

吸水軟化による飽和泥岩のスレーキングとその対応

名古屋大学工学部 (正) 浅岡 顕 中野正樹 野田利弘

1. はじめに

本報告の目的は、スレーキングの特に水浸による粘土化現象を「超過圧密粘土のせん断時の吸水軟化」現象としてとらえて、碎石状になった飽和泥岩の集合体が全体として示す圧縮/せん断挙動の試験結果の解釈に見通しを与え、泥岩碎石の沈下に対する締固め基準を示し、泥岩碎石を盛土材料に用いる時のもっとも安全側の設計の考え方を述べることにある。

2. 超過圧密粘土の吸水軟化計算とスレーキングの解釈への応用

容易にスレーキングしてしまう飽和泥岩の、力学材料としての第1次近似は、泥岩を超過圧密粘土と見なすことによって得られる。図1には、練り返し川崎粘土から作製した超過圧密粘土の排水せん断試験結果を示している。超過圧密粘土をせん断すれば、限界状態の上側にその応力状態を移すことができ、最初しばらくは体積膨張(吸水)にもかかわらず硬化したあと、引続く大量の吸水膨張によって次第に軟化してゆく。この吸水軟化の過程で過圧密粘土はすでに正規圧密状態に返っているが、さらに吸水軟化が起これば、軟らかいトロトロの練り返し粘土状の正規圧密粘土に戻る。図2¹⁾では、超過圧密粘土(過圧密比1.8)の3軸供試体を側圧(98kPa)一定で上下端を吸排水境界にして軸荷重を増やして「排水」せん断したときの、供試体中央高さでの中心部と側端部の二つの土エレメントのせん断挙動を計算したものである。「カムクレイ」モデルによる土~水連成有限変形計算で、過圧密粘土の再負荷時には、正規降伏面(カムクレイ)に相似な下負荷面²⁾を用いている。土エレメントは限界状態線より上側で吸水軟化しすでに正規圧密粘土化している。図2(b)は図2(a)よりもさらに多く吸水しており、結果的に初期等方圧密圧力の約4分の1の降伏応力しか持たぬ正規圧密粘土に戻ってしまっている。

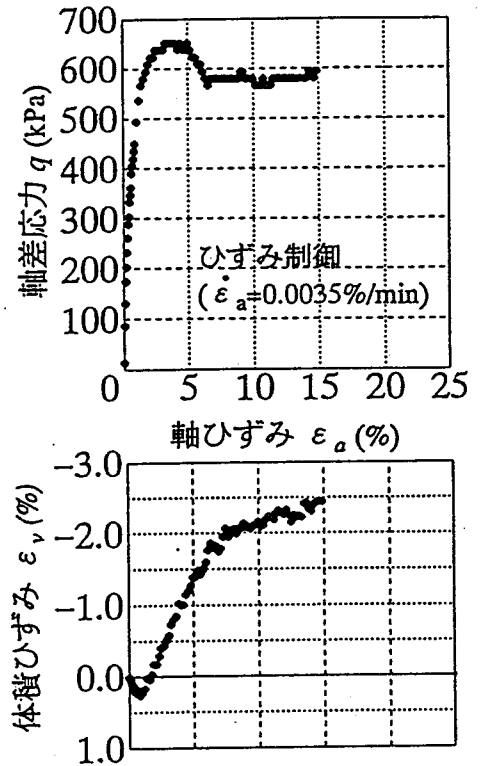
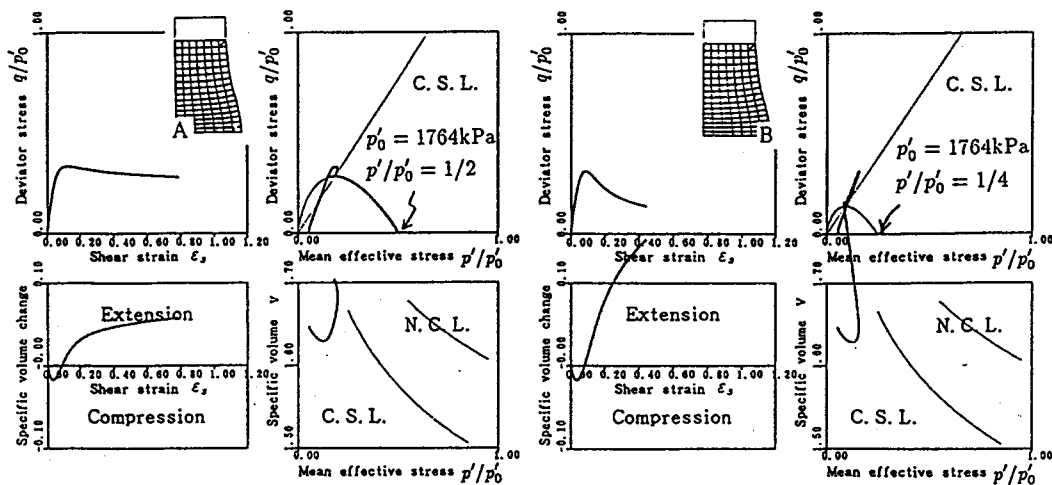


図1 典型的な過圧密粘土の排水圧縮試験 (川崎粘土、OCR=18、側圧98kPa)



(a) 供試体中央部(要素A)

(b) 供試体側端部(要素B)

図2 3軸供試体内部の土エレメント挙動

このように超過圧密粘土のせん断時の吸水軟化としてスレーキングをモデル化することにより、スレーキングに伴ういろいろな現象をうまく説明することができる。本報告ではこの見方によって、以下に示す泥岩岩砕試料の圧縮特性とせん断特性との実験の考察を行う。

3. 泥岩岩砕試料の水浸一次元圧縮挙動特性

本報告で用いた泥岩試料は、常滑泥岩と呼ばれ、愛知県知多半島に広く分布する第三紀鮮新世の常滑層群の堆積泥岩である。試料は地下約50mの掘削現場から採取したもので飽和度も高い。その物理的性質を表1に示す。

表1 泥岩の物理的性質

自然含水比 (%)	比重	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)
24.3478	2.688	43.63	30.33	1.5976

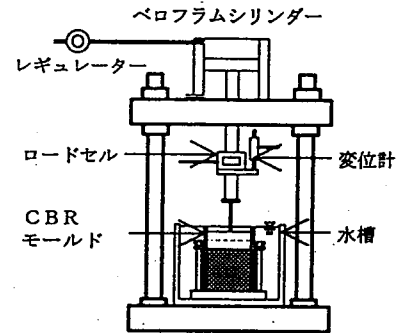


図3 圧縮試験装置

この泥岩試料のスレーキングに伴う圧縮特性を、以下に示す実験により調べた。まず、泥岩を19.1~37.5mmと、4.76~9.50mmの2種類の粒径に調整する。図3に示す圧縮試験装置のCBRモールドに、その試料を3回に分けて高さ10cmになるよう締め固める。ランマー重量や突き固め回数を変えることにより初期密度を数種類変化させた。このように調整した泥岩岩砕供試体を最初1日間は自然含水比のまま一次元圧縮し、载荷したままモールドを取り囲む水槽に注水し水浸状態にする。そして約5日間荷重一定のまま放置し、その圧縮量を測定する。なお圧縮荷重は、3、5、6.5、7kgf/cm²の4種類とした。表2は実験条件、試料の初期条件と実験結果の一覧である。また圧縮荷重3kgf/cm²に対する水浸後の圧縮量~時間関係を図4に示す。初期間隙比が1.3~1.5のゆるく詰めた試料A3~D3は、水浸後、緩やかに沈下し続ける。初期粒径の小さいD3が最も大きく沈下している。一方、空隙比0.73と密に詰めた試料E3は、水浸後もほとんど沈下していない。

表2 試験条件および供試体の初期条件

データ名	荷重 (kgf/cm ²)	乾燥重量 (g)	初期空隙比	初期粒径 (mm)	乾燥過程沈下量 (cm)	水浸過程沈下量 (cm)
A3	3.0	2022.63	1.349	19.1~37.5	0.3332	0.2504
B3	3.0	1970.04	1.411	19.1~37.5	0.5406	0.6260
C3	3.0	2150.57	1.540	19.1~37.5	0.3804	0.5884
D3	3.0	1854.30	1.562	4.76~9.50	0.8316	0.6017
E3	3.0	2746.66	0.729	19.1~37.5	0.2532	0.0030
H5	5.0	1937.73	1.451	19.1~37.5	0.9762	0.4052
J5	5.0	1680.43	1.827	4.76~9.50	2.0000	0.9410
M6	6.5	1963.57	1.419	4.76~9.50	1.6858	0.6628
N7	7.0	2038.29	1.330	19.1~37.5	1.4804	0.4864

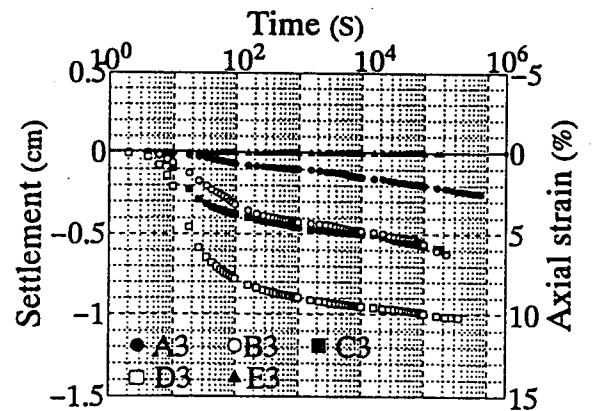


図4 水浸過程での時間(対数軸)~沈下関係 (荷重3kgf/cm²)

図5は、全ての試料の水浸過程での空隙比の変化を空隙比~圧縮荷重図上に再整理したものである。図中に示した繰り返し正規圧密曲線は、泥岩を水にとかしながらよくすり潰し、十分脱気および繰り返しして再圧密した供試体の標準圧密試験により得られたものである。この図から、水浸によってスレーキングを起こし大沈下したゆる詰め泥岩岩砕試料は、繰り返し泥岩正規圧密曲線の空隙比へ向かっていることがわかる。そして圧縮荷重が大きいほど、初期粒径が小さいほど曲線の含水比へ近づいている。一方、初期含水比が練り

返し泥岩正規圧密曲線よりも小さい試料E3は、ほとんど沈下していない。

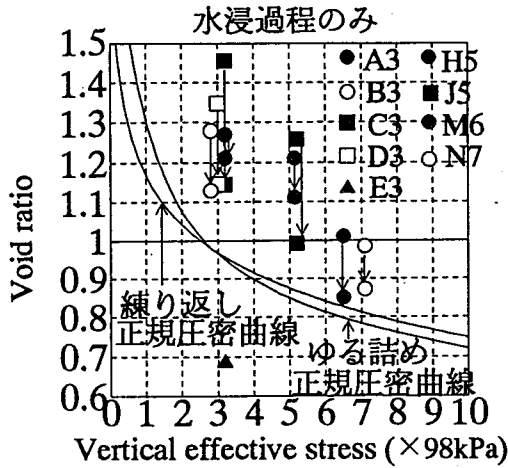


図5 水浸過程での間隙比の変化

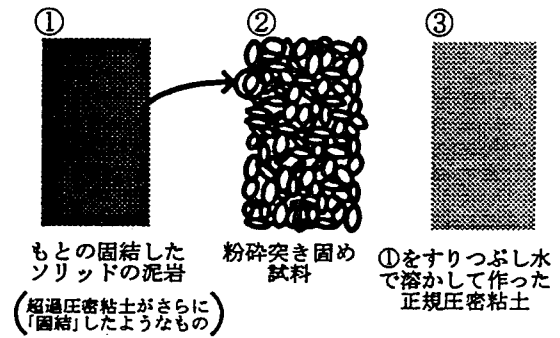


図6 泥岩の3態

ここで、通常の粘土を考えると、正規圧密曲線よりも上に間隙比がプロットされることはない。その理由は、粉碎泥岩が「2重構造」を有しているからである。図6に示すよう常滑泥岩は、堆積した状態の固結状態、岩砕した状態、練り返した状態と大きく3つの状態を持つことができる。②の岩砕状態において、石粒そのものは①の固結状態であり超過圧密粘土と同様、石粒自身の間隙比はかなり小さい。しかし、ゆるく詰めることによって、石粒石粒の間隙は大きくなる。このような「2重構造」を持つため、泥岩岩砕試料は不可能領域に存在することができるのである。先の水浸一次元圧縮試験において、ゆるく詰めた試料が繰り返し正規圧密曲線にまで下がってゆく理由は、泥岩の石粒石粒の間隙から水を排出しつつ、石粒そのものは石粒同士の接触部分で大きなせん断を受け、まわりから吸水することにより、石粒自身の間隙を大きくしてゆき、図6③の練り返し正規圧密粘土へ状態を変化させるためである。すなわちスレーキングは、超過圧密状態の固結試料をもといた正規圧密状態へ戻る過程とみなすことができる。

実際、水浸圧密試験後の試料を観察すると、石粒は残っているもののその周りの特に石粒同士接触していた部分はかなり粘土化していた。その様子を試験後の粒度分析によって示したものが図7である。初期粒径4.76~9.5mmのD3、J5、M6での粒子破碎の程度は鉛直荷重6.5kgf/cm²のM6が大きく、粒径0.425mm以下の細粒分含有率は20%程度である。スレーキングにより石粒同士の接触部で粘土化が起こっている。また図8では石粒周りの粘土化した泥岩を取り出し、含水比を測定し、 $e \sim \log p'$ 図にプロットしたものである。粘土化していた石粒まわりの泥岩は、吸水軟化によってもとの正規圧密粘土状態に戻っている。

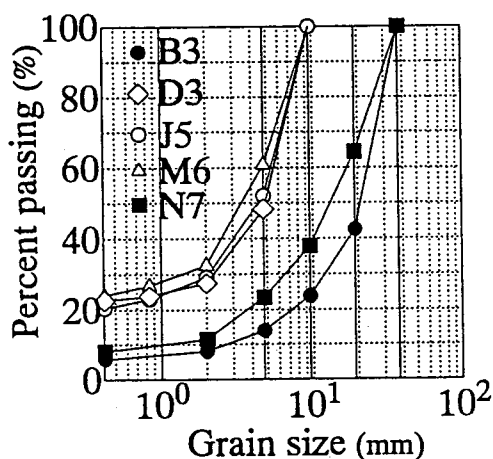


図7 1次元圧縮試験後の粒度分析

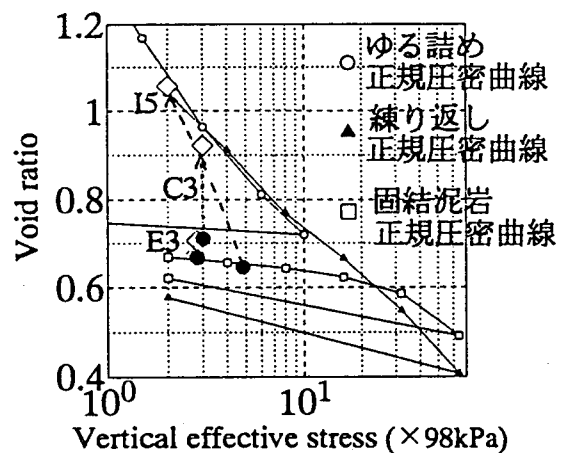


図8 圧縮による泥岩石粒周りの間隙比の変化

以上試験結果をまとめると、粉碎泥岩はスレーキングによる沈下は、初期間隙比を繰り返し泥岩正規圧密曲線よりも小さく締め固めることにより、回避することができる。また、たとえゆるく締め固めても最終沈下量は正規圧密曲線の間隙比までであり、この曲線が数居値となる。かくして泥岩碎石の対沈下の締め固め基準には、泥岩から作った繰り返し粘土の正規圧密曲線が一つの目安を与えることがわかる。

4. 泥岩岩砕試料のせん断特性

3章では、一次元圧縮によって石粒石粒にせん断を与えたが、ここでは石粒石粒の集合体全体にせん断を与える。特に正規圧密曲線の下側まで締め固めた密詰め試料について、吸排水条件のもと軸荷重を漸増させる試験と軸荷重を一定に保ったまま供試体が破壊してゆく進行性破壊試験を行った。

3軸供試体の作製方法は、常滑泥岩を2.0~4.75mmの粒径に調整し、内径50mm、高さ100mmの2つ割りモールド内で、1kgfランマーを高さ15cmから落下させ、1層につき落下回数55回、13層で突き固めるといものである。さらに水浸、脱気して飽和度を高め、凍結させて3軸試験機にセットした。このようにして供試体の間隙比 e を0.96以下にしている。

吸排水条件のもと、側圧を 1kgf/cm^2 で一定に保ち、せん断試験を実施した。その結果を図9に示す。一瞥では、密詰め粉碎試料の集合体は密詰めのゆえに過圧密粘土のように挙動するように見える。しかしせん断時の圧縮膨張挙動は過圧密粘土とは大きく異なっている。これを示すために図中には超過圧密粘土も重ねて示した。せん断のピークまでは圧縮だけが継続し、過圧密粘土のようにピーク前の膨張による硬化はほとんど表れない。圧縮による硬化とピーク後の膨張による軟化だけを取り出せばむしろ正規圧密粘土のようである。このような挙動を示すのは、やはり泥岩岩砕試料のもつ2重構造のためである。すなわち石粒石粒の集合体全体は密に詰めているため、密な砂や過圧密粘土の様な挙動を示す。しかし密な砂と違い、石粒自身は過圧密粘土であり、石粒同士の接触部分での荷重集中のため強いせん断を受け、石粒自身吸水軟化し、正規圧密粘土化するのである。

この泥岩石粒石粒の正規圧密粘土化が実務上大問題となるのは、たとえピーク前の荷重であっても長時間にわたり荷重一定で放置すれば石粒石粒の接触点での正規圧密粘土化の進行によって、泥岩粉碎試料の強度が低下する可能性が生じることである。そこで今度は、吸排水条件のもと側圧 1kgf/cm^2 で一定のまま、軸荷重を 4.5kgf/cm^2 と 3.0kgf/cm^2 で一定放置するという試験を行った。軸荷重 4.5kgf/cm^2 は、先の試験においてピーク強度と残留強度との間の値であり、 3.0kgf/cm^2 は、その残留強度と繰り返し泥岩を側圧 1kgf/cm^2 で

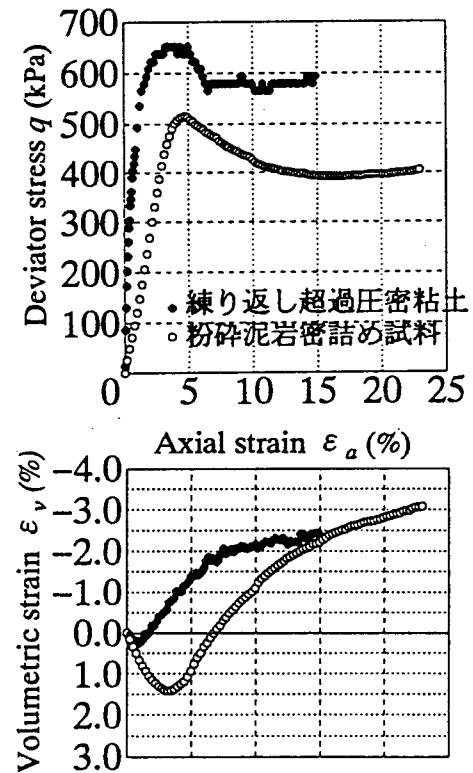


図9 密詰め試料の排水3軸圧縮試験

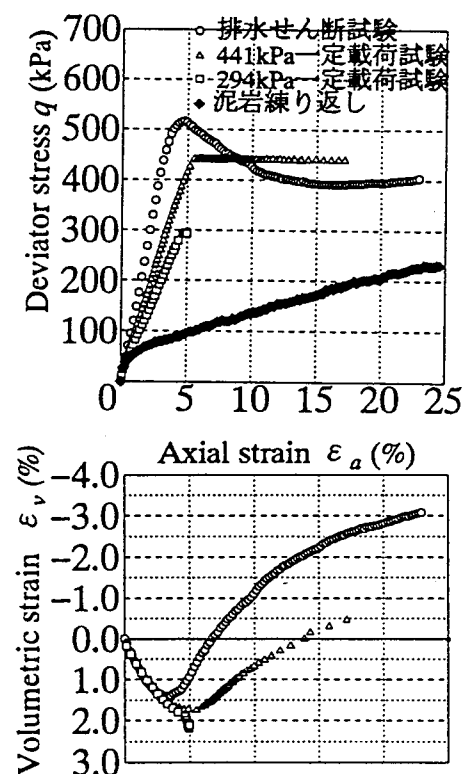


図10 泥岩碎石試料の進行性破壊

排水せん断したときの排水強度との間の値である。試験結果を図10に示す。軸荷重を4.5kgf/cm²としたときは、軸荷重を一定に保つと同時に排水から吸水に転じ、膨張を伴いながら軸ひずみは増え続け、約800mmになると軸ひずみ速度が増加し吸水量も増え破壊に至った。一方軸荷重が3.0kgf/cm²の試験は、荷重放置後軸ひずみも体積ひずみもほとんど変化がなく破壊しなかった。比較のため密な砂を用いて、同じ試験を行った。その結果を図11に示す。スレーキングが起きないため、ピーク強度と残留強度の間の軸荷重では破壊しない。泥岩碎石はたとえ密詰めに締めてもピーク強度や「残留」強度を直ちに長期安定の設計に用いることは危険である。

ではどこまでの荷重であれば、長期間载荷されても(つまりスレーキングが発生しても)必ず安定を保つことができるのか。これを調べるために、ゆる詰め試料を取り上げ、側圧(98kPa)一定の排水せん断を実施した。実験結果を図12に示すが、同図には同じ泥岩を繰り返して作った正規圧密粘土の排水せん断試験結果も併記している。軸差応力~軸ひずみ関係では両者に大きな差がないことから、長期载荷に際しても粉碎泥岩集合体のせん断強度は泥岩から作った正規圧密粘土の排水強度を考えておけばよい。ただし、ゆる詰め試料の場合排水せん断時の圧縮量は、図12からもわかるとおり、すこぶる大きい。また図13に試験後の粒度分析結果を示しているが、石粒は排水せん断中にかなりスレーキングを起こし、細粒化している。この圧縮量が初期間隙比、あるいは初期の締め固め状態に依存するのである。

泥岩碎石盛土の長期安定は大変形を伴うものの、泥岩を吸水軟化させて作った正規圧密粘土の排水強度をとりあえずの最低線に考えてよい。正規圧密粘土とはいえ非排水強度ではなく、側圧ないし拘束圧依存の排水強度で設計できることは、相当の高盛土も可能であることを示している。

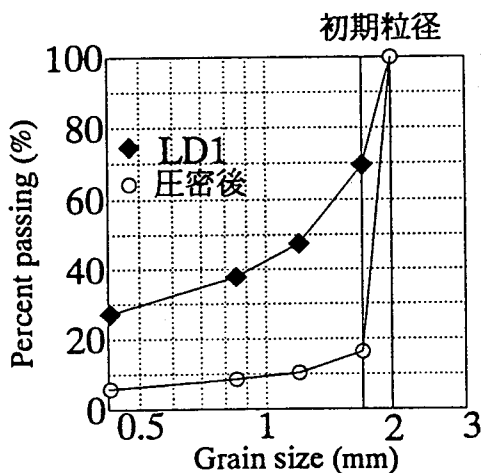


図13 ゆる詰め試料の試験後の粒度分析

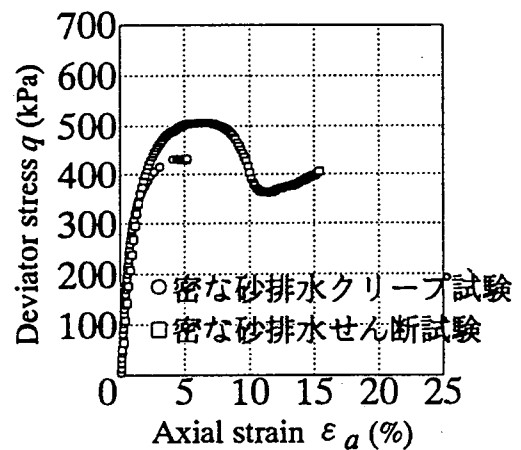


図11 密な砂の排水クリープ試験

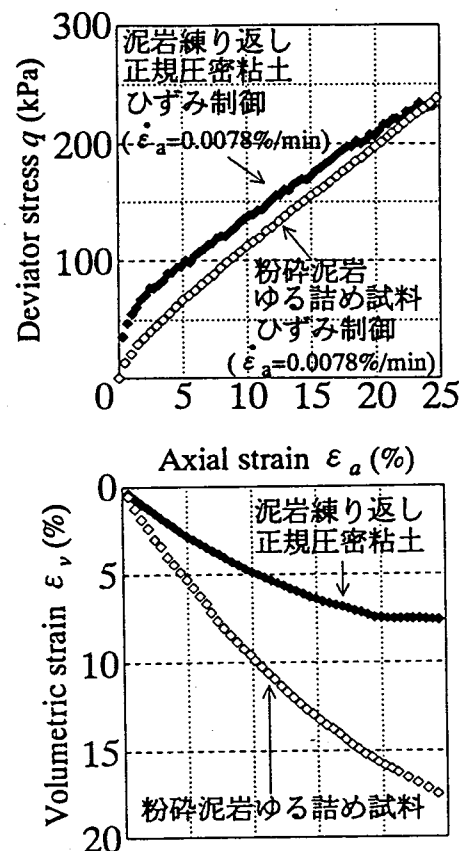


図12 ゆる詰め試料の排水3軸圧縮試験

5. おわりに

以下に本報告の結論を述べる。

- (1)飽和した泥岩岩砕試料の湿潤によるスレーキングは、超過圧密粘土がせん断を受けて限界状態線を越えた応力状態において吸水軟化して、その結果練り返した正規圧密粘土に戻る過程としてモデル化することができる。
- (2)泥岩岩砕試料の一次元圧縮特性は、練り返した泥岩の正規圧密曲線を敷居線として、上側の間隙比のゆる詰め試料と下側の密詰め試料とで、以下に示すように異なる。ゆる詰め試料は、水浸によって、正規圧密曲線まで沈下が継続する。一方、密詰め試料は、水浸しても沈下しない。
- (3)泥岩砕石の集合体がせん断をうけるときは、たとえ密詰めに締められていても、スレーキングによる進行性破壊が考えられるため、排水せん断でのピーク強度や「残留」強度を直ちに長期安定の設計に用いることは危険である。
- (4)泥岩砕石盛土の長期安定は、泥岩を吸水軟化させて作った正規圧密粘土の排水強度を最低線に考えてよい。ただし初期の締め固めが不十分でゆる詰めのときは、強度の発現までに大変形が起こる。

6. 参考文献

- 1)Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T.(1996) : "Soil-water Coupled Behavior of Heavily Overconsolidated Clay near/at Critical State", Soils and Foundations, Vol.36, No.1 (to appear)
- 2)Hashiguchi, K.(1989) : "Subloading Surface Model in Unconventional Plasticity", International Journal of Solids and Structures, Vol.25, pp.917-945.