



Title	き裂性岩盤モデルの比抵抗特性を用いた原位置岩盤の評価法
Author(s)	中村, 真, 楠見, 晴重
Citation	材料, 55(5): 458-463
Issue Date	2006-05
URL	http://hdl.handle.net/10112/2141
Rights	
Type	Journal Article
Textversion	publisher

き裂性岩盤モデルの比抵抗特性を用いた原位置岩盤の評価法[†]

中 村 真* 楠 見 晴 重**

An Estimation Method of In-situ Rock Masses by Characteristic of Electric Resistivity for Jointed Rock Mass Model

by

Makoto NAKAMURA* and Harushige KUSUMI**

Before the underground structures such as tunnels are constructed, electrical prospecting is often applied, because of its sensitivity for the water included in the rock mass. However, the relationship between resistivity and the physical property of the rock mass has not quantitatively been clarified. Especially, in the jointed rock mass, it is important to grasp the influence of the joint on the resistivity.

In this paper, two kinds of jointed rock mass model are used. One is the discontinuity model, which is made to change the open width of discontinuity by inserting various number of filter papers. The other is the porous model, in which micro opening cracks are generated inside the rock by heating with the electricity muffle furnace. Using these models, the characteristics of resistivity for the jointed rock mass are examined by comparing with the field data obtained by electrical prospecting. As the result, it is shown the possibility to evaluate the porosity of in-situ rock mass from the relationship between porosity and resistivity of the porous model.

Key words : Jointed rock mass, Intact rock specimen, Heating, Discontinuity, Characteristics of resistivity

1 緒 言

近年、トンネル等の地下構造物建設における地質調査で、電気探査が実施される例が増えてきたが、比抵抗と岩盤物性値との関係については定量的に解明されていないのが現状である。そこで著者らは、室内試験において種々の岩種の岩石供試体を用いて、含水状態を変化させながら比抵抗を測定し、比抵抗と飽和度、間隙率の関係について検討してきた¹⁾ところが、数%程度の間隙率の岩石供試体による室内試験で得られた比抵抗と飽和度、間隙率の関係を岩盤評価に適用するためには、十分な精度を有しているとはいえず、極力幅広い間隙率で評価することが望ましい。

本論文では、間隙率の大きい供試体で室内実験を実施するに際し、2種類のき裂性岩盤モデルを作成した。一つは、不連続面に種々の枚数の濾紙を介在させて、不連続面の開口幅を変化させた人工不連続面モデル、もう一つは、電気マッフル炉で加熱処理を施す事により、岩石内部に微細な開口き裂を発生させ、岩石供試体の有効間隙率を増加させて作成したポーラスモデルである。これらのき裂性岩盤モデルを用いた室内実験によって得られた比抵抗特性²⁾と、既往のトンネル切羽で実施した簡易比抵抗測定結果と比較し、き裂性岩盤モデルの比抵抗特性による原位置岩盤評価の間隙率の推定の可能性を検討した。

2 研究対象サイトの概要

研究対象としたのは、岐阜県西北端に位置する水力発電所導水路トンネル¹⁾である。導水路トンネル周辺の地質は、中生代白亜紀に生成された濃飛流紋岩類および白川花崗岩が主体となり、これを貫く厚さ10cmから3mの貫入岩(主としてひん岩)、そしてこれら基盤岩を覆う未固結の段丘堆積物および崖錐堆積物から構成される。濃飛流紋岩は流紋岩および流紋岩質熔結凝灰岩から構成され、白川花崗岩は中粒および細粒花崗岩から構成されている。地質上重要な構造線としては、付近に御母衣断層のほか跡津川断層、牛首断層といった活断層が存在し、広い範囲に広域破碎作用を与えている。

トンネルの地質分布をFig. 1に示す。図に示すように、トンネル中央部よりやや上流側に位置するナラ谷をほぼ境にして上口側は流紋岩が主体で、一部中粒花崗岩からなっており、下口側は花崗岩が主体となっている。

地質状況は、破碎作用の影響によってき裂が発展し、風化も進行しており、トンネルの地質として非常に悪い状況である。トンネル掘削開始直後から、両坑口ともに地質不良が続き、上口側では掘削を開始してしばらくした後に、切羽に河床砂礫が出現しルート変更を余儀なくされた。また、地質不良に加えて度重なる出水と断層破碎帯に起因するトラブルによりトンネルの施工は困難を極めた。

[†] 原稿受理 平成17年8月2日 Received Aug. 2, 2005

* (株)ニュージェック 〒531-0074 大阪市北区本庄東, NEWJEC Inc., Kita-ku, Osaka, 531-0074

** 正会員 関西大学工学部都市環境工学科 〒564-8680 吹田市山手町, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kansai Univ., Yamate-cho, Suita, 564-8680

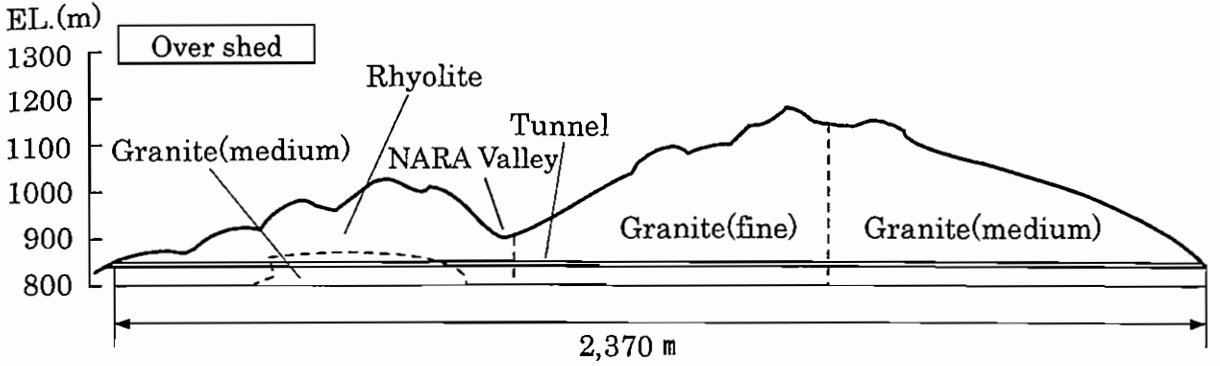


Fig. 1 Established tunnel geology longitudinal section.

3 原位置岩盤の比抵抗特性

本検討では最初に、岩盤の良し悪しと比抵抗の関係を調べるために、既設の導水路トンネルにおいて、Table 1 に示す切羽から湧水が認められ飽和状態に近いと思われる測点での、簡易比抵抗測定結果と岩盤良好度の関係を調べた。

トンネル掘削現場の比抵抗は、掘削直後の切羽で適宜簡易比抵抗測定器を用いて各切羽7点ずつ測定した。同時に、従来から多用されている電中研式岩級分類に加えて、Q値による評価法を改良した地山評価手法³⁾を用いて「岩盤良好度」を判定した。この中で湧水の評価点は、「滴水・にじみ出る程度；2」、「湧水程度；3」、「少量連

続して流れ落ちる状態；4」、「特定の割れ目から集中的に湧水がある状態；5」と評価している。

Table 2は、各評価手法による地山区分を対比した花崗岩の例である。³⁾これらの関係から、Fig. 2に示す相関関係を仮定し、現場で判定した岩盤の良好度から間隙率を推定して、第5章および第7章での検討に用いる。

Fig. 3は、湧水を確認した切羽における比抵抗の最大・最小値を岩盤の良好度に対して示したものである。

評価対象とした流紋岩 Rh、中粒花崗岩 mGr、細粒花崗岩 fGr とともに、比抵抗値はかなりばらついている。これは切羽全面にわたって均等に湧水が生じていないため、不飽和状態の位置も計測していることが原因と考えられる。

そこで、各切羽の簡易比抵抗測定結果では、比抵抗の最低値を示す測点が湧水の影響を一番大きく受けて飽和に近い状態にあると仮定し、第6章においてFig. 2の岩盤の良好度から推定した間隙率に対して室内試験で求めた近似曲線（飽和状態）との整合性を調べた。

Table 1 Assessment of the rock mass, water inflow and resistivity.

Rock Type	TD (m)	Assessment of the Rock Mass	Water Inflow	P_{min} ($\Omega \cdot m$)
Rhyolite	44.4	35	2	288
	46.2	43	2	731
	48.9	37	2	748
	232.4	58	4	429
	253.5	60	4	356
	325.0	25	3	225
	347.0	18	2	58
Granite (medium)	372.5	20	2	20
	424.4	18	2	94
	452.0	27	2	194
	546.0	52	3	179
	569.9	36	3	67
	596.8	76	2	756
Granite (fine)	624.0	67	3	720
	653.0	57	2	217
	966.2	46	2	334
	987.8	49	2	96
	1030.0	67	5	1642
	1186.6	55	3	985
	1265.8	73	2	708
	1295.8	45	2	436
	1392.6	71	3	804
	1445.6	41	2	307
Granite (medium)	1498.6	72	3	700
	1581.6	49	5	71
	1710.5	61	2	53
Granite (medium)	1814.6	63	2	392
	1854.9	64	5	56

Table 2 Assessment of the rock mass and porosity.

Assessment of the Rock Mass	Porosity
0~20	0.14~
20~40	0.07~0.14
40~60	0.035~0.07
60~80	~0.035
80~100	

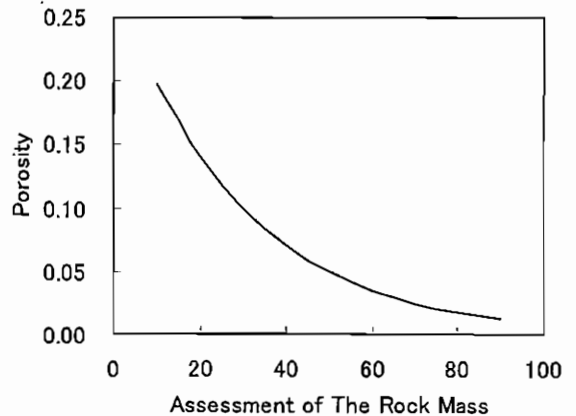


Fig. 2 Assumed correlation between porosity and assessment of the rock mass.

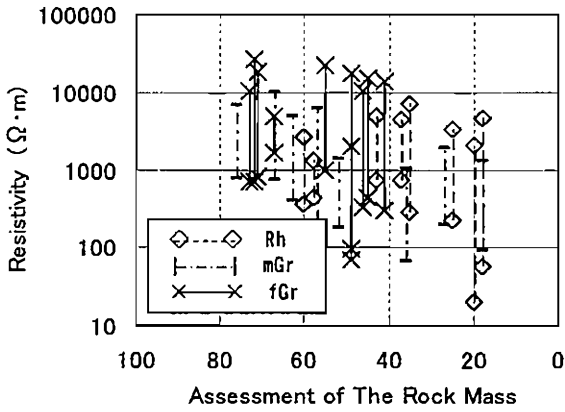


Fig. 3 The results of In-situ measuring.

4 インタクトコアの比抵抗特性

比抵抗の測定手法は、Fig. 4 に示すような GS 式比抵抗測定装置を用いた。電極装置は C₁, C₂ を電流電極、P₁, P₂ を電位電極として、岩石供試体の左右に銅メッシュシートと 0.1N の硫酸銅溶液を含んだ濾紙を挟んで比抵抗の測定を行った。岩石供試体は、ボーリングカッターおよびダイヤモンドカッターで、直径 50mm、高さ 100mm の円柱に整形した。なお、比抵抗値は、測定した電位差と電流値に断面積と電位電極間の長さを用いて式 (1) によって求めた。

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (1)$$

- ただし、 ρ : 比抵抗 [Ω·m]
- I : 電流値 [A]
- V : 電圧値 [V]
- L : 電位電極間の長さ [m]
- A : 供試体の断面積 [m²]

比抵抗の測定は、インタクトコア (岩盤基質部) を 96 時間以上真空脱泡し、完全飽和の状態にしてから測定を行った。なお、間隙水の比抵抗は、80Ω·m である。

Fig. 5 は飽和状態にある流紋岩 Rh, 中粒花崗岩 mGr, 細粒花崗岩 fGr の有効間隙率 ϕ と、比抵抗値との関係について示したものである。著者らが行ってきた室内試験

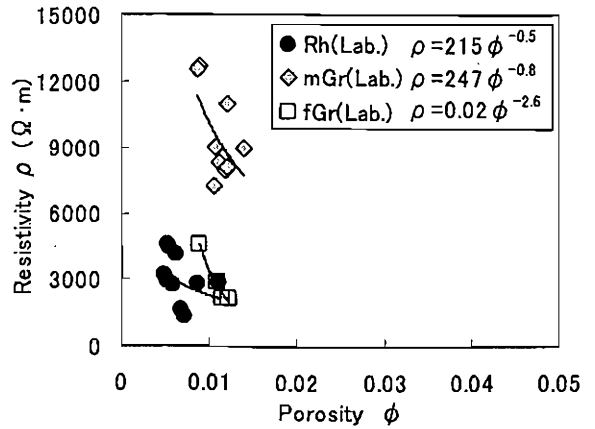


Fig. 5 The measuring result of intact rocks.

結果の評価では、有効間隙率が小さくなるほど比抵抗は大きくなり、特に有効間隙率が小さいところでは、比抵抗の増加が著しいことから、指数関数によって近似することを試みてきた。今回も同様に指数関数で近似してみたが、3 岩種ともに、各岩石供試体間の有効間隙率の差が小さいため、あまり顕著な相関性が見られず、近似した指数関数の係数の差異についてまで言及できないが、右下がりの傾向は確認できる。

5 インタクトコアと原位置岩盤の比較

Fig. 6 は、流紋岩におけるインタクトコアによる室内試験結果 Rh (Lab.) と、簡易比抵抗測定結果 Rh (In-situ) を併記したものである。図から、室内試験結果に多少のばらつきはあるものの、簡易比抵抗測定結果とも同じ指数関数で近似できることがわかる。なお、簡易比抵抗測定結果の比抵抗が若干大きめの測点は、湧水評価においては「2」と判定されているものの、切羽での湧水量がほぼ 0 であることから、飽和状態にまで至っていないものと考えられる。

また、Fig. 7 は、中粒花崗岩 mGr での測定結果である。図から室内試験結果と簡易比抵抗測定結果は、かなり相関性の高い指数関数で近似できることがわかる。

さらに、Fig. 8 に示す細粒花崗岩 fGr においても、簡易比抵抗測定結果には、岩盤が飽和に至っていないと思

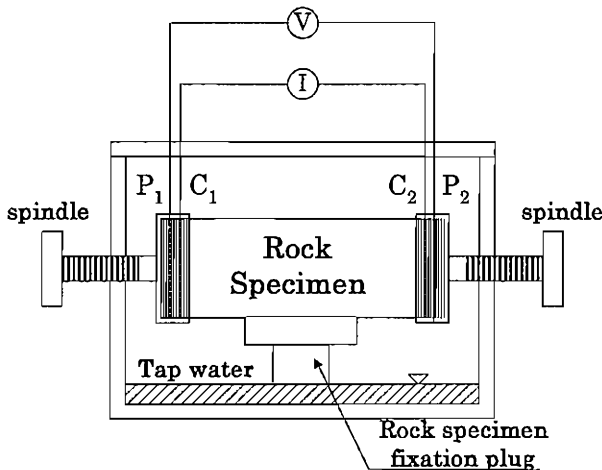


Fig. 4 The apparatus used for measuring resistivity.⁴⁾

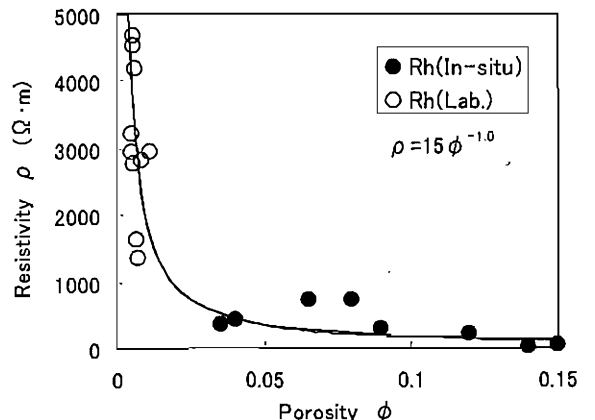


Fig. 6 The comparison of laboratory measuring result and In-situ measuring result (Rh).

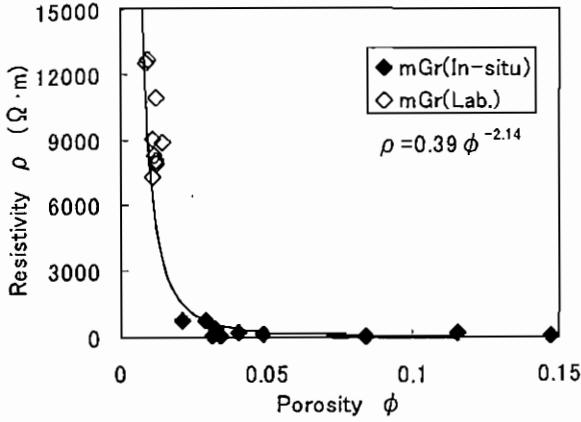


Fig. 7 The comparison of laboratory measuring result and In-situ measuring result (mGr).

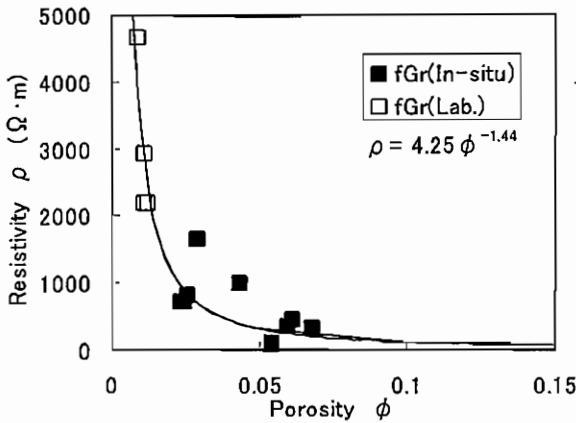


Fig. 8 The comparison of laboratory measuring result and In-situ measuring result (fGr).

われる測点も見られるが、ほぼ一つの指数関数上に分布することがわかる。なお、近似した指数関数の係数の差異については、今後の検討課題である。

事前調査で得られた地山の比抵抗分布から岩盤評価を行うに際し、室内試験で得られた比抵抗特性から推定した指数関係式を用いて岩盤の良好度が評価できればよいが、数%程度の間隙率の岩石供試体による室内試験で得られた比抵抗特性を、岩盤評価に適用するためには十分な精度を有しているとはいえ、極力幅広い間隙率で評価することが望ましい。そこで、次章以降で2種類のき裂性岩盤モデルを作成し、これらのき裂性岩盤モデルの比抵抗特性による原位置岩盤評価の適用性について検討した。

6 き裂性岩盤モデルの比抵抗特性

き裂性岩盤モデルは、Fig. 9に示すように人工的に不連続面を作成した不連続面モデルと、加熱処理により岩石内部に微細な開口き裂を発生させたポーラスモデルを用いた。不連続面モデルでは、不連続面の開口幅が比抵抗に及ぼす影響を検討するために、水を含んだ濾紙を5通りの枚数 (n=2, 5, 10, 20, 30) で比抵抗測定を行った。

試験に用いた岩石供試体は、細粒花崗岩 fGr とほぼ同じ比抵抗特性を有する宮津花崗岩 Gr である。

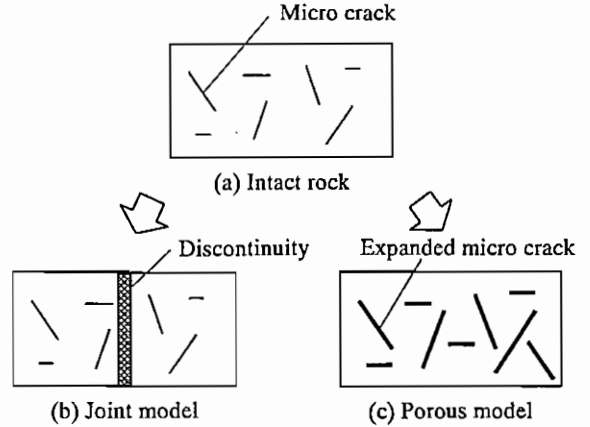


Fig. 9 Jointed rock mass model.

一方、ポーラスモデルでは吉中ら⁵⁾の研究を参考に、電気マッフル炉で加熱処理を施すことにより、岩石内部に微細な開口き裂を発生させ、岩石供試体の有効間隙率を増加させた。ポーラスモデルでは、深成岩である宮津花崗岩 Gr、火山岩である安山岩 An ならびに堆積岩である砂岩 Ss について試験を行った。

不連続面モデルの比抵抗特性の一例として、Fig. 10に岩石実質部分の有効間隙率0.012、不連続面の角度 $\theta = 35^\circ$ の不連続面を有する花崗岩の比抵抗値と飽和度の関係を、濾紙の枚数をパラメータとして示す。ここで不連続面の角度 θ とは、Fig. 11に示すコア軸に対する角度である。Fig. 10より、飽和度が減少するにつれて、比抵抗値は増加する傾向がみられ、不連続面に挟んだ濾紙の枚数が少ないほど、飽和度の変化に対する比抵抗値の変化は大きくなっている。また、不連続面が存在する岩石供試体の比抵抗値と飽和度の関係は指数関数的であり、式 (2)に示す指数関数で近似できる。

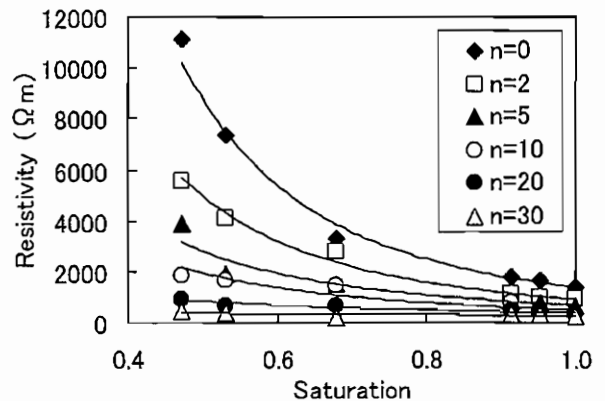


Fig. 10 The relationship between saturation and resistivity of joint model with various number of filter papers.

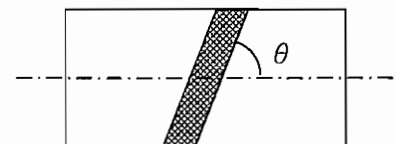


Fig. 11 The angle of joint for the core shaft.

$$\rho = \alpha \cdot Sr^{-\beta} \quad (2)$$

ただし, Sr: 飽和度

α : 係数 (Sr=1.0 時の比抵抗) [$\Omega \cdot m$]

β : 指数

また, Fig. 10 より, 濾紙の枚数が増える, すなわち見かけの間隙率が増えるにしたがい比抵抗が減少することがわかる. そこで, 不連続面を有する岩石供試体の見かけの有効間隙率 ϕ' を次式で求め, 次章において原位置岩盤の比抵抗特性と比較した.

$$\phi' = (W_2 - W_1 + W_4) / (W_2 - W_3 + W_4) \quad (3)$$

ただし, W_1 : 岩石実質部分の乾燥重量 [g]

W_2 : 岩石実質部分の湿潤重量 [g]

W_3 : 岩石実質部分の水中重量 [g]

W_4 : 不連続面内の水の重量 [g]

次に, ポーラスモデルの比抵抗特性について述べる. Fig. 12 は, 加熱後の間隙率を ϕ_a としたときの, 加熱処理温度と間隙の変化率を示している. 花崗岩における関係は, 加熱温度が上昇するにしたがい, 間隙の変化率が直線的に徐々に増加している. 兼間ら⁹⁾の研究では, 岩石を構成している結晶が膨張してき裂を発生する音波の発生加熱温度は 400°C であり, 音波のピークが 600°C であることが実験的に確認されている. そのため, 本研究で用いた岩石供試体においても, それぞれ 400°C から加熱処理を行った. 本結果は, 吉中らの研究結果とほぼ同様に 400°C から徐々に間隙が増加し, 600°C で急激に間隙が増加するという同様な傾向を示した. これは, 岩石供試体である花崗岩の構造が結晶質で構成されているためであると考えられる. その結果, 花崗岩を加熱処理することにより, 有効間隙率が最大 6 倍程度の岩石供試体を作成することができた. 一方, 安山岩については加熱温度が上昇しているにも関わらず, 間隙の変化率の増加がみられなかった. さらに, 砂岩では花崗岩と同様に加熱温度が上昇するにしたがい, 徐々に間隙が増加する結果となった. しかし, 加熱温度と間隙の変化率の関係における直線的な変化の傾向は, 花崗岩の場合ほど明瞭には見られない. このように, ポーラスモデルでは, 岩種によってき裂の発生量の調節の難易度が異なることが分かる.

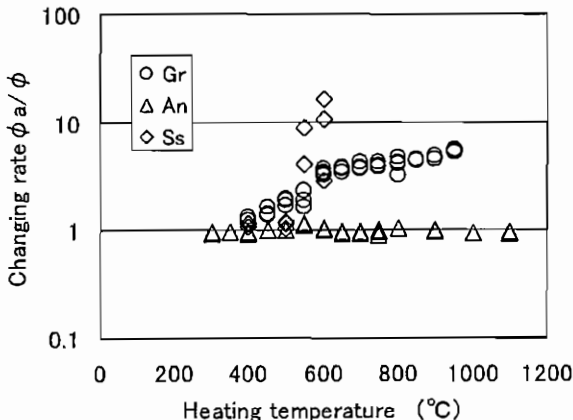


Fig. 12 The relationship between heating temperature and porosity change.

Fig. 13 は, 花崗岩における加熱温度 800°C で処理を行った岩石と加熱処理前の岩石の飽和度と比抵抗の関係の一例を示したものである. 同図からわかるように, 加熱後の岩石は加熱前の岩石と同様に, 飽和度が減少すると比抵抗が高くなるという同様の結果が得られた.

また, 各飽和度において加熱後の岩石の比抵抗は, 加熱前の比抵抗よりも低くなっていることがわかる. このように, 本研究で作成したポーラスモデルにおいても, インタクトコアと同様な比抵抗特性を示すことを確認した. このことは他の加熱温度によって得られた岩石についても同じである.

7 き裂性岩盤モデルと原位置岩盤の比較

原位置岩盤での計測結果との比較に際して, Fig. 14 に示すように, インタクト供試体と不連続面モデル (ただし, ここでは不連続面の角度が 90° の岩石を使用), ならびに, インタクト供試体とポーラスモデルの室内試験結果から 2 種類の近似曲線を求めた. Fig. 15 は, これらの近似曲線と原位置計測における比抵抗と間隙率の関係を示したものである. 同図より, 一部の測点を除き, ポーラスモデルから求めた近似曲線の方が, 不連続面モデルから求めたそれより現地計測結果との相関がよいことがわかる. なお, 図中に破線で囲んだ測点は原位置計測の比

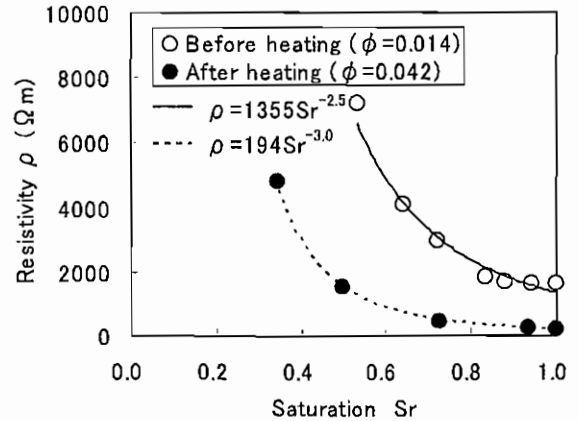


Fig. 13 The relationship between saturation and resistivity before and after heating.

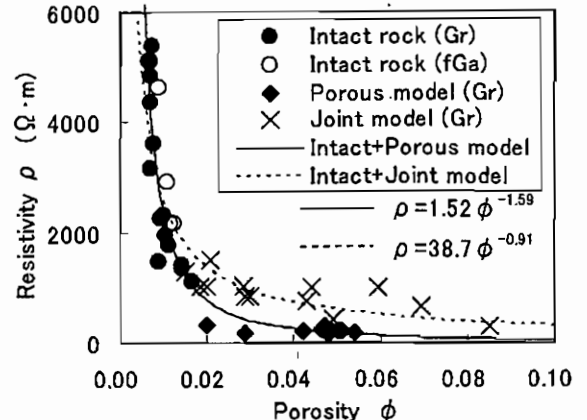


Fig. 14 The estimation of the approximate curve according to intact rock and proposed models.

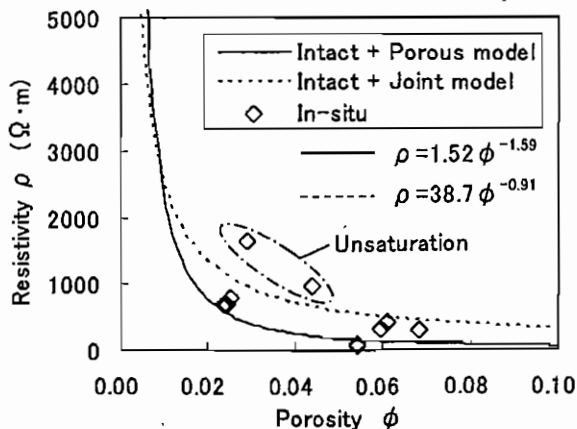


Fig. 15 The relationship between effective porosity and resistivity of proposed models.

抵抗が若干高くなっているが、これらは Fig. 6 において飽和状態にまで至っていないと考察した測点に対応する。

不連続面モデルの相関がよくない理由として、本検討では、不連続面モデルにおいて単一不連続面の角度が 90° の岩石を使用していることが考えられる。この角度の場合が、単一の不連続面を含む岩石の中でも最も高い比抵抗値を示すため、角度を小さくすれば比抵抗は小さくなるが、評価に最適な角度の設定方法が未知なため、原位置におけるき裂性岩盤の模擬としては、ポーラスモデルの方が妥当であると思われる。

8 結 言

本検討では、室内試験における岩石供試体の比抵抗特性による原位置岩盤の物性値評価の精度向上を目指し、既往のトンネル切羽で実施した簡易比抵抗測定結果と2種類のき裂性岩盤の比抵抗特性の比較を行った。一つは不連続面に種々の枚数の濾紙を介在させて、不連続面の開口幅を変化させた人工不連続面モデル、もう一つは電

気マッフル炉で加熱処理を施す事により、岩石内部に微細な開口き裂を発生させ、岩石供試体の有効間隙率を増加させて作成したポーラスモデルである。比較の結果、き裂性岩盤の模擬としてポーラスモデルが原位置岩盤の比抵抗特性と間隙率の相関がよいことを示した。したがって、ポーラスモデルを用いて極力間隙率が広い範囲にわたる供試体を作成し、これらの供試体の間隙率と比抵抗の関係を明らかにすることで、電気探査などから原位置岩盤の間隙率の評価が可能になると考えられる。今後も、さらに多くの岩種について検討を行っていく必要がある。

参 考 文 献

- 1) M. Nakamura, U. Nishikata, H. Kusumi and Y. Hatakenaka, "Application of several electric resistivity of intact rocks to field rock masses", Proceedings of the 29th Symposium on Rock Mechanics, Japan, pp.211-215 (1999).
- 2) M. Nakamura and H. Kusumi, "Preparation of jointed rock mass model using intact rock specimen and its characteristics of resistivity", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.52, No.5, pp.478-482 (2003).
- 3) T. Iwata, S. Hujita and A. Hojo, "A study on rock mass classification method for tunneling", Electric power civil engineering, No.217, pp.61-68 (1988).
- 4) A. Chiba and M. Kumata, "Resistivity measurement for granite and tuff samples", BUTSURI-TANSA, Japan, Vol.41, No.3, pp.161-172 (1994).
- 5) R. Yoshinaka and T. Onodera, "Strength and dilatancy of artificially granulated granite", Proceedings of the 10th Symposium on Rock Mechanics, Japan, pp.31-35 (1976).
- 6) T. Kanema and I. Maeda, "Micro shocks produced by heating of the granite sample and its mechanism", Journal of the Seismological Society of Japan, No.31, pp.391-400 (1978).