

粘土の一次元膨潤圧の測定と影響因子

Measurement and Effect Factor of One-dimensional Swelling Pressure of Clay

小西 純一	Junichi KONISHI	(サンコーコンサルタント (株))
鈴木 素之	Motoyuki SUZUKI	(山口大学大学院理工学研究科)
三須 尊洋	Takahiro MISU	(山口大学大学院理工学研究科)
山本 哲朗	Tetsuro YAMAMOTO	(山口大学大学院理工学研究科)

本研究は、粘土や泥岩からなる地山の盤膨れ、トンネルの膨張性地圧、地すべりといった地盤災害に与える膨潤性の影響を解明して、防災実務に活用することを目的としている。膨潤の基本的性質を把握するため、ベントナイトを一次元圧密した供試体および不攪乱泥岩に対して一次元膨潤圧試験を実施した。不攪乱泥岩についてはボーリングコアを用い、ベントナイトについては、種々の含水比のスラリー試料を2種類の予圧密圧力で一次元圧密し、試作した一次元膨潤圧測定装置を用いて水浸後の膨潤圧を測定した。ベントナイトの膨潤圧および膨潤圧発生時間は、含水比、乾燥密度、間隙比等の物理的性質と強い相関があり、この相関は不攪乱泥岩でも成立することが分かった。

キーワード：盤膨れ、膨潤圧、予圧密、粘土鉱物、泥岩、ベントナイト (IGC : D02, D05)

1. はじめに

東北日本～日本海側のグリーンタフ地域(図-1)では、これまでに、切土地盤上の住宅基礎の変状、軟岩トンネルの膨張性地圧、地すべりといった地盤災害事例が数多く報告されている¹⁾。これらの災害は、主に新生代第三紀の泥岩や断層破砕帯からなる地山で発生しており、地山の膨潤性が強く関与している。本研究は、地山の膨潤性が前述の地盤災害に与える影響を解明して、防災実務に活用することを目的としている。

今回の研究では、純粋な粘土鉱物および不攪乱泥岩の膨潤の基本的性質とその影響因子を見出すため、膨潤圧に着目し、一次元膨潤圧試験を実施した。試作した一次元膨潤圧測定装置は、膨潤変位を完全に拘束して発生する膨潤圧を測定するものであり、これによってベントナイト、第四紀粘土、第三紀泥岩の膨潤圧を測定した。その結果から、膨潤圧、膨潤圧発生時間と乾燥密度、間隙比等粘土の物理的性質との相関について考察し、膨潤圧の影響因子を評価した。

2. 地山の膨潤に関わる地盤災害事例と既往研究成果

2.1 地盤災害事例

泥岩の切土地盤上に建つ住宅基礎に、盤膨れによる変状が発生する場合がある。盤膨れの原因については、これまでに次の2つの事例が報告されている。一つ目の事例は、切土造成された地山の応力解放によって泥岩が吸水・膨潤

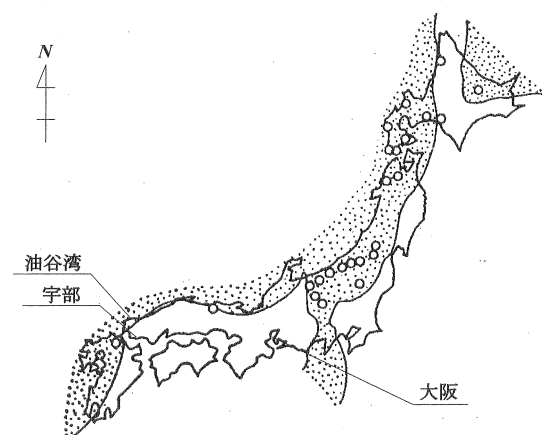


図-1 膨潤土の分布 (○印) とグリーンタフ地域¹⁾

し、盤膨れが発生したという事例が高森²⁾によって報告されている。盤膨れ対策として、泥岩地盤上に排水機能および膨潤変位の緩衝機能を兼ねた敷砂を施し、基礎をスラブ構造として剛性を高めている。三木³⁾は、切土地盤の膨潤は、基礎下と周辺地盤中の温度差に起因して基礎下へ水分移動が起こり、その凝結水を吸水して引き起こされるものであると説明している。二つ目の事例は、大山ら⁴⁾の研究事例である。大山らは、黄鉄鉱や方解石を含む泥岩を支持層とする住宅の床下で、塩類の結晶成長(塩類風化)が盤膨れを引き起こしたことを実験で確かめた。黄鉄鉱の酸化と方解石の溶解により生成した硫酸イオンやカルシウムイオンが地下水とともに乾燥した床下表面へ向けて上昇し、石膏として析出する。この石膏の結晶成長圧により盤

膨れを引き起こし、住宅基礎に変状が生じたと説明している。

植本ら⁹⁾は、東北自動車道の切土区間における路面や石積み擁壁の変状とその解析事例について報告している。この変状は、道路供用後5年経過時に石積み擁壁にクラックが生じ、路面に隆起が発生した。室内膨潤試験から求めた地山の膨潤特性曲線を用いて、FEM解析により50年後の路面の隆起量を予測している。

軟岩トンネルの膨張性地圧（膨圧）は、グリーンタフ地域を中心に広範に分布する新第三紀泥質岩・凝灰岩地圧が代表的であるが、その他蛇紋岩、結晶片岩、温泉余土、断層粘土等においても発生するといわれている⁶⁾。特に日本海側の褶曲軸あるいは褶曲軸の翼部に強大な地圧発生事例が多い。一般に、膨圧トンネルの分布はいわゆる「第三紀地すべり」の分布とよく対応する⁷⁾。既往事例⁸⁾では、地山強度比、モンモリロナイト含有量、CEC（陽イオン交換容量）、自然含水比、スレーキング特性、粒度特性、コンシステンシー特性などが膨張性地圧の指標とされてきた。膨張性地圧に影響を与える最も大きな要因は、地山強度比、すなわち地山の破碎の程度である。事実、モンモリロナイト含有量が30%を超えているにもかかわらず、破碎されていない泥岩中のトンネルで、膨張性地圧が発生しなかった例もある⁷⁾。仲野⁹⁾は、膨張性地圧の根本的な原因は地山の強度不足によるせん断破壊であり、地山の吸水膨張は、せん断破壊後のせん断帯への吸水によるせん断抵抗力の減少とともに起こる二次的な現象であると説明している。また、強大な膨張性地圧のために掘削工事が難航した鍋立山トンネルにおいて、地山の断層粘土の限界状態（完全軟化状態）の含水比と地山の自然含水比がほぼ一致する区間で著しい膨張性地圧が発生したことを示し、断層粘土の自然含水比の工学的意義を説明した。

2.2 粘土の膨潤に関わる既往研究成果

伊藤¹⁾は、地すべり粘土に膨潤性粘土鉱物が介在する場合、図-2に示すようにすべり面上に圧縮力として作用する膨潤圧 P_s が発生することを示した。さらに、図-3に示すように P_s の大きさによって F_s が変化することから、地すべりの安定を検討する上で膨潤圧を無視できないことを示した。また伊藤¹⁰⁾は、膨潤圧が浸透水の塩類濃度に強く支配されることを示すため、モンモリロナイト50%試料について、NaClの規定度 N が異なる5種類の浸透水を作用させて膨潤圧試験を行い、 N が大きいと数時間で収束値が現れ、膨潤圧はほとんど発生しないことを示した（図-4）。

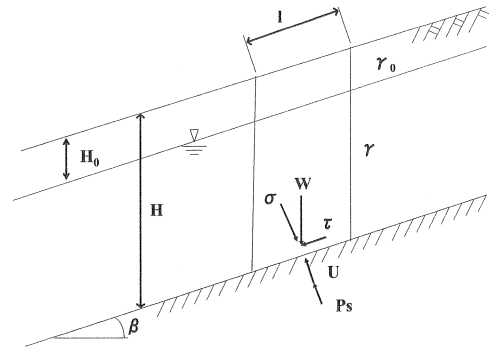


図-2 すべり面に作用する膨潤圧 P_s ¹⁾

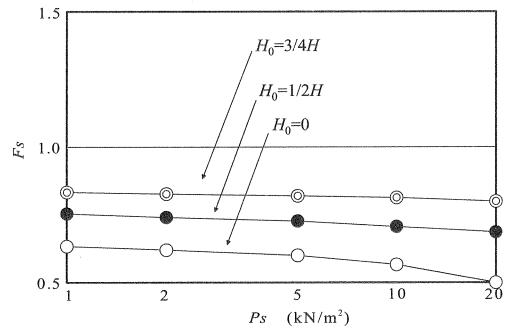


図-3 膨潤圧 P_s の影響による安全率 F_s の変化¹⁾

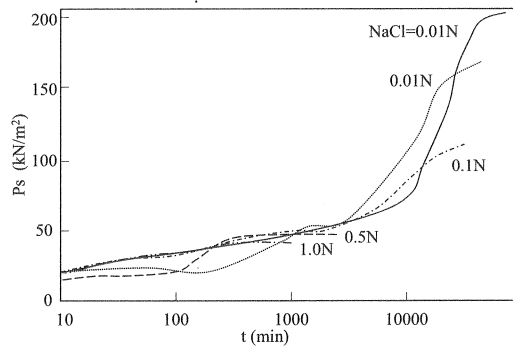


図-4 塩規定度 N の違いによる膨潤圧 P_s ¹⁰⁾

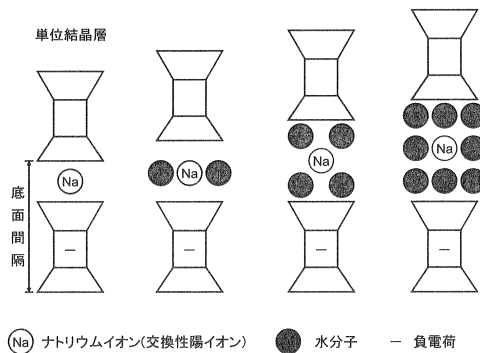


図-5 粘土鉱物の構造と膨潤現象(文献13)を基に作成)

粘土の一次元膨潤圧の測定と影響因子

表-1 試料の物理的性質

試料名	試料記号	土粒子の密度 (g/cm ³)	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	初期間隙比	粘土分5μm (%)	粘土分2μm (%)	自然含水比 (%)	液性限界 (%)	塑性限界 (%)	塑性指数
カオリナイト	K	2.662							62.0	40.2	21.8
ベントナイト	B	2.716							479.0	37.0	442.0
第四系 大阪層群	01~04	2.694	1.642~1.645	1.028~1.034	1.285	78.9	64.0	58.2~ 59.7	78.2	23.4	54.8
新第三系 油谷湾層群	Y1~Y2	2.677~2.709	1.979	1.576	0.720	34.8~ 44.0	28.7~ 32.4	25.6	47.8~ 64.5	17.3~ 19.6	30.4~ 44.9
古第三系 宇部層群	U1~U14	2.606~2.649	2.488~2.564	2.245~2.350	0.109~ 0.180	54.0~ 57.0	42.0~ 43.2	9.1~10.8	52.3~ 53.5	17.8~ 19.7	32.6~ 35.7

すなわち、NaClの規定度 N の大きな浸透水を作用させることは、膨潤圧を応急的に抑制し、地盤の安定化工法として有効な方法であることを示した。この現象を現場に応用したものとして、例えば悪路に塩を散布することが行われてきた。さらに伊藤ら¹⁰⁾は、 N と塑性指数 I_p の2変数で構成される膨潤圧 P_{sf} の構造式(1)を求め、重相関係数 γ_{ss} が $\gamma_{ss}=0.996$ となって高い寄与率をもつことを示した。

$$P_{sf} = 0.2652 + 0.0013(I_p) - 0.4180(\log N) \quad (1)$$

小峯ら¹¹⁾は、砂・ベントナイトの混合材料について、最大膨潤圧に対しては交換性陽イオンの種類・組成よりもベントナイトのモンモリロナイト含有率の方が大きく影響し、膨潤変形に対してはベントナイトのモンモリロナイト含有率よりもむしろ、モンモリロナイトの保有する交換性陽イオンの種類・組成が大きく影響を及ぼすことを示した。モンモリロナイト含有量の多寡が必ずしも発生膨潤圧の大きさに直接結びつかない場合があることは、神居古潭帯に分布する蛇紋岩についての三田地ら¹²⁾の報告もある。

3. 膨潤圧試験方法

3.1 試料の物理的性質

実験に用いた試料は、純粋な粘土鉱物（カオリナイト、モンモリロナイト）および不攪乱泥岩（古第三系宇部層群、新第三系油谷湾層群、第四系大阪層群）であり、各々の物理的性質を表-1に示す。特に膨潤性の著しいNa型ベントナイトは図-5に示すように、交換性陽イオンとしてNaをもちモンモリロナイトを主成分とする。膨潤時には粘土鉱物自身が水分子を取り込んで著しい体積膨張を起こす。

3.2 供試体の作成方法

(1) 純粋な粘土鉱物

純粋な粘土鉱物の膨潤圧測定に用いる供試体は、粘土鉱物のスラリー試料を予圧密して作成した。粘土に一定の構造（初期含水比、初期間隙比）をもたせる目的で、試料調

整時の含水比および予圧密圧力を数ケース設定し、次のような試験条件で図-6に示す予圧密試験装置を用いて供試体を作成した。

- ・ 試料調整時の含水比 w_{01} : $1/4 w_L$, $1/2 w_L$, w_L
- ・ 供試体寸法 : 直径 14~20cm, 高さ 4~7cm
- ・ 予圧密圧力 : $P_c=100kPa$, $200kPa$

試料を容器に入れて真空脱気を行ってから、先行荷重として考える予圧密圧力 $P_c=100kPa$ および $200kPa$ で圧密を開始した。圧密の打ち切り時間は $3t$ 法で決定した。圧密後、形成された粘土構造に急激な除荷による状態の変化が生じないように、排水経路を開いて段階的に除荷した。透水性の低い当試料では、そのような処置を施しても負の間隙水圧が残留している可能性はある。予圧密した試料は、速やかに膨潤圧測定用の供試体（φ60mm, h20mm）に成形した。

(2) 不攪乱泥岩

ボーリングコアまたはブロックサンプリング試料を、直径 60mm, 高さ 20mm に整形した（図-7）。飽和度の影響が膨潤圧の大きさに及ぼす影響を調べる目的で、水浸させる直前の供試体の含水状態を次の4種類用意した。

- 条件 i 自然含水比
- 条件 ii 2日間（48時間）自然乾燥
- 条件 iii 7日間（168時間）自然乾燥
- 条件 iv 14日間（336時間）自然乾燥

3.3 一次元膨潤圧測定方法

今回試作した膨潤圧測定装置を図-8および写真-1に示す。本装置は、供試体をセットした圧密容器、ペロフラムシリンダー、ロードセル、反力枠からなっている。最下部にロードセル、その上位に供試体をセットした圧密容器を置き、供試体上面に多孔板を介してペロフラムシリンダーをセットする。膨潤変位を拘束して膨潤圧を測定するため、ペロフラムシリンダーはクランプで高剛性反力枠に固定しているが、さらに上位に取り付けた変位計により変位が拘束されていることを確認している。ロードセルの許容検出荷重は 5 kN である。

試験手順は、次のとおりである。予圧密させた試料を速やかにカッターリングで膨潤圧試験用のサイズ（直径60mm，高さ20mm）に成形し，供試体を圧密容器にセットした。次にペロフラムシリンダーにより10kPa程度の軸圧を供試体に作用させることで供試体と装置を密着させ，ペロフラムシリンダーの载荷軸を機械的に固定した。ロードセル，変位計のゼロ補正を行い，試験容器内に，供試体上面の多孔板が浸るまで純水を速やかに注水し，完全に水浸状態の水位に達した時点で測定を開始した。注水を終了した時点のデジタル計の読みを初期値としている。測定は，常に鉛直変位が発生していないか，また発生した場合は鉛直変位が初期供試体高さの0.25%以内であることを確認しながら行った。測定の終了は，膨潤圧が一定量に達するまで，あるいは最大値を記録するまでとした。発生する膨潤圧はロードセルによって測定し，データロガーに記録した。

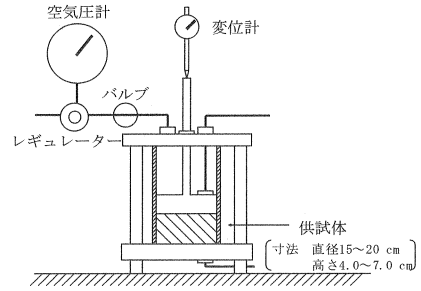


図-6 予圧密試験装置

4. 膨潤圧試験結果および考察

4.1 純粋な粘土鉱物の予圧密試験結果

粘土鉱物の予圧密および膨潤圧試験結果一覧を表-2に示す。図-9は，ベントナイトとカオリナイトの $w_{01}=w_L$ 試料の $P_c=100\text{kPa}$ における予圧密試験結果である。カオリナイトは $t=100\text{min}$ 以降で圧密がほぼ収束し，最終圧密量は $\Delta H_c=9.2\text{mm}$ であった。これに対しベントナイトでは，3t法により $t=30090\text{min}$ で圧密を打ち切ったが，最終圧密量は $\Delta H_c=32\text{mm}$ にも達した。この圧密量の差は，液性限界の差（ベントナイト：479%，カオリナイト 62%）に起因するものである。

図-10は，ベントナイトの試料調整時の含水比 w_{01} が異なる試料の圧密量（ $P_c=100\text{kPa}$ ）を比較したものである。圧密量は，試料調整時の含水比が大きいほど，大きくなっている。

4.2 純粋な粘土鉱物の膨潤圧測定結果

カオリナイトは，測定開始から24h経過しても膨潤圧が発生しなかったため，試験を打ち切った。カオリナイトが膨潤しない理由は，CEC（陽イオン交換容量）が2~15 meq/100gと極めて小さいことによる。一方，モンモリロナイトを主成分とするベントナイトは，CECが60~150 meq/100gと大きい膨潤性粘土鉱物である¹³⁾。ここでは，ベントナイトの試験結果について述べる。

図-11は試料調整時の含水比 w_{01} が異なる供試体の膨潤圧曲線である。同図に示すように， w_{01} が低いほど，膨潤圧の立上り時期および最大膨潤圧が発生する時期が遅くなり，最大膨潤圧が大きくなる傾向が認められる。

図-12は，予圧密圧力が異なる場合の膨潤圧 P_s と経過時間 t の関係である。同図に示すように，大きな予圧密を

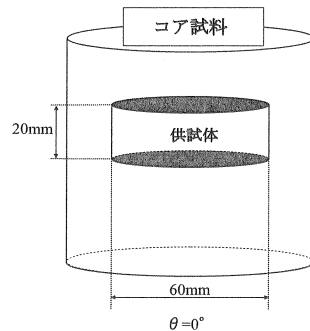


図-7 不攪乱泥岩の成形方法

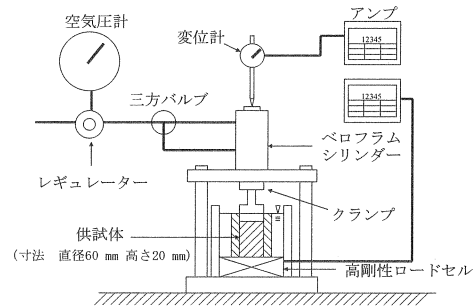


図-8 一次元膨潤圧測定装置

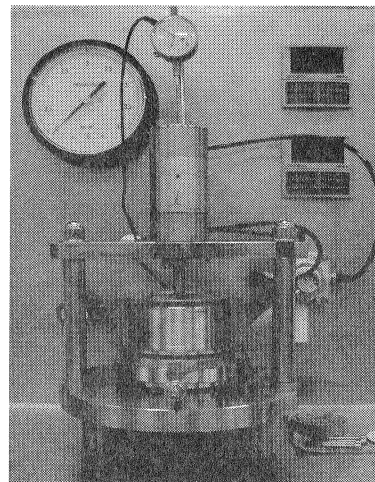


写真-1 一次元膨潤圧測定装置

表-2 純粋な粘土鉱物の一次元膨潤圧試験結果一覧

試験ケース			試験結果						
実験材料	予圧密供試体 作製前の 含水比 w_{01}	予圧密圧力 (kPa)	最終圧密量 ΔH_c (mm)	膨潤圧曲線の 立ち上がり時間 t_s (min)	最大膨潤圧 発生時間 $t_{P_{smax}}$ (min)	最大膨潤圧 P_{smax} (kPa)	最大膨潤 速度 C_{Ps} (kPa/min)	初期乾燥密度 ρ_{d0} (g/cm ³)	初期間隙比 e_0
Na型ベントナイト 1回目	w_L	100	31.9	120	3071	13.202	0.031	0.328	7.273
	$1/2 w_L$		15.6	210	6040	28.451	0.015	0.432	5.286
	$1/4 w_L$		8.9	360	12720	36.183	0.007	0.565	3.811
カオリナイト	w_L	100	9.2	—	—	—	—	1.065	1.500
Na型ベントナイト 2回目	$1/2 w_L$	100	14.1	120	2960	22.095	0.025	0.419	5.483
		200	22.8	220	5915	71.816	0.015	0.510	4.328

注) カオリナイトは膨潤圧を発生しなかったため、一欄の値は計測されていない。

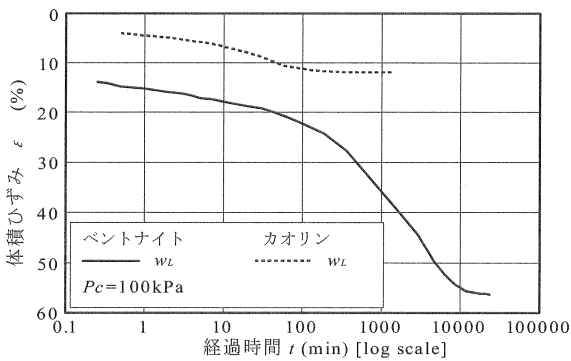


図-9 予圧密時のベントナイトとカオリナイトの体積ひずみの比較

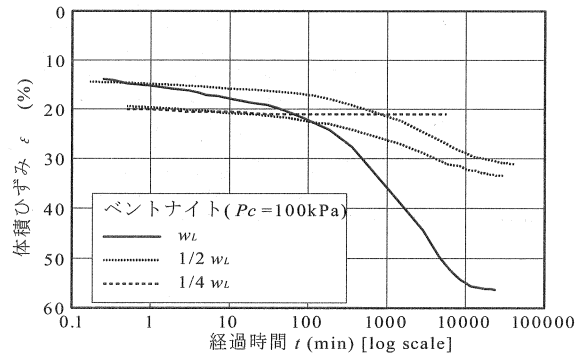


図-10 予圧密時の試料調整時の含水比 w_{01} が異なる場合の体積ひずみの比較

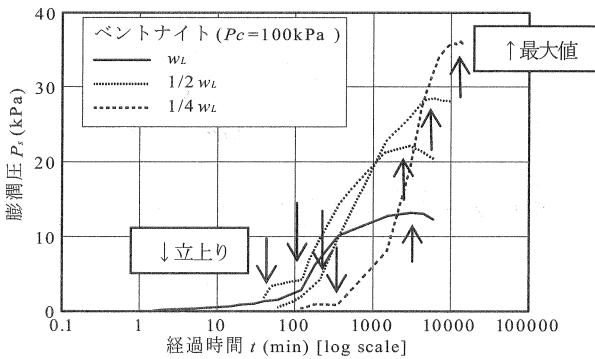


図-11 試料調整時の含水比 w_{01} が異なる場合の膨潤圧-時間曲線

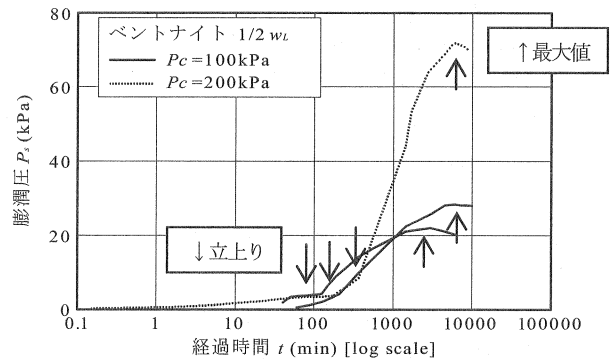


図-12 予圧密圧力 P_c が異なる場合の膨潤圧-時間曲線

与えた方が、膨潤圧の立ち上がり時期および最大膨潤圧が発生する時期が遅くなり、最大膨潤圧が大きくなる傾向が認められる。

最大膨潤圧および膨潤圧発生時間の差については、異なる圧密条件（試料調整時の含水比、予圧密圧力）で得られた物理的性質（間隙比、乾燥密度）の差が関係していると考えられる。

4.3 不攪乱泥岩の膨潤圧測定結果

不攪乱泥岩の膨潤圧試験結果一覧を表-3に示す。図-13、図-14に示すように、最大膨潤圧は、大阪層群で $P_{smax}=0.67$ MPa、宇部層群で $P_{smax}=0.90$ MPa であり、全体に宇部層群のほうが大きい。地質による膨潤圧の差は、応力履歴やセメンテーション（膠結）の度合いに起因するものと考えられる。

表-3 不攪乱泥岩の一次元膨潤圧試験結果一覧

地質と試験条件			試験結果							
地質	記号	含水状態	試験前含水比	膨潤圧曲線の立ち上がり時間	最大膨潤圧発生時間	最大膨潤圧	最大膨潤圧速度	初期乾燥密度	初期間隙比	
			w (%)	t_s (min)	$t_{P_{smax}}$ (min)	P_{smax} (MPa)	C_{Ps} (kPa/min)			
大阪層群	O3	自然含水比	59.1	—	—	0.032	—	1.034	1.610	
		2日乾燥	34.1	15	5760	0.336	0.320	1.182	1.283	
		7日乾燥	16.3	4	4320	0.483	0.300	1.321	1.042	
		14日乾燥	7.0	4	5760	0.668	0.340	1.316	1.050	
	O4	自然含水比	59.7	—	—	0.025	—	1.028	1.625	
		2日乾燥	36.1	30	5760	0.296	0.440	1.181	1.284	
		7日乾燥	16.5	15	4320	0.450	0.370	1.323	1.040	
		14日乾燥	6.3	8	4320	0.629	0.390	1.353	0.995	
油谷湾層群	Y1-1	7日乾燥	6.4	4	1440	0.381	0.250	1.754	0.526	
	Y1-2	7日乾燥	5.7	30	7200	0.176	0.110	1.668	0.605	
宇部層群	U7	自然含水比	9.1	—	—	0.064	—	2.350	0.109	
		2日乾燥	8.2	4	1440	0.812	0.400	2.369	0.100	
		7日乾燥	9.2	4	5760	0.902	0.460	2.302	0.132	
		14日乾燥	8.3	8	1440	0.571	0.340	2.379	0.095	
	U8	自然含水比	10.8	—	—	0.375	—	2.245	0.180	
		2日乾燥	4.5	4	2880	0.464	0.420	2.253	0.176	
		7日乾燥	4.5	4	600	0.709	0.450	2.216	0.195	
		14日乾燥	4.8	8	2880	0.427	0.240	2.048	0.293	
	U9(盛土材)	自然含水比	19.0	—	—	0.031	—	1.724	0.512	
		2日乾燥	5.4	—	—	0.048	—	1.938	0.345	
		7日乾燥	4.7	—	—	0.037	—	1.839	0.417	
		14日乾燥	4.8	—	—	0.027	—	1.699	0.534	
	U13-1	7日乾燥	6.3	—	—	0.044	—	2.208	0.180	
	U13-2	7日乾燥	3.7	—	10	4320	0.480	0.450	2.259	0.154
	U14-1	7日乾燥	6.1	—	10	7200	0.569	0.590	2.140	0.238
	U14-2	7日乾燥	6.4	—	10	2880	1.050	0.830	2.055	0.289

注) —の欄は膨潤圧をほとんど発生しなかったため計測されていない。

大阪層群，宇部層群ともに自然含水比供試体（条件 i）の膨潤圧は，0.06 MPa 以下の非常に小さな値となった。

さらに図-15，図-16 に示すように，乾燥日数の増加とともに低下する初期含水比 w_0 と最大膨潤圧 P_{smax} の関係から，乾燥による含水比の低下が大きいほど最大膨潤圧 P_{smax} が増大することがわかった。これは含水比の低下による乾燥密度の増加（間隙比の減少）に起因すると考えられる。自然含水比の供試体で膨潤圧がほとんど発生しなかったのは，供試体にサクシオンが発生しなかったためと考えられる。泥岩の乾燥によるサクシオンと膨潤圧の発生メカニズムについては，今後の研究課題の一つである。大阪層群では乾燥日数の増加（初期含水比の低下）に伴う最大膨潤圧の増大が顕著であるのに対し，宇部層群の U7, U8 では7日と14日で膨潤圧の大きさが逆転している。これは，供試体の初期の自然含水比が10%前後と低く，自然乾燥による含水比変化が1%未満であり，膨潤圧に顕著な差を生じさせるような含水比変化を与えられなかったためと考えられる。また，試料の乾燥収縮等による粘土構造の破壊も関係しているのではないかと考えられる。

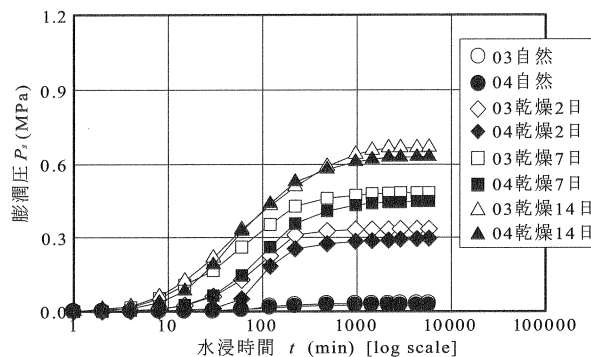


図-13 乾燥日数による膨潤圧の違い（大阪層群）

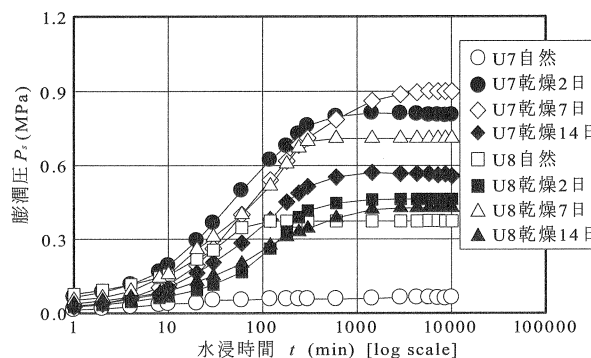


図-14 乾燥日数による膨潤圧の違い（宇部層群）

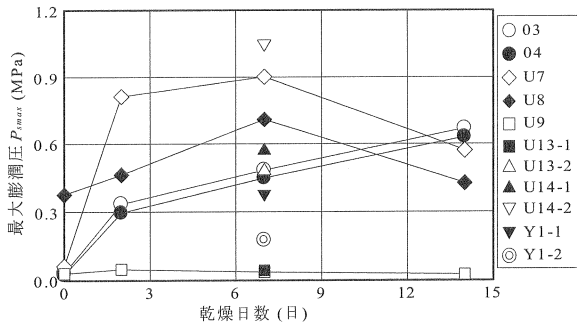


図-15 乾燥日数と最大膨潤圧の関係

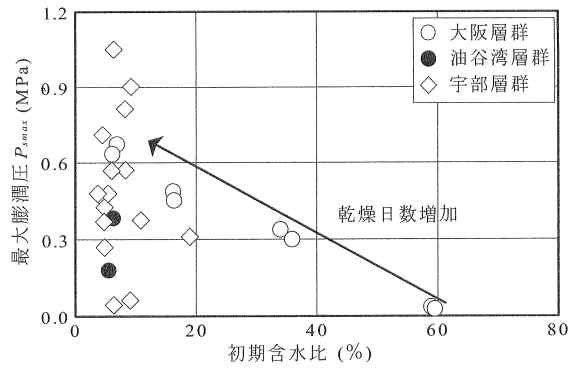


図-16 初期含水比 w_0 と最大膨潤圧 P_{smax} の関係

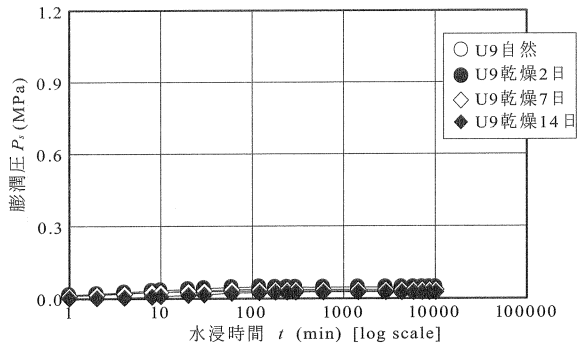


図-17 乾燥日数による膨潤圧の違い (宇部層群の盛土)

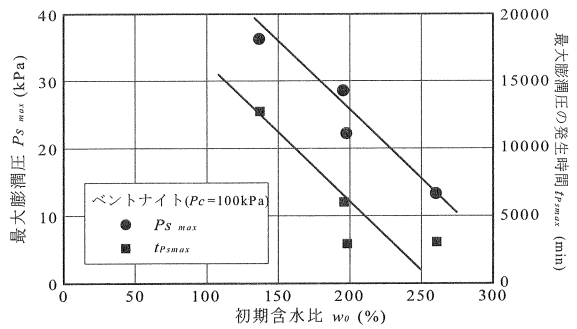


図-18 初期含水比 w_0 と最大膨潤圧 P_{smax} 、発生時間 t_{psmax} の関係

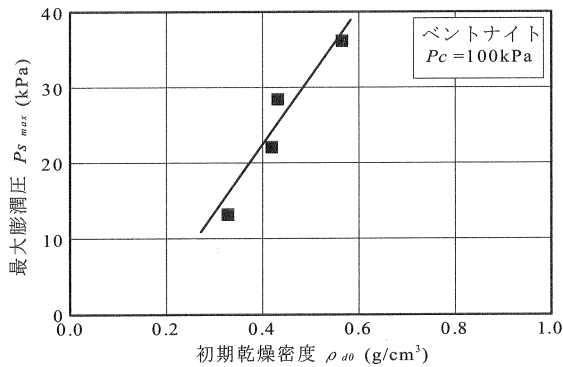


図-19 初期乾燥密度 ρ_{d0} と最大膨潤圧 P_{smax} の関係

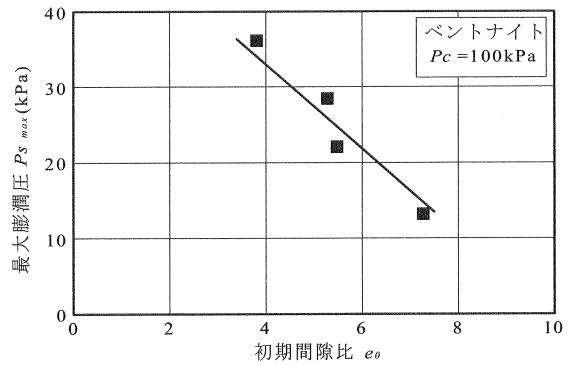


図-20 初期間隙比 e_0 と最大膨潤圧 P_{smax} の関係

図-17 に示すように、宇部層群の盛土材では $P_{smax}=0.05$ MPa と大きな膨潤圧は発生していない。これは、盛土材そのものが切土掘削により乱され、粘土の構造が破壊されたためと考えられる。

4.4 膨潤圧を支配する因子

予圧密後（膨潤圧測定前）の初期含水比 w_0 と P_{smax} 、最大膨潤圧の発生時間 t_{psmax} の関係を図-18 に示す。供試体の w_0 が低いほど、膨潤圧が発生する時期が遅くなり、 P_{smax} が大きくなる。すなわち、 w_0 と P_{smax} 、 t_{psmax} との間には同様な相関が認められる。さらに、図-19 の初期乾燥密度 ρ_{d0}

と P_{smax} の関係、図-20 の初期間隙比 e_0 と P_{smax} の関係においても、 ρ_{d0} の増加（ e_0 の減少）に伴い、最大膨潤圧が増加する顕著な相関が見られる。

予圧密圧力 P_c の異なる条件でも、 w_0 が異なる供試体と同様に、 ρ_{d0} 、 e_0 と P_{smax} の関係を再現できる（図-21、22）。 ρ_{d0} が大きいほど（ e_0 が小さいほど） P_{smax} が大きくなる理由については、次のように考察した。膨潤現象は、粘土鉱物の積層状単位結晶の層間に水が浸入して、粘土鉱物自身が体積増加する現象であり、例えば Na-モンモリロナイトを拘束しないで自由に膨潤させると元の 14~16 倍もの体積増加を示すこと、体積増加を抑制すると高い膨潤圧を発

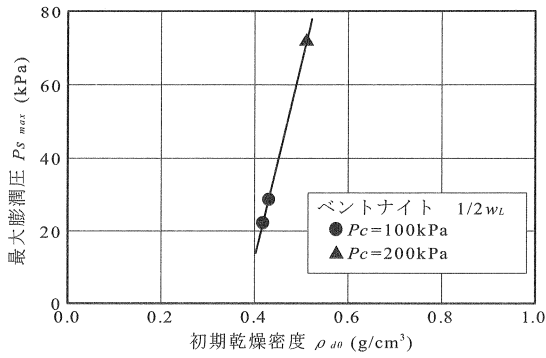


図-21 予圧密圧力 P_c が異なる場合の最大膨潤圧 P_{smax} と初期乾燥密度 ρ_{d0} の関係

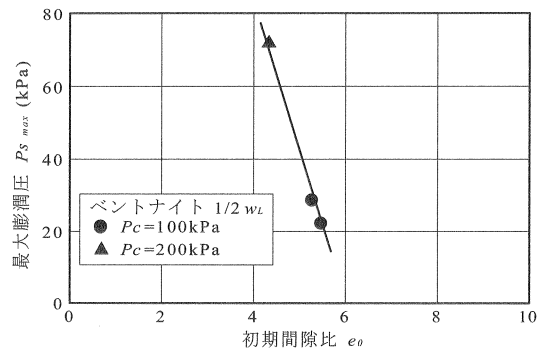


図-22 予圧密圧力 P_c が異なる場合の最大膨潤圧 P_{smax} と初期間隙比 e_0 の関係

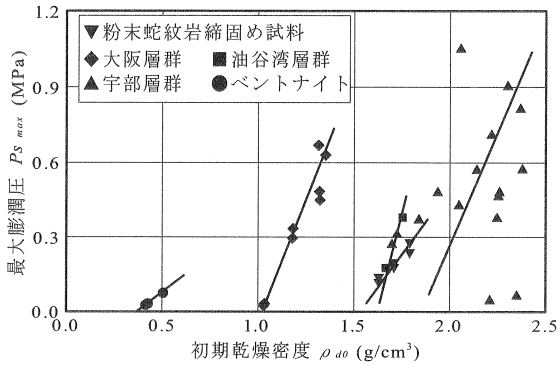


図-23 膨潤圧 P_{smax} と初期乾燥密度 ρ_{d0} の関係

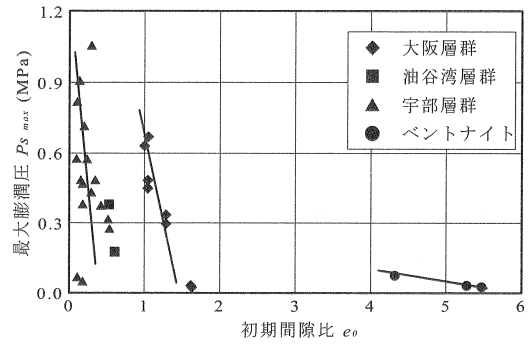


図-24 膨潤圧 P_{smax} と初期間隙比 e_0 の関係

生することが知られている。ただし、これまでの研究事例では、膨潤圧の大きさと粘土鉱物粒子の数については検討されていない。図-19～22のような実験結果は、膨潤圧現象を解明する上で興味深い相関であり、“供試体の膨潤圧は個々の粘土鉱物粒子で発生する膨潤圧の総和である”と仮定することで説明することができる。すなわち、単位体積当たりの膨潤圧は、その中にある粘土鉱物粒子の数に比例し、密度の大きな方がより大きな膨潤圧を発生することになる。膨潤圧発生時間についても、 ρ_{d0} が大きいほど (e_0 が小さいほど) 単位体積当たりの粘土鉱物粒子の数が多いため、全ての粘土鉱物粒子が膨潤するまでに多くの時間を要するのではないかと考えられる。

図-23 および図-24 は、地山の不攪乱泥岩の ρ_{d0} , e_0 と P_{smax} の関係に、ベントナイトの実験結果を加えたものである。泥岩の膨潤圧は、初期乾燥密度および初期間隙比と強い相関があり、これらの相関は各地質ごとに固有の集団を形成している。ベントナイトの実験では、相関式を評価できるほどのデータ数が得られていないが、地山泥岩の $\rho_{d0} \sim P_{smax}$, $e_0 \sim P_{smax}$ の関係と類似の相関が見られる。すなわち、これらの相関は、ほぼ同じ応力履歴を被った地質単位でグルーピングされているとみることもできる。

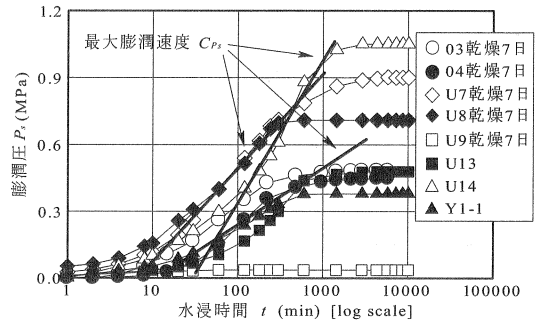


図-25 同一乾燥条件 (7日間) における地質による膨潤圧 P_s の違い

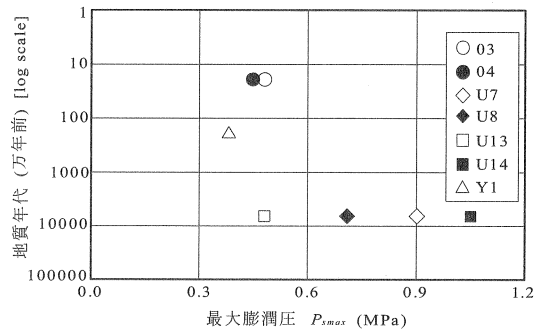


図-26 地質年代と最大膨潤圧 P_{smax} の関係

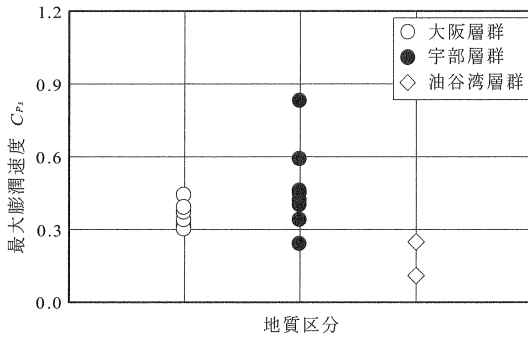


図-27 地質別の最大膨潤速度 C_{ps}

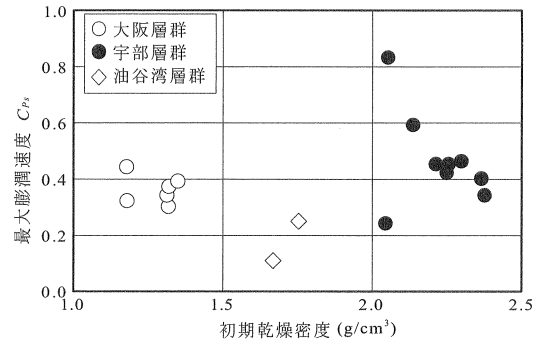


図-28 初期乾燥密度 ρ_{d0} と最大膨潤速度 C_{ps}

次に、地質の違いによる膨潤圧の大きさを比較するために、同一乾燥条件（7日間）における膨潤圧曲線を図-25に示した。また、大まかな地質年代と最大膨潤圧の関係を図-26に示した。これらの図によれば、サンプル数が少ない上、値のバラツキも大きい、概ね地質年代の古いものほど（初期乾燥密度の大きいものほど）大きな膨潤圧を発生するといえそうである。

ここで、膨潤圧曲線の最急勾配を最大膨潤速度 C_{ps} と定義する。 C_{ps} を地質別に見ると図-27、初期乾燥密度との関係で見ると図-28の通りとなった。地質別に見ると、大阪層群では $\rho_{d0}=1.18\sim 1.35$ に対して $C_{ps}=0.3\sim 0.45$ 、油谷湾層群では $\rho_{d0}=1.67\sim 1.75$ に対して $C_{ps}=0.1\sim 0.25$ 、宇部層群では $\rho_{d0}=2.05\sim 2.38$ に対して $C_{ps}=0.2\sim 0.8$ となっており、地質ごとに固有のプロット集団を形成している。

5. 結論

今回の研究における結論を以下に述べる。

- (1) カオリナイトは、膨潤圧を発生しないことがわかった。その理由は、CEC（陽イオン交換容量）が2～15 meq/100gと極めて小さい¹³⁾ことによると考えられるが、今後、様々な粘土鉱物のCECと膨潤性の関係を検証しておく必要がある。
- (2) ベントナイトの予圧密供試体を用いた膨潤圧試験では、 ρ_{d0} が大きいほど（ e_0 が小さいほど）、発生膨潤圧は大きく、最大膨潤圧 P_{smax} 発生までの時間も長くなることが明らかになった。
- (3) (2)の結果に対して、次の膨潤圧発生メカニズムが考えられる。
 - ・ 供試体の膨潤圧 P_s は、個々の粘土鉱物粒子で発生する膨潤圧の総和であり、供試体の密度に比例して増大する。
 - ・ 供試体の最大膨潤圧 P_{smax} は、全ての粘土鉱物粒子が膨潤した時点で発生すると考えられる。したがって、最大膨潤圧発生時間 t_{psmax} は、密度（単位体積

当たりの粘土鉱物粒子の数)に比例して長くなると考えられる。

- (4) 不攪乱泥岩の供試体は、乾燥による含水比の低下が大きいほど最大膨潤圧 P_{smax} が増大することがわかった。これは含水比の低下に伴う乾燥密度の増加（間隙比の減少）に起因すると考えられる。
- (5) 宇部層群の盛土材は $P_{smax}=0.05$ MPa と大きな膨潤圧を発生しないことがわかった。これは、盛土材そのものが切土掘削により乱され、粘土の構造が破壊されたためと考えられる。
- (6) 不攪乱泥岩の膨潤圧 P_{smax} や最大膨潤速度 C_{ps} は、応力履歴や生成環境の異なる地質ごとに固有の値をもっていることがわかった。
- (7) ベントナイトの予圧密供試体と不攪乱泥岩の P_{smax} は、ともに ρ_{d0} 、 e_0 と類似の相関があることがわかった。したがって、 ρ_{d0} 、 e_0 は、自然粘土の膨潤挙動を推測するための重要な影響因子であるといえる。

参考文献

- 1) 伊藤 暁：土の膨潤挙動からみた地盤災害、土と基礎、Vol.28, No.2, pp.31～38, 1980.
- 2) 高森 洋：戸建住宅における基礎の事故と対策、基礎工、No.12, pp.52-61, 1992.
- 3) 三木 幸蔵：わかりやすい岩石と岩盤の知識、pp.175-176, 鹿島出版会, 1978.
- 4) 大山 隆弘・千木 良雅弘・大村 直也・渡部 良朋：泥岩の化学的風化による住宅基礎の盤膨れ、応用地質、第39巻, 第3号, pp.261-272, 1998.
- 5) 植本 直之・大塚 康範・満 弘之：膨潤性地山における変形挙動と対策工の効果、土と基礎, Vol.36, No.5, No.364, pp.43-48, 1988.
- 6) 朝倉 俊弘, 小島 芳之：膨張性地山の調査・試験・解析、膨張性地山のトンネル、地質と調査, 第1号, pp.7-14, 1995.
- 7) 櫻井 孝：堆積軟岩中のトンネル、堆積軟岩の工学的

- 性質と調査方法, 地質と調査, 第4号, pp.35-40, 1997.
- 8) 土木学会：軟岩—調査・設計・施工の基本と事例, p.162, 1984.
 - 9) 仲野良紀：膨張性トンネルの吸水膨張説再考—限界状態の土質力学の観点より—, 膨張性地山のトンネル, 地質と調査, 第1号, pp.37-43, 1995.
 - 10) 伊藤驍, 金沢徳雄：上載荷重と塩規定度の変化による膨潤性土質の体積変化と膨潤圧に関する考察, 秋田高専研究紀要, 第16号, pp.61~65, 1981.
 - 11) 小峯秀雄・緒方信英：砂・ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp.373-385, 2002.
 - 12) 三田地利之・藤澤久子・和智真太郎・大河原正文・工藤豊：神居古潭帯に分布する蛇紋岩の不攪乱状態および再構成粘性土試料の力学特性, 地すべり学会誌, Vol.40, No.4, pp.35~43, 2003.
 - 13) 佐藤努：粘土の特性と利用, 粘土基礎講座 I, 日本粘土学会 (<http://www.soc.nii.ac.jp/cssj2/>), 2007.

(2007年6月29日 受付)