

# 乾燥した珪藻泥岩の湿潤時における 吸水膨張と強度低下の関係

前川晴義<sup>1</sup>・宮北 啓<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 博士 (工学) 金沢工業大学教授 環境系 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

<sup>2</sup>農博 金沢工業大学名誉教授 (〒921-8501 石川県石川郡野々市町扇が丘 7-1)

珪藻泥岩の乾湿繰返しの湿潤時に起こる強度低下と“吸水膨張”の関係を調べるために、ここでは所定の条件で乾燥させた供試体を三軸セルにセットし、膨張を抑制する目的で拘束圧 (側圧) を与えて湿潤状態に戻した後、圧縮試験を実施した。その結果、水浸によって湿潤状態にした場合とほぼ同等な強度低下が確認できた。つまり、湿潤時の強度低下は、膨張の有無に関係なく起こり、その低下量は乾燥過程における乾燥の程度に依存することが明らかになった。

*Key Words* : swelling, weathering, compressive strength, sedimentary rock, testing method

## 1. はじめに

固結力の低い泥岩材料は、乾燥と湿潤の状態を繰り返し受けると、劣化やスレーキングを起こしやすいことが知られている。このような特性の材料で形成された地盤を施工の対象にする場合には、施工後の強度の低下量などの物性の変化に関する情報が重要になる。著者らは、泥岩材料が乾湿繰返しを受けた場合の強度・変形特性の変化と乾燥履歴の関係を明らかにするために、未風化状態の珪藻泥岩を用いて実験を行ってきた。その結果<sup>1)</sup>は、次章で要約するように非常にシンプルな内容であった。

ところで、乾燥状態の材料が湿潤過程で強度低下を起こす要因を究明することは、設計条件や現地での対策を決めるためにも重要な課題である。しかしながら、劣化やスレーキング現象に関しては、結果として捉えられているものの、その力学的なメカニズムを初めとして、不明な点を多く残しているのが現状である。ここでは、劣化の要因に挙げられることが多い“吸水膨張”に焦点を当て、強度低下との関係を実験で検証している。

“膨張したから強度が低下するのか、強度低下が起きたから膨張するのか”を明らかにすることが実験を行うそもそもの出発点であった。この素朴な疑問に回答を出すために、著者らは所定の条件で乾燥した供試体を三軸圧縮試験装置の三軸セルにセットし、拘束圧で吸水時の膨張を抑制して湿潤状態に戻した後、強度試験を実施した<sup>2)</sup>。この結果、拘束条件を与えて供試体の膨張を抑制した場合と無拘束条件 (水浸状態) の場合とでは、湿潤によって起きる強度低下量に大差が認められなかった。

つまり、本泥岩の乾燥から湿潤過程に起きる膨張は、強度低下の直接の要因になっていないことが明らかになった。

## 2. 過去に実施した珪藻泥岩を用いた乾湿繰返し試験の実験結果

湿潤時に起きる強度低下と吸水膨張との関係について述べる前に、本研究のデータベースにもなっている珪藻泥岩の乾湿繰返し試験の実験結果<sup>1)</sup>を紹介する。実験は乾燥履歴の影響を調べるために、乾燥度合が異なる乾燥条件と湿潤条件を供試体に繰り返し与えて、一軸圧縮試験を行った。供試体の乾燥方法は、恒温恒湿室 (湿度約 85%, 温度約 20°C) で自然乾燥によって、4 種類の乾燥条件を与えた。また、乾燥供試体の湿潤方法は、霧吹きで十分に吸水させた後、水浸した。図-1 は、乾燥時 (Dステップ) と湿潤時 (Wステップ) の一軸圧縮強さ  $q_u$  と乾湿繰返し回数  $N$  の関係を示している。ここで言うシリーズとは、乾燥過程の乾燥度合の呼び名である。例えば、50%シリーズは供試体の含水比が  $w=50\%$  になるまでの乾燥と、湿潤 (水浸) 状態を繰り返し与えた。また、具体的な実験データは紹介していないが、異なる乾燥度合を組み入れて乾湿繰返しを与えたケースの実験も行っている。

これらの実験を通し、以下の事項が明らかになった。なお、供試体の管理方法や実験結果の詳細は、参考文献 1) を参照して頂きたい。

- 1) 乾燥度合を一定にして乾湿繰返しを与えた場合の湿潤（浸水）時の強度低下量は、乾燥度合の大きいほど著しい。
- 2) 異なる乾燥度合を組み入れて乾湿繰返しを与えた場

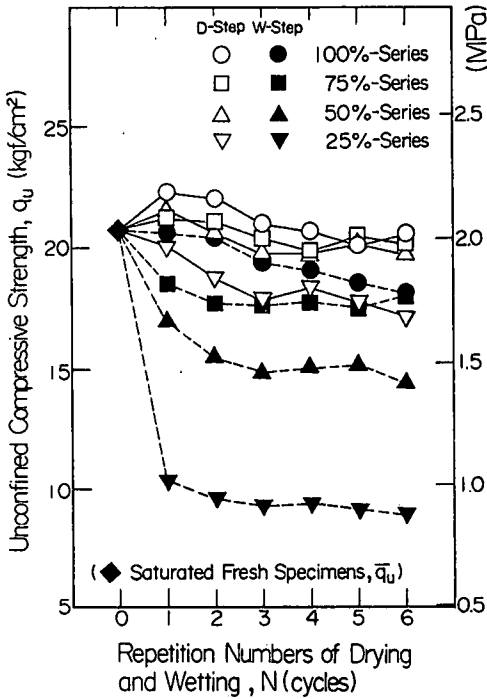


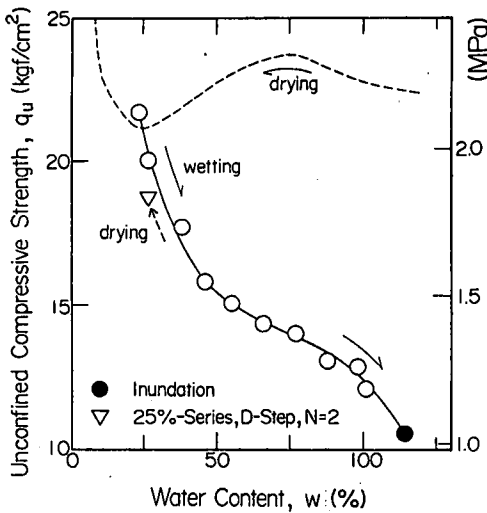
図-1 乾燥度合を考慮した一軸圧縮強さと乾湿繰返し回数との関係

合の湿潤時の強度低下量は、乾燥度合の大きさにより決まる。つまり、圧密伏応力のように応力履歴的な発想が乾燥履歴に適用できる。

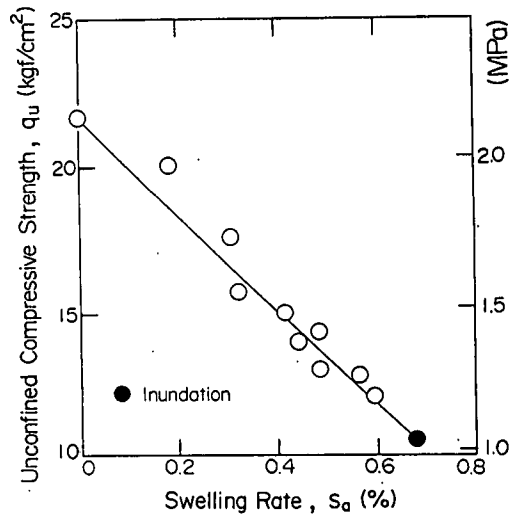
- 3) 上記の結果は、変形係数  $E_{s0}$  についても同様である。
- 4) 上記 1) の条件の場合、湿潤（水浸）後の一軸圧縮強さと乾湿に伴う供試体高さの変化（膨張率）の間は乾燥条件に関係なく、一次式で表現ができる。

次に、乾燥状態から湿潤過程の結果について説明する。図-2(a)では、乾燥過程と湿潤過程における一軸圧縮強さ  $q_u$  と含水比  $w$  の関係を示している。図中の破線は、未風化飽和状態の供試体を乾燥させた場合の一軸圧縮試験の結果を集約したものである。また、実線の湿潤過程は、乾燥過程で一軸圧縮強さが最小になる含水比  $w=25\%$  まで、未風化飽和状態の供試体を恒温恒湿室で自然乾燥させた後、湿潤させた結果を示しており、図-1 の 25% シリーズにおける  $N=1$  の D ステップから W ステップへの移行過程に相当する。実験結果からも明らかなように、湿潤過程で起きる強度の低下量は、含水状態と密接な関係にあることがわかる。一軸圧縮強さ  $q_u$  の結果を吸水に伴う供試体高さの変化を示す膨張率  $s_s$  で整理したのが図-2(b)である。上記の 4) の湿潤（水浸）後の結果と同様に、湿潤過程においても両者の間には、おおむね直線関係にあり、強度低下が膨張率に依存しているようにみえる。図-2(b)の膨張率  $s_s$  は乾燥供試体高さを基準にしており、供試体高さはダイヤルゲージを利用して計測した。

以下では、劣化現象の説明に使用されるケースが多い、“吸水→膨張→強度低下”のシナリオを検証する一方、乾湿に伴う強度低下の要因についても考察を行っている。



(a) 一軸圧縮強さと含水比の関係



(b) 一軸圧縮強さと膨張率の関係

図-2 乾燥状態から湿潤過程における一軸圧縮強さと含水比および膨張率の関係

表-1 供試体の諸性質

土粒子密度	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.26
初期含水比	$w_0$ (%)	126.1
湿潤密度	$\rho_i$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.33
乾燥密度	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	0.59
初期間隙比	$e_n$	2.85
一軸圧縮強さ	$q_u$ (MPa)	2.03
圧密降伏応力	$p_c$ (MPa)	2.65

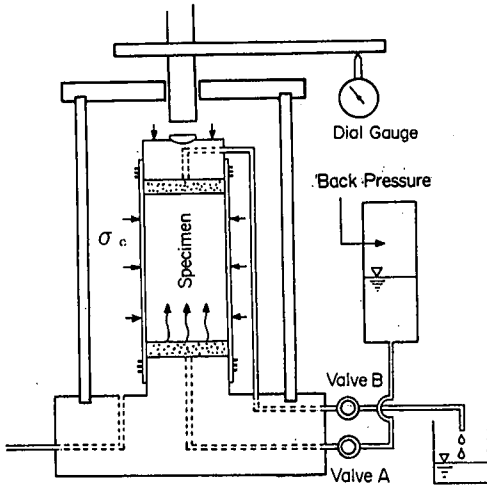


図-3 三軸セルを利用した乾燥供試体の湿潤方法

### 3. 供試体の管理および実験方法

#### (1) 供試体の乾燥方法

実験に使用した供試体は、未風化飽和状態の供試体（直径約50mm、高さ約100mm）をこれまでと同様に、恒温恒湿室内で含水比  $w=25$  および  $50\%$  まで自然乾燥をした（25、50%シリーズと呼ぶ）。今回は、2日間炉乾燥（ $110^\circ\text{C}$ ）した条件の供試体（0%シリーズと呼ぶ）を新たに加えた。未風化飽和状態の珪藻泥岩の物理的諸性質は、表-1に一覧している。

#### (2) 実験方法

図-3には、乾燥供試体を拘束条件下で湿潤状態にするために使用した三軸セル部を示している。所定の乾燥条件を与えた供試体には、厚さ0.25mmのゴムスリーブを装着し、飽和供試体と同様な状態で三軸セル内にセットをした。乾燥供試体の湿潤の方法は、 $0.2\text{kgf/cm}^2$  ( $0.0196\text{MPa}$ ) を背圧水槽に負荷した状態でバルブAを開き、ペDESTALよりポーラスメタルを介して、脱気し

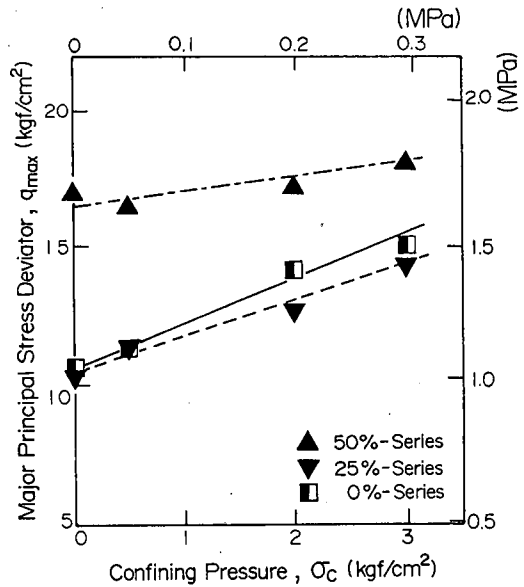


図-4 湿潤後の各シリーズの最大主応力差と拘束圧の関係

た蒸留水を供試体に送り込んだ。供試体内部の空気の排除は、給水と同時に供試体上部用のバルブBを開放して行った。供試体の膨張の抑制を目的とした拘束圧（等圧状態） $\sigma_c$  は、 $0.5, 2.0, 3.0\text{kgf/cm}^2$  ( $0.049, 0.196, 0.294\text{MPa}$ ) の3種類とした。給水を4日間継続した後、バルブA、Bを閉じ、供試体高さの変化を計測した。強度試験は、拘束圧をそのままに保ち、非排水条件で  $0.35\text{mm/min}$  の軸圧縮速度で実施した。なお、給水後の供試体の飽和度は、B値で確認していないが、試験後の供試体の含水比から求めた飽和度  $S_r$  は約95%であった。

### 4. 実験結果および考察

図-4は、湿潤後に実施した各シリーズの圧縮試験の最大主応力差  $q_{max}$  ( $=\sigma_u - \sigma_c$ ) と拘束圧  $\sigma_c$  の関係を示している。 $\sigma_c = 0\text{kgf/cm}^2$  (0MPa) の軸上のデータは、各シリーズの乾湿後の一軸圧縮強さ  $q_u$  の結果である。低拘束圧下での各シリーズの最大主応力差  $q_{max}$  は、図-1の乾燥前の未風化飽和状態（◆印）や乾燥繰返しの最初の乾燥時（ $N=1$ , Dステップ）の一軸圧縮強さ  $q_u$  に比べて、著しく低下しており、その低下量は乾燥度合に依存していることがわかる。また、拘束圧と最大主応力差の関係に注目すると、総てのシリーズで拘束圧  $\sigma_c = 0\text{kgf/cm}^2$  (0MPa) 軸上の  $q_u$  値を軸に、おおむね直線的に強度が増加しており、乾燥度合の大きい0%、25%シリーズで強度増加が顕著になっている。これは、拘束圧

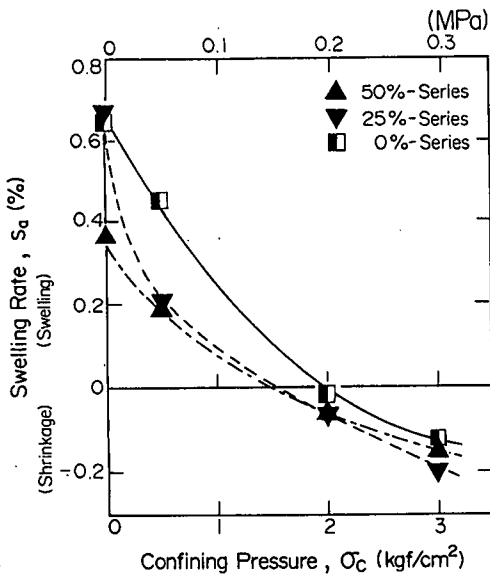


図-5 各シリーズの膨張率と拘束圧の関係

の有無や大きさに関係なく、乾燥度合に応じた劣化が供試体内部で起き、0%、25%シリーズのように劣化の度合が大きいケースでは、給水中の強度低下に対し、圧密および供試体内部に残留していた空気せん断中の圧縮による強度増加が、大きくなったためと考えている。

図-5 は給水終了後の膨張率  $s_s$  と拘束圧 (等方圧)  $\sigma_c$  の関係を示している。膨張が強度低下の直接の要因であるならば、湿潤時の膨張を抑制した場合には、強度低下が起きないはずである。拘束圧が  $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  (0.196MPa) の場合、総てのシリーズで湿潤後の供試体高さは収縮しているが、強度は水浸前に比べて明らかに低下していた。このように本泥岩の乾湿に伴う強度低下は、“吸水膨張”で説明ができない。そこで、以下では吸水膨張以外の強度低下の要因について検討する。

膨張率  $s_s = 0\%$  に相当する拘束圧が膨張圧に等しいと仮定すれば、吸水時の膨張圧は、図-5 より、0%シリーズが約  $2.0 \text{ kgf/cm}^2$  (0.196MPa)、25、50%シリーズが約  $1.5 \text{ kgf/cm}^2$  (0.147MPa) となる。膨張圧と強度低下の関係は明らかでないが、膨張圧自体は一軸圧縮強さに比べても十分に小さく、劣化である強度低下の直接の原因にはならなかったと考えている。

第2章の25%シリーズの結果を未風化飽和状態の供試体高さを基準にした場合の乾燥および湿潤時における供試体の鉛直方向の膨張率  $s_v$  は、それぞれが  $-0.062\%$  (収縮)、 $0.610\%$  (膨張) であり、湿潤時の側方向の膨張率  $s_r$  は  $0.465\%$  であった。この結果、乾湿によって発生したせん断ひずみ  $\gamma$  (鉛直方向の膨張率  $s_v$  と側方向の膨張率  $s_r$  の差) は、 $0.145\%$  と非常に小さく<sup>3)</sup>、劣化の要因

としては考えにくい。また、25%シリーズの乾湿を与えた供試体を用いて側圧  $\sigma'_1 = 2.5 \text{ kgf/cm}^2$  (0.245MPa) で排水せん断試験を実施して得たせん断弾性係数  $G$  は、約  $400 \text{ kgf/cm}^2$  (33.1MPa) であった。これらの結果から予想されるせん断応力<sup>3)</sup> は、強度に比べると非常に小さく、せん断変形と同様、強度低下の原因になっていなかったものと考えられる。

拘束圧条件を与えた今回の実験では、供試体の体積ひずみ、側方向ひずみを測定していないために、供試体の形状の変化やせん断応力は明確にできなかった。しかし、図-5の膨張率の結果からも明らかなように、これらが劣化に与える影響は、水浸した場合よりも小さかったと予想される。

このように、本泥岩の湿潤後に起きる強度低下は、これまでに指摘されてきた工学的な要因で説明ができず、また、上記の要因が関与し合ったとも考えにくい。なお、試験後の供試体状況からは、強度低下に直接結びつくようなクラックが確認できなかった。著者らは、乾燥・湿潤による供試体内部の間隙水の入れ替え中に、セメンテーション作用を支配していた理化学的性質に変化が起き、結果的に組織形態の軟質化を招き、劣化したものと考えている。

乾湿繰返し状況下で起きる強度低下と吸水膨張の関係を探るために、ここでは乾燥過程における乾燥度合に着目し、3種類の乾燥を供試体にて与えて実験を行った。25%シリーズと呼んでいる自然乾燥を供試体にて与えるには、恒温恒湿室内で約4週間放置しておく必要があった。この25%シリーズの乾燥条件は、図-2(a)からも明らかなように、乾燥過程(破線)において強度が最小になる含水状態であり、ここでは自然乾燥によるダメージが大きい条件を想定していた。また、今回新たに実施した炉乾燥の0%シリーズは、25%シリーズ以上の乾燥のダメージを期待した条件であった。乾燥方法や乾燥度合が異なっていたにもかかわらず、両シリーズの湿潤後の強度は近似していた。このような結果は、砂岩<sup>4)</sup>を用いた実験でも確認しており、乾湿繰返し試験の乾燥過程で採用されるケースの多い乾燥炉を用いた非現実的とも思われる乾燥方法は、供試体に大きな乾燥ダメージを与える手段として、簡単で有効なのかもしれない。

## 5. 劣化に関する力学試験の提案

現行の軟岩を対象にした劣化およびスレーキングに関する試験<sup>5)</sup>では、対象材料の供試体に乾燥と湿潤条件を繰り返して与え、それに伴う形状や吸水量の変化から乾湿繰返しに対する耐久性を判断している。これらの結果は、例えば、盛土用材料の品質の評価<sup>6)</sup>に利用できるが、強

度低下量などの諸数値が要求されるケースにおいては、必ずしも有用な方法ではない。

劣化に関する強度試験を実施しようとする場合、乾燥から湿潤過程における供試体の管理が重要になる。水浸による湿潤方法では、スレーキングを起こし、結果的に強度試験ができなくなるケースも多い。著者らはわずかな拘束圧の存在が、湿潤時の崩壊防止に役立ち、湿潤後の強度試験を可能にすることを、固結力の低い砂岩<sup>6)</sup>やシルト岩<sup>7)</sup>でも確認している。

以上のことを踏まえ、乾湿後の劣化に関する力学特性を調べる方法として、ここでは次のような試験を提案する。

基本的には、本報告のよう所定の条件で乾燥させた供試体を三軸セル内にセットし、数種類の拘束圧のもとで湿潤状態（可能であれば飽和状態）に戻し、圧縮試験を実施する方法である。供試体の乾燥方法や実験方法については、さらに検討を必要とするが、本試験では以下のような利点が挙げられる。

- 1) 軟質な材料の場合、土質材料用の三軸圧縮試験装置で実験ができるため、特殊な試験装置を必要としない。また、拘束圧を負荷することで、無拘束（水浸）で起きる供試体の崩壊が回避できる。
- 2) 拘束圧と湿潤後の供試体の形状の変化より、供試体内部に作用する膨張圧などの情報が推測できる。
- 3) 任意の乾燥履歴を受けた場合の強度・変形特性の変化が直接求められる。
- 4) 給水後に、背圧を負荷して飽和状態が確保できれば、劣化後の有効応力を適用した強度定数などが簡単に求められる。

劣化後の物性値が明らかになれば、現場での劣化に伴う力学特性の変化を評価することが可能になる。

## 6. まとめ

三軸セル内では吸水に伴う供試体の体積変化の計測が難しいために、ここでは供試体高さの変化で膨張を評価した。一連の結果より、本泥岩の湿潤後の強度低下は供試体が受けた乾燥度合に依存し、“吸水膨張”が強度低下の直接の要因でないことが明らかにできた。

乾燥・湿潤条件は供試体内部の間隙水の出入にほかならない。これによって、供試体内部の理化学的な性質が変化し、セメンテーション効果の低下を招くものと考えられる。つまり、“膨張”は、あくまでも強度低下の副

産物に過ぎない。地盤内部のように変形が拘束された状態であっても、一旦地盤が乾燥を受けたならば、これが乾燥履歴として地盤内部に記憶され、湿潤時には劣化が必ず起きることになる。このような劣化に対する考え方は、本泥岩に限ったものではなく、他の泥岩材料にも適用できると考えている。では、“何故、乾燥履歴に依存した強度低下が起きるのか”という新たな疑問が生まれるが、今回は明確にできなかった。

乾湿繰返しによって引き起こされる劣化現象の究明は、古くて新しい研究課題であると同時に、実務上も極めて重要な問題でもある。本実験を通して、乾燥させないことが、劣化防止の最善策であることを改めて裏付ける結果になった。しかし、現実的な問題として、地盤の乾湿繰返しは避けられないケースが多く、このような地盤を設計・施工の対象にする場合には、強度の低下量などが予知できる力学試験が必要になる。また、劣化やスレーキング現象の主因になるのが、セメンテーション作用であろう。ここで取り上げた劣化やスレーキング現象以外にも、セメンテーション作用は洪積土の一部や軟岩材料の力学特性の特徴として注目されてきている。セメンテーション作用の解明のためには、工学のみならず理化学などの広範囲な分野からの研究体制が不可欠であろう。

## 参考文献

- 1) Maekawa, H. and Miyakita, K.: Effect of Repetition of drying and wetting on mechanical characteristics of a diatomaceous mudstone, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.2, pp.117-133, 1991.
- 2) 梅原 悟, 宮北 啓, 前川晴義: 珪藻泥岩の吸水膨張と強度の関係, 第 45 回土木学会年次学術講演会概要集, No. III-221, pp.478-479, 1990.
- 3) 村山朔郎, 八木則男: 泥岩または粘板岩の吸水膨張について, *材料*, 第 14 巻, 第 141 号, pp.520-525, 1965.
- 4) 前川晴義: 三軸圧縮試験装置を使用した軟岩材料の劣化試験とその評価, 岩の一軸および三軸圧縮試験の方法と結果の適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.139-142, 1998.
- 5) 土木学会編: 軟岩の調査・試験の指針(案)-1991年度版, 土木学会, 1991.
- 6) 山口晴幸, 大山英治, 黒島一郎, 中岡時春: 講座; 盛土材料としての堆積軟岩の諸特性と盛土事例 5. 堆積軟岩を用いた宅地造成盛土(その1), *土と基礎*, 第 44 巻, 第 5 号, pp.63-68, 1996.
- 7) 前川晴義・高野 健: 大桑層シルト岩の力学特性, *北陸地質研究所報告*, No.5, pp.327-341, 1996.

(1999. 12. 17 受付)

## RELATION BETWEEN SWELLING AND DECAY OF STRENGTH OF DURING WET-STATE OF DRY DIATOMACEOUS MUDSTONE

Haruyoshi MAEKAWA and Kei MIYAKITA

This paper investigates the relation between swelling and decay of strength during the wet-state of the drying- wetting of diatomaceous mudstone. A dry specimen in a triaxial cell was returned to the wet state by the use of back pressure. Loss of strength was confirmed from the result of the compression test of a wet specimen, even though confining pressure was given to the specimen to prevent swelling. The degree of loss of strength obtained from these tests is approximately equal to that observed for a specimen in an inundated condition. It can be concluded that the loss of strength during the wet-state is not connected with swelling, but rather depends only on the highest degree of desiccation attained during the drying-wetting process.