

軟岩の吸水膨張に関する一考察

村山朔郎・関口秀雄・鳥井原誠・沢田守生

A STUDY OF SWELLING CHARACTERISTICS OF MUDSTONES

By *Sakuro MURAYAMA, Hideo SEKIGUCHI, Makoto TORIIHARA*
and *Morio SAWADA*

Synopsis

Swelling characteristics of mudstones have been studied. A thermodynamic study on the basis of pF versus water content relations indicates the importance of the capillary potential for elucidating the mechanism of slaking in mudstones. Furthermore, it is found from a limited number of swelling tests that behaviors of mudstones under swelling are markedly anisotropic. In order to account for this, the relations relating swelling pressures to swelling strains and the initial capillary pressure are derived with the aid of the theory of cross-anisotropic elasticity, and then their validity is discussed.

1. 序 論

わが国においては、近年、深刻な過密、過疎の弊害を打開するために国土開発の必要が叫ばれているが、これにともない、道路や鉄道などの諸交通施設が山地や劣弱地質地帯に建設されるすう勢にある。

これらの大規模な建設プロジェクトを円滑に遂行するには、土木工事などにもなう地盤災害の防止、軽減に留意することが必要であろう。ところで、泥岩や頁岩などの軟岩によって形成される地山において、とくに切取や掘削にもなう災害例の多いことが経験的に知られている。この原因としては、軟岩の吸水膨張、強度低下や進行性破壊によるものが多いようである。

そこで、本研究は、地山の切取や掘削による地盤災害の発生機構の解明を目的として、まず、軟岩の吸水膨張に関する問題に取組むものである。

ところで、軟岩の吸水膨張に関する問題は、粘性土の場合¹⁾と同じく、つぎのように分類されよう：

(A) 飽和層の切取あるいは地下水位の上昇などの応力解放による膨張

(B) 不飽和層の浸潤による膨張

(A) に属する問題には、トンネル開削による地山の膨張が覆工によって抑止される結果生ずる膨張土圧²⁾、掘削による構造物基礎地盤のヒービング³⁾、サンプリングにもなう採取土中の負の間げき水圧の発生⁴⁾などの問題がある。

一方、(B) に属する問題には、路盤あるいは擁壁裏込材料として多く用いられる締固め土の耐水性の評価⁵⁾やスレーキングによる斜面表層の崩壊⁶⁾などの問題がある。

さて、(A)、(B) に共通する膨張過程としては、つぎのような理想的なプロセスが考えられよう¹⁾。

プロセスⅠ：軟岩の構造骨格を形成する鉱物粒子自体は吸水せず、有効応力の減少によって間げきが大きくなる。

プロセスⅡ：間げきは水で満たされていて、ある瞬間から一斉に鉱物粒子が吸水膨潤する。なお、境界から水は自由に供給されるものとする。

軟岩には、モンモリロナイトのような膨潤性鉱物が含まれることが多いので、上述のプロセスⅡは重要である。しかしながら、後述するような軟岩の異方的な膨張挙動を考慮するには、軟岩の構造骨格の有効応力—ひずみ関係に立入る必要があるが、現段階ではプロセスⅡにおける有効応力の評価はきわめて難しいようである。

そこで、本研究では、とくに膨張挙動の異方性に着目し、プロセスⅠの膨張過程に主眼をおいて考察を加えていくことにする。

2. 理論的背景

2.1 熱力学的準備

軟岩中の水は、一般にバルクの水に比べて可動性が低下しているが、この可動性の指標としては、Schofield⁷⁾によって提唱された熱力学的概念 pF を導入するのが便利である。ここに、 pF は次式で定義される。

$$pF = \log(\Delta\mu), \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 $\Delta\mu$ は等温状態の純水の化学ポテンシャル μ_0 と軟岩中の水の保持している化学ポテンシャル μ との差を重力場の水頭 (cm 単位) で表わしたものである⁸⁾。

なお、軟岩中の水の化学ポテンシャル μ は次式で表現される⁸⁾。

$$\mu = \left(\frac{\partial G}{\partial n_0} \right)_{P, T, n_i}, \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 G : Gibbs の自由エネルギー、 n_0 : 水 (溶媒) の質量 (単位: g)、 n_i ($i=1, 2, \dots$): 溶質 i の質量 (単位: g)、 P : 圧力、 T : 温度である。

前述した pF と軟岩の含水比 w との関係から軟岩の水分保持特性などが評価される。後の議論の便利のために pF による軟岩中の水の分類例⁹⁾を示しておく。

吸着水: pF は5.5~7で、鉱物粒子表面の吸着力によって水分子が一定方向に配列している。

膨潤水: pF は4.5~5.5で、軟岩中の膨潤性物質によって水膨潤現象で保持される。

毛管水: pF は1.8~4.5で、間隙内に毛管張力によって保持される。

重力水: pF は0~1.8で、重力によって排除される。

2.2 面内等方弾性論の応用

前節で導入した pF の大小によって、軟岩と水が接触したときの水の移動方向は規定される。しかし、トンネル覆工に作用する膨張地圧や掘削によるヒービングの解析には、膨張圧—膨張ひずみ関係を説明できる軟岩の構成関係が必要である。

ここで対象とする泥岩や頁岩などの軟岩は、土質力学的に表現すれば、非常に過圧密された硬質粘土¹⁰⁾に対応するもので、その応力—ひずみ挙動は有効応力によって支配されよう。赤井・足立・新城¹¹⁾は飽和した沖縄、島尻層泥岩の力学特性が有効応力によって支配されることを示しており、興味深い。

ところで、切取などで難しい問題が生じるのは、風化を受けやすい比較的表層地盤に多いと考えられるが、この場合には、対象となる軟岩は必ずしも飽和していないので、次式¹²⁾によって有効応力 σ' を評価しなければならないであろう。

$$\sigma' = \sigma - u_a + \chi(u_a - u_w), \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 σ : 全応力、 u_a : 間げき空気圧、 u_w : 間げき水圧、 χ : 飽和度に依存するパラメーターである。

u_a が、常に大気圧と平衡しているとみなしうような場合には、圧力としてゲージ圧を考えれば、(3)式はつぎのように簡単化される。

$$\sigma' = \sigma + \chi p_k, \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 $p_k = -u_w$ である。

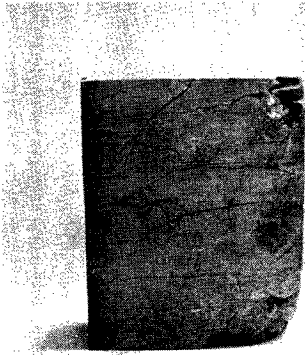


Photo. 1 Fissures in the vertical section of a mudstone from Tojyo, Hyogo, which were photographed after a swelling test.

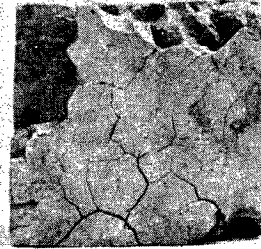


Photo. 2 Fissures in the horizontal section of a mudstone from Tojyo, Hyogo, which were photographed after a swelling test.

つぎに、軟岩の構成関係を考える際に留意すべきことは、軟岩の成因からも理解されるように堆積面に垂直な方向と平行な方向ではその力学的性質が異なることである。以下では、堆積面に垂直な方向をV方向、堆積面に平行な方向をL方向と簡約することにする。

Photos. 1, 2 に神戸層群に属するある泥岩の Type 4 の膨張試験後のクラック分布状況を示す。試験法の詳細は、**3.** で述べる。

Photo. 1 は、堆積面に垂直な面内の結果であるが、L方向のクラックがV方向よりも卓越して存在していることが明らかである。**Photo. 2** は堆積面に平行な断面の結果であるが、この場合には興味深いことにクラックの分布はランダムで特定の配向性はみられない。

Photos. 1, 2 の結果に基いて、軟岩を面内等方性材料とみなしうるものとし、さらに第1段階の解析モデルとして面内等方弾性体を考えてみる^{13), 14)}。

さて、初期状態*i*において p_k なる負圧を有する軟岩試料を、外力条件は一定に保って、大気圧と平衡している純水中に水浸させ、試料の膨張が終了し系が平衡に達した状態*f*を考える。このときは、状態*i, f*間の有効応力変化 $\Delta\sigma'$ は次式で与えられる。

$$\Delta\sigma' = p_s - (\chi p_k)_i, \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $p_s = \sigma_f - \sigma_i$ は膨張圧であり、仮定により $(\chi p_k)_f = 0$ である。

以下に、**3.**で述べる4種類の膨張試験に対応する面内等方弾性体の応答を示す。なお、(5)式の関係を利用することにする。

(i) 自由膨張：**3.**で述べる Type 1 の試験

軸対称条件下の応力一ひずみ関係は次式で表現される。

$$\epsilon_V = \Delta\sigma'_V / E_V - 2\nu_{LV}(\Delta\sigma'_L / E_L) \dots\dots\dots(6)$$

$$\epsilon_L = -\nu_{LV}(\Delta\sigma'_V / E_V) + (1 - \nu_{LL})(\Delta\sigma'_L / E_L) \dots\dots\dots(7)$$

ここに、添字 V, L は先述した V 方向、L 方向の成分を意味する (**Fig. 1** を参照)。E は弾性係数、 ν_{ij} は*i* 方向のひずみの*j* 方向へのひずみの影響

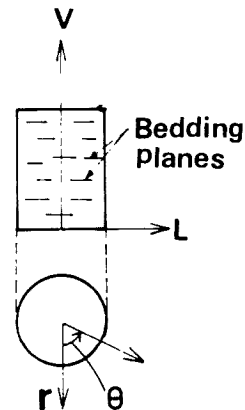


Fig. 1 Cylindrical coordinate system.

を示すポアソン比である。 ϵ はひずみであるが、以下では圧縮ひずみと圧縮応力を正とすることにする。

自由膨張では、 $(p_s)_V = (p_s)_L = 0$ であるから、(5), (6), (7)式より次式を得る。

$$(\epsilon_V)_{free} = -(\chi p_k)_i (1 - 2\nu_{LV}/n) / E_V, \dots\dots\dots (8)$$

$$(\epsilon_L)_{free} = -(\chi p_k)_i \{-\nu_{VL} + (1 - \nu_{LL})/n\} / E_V, \dots\dots\dots (9)$$

$$n = E_L / E_V. \dots\dots\dots (10)$$

(ii) V方向拘束, L方向自由膨張: 3. で述べる Type 2 の試験

この場合には、 $\epsilon_V = 0$, $(p_s)_L = 0$ であるので、(5), (6), (7)式より次式を得る。

$$(p_s)_{V2} = (\chi p_k)_i (1 - 2\nu_{LV}/n). \dots\dots\dots (11)$$

$(\epsilon_L)_2$ に関しては、(5)~(11)式の関係を利用して次式を得る。

$$(\epsilon_L)_2 = (\epsilon_L)_{free} (1 + m\nu_{VL}), \dots\dots\dots (12)$$

ここに、 $m = (\epsilon_V)_{free} / (\epsilon_L)_{free}$ である。

(iii) 完全拘束膨張圧試験: 3. で述べる Type 3 の試験

この場合には、 $\epsilon_V = \epsilon_L = 0$ であるので、(5), (6), (7)式より次式を得る。

$$p_s = (p_s)_V = (p_s)_L = (\chi p_k)_i. \dots\dots\dots (13)$$

(iv) Type 4 の試験

この場合には、Type 1, 2, 3 の試験とは異なり、

Fig. 2 に示すような直方体供試体を用いる。**Fig. 2** の直交座標系によれば、 $\epsilon_x = \epsilon_L = 0$, $(p_s)_V = (p_s)_z = 0$ であるから、 $(p_s)_{L4} = (p_s)_x$ に関しては次式が得られる。

$$(p_s)_{L4} = (\chi p_k)_i (-n\nu_{VL} + 1 - \nu_{LL}). \dots\dots\dots (14)$$

また、(8), (11)式および(9), (14)式から次式の関係が得られる。

$$(p_s)_{V2} = -E_V (\epsilon_V)_{free} \dots\dots\dots (15)$$

$$(p_s)_{L4} = -E_L (\epsilon_L)_{free} \dots\dots\dots (16)$$

これらの関係式について、4. で再び言及するであろう。

3. 実 験

3.1 試 料

pF- w 曲線を求めるために供した試料は、兵庫県竹向下と妙法寺から採取した神戸層群に属する泥岩である。これらの試料の物理特性を **Table 1** に示す。なお、膨潤性鉱物の存在をみるために、これらの泥岩から粘土分を採取し、島津自記X線回折装置 VD-1A 型を用いてX線分析を行なっている。

膨張試験に供した試料は、兵庫県東条からボーリングサンプルとして採取された、やはり神戸層群に属する泥岩である。この試料の物理特性を **Table 2** に示す。

3.2 試験方法

3.2.1 pF- w 曲線の作成

pF の測定には、pF の大きさにより 種々の

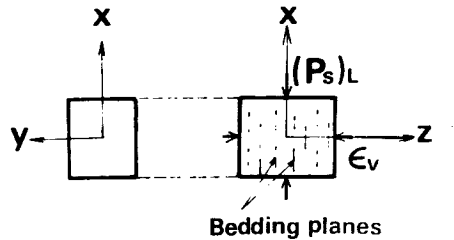


Fig. 2 Cartesian coordinate system.

Table 1 Index properties of mud stones from which PF versus w relations and X-ray diffraction patterns were obtained.

Site	LL %	PL %	PI %	Clay fraction, %
Takemukushita, Hyogo	47	24	23	9
Myohoji, Hyogo	44	17	27	10

Table 2 Index properties of mud stones from Tojyo, Hyogo on which swelling tests were performed.

Sample	Boring No.	Depth of site, m	w_i^* %	γ g/cm ³	S_r^{**} %
A	3	16~17	7.06	2.28	71
B	3	27~28	5.96	2.29	65
C	8	20~20.8	8.20	2.25	74
D	8	23~24	8.86	2.26	80
E†	8	22.4~23	7.52	2.26	71

* Average values of initial water content

** Degree of saturation

† LL=51%, PL=30%

方法があるが、本研究では低 pF 領域 (pF=0~2.3) ではガラスフィルターテンシオメーターを用いた吸引法を、高 pF 領域 (pF=4.3~6.7) では硫酸溶液を用いた蒸気圧法を採用した。

吸引法に使用した装置の概略を Fig. 3 に示す。スクリーコントロールによって自由水に負圧 p_k を与え、この負圧状態の水と軟岩中の水をガラスフィルターを通して接触させている。平衡時の軟岩中の水の負圧は次式によって求められる。

$$p_k = \gamma_w h_1 + \gamma_m h_2, \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 γ_w : 水の密度、 γ_m : 水銀の密度、 h_1, h_2 :

高度差である。したがって、pF は、 $pF = \log(p_k/\gamma_w)$ として求められる。

蒸気圧法に使用した装置の概略を Fig. 4 に示す。測定に際しては、真空ポンプによって容器内を減圧した後、2g 程度の塊状あるいは粉末状泥岩試料をセットし、軟岩中の水が容器内の水蒸気圧と平衡するまで静置した。

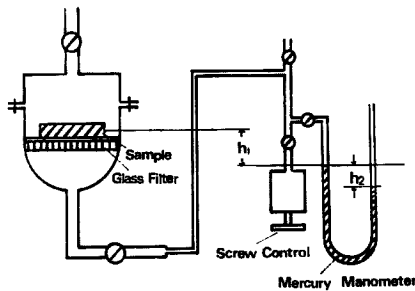


Fig. 3 Glass filter tensiometer used.

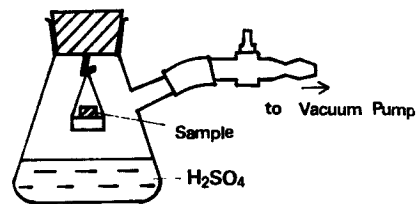


Fig. 4 An apparatus for providing the prescribed vapor pressures.

既知の一定蒸気圧を与えるための溶液として、Table 3 に示す 4 種類の既知濃度硫酸溶液を用いた。蒸気圧法の基礎式はつぎのようである¹⁵⁾。

$$pF = \log \{(RT/Mg) \ln(100/H)\}, \dots\dots\dots (18)$$

ここに、R: 気体定数、T: 絶対温度、M: 水蒸気の分子量、g: 重力加速度、H: 湿度 (単位: %) である。

硫酸濃度と湿度との関係は、文献¹⁵⁾ に与えられているので、(18)式から各濃度の硫酸溶液によって生ずる pF の値が求まる。これらの値も Table 3 に示してある。なお、本実験では、 $T=295^\circ\text{K}$ であった。

3.2.2 膨張試験

円柱状の泥岩供試体作成にあたっては、ボーリングサンプルを所定の長さに切断後、端面をサンドペーパーで念入りに仕上げた。供試体の

Table 3 Concentrations of solutions of sulphuric acid used, and the corresponding values of humidity and pF.

Concentration %	Humidity %	pF
4.50	98.6	4.28
15.43	92.3	5.04
27.82	78.4	5.53
75.06	2.22	6.72

寸法は高さ 3 cm, 直径 4.5 cm に統一した。直方体供試体については, 各辺の長さが 3~3.8 cm になるようにした。

行なった試験はつぎの 4 種類である。

Type 1: 無拘束状態で円柱状試料を水浸し, ϵ_v と ϵ_L を測定する試験である。

Type 2: $\epsilon_v=0$ の条件下で, 円柱状試料を水浸し, $(p_s)_v$ と ϵ_L を測定する試験である。

Type 3: 円柱状試料を側方変位および鉛直変位を許さない状態で水浸し, 膨張圧 $(p_s)_v$ を測定する試験である。

Type 4: 直方体供試体を用い, V 方向は自由に, L 方向の一方は拘束, 他方は自由とした状態で水浸し, $(p_s)_L$ を測定する試験である。

なお, 膨張量の測定には, ダイアルゲージを, 膨張圧の測定にはロードセルを使用した。

4. 結果と考察

4.1 pF-w 曲線

まず, Fig. 5 に pF-w 曲線を求めた泥岩(竹向下)の X 線回折図を示す。Fig. 5-(a) は無処理試料の, Fig. 5-(b) はエチレングリコール処理を行なった試料の良定位法による結果である。エチレングリコール処理によって, モンモリロナイトの (001) 反射が格子間隔 13.6 Å の位置から 17 Å の位置へ移動していることが図からよくわかる。このようにモンモリロナイトの存在は明瞭である¹⁶⁾ が, 他の粘土鉱物は明らかではない。妙法寺から採取した泥岩についても, ほぼ同様の結果が得られたので, X 線回折図は割愛した。

Fig. 6 に泥岩(竹向下)について得られた pF-w 曲線を示す。Fig. 6 において注目すべきことは, 塊状泥岩試料についての乾燥過程曲線 ABD と湿潤過程曲線 DE とが交差し, 乾湿のサイクルを受けた後の E 点の含水比が乾燥過程前の初期含水比 (A 点の含水比) よりも大きくなっていることである。

この現象の発生機構としては, 湿潤過程にスレーキングが生じ, 試料中にクラックが形成されたことが考えられる。このように, 泥岩のスレーキングの効果が pF-w 曲線に反映されること

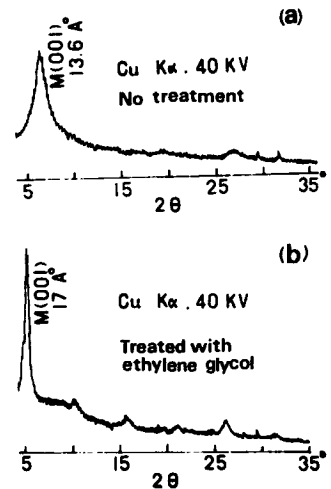


Fig. 5 X-ray diffraction patterns of clay fractions of a mud stone from Takemukushita, Hyogo: (a) none treated sample; (b) sample treated with ethylene glycol.

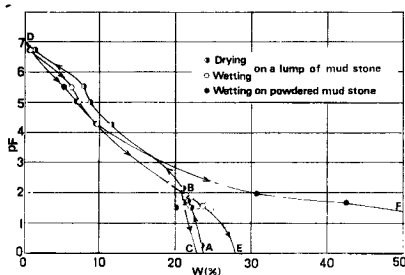


Fig. 6 Relationship between pF and w of a mud stone from Takemukushita, Hyogo.

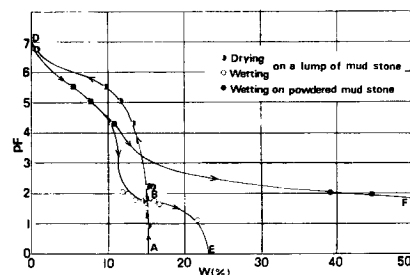


Fig. 7 Relationship between pF and w of a mud stone from Myohoji, Hyogo.

をさらに確認するために、塊状泥岩を乳鉢で粉碎後、 $250\ \mu$ フルイを通過させた粉末状試料について湿潤過程曲線 DF を求めてみた。

曲線 DF と DBE との比較により、 $pF \cong 4.5$ 以上の高 pF 領域では粉末状試料と塊状試料の $pF-w$ 曲線にはほとんど差違がみられないにもかかわらず、 pF が 4.5 より小さくなってくると両者の差違は次第に顕著になることが明らかである。2.1 で述べたように、 $pF=4.5$ 以下では軟岩中の水分は毛管水になっていくといわれている。毛管水は土粒子間の間隙に保持されるものであるので、泥岩のスレーキングの影響が $pF=4.5$ 以下で顕著になることは理解されよう。

Fig. 7 は妙法寺から採取した泥岩の結果であるが、Fig. 6 と同様の特性がみられている。

なお、Fig. 6 には塊状泥岩試料を $pF=2.2$ 前後まで脱水し、その後吸水させた場合の $pF-w$ 曲線 BC も示してあるが、この場合には乾湿サイクル後の C 点の含水比は A 点の含水比よりも小さくなっており、スレーキングは生じていないと判断される。

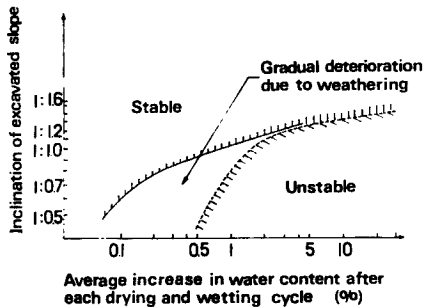


Fig. 8 Relationship between inclination of excavated slopes and average increase in water content after each drying and wetting cycle on soft rocks, after Okuzono (1972)⁶⁾.

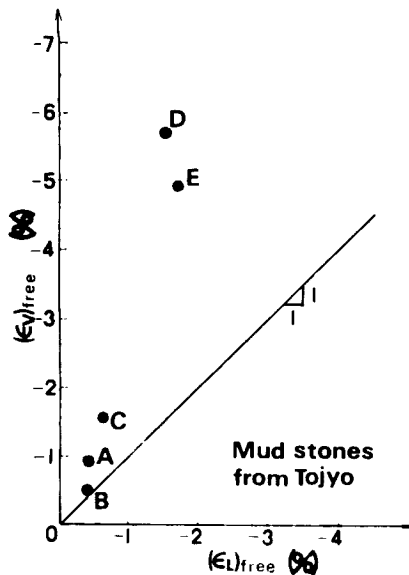


Fig. 9 A plot of $(\epsilon_v)_{free}$ versus $(\epsilon_L)_{free}$.

したがって、以上に述べたことから、スレーキングが発生するためには、湿潤過程初期の状態、例えば B 点、の泥岩中の水の pF がある値以上に大きい必要があるとの示唆が得られる。この点に関しては、泥岩にとりこまれる水の放出自由エネルギーに着目した仲野の研究¹⁷⁾が興味深い。

一方、奥園ら^{18), 19)}は軟岩についての乾湿繰返し試験から、吸水膨張しやすい軟岩では乾湿 1 サイクルあたりの含水比増加量 Δw が正になるという結果を得ている。彼らの行った試験では乾燥過程における軟岩中の水のエネルギー状態が不明であるが、著者らの得た乾湿両過程の $pF-w$ 曲線の交差という結果と奥園らの得た $\Delta w > 0$ という結果は、スレーキングによるクラックの増加効果という点で一致していると考えられる。

Fig. 8 は切土ノリ面勾配の選定に関する Δw の大きさにもとづく実用的な判定図⁶⁾である。この図からも、前述の熱力学的アプローチの実際の意義が理解されるようである。

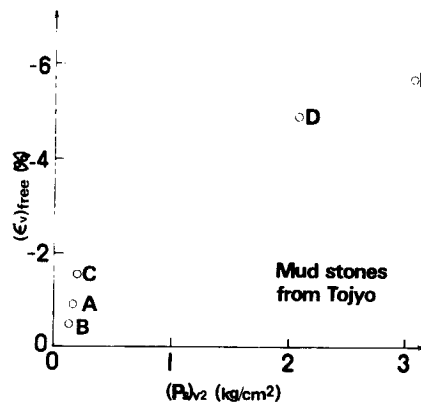
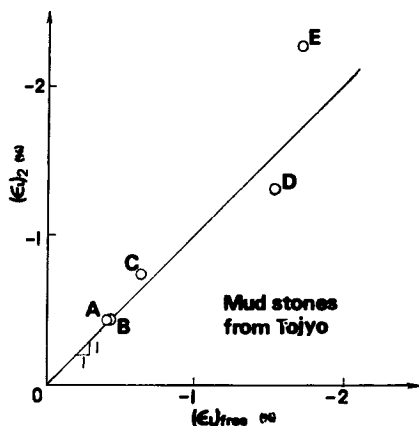
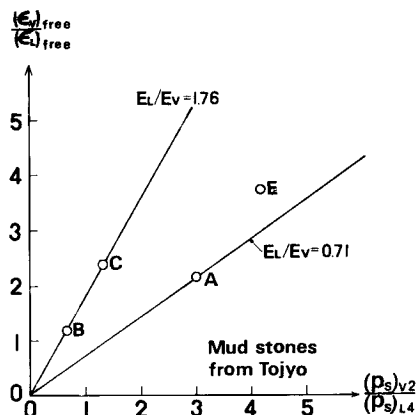


Fig. 10 A plot of $(\epsilon_v)_{free}$ versus $(P_s)\sqrt{2}$.

Fig. 11 A plot of $(\epsilon_L)_2$ versus $(\epsilon_L)_{free}$.Fig. 12 Relationship between ratio of $(\epsilon_V)_{free}$ to $(\epsilon_L)_{free}$ and ratio of $(p_s)_v2$ to $(p_s)_L4$.

4.2 膨張挙動

Fig. 9 は泥岩（東条）の Type 1 の試験における V, L 方向の膨張ひずみを示したものである。図から、V 方向の膨張ひずみが L 方向よりも卓越していることが明らかである。

Fig. 10 は、泥岩（東条）に対する $(\epsilon_V)_{free}$ と $(p_s)_v2$ との関係である。(15)式によれば、各試料の E_V の値がそれほど大きく違わなければ、 $(\epsilon_V)_{free}$ が $(p_s)_v2$ に比例すべきであるが、このことはほぼ満足されているようである。

Fig. 11 は、泥岩（東条）に対する $(\epsilon_L)_{free}$ と $(\epsilon_L)_2$ との関係を示したものである。(12)式から予想されるように $(\epsilon_L)_2$ の方が $(\epsilon_L)_{free}$ よりも大きくなっている。

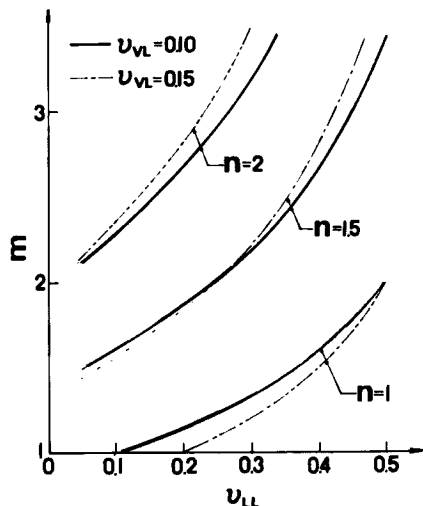
Fig. 9 と Fig. 11 に示した結果から、 $\nu_{VL}=0\sim0.11$ 程度の値が得られる。

Fig. 12 は、Murayama and Yagi²⁰⁾ にならって、 $(\epsilon_V)_{free}/(\epsilon_L)_{free}$ と $(p_s)_v2/(p_s)_L4$ との関係を示したものであるが、プロットは、 $E_L/E_V=0.71\sim1.76$ の範囲にばらついている ((15), (16)式参照)。この理由の1つとしては、直方体供試体の成形が難しく、 $(p_s)_L4$ の測定精度が他の試験における膨張圧測定精度より劣ることが考えられる。

そこで、膨張挙動の異方性に関して、 $m=(\epsilon_V)_{free}/(\epsilon_L)_{free}$ の値に着目して考察してみよう。 m と面内等方弾性定数との関係は、(8), (9)式から求まるが、全てのポアソン比の精度の高い情報を得るのは、実際には必ずしも容易ではないので、hexagonal anisotropy を仮定したときに得られる次式の関係¹³⁾を利用することにする。

$$n=\nu_{LV}/\nu_{VL} \dots\dots\dots (19)$$

このとき、(8), (9), (19)式から次式の関係が得られる。

Fig. 13 Calculated relationship among m , ν_{LL} and n , where values of ν_{VL} are chosen in view of the results of swelling tests on mud stones from Tojo, Hyogo.

$$m = \frac{1 - 2\nu_{VL}}{-\nu_{VL} + (1 - \nu_{LL})/n} \cdot \dots\dots\dots (20)$$

Fig. 13 は先述した ν_{VL} の値を考慮して、 $\nu_{VL}=0.10, 0.15$ に対する $m \sim n \sim \nu_{LL}$ の関係を示したものである。試験に供した泥岩の m の値は、1.20～3.69の範囲に入っているが (**Fig. 9** 参照)、妥当と考えられる ν_{LL} の範囲でこの程度の m の値を得るには、 n の値が1よりも大きくなくてはならないようである。

しかし、泥岩について n の値はほとんど報告されていないので、軟岩とその力学特性が類似していると考えられる London Clay についての膨張試験結果²¹⁾ を引用してみよう。**Table 4** に、飽和した London Clay の物理特性、膨張特性および非排水3軸圧縮試験より求められた L 方向と V 方向の変形係数比 E_L/E_V を示す²¹⁾。**Table 4** 中の ϵ_V/ϵ_L は1次元膨張における V 方向と L 方向との膨張ひずみ比の値を示しているが、明らかに V 方向の膨張ひずみが卓越している。このとき、変形係数比 E_L/E_V (上述の n に相当) の値も1より大きく、泥岩 (東条) について **Fig. 13** から得られた示唆を支持するようである。

また、**Table 4** において興味あることは、このように顕著な異方性を示す試料においても、Type 3 の試験 (**3.2.2** 参照) から求まる膨張圧にはほとんど V 方向と L 方向の差がないことである。実は、ここに導入した解析モデルによれば、(13)式に示すごとく、 $p_s = (p_s)_V = (p_s)_L$ なる関係が得られるのであり、Ward et al.²¹⁾ による実測データとよく対応することは興味深い。

Table 4 Results of swelling tests and undrained triaxial compression tests on saturated samples of London clay (From Ward et al., 1959).²¹⁾

Site	Type of sample	No. of tests	w %	LL %	PL %	γ g/cm ³	G _s	P _{0'} * kg/cm ²	P _s kg/cm ²	$\epsilon_V^{**}/\epsilon_L$	$E_L/E_V^\dagger$		
											First loading	Reloading	Unloading
L	V	12	25	76	27	2.02	2.68	—	3.55	1.98	1.7	1.6	1.7
	L	10	25	80	29	2.03	2.68	—	3.34	—	—	—	—
K (Site 1)	V	4	21	60	22	2.10	2.68	3.34	3.98	1.22	1.9	1.8	1.8
	L	4	21	60	21	2.10	2.68	—	3.44	—	—	—	—
G	V	4	26	78	28	2.05	2.74	—	5.06	1.13	1.1	1.8	1.4
	L	4	26	80	28	2.05	2.75	—	4.09	—	—	—	—
B (Site 3)	V	4	25	71	27	2.07	2.72	4.84	3.88	1.41	1.9	1.9	2.0
	L	4	25	71	27	2.07	2.72	—	3.44	—	—	—	—
P	V	2	22	66	28	2.08	2.68	—	9.47	3.11	—	—	—
	L	2	22	67	28	2.08	2.69	—	9.47	—	—	—	—
O	V	3	25	82	30	2.03	2.68	—	3.23	2.17	1.2	1.3	1.3
	L	3	24	79	29	2.03	2.70	—	3.12	—	—	—	—
	V	3	22	65	25	2.05	2.67	—	2.15	1.82	—	—	—
	L	3	22	65	24	2.05	2.68	—	2.05	—	—	—	—
T	V	2	24	73	31	2.05	2.74	—	7.43	3.69	1.4	1.5	1.5
	L	2	24	76	32	2.05	2.73	—	7.00	—	—	—	—

* Effective overburden pressure in situ.

** Values of ϵ_V and ϵ_L were obtained from one-dimensional swelling tests using the Casagrande type of oedometer.

† Values of E_V and E_L were obtained from undrained triaxial compression tests.

5. ま と め

前節までに得られた主要な結果を列挙すれば、つぎのようである。

- 1) $pF-w$ 関係にもとづく考察から、吸水膨張しやすい泥岩では、乾湿両過程の $pF-w$ 曲線が交差し、乾湿サイクルを受けることによって飽和含水比が増加することが明らかにされた。
- 2) 砕細化の影響を $pF-w$ 関係にもとづいて考察することにより、泥岩のスレーキングにおける毛管ポテンシャルの重要性が指摘された。
- 3) 軟岩の膨張挙動の異方性を考慮するために、面内等方弾性論が導入され、膨張圧—膨張ひずみ—毛管圧関係が求められている。さらに、神戸層群に属する泥岩および London Clay²¹⁾ についての膨張試験結果にもとづいて、この解析モデルの有用性が確かめられている。

謝 辞

泥岩の吸水膨張特性に関して、適切な御助言を頂いた金沢大学工学部八木則男助教授に感謝の意を表します。妙法寺および竹向下泥岩試料を提供して頂いた応用地質調査事務所和田晃氏、ならびに東条泥岩試料を提供して頂いた大阪土質試験所橋本正氏に対し感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Tsytovich, N. A., Yu. K. Zaretsky and Z. G. Ter-Martirosyan: Problems of Soil Swelling on Wetting, Proc. 3rd Asian Regional Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1967, pp. 120-123.
- 2) 村山朔郎：トンネル背面地山の吸水膨張，京都大学防災研究所年報，第9号，昭41.3，pp. 409-415.
- 3) Serota, S. and R. A. J. Jennings: The Elastic Heave of the Bottom of Excavations, Géotechnique, Vol. 9, 1959, pp. 62-70.
- 4) Skempton, A. W.: Horizontal Stresses in an Overconsolidated Eocene Clay, Proc. 5th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Vol. 1, 1961, pp. 351-358.
- 5) 例えば、植下協：路床土の含水状態とその支持力に関する研究，京都大学博士論文，昭33.12.
- 6) 奥園誠之：切土ノリ面の崩壊とノリ勾配，土と基礎，第168号，昭47.2，pp. 33-39.
- 7) Schofield, R. K.: The P.F. of the Water in Soil, Trans. 3rd Int. Cong. Soil Sci., Vol. 2, 1935, pp. 37-48.
- 8) 山崎不二夫監修：土壤物理，養賢堂，昭46，pp. 46-97.
- 9) 土木学会：土木技術者のための岩盤力学，昭41.11，pp. 128-130.
- 10) Bjerrum, L.: Progress Failure in Slopes of Over-Consolidated Plastic Clay and Clay Shales, Proc. ASCE Jour. Soil Mech. Found. Div. Vol. 93, No. SM5, 1967, pp. 3-49.
- 11) 赤井浩一・足立紀尚・新城俊也：沖縄，島尻層泥岩の力学特性，京都大学防災研究所年報，第16号B，昭48.4，pp. 753-764.
- 12) Bishop, A. W.: The Measurement of Pore Pressure in the Triaxial Test, Pore Pressure and Suction in Soils, Butterworths, London, 1960, pp. 38-46.
- 13) Barden, L.: Stresses and Displacements in a Cross-Anisotropic Soil, Géotechnique, Vol. 13, No. 2, 1963, pp. 198-210.
- 14) 諸戸靖史：砂の弾性的な変形特性，土質工学会論文報告集，第12巻，第3号，昭47.9，pp. 65-74.
- 15) 土壤物理性測定法委員会：土壤物理性測定法，昭47.4，pp. 154-157.
- 16) 須藤俊男：粘土鉱物，岩波書店増補版，昭33.5，pp. 130-133.
- 17) 仲野良紀：由比地すべり母岩（泥岩）の軟弱化と物性の変化について（その1）—軟弱化のメカニズムについて—，土と基礎，第12巻，第11号，昭39.11，pp. 27-33.
- 18) 奥園誠之・中島将博：室内岩質試験の方法とその応用について，日本道路公団試験所報告，昭44，pp. 28-32.
- 19) 奥園誠之・中島将博：切土ノリ面の風化に関する研究—東名・中央道切土ノリ面追跡調査から—，日本

道路公団試験所報告, 昭45, pp. 1-9.

- 20) Murayama, S. and N. Yagi: Swelling of Mudstone Due to Sucking of Water, Proc. 1st Congress of Int. Soc. Rock Mech., Vol. 2, 1966, pp. 495-498.
- 21) Ward, W. H., S. G. Samuels and M. E. Butler: Further Studies of the Properties of London Clay, Géotechnique, Vol. 9, No. 2, 1959, pp. 33-58.