泥岩または粘板岩の吸水膨張について*

村 山 朔 郎** 八 木 則 男**

Swelling of Mudstone or Claystone due to Sucking of Water

by

Sakuro MURAYAMA and Norio YAGI

(Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto)

It happens occasionally that new slopes or tunnel walls fail due to swelling of mudstone or claystone in consequence of water sucked. In this paper, various mechanisms of such failures have been investigated, and their causes are classified into the following 3 main cases.

(1) Deviatoric stress may have been generated in the mudstone or claystone due to the unisotropic expansion caused by the sucking of water. In order to examine the hypothesis stated above, some samples of mudstone from the deluvial layer situated about 180 m beneath the surface of Osaka City and of claystone from Maibara Pass have been tested. In these tests, it has been shown that the swelling strain perpendicular to the bedding is larger than that parallel to the bedding. Accordingly, if the stress on the mudstone or claystone is decreased under a nearly confined state, the stress generated in the stone becomes unisotropic. If the deviatoric stress thus generated reaches the strength of the stone, failure takes place in the stone.

This strain or stress due to the swelling increases with time, and the rate of increase can be estimated by applying the expansion coefficient of the rock. Moreover, the capability of sucking water of the mudstone or claystone has been measured by suction-measuring device.

(2) The failure of the structure of the rock may have been caused by the local unequal expansion of the minerals contained and the fine seam of different materials. To observe the phenomena that have occurred in the rock when the rock has sucked water, micrometric expansive deformation will be measured by means of a microscope.

(3) The failure of the stone may have occurred in consequence of ununiform swelling due to the unequal distribution of sucked water.

(Received Mar. 24, 1965)

1 ま え が き

近年国土の開発に伴い、諸施設、交通路は山地にも及び劣弱地質地帯に土木構造物の施工がしいられる状態になってきた。これに伴い山地崩壊、地層滑落、落盤、落石の事故が急増し、人命、財貨、資源が受ける被害も数多きに上っている。上記の災害は特に粘土鉱物を含む岩石(たとえば泥岩、粘板岩)地帯に多く発生し、構造物の施工中および施工後に注意しなければならない問題点が多くある。これは粘土鉱物を含む岩石の吸水膨張による膨張地圧の発生および強度低下によるものが多いと思われる。このような岩石は力学的に等方等質の物質ではなく、鉱物の堆積による異方性および不均一性を有するとともに、ひび割れの存在などがその力学的性質を複雑にし、その方面の研究を困難にしている。本研究では上記の岩石の吸水による破砕の原因および吸水膨張圧の性状を調べることを目的とするが、用いる試料としては泥岩は堺市において地下

180mの洪積層より、粘板岩は米原峠の古世層より採集したものである。

2 岩石の破砕の原因

トンネル内の落盤や切取斜面の崩壊は岩石の破砕が原因となっている。このような現場における岩石の破砕の原因について考えると次項のようになる。

(1) 切り取りまたは掘削により、その付近の岩盤中の応力状態が変化し従来より大きな主応力差が発生する。

(2) 切り取りまたは掘削により上載荷重が減少し、平均主応力 σ_m が減少する。したがって吸水膨張が起こり、岩石の強度が低下する。(粘性土では含水比と強度の関係は一義的に定まる)。しかし岩石の強度低下は節理、層理やき裂の性質にも関係する。

(3) 切り取りまたは掘削のためその上部に生ずる引張りき裂により強度低下が起こる。

(4) 岩石の材料的、力学的異方性のために生ずる膨張量の方向別の差によりせん断ひずみが生じ、そのためせん断応力が発生する。(実験により確かめた)。

* 原稿受理 昭和40年3月24日

** 正 会 員 京都大学防災研究所 京都市伏見区横大路

(5) 材料の不均一性のためその内部の部分的な吸水膨張量の違いによりせん断応力が発生する。(後に実験により確かめた)。

(6) 材料の吸水膨張はその表面より深部へと進むので、その表面と深部の膨張量の違いによりせん断応力が発生する。

(7) 材料が大気に接していると、降雨および日照りにより吸水、乾燥が繰り返され、岩石が風化し強度低下が起こる。

以上のような原因をあげたが、実際の破壊は上記の原因の一つによって起こるのではなく、いくつかの原因の組み合わせおよび繰り返しの起こるものと思われる。

3 吸水膨張

3・1 試料, 供試体

実験に用いた試料は大阪府堺市の地下180mの洪積層より採取した泥岩と米原峠の古世層の粘板岩である。泥岩の物理的、力学的性質は次のようである。粒径加積曲線は Fig. 1 に示すようで、均等係数2.5以上、上粒子の比重は2.66、液性限界、塑性限界はおおの110.8%, 45%である。また1軸圧縮試験の結果を最大せん断応力 τ_{max} と最大せん断ひずみ γ_{max} の関係で示すと Fig. 2 のようになり、せん断強度 $\tau_{max} = 5.30 \text{ kg/cm}^2$ である。圧密試験の結果、先行圧縮荷重は 25 kg/cm^2 、圧縮指数 $C_c = 0.9$ 、圧密係数 $C_\alpha = 5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 、透水係数 $k = 1 \sim 7 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ であった。

泥岩の供試体は上記の試料を直径3.5cm 高さ3.5~4.0cmの円筒型に成形したもので、粘板岩の供試体は1辺が3cmの立方体である。

Fig. 1. Grain size distribution curve.

3・2 吸水膨張量

吸水膨張量の測定には供試体の縦方向および横方向の変位が測定できる Fig. 3 に示すような装置を使用した。供試体の縦方向は試料が地中にあるときの鉛直方向と一致している。また岩層はその鉛直方向と直角をなしている。供試体の上下面からも吸水できるよう

Fig. 2. Shear stress-shear strain curve.

Fig. 3. Apparatus for measuring amount of expansion.

に上下面にポーラストーンを置いた。

実験は泥岩および粘板岩について荷重を作用させない自由膨張の場合および供試体の縦方向に種々の荷重を作用させた場合について行ない、その縦方向および横方向の変位を測定し、その結果を縦方向ひずみ ϵ_v 、横方向ひずみ ϵ_h と時間の関係で Fig. 4, 5 に示した。ここに横方向は自由の状態である。Fig. 4 は泥岩、Fig. 5 は粘板岩についてのものである。Fig. 4 および Fig. 5 の曲線1 はいずれも自由膨張の場合の縦方向ひずみを示していて、泥岩の膨張量のほうが粘板岩のそれより最終的には約3倍大きい、Fig. 4 の曲線1 と

Fig. 4. Amount of expansion-time curves.

Fig. 5. Amount of expansion-time curves.

12および Fig. 5 の曲線 1 と 8 (Fig. 3 の曲線 12, Fig. 4 の曲線 8 は自由膨張の場合の横方向ひずみである) の比はほぼ 2 : 1 であって、両者とも自由膨張の場合の縦、横両方向の膨張量の比は同じであることがわかる。縦方向より横方向の膨張量が小さいのは試料の材料的 (粒子の方向性) および力学的 (試料が地中において受ける鉛直方向と水平方向の圧力の差) 異方性によるものと考えられる。このようなことから縦方向ひずみは最大主ひずみ、横方向ひずみは最小主ひずみとなっているであろう。その場合にはせん断ひずみ $\gamma_{\max}$ は次式で示される。

$$\gamma_{\max} = \epsilon_v - \epsilon_L \quad (1)$$

また、せん断ひずみ $\gamma_{\max}$ とせん断応力 $\tau_{\max}$ との関係は

$$\tau_{\max} = G\gamma_{\max} \quad (2)$$

で与えられる。一方 Fig. 2 の $\tau_{\max} \sim \gamma_{\max}$ 関係より泥岩のせん断弾性係数 $G = 225 \text{ kg/cm}^2$ となり、Fig. 4 の曲線 1 と 12 より 24 時間後の縦と横の膨張量の差すなわち $\gamma_{\max} = \epsilon_v - \epsilon_L = 0.01$ となるから、かりに膨張時と圧縮時とで G の値が同じであると仮定すれば、材料の方向別の膨張量の違いによるせん断応力の発生する大きさは 2.25 kg/cm^2 となりこの材料の破壊応力の約 45 % に達している。これで破砕の原因 (4) が量的に概算できた。

次に膨張量と時間の関係は時間を対数にとると Fig. 4, 5 に示すようになり、粘土などの圧密曲線と同形である。そこで圧縮時と同様に膨張時にも次の関係が成

立するものとする。

$$\sigma = \sigma' + u \quad (3)$$

ここに γ は全応力, σ' は有効応力, u は間げき水圧である。切り取りや掘削を行なうと全応力が減少し、その減少量だけ過剰間げき水圧 u (負圧) が発生し、試料中に水の流れが生じ吸水膨張が始まる。この三次元流れの微分方程式を方向により透水係数の異なっている場合について示す直交座表を用いて次のように書ける。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_{sx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + C_{sy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + C_{sz} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

ここに t は時間, C_{sx} , C_{sy} , C_{sz} は、 y , z 方向の膨張係数である。したがって膨張量～時間関係を知るには膨張係数を求めればよいが、ここに用いた試料は条件が複雑でその値を求めることができなかったが、一般に膨張係数 C_e は圧密係数 C_v より大きいことがわかっている。

次に Fig. 4, 5 より縦方向に一定圧力 p を作用させた場合の 24 時間後の膨張量と p の関係を示したのが Fig. 6, 7 である。これらの図より膨張量はある値で止めるにはどれだけの圧力が必要であるかがわかる。この圧力を高くすると膨張量は零に漸近するが、Fig. 7 より粘板岩では膨張量を零にするには相当大きな圧力

Fig. 6. Relation between vertical pressure and amount of expansion after 24 hours.

Fig. 7. Relation between vertical pressure and amount of expansion after 24 hours.

が必要であることがわかる。同様に Fig. 6 より泥岩に対しても膨張量を零にするには相当大きな圧力が必要であることがわかるが、Fig. 4からもわかるように、 p が 7 kg/cm^2 を越える (曲線10, 11) 場合は最初は圧力に抵抗して膨張するが、途中より膨張量より圧縮クリープが大きくなり、クリープ破壊が起こっている。(曲線11)。したがって、吸水初期の膨張圧は試料の上限降伏値 (クリープ破壊が起こる最も小さな応力の値) より大きいことがわかる。また最初に縦方向に 4.7 kg/cm^2 の圧力を与え吸水膨張をさせ段階的に圧力を減少させたときの縦方向および横方向の膨張量と圧力の関係を示したのが Fig. 8 である。この図の ϵ_v は Fig. 6 の ϵ_v と圧力に対し同様の傾向を示すが、

Fig. 8. Relations between vertical, pressure and vertical, lateral amount of expansion after 24 hours.

Fig. 6 の ϵ_v と比べ相対的に大きいのは最初の圧力 4.7 kg/cm^2 により圧縮量が圧力の減少とともに回復して吸水膨張量に加わったものと考えられる。一方横方向の膨張量はほとんど変化がないが、これは縦圧力の減少による横方向の圧縮と平均主応力の減少による吸水膨張量とがつりあっているものと思われる。

また、さきに述べた破碎の原因(5)を確かめるため、拡大投影機とマイクロメーターを用いて試料の各部分の膨張量を測定した。厚さ 2 cm 、長さ (岩層に直角) 8 cm 、幅 (岩層に平行) 5 cm の試料に 5 mm 間隔に岩層に直角に14行 (各行をA~Nと名づける)。岩層に平行に8列 (各列を1~8と名づける) の点をつけ吸水前後の各点間の距離を測定した。その結果を各行ごとに岩層に直角方向の膨張量が各列ごとにいかに変化するかを Fig. 9 に示した。この図からもわかるように試料の内部で部分的な膨張量は非常に異なっていて、したがってこれが原因でせん断力が発生していることがわかる。

Fig. 9. Local amount of expansion.

3・3 吸水膨張圧

吸水膨張圧の測定には Fig. 3 に示した装置 (上方のダイヤルゲージはつけない) を容量が 25 kg のロードセルが付属した圧縮試験機の載荷台の上に置き上下方向の変位を許さないで行なった。ロードセルは自記記録計に接続してある。吸水膨張圧の測定は泥岩についてのみ行なった。供試体は円筒形とし、その軸を岩層に直角および平行のものを作製して、岩層に直角および平行方向の吸水膨張圧を測定した。その結果を膨張圧と時間の関係で Fig. 10 に示すが、前に用いた試料と

Fig. 10. Amount of expansion, swelling pressure-time curves.

はやや異なるのでその試料膨張量と時間の関係を付け加えた。この図で p_v は岩層に直角方向、 p_L は岩層に平行方向の膨張圧である。この図によると p_v は p_L より大きい。その比 p_v/p_L はほぼ、岩層に直角方向および平行方向の膨張量の ϵ_v/ϵ_L に等しい。したがって、膨張圧はその試料が膨張しようとする量 (潜存膨張量) に比例していると思われる。これをさらに確認するために、膨張圧を測定する前に供試体を ϵ_0 だけ膨張させた後、上下方向を拘束して膨張圧を測定し、その残留膨張量 (全膨張量から ϵ_0 を引いたもの) と膨張圧との関係を示すと Fig. 11 のようになり両者は原点を通る直線関係を示している。したがって残留膨張量と膨張圧は比例しているといえよう。また膨張圧は試料の

Fig. 11. Relation between residual amount of expansion and swelling pressure.

初期含水比などによってもその大きさが異なると思われるので、含水比と膨張圧などの関係について今後さらに実験を進めていきたい。

4 Suction の測定

4・1 Suction の表示法

岩石や土が吸水膨張するのはそれらの材料中に Suction が存在するからである。この Suction の大きさによっては下方にある水源から水を吸い上げる場合もある。したがって材料内の Suction の大きさを測定することは吸水膨張の性状を調べるのに重要な要素となる。Suction を表示するにはいろいろの方向があるであろうが、Schofield によって提案された pF 表示法を用いると便利であるので、ここではこの表示法を用いる。 pF とは材料内の Suction につりあうに必要な水頭差を cm で表わしたものの常用対数で表わされるものである。すなわち、 $pF = \log_{10} h$ 、 h は水頭差である。したがって pF の値は h が零で $-\infty$ 、 110°C の乾燥炉内では 7 である。(110°C で材料を乾燥させた場合の含水比を零とする)。

4・2 pF の測定法

pF の測定は pF の大きさの範囲に応じて種々の方法があるが、ここで用いた二、三の方法をあげる。

4・2・1 ガラスフィルター・サクションメーターによる方法 ガラスフィルターの細かい穴のメニスカスによって、ガラスフィルターの裏面に負圧をかけても大気圧の空気が浸入してこないことを利用して、Fig. 12 に示すような装置のガラスフィルター上に試料を密着させ、試料に Suction を与える。ガラスフィルターの空げきの寸法が 29μ 以下であれば理論的に

Fig. 12.

は 1 kg/cm^2 の吸水圧を与えることができるが、実際には空げきが不均一のため、与えられる吸水圧は 0.3 kg/cm^2 ($pF=2.5$) ぐらいが限度である。ゆえにこの装置で測定できる pF の範囲は $-\infty \sim 2.5$ である。

4・2・2 遠心分離機による方法 遠心力によって試料内の吸水を平衡させるものであるが、ここではこの装置により実験を行なわなかったので、詳しい説明は省略する。なおこの装置で測定できる pF の範囲は $3 \sim 4$ である。

4・2・3 硫酸を使用する方法 濃硫酸の吸水性を利用して pF を求める方法である。実験装置は Fig. 13 に示すもので、試料の含水状態が早く平衡に達せさすためにフラスコ内に真空をかける。使用すべき硫酸は

Fig. 13.

Fig. 14. Relation between specific gravity of H_2SO_4 and value of pF .

Fig. 14 の硫酸の比重と pF の関係より知ることができる。

4・3 pF と含水比の関係

pF は試料の含水比によって値が異なるので両者の関係を求めると非常に便利ことが多い。たとえば、気象状態などから pF がわかると、現場での含水比が推定できるし、また水源の位置がわかればどれだけの含水比で平衡に達するかもわかる。また含水比がわかればどれだけの吸水能力を有しているかも pF 含水比曲線から推定される。そこで泥岩について、前述の pF 測定法 4・2・1, 3 を用いて測定を行なった結果を pF と含水比の関係で示したのが Fig. 15 である。 pF が小さい間は試料は飽和しながら含水比が変化していくであろうが、さらに pF が大きくなると間げき比はあまり変化せずに含水比のみが変化し不飽和状態となる。上述の飽和と不飽和の境となるのが Fig. 15 の含水比が 45~50% のところで含水比の減少の割には pF が増加の割合が少なくなるところであろう。さらに pF が増加すると含水比が 15% 付近で変曲点が現われているが、この点よりまた含水比の減少に対する pF

Fig. 15. Relation between water content and value of pF .

の増加は急激になっている。これは間げきにある自由水がほとんどなくなり、物理的な水よりむしろ化学的な水(たとえば Interlayer water 自由水と結晶水との間にある水)が脱出しているのではないかとと思われる。しかしこの点に関してはまだ充分なデータがないので明確なことはいえない。また粘板岩についても pF を測定したところ、 $pF=5.5$ (京都10月の気乾燥状態)で含水比0.55%, $pF=1.3$ で含水比1.17%であった。

5 あとがき

以上のように切り取りや、トンネルなどにおける泥岩や粘板岩の破壊や崩落にはその岩石の吸水膨張の及ぼす影響が少なくなかないことを示すことができた。しかし吸水作用は岩石の含む粘土鉱物などにより差異があるから鉱物的研究も必要であり、その他今後進めるべき事項も少なくない。なお室内実験に多大の協力を受けた永田審氏に対し深く感謝する次第である。

(昭和39年11月12日 岩の力学国内シンポジウムにて講演)