

硬質粘土と頁岩の膨潤特性と pF 特性

SWELLING TESTS OF STIFF CLAY AND SHALE AND PF TESTS

片岡昌裕*・ 望月秋利**・ 阪口 理***・ 山田貴史****

Masahiro KATAOKA, Akitosi MOTIZUKI, Osamu SAKAGUTI and Takashi YAMADA

An apparatus to observe the swelling pressure of swelling deformation was developed. Stiff clay, shale and sandstone were grained under $250\ \mu\text{m}$ powder and compacted in a mould (30mm inside-diameter, 78mm height) by static pressure of 30 to 130 kg/cm². It is already known that the former two show slaking obviously by cyclic drying and wetting tests, though the last one shows no slaking. Two series of tests were achieved; The first series was to observe swelling pressure under a constant volume condition of the samples. The second series was to observe swelling deformation under no stress condition. It was concluded that the slaking rate is higher, the swelling pressure is higher. It shows a possibility that swelling pressure can be used as an index for the slaking of material. The behaviors of swelling pressure or deformation, and pF-value of the samples are also reported in detail.

1. はじめに

丘陵地や山間地の開発に伴い、硬質粘土や頁岩等の軟岩を主材料とする盛土工事が増えているが、このような材料はスレーキングを生じやすく、盛土供用後に不同沈下による被害が生じた例が報告されている¹⁾。筆者らは頁岩を対象に載荷状態で乾燥・水浸を繰り返す圧縮試験を実施し、乾燥過程では収縮による沈下を生じ、水浸過程では繰返し回数の増加に伴い沈下から膨潤に転じることを指摘するとともに、スレーキングに伴う沈下特性を検討してきた²⁾。

岩塊のスレーキングは乾燥過程での収縮も重要な要因であるが³⁾、材料の吸水能力を示す pF 特性や吸水に伴う膨潤特性の重要性が指摘されている。仲野⁴⁾は泥岩を対象に水分ポテンシャルの考えを導入してスレーキング現象を説明し、村山ら⁵⁾は泥岩を対象に吸水・脱水過程での pF～含水比関係からスレーキング現象を考察した。また Matsukura ら⁶⁾は凝灰岩や頁岩を対象に、立松ら⁷⁾はモンモリロナイトを用いて作製した錠剤試料を対象に、試料の吸水にともなう膨潤圧を計測し、膨潤圧が大きい試料はスレーキングを生じや

* 正会員 工修 大日本土木(株)技術研究所 土木研究室

** 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

*** 理博 近畿大学教授 理工学部建築学科

**** 大日本土木(株)技術研究所 土木研究室

すいことや、膨潤圧は試料のモンモリロナイト含有率や空隙率が影響することを指摘した。さらに Mihail ら⁹⁾は粘土塊 (crumb) を有するロームを用いて水浸・乾燥を繰り返した場合の膨潤量は繰返しとともに増加すると報告し、その原因として粘土塊の膨潤特性を指摘した。しかしこれらの研究は、材料のスレーキングに影響を与える要因として材料の pF 特性や膨潤特性が指摘されているものの、材料の吸水にともなう膨潤圧や膨潤量の発生過程の詳細な検討やこれらの膨潤特性と材料の吸水特性との評価についてはまだ十分解明されていない。

本論文では材料のスレーキング現象を検討するためには基礎的な研究が必要であると考え、スレーキング特性と乾燥した材料の膨潤特性や pF 特性の関係を検討したものである。すなわち硬質粘土、砂岩およびスレーキング特性の異なる 2 種類の頁岩を対象に、岩塊を粉碎して静的に締固めた試料を用いて吸水量と膨潤圧や膨潤量の経時変化を測定することのできる実験装置を作製し、まずスレーキングの生じやすさと膨潤圧、膨潤量の関係を検討するとともに、各試料の膨潤圧、膨潤量の発生過程を吸水による含水比の変化と関連づけた。次いで pF 試験 (蒸気圧法、加圧法) を実施して各試料の pF-含水比関係を計測し、膨潤圧や膨潤量が生じる含水状態を、pF 特性から評価した結果をまとめたものである。

2. 試料と試験の種類

試験は硬質粘土、頁岩 (淡路頁岩、阪南頁岩) および砂岩の 4 種類の材料を用いた。硬質粘土は大阪層群に属し、また頁岩、砂岩は紀伊半島和泉山脈から淡路島南部、愛媛県北部に分布する和泉層群に属する堆積岩で、いずれの材料も最近では盛土材料として用いられている。

表-1 に材料の基本的性質を示す。X線回折は硬質粘土と淡路、阪南頁岩について実施した。これらの材料の主な鉱物組成は石英・斜長石で、膨潤性鉱物であるセリサイト・スメクタイト混合層鉱物は硬質粘土に少量、淡路・阪南頁岩に微量含まれる。

図-1 は筆者ら⁹⁾が頁岩のスレーキング特性を検討するために、以前に実施した乾湿繰返し試験での N (繰返し回数) 5、10 回目の粒度分布を示したものである。淡路頁岩は阪南頁岩に比較して N の増加に伴ってスレーキングによる細粒化が激しい。また図-1 には示していないが、硬質粘土は乾燥後の 1 回目の水浸で泥状化まで細粒化し、砂岩は 10 回繰返した後ほとんど粒度分布が変わらなかった。スレーキングに対する安定性は硬質粘土が最も低く、次に淡路頁岩、阪南頁岩、砂岩の順になる。表-2 は試験の種類と用いた試料を示したものである。膨潤圧や膨潤量試験には原石を

整形したコアを用いる場合も見られるが、今回は硬質粘土は固結度が低く、コア材として整形するのが難しいことや構成粒子本来の膨潤性に着目して、粉体を静的に締固めた締固め試料を主として用いた。また pF 試験 (蒸気圧法) は締固め試料の他に岩塊試料も実施した。締固め試料は粉碎機で試料 20g を約 30 分かけ

表-1 材料の基本的性質

試料名	硬質粘土	淡路頁岩	阪南頁岩	砂岩
採取場所	奈良・生駒	兵庫・淡路	大阪・阪南	和歌山・泉佐野
G_s^{*1}	2.68	2.75	2.69	2.70
w_n (%)	2.15	2.03	1.17	1.83
ρ_d (t/m ³)	2.08	2.21	2.31	2.40
q_u (tf/m ²)*2	約 80	約 300	約 700	約 2000
X線回折結果				実施せず
石英	多量	多量	多量	
斜長石	多量	普通	多量	
カリ長石	微量		微量	
セリサイト・スメクタイト*3	少量	微量	微量	

*1: G_s, w_n, ρ_d, q_u は 3 試料について試験し、その平均値。
*2: 1kgf/cm² = 0.098Mpa
*3: エチレングリコール処理と塩酸処理を行った結果。

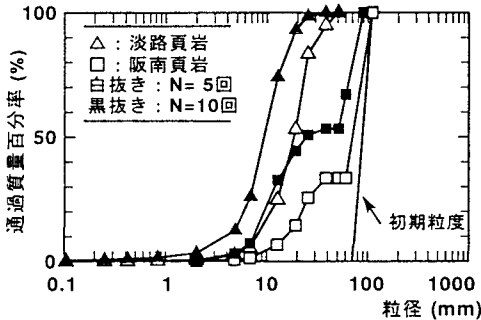


図-1 粒度分布の変化

表-2 試験の種類と試料

試料	試験	膨潤圧	膨潤量	pF 試験	
				蒸気圧法	加圧法
岩塊	σ ^{*1} = 230	○ ^{*2}	○	○	○
	σ = 130	○	○	○	○
	σ = 30	○	○	○	○

*1: 締固め荷重 (kgf/cm²)、*2: 実施

て250 μ 以下に粉碎し、24時間炉乾燥後にシリカゲルをいれたデシケーター内で約1週間保存したものを、21g計測してモールドに詰めて、 $\sigma=30, 130, 230\text{kgf/cm}^2$ (2.94, 12.74, 22.54MPa)の3通りの静的荷重をそれぞれ約2時間載荷し、供試体を作製したものである。表-3に締固め後の試料の含水比、乾燥密度を示す。 $\sigma=230\text{kgf/cm}^2$ で締固めた供試体の乾燥密度は約1.9~2.1 t/m^3 で、原石のそれに近い。ため、膨潤量試験およびpF試験(加圧法)は $\sigma=230\text{kgf/cm}^2$ での締固め試料で実施した。

3. 試験方法および試験結果

3. 1 膨潤圧、膨潤量試験

(1)試験方法

図-2は膨潤圧および膨潤量の試験装置を示したものである。装置はモールド(内径30,高さ78mm)と水槽から構成される。膨潤圧、膨潤量試験とも同じモールドを使用し、その内部には試料とモールドとの摩擦を軽減するため、樹脂(デルリン)層を設けた。膨潤圧は試料上部に小型ロードセルを固定して一定体積下で測定し(図(1))、また膨潤量はモールド上部に変位計をセットして測定した(図(2))。試料はモールド下部に設けた素焼き板を通して水槽から吸水し、その時の吸水量と膨潤圧あるいは膨潤量を計測する。なお、吸水量は電子天秤上に設置した水槽重量の減少から求め、試験中の吸水量と膨潤圧、膨潤量の経時変化のデータをパソコンに取り込む。

図-3は試験手順を示したものである。試験手順はモールド内で供試体を作成後、水槽に蒸留水を素焼き板上面まで給水し、飽和した素焼き板を設置する。次に試験装置を組み立て、吸水量、膨潤圧や膨潤量の測定を開始する。なお、供試体の吸水は装置組立中にはじまるので、吸水と同時に発生する膨潤圧については計測しながら装置を組み立てた。最後に膨潤圧や膨潤量の収束を確認後、供試体をモールドから押し出して含水比を測定し、吸水量から試験中の含水比の経時変化を算定する。

(2)結果

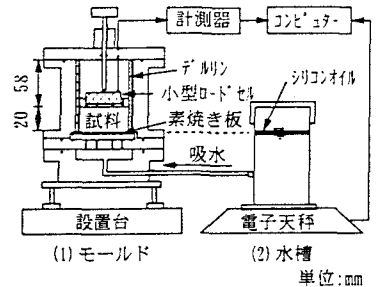
図-4は $\sigma=230\text{kgf/cm}^2$ で締固めた各試料の膨潤圧、含水比の経時変化を示したものである。淡路、阪南頁岩では含水比は約40~45分、膨潤圧は約30分で最大値に達し、その後ほぼ一定となる。これに対して硬質粘土では約20分まで含水比が急激に増大し、それ以降は一定の割合で増加する。また膨潤圧は約15分と、淡路、阪南頁岩の半分の時間で最大値(約15 kgf/cm^2)に達する。図-5は最大膨潤圧を締固め荷重に対して示したものである。

表-3 締固め試料の初期含水比および乾燥密度

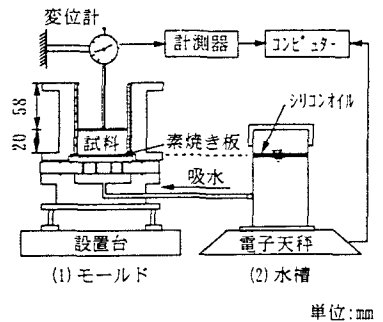
締固め荷重 (kgf/cm ²)*1	$\sigma=230$		$\sigma=130$		$\sigma=30$	
	試料	w_0 *2	ρ_d *3	w_0	ρ_d	w_0
硬質粘土	1.53	1.91	1.50	1.87	1.15	1.70
淡路頁岩	0.78	2.11	0.60	1.99	0.71	1.84
阪南頁岩	0.91	2.10	0.75	1.99	0.67	1.85
砂岩	0.37	2.07	0.41	1.98	0.50	1.94

*1: $1\text{kgf/cm}^2 = 0.098\text{MPa}$

*2: 初期含水比(%), *3: 初期乾燥密度(t/m^3)



(1) 膨潤圧試験



(2) 膨潤量試験

図-2 試験装置(膨潤圧、膨潤量試験)

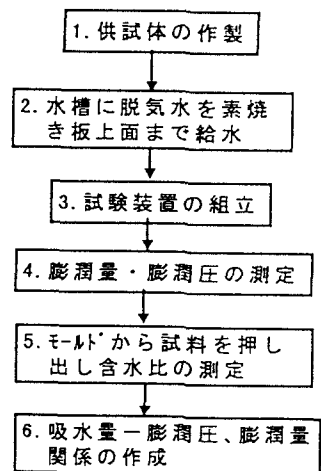
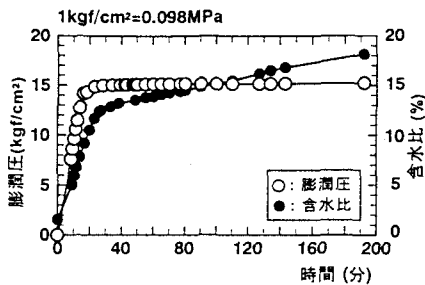
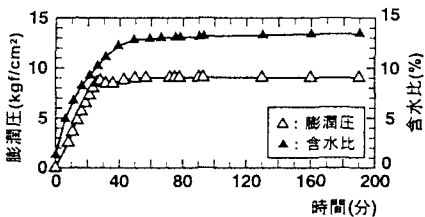


図-3 試験手順(膨潤圧、膨潤量)

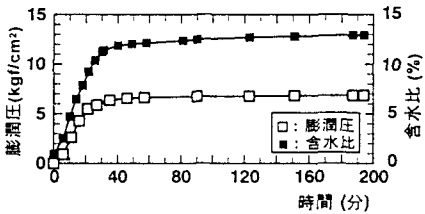
一般に締め荷重が大きいくほど膨潤圧は大きくなり、その増加量はスレーキングのしやすい材料ほど大きい。材料のスレーキング特性の違いが明瞭に認められるのは、原石の乾燥密度に近い $\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$ で締めめた供試体であった。これは密度が小さい供試体は、試料が膨潤してもその空隙に吸収され、結果として膨潤圧の差があまり生じなかったためと考えられる。図-6は $\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$ で締めめた各試料の膨潤率（膨潤量／初期供試体高さ）と含水比の経時変化を示したものである。硬質粘土では吸水の初期段階で急激に膨潤率が増加し、その後漸増する。これに対して淡路、阪南頁岩の膨潤率は吸水にともない緩やかに増加を生じ、含水比がほぼ一定になった後も漸増する。図-7は各試料の膨潤圧と膨潤率の最大値を示したものである。膨潤率は時間の経過とともに増加するため、硬質粘土の含水比が計測後500分でほぼ収束する傾向にあるためこの時間での結果を示した。



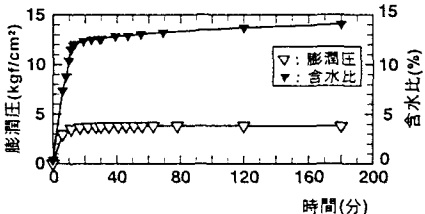
(1) 硬質粘土



(2) 淡路頁岩



(3) 阪南頁岩



(4) 砂岩

図-4 時間-含水比、膨潤圧関係

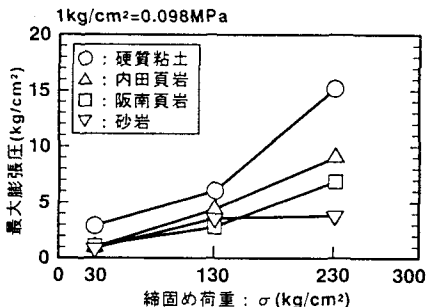
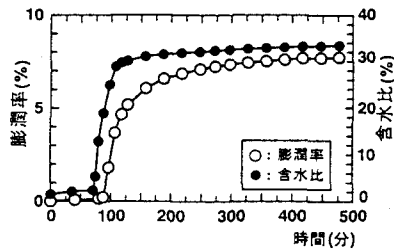
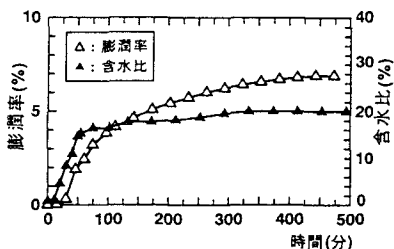


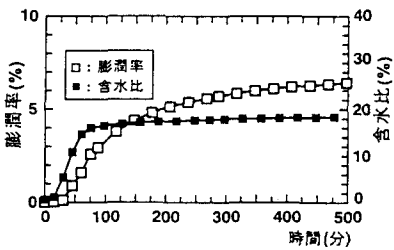
図-5 締め荷重-最大膨張圧関係



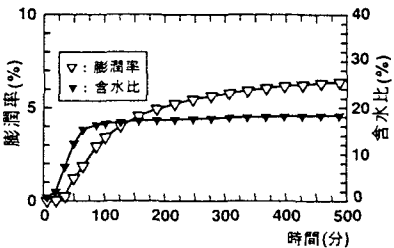
(1) 硬質粘土



(2) 淡路頁岩



(3) 阪南頁岩



(4) 砂岩

図-6 時間-含水比、膨潤率関係

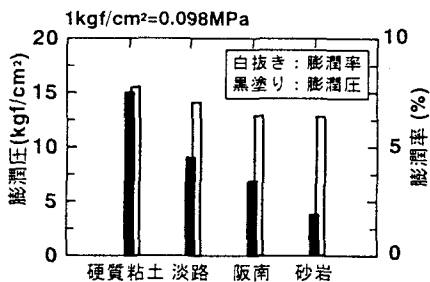


図-7 膨潤圧と膨潤率
(締めめ試料: $pF = 230 \text{ kgf/cm}^2$)

膨潤圧はスレーキングの生じやすさと明瞭に関連するとともに短期間（30～50分）でほぼ収束する。これに対して、膨潤率は硬質粘土では最も大きくなるものの、他の試料については膨潤圧ほどスレーキングの生じやすさとの関連は明瞭ではない。特にスレーキングに対する安定性が高い砂岩の膨潤率が大きかった理由は

はっきりしないが、これは初期含水比が小さかったことも原因ではないかと考えられる（表-3参照）。今回用いた試料に関しては、スレーキングの生じやすさの評価は膨潤圧を指標とする方がより明確となることがわかった。図-8は、図-4、6の結果をもとに含水比と膨潤圧、膨潤率の関係に整理したものである。いずれの試料でも膨潤圧は吸水とほぼ同時に発生するのにに対し、膨潤率は淡路、阪南頁岩では含水比(w)が約5%で、また硬質粘土では約20%で増加し始め、膨潤圧よりも遅れて生じる。亀井ら¹⁰⁾は締固めた粘土を用いて吸水膨潤試験を実施し、膨潤圧の方が膨潤量より速く生じることを指摘しているが、今回の実験でも同様な結果となった。また今回の実験では硬質粘土では $w \geq 25\%$ で、淡路、阪南頁岩では $w \geq 15\%$ で急激に膨潤率が増加した。吸水段階では供試体の吸水は底面から始まり、水分は徐々に試料全体に広がる。膨潤を拘束する膨潤圧試験では、吸水と同時に吸水した部分から膨潤しようとするが、拘束のため内力としての膨潤圧が直ちに発生し、吸水とともに膨潤圧は増大する。一方膨潤量試験では吸水と同時に膨潤は発生するが、初期段階の発生量は最終膨潤量に比較して極めて小さく、ある程度含水比が上昇した時点で供試体の剛性も低下するため、全体の膨潤が活発になると考えられる。

3. 2 pF 試験

(1) 試験方法

pF 4 以上 ($pF = 4.46, 5.0, 5.51, 5.95, 6.48$) は蒸気圧法¹¹⁾を用いた。すなわち各 pF に対応した溶液を入れたデシケー

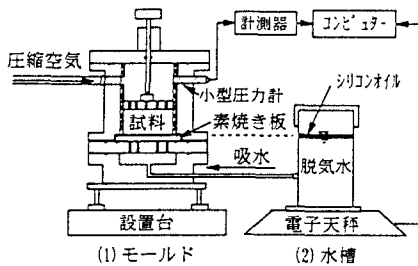
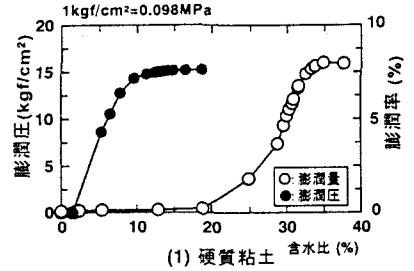


図-9 pF 試験装置（加圧法）

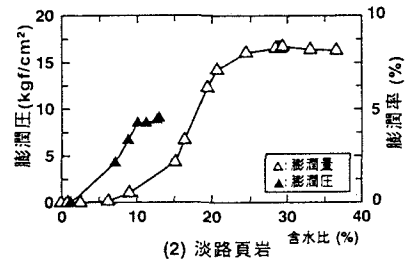
ター内に締固め試料および岩塊試料を入れ、約4ヶ月間にわたって2週間毎に試料の重量を計測し、各試料の重量がほぼ収束したのを確認後含水比を計測した。また締固め試料に対しては、それ以下の pF 値 ($= 3.5, 3.0, 2.5$) についても加圧法を用いて計測した。なお、加圧法は一般には脱水過程が実施される場合が多いが、ここでは吸水時の膨潤圧や膨潤量に着目しているため試料の吸水過程について実施した。図-9は加圧法による pF 試験装置を示したものである。試験方法は供試体を入れたモールドを設置台にセット後、モールド内に $pF = 3.5$ に相当する圧縮空気 (3.2 kgf/cm^2) を送り込み、吸水量（水槽の重量の減少）がほぼ平衡になるのを確認後、 $pF = 3.0$ 、 $pF = 2.5$ と圧縮空気の圧力を低下させて各 pF の吸水量を計測した。各 pF 値に対応する含水比は、膨潤圧や膨潤量試験と同様に試験後の試料の含水比と試験中の吸水量から求めた。

(2) 結果

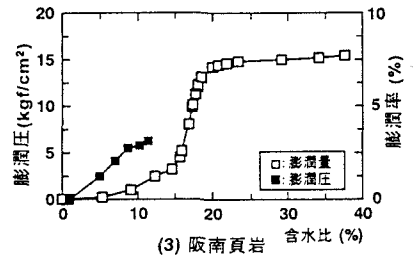
図-10は岩塊試料および締固め試料 ($\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$) の pF と含水比(w)の関係を示したものである。なお、岩塊の $pF = 0$ での含水比は、脱気水を入れた真空状態の容器に岩塊を3日間水浸して求めたが、硬質粘土は水浸により激しく細粒化したため計測できなかった。 $pF \geq 4.46$ の場合、同じ pF 値に対して岩塊試料では硬質粘土の w がやや大きい程度で他の試料については試料による違いはほとんど見られず、また岩塊と



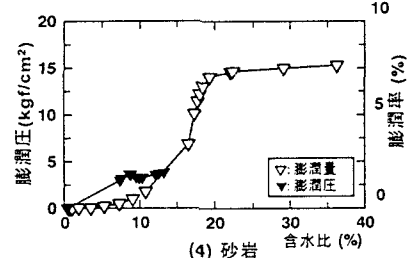
(1) 硬質粘土



(2) 淡路頁岩



(3) 阪南頁岩



(4) 砂岩

図-8 含水比～膨潤圧、膨潤量関係

締固め試料でのwの違いもほとんどない。一般に土に保持される水は土粒子表面で粒子からの強い吸着力によって保持される「結合水（表面保水）」と粒子の接触点近傍で毛管作用によって保持される「自由水（間隙保水）」に分けられ、 $pF \geq 4.5$ は結合水、 $pF \leq 3.5$ は自由水、その間の $pF = 3.5 \sim 4.5$ は「半結合水」と区別されている¹²⁾。今回の実験でも $pF \geq 4.46$ で岩種が同じならば岩塊試料、締固め試料とも各 pF 値に対応する含水比はほとんど変わらず（図-10参照）、試料の間隙の大きさに影響されない結合水と考えられる。またそれ以下の半結合水あるいは自由水の段階で締固め試料の含水比の変動が大きい。

図-11は締固め試料（ $\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$ ）の膨潤圧および膨潤量についてそれぞれ pF 値との関係を示したものである。膨潤圧の場合、硬質粘土では $pF \geq 4.5$ の結合水の状態ですでに最大膨潤圧（ 15 kgf/cm^2 ）の約70%の 10.5 kgf/cm^2 とかなり大きく、これに対して例えば淡路試料では最大膨潤圧（ 9 kgf/cm^2 ）の約10%の 1 kgf/cm^2 であり、他の試料もほぼ同様な値となった。硬質粘土の膨潤圧が大きかった原因はスメクタイト・セリサイト（膨潤性鉱物）の含有量の違いで

であろうと考えている。次に膨潤量の場合はいずれの試料でもそのほとんどが $pF \leq 3.5$ での自由水（間隙保水）で生じている。すなわち、乾燥した試料が吸水すると硬質粘土ではまず結合水の状態で、また他の試料は半結合水の状態で膨潤圧が最大値に達する。これは締固め試料についての結果であるが、 $pF \geq 4.46$ での pF と含水比の関係は岩塊と締固め試料ではほとんど変わらないので、この結果を岩塊に当てはめると硬質粘土は $pF \geq 4.5$ のかなり乾燥した状態では、表面保水状態のわずかな含水比の変化で急激に大きな膨潤圧が発生する。すなわち試料の初期乾燥状態は膨潤圧の発生に対して重要な要因となる。さらに、岩塊の場合は本来有するセメンテーションによる結合力は最初の乾燥に伴う収縮による損傷の要因が加わると考えられ、結局乾燥による損傷の度合いが大きいほど（乾燥程度が著しいほど、あるいは攪乱の付加など）、吸水による膨潤は大きく発生するので、スレーキングも著しくなると考えられる。

4. まとめ

スレーキング特性の異なる硬質粘土と頁岩を用いて吸水による膨潤圧や膨潤量を測定できる実験装置を製作して、膨潤圧、膨潤量特性を検討するとともに、 pF 試験を実施し、各材料のスレーキング特性との関連を検討した。得られた主な結論は以下の通りである。

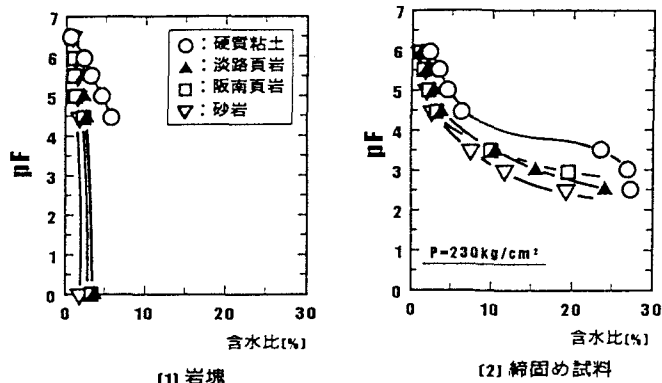


図-10 pF -含水比関係（岩種の違い）

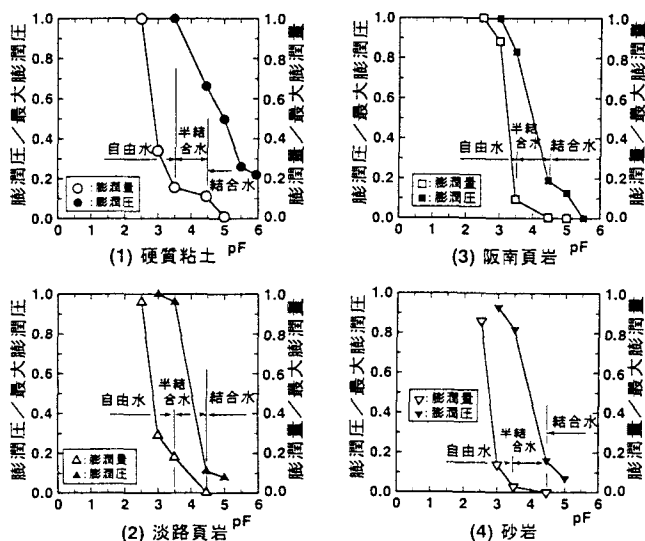


図-11 pF -膨潤圧、膨潤量関係

- (1) $\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$ で静的に締固めた試料はスレーキングが生じやすい試料ほど膨潤圧が大きくなり、試料のスレーキング特性を評価する上での一つの指標となり得る。
- (2) 膨潤量はスレーキングが生じやすい試料ほど大きくなる傾向は認められるものの、膨潤圧ほど明瞭な傾向は認められない。
- (3) 膨潤圧は吸水とほぼ同時に発生するが、膨潤率は硬質粘土では含水比が約 25% で、淡路、阪南頁岩では含水比が約 15% で急激に増大する。これは膨潤を拘束する膨潤圧試験は拘束のため吸水と同時に膨潤圧は発生するが、膨潤量試験では初期段階の発生量は最終膨潤量に比較して極めて小さく、ある程度含水比が上昇した時点で供試体全体の膨潤が活発になると考えられる。
- (4) スレーキングが最も生じやすい硬質粘土の締固め試料 ($\sigma = 230 \text{ kgf/cm}^2$) では、「結合水 (pF4.5 以上)」の乾燥状態で他の試料の約 10 倍の膨潤圧が生じ、試料の初期乾燥状態は吸水による膨潤圧に対して重要な要因と考えられる。
- (5) 膨潤量はいずれの試料でもそのほとんどが $pF \leq 3.5$ の自由水 (間隙保水) で生じる。

本論文は盛土材料として最近よく用いられる硬質粘土や頁岩の膨潤特性、pF 特性について述べたが、膨潤圧や膨潤量は切土のり面の崩壊やトンネル掘削での地山の押し出しといった地盤工学上重要な問題とも密接に関係している。今後も種々の条件の基でこの種のデータを蓄積するとともに、岩塊試料に対しても膨潤特性やスレーキング特性との関連を検討する予定である。

最後に、本研究を進めるに当たり大阪市立大学大学院、柴山敏君 (現大阪市) の協力を得た。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 三笠正人・望月秋利・川本祥史：宅地沈下に関する一考察，第 8 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.399-402, 1972.
- 2) 片岡昌裕・望月秋利・阪口理・木下哲生：頁岩の載荷状態での水浸・乾燥に伴う沈下特性とその推定，地盤工学会論文報告集，vol.36, No.2, pp.143~151, 1996.
- 3) 田中芳則：水分ポテンシャルからみた泥岩の乾燥収縮と湿潤膨張，応用地質，21巻 3号，pp.13-21, 1980.
- 4) 仲野良紀：由比地スレリ母岩(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，Vol.12, No.11, pp.27-32, 1964.
- 5) 村山朔郎・関口秀雄・鳥居原誠・沢田守生：軟岩の吸水膨張に関する一考察，京大防災研究所年報，第 17 号B, pp.391-401, 1974.
- 6) Yukiori, Matsukura and Eiji Yatsu : Wet-dry slaking of Tertiary Shale and Tuff Transaction, Japanese Geomorphologic Union., 3-1, pp.25-39, 1982.
- 7) 立松英信・水野清：人工泥岩の膨張圧力特性：交換性陽イオンの影響，粘土科学，第 27 巻第 3 号，pp.147-152, 1987.
- 8) Mihail Popescu : Behavior of Expansive Soils With A Crumb Structure, 4th., Int., Conf. On Expansive Soils, A.S.C.E, New York, Vol.1, pp.158-171, 1980.
- 9) 望月秋利・片岡昌裕・阪口理・寺下雅裕：暴露試験と乾湿繰返し試験による頁岩の風化速度の検討，土質工学会論文報告集，vol.34, No.4, pp.109~119, 1994.
- 10) 亀井健史・榎本雅夫：水浸に伴う不飽和シルト質土の膨潤特性，土木学会論文集，No.505/III-29, pp.89-96, 1994.
- 11) 土質工学会編：土質試験の方法と解説，pp.94-95, 1990.
- 12) 土壌物理研究会編：土の物理学，pp.211-225, 1978.