

(104)クラックテンソル理論による地下空洞掘削時の原位置岩盤の透水性評価に関する一考察

大成建設（株）土木設計部 ○ 羽出山吉裕
大成建設（株）土木設計部 大津 宏康
大成建設（株）土木設計部 大矢 敏雄
日本地下石油備蓄（株）菊間事業所 岡本 淳

A Study on Estimation of Permeability of in-situ Rock Masses by Crack Tensor Theory

YOSHIHIRO HATSUYAMA ,TAISEI CORP
HIROYASU OTSU ,TAISEI CORP
TOSHIO OYA ,TAISEI CORP
JUN OKAMOTO ,Japan Underground Oil Storage Co.,Ltd

Abstract

It is well-known that discontinuities play an important role in the groundwater flow through discontinuous rock masses. For evaluating geometry of discontinuities like faults and joints(called cracks), M.Oda⁽¹⁾(1982) proposed "Crack Tensor Theory". Crack Tensor is formulated by geometrical character of cracks (density,orientation,size,etc). M.Oda⁽²⁾ applied this theory to evaluating groundwater behavior of discontinuous rock masses.

This study was performed to see whether "Crack Tensor Theory" can evaluate groundwater flow through discontinuous rock masses. For this study, the data required for the "Crack Tensor Theory" was taken from Kikuma Under Ground Oil Storage Tank. We compared actual groundwater behavior and first invariant of Crack Tensor (F_0). From this study, we conclude that there is good agreement between groundwater behavior and first invariant of Crack Tensor (F_0).

1.はじめに

岩盤の透水性は、岩盤内に存在する不連続面（断層、層理、節理）の影響によって、岩石コアのそれとは異なることが指摘されている。特に花崗岩のような、結晶質の岩盤では、その基質部分の透水性が非常に小さいため、岩盤の透水性は不連続面に支配される。したがって、岩盤中の地下水挙動を評価するためには、岩盤内の不連続面の分布状況を的確に評価することが必要である。

小田¹⁾は、岩盤内の不連続面の幾何学的性質を定量的に評価する手法として、クラックテンソルを提唱している。そして、不連続面の幾何学情報から算定されるテンソル量と岩盤内の地下水挙動との相関性²⁾について検討を行っている。

本研究では、菊間地下備蓄基地の岩盤タンク工事を対象とし、最初に、岩盤タンク掘削時に観察された湧水状況について整理する。次に、岩盤タンク側壁で観察された不連続面の幾何学情報からクラックテンソルを算定する。最後に岩盤タンク掘削時の湧水箇所と算定したクラックテンソル量の分布状況を比較し、原位置岩盤の透水性評価へのクラックテンソル理論の適用性について明らかにする。

2. 菊間地下備蓄基地の概要

菊間地下備蓄基地（愛媛県越智郡菊間町）の地形は、瀬戸内海に面した標高10～70mの丘陵地である。岩盤タンク本体は、地下EL.-65～EL.-35mに位置し、地表面からの土被りは80～100m程度である。岩盤タンクの断面形状は、幅20.5m、高さ30mの砲弾型断面で、長さが230～448mの7本の燃料貯蔵用空洞と、水封トンネル及び作業トンネル等の周辺の各トンネルからなっている。

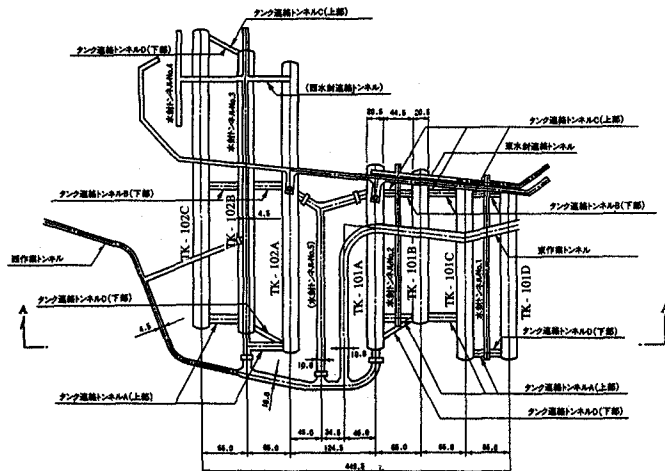


図-1 菊間地下備蓄基地岩盤タンク配置図 (平面図)

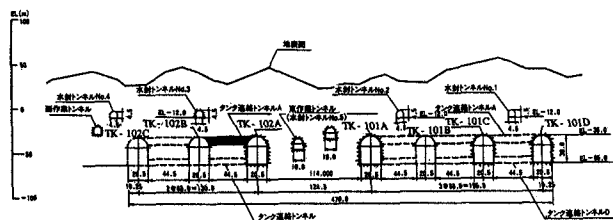


図-2 菊間地下備蓄基地岩盤タンク配置図 (断面図)

菊間備蓄基地の基盤は、花崗岩ないし花崗閃緑岩で、その岩盤等級は、日本地下石油備蓄（株）の岩盤総合評価基準³⁾によればH₁～H（電中研式の岩盤分類でB～C₁級）である。ボーリングコアによる調査／試験から一軸圧縮強度が800～1000kgf/cm²、R.Q.D.は80～85%である。岩盤の水理特性については、ボーリング孔を用いた透水試験結果から、破碎部を含めて岩盤の透水係数は、10⁻⁶～10⁻⁸cm/sの範囲であった。

3. 岩盤タンク掘削時の地下水挙動⁴⁾

岩盤タンク掘削時に発生した湧水は、そのほとんどが空洞上部からのものであり、その発生箇所はアーチ部の湧水マップ（図-3）に示すように特定の領域に集中する傾向が確認された。すなわち、TK-101A～TK-101Dでは、以下の各ゾーンで湧水が認められた。

- ゾーン1：TK-101Bの南東側の端部付近
- ゾーン2：TK-101Cの中央部付近
- ゾーン3：TK-101Dの南東側の端部付近
- ゾーン4：TK-101Dの北西側の端部付近

これらの湧水箇所は、空洞内で観察された亀裂の内、図に示す①および②の亀裂帯のように空洞軸に約60度で交差するものと明確な関係にある。また、TK-101Cの中央部のように③および④といった全空洞を横切る亀裂帯が①および②の亀裂帯と交差する箇所での湧水が特に顕著であった。これに対して、TK-102A～TK-102Cのグループでは、以下のゾーンで湧水が認められた。

- ゾーン5：TK-102Bの北西側の端部付近
- ゾーン6：TK-102Cの中央部から北西側付近

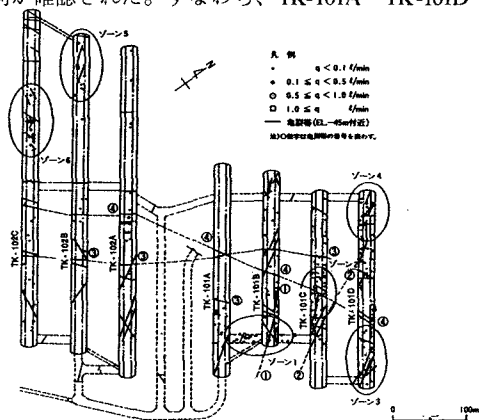


図-3 アーチ部湧水マップ

これらのゾーンでの湧水も亀裂帯に沿って発生しておりゾーン5の湧水箇所は、①および②の亀裂帯のように空洞軸に約60度で交差する亀裂帯と明確な関係がある。しかしながら、ゾーン6では、亀裂帯の方向と湧水箇所との関係を見出すことができなかった。

以上の結果より、空洞掘削によって湧水が発生した領域は、その殆どが空洞内の不連続面（亀裂帯）と密接な関係にあることが判る。

4. 岩盤タンクの不連続面情報

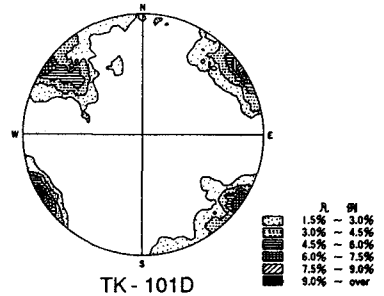
岩盤タンクの不連続面調査では、4.5mのベンチ毎に詳細なスケッチと走向／傾斜の計測が行われた。今回の研究では、各ベンチで得られたデータを整理して、岩盤タンク全体の不連続面情報とした。ここでは、その一例として岩盤タンクTK-101Dの不連続面情報について示す。

(1) 方向

図一4に、不連続面のシュミットネット投影図を示す。
これより、不連続面は、N30～50Wの走向を持つものとN40～50Eの走向を持つものの2つに分類でき、その傾斜は60～80度である。

(2) 不連続面のトレース長さ

図一5にTK-101Dタンク側壁の不連続面トレース図を示す。
なお、図中ではそれぞれの不連続面を直線で近似している。

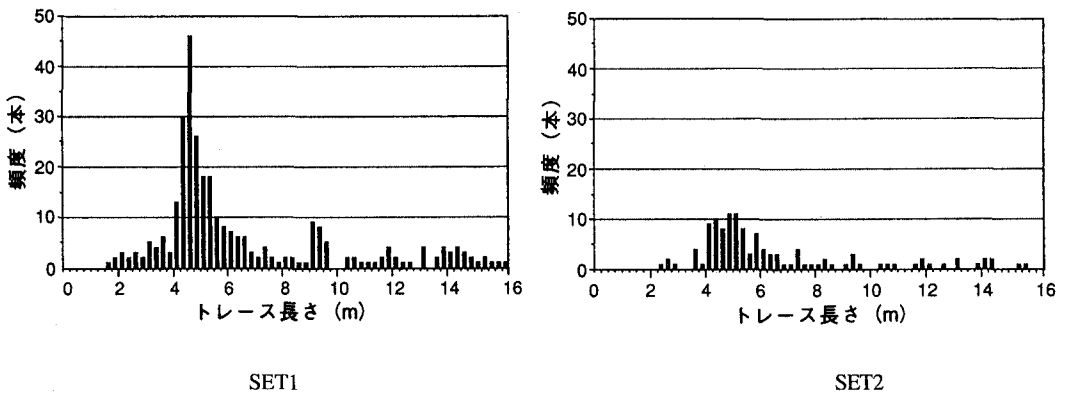


図一4 シュミットネット投影図



図一5 岩盤タンク不連続面トレース図 (TK-101D)

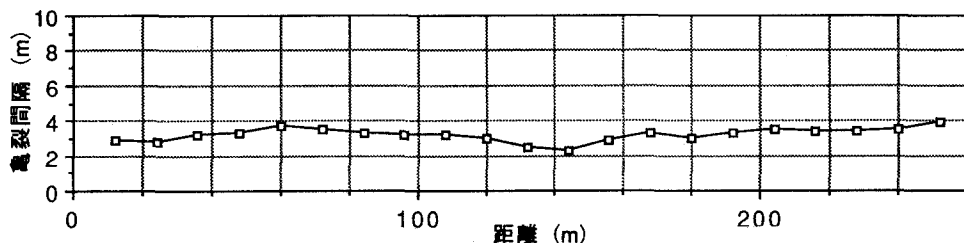
図一6に、不連続面のトレース長さの頻度分布図を示す。ここで、不連続面はN30～50Wの走向を持つものをSET1, N40～50Eの走向を持つものをSET2として分類した。



図一6 不連続面トレース長さ頻度分布図

(3) 不連続面間隔

不連続面トレース図上に、様々な方向と長さを持つ測線を設定し、不連続面間隔を算定した。これより、TK-101Dタンク側壁の不連続面間隔は、2.0~4.0mの範囲にある。



図—7 亀裂間隔 (TK-101D)

5. 菊間地下備蓄基地でのクラックテンソル

前章に示した、菊間地下備蓄基地の不連続面の幾何学的諸量からクラックテンソルを算定する。

(1) クラックテンソルの算定法

クラックテンソルは、岩盤中に存在している不連続面の幾何学的性質（体積密度、大きさ、方向）を統計的かつ一般的に表現したものである。ここでは、次式に示すように、野外観察により露頭で得られた不連続面の幾何学的な諸量からクラックテンソルを算定する方法⁵⁾を用いた。

$$F_{ij} = \frac{3\pi}{8} \frac{\langle t^2 \rangle}{\langle t \rangle} \frac{N(q)}{\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle} N_{ij} \quad N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega$$

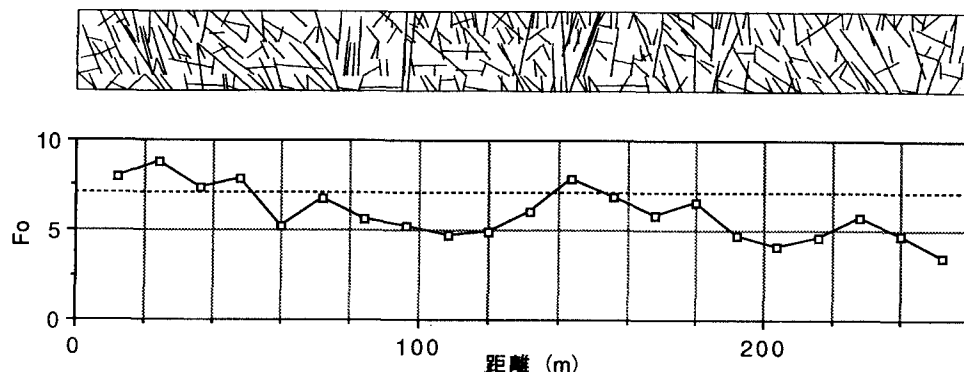
ここで、 $\langle t^2 \rangle$ ：クラックのトレース長さの2乗平均、 $\langle t \rangle$ ：クラックのトレース長さの平均

$N(q)/h$ ： q の方向に長さ h (m) の測線を設定した時にこれと交わる単位長さ当たりのクラック数

$\langle |\mathbf{n} \cdot \mathbf{q}| \rangle$ ：クラックの方向 $\mathbf{n}$ と測線の方向 $\mathbf{q}$ の内積の絶対値の平均、

$E(n)$ ：不連続面の方向の確率密度関数

図-8にTK-101Dタンク側壁のトレースマップとタンク軸方向に24m毎の領域で算定したクラックテンソルの第1不変量 F 値（不連続面の体積密度に相当する量）の分布を示す。



図—8 クラックテンソルの算定結果 (TK-101D)

6. クラックテンソルと岩盤空洞掘削時の湧水量の関係

5.に示した手順で全ての岩盤タンクのクラックテンソル (F_0) 値を算定した。図-9にクラックテンソルの第1不変量 F_0 が7以上の領域をアーチ部の湧水マップと併せてを示す。

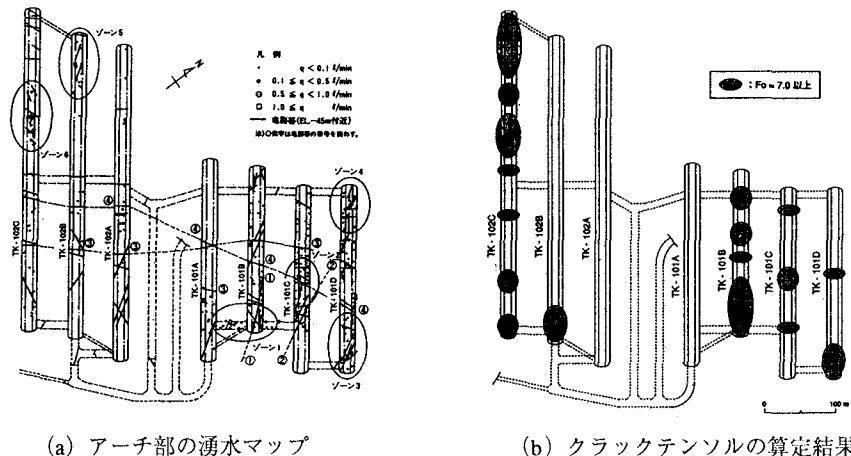


図-9 クラックテンソルの算定結果と湧水箇所の相関

同図に示すように、湧水が顕著であった箇所と F_0 が7以上の領域が概ね一致している。特に、湧水ゾーン1から3およびTK-102Cのゾーン6はいずれも F_0 が7以上の領域に相当している。

しかし、TK-101Dの北西端部のゾーン4およびTK-102Bのゾーン5では顕著な湧水が生じたにも関わらず F_0 は7以下となっている。このように湧水ゾーンと F_0 との関係に相違が生じる原因としては、クラックテンソルの理論が、不連続面の幾何学的性質のみを評価するものであり、亀裂内の介在物の種類・有無と言ったパラメータを考慮できないことが挙げられる。このため、クラックテンソル理論では、亀裂数自体は少ないが開口性のために透水性が高い領域、あるいは亀裂が数多く存在するが、充填物が含まれているために透水性が低い領域を判別できないことが課題となる。

7. おわりに

本研究では、岩盤内の湧水状況と不連続面の幾何学特性を定量的に評価するクラックテンソル量の比較を行った。その結果、菊間地下石油備蓄基地の岩盤タンクでは、顕著な湧水箇所とクラックテンソル F_0 が7以上の領域が概ね良い一致を見た。また、今後の研究として、クラックテンソルによる岩盤透水性評価システムの構築を考えた場合、事前調査段階において岩盤内の不連続面の幾何学的諸量を得るための調査/探査技術の開発が課題として挙げられる。

参考文献

- (1) Oda, M. : Fabric tensor for Discontinuous Geological Materials, Soils & Foundations, Vol.22, No.4, pp.96~108, 1982
- (2) Oda, M., Hatsuyama, Y., and Ohnishi, Y. : Numerical Experiments on Permeability Tensor and Its Application to jointed Granite at Stripa Mine, Sweden, J. Geoph. Res., 92(8), 8037-8048, 1987
- (3) 宮永佳晴・福原明: 地下石油備蓄基地の設計について, 電力土木, No.219, pp.63-74, 1989年3月
- (4) 山本和彦・大津宏康: 菊間地下石油備蓄基地の建設工事概要, 地下水技術, Vol.33, No.6, pp.16-35, 1991
- (5) Oda, M. : A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on The Mechanical Behavior of Cracked Rock Masses, Mechanics of Materials 2, pp.163-171, 1983