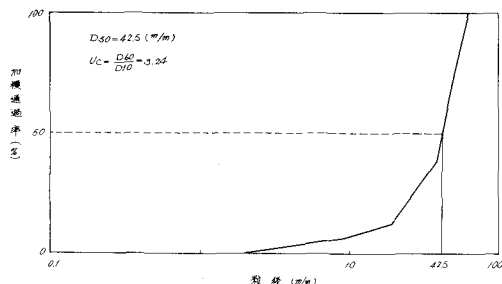


(6) 岩盤節理の摩擦強度に及ぼす水浸・油浸の影響

電力中央研究所 ○徳江 俊秀
 林 正夫
 北原 義浩

1. 本研究の目的

資源の乏しい我国では、近年、液体燃料の備蓄量を増すことが重要になってきた。従来、この種の備蓄は主として地上式タンクによってなされてきたが、災害対策、環境対策上、必ずしも望ましい方式とはいえず、地下貯蔵の技術開発が急務となった。我国のように亀裂の発達した岩盤空洞に對して、ライニングせずにそのまゝ用いる水封式地下貯油方式を採用する場合には、節理の摩擦強度に及ぼす油浸や水浸の影響について力学特性を把握しておくことが必要である。何故なら、この貯油方式では、油を封じ込めるために強制的に圧力水と空洞周辺に存在させる方法が採られるからである。



(図-1) 碎石の粒度分布曲線

(表-1) 実験状態と試験個数一覧

従来より、亀裂の多い岩盤の力学挙動に及ぼす節理の影響に注目して、岩盤を積層体として扱う研究や節理面の摩擦強度に関する研究は行われてきたが、上記のような特殊な条件下(油や水の封入)での節理摩擦強度特性に関する十分な研究結果は現在の所見当らない。以上の理由から、本研究の目的は、岩盤節理の摩擦強度に及ぼす水浸、水浸後油浸および油浸の影響を解明することである。

2. 試料、装置および実験方法

2-1 試料

本実験では、岩盤節理模擬材料として花崗岩石板、大谷石(凝灰岩)石板を用い、他に極端に亀裂の発達した材料と見なして花崗岩碎石を用いた。花崗岩石板は堅固な岩盤を、大谷石は軟質の岩盤とそれぞれ模擬するものと見なした。図-1に碎石の粒度分布曲線を示す($G_s=2.70$)。前述の目的と達成するためには、岩盤の節理面を室内で再現する必要がある。ここでは、ダイヤモンドカッターで切削し簡単に研磨した面と節理面として使用した場合(以下、切板と呼ぶ)と節理沿いに割った面と節理面として使用した場合(以下、割板と呼ぶ)の2通りで実験した。ただし、割板は花崗岩についてのみ作製した。割板の凹凸は最大で数mm程度であった。切板は主として摩擦強度に及ぼす水浸・油浸の影響を見るために、割板は実際の節理面の形状効果のある場合の摩擦強度に及ぼす水浸・油浸の影響を見るために準備した。これらの試料と所定の期間に渡って水およびA重油に浸して実験した。実験状態と試験個数の一覧を表-1に、また、A重油の主な性質を表-2にそれぞれ示す。

大谷石 切板	気 乾	8 体
	水浸 3 日間	7 体
	水浸 2 0 日間	4 体
	水浸 4 0 日間	3 体
	水浸 1 日間 油浸 2 日間	4 体
	水浸 2 0 日間 油浸 2 0 日間	3 体
	油浸 2 0 日間	4 体
計	油浸 4 0 日間	4 体
	8 種	37 体
花崗岩 切板	気 乾	7 体
	水浸 3 日間	9 体
	水浸 2 0 日間	3 体
	水浸 4 0 日間	3 体
	水浸 1 日間 油浸 2 日間	5 体
	水浸 2 0 日間 油浸 2 0 日間	4 体
	油浸 2 0 日間	4 体
計	油浸 4 0 日間	3 体
	8 種	38 体
花崗岩 割板	気 乾	9 体
	水浸 1 0 日間	6 体
	水浸 2 0 日間	4 体
	油浸 1 0 日間	3 体
	水浸 1 0 日間 油浸 1 0 日間	6 体
計	5 種	28 体
砕 石	気 乾	5 体
	水浸 3 日間	8 体
	水浸 2 日間 油浸 2 日間	8 体
計	3 種	21 体
合 計		124 体

2-2 実験装置

用いたせん断装置の概要図を図-2に、供試体のセット状況を図-3にそれぞれ示す。本装置は変位制御方式の上部可動型大型一面せん断装置である。水浸・油浸状態の試料をせん断する際に、せん断中もこれらの状態が確保されるようにするため、せん断箱の周囲を囲い、水(油)位がせん断面以上(石板)または供試体上端(碎石)までくるようにした(図-3)。図-3に示すように上載圧は球座を用いて供試体に加えられるので、石板が仮に若干傾いてセットされるような場合でも、上下板の密着性は常時確保されることになる。石板の寸法は、 $20 \times 20 \times 3^{\text{cm}}$ (切板)、 $20 \times 20 \times 5^{\text{cm}}$ (割板)であり、碎石の供試体寸法は、直径 45^{cm} ×高さ 30^{cm} である。

2-3 実験方法

a) 石板を用いた実験

石板は、図-3に示すように予の鉄製の内箱にセットし、周囲に硬質焼石膏(圧縮強度 600kg/cm^2 以上)を $5 \sim 6^{\text{mm}}$ の厚さに流し込んで固定させる。次にこの内箱ごとせん断装置にセットしてせん断を実施する。せん断変位と上下変位(上下板間変位)は、差動変位計を用いて測定した。せん断変位速度は、 $4^{\text{mm/min}}$ 以下で $2^{\text{mm/min}}$ 前後のものが多い。

b) 碎石を用いた実験

碎石は、計量後、3層に分けてせん断箱に詰められ、1層ごとに振動締固めの装置で十分に締固められた。上下箱間を予め約 1cm 空けて供試体を作製しており、かつ、タイラタンシーはほとんど正であるので上下箱の接触は生じない。この隙間の部分には、内側より厚紙を当てているので、試料が嚙むことはない。せん断変位速度は $6^{\text{mm/min}}$ 以下で $2^{\text{mm/min}}$ 前後のものが多い。

3. 実験結果と考察

3-1 石板の応力-変位-時間関係

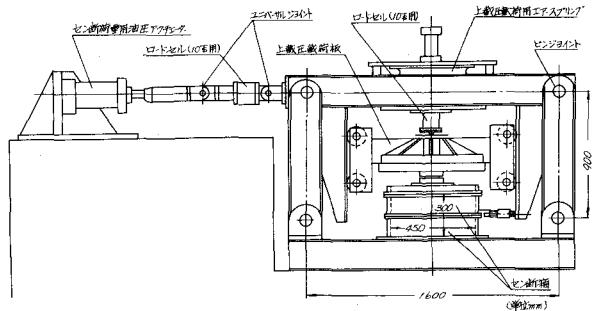
図-4に、切、割板の応力-変位-時間関係の代表例を示す。なお、切板のせん断中の上下変位はほぼ0であった。

これより、せん断変位の増加に伴ってせん断応力も増し、最終的にはせん断応力が一定になるか減少するようになる。この様な現象が生じた理由として、切板

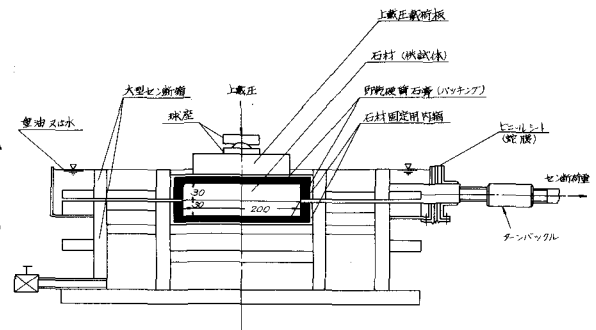
といえども表面の微小な凹凸が存在し、この凹凸での噛み合いがせん断変位の増加に伴って増加し、最終的には切断されてせん断応力の低下が生じたものと考えられる。実際、切板でも上下板は決して面接触でなく凹凸部でのみ点接触していることは、せん断後のせん断面上に数本の条痕が観察されたことから理解される。

(表-2) A重油の主な性質

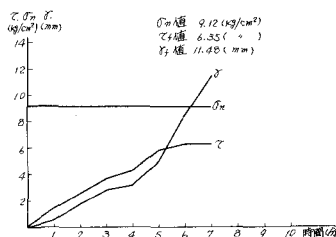
引火点	60℃以上
粘 度	20 cST以下
流動点	5℃以下
残留炭素分	4% (重量比率) 以下
水 分	0.3% (体積比率) 以下
灰 分	0.05% (重量比率) 以下
硫 黄 分	2.0% () 以下



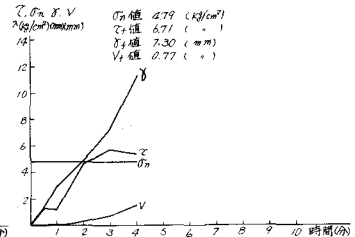
(図-2) 大型一面せん断装置概要図



(図-3) 石板のセット状況



(図-4a) 応力-変位-時間関係
(大谷石切板, 気乾)



(図-4b) 応力-変位-時間関係
(花崗岩割板, 気乾)

以上の考察から、摩擦強度としてせん断応力の最大値を採用した。

3-2 気乾状態の摩擦強度

a) 切板

図-5, 6に、大谷石切板と花崗岩切板の気乾状態での摩擦強度を示す。各図中の直線は、最小自乗法によって求めた。これより、両石板の上載圧 σ_n とピークせん断強度 τ_f の関係は、ほぼ直線となり、クーロン則に従っているのが分る。

b) 割板

図-7に、花崗岩割板の気乾状態での摩擦強度を示す。これより、凹凸の小さい切板の摩擦強度 τ_f と比較すると、割板のそれは約3倍近くも大きくなること、切板では粘着力 c は0であったのが割板では3 kg/cm²にもなり、摩擦角も切板(29.5°)の倍近くの57.9°になることが認められる。この様に、割板の摩擦強度 τ_f は、節理面形状効果によって飛躍的に増大するのが分った。この形状効果をより詳しく調べるために、次の検討を行った。

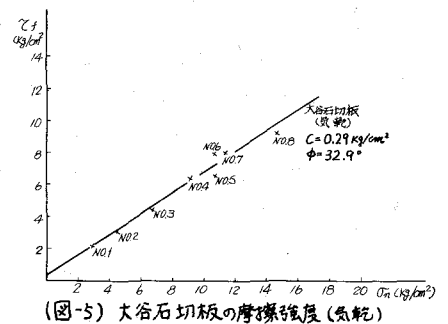
一つは、上下変位の増加開始付近のせん断応力と切板の強度と比較したものである(図-8)。これより、上下変位が0から増加し始める付近のせん断応力は、切板の摩擦強度とほぼ対応しているのが分る。これは割板といえども、上下変位開始までは切板と同様に上下変位は0の状態になっているので、この時点の応力が切板の摩擦強度にほぼ対応したものと考えられる。これより、割板の強度増加に寄与する形状効果は、当然のことながら、上下変位が生じてくる範囲で主として発揮されることが分る。

そこで、加えた二つ目の検討は、土のせん断強度を求める際に用いられるBishopの体積補正⁷⁾を今回の割板に適用したものである。この補正の基本的考え方は、せん断強度 τ_f を摩擦抵抗および粘着抵抗成分 τ_0 と体積増加に要する成分 τ_d とに分け、純粋に摩擦および粘着抵抗のみを取り出して比較しようとするものである。 τ_d は次式から求まる。 $\tau_d = \sigma_n \cdot (dv/d\epsilon)_s$ 、ここに、 $(dv/d\epsilon)_s$ ：破壊時近傍の上下変位増分 $d\epsilon$ とせん断変位増分 dv との比

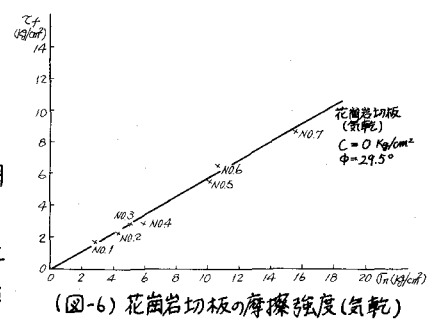
$$\tau_d = \tau_f - \tau_0 = \tau_f - \sigma_n \cdot (dv/d\epsilon)_s$$

このように体積補正を加えた結果と未補正の結果の比較を図-9に示す。これより、体積補正を行うと、未補正の値より若干下がるが、平坦な切板の摩擦強度よりははるかに大きいことが分る。このことは、

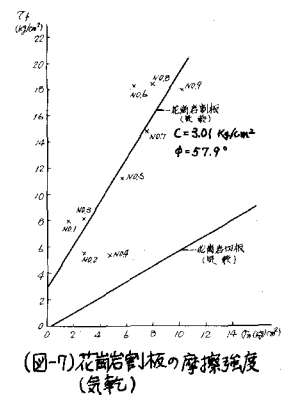
強度増加に寄与する形状効果が、単に節理面上の比較的大きい凹凸を乗り越えるために必要とされた成分のみで帰せられないことを示唆している。換言すれば、割板の摩擦強度には、土質材料とは異って、単に摩擦抵抗成分と比較的大きい凹凸を乗り越えるための成分だけでなく、節理面上の小さい凹凸の切断に要する成



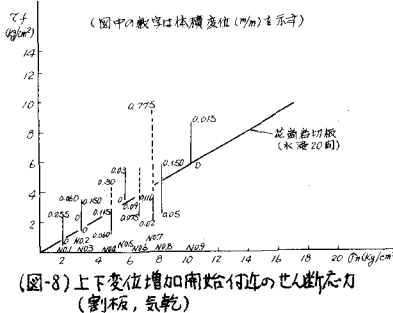
(図-5) 大谷石切板の摩擦強度(気乾)



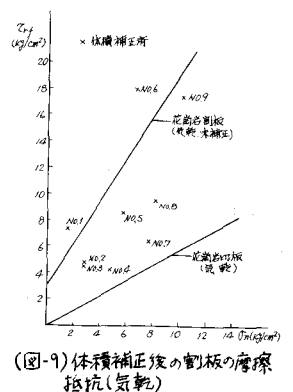
(図-6) 花崗岩切板の摩擦強度(気乾)



(図-7) 花崗岩割板の摩擦強度(気乾)



(図-8) 上下変位増加開始付近のせん断応力(割板、気乾)



(図-9) 体積補正後の割板の摩擦抵抗(気乾)

分も加わっていることを示唆しているものと思われる。

c) 砕石

図-10に、砕石の気乾状態のせん断強度を示す。これより、 τ_f と σ_n はほぼ直線関係を示しているのが分る。

3-3 水浸状態の摩擦強度

図-11に、各試料の水浸状態の強度を示す。これより次の諸氏が認められる。

- ① 大谷石、花崗岩石板および花崗岩割板の水浸強度は、少くとも水浸期間が40日程度では、気乾強度と余り変わらない。
- ② 砕石の水浸強度は、気乾強度より15~20%程度小さい。

3-4 水浸後油浸状態および油浸状態の摩擦強度

図-12に、各試料の水浸後油浸および油浸状態の強度を示す。これより、次の諸氏が認められる。

- ① 大谷石切板では、水浸後油浸させた場合、水浸油浸期間が長くなるにつれてその強度は若干下る(水浸1日油浸2日で5%減、水浸20日油浸20日で12~3%減)。しかし、気乾から直接油浸させた場合の強度は、気乾強度よりむしろ若干上り気味である。
- ② 花崗岩切板では、水浸後油浸および油浸状態の強度では気乾強度より10~20%下る。
- ③ 花崗岩割板では、水浸後油浸および油浸状態の摩擦強度は、気乾強度より下る(水浸10日油浸10日および油浸10日で約5%減)。
- ④ 砕石では、水浸後油浸および油浸の各状態のせん断強度は、相互に似たような値を示し、気乾状態の強度より15~20%下る。

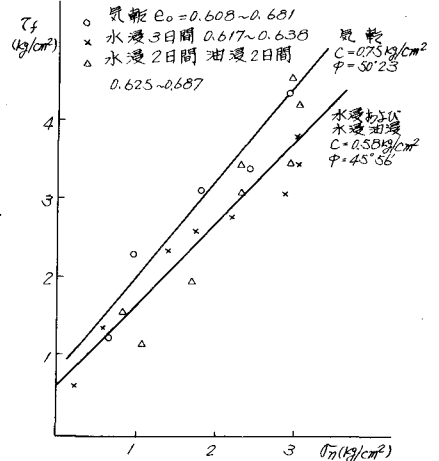
以上から、水浸油浸期間が40日程度の場合、水浸、水浸後油浸および油浸による節理面の摩擦強度の低下の目安として、上載圧が15kg/cm²以下の範囲では、一応、20~25%程度考慮すれば良いと考えられる。

4. 終りに

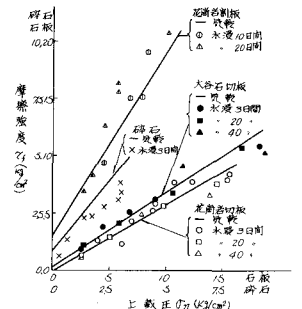
今回の実験では、水浸油浸期間が40日以下であったが、更に9ヶ月に期間を延長し、その影響について検討し、次回に報告したい。

本実験の実施に当り、(株)中興電力の関係者各位に多大

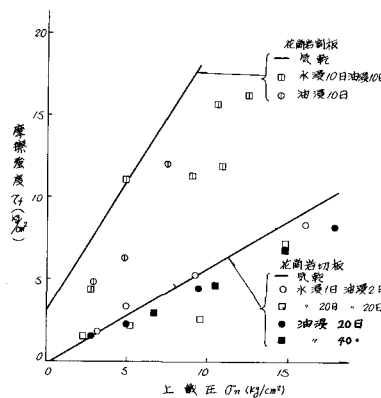
の御援助を賜わり、ここに深謝の意を表します。5. 参考文献 1) 林正夫:「燃料地下貯蔵……」第20回電力土木研究会。昭和53年10月。2) 林正夫:「不連続節理面の……」第2回岩カシンボ、1963。3) Bray, J. W.:「Limiting Equilibrium……」Proc. 1st Cong. ISRM, 1966。4) 林正夫:「積層体の……」第3回岩カシンボ、1965。5) Barton et al.「The shear……」Rock Mech., 10, 1977。6) Jaeger, J. C.:「Friction……」Geotech., 21, 10, 2, 1971。7) 土質工学会:「土質工学ハンドブック-土のせん断-」aB和40年11月。



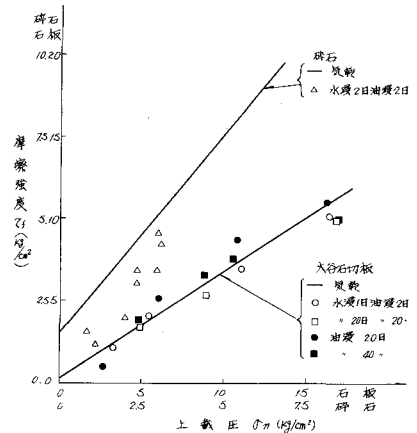
(図-10) 砕石のせん断強度



(図-11) 摩擦強度に及ぼす水浸の影響 (花崗岩切板と割板、大谷石切板および砕石)



(図-12-a) 摩擦強度に及ぼす水浸後油浸、油浸の影響 (花崗岩割板と割板)



(図-12-b) 摩擦強度に及ぼす水浸後油浸、油浸の影響 (大谷石切板と砕石)

Effects of Ground Water and Heavy Oil on Frictional Strength
of Rock Joints

Toshihide TOKUE
Masao HAYASHI
Yoshihiro KITAHARA

CIVIL ENGINEERING LABORATORY
CENTRAL RESEARCH INSTITUTE OF
ELECTRIC POWER INDUSTRY

Synopsis

It is important to increase an amount of liquid fuel in stock for constant and sufficient supply of electric power. Countermeasure against calamities demands an rapid development in technique for underground storage of liquid fuel instead of a tank on the ground. For this purpose, shearing tests are conducted with rock plates of granite and tuff and crushed stone in oil and in water by using a large-scaled box shear machine.

Rock plates which are cutted by a diamond cutter and are cracked along inherent joints by force are used as joint planes. These plates are soaked in water or in heavy oil for 3 to 40 days.

As a result, it is clarified that the frictional strength of rock plates is smaller by 20 to 25 percent in the state soaked in water or heavy oil than in the dry state.