用等により現在の状態が機械的な過圧密状態 (図-1での⑤の状態)にあり、現在の有効上載圧が $(\sigma_v')_{OC}$ である場合でも、上記a), b), c) の要因の影響を受けて、圧密試験で観察される圧密降伏応力は、過去に受けた最

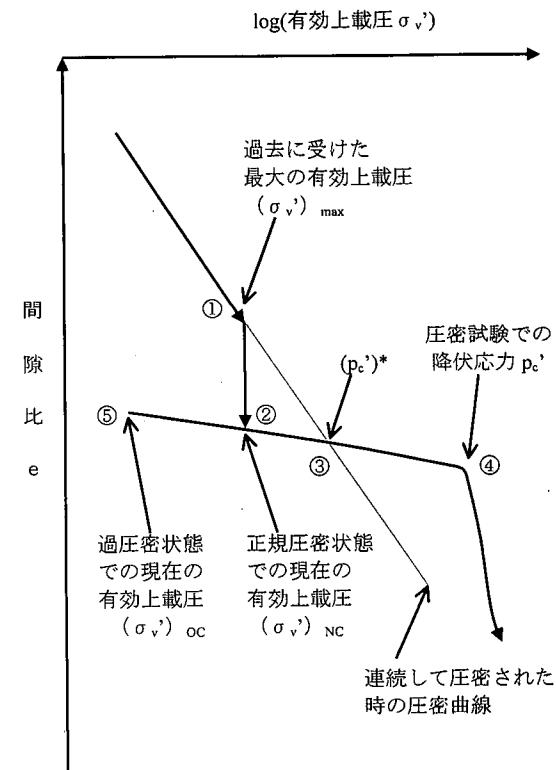


図-1 粘性土における圧密降伏応力の解釈

大の有効上載圧 (σ_v')_{max}よりも大きくなる。沖積粘土において要因c)が重要であるかは議論の分かれる所であるが、堆積軟岩ではこの要因は重要であろう。本研究対象の堆積軟岩においても、図-9、10に示すデータは、「現在の有効上載圧 σ_v' よりも小さい圧密応力状態 σ_c' では、非排水せん断強度に対する σ_c' の影響は小さく、 σ_c' がゼロに漸近したときの有効応力での真の粘着力係数はかなり大きいこと」を示している。事実、この堆積軟岩は大きな一軸圧縮強度を持っている。本論文中でも、「鹿島地点が袖ヶ浦地点よりも細粒分が多く、セメンテイションが発達しやすかった(83頁右欄下9-11行)」と述べている。これらの事実は、この堆積軟岩が大きなセメンテイションを持っていることを示している。

本研究では、100万年以上の地質年代を持ち、沖積粘性土よりも年代効果あるいは統成作用による構造化(特にセメンテイションによる構造化)の影響が室内試験でも明確に認識できる堆積軟岩を扱っている。また、年代効果による高密度化の影響も、小さくないものと思われる。しかしながら、このような堆積軟岩に対して、「1.0を越える過圧密比 $OCR = p_c'/\sigma_v'$ が観察されるのは、浸食過程による機械的過圧密応力履歴だけのためである、すなわち図-1で $p_c' = (\sigma_v')_{max}$ である」と想定している。すなわち、上記の沖積粘性土に対する解釈と本論文での堆積軟岩に対する解釈は異なっている。両者は、どのように統一できるのであろうか? Clayton and Serradre¹⁾によると、構造(structure)の影響は建設直後の盛土を除いた自然及び人工地盤で普遍的に観察できるものであり、構造を持つ土の圧密降伏応力 p_c' を過去に受けた最大の有効上載圧 (σ_v')_{max}と関連づけることはむずかしい。また Vaughan²⁾は、英國のジュラ紀の硬質粘土・軟岩の場合で、圧密降伏応力 p_c' が過去に受けた最大の有効上載圧 (σ_v')_{max}よりもはるかに大きい例を示している[文献2]のFigure 17]。

以上のことから推察すると、通常の堆積軟岩に対して、見かけの過圧密比 p_c'/σ_v' から過去の地盤の浸食深度を推定する場合は、現在の応力状態が実際に機械的な過圧密状態にあるにせよ、上記a), b), c)の三つの要因の影響を考慮する必要があると思われる。なお、上総層群の堆積軟岩の供試体を p_c' を越えて等方圧密して、その後現在の有効上載圧 σ_v' まで等方応力状態で除荷してから排水三軸圧縮試験を行った例がある(龍岡文夫ら³⁾、図-6参照)。室内で

上記のように機械的過圧密過程を与えたことにより高密度化したにも拘わらず、室内でこのような機械的過圧密履歴を与えない供試体の上記と同一の試験条件での三軸圧縮試験による変形・強度特性と比較すると、剛性も強度も大幅に低下している。このことは、変形・強度特性に対して、セメンテイションを伴う構造化とセメンテイションを伴わない機械的過圧密は異なる過程であることを示している。

本論文図-13は、異なる深度から得られた堆積軟岩の供試体を、それぞれの深度での有効上載圧 σ_v' で等方圧密した圧密非排水三軸圧縮試験から得られた非排水せん断強度 C_u を用いて、 C_u/σ_v' を見掛けの過圧密比 $OCR = [圧密試験での圧密降伏応力 p_c'] / \sigma_v'$ に対してプロットしたものである。同一深度の供試体に対して OCR を変化させたときの挙動も、このようになると仮定している。しかし、過圧密状態でも有効応力での真の粘着力係数は実質的にゼロであるセメンテイションの無い粘性土と同様に、堆積軟岩の変形・強度特性を、 $OCR = p_c'/\sigma_v'$ を変形・強度特性のパラメーターとしてモデル化すると、種々の問題が顕在化すると思われる。例えば、有効拘束圧 p_c' がゼロでも、堆積軟岩の地盤は相当な自立高さを持つことを説明できない。したがって、図-13のプロットは、セメンテイションの無い地盤材料と有る地盤材料では、同一にはならないはずである。たとえば、同一の深度から得られた複数の供試体を用いて、過圧密比 $OCR = p_c'/[圧密非排水三軸圧縮試験での圧密有効拘束圧 p_c']$ を変化させ、強度増加率 C_u/p_c' を求めたとする。この場合、セメンテイションの無い過圧密粘土では、 p_c' をゼロに漸近させ OCR を無限大に近づけて行っても C_u もゼロに漸近するので、 C_u/p_c' は有限の値に漸近して行くはずである。一方、セメンテイションがある堆積軟岩の場合は、 p_c' をゼロに漸近させ OCR を無限大に漸近させても、 C_u は有限の大きさなので C_u/p_c' も無限大に漸近してゆくはずである。このことは、一軸圧縮試験の結果を $p_c' = 0$ でのデータと解釈してプロットしようすれば明らかであろう。

以上まとめると、堆積軟岩を「機械的に超過圧密され、かつ構造の影響の無い粘土」と仮定して、その変形・強度特性をモデル化すると、種々の問題が顕在化すると思われる。特に、有効拘束圧がゼロに近づいた場合の変形・強度特性を推定する際に。本論文でも結論の直前で、堆積軟岩の変形・強度特性の評価にはセメンテイションが重要なことが、述べ

られている。近年、地盤材料の変形・強度特性のモデル化における年代効果・統成作用による高密度化・構造化の影響の重要性が強く認識されている。この点の研究は、一次元圧縮特性に対して進展している。しかしながら、せん断試験による詳細な力学的研究は、意外に進んでいないのが現状であると思われる⁴⁾。

参考文献

- 1) Clayton, C.R.I. and Serradice, J.F. : General Report, Session 2: The mechanical properties and behaviour of hard soils and soft rocks; Geotechnical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks, Balkema, Vol.3, pp.1839-1877, 1997.
- 2) Vaughan, P.R. : Engineering behaviour of weak rock:

Some answers and some questions; Geotechnical Engineering of Hard Soils and Soft Rocks, Balkema, Vol.3, pp.1741-1765, 1997.

- 3) 龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一: 堆積軟岩の変形特性－研究展望, 土木学会論文集, No.561/III-38, 1-17, 1997.
- 4) Tatsuoka, F., Jardine, R.J., Lo Presti, D., Di Benedetto, H. and Kodaka, T. : Characterising the Pre-Failure Deformation Properties of Geomaterials, Theme Lecture for the Plenary Session No.1, XIV IC on SMFE, Hamburg, September 1997, Vol.4, pp.2129-2164, 1999.

(1998. 5.12受付)

►回答者 (Closure)——川崎 了 (大阪大学)・西 好一 (電力中央研究所)・岡本敏郎 (電力中央研究所)
Satoru KAWASAKI, Koichi NISHI and Toshiro OKAMOTO

1. はじめに

まず最初に、著者らの研究に対して貴重なご指摘をいただいたことに対し、討議者ならびに論文集編集委員会に厚く感謝の意を表する。

さて、討議者からご指摘をいただいた内容、すなわち「通常の堆積軟岩に対して、見かけの過圧密比 ρ_c' / ρ_o' から過去の地盤の浸食深度を推定する場合には、現在の応力状態が実際に機械的な過圧密状態にあるにせよ、a) 長期に亘る二次圧密による密度の増加、b) セメントーションがない場合で、密度の増加では説明できない何らかの年代効果による粒子構造の安定化、あるいは構造化、c) 粒子間のセメントーションによる構造化、の3つの要因の影響について考慮する必要がある。」に関して、討議者からの議論の中心が、特にc) にあるものと解釈して、著者らの見解を述べさせていただきたい。

2. 指摘事項についての著者らの見解

ご指摘の通り、堆積地盤(堆積軟岩)の強度・変形・圧密特性の評価に関しては、圧密圧力の載荷、除荷といった機械的な圧密履歴だけでなく、セメントーションなどの年代効果に関する影響も考慮することが重要であり、この点に関しては本論文の結論の直前に述べている通り、著者らも十分に認識してい

る。しかしながら、本論文をあえて機械的な圧密履歴のみに限定して記述を行ったのは、主に以下のようない理由によるものである。

- (1) 堆積年代および粒度分布の面から、力学的特性に関与するセメントーション効果が比較的小さいと判断した。
- (2) 強度・変形特性に関しては、特に応力～ひずみ関係において比較的明瞭な拘束圧依存性が見られた。
- (3) 過圧密比および強度増加率の深度分布を、できるだけ簡単な力学パラメータによって表現したかった。すなわち、単に機械的な圧密履歴によって堆積地盤(堆積軟岩)が過圧密状態になったとする最も簡略化した仮定によって、どこまで圧密・強度特性の深度分布が表現できるのかを論文中で示したかった。
- (4) 深度500～600mの大深度堆積地盤(堆積軟岩)よりコアを採取することによる、応力解放に伴うセメントーション効果の低下が予想された。

以下に順を追って、上記(1)～(4)に関する補足説明をさせていただきたい。

最初の(1)に関しては、本論文で対象とした袖ヶ浦、鹿島の両地点の地盤が、東京湾の東側に分布する一軸圧縮強度 q_u が約1～40kgf/cm² (約0.1～4 MPa) の砂質～シルト質の堆積地盤(堆積軟岩)であ

り、例えば袖ヶ浦地点の場合には約10~40万年程度の地質年代と推定される^{1,2)}。一方、土丹と呼ばれる東京湾の西側に広く分布しているシルト質~泥質の堆積軟岩は、関東地方に分布する堆積軟岩の中でもセメンテーションが比較的よく発達している³⁾。討議者を含む研究グループが対象とされた神奈川県相模原市の堆積軟岩(泥岩)は、この土丹の一種と考えられるが、この相模原の堆積軟岩(泥岩)の地質年代は約150万年であり⁴⁾、著者らが対象とした堆積地盤(堆積軟岩)と比較して古いものである。よって、袖ヶ浦、鹿島の両地点における堆積地盤(堆積軟岩)に関しては、セメンテーションの効果が堆積地盤(堆積軟岩)の力学的特性に関与する割合が比較的小さいと考える。

次の(2)に関しては、セメンテーションの効果が十分に発達している堆積地盤(堆積軟岩)の場合、すなわち、見かけの過圧密状態においては、三軸圧縮試験による強度・変形特性の拘束圧依存性がない、あるいは非常に小さいと考えられる。しかし、本論文中の図-7および図-8に示した応力~ひずみ関係からは、強度・変形特性に関して比較的明瞭な拘束圧依存性が存在することが知られる。

統いて(3)に関しては、実は本論文の執筆を開始する以前において、機械的な圧密履歴だけでなくセメンテーションを考慮した圧密・強度特性の深度分布に関する検討を実施していた経験がある。その概要は、次のようにある。圧密履歴とセメンテーションの両方を考慮して、堆積地盤(堆積軟岩)の例えれば過圧密比 $OCR = p_c' / \sigma_v'$ を表現した場合には、本論文の87ページの式(9)は、例えば次のような関係式を仮定して表現することができる。

$OCR = (p_c' + C(Z)) / \sigma_v' = (Z + Z_i + C(Z)/\gamma_i') / Z$

ここに、 $C(Z)$ はセメンテーションの効果による、機械的な圧密履歴による p_c' からの增加分であり、ここでは暫定的に深度 Z のみによる任意の関数として表現している。また、 γ_i' は地盤の水中単位体積重量である。しかしながら、 $C(Z)$ を簡単な直線式と設定して、例えば

$$C(Z) = a \cdot Z + b \quad (a, b \text{ は定数})$$

と仮定すると、この直線式の物理的な意味や定数 a および b の決め方など、関数 $C(Z)$ の設定方法に関して著者らはその時点において適切な方法を見出すことができなかつた。さらに、今後さらに検討を要するパラメータとして残されている浸食量 Z_i に加えて、この $C(Z)$ までも任意の関数式を設定して、本論文において言及する段階にまで至っていないと判断したのである。したがって、今回の論文では、単に機

械的な圧密履歴によって堆積地盤(堆積軟岩)が過圧密状態になったと仮定することで、どこまで堆積地盤(堆積軟岩)の圧密・強度特性の深度分布が表現できるのかについて考察した内容までに留めておくこととした。

最後の(4)に関しては、一言で換言すればサンプリングによるコアの乱れと表現することができる。コアに含まれているセメンテーション効果の大小を定量的に示す力学的指標の1つとして引張強度が考えられるが、一般的には堆積軟岩の場合で圧縮強度の約1割程度である⁵⁾。すなわち、本論文で対象とした堆積地盤(堆積軟岩)の一軸圧縮強度 q_u が約1~40 kgf/cm²(約0.1~4 MPa)であることから、引張強度は約0.1~4 kgf/cm²(約0.01~0.4 MPa)と推定される。一方、コアの採取深度は500~600mであることから、コアの採取に伴う応力解放は、有効土かぶり圧に換算すると約40~50 kgf/cm²(約4~5 MPa)となる。応力解放によって解放される応力と、一軸圧縮強度 q_u から推定される引張強度との比較を試みれば、コア内部のセメンテーション物質が損傷を受け、セメンテーションの効果が低下していることが推定される。よって、本論文のコアを用いたセメンテーションの効果に関する定量的な評価が、あまり意味をなさないことは容易に理解される。

以上、機械的な圧密履歴のみに限定して本論文を記述した理由について述べさせていただいたが、今回の討議者からのご指摘は、討議者からの温かい励ましのお言葉と理解して、今後とも継続して研究を実施する予定である。

3. 今後の研究について

著者らは、堆積地盤(堆積軟岩)の強度・変形・圧密特性の評価に際して、セメンテーションの効果を含めた関係式によりモデル化する必要性は十分認識しているつもりである。今後はさらなる検討を加え、セメンテーションの効果を含めた堆積地盤(堆積軟岩)の圧密・強度特性の深度分布の近似式について、次の論文紙面上において報告したいと考えている。一方、堆積地盤(堆積軟岩)の強度・変形・圧密特性におけるセメンテーションの効果を定量的に調査するための新しい調査・試験方法に関しては、今後とも工夫を重ねて検討をして行く予定である。

最後に、討議者に貴重なご指摘をいただいたことに対して、重ねて感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 成瀬 洋：第四紀，岩波書店，1982。
- 2) 徳橋秀一，遠藤秀典：姫崎地域の地質，地域地質研究報告（5万分の1図幅），地質調査所，1984。
- 3) 川崎 了，西 好一：深部堆積軟岩の圧密特性，第28回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1383～1384，1993。
- 4) 越智健三：大深度地下空洞の掘削と原位置挙動・原位置試験・室内試験による堆積軟岩の変形特性，東京大学学位論文，1994。
- 5) 例えば，国鉄技研地質研究室：日本産岩石の物性値の総括，鉄道技術研究所報告，No.812，1972。

(1999. 2.12受付)