

膨潤性軟岩の工学的性状について

斎藤 二郎 平間 邦興
木村 薫 丸山 誠

Engineering Properties of Swelling Soft Rocks

Jiro Saito Kunioki Hirama
Kaoru Kimura Makoto Maruyama

Abstract

Recently, in construction of large-scale civil structures, there have been increases especially in work on rock and bedrock making it necessary for analyses to be made of rock movements in excavation and of earthquake resistance of bedrock. In construction on hard rock in the past, only the excavation properties were discussed because of its good physical properties, but recently, detailed examinations of the engineering properties of bedrock for design and construction of large-scale projects such as underground oil storage reservoir and underground power station have become necessary. The authors carried out basic research on several items related to engineering properties of rocks. Swelling soft rock was taken up and various physical, chemical and mechanical tests were performed mainly focusing on water absorption and swelling tests, and examinations were made of the useful natures or correlations of the respective engineering test results. As a result of comparisons and studies of the various numerical engineering values, it was possible mainly to clarify the swelling characteristics of soft rock.

概 要

近年、大型土木構造物の建設にあたって、特に岩あるいは岩盤がその建設工事の対象となる場合が多くなり、事前に岩盤掘削時の挙動や岩盤構造物の安定性などの解析が必要となってきた。従来から硬岩を対象とする工事では、その良好な物性からむしろ掘削性が論議されていたに過ぎず、最近の石油岩盤備蓄、地下発電所などの大規模工事における設計・施工では岩盤の工学的性状についての詳細な検討が要求される。筆者らは岩の工学的な性状に関する2、3の基礎研究を行ってきた。ここでは、膨潤性の軟岩を取り上げ、その吸水膨張試験を主として、各種の物理、化学および力学試験を実施し、それぞれの工学的試験結果の有用性あるいは相関性について検討した。各種の工学的な物性値を比較、検討した結果、主に軟岩の吸水膨張特性について明確にすることができた。

1. まえがき

大規模な岩盤内構造物の建設にあたっては、岩盤の工学的性状の把握の重要性について指適されるようになり、特に問題となるのが風化の激しい軟岩で構成されている岩盤である。軟岩とは一般に固結度が低く容易に風化しやすい特徴を持っており、軟岩が吸水すると膨張を生じて軟弱化する吸水膨張現象の著しい岩である。この軟岩の吸水膨張が、トンネル支保工の変状や長大切取斜面の崩壊などを引き起こし、土木工学上の問題となっている。

そこで、軟岩の工学的性状を究明するために吸水膨張試験をはじめとして各種の工学的な試験を試みた。岩石の基本的な物理性状の他に、土質試験法に準拠して各種の物理試験を行なった。化学的な試験では、PF試験、スレーキング（崩壊性状）試験、並びにX線回析を実施した。力学的な試験では、室内弾性波試験と圧縮試験を行なうとともに、特に一部試料について三軸圧縮試験を試みた。

以上の各種試験結果から、軟岩の工学的性状について検討するとともに、特に顕著な吸水膨張特性の定性的傾向や、各種試験結果との相関性の把握を試みた。以下に

採取場所	相 浦			生 駒			鶴 川	松 代	湯ヶ島
試料名	A-1	A-2	A-3	I-1	I-2	I-3	K	M	Y
岩石名	風化 泥岩	風化 凝灰岩	泥岩	土丹	土丹	土丹	風化 蛇紋岩	泥岩	風化 凝灰岩
初期含水比(%)	13.2	13.3	3.4	22.5	21.6	21.6	9.1	23.3	26.6
真比重Gs	2.80	2.87	2.76	2.75	2.70	2.77	2.75	2.81	2.69
乾燥比重Gdry	1.68	1.92	2.44	1.49	1.50	1.56	1.95	1.43	1.49
間隙率n(%)	40.0	33.0	11.5	45.9	44.5	43.5	29.2	49.1	44.7
吸水率Wsat(%)	25.4	22.8	5.2	30.4	35.8	27.7	16.1	34.9	28.3
粒砂分(%)	1	37	1	22	2	4	3	1	44
度シルト分	27	15	38	26	33	29	28	8	13
特粘土分	72	41	61	54	65	67	69	91	43
性2μpass	57	41	48	48	56	59	52	70	35
コテン液性限界LL(%)	55	66	29	46	73	71	60	131	56
ンシ塑性限界PL(n)	23	23	15	21	23	23	23	20	35
スI液性指数IP	32	43	14	25	50	48	37	111	21
一軸圧縮強度qu(kg/cm ²)	8.3	75.0	126.2	3.1	15.3	20.3	8.8	35.7	3.2
弾性波速度Vp(km/sec)	0.736	1.554	1.739	0.988	1.000	1.696	1.272	1.851	1.051

表-1 試験試料と基本的性質

検討結果の一部についてその概要を示す。

2. 試験試料

試験試料の基本的性質を表-1に示す。試料としては5地点で採取した9試料である。岩質は泥質岩、凝灰岩、蛇紋岩および土丹などで、いずれの試料も軟岩の部類に属し、一部試料は粘土化が激しく全般的に固結度も低い。

松代の泥岩試料を除いてその他の試料は、いずれもボーリングコア(φ50mm)採取したもので、採取深度は5mから25mと異なっている。また、相浦および生駒試料については、採取深度あるいは岩質から判断してそれぞれ3試料選別し、試験に供した。なお、試験試料の自然含水比(採取時)が不明なため、初期含水比は試験時の含水比とした。

3. 試験方法の概要

試験	試験項目	備 考
物理試験	比重, 吸水率, 間隙率	
	土粒子の比重試験	JIS A 1202
	土の粒度試験	JIS A 1204
	土の液性限界試験	JIS A 1205
化学試験	土の塑性限界試験	JIS A 1206
	吸水膨張量試験	
	吸水膨張圧試験	
	粘土鉱物	X線回折法
力学試験	pF試験	遠心法および蒸気圧法
	スレーキング試験	写真撮影による視察および乾湿くり返し法
	一軸圧縮試験	
	三軸圧縮試験	
	弾性波速度試験	超音波速度法

表-2 工学的試験方法の種類と適要

ここで実施した試験を物理、化学および力学試験に分類すると表-2のようになる。吸水膨張試験では膨張量試験と膨張圧試験をそれぞれ行ない、軟岩の基本特性について調べた。また、吸水による崩壊性状を調べるためのスレーキング試験では、写真撮影による方法の他に、湿潤と乾燥のくりかえしによる方法を試みた。なお室内弾性波試験では最も一般的な超音波速度法を採用した。

以下に、主な試験方法についての概要を示す。

3.1. 吸水膨張量・吸水膨張圧試験

吸水膨張試験器の概要を図-1に示す。試験容器は真ちゅう製で、側方と底部が固定され上部のみに体積変化できる機構になっており、リング側壁にも多数の小孔があり供試体全面からの吸水も可能な構造となっている。供試体寸法は直径5cm、高さ2cmである。

吸水膨張量試験は上部のみ非拘束としてダイヤルゲージで吸水膨張量を測定した。初期含水条件は(i)自然状態(W_n)、(ii)自然乾燥状態(W_n-α)とし、吸水条件は(i)全面吸水と(ii)下部吸水(図-1参照)の2種で実施した。また、一部試料については土被り圧相当荷重(P₀=0.05, 0.1(kg/cm²))を載荷させた上で吸水させた。なお、吸水膨張量とは試験前の試料高さを1、吸水膨張量をΔlとするとΔl/l×100(%)で表わされる。

吸水膨張圧試験は、圧縮試験機のクロスヘッドに固定したロードセル(200kg)を利用して、体積一定条件で吸水膨張圧を測定した。試料の含水条件は自然状態、吸水条件は全面吸水である。なお、吸水膨張圧とは試料断面積A、吸水膨張力FとするとF/Aで表わされる。

試験中の最大値をその試料の吸水膨張量、吸水膨張圧と定義し最大値が発生後測定を終了した。また試験前後の試料重量、含水比から乾燥比重G_{DRY}、間隙率n、吸水率W_{sat}などを算定した。

3.2. スレーキング試験

岩石の浸水による崩壊性状を調べる方法については未だ明確な規定はないが、ここでは最も簡便な写真撮影による視察の方法の他に乾湿くりかえし試験法を採用した。これは乾燥・湿潤を人工的にくりかえすことによって、

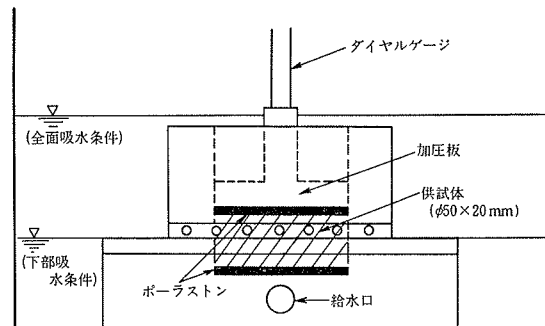


図-1 吸水膨張試験器と吸水条件

岩石の性状変化を調べる方法で、日本道路公団でも多用されている。試験方法としては、各研究機関の方法を参考にした。まず自然試料を 5g 程度ろ過水筒(径 175mm) 中に入れ、水浸 8 時間・炉乾燥(110°C) 16 時間を 1 サイクルとして 10 回の乾湿くりかえし試験をおこなった。各サイクルごとに吸水量を測定し、吸水量増加率をなど算定する。

3.3. 圧縮試験

通常の圧縮試験の他に三軸圧縮試験を行なった。供試体寸法は原則的に直径 5 cm、高さ 10 cm で、載荷速度 0.1(%/min) のヒズミ制御方法を採用した。

三軸圧縮試験は岩石用の高圧三軸圧縮試験機を使用した。三軸セルはステンレス製で内径 9 cm、高さ 34 cm であり、側圧は油圧により最高 $\sigma_3=600(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の負荷が可能である。ここでは、側圧 $\sigma_3=25\sim300(\text{kg}/\text{cm}^2)$ の 5 段階を設定し、非圧密非排水条件で試験を実施した。

なお、岩石の圧縮強度は、試験片の縦横比 D/L によって異なるため、試験供試体の D/L によって得られた試験強度を D/L=2 の場合に換算して圧縮強度とした。

4. 試験結果とその検討

4.1. 吸水膨張量試験

吸水膨張量試験結果を一括して表-3 に、代表試料の経時変化を図-2 に示す。

吸水膨張量の最大値は 0.7~19.0% の範囲にあり、吸水量(試験前後の含水比の差)も試料によっては 0.8~20.3% とまちまちの試験結果が得られた。また、最大吸水膨張量を示す時間は 20~400 時間と、経時変化も異なった傾向を示し、同じ試料でも吸水条件や含水比条件によってかなり異なるようである。例えば、吸水条件による違いをみると、全般的に全面吸水条件より下部吸水条件のほうが大きい吸水膨張量を示す試料が多く、4~7% の吸水膨張量の差が表われている。最大の吸水膨張量に達する時間も、全面吸水条件よりも下部吸水条件のほうが長期間を要し、徐々に吸水膨張していく傾向が認められる。試料含水比による違いでは、自然試料よりも自然乾燥試料のほうが 2~7 倍の大きな吸水膨張量を示している。したがって、試料の乾燥状態が吸水膨張特性に著しく影響を与える状況が理解できる。

4.2. 吸水膨張圧試験

吸水膨張圧試験結果を一括して表-4 に、代表的試料の経時変化を図-3 に示す。

吸水膨張圧の最大値は 0.02~2.44(kg/cm²) を示し、吸水量も 1.0~10.5% の測定結果が得られている。吸水膨張圧にはバラツキが多く、吸水量は吸水膨張量試験と比較して小さい結果が得られた。また、吸水膨張圧が最

大となる経過時間は 20~140 時間と比較的短時間のうちに発生している。しかし最大膨張圧の 1/2 に達するのは試験開始後約 1 時間以内である。したがって、短時間の

試料名及び岩種	最大膨張量 (%)	時間 (hour)	試験前含水比 (%)	試験後含水比 (%)	吸水量 (%)	試料含水比	吸水条件
A-1 風化泥岩	1.7	98	13.2	25.4	12.2	Wn	全面
	8.6	270	8.0	24.6	16.6	"	下部
A-2 風化凝灰岩	11.7	295	(20.3)15.6	35.9	20.3	Wn-α	全面
	1.3	142	19.7	20.5	0.8	Wn	"
A-3 泥質岩	3.5	313	13.3	21.2	7.9	"	下部
	7.8	408	(9.7)9.3	18.0	8.7	Wn-α	全面
I-1 土丹	3.9	20	3.0	7.4	4.4	Wn	"
	6.4	282	4.6	9.1	4.5	"	下部
I-2 土丹	0.7	75	18.8	23.4	4.6	"	全面
	1.7	240	22.5	30.2	7.7	"	下部
	4.9	18	(15.1)14.4	25.4	11.0	Wn-α	全面
I-3 土丹	6.1	196	16.8	35.7	18.9	"	下部
	2.7	28	27.0	29.6	2.6	Wn	全面
	4.5	262	32.0	36.1	4.1	"	下部
K 風化蛇紋岩	9.4	76	(23.2)21.6	36.0	14.4	Wn-α	"
	1.6	26	30.0	33.5	3.5	Wn	全面
	5.6	286	14.8	18.4	3.6	"	下部
M 泥岩	3.4	243	(25.2)21.6	26.7	5.1	Wn-α	全面
	10.6	142	10.1	25.4	15.3	Wn	"
Y 風化凝灰岩	3.9	166	7.8	14.4	6.6	"	下部
	9.9	77	(11.1)9.1	19.3	10.2	Wn-α	全面
A-1 風化泥岩	19.0	137	21.4	34.9	13.5	Wn	"
	4.2	223	23.3	33.2	9.9	"	下部
I-1 土丹	0.8	28	26.6	31.5	4.9	"	全面
	2.5	91	(25.4)18.9	32.3	13.4	Wn-α	"

表-3 吸水膨張量試験結果 (一部)

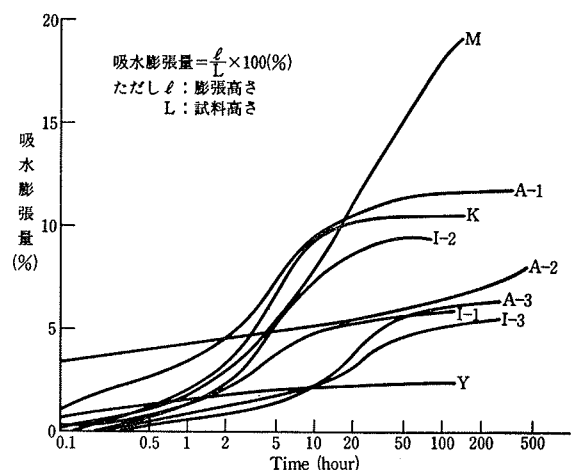


図-2 吸水膨張量の経時変化 (最大値)

試料名	試験前含水比 (%)	試験後含水比 (%)	吸水量 (%)	最大膨張圧 (kg/cm ²)	時間 (hour)	P/2に達する時間 (hour)	備考
A-1	11.8	21.1	9.3	1.22	46	1	
A-2	3.4	4.4	1.0	0.20	116	0.7	
A-3	3.0	6.1	3.1	1.22	72	1.4	
I-1	22.7	24.9	2.2	0.15	46	0.5	
I-2	24.0	30.0	6.0	0.36	20	7.4	下部吸水
I-3	20.6	27.4	6.8	0.14	106	0.7	下部吸水
K	8.5	14.0	5.5	0.63	95	0.8	
M	12.3	18.8	6.5	2.44	141	9.5	
Y	29.5	34.6	5.1	0.02	0.03	0.01	

表-4 吸水膨張圧試験結果 (一部)

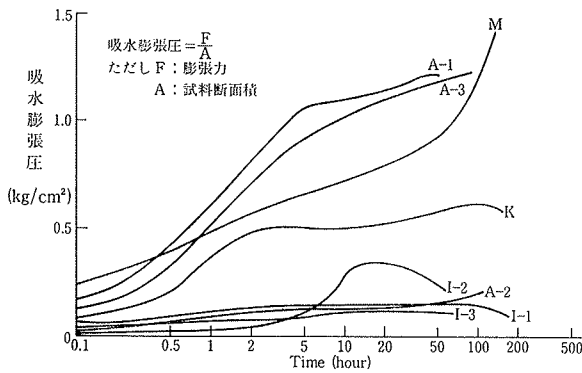


図-3 吸水膨張圧の経時変化 (最大値)

うちにはほぼ最大吸水膨張圧に達し、その後の増加傾向がきわめて小さい試料と長時間にわたり漸増していく試料との二つの増加傾向が認められ、後者のほうがより大きい吸水膨張圧を示しているようである。

4.3. スレーキング試験

最も簡便な視察によるスレーキング試験の一部を、写真-1に示すが軟岩の崩壊状況がよく理解できる。また試行的に実施した乾湿くりかえし試験結果を図-4に示す。この結果によると、乾湿サイクルによる含水比の変化の傾向にはつぎの3通りのパターンが認められよう。



写真-1 スレーキング試験

① 1サイクル目の吸水量が最も大きく、その後は比較的一定吸水量を示す。

② 1サイクル目吸水量も比較的大きいが、その後

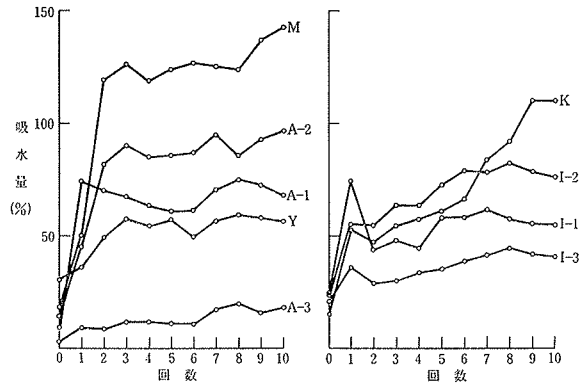


図-4 乾湿くりかえし試験結果

の吸水量も徐々に増加する。

③ 最初から吸水量が一定増加傾向を示す。また得られた測定結果のうち特に興味あるのが、採取深度の異なった試料による(相浦, 生駒)スレーキング性状の違いである。いずれも採取深度の比較的浅い試料が前述の①あるいは②の傾向を呈しているとともに吸水量も大きな値を示している。また、採取深度の深い試料が③の傾向を示し、乾湿の影響を比較的受けていないことがわかる。

4.4. 三軸圧縮試験

高圧三軸圧縮試験結果のうち、一部の試料の応力-ひずみの関係と Mohr の応力図を示したのが図-5, 6 である。側圧は $\sigma_3 = 25, 75, 100, 150, 300$ (kg/cm²) の5段階で実施した。いずれの側圧段階でも、主応力差のピークが明確で残留強度の表われる岩石の典型的な挙動を示している。弾性係数は各側圧段階で異なるが、大略 $E_{30} = 1.5 \sim 3.5 \times 10^4$ (kg/cm²) の

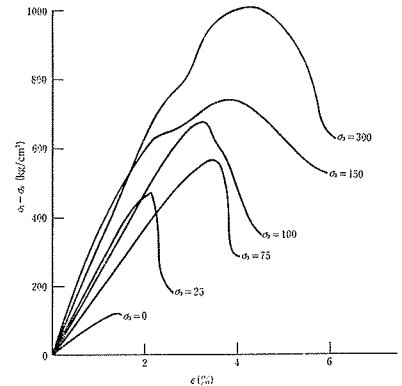


図-5 応力-ひずみ曲線

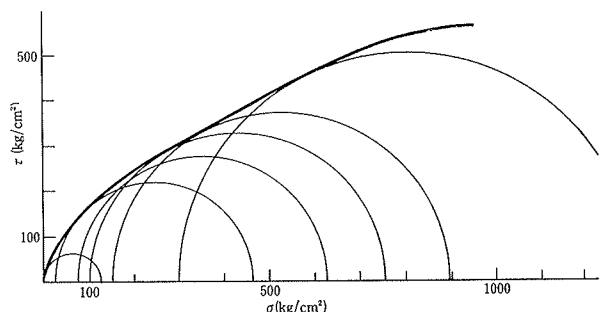


図-6 Mohr 応力図 (相浦 A-3)

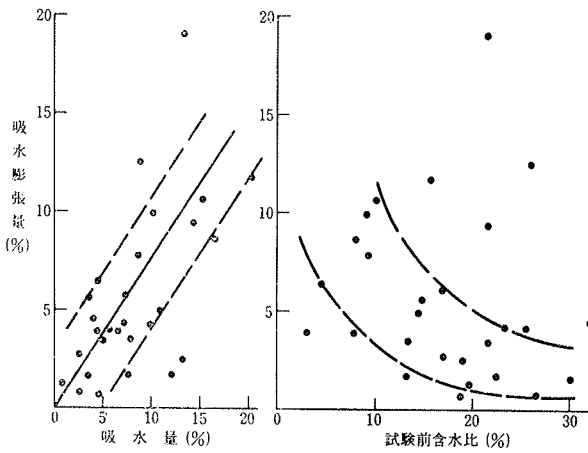


図-7 吸水膨張量試験における相関関係

範囲にある。

5. 吸水膨張特性に関する検討

5.1. 吸水膨張試験結果の相関性について

吸水膨張量と吸水量あるいは初期含水比との関係をすべての試料についてまとめたのが図-7である。まず吸水膨張量と吸水量の間には一応の相関関係が認められるようである。吸水膨張量が大きくなると吸水量も増加しその関係も比較的一定範囲にあることがわかる。しかし試料の一部には、吸水量の割合には大きい吸水膨張量も示す試料が見受けられた。

吸水膨張量と試験前含水比との間にはバラツキが多く、全試料の試験結果をみる限りでは一定の相関性は認められない。しかし前述したように、試料別にみると試験前含水比の影響は、ある程度表われていると解釈できよう。(4.1.参照)

なお、吸水膨張圧と吸水量・試験前含水比との関係では、試験個数も少なく相関性は求められなかった。

つぎに吸水膨張圧と吸水膨張量との関係を示したのが図-8である。吸水条件によって区別して示している。下部吸水条件の一部試料は吸水膨張量と比較して大きい吸水膨張圧を示しており、試験条件による吸水膨張特性の違いを意味するものである。したがって拘束条件下の

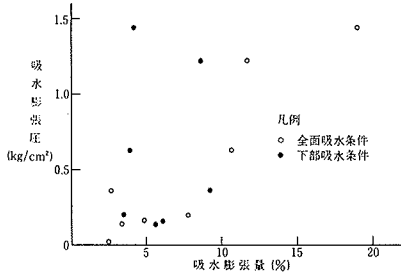


図-8 吸水膨張圧と吸水膨張量

5.2. 吸水膨張特性と基本物性との相関について

岩石の基本物性値として乾燥密度 γ_d と吸水膨張特性

との関係を示したのが図-9である。吸水膨張量との関係ではまったく相関性は認められないが、吸水膨張圧と乾燥密度との間にはバラツキはあるもののある程度の相関性を認めることができる。この傾向は吸水膨張圧が岩石の固結度あるいは空隙率などに関係し、これらの物性値が吸水膨張圧の発生機構を考える上で重要な因子とな

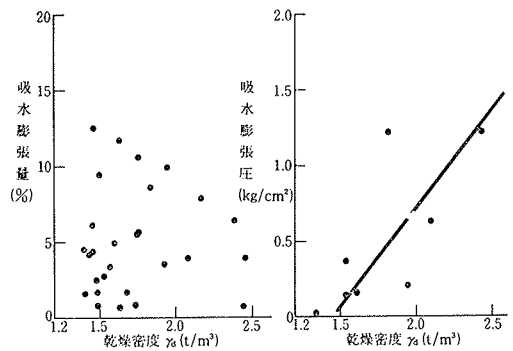


図-9 吸水膨張特性と基本物性

ることを意味している。

一軸圧縮強度 q_u と吸水膨張圧との関係を試みに検討したのが図-10である。試験個数が限られているが、一応の相関が得られた。今後吸水膨張特性の設計上の適用が問題となる。

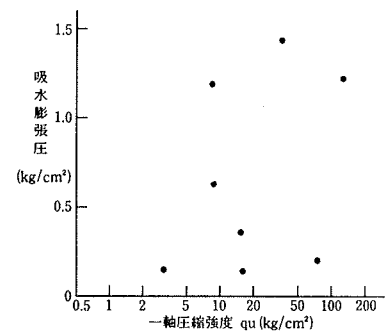


図-10 吸水膨張圧— q_u

6. あとがき

軟岩の吸水膨張特性を中心に基礎的な試験結果の一部について示したが、以下の検討結果をまとめると、

- (1) 吸水膨張量と吸水膨張圧試験結果ではそれぞれの最大値発生過程までの経時変化や吸水量などに違いがある。
- (2) 吸水膨張量と吸水膨張圧には相関性は認められない。
- (3) 軟岩の吸水膨張特性に影響を与える因子としては乾燥密度、吸水率、試験前含水比などであるが、その他には含有粘土鉱物の種類とその含有量が関係する。

いずれも試験個数が少なく今後ともデータの蓄積と試験条件などの再検討が必要と考えている。

参考文献

- 1) 星野, 他: 風化岩の吸水膨張とその地質工学的意義, 土木試験所報告第60号, (昭和48.6)
- 2) 喜田, 他: ずい道工事における膨潤性泥岩の土質化学的研究, 大林組技術研究所報, No. 16, (1978)