

## 土の膨潤挙動からみた地盤災害

## SWELLING BEHAVIOR WITH RESPECT TO GEOLOGICAL HAZARDS

い 藤 とう 藤 たくし 駿\*

## 1. ま え が き

地震の予知研究で象徴的に代表されているように、地盤の破壊問題に対しては、我が国は絶えず関心を払ってきた。地球科学諸現象の中における地盤災害は、人間生活環境が直接破壊されるということから、特に社会的要請の強い問題を抱えている。沖積層や造成地におけるライフライン関連施設の被害は止まることを知らないが、一方梅雨前線に伴う持続性降雨、台風、しつぜつ(湿舌)による集中豪雨も絶えず、各地で山崩れは年中行事のように発生し、更に北部日本海側は世界的多雪地帯に位置するため、地すべりの被害もまた止まることを知らない現状である。被災要因の人間生活環境の著しい変化により、土質工学においても環境及び防災アセスメントの学際的研究が不可欠になったが、このような災害問題と関わりのある土質工学上の難解な問題の一つは、降雨や地下水と粘土鉱物が接触した時の、いわゆる clay-water system において、膨らむものと膨らまないものが混沌として複雑に存在していることである。親水性の強い粘土鉱物は、時間経過とともに変化し、シキントロピー現象とか膨潤現象等の特異な性状を示し、土木工事施工上トラブルを引き起こすことが多いので、problem soils として取り扱われてきた。地盤災害の多くが特殊な粘土鉱物をもつ土質と深い関わりがあることは、知識としては広く知られているが、土木工学と他分野の境界領域の問題である上、更に膨潤問題は要因が複雑なため、工学的アプローチに欠けていた。

土が容積増加を示すものに膨張 (expansion) と膨潤 (swelling) の二通りがある。この性質を示す土を一括して expansive clays と呼んでいる。swelling は粘土鉱物が液体をその内部に取り込んでこれを拘束し、浸透・拡散・イオン交換などの作用を伴って体積増加をきたす現象である。したがって単なる圧密の逆現象ではなく、また通常のダイレイタンスーとも意味を異にする。これに対し、expansion は必ずしも水を必要としない広義の体積増加一般の現象である。しかし膨潤は CBR とか、テルツァーギ (Terzaghi) が示した圧密試験後の除荷過程における体積増加と理解される場合が多く、諸外国でもあまり判然としていない。更に膨潤の概念や測定方法もまだ定着しておらず、土質工学

会でも一定の用語規準がなく、学術的規定が叫ばれている。このような事情から、ここでは膨潤性粘土鉱物を母材とする地盤災害が意外に多いことに着目し、工学上デメリットとみなされる膨潤挙動の問題点を整理してみた。更に膨潤現象を実験的に考察し、それによって得られた膨潤構成式のモデルが、現地の地盤挙動に適合するかどうかを調べ、地すべりにおける膨潤の影響についても検討してみた。

## 2. 膨潤性土質による地盤災害

膨潤性土質 (ベントナイト) の主な分布をみると図一<sup>1)</sup> のようである。この土質が図のグリーントフの分布と一致しているが、これは第三紀中新世～鮮新世の火山噴出物が熱水作用、海底風化及び続成作用とそれに引き続く露天化作用を受けて、例えば火山ガラス→アロフェン→加水ハロイサイト→モンモリロナイトの生成過程をたどり、ベントナイトに変質したためである。ベントナイトは主としてモンモリロナイト-バイデライト系から構成される粘土であるが、その主成分のモンモリロナイトは水に浸すとぬるぬるし、放っておくと原体積の10数倍にも膨れあがる。この性質が表一に示すような種々の地盤災害と密接な関係をもっているため、ここではこれらのことについて考察を加えて述べる。



図一 膨潤土の分布 (○印) とグリーントフ地域

\*秋田工業高等専門学校校助教授 土木工学科

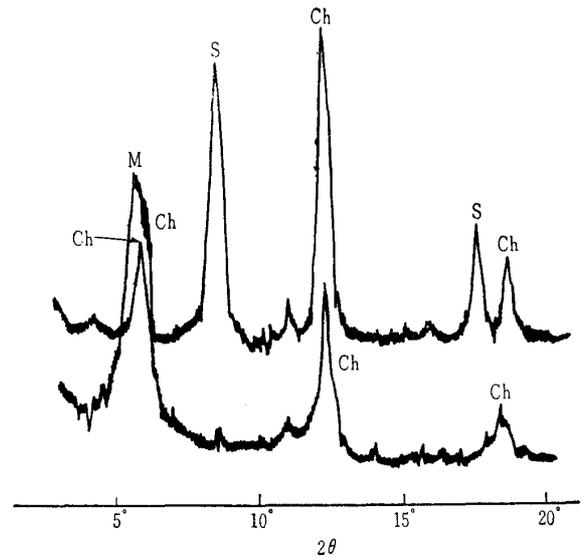
表一 粘土鉱物に関わる主な地盤災害

災害	粘土鉱物	粘土の性質	主な災害地点
地すべり	モンモリロナイト 他	膨潤性, 潤滑性	第三紀層・温泉余土地帯
地盤沈下・ 構造物の変状	多 種 類	圧密性, 膨潤性	沖積層, 火山灰地層
トンネルの変状	モンモリロナイト 他	膨潤性, スレーキング	軟岩の多い変質帯
軟弱化	多 種 類	シキントロピー	沖積層, 埋立て地
ダム崩壊	モンモリロナイト 他	潤滑性	弱面・断層破砕面

## 2.1 崩土災害

各種崩土災害とそれをもたらす主要粘土鉱物については表一に整理した。土石流と地すべりでは岩質や粘土鉱物に明りょうな区別がみられるが、地すべりの中で更に、構造線沿い片理面ですべるものと第三紀層ですべるものとも粘土鉱物に違いが認められる。すなわちこれらは、全く同一の発生機構では考えられない地すべりである。図一には輝緑凝灰岩のすべり面から採取した土のX線回折の例を示した。非地すべり土では、図のようなシャープなピーク（結晶化の進んだもの）はあまり見られない。

地質がヤングで固結度も低い第三紀層では、クラックが深部に及び浸透水も豊富である。この地質の中にはおおむね膨潤性粘土鉱物が存在し、これがベントナイト化し著しい保水能をもつ。その上滑剤にもなるので従来より粘稠性の地すべりに一役買っていると考えられている。しかもこの地層は Al, Fe, Mg に富み、雪に被覆される期間の長い湿潤気候下におかれているため、地表の水はけが悪く溶脱イオンも停留しやすくアルカリ環境の素地を作っている。地すべり基岩に多い黒色頁岩などは網目状に発達する毛状クラックをもち、乾湿の差により体積変化が著しい。したがって、機械的分解作用により新しいき裂を形成し、溶脱イオンの多い地表水の透過を容易にする。新潟県の地すべりの過半を占める寺泊層は Mg や Fe の珪酸塩に富むこのような深海性黒色シルト質頁岩であるが<sup>2)</sup>、このような地質に地すべりが多い理由は次のようなことによるものと考えられる。例えば融雪水が地下へしみ込むとき塩基を地下へ運んでいく。一方地下水が高くアルカリ性を示すため、その塩類がある深さの弱面に蒸発し集積される。地表と深層の双方から運積されたアルカリ塩類が集積される場所は、



図一 地すべり土（輝緑凝灰岩）のX線回折  
(M:モンモリロナイト, Ch:クロライト,  
S:セリサイト)

地層が角礫細片化し礫混じりである。したがって、フラクションが化学的分解作用により粘土化しベントナイト化が促進され、土質の変位面を形成していると考えられる。地すべり地帯には概略この角礫細片物が介入し、そこに地下水の流動をみる。寺泊層とほぼ同時代の他県の地層（例えば秋田県の船川層）にもやはり地すべりが顕著である。いずれも背斜構造や断裂系が発達し雪融け水を貯留するのに有利な構造である。このことは、構成地質の生成環境のみならず化学成分も類似し、風化、変質、粘土化の過程にも類似のメカニズムがあることを示唆している。多雪地帯に地すべりが多いのは、「水がめ」を成す地質構造と粘土化の進んだ土質と年間を通じて豊富な地下水を与える雪とがシステム的にうまくマッチしているためだろう。

そしてこの地すべりは地すべり粘土があってこれですべると考えられている。しかし粘土化は地すべりという進行性破壊によって進んでいる場合もある。どちらが卓越するかは議論があるが、粘土が滑剤となり時間をおいて二次、三次の地すべりを促すことは疑問の余地はない。その間隙を満たしている水は化学的結合水であって、容易に暗きよ排水できない水である。図一はこのような地すべり断面の例<sup>3)</sup>である。すべり層に強い膨潤土を介在しているのが

表二 崩土災害

	主な粘土鉱物	岩相	主な原因	膨潤性の影響	
崩土災害	山崩れ, 土石流	カオリナイト, 雲母粘土鉱物, 中にパーミュキライトも有	古生層, 花崗岩類, せん緑岩	地震, 集中的降雨	あまりなし
	温泉余土地すべり 第三紀層地すべり	モンモリロナイト, セリサイト, クロライト, 混合層鉱物他	凝灰岩類, 泥岩, 頁岩, 変朽 安山岩, 石英粗面岩	地質構造, 融雪水, 膨潤性粘土鉱物	著大
	破砕帯地すべり	イライト, クリソタイル, サーベンチン, クロライト, モンモリロナイト他	結晶片岩, 蛇紋岩	片理面, 集中的降雨	やや有

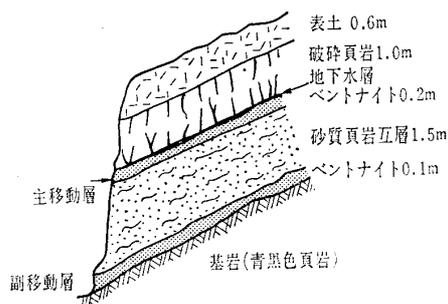


図-3 地すべりの地質断面の例

注目される。このような地すべりは乾湿による土の体積変化が大きいので、斜面内では季節の変化とともに伸縮し、そのせんで運動により季節的に安全率を変えながら緩慢にすべり落ちていくようである。粘土のこのような季節的変動例を図-4<sup>4)</sup>に示した。

## 2.2 地盤の軟弱化

綿毛蜂の巣構造をもつ地盤は含水比が高く、地震などの衝撃力を受けるとシキソトロピー現象を引き起こし液状化し破壊する。この弱点をはっきりと露呈したのが1978年の宮城県沖地震<sup>5)</sup>であった。軟弱なたんぼを埋め立てて造成された団地の上の中小のビルは、まるでコンニャクの上の物体のように揺れ動いて地盤の上に崩れ落ちたという。軟弱な上に振動を受けるともろさを露呈する土の骨格構造に寄与する粘土鉱物の筆頭は、このモンモリロナイトであると考えられている。

## 2.3 地盤沈下・構造物の変状

地下水汲上げによる水の需要や巨大構造物は、年々増加の一途をたどっている。しかしこれらに伴う地盤沈下の問題は全国的に拡大している地盤災害の一つである。支持地盤の変状によるピサの斜塔や社会問題になっている油タンクの破損は、不同沈下の典型に数えあげられる。著名なメキシコシティの地盤沈下は、火山灰質の土質で自然含水比が高く、中に多量のモンモリロナイトを含むことがその理由とされている。

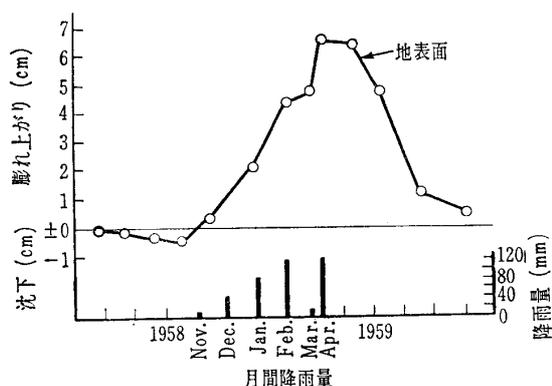


図-4 季節による粘土地盤の膨れ上がり

## 2.4 トンネルの変状

トンネル掘削において、周壁面に現れる膨張性土圧(膨圧)は、一般に「拘束応力の解放—組織の緩み—リバウンド—地下水浸透—膨潤—スキーズアウト」という一連の変形パターンを示す。周壁に水がまわりべとつた土質が塑性的にふるまい容積変化を示すのは膨潤である。更に発達するとスレーキングを起こして岩石の一部が無機親水コロイドのゲル化を示すようになる。堅岩のところは地山の潜在応力の押し出しが卓越する。結局膨圧は、一般にこの両者が複合作用して生じているとみてよいだろう。どれが swelling でどれが expansion なのかは明りように区別できないが、後の実験結果で示されるように、緩みの圧力は膨潤圧の変換である可能性が強い。そしてこの膨潤は圧力よりもむしろ体積増加の著しさにおいてその特徴が顕著である。坑内では押し出し性の盤圧が増強するにつれ切羽の含水量も大きくなる。このことから吸水膨潤は、緩みの結果の現象であると考えられ、ばく大なトンネル土圧は単に膨潤のみでは説明できない。したがって膨潤圧が岩盤の一軸圧縮強度と等しいとする見方も疑問視されている<sup>6)</sup>。そのような膨潤が予測される場所は、しゅう曲帯、断層破碎帯、軟岩の多い変質帯等の不連続面と水が組み合わさった特定地点である。そういう所の粘土鉱物は、例えば断層中のグウジ(gouge)を取りあげると、クロライト、セリサイト、サーペンティン、方解石、カオリナイト、プロピライト、モンモリロナイト等が多く、おおむね膨潤性粘土鉱物で占められる。また黒鉱鉱床における坑内の盤ぶくれや炭層に挟在する火山灰地質によるフローリフトもやはり同種の鉱物による。

トンネル屋泣かせの時間依存性的な変形も、青函トンネルでは計測工法樹立の試みが行われ、また地山の弾性変形は許すが地山を緩めない NATM の概念は、地山と構造物が一つのシステムとして把握されコントロールされた成功例だろう。トンネルは地山で持たせることが理想である。しかし至る所弱面傷だらけで水を吸って強度低下をきたす壮年系山地の分布は広大である。この地山の緩みと膨潤圧の予測は、後の章で論じられる。

## 3. 膨潤のメカニズム

膨潤土の功罪の一つとして、この土は“功”の方面でもなかなかの関心がもたれている。米国では膨潤土のことを“a clay with thousand uses” と称し、ワイオミング州ベントン統の地層内に賦存するベントナイトを古くから多分野にわたり活用してきた<sup>7)</sup>。水と接してゲル化の性質を示すことから、soap clay とも呼んでいる。変質して膨らまないメタベントナイトも存在するが、日本のベントナイトの多くは、熱水による母岩の変質の産物であり、極めて膨潤性に富んでいる<sup>8)</sup>。このような土などの体積増加現象を表-3(a)に整理した。土が水を吸って膨潤するとき、

表-3 体積増加現象の要因

(a) Expansion	(b) Swelling	記号
吸水による物理的膨張	粘土鉱物の種類	$C_k$
層間に水が入るための容積変化	" 量	$C_q$
結晶成長に伴う容積変化	溶解する電解質の種類	$W_k$
層間以外の構造への加水による変化	" 濃度	$W_c$
熱や圧力による結晶構造の変化	粘土粒子の配列	$C_p$
地山応力の解放に伴う変形	" 骨組み構造	$C_s$
造構運動の際の潜在応力の解放	周圧条件 (固結度)	$E_c$
岩か水の凍結	初期含水比	$w_i$
ゼラチン・蛋白質類の存在	温度	$T$

その程度の大小は表-3(b)のような因子の組合わせによって決まると考えられる。したがって、膨潤圧を  $P_s$  (kgf/cm<sup>2</sup>) とすると、表-3の記号を使って次式のように表せる。

$$P_s = f(C_k, C_q, W_k, W_c, C_p, C_s, E_c, w_i, T \dots) \dots (1)$$

この膨潤圧には次の二つの体系がある<sup>9)</sup>。まずモンモリロナイトのような親水コロイドにおいては、水分は粘土粒子(単結晶片)の間に浸入する。それによって土粒子表面近くの拡散二重層のイオン濃度と間隙中の自由水のイオン濃度の差により粒子間膨潤が生ずる。これが外部膨潤で浸透圧と考えられる粒子間反発力である。この力と粒子間間隙が水を吸引する力、すなわちサクシオン圧とは対応関係にあるとし、この関係から膨潤圧を説明する考え方がある。もう一つは層状格子に水分が浸入し、層間隔を拡張する層間膨潤と呼ばれる内部膨潤である。これは今のところ理論的に定量できない。以上から不飽和粘土が完全飽和になる吸水・膨潤という過程は、化学的エネルギーが力学的エネルギーに転化される過程である。しかし、これらは膨潤の action として互いに分離して区別できない力である。この力の源泉は水分である。

モンモリロナイトは不定形板状鉱物で粘土鉱物中最も微細な結晶である。この粒子は吸着水、(OH)水(構造水)、層間水の三通りの水をもつ。しかも層状格子をもち、その中に水を取り入れている。この水分を膨潤水という。これは弱結合を示す層間水である。モンモリロナイトはこの層状格子が三層積み重なった三層格子構造型粘土鉱物で、既述の膨潤性粘土鉱物もこのタイプに含まれる。しかしカオリナイト、ハロイサイト等は二層構造である。膨潤の度合いは結局この格子間を占めるイオン(カチオン)によって決まる。その顕著な鉱物が Na 型モンモリロナイトである。すなわち膨潤を生ずるのはこの場合層格子の層間距離が開くことによるので単なる粒子間反発力とも異なる。層間に入った水分は粘性液体であり、非自由水である。粘性抵抗以上の力が加わって、化学ポテンシャルの低い部分へ粘性流動により移動する。重粘性をもち、比重も 1.5 前後

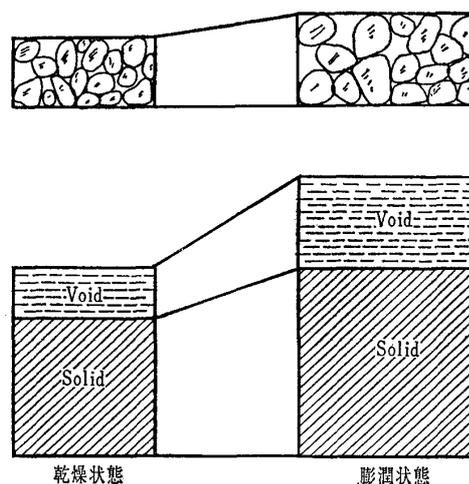


図-5 膨潤状態図

に達すると考えられており、斜面の土を一緒に押し流す力を持っている。この層間水や(OH)水は脱水により土の構造を変化させる。この水が毛管現象による吸着水と連絡し、土粒子の伸縮を支えている。このような層間水は、スメクタイト、パーミキュライト群、ハロイサイトで知られている。その膨潤の骨格は大体図-5のように考えられる。

#### 4. 工学的問題点

膨潤土の分布する標式的地盤は、雨でゼリー状の軟弱な土質を形成し、乾燥によって表面には縮面状のき裂ができる。このような土については、土質工学上不明な点が多く、次のような事柄が工学的に考慮される点であると考えられる。

- ① 物理化学的性質と膨潤のメカニズムの関係
- ② 膨潤の際の土の力学的性質の変化
- ③ 膨潤の要因と膨潤量
- ④ 膨潤圧の分布と極値
- ⑤ 膨潤による災害現象の予知
- ⑥ 被災のメカニズムと構造物の破壊限界
- ⑦ 膨潤現象の利害及び制御
- ⑧ 設計計画(安定性)の追求

#### 5. 膨潤の測定と解析例

土や岩盤の膨潤に関しては、その試験法が確立していない。そのため ISRM (国際岩の力学会議) から規準案も出されているが、まだ問題点もある。装置としては圧密試験器の転用によることが多い。膨潤ひずみと圧力の測定は慣例的に独立した方法で行われる。すなわち、ひずみはシード(Seed)らの方法によると、0.1 kgf/cm<sup>2</sup> のサーチャージのもとで測定することとし、膨潤圧の場合はひずみを許さない厳密に閉じた容器内で吸水させ、それによって発揮する圧力と定義している。膨潤は一般に法外な計測時間を必要とする。このような測定における問題点は、装置が複雑

であるばかりでなく、試料のセット時における容器との密着度や水まわりの均等性、気泡の内閉を生じさせないで、迅速に測定することなど細かな技術的配慮が必要である。膨潤諸量の測定には主に次のようなものがある。

膨潤力（容積法）の測定は各国とも薬局方に基づいている。その単位は ml/2 gf である。一方重量法による膨潤度は JBAS（日本ベントナイト工業会）<sup>10)</sup> によると次のようである。

$$\text{膨潤度 (gf/gf)} = \frac{W_2 - W_1}{S \times \left( \frac{100 - w}{100} \right)} - 1 \dots\dots\dots(2)$$

ここに  $W_1$  = 空の膨潤セルの吸水後の重量,  $W_2$  = 試料入り膨潤セルの吸水後の重量,  $S$  = 試料採取量,  $w$  = 試料の含水比。また土質工学的には膨潤性の目安として、土のコロイド含有率 ( $C$ )、塑性指数 ( $I_p$ )、活性土 ( $A_c = I_p / 2 \mu\text{m}$ ) などを利用することが多い。シードラ<sup>11)</sup>によると、swelling potential ( $S_p$ ) として、

$$S_p(\%) = 3.6 \times 10^{-5} \times A_c^{2.44} \times C^{3.44} \dots\dots\dots(3)$$

ブラックレイ (Brackley)<sup>12)</sup> は初期間隙比  $e_0$ 、外力  $P$  (in Kpa) を用い次式で表している。

$$S_p = (32.4 - 0.85 w_i)(5.3 - 2.77 e_0 - \log_{10} P) \dots\dots(4)$$

オニール (O'Neill) ら<sup>13)</sup> は自由膨潤の場合は液性限界 ( $w_L$ ) と初期含水比 ( $w_i$ ) を用い統計的処理を施し、

$$S_p = 2.27 + 0.131 w_L - 0.274 w_i \dots\dots\dots(5)$$

としている。

膨潤の吸水過程は時間関数として表示されるものであるから、著者はこのような自由膨潤を図-6のような装置で調べてみた。この装置による吸水量と時間の関係はおおむね図-7のようである。膨潤性を示さない土の吸水は一般に粒子間隙を充てんする毛管水量 ( $Q$  ml) で決まり、その吸水は早い時期に終了する。このような変化全体をみると次式で表示される。

$$Q(t) = \frac{\sqrt{t}}{a + b\sqrt{t}}, \quad (a, b \text{ は定数}) \dots\dots\dots(6)$$

初期吸水過程は時間の平方根に比例し、拡散の法則  $Q(t) = at^b$  が成立している。したがって、ある時間までは図-7から各々次のように表せる。

$$Q(t), S_p(t) = a\sqrt{t} \dots\dots\dots(7)$$

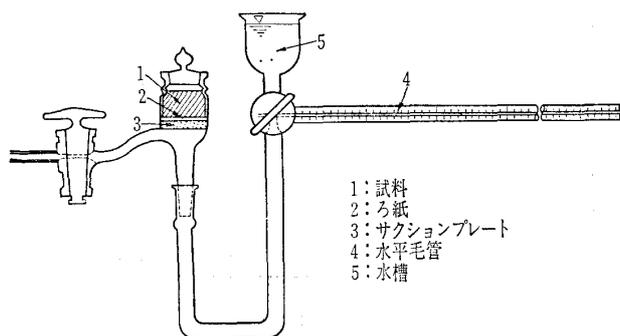


図-6 フロインドリッヒ吸水装置

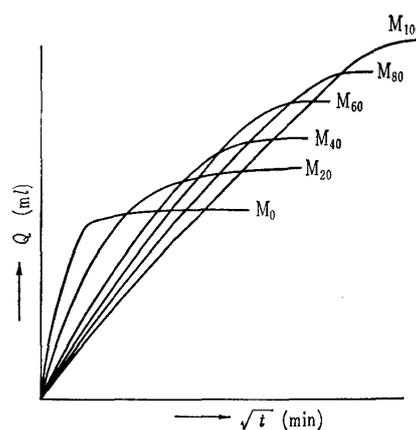


図-7 土の吸水特性概略図 (Mの添字はモンモリロナイトの含有率を示す)

チトヴィッチ (Tsytoovich) ら<sup>14)</sup> は、やはり  $\sqrt{t}$  を用いた圧密型の方程式を与えているが、膨潤性の強い土は上式の  $a$  が小さく非常に長期にわたる現象を示す。したがって、急激な吸水変化を示さず、かなり時間的遅れを伴って水和する。モンモリロナイトの多いものほどこの時間的遅れの傾向が強くなり  $Q$  が増大し膨潤量も大きい。そして徐々にスレーキングを引き起こす。このような浸透と水分拡散に関する体積含水率と膨潤の関係は、拘束下と非拘束下とでも異なる。

拘束状態における膨潤挙動の圧力測定については、種々の試みがあるが、例えばゴモルニク (Komornik) ら<sup>15)</sup> は 125 個の試料から統計的に次式のように整理した。

$$\log_{10} P_s = 2.732 + 0.0208(w_L) + 0.000665(\rho_a) - 0.0269(w_n) \dots\dots\dots(8)$$

ここで  $\rho_a$  = 乾燥密度,  $w_n$  = 自然含水比

ザレツキー (Zaretsky) やボルト (Bolt) らも解析的に導いているが式の内容が複雑である。以上がこれまでの膨潤に関する主な研究例である。

### 6. 膨潤の構成式とその工学的応用例

膨潤挙動はモンモリロナイトの含有率によってどのように経時変化するかデータがない。そこで著者は図-8のような装置を考案し、これによる圧力測定を行った。モンモリロナイトの含有率の差異による変化のパターンを示すと図-9のようになる。この図から分かるように膨潤圧は拘束下ではやがて飽和収束し一定値に落ち着く。このような現象に適用可能なモデルを追究すると、次のような指数関数型の式を得る<sup>16)</sup>。

$$P_s(t) = P_{sf}(t)(1 - e^{-2.302k_1 t}) \dots\dots\dots(9)$$

上式はレオロジーにおけるフォークト (Voigt) 体の挙動と同じタイプであり、膨潤に関する予測式である。式中  $P_{sf}(t)$  は  $P_s(t)$  の最終値,  $e$  は自然対数の底,  $k_1$  は膨潤係数,  $t$  は時間 (min),  $a$  は定数である。(9)式に基づいて同一時間内における  $P_s(t)$  の予測曲線を描くと図-10のようになる。これはひずみに関しても同様の関係を得る。

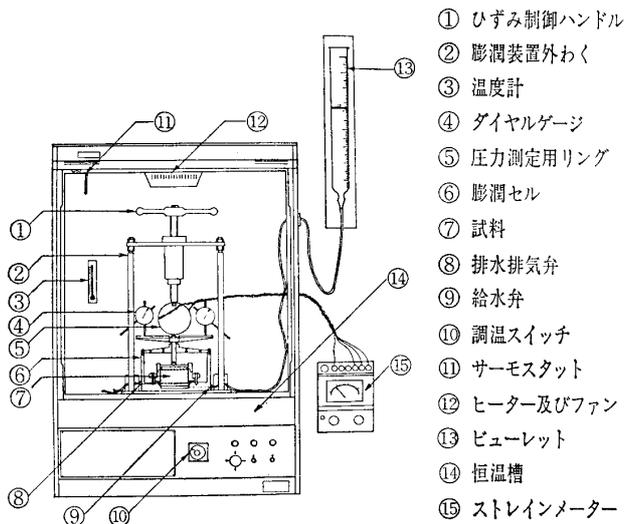


図-8 膨潤試験装置の概要

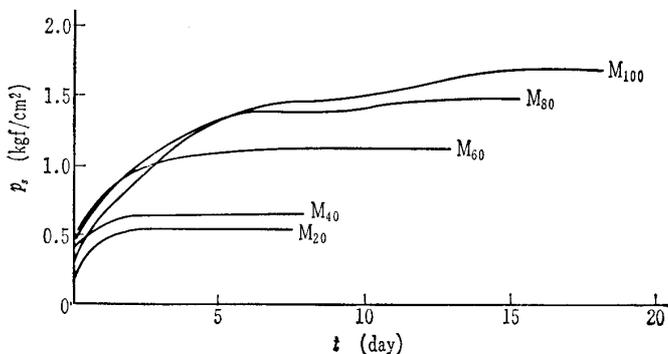


図-9 モンモリロナイトの含有率による膨潤圧のパターン

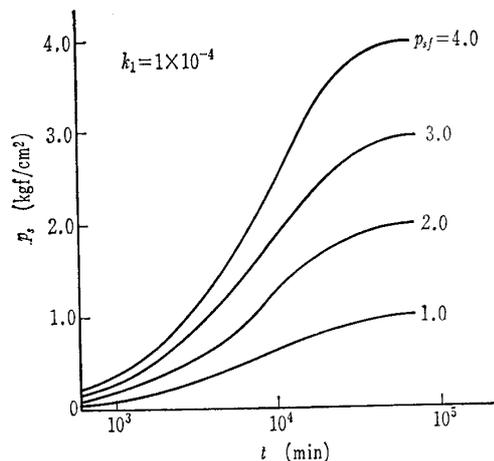


図-10 膨潤圧の予測曲線

$$P_s(t) = P_{sf}(t)(1 - e^{-2.302k_1' \cdot t}) \dots (10)$$

このようなモデル式によって示される現場の現象例はかなりある。例えば地山のクリープ現象とか坑内の floor heave もこれに該当する。図-11は、地下約550mにおけるイージントン炭坑 (Easington Colliery)<sup>17)</sup>の地質断面と膨潤による破壊箇所(×印)を示し、更に実測の結果と原著者の理論曲線、 $P_s(t) = \delta(1 - e^{-\alpha \cdot t})$ と著者の予測曲線を示して

いる。ここで  $\delta$ ,  $\alpha$  は粘弾性レオロジーモデルによる定数で、(10)式に対応する値である。著者のあてはめによれば次式のようになる。

$$P_s(t) \text{ (cm)} = 62.1(1 - e^{-2.753 \times 10^{-3} \cdot t}) \dots (11)$$

床盤の膨れ上がりの変形挙動が図示のように膨潤実験による構成式に適合し、現場の挙動をよく説明していることが分かる。この式による膨潤は地山の支保工などに時間的要素をもって作用し、最後に平衡を生じて変形は停止するレオロジーモデルである。そして膨潤は地山の塑性領域の緩みが生じてトンネル土圧に変換される現象であると考えられる。したがって、トンネル掘削に伴う圧力の経時変化も予測され、その極限値の時間は(9)式より、次のように導かれる。

$$t_{\infty} = -\frac{1}{2.302 k_1} \log_{10} \left( 1 - \frac{P_s(t)}{P_{sf}(t)} \right) \dots (12)$$

以上は膨潤挙動がレオロジー的に表示された場合である。このモデル以外のものに、例えば統計的に導かれた次式<sup>18)</sup>が提案され、膨潤性軟岩の挙動に合うことが確かめられている。

$$P_s(t) = P_{sf}(t) / \{1 + e^{-(a - k_2 \cdot t)}\} \dots (13)$$

ここでは詳述しないが、(9)式より若干精度が良い。統計的方法の方が弾性論的方法よりも信頼性があるという報告もある<sup>19)</sup>。

ところで膨潤圧は理論的には既述のように、粒子間反発力として浸透圧を考慮したヴァンホッフ (van't Hoff) 理論より求められている<sup>20)</sup>。これはイオンや塩類濃度等に支配されるとして次式で表される。

$$P_s = RT(C_c - 2C_0) \dots (14)$$

$$C_c = \pi^2 / \{z^2 B(d + x_0)^2 \times 10^{-16}\}$$

ここで  $R$  = 気体定数,  $T$  = 絶対温度,  $C_c$  = 2枚の粘土板の間における陽イオン濃度,  $z$  = 交換性陽イオンのイオン価,  $d$  = 2枚の粘土板の距離の1/2,  $x_0$  = 補正係数,  $C_0$  = 間隙水の塩類濃度,  $B = 10^{15} \text{ cm}^3 / \text{m} \cdot \text{mol}$ 。計算のため  $x_0 = 3.2 \text{ \AA}$ ,  $T = 293^\circ \text{K}$ ,  $C_0 = 10^{-4} \text{ M NaCl}$  を使い、本実験のような Na 型モンモリロナイトがその含有率を変えることによる含水比 ( $w$ ) と  $P_s$  の関係を求めてみた。それが図-12である。モンモリロナイトの差異による傾向がよく分かる。

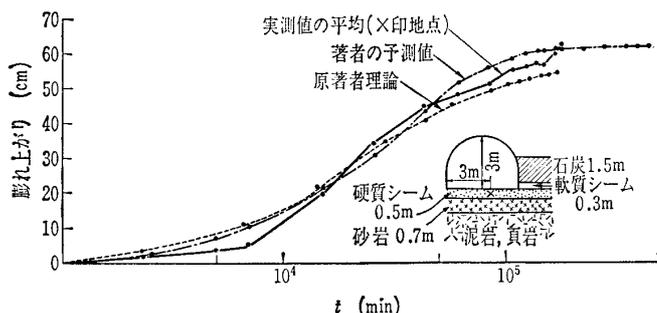


図-11 イージントン炭坑の盤膨れ

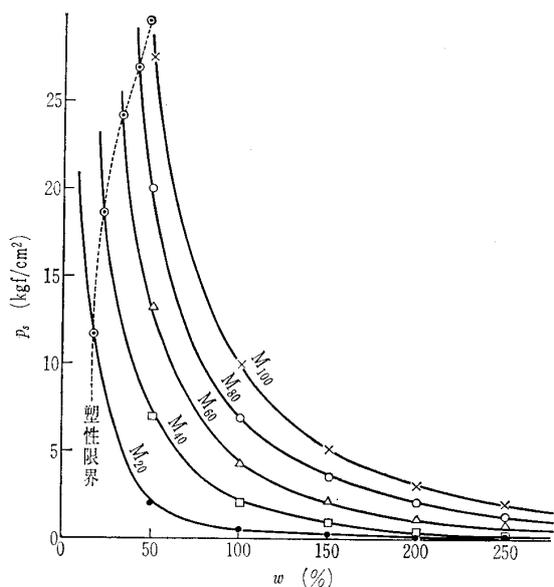


図-12 ヴァンホッフ理論による膨潤圧

ただこの計算では  $w$  が増大すると圧力は互いに近似し収束性を示し、逆に乾燥側では極度に増大する。しかし実験では決してこのような傾向を示さない。この理論は含水比の一定領域には良く合うと言われる。また表-3(b)の条件とは無関係に成立する一面もあり、工学的応用としている難点も指摘されているが、含水比や粘土鉱物が定量されれば  $P_s$  が予測されるので、工学的アプローチとしては重要な資料の一つである。

さて膨潤は塩類濃度に強く支配される。このことからその抑制効果を調べるため、 $M_{50}$  について NaCl の規定度 ( $N$ ) を段階的に変えた膨潤試験を行った。図-13はその結果を示している。図から  $N$  の影響による膨潤挙動の特徴が明りように読みとれる。すなわち、 $N$  が小さくなると時間

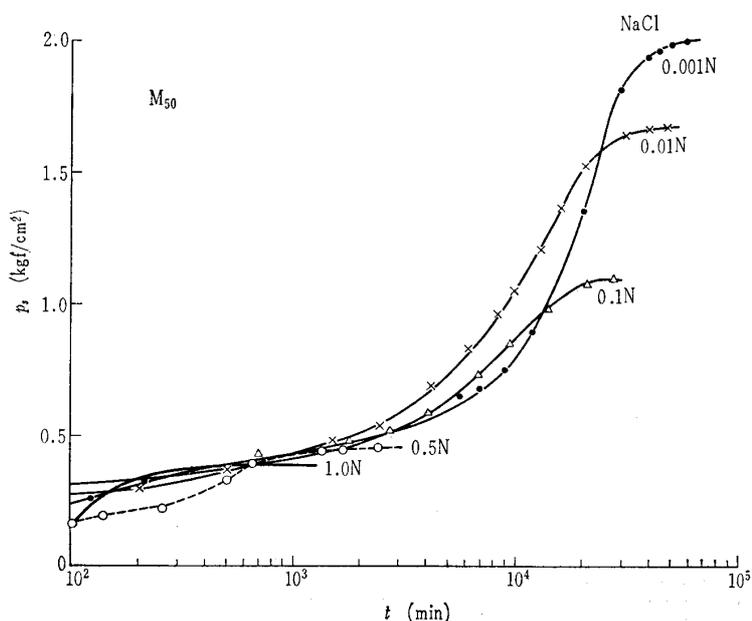


図-13 塩規定度による膨潤圧

的遅れの著しい蒸留水の場合に類似した成長曲線を描くが、 $N$  が大きいと数時間で収束値が現れ、 $N=1.0$  では自由膨潤の場合と同様の挙動曲線となっている。

このように膨潤圧は NaCl の  $N$  によって応急的に抑制されるが、これはリグニンや石灰添加による地盤の安定化と同一の基礎をもつ現象であり、膨潤を抑制する一つの方法として重要な問題である。この現象を現場に応用したのとして、例えば従来より悪路に塩を散布することが行われてきた。

ところで、含水比が高まり膨潤圧が高まって体積増加を示すことは、それが地盤の内部からそれだけ破壊する力が系全体へ作用した場合と同一の原理である。内部破壊力としての膨潤圧は小さくとも図-4のように体積増加は顕著である。この問題は擁壁や地すべりにおいても重要である。地すべりの安定計算ではこの影響を考慮したものを知見しないので、一例としてこの影響を斜面安定計算によって調べてみた。計算を簡単にするため図-14のような半無限斜断面内における地下水位をいろいろ変化させた場合の安全率を考えてみる。斜面内の力の成分は、 $W = \{H_0\gamma_0 + (H - H_0)\gamma\} \cos\beta$ 、 $\sigma = \{H_0\gamma_0 + (H - H_0)\gamma\} \cos^2\beta$ 、 $\tau = \{H_0\gamma_0 + (H - H_0)\gamma\} \cos\beta \cdot \sin\beta$ 、 $u = (H - H_0)\gamma_w \cdot \cos^2\beta$ 、その安全率 ( $F_s$ ) は、 $\gamma' = \gamma - \gamma_w$  として、

$$F_s = \frac{C + \{H_0\gamma_0 + \gamma'(H - H_0)\} \cos^2\beta \cdot \tan\phi}{\{H_0\gamma_0 + (H - H_0)\gamma\} \cos\beta \cdot \sin\beta} \dots\dots\dots (15)$$

粘性土の膨潤圧  $P_s$  は骨格中の圧力であり、正規圧密状態では地下水が胚胎して生ずるものであるから、有効応力に参与するものと仮定する。これが間隙水圧と同じ向きに作用するものと考えれば、斜面が地下水で飽和された状態 ( $H_0=0$ ) では、次のようになる。

$$F_s = \frac{C + (\gamma'H - P_s) \cos^2\beta \cdot \tan\phi}{\gamma'H \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta} \dots\dots\dots (16)$$

各  $H_0$  について  $P_s$  の変化による  $F_s$  の変化を示すと図-15のようである。これによると、地下

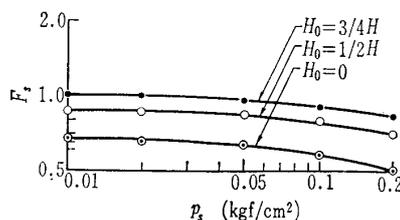


図-15  $P_s$  の影響による  $F_s$  の変化

## No. 1152

水が  $-3.5\text{m}$  において  $P_s=0.1\text{kgf/cm}^2$  としても安全率は約5%減となる。従来より地すべりでは  $c$ ,  $\phi$ ,  $u$  が主要な役割を演じてきた。しかし地すべり地帯では、膨潤性粘土がシームを成したり多量に含まれることから、 $P_s$  も当然考えておかねばならない。更に地下水上昇とともに膨潤による  $c$ ,  $\phi$  の変化や bubble pressure (気泡圧) も考慮しなければならない問題である。したがって安定計算上、この膨潤挙動は無視できない重要な現象であると言える。

## 7. 結 び

膨潤性土質は、トンネル以外にはこれまであまり取り扱われなかったが、以上のようにそれが関与する領域は非常に幅広く、また社会的要素の強い性格をもつ問題であることが分かった。ここでは膨潤土による災害の原因やその機構について述べ、実験的に究明した結果について整理し、これまで抜けていたデータを補足した。更に実験的に考察して得た膨潤の構成式が、トンネル掘削における地盤の挙動をよく説明するモデルであること、特にこれが経時変化からみて、緩みの土圧に変換されていくとみられること、また従来地すべり安定計算上無視されていた膨潤挙動を検討した結果、これは看過できない現象であることなどが分かった。

本文で述べた膨潤挙動は複雑多様な要因に支配される物理的・化学的現象であるが、以上のように工学的アプローチが可能であることが示された。しかし現実には、膨潤の測定方法や膨潤の概念が浸透していないので、この方面での一層の研究の積重ねが望まれる。

なお、本文をまとめるに当たりアドバイスをいただいた東北大学工学部佐武正雄教授、粘土鉱物に関して秋田大学鉱山学部本多朔郎教授に労をわずらわし、いろいろご教示頂いた。また実験試料についてお世話になったクニミネ工業の皆様に厚く感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 内田宗義：膨潤土(ベントナイト), 北隆館, 1946, p.14
- 2) 高野秀夫：地すべりと防止工法, 地球出版, 1970, p.104
- 3) 高野秀夫：地すべりの内部構造について, 土と基礎, Vol. 3, No.11, 1955, pp.17~21
- 4) R. N. ヤング・B. P. ワーケンチン(山内他監訳)：新編土質工学の基礎, 鹿島出版会, 1978, p.137
- 5) 佐武正雄編著：1978年宮城県沖地震による被害の総合的調査研究, 1979, 265p.
- 6) 飯星 茂・青砥 宏・領家邦泰：赤倉トンネルにおける膨張性土圧と泥岩の諸性質について, 第10回土質工学研究発表会, 1975, pp.775~778
- 7) R. Grim and N. Güven: Bentonites, Elsevier, 1978, pp.232~237
- 8) Iwao ed.: The Clay of Japan; Geological Survey of Japan, 1969, pp.103~120
- 9) J. E. Gillott: Clay in Engineering Geology, Elsevier, 1968, pp.107~113
- 10) JBAS: 日本ベントナイト工業会標準試験法, 日本ベントナイト工業会, 1977, JBAS-4-77
- 11) H. B. Seed et al: Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays., ASCE, SM3, 1962, pp.53~83.
- 12) I. J. A. Brackley: Swell under Load, 6th Reg. Conf. Africa on SMFE, 1975, p.68.
- 13) M. W. O'neill and O. I. Ghazzaly: Swell Potential Related to Building Performance, ASCE, GT12, 1977, p.1364.
- 14) N. A. Tsytoich et al: Problems of Swelling on Wetting, Proc. 3rd Asian Reg. Conf. on SMFE, V.1, 1967, pp.120~123.
- 15) A. Komornik and D. David: Prediction of Swelling Pressure of Clays, ASCE, SM.1, 1969, p.222.
- 16) 伊藤 駿・堀部富男：モンモリロナイトを含む岩盤の膨潤挙動に関する基礎的研究, 第11回岩盤力学に関するシンポジウム, 1978, pp.6~10.
- 17) P. R. Sheorey and R. K. Dunham: An Approximate Analysis of Floor Heave Occuring in Roadways Behind Advancing Longwall Faces, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol.15, 1978, pp.277~288.
- 18) 伊藤 駿：膨潤挙動を示す地盤の力学的性質に関する一考察, 第12回岩盤力学に関するシンポジウム, 1979, pp.46~50.
- 19) M. N. ゴールドシュテイン (大草訳)：新しい土質力学 I, 森北出版, 1973, pp.284~285
- 20) 例えば, 古賀 潔・河野英一・岩田進午：土の膨潤について, 土と基礎, Vol.21, No.12, 1973, p.62.

(原稿受理 1979.10.22)

学会発行図書案内

# 技 術 手 帳

—実務に役立つ土質工学用語の解説—

B 6 判320ページ 送料200円  
 会員特価 1,500円 定価 2,000円

発行：土質工学会

東京都千代田区神田淡路町2丁目23番 菅山ビル4階  
 〒101 電話 03-251-7661(代表)