

71) 椎谷泥岩の強度に及ぼす吸水膨張の影響

東電設計(株) 三室 俊昭

東電設計(株) 岡 信彦

清水建設(株) 傳田 篤

清水建設(株) 渡辺 浩平

The effect of swelling on strength of Shiiya mudstone

Toshiaki MIMURO (Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

Nobuhiko OKA (Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.)

Atsushi DENDA (Shimizu Corporation)

Kohei WATANABE (Shimizu Corporation)

ABSTRACT

Authors have researched deterioration phenomena of soft sedimentary rocks such as slaking and swelling. In this study triaxial compression tests and triaxial swelling-compression tests were carried out using non weathered specimens and artificial dried specimens of Shiiya mudstone which swelling properties are clarified, as to examine the effect of swelling on strength of soft sedimentary rocks. As the results, the following conclusions are obtained;

1. The strength of non weathered Shiiya mudstone is not due to vertical stress relaxation.
2. Dried specimens of Shiiya mudstone is not easy to saturate under the confined stress condition.
3. In the case such that the six months-dried specimens are sheared under the imperfect saturated condition, shear strength are higher than those of non weathered specimens with increasing confining pressure.

1. はじめに

近年、わが国においては、原子力発電所、本州四国連絡橋、青函トンネルのような新第三紀の堆積軟岩を基礎とする重要かつ大規模な岩盤構造物が増えてきている。しかし、これらの堆積軟岩の多くが吸水膨張、スレーキングなどといった軟岩特有の性質も持っており、これらに起因した工学的な問題も増加の傾向にある。このため、筆者らは新第三紀堆積軟岩についてスレーキング特性¹⁾および吸水膨張特性²⁾について研究を行ってきた。一方、風化した斜面の崩壊などの軟岩構造物における安定性などの問題を取り扱うため、応力解放や乾湿繰り返しといった環境の変化を受けて劣化した軟岩の強度、変形特性についての研究も行われている。

軟岩の風化による強度劣化の研究としては、西ら³⁾、新城ら⁴⁾、前川ら⁵⁾の研究がある。これらの研究は乾燥・湿潤により人為的に風化させた飽和試料と未風化の飽和試料について試験を行い、力学特性の変化について検討したものである。足立ら⁶⁾は岩盤の強度は図-1に示すように、岩石試験から得られる最大強度を上限值とし、残留強度を下限值とする範囲にある事を指摘している。これは、岩盤が様々

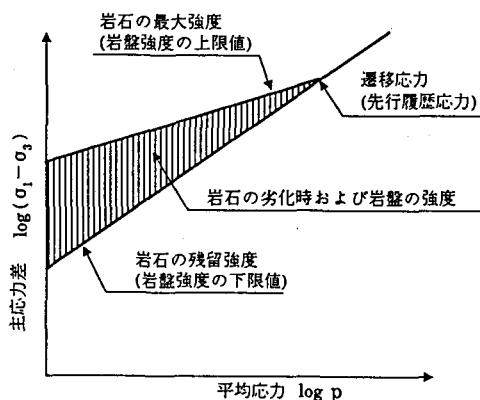


図-1 岩石の劣化時および岩盤強度の範囲

な原因によって劣化を生じ、岩石の最大強度から残留強度に至る過渡的な状態にあることを意味している。風化によって劣化した飽和試料についても同じく未風化の飽和試料の最大強度を上限値とし、残留強度を下限値とする範囲内にあることが確認されている。本研究では、軟岩の力学特性、特に強度に及ぼす吸水膨張や乾湿の影響をについて検討を行うため、原位置から採取した未風化飽和試料、および乾燥・湿潤により人為的に風化させた飽和試料について三軸圧縮試験を実施し、これらの試験結果について検討した。

2. 基本的な物性試験の概要と結果

試験に用いた試料は、新潟県東頸城郡松代町のトンネル掘削現場の切羽付近からブロックサンプリングした試料である。椎谷層と呼ばれる新第三紀の黒色泥岩で塊状無層理である。表-1 にこの椎谷泥岩の基本的な物性値を示す。粒度組成をみると、粘土分だけでも75%近くに達しており、きわめて微細な構成粒子からなっていることがわかる。コンシステンシー特性をみても、液性限界が190%程度、塑性指数も138と大きく、きわめて高塑性な試料である。X線回折結果から膨潤性粘土鉱物であるモンモリロナイトの存在も確認されている。一軸圧縮強さは13.6~20.5kgf/cm²の値が得られており、新第三紀泥岩の中では小さめの値を示している。図-2 には高圧圧密試験の結果を示した。これによれば圧密降伏応力として、70kgf/cm²が得られた。この試験では、圧密降伏応力以下の応力レベルで1回、圧密降伏応力以上のレベルで2回の膨潤試験を行い、膨潤指数としてそれぞれ0.03, 0.04, 0.06が、圧縮指数として0.22が得られた。膨潤過程をみると、圧密降伏応力以下の応力レベルでは膨潤量はそれほど大きなものではないが、圧密降伏応力以上の荷重を作用させた後では、かなり大きな膨潤が観測された。これは圧密降伏応力以上の荷重を受けることによって試料の構成粒子間のボンドが破壊され、固結した泥岩から粒子間の結合力がそれほど大きくない土のような状態への、ある意味での構造変化が生じているためと考えられる。

3. 三軸圧縮試験の概要および試験結果の考察

三軸圧縮試験には、未風化の飽和試料と一旦乾燥させた試料を用いた。未風化飽和試料は、自然状態の強度特性、また、吸水膨張の影響を検討するためにも用いた。乾燥試料については、所定の拘束状態で吸水させ劣化させた。乾燥試料の作成は、恒温・恒圧槽を利用して温度20℃で相対湿度を99%から85%まで、試料に乾燥亀裂が入らないように約6か月をかけて

表-1 椎谷泥岩の基本物性

項 目		値
粒 度 組 成	礫 分	—
	砂 分	0.5 %
	シルト分	25.5 %
	粘土分	74.5 %
液性限界	LL	189.5 %
塑性限界	PL	51.5 %
塑性指数	I _p	138.4
土粒子の比重	G _s	2.66
自然含水比	w _n	20.0 %
湿潤密度	γ _t	2.12 g/cm ³
乾燥密度	γ _d	1.77 g/cm ³
間隙比	e	0.506
一軸圧縮強さ	q _u	13.6~20.5kgf/cm ²
圧密降伏応力	p _c	70.0 kgf/cm ²
圧縮指数	c _c	0.22
膨潤指数	c _s	0.03 ~0.06

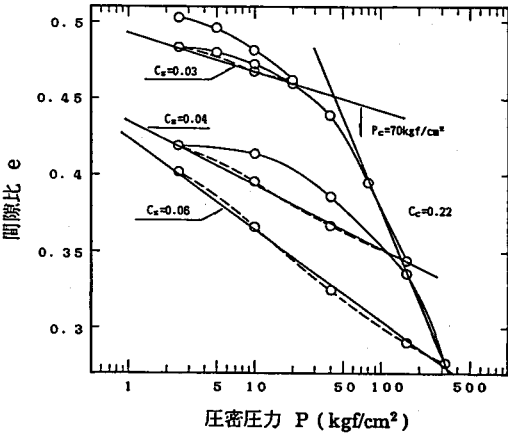


図-2 高圧圧密試験結果

きわめて徐々に乾燥させ、試料含水比が約 5%になるまで乾燥させた。したがって、この乾燥過程により供試体の含水比は自然状態での20%から 5%まで低下したことになる。

3. 1 未風化試料の圧密排水三軸圧縮試験 (CD試験)

この試験は、自然状態の岩石の持つ強度特性を把握し、吸水後の強度特性と比較するために行った。試験は未風化飽和試料を側圧一定、ひずみ速度一定(0.005%/min)の排水条件でせん断した。側圧としては、0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00kgf/cm²の5種類を用いた。図-3 には、主応力差($\sigma_1 - \sigma_3$)～軸ひずみ(ε_1)～体積ひずみ(ε_v)の関係の実測値を σ_3 をパラメーターとして示した。なお、 $\sigma_3 = 0.5\text{kgf/cm}^2$ については図の煩雑さを避けるため省略した。図-4 には、最大強度(実線)と残留強度(破線)の有効応力で表示したモール円、およびこれらの円の包絡線を直線で近似したときのモール・クーロンの破壊基準線を示した。モール・クーロンの破壊基準は次式で示される。

$$\tau = c' + \sigma \cdot \tan \phi'$$

ここで、 c' ; 粘着力、 ϕ' ; 内部摩擦角である。

図-4 から、最大強度については、 $c' = 5.96\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi' = 31.3^\circ$ 、残留強度については、 $c' = 0.82\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi' = 27.6^\circ$ が得られた。

図-5 は、最大強度(○)および残留強度(●)の実測値と図-4 に示した応力円の包絡線は、やや曲線性を示しているので、この関係を表現するためにべき関数型の破壊基準^{6) 7)}を適用して破壊基準線を示したものである。

足立ら⁶⁾の破壊基準は、次式によって示される。

$$q/p_0 = \alpha (p/p_0)^\beta$$

ここで、 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ 、 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ 、 $p_0 = 1.0\text{kgf/cm}^2$ である。

この破壊基準式からは、最大強度について、 $\alpha = 7.65$ 、 $\beta = 0.515$ が、残留強度については、 $\alpha = 2.53$ 、 $\beta = 0.660$ が得られた。

3. 2 未風化試料の圧密吸水膨張排水三軸圧縮試験

この試験は自然状態の椎谷泥岩が応力解放を受けたとき、強度にどのような影響を及ぼすかをみるものである。すなわち、初期応力が解放されると泥岩は膨張しようとする。

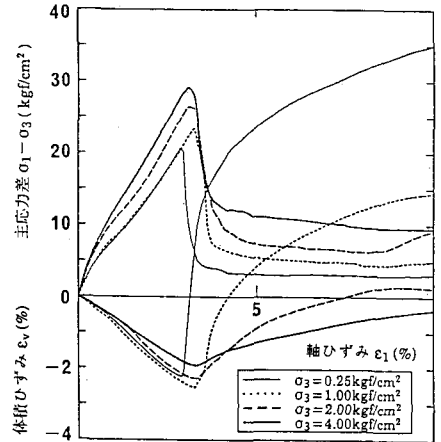


図-3 主応力差～軸ひずみ～体積ひずみ
(未風化試料CD試験)

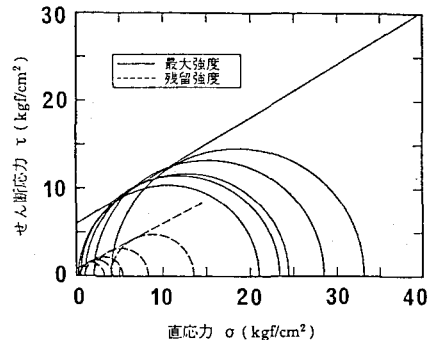


図-4 モール円、モール・クーロンの
破壊基準線 (未風化試料CD試験)

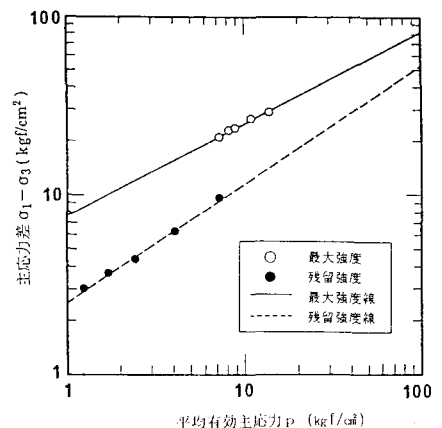


図-5 最大強度および残留強度
(未風化試料CD試験)

このとき吸水条件が与えられていると泥岩の水分は増加し、同時に膨張する。この過程の強度に及ぼす影響を調べるものである。試験に用いた試料には、 1.0 kgf/cm^2 の土被り圧が作用していたので、通常のCD試験に先立ち、土被り相当の圧力で等方圧密し、所定の圧力まで除荷した後に吸水膨張させ、吸水量に変化の見られなくなった時点で、側圧一定、ひずみ速度一定（ $0.005\%/min$ ）の排水条件でせん断した。側圧は $0, 0.05, 0.25, 0.40 \text{ kgf/cm}^2$ の4種類を用いた。図-6には、主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）～軸ひずみ（ ε_1 ）～体積ひずみ（ ε_v ）の関係の実測値を各側圧 σ_3 について示した。図-7は、側圧 $\sigma_3 = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ の場合について、吸水膨張過程を入れたCRD試験（破線）とCD試験（実線）から得られた応力～ひずみ関係を示したものである。この両者の応力～ひずみ関係にはほとんど差が見られず、ひずみ軟化過程における体積ひずみに差が見られるのみである。図-8には、本試験から得られた最大強度（ Δ ）と残留強度（ $\blacktriangle$ ）の実測値、およびCD試験から得られた最大強度（ $\circ$ ）と残留強度（ $\bullet$ ）の実測値を足立ら⁶⁾の破壊基準とともに示した。これらは、本試験の最大強度、残留強度ともにCD試験の結果と良く一致しており、強度特性に変化は見られなかった。

3. 3 乾燥試料の圧密吸水膨張排水三軸圧縮試験

この試験は一旦乾燥した試料が吸水することによって生じるスレーキングや吸水膨張が強度特性に及ぼす影響を見るために行った試験である。試験は乾燥試料に所定の圧力を作用させた後、吸水させて吸水量の変化がなくなった時点で側圧一定、ひずみ速度一定（ $0.005\%/min$ ）の排水条件でせん断した。側圧は、 $0.80, 1.60, 3.20, 6.40 \text{ kgf/cm}^2$ の4種類を用いた。本試験では、吸水を所定の拘束圧を負荷させた後に実施しているが、これは本試料が非常にスレーキング性が強い無拘束状態で吸水させると供試体の形状が失われる危険性があること、および拘束圧が負荷された状態での吸水特性を見るためである。吸水は供試体とメンブレンの間のメッシュおよび底面からとし、供試体の上面からは脱気させた。

図-9には、主応力差（ $\sigma_1 - \sigma_3$ ）～軸ひずみ（ ε_1 ）～体積ひずみ（ ε_v ）の関係の実測値を各側圧 σ_3 について示した。図-10には、最大強度（実線）および残留強度（破線）のモール円とモール・クーロンの破壊基準線を示した。これから、最大強度については、 $c' = 2.45 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $\phi' = 48.6^\circ$ 、残留強度については、 $c' = 0.60 \text{ kgf/cm}^2$ 、

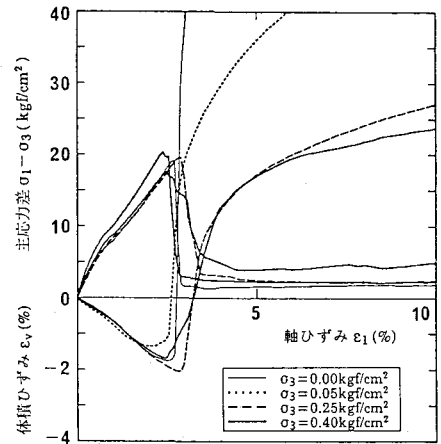


図-6 主応力差～軸ひずみ～体積ひずみ
(未風化試料CRD試験)

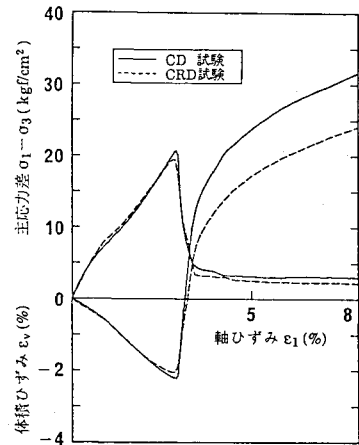


図-7 主応力差～軸ひずみ～体積ひずみ
($\sigma_3 = 0.25 \text{ kgf/cm}^2$ の場合)

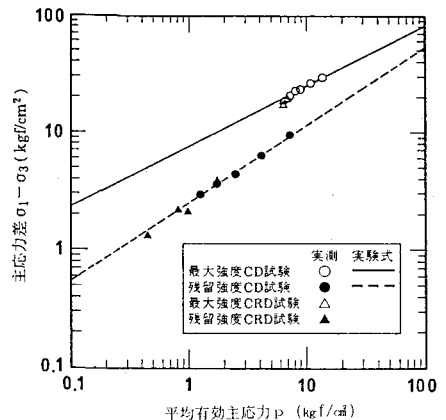


図-8 最大強度および残留強度
(未風化試料のCD, CRD試験)

$\phi' = 38.2^\circ$ が得られる。これらの得られた強度定数を未風化試料のCD試験から得られた強度定数と比較すると、最大強度、残留強度ともに粘着力 c' が小さく、内部摩擦角 ϕ' は大きくなっている。図-11は最大強度(□)と残留強度(●)の実測値、および足立ら⁶⁾によるべき関数型の破壊基準線を示したものである。なお、同時に未風化試料のCD試験から得られた最大強度(○)と残留強度(●)の実測値、およびべき関数型の破壊基準線も示してある。

足立ら⁶⁾の破壊基準による強度定数としては、最大強度について $\alpha = 3.41$, $\beta = 0.858$ が、残留強度については、 $\alpha = 2.07$, $\beta = 0.917$ が得られた。

これらの強度定数 α , β を未風化試料のCD試験結果の強度定数(最大強度 $\alpha = 7.65$, $\beta = 0.515$, 残留強度 $\alpha = 2.53$, $\beta = 0.660$)と比較すると、乾燥試料の α , β は最大強度、残留強度ともに α が小さく、 β が大きくなっている。

4. おわりに

これらの試験結果から、①本泥岩の未風化試料では、土被り圧相当の除荷を受けて吸水しても、強度特性に対する影響がない。これは、この泥岩の固結力の強さ、内部組織の強さが示されているものと考えられる、②乾燥亀裂のない本泥岩の乾燥試料は、拘束圧下での吸水がきわめて生じ難い、③約6か月の乾燥過程を与えた供試体を、不完全飽和状態でせん断した場合、そのせん断特性は拘束圧の増加に応じて未風化試料より高い強度を示す、ことがわかった。

参考文献

- 1) 三室, 吉中, 岡, 佐藤; スレーキング試験結果の解釈と利用, 第18回岩盤力学に関するシンポジウム, 1986.
- 2) 三室, 岡, 傳田; 椎谷泥岩の吸水膨張特性について, 第21回岩盤力学に関するシンポジウム, 1989.
- 3) 西, 工藤, 金谷, 緒方; 風化した堆積軟岩の力学特性, 電力中央研究所報告, No. U87032, 1987.
- 4) 新城, 小宮; 乾湿劣化に伴う泥岩の強度低下, 第22回土質工学研究発表会, 1987.
- 5) 前川, 宮北, 小川; 乾湿条件を与えた珪藻質軟岩の工学的特性, 土木学会第38回年次学術講演会, 1983.
- 6) 足立, 小川; 堆積軟岩の力学特性と破壊基準, 土木学会論文報告集, 第295号, 1980.
- 7) Yoshinaka, R. and Yamabe, T.; A Strength criterion of rocks, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 4, 1980.

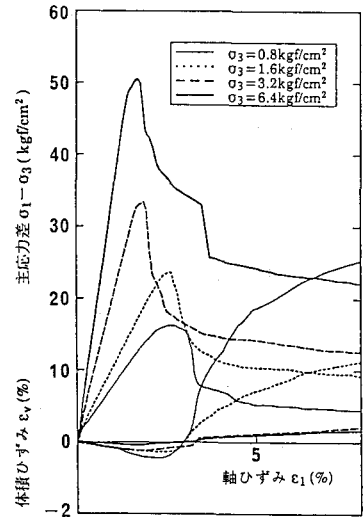


図-9 主応力差～軸ひずみ～体積ひずみ
(乾燥試料のCRD試験)

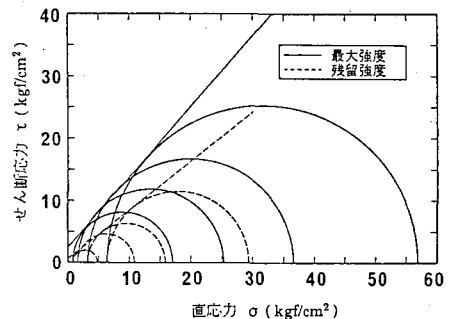


図-10 モール円, モール・クーロンの破壊基準線 (乾燥試料のCRD試験)

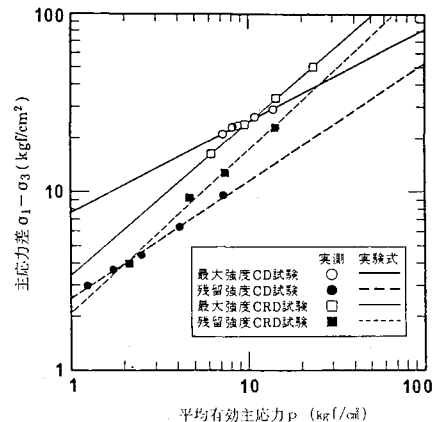


図-11 最大強度, 残留強度 (乾燥試料CRD, 未風化試料CD試験)