

室内試験による岩石の比抵抗に関する基礎的研究 EXPERIMENTAL STUDY ON THE ELECTRIC RESISTIVITY OF ROCKS BASED ON LABORATORY TESTS

西澤亮総*・谷本親伯**・川崎了***・舛屋直****

Akifusa NISHIZAWA, Chikaosa TANIMOTO, Satoru KAWASAKI and Tadashi MASUYA

It is well known that conditions of ground are surveyed by measuring the electric resistivity of rocks. However, it is difficult to understand the characteristics of electric resistivity in rock, for natural rocks have some cracks and it is not homogeneous. Agar is the proper material for rock samples because it is homogeneous and easy to process. This paper shows that agar samples is useful for rock samples and describes the relations between the conditions of joints in agar samples and the properties of electric resistivity. Moreover those relations are verified by using natural rock samples.

1. まえがき

岩盤の比抵抗探査において割れ目の及ぼす影響の評価が不可欠である。現在、岩石の比抵抗と工学的性質との関係については多くの論文が報告されているが、特に、割れ目を有する岩石や岩盤の比抵抗特性については、自然の岩石が均質でないという理由により明らかにされていないのが現状である。本研究では、均質という条件を満たし、経済性、加工の容易さなどに優れていると考えられる寒天を供試体材料として新たに採用し、人工岩としての寒天供試体の作製方法に関する検討と、寒天供試体中に作製した割れ目の性状と比抵抗の関係に関する研究を実施した。一方で、供試体の寸法が比抵抗に与える影響は無視できないと考えられる。すなわち、岩盤ブロック内に存在する数mm幅の割れ目と通常実験に用いる岩石供試体内に存在する数mm幅の割れ目とでは、比抵抗に及ぼす影響に差があると推定される。そこで本研究では、①供試体の寸法が比抵抗値に与える影響、②供試体内の割れ目の方向と比抵抗の関係について室内試験を実施して考察を行った。また、実験①によりえられた知見をもとに、自然の岩石を用いて比抵抗に関する同様の試験を実施して、両者の比較検討を行った。

2. 寒天供試体の作製方法と比抵抗

一般に、岩石の比抵抗は頁岩の示す数 $\Omega \cdot m$ 程度のものから新鮮な火成岩の $10^6 \Omega \cdot m$ 程度までと非常に幅広い範囲の値をとる。本研究は、岩石を寒天に置き換えて岩石の比抵抗を評価するものであるので、供試体

* 学生会員 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻
** 正会員 工博 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 教授
*** 正会員 博(工) 大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 助手
**** ハイテック株式会社

として用いる寒天に関しても自然の岩石と同程度の比抵抗を持つことが重要である。化学試薬として市販されている寒天粉末には、硫酸塩、鉄、鉛などの電解質が不純物として混入しているため、これを用いて供試体を作製すると約 $50 \Omega \cdot \text{m}$ の比抵抗がえられる。そこで、ろ過による寒天と電解質の分離によって寒天の比抵抗を調節することを試みた。その詳細は図-1で示すとおりである。すなわち、粉末状の寒天を蒸留水で攪拌させて、ろ紙を通過させる。ろ液として蒸留水に溶けたイオンが通過するため、ろ紙の上にはイオンが取り除かれた未固結の寒天が残る。1回のろ過では寒天に含まれるイオンを完全に分離できないので、このフローを数回繰り返す。この操作において作製できた寒天の比抵抗の最大値は、 $250 \Omega \cdot \text{m}$ であった。なお、供試体は寒天と蒸留水の混合比2%で作製し、温度に関する試験条件を一定にするために、 4°C に十分冷却した供試体で測定を行った。一方、作製時に電解質を加えることで寒天の比抵抗は数 $\Omega \cdot \text{m}$ まで変化させることができる。すなわち、寒天供試体として用いることで数 $\Omega \cdot \text{m}$ から $250 \Omega \cdot \text{m}$ までの比抵抗を再現することができる。また寒天供試体は比抵抗の再現性がよく均質である。次章では、寒天を岩石に置き換えた岩石の比抵抗特性に関する実験について述べる。

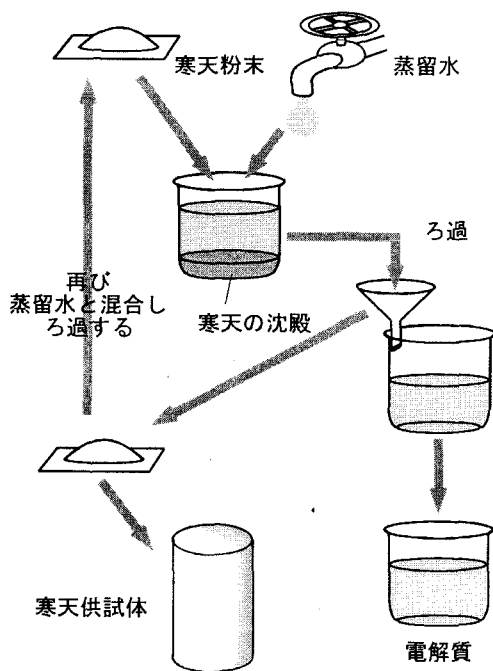


図-1 寒天供試体作製フロー

3. 寒天供試体を用いた割れ目を有する岩石の比抵抗特性に関する実験の概要

ここでは、割れ目を有する岩石の比抵抗が、供試体の寸法の変化によってどのような特性を示すかを調査する。実験で用いた供試体は、前述した寒天供試体である。供試体については、寒天の粉末を蒸留水に対して重量比で2%混合し、内径5 cm, 4 cm, 3 cmの塩化ビニル製の円管を型枠として使い、供試体の高さを2 cmから13.5 cmまで変化させて供試体を作製した。また、供試体は十分冷却することで温度を 4°C にし、冷却後の供試体は比抵抗を測定した後に直ちに割れ目を入れ、再び比抵抗の測定を行った。そして、割れ目を入れる前の供試体の比抵抗と、割れ目を入れた後の供試体の比抵抗より比抵抗の変化率 α を算出した。比抵抗の変化率 α は式①で表され、割れ目を入れた後の供試体の比抵抗 ρ_1 を、割れ目を入れる前の供試体の比抵抗 ρ_0 で除した値である。

$$\alpha = \frac{\rho_1}{\rho_0} \dots \dots \textcircled{1}$$

比抵抗の測定システムについては図-2に示すとおりである。電流 I の制御には、McOHM21 (応用地質(株)製) を使い、4秒周期で電流の向きが入れ替わる交代直流を供試体内に流した。電位測定には

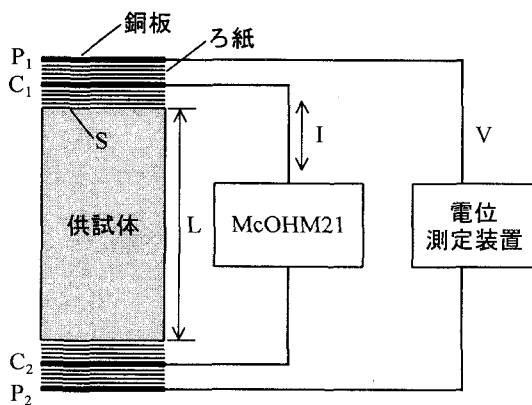


図-2 比抵抗測定装置の概要

テスターを用いて電圧の測定を行った。供試体内には交代直流を流しているため、入力される電圧は正の値と負の値を取る。そこで、測定値の最大値と最小値の絶対値の平均を供試体の測定電圧 V とした。供試体の比抵抗値 ρ は、次の式②を用いて計算した。

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{S}{L} \quad \dots\dots \text{②}$$

ここで、 V ：測定電圧、 I ：電流、 S ：供試体の断面積、 L ：供試体の高さである。

なお、供試体の割れ目の性状については図-3で示すとおりであり、数枚のろ紙を挟むことで割れ目の幅 B を 0.2mm 単位で任意に調節した。ろ紙には、一般の地下水と同程度の比抵抗を示す食塩水を染み込ませることで割れ目の比抵抗を調節した。本研究では $43.9\Omega \cdot \text{m}$ の食塩水をろ紙に染み込ませた。また以下では、割れ目の方向に関しては、電流の向きと垂直な方向に存在する割れ目を「水平方向の割れ目」、水平方向から θ° 傾いている割れ目を「傾斜のある割れ目」とそれぞれ呼ぶことにする。

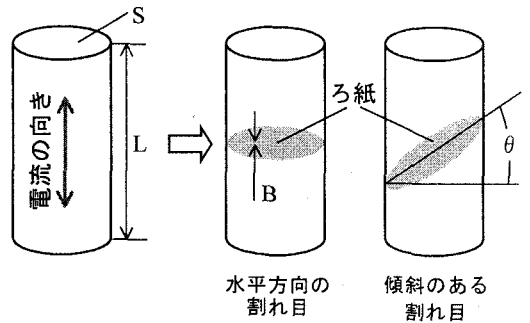


図-3 供試体内に作製した割れ目の性状

4. 実験結果および考察

4.1 供試体寸法と比抵抗の変化率特性

これまでの研究¹⁾によると、同一の寸法の供試体において、比抵抗の変化率 α は割れ目の幅 B と負の相関があることが明らかになっている。しかし供試体内に、ある幅の割れ目を作製した時、割れ目を入れる前と後の比抵抗の変化率 α は、式②より明らかなように供試体の高さ L や断面積 S などの2つのパラメータの影響を受ける。そこで、供試体内に含まれる割れ目の体積の割合 A を用いることで、これら寸法による影響は無視できると考え、パラメーター A と比抵抗の変化率 α との相関を以下で実験的に検証する。パラメーター A は、以下の式③で表される無次元量である。

$$A = \frac{\text{供試体内の割れ目の体積}(\text{cm}^3)}{\text{供試体の体積}(\text{cm}^3)} \quad \dots\dots \text{③}$$

ここで、式③は次の式④のように表すことができる。

$$A = \frac{S \times B}{S \times L} = \frac{B}{L} \quad \dots\dots \text{④}$$

本研究は、供試体内に水平方向の割れ目が存在するときには、抵抗の変化率 α は A を用いて評価できるものと考え、以下の2通りの実験を行った。まず、①高さ L と断面積 S をそれぞれ変化させて供試体を作製し、それら供試体に幅 1mm の割れ目を作製したときの比抵抗の変化率 α を求める実験を行った。次に、②高さ 10cm の供試体を複数個作製し、それら供試体に幅 B の異なる割れ目を作製したときの、比抵抗の変化率 α を求める実験を行った。以上、①、②のとおり行った実験結果を比較し、それぞれの A と α の関係が同様の傾向を示すのであれば α を A を用いて評価することが可能である。実験の結果は、図-4、図-5にそれぞれ示すとおりである。図-4の縦軸は比抵抗の変化率 α を、横軸は供試体の高さ L をそれぞれ示している。また、図-5の縦軸は α 、横軸は割れ目の幅 B をそれぞれ示している。また、それぞれの図の横軸

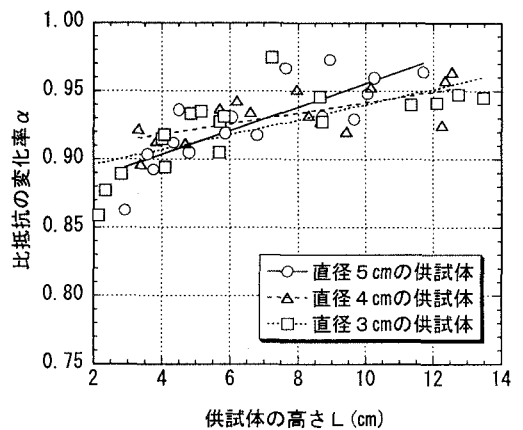


図-4 寒天供試体における L と α の関係

また、図-5の縦軸は α 、横軸は割れ目の幅 B をそれぞれ示している。また、それぞれの図の横軸

には供試体の高さ L および割れ目の幅 B から算出される A の値を同時に示している。なお、図中の直線および2種類の点線は最小二乗法により求めた回帰直線である。図-4によると、供試体の高さ L が大きくなるにしたがって α が大きくなる傾向を示している。これは同時に、 A が大きくなれば α は小さくなるということも示している。なぜなら、式④より明らかのように、 A と L には逆比例の関係があるからである。これより、図-4から A と α に相関があることが明らかである。一方で、図-5では、割れ目の幅 B が大きくなることにより α が小さくなる傾向を示している。同図においても、 A が大きくなれば α は小さくなるという関係を示していることがわかる。そこで、図-4、図-5の実験データをもとに A と α の関係を図-6に同時に示した。同図より、図-4のデータ、図-5のデータともに同様の傾向を示すことがわかる。

よって以上の結果から、割れ目の幅と供試体の寸法に関するパラメーター A を用いて比抵抗の変化率 α の評価ができるものと考えられる。

4. 2 自然の岩石を用いた割れ目を有する岩石の比抵抗特性に関する実験

前節で、寒天を岩石材料に置換して比抵抗の実験を行ったことにより、 α が A と負の相関を示すことが明らかになった。そこで、この関係が自然の岩石において成立するかどうかを確認するため、自然の岩石供試体を用いた同様の比抵抗測定を実施した。供試体として、鳥根県来待産の凝灰質砂岩を用いた。供試体は蒸留水で満たしたデシケーター内で72時間以上脱気し、強制飽和させた。飽和した供試体は比抵抗測定後直ちに割れ目を入れ再び比抵抗の測定を行い α を算出した。なお、供試体内の割れ目にはろ紙を用いることで幅を規定した。実験によりえられた A と α の関係は図-7に示すとおりである。同図

の縦軸は α 、横軸は A をそれぞれ示している。図内の直線および点線は最小二乗法を用いて算出した回帰直線である。なお、図中の寒天供試体のデータについては図-5のデータをもとに引いた回帰直線である。同図より、砂岩における A と α の関係は寒天供試体のそれと同様の傾向があるといえる。

自然の岩石における比抵抗に関する実験を行ったことより、自然の岩石においても寒天供試体と同様の結果を示すことがわかった。以上のことから、水平方向の割れ目を有する岩石の比抵抗特性は A を用いて評価できるものと考えられる。

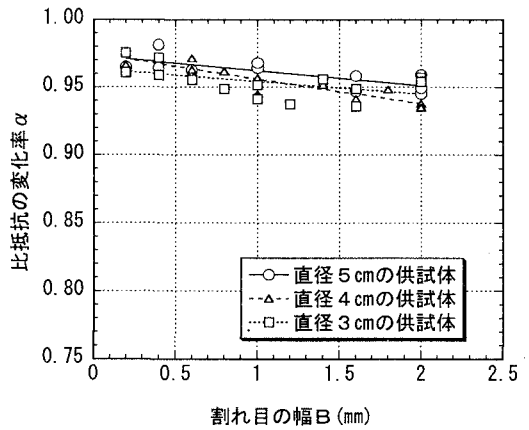


図-5 寒天供試体における B と α の関係

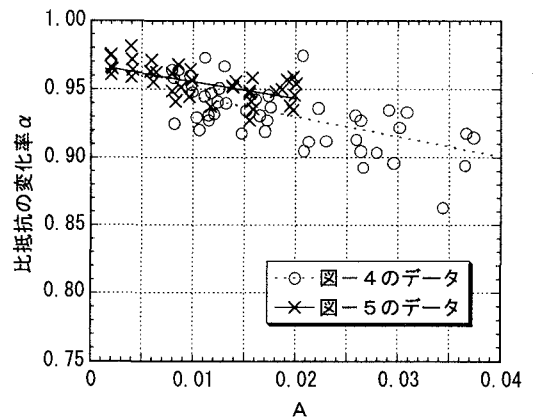


図-6 寒天供試体における A と α の関係

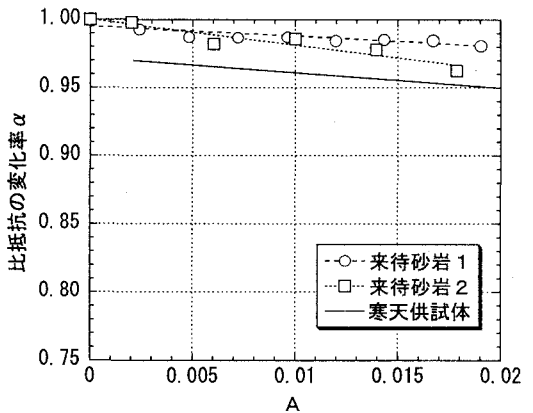


図-7 自然の岩石における A と α の関係

4. 3 傾斜した割れ目と比抵抗の変化率の特性

次に、割れ目の方向と比抵抗の変化率特性について実験を行った。直径4 cm×高さ10 cmの円柱形の寒天供試体を作製し、図-3で示すように角度 θ の傾斜のある割れ目を作製する。割れ目を入れる前と後で比抵抗の測定を行い α を算出した。割れ目には厚さ0.2 mmのろ紙を5枚挟み込み、供試体内に幅1 mmの傾斜した割れ目を表現した。実験結果は図-8で示すとおりである。同図の縦軸は α を、横軸は割れ目の傾斜角度 θ をそれぞれ示している。また、図中の直線は最小二乗法により求めた回帰直線である。同図より、供試体内の傾斜した割れ目に関して角度 θ が大きくなるにつれて α が低下することがわかる。

4. 1, 4. 2では、水平方向の割れ目について、比抵抗特性はAの影響を受けるということを実験的に証明した。しかし、割れ目の角度 θ も比抵抗特性に影響を及ぼすことが、ここで明らかになった。これら、傾斜角度 θ と比抵抗の変化率 α との関係については、今後も引き続き研究を重ねて明らかにする必要がある。

5. まとめ

本研究では、人工岩としての寒天供試体の作製方法に関する検討、および寒天供試体を用いた割れ目を有する岩石の比抵抗特性に関する実験を行った。また、これら寒天供試体を用いた実験によりえられた知見をもとに、自然の岩石を用いて同様の比抵抗に関する実験を実施して、両者の比較検討を行った。本研究で得られた主な知見は、次のとおりである。

- 1) 割れ目を有する供試体の比抵抗特性については、比抵抗の変化率 α が割れ目の幅Bと供試体の寸法に関するパラメーターAとよい相関を示すことがわかった。
- 2) 自然の岩石を用いて割れ目を有する岩石の比抵抗に関する実験を行った結果、寒天供試体を用いた実験と同様の結果が得られ、 α とAに相関があることが確認できた。
- 3) 傾斜した割れ目に関する実験を行ったことにより、割れ目の角度 θ が大きくなると比抵抗の変化率 α が低下することがわかった。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、岩石供試体の側面および端面整形に関して、基礎地盤コンサルタンツ株式会社岩盤工学センターの松村真一郎氏他、同センター関係諸氏にご協力をいただいた。末筆ながらここに記して、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 西澤亮絵・谷本親伯・川崎了・舛屋直：寒天供試体を用いた岩石の比抵抗に関する基礎的研究，平成11年度土木学会関西支部年次学術講演会講演集，Ⅲ-21，1999。
- 2) 西澤亮絵・谷本親伯・川崎了・舛屋直：寒天供試体を用いた割れ目を有する岩石の比抵抗に関する研究，第54回土木学会年次学術講演会講演集，Ⅲ-A320，pp.636-637，1999。

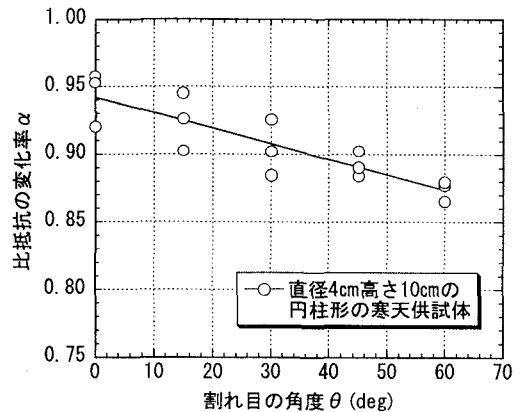


図-8 割れ目の角度 θ と α の関係