

岩石の有効間隙率測定における試料の飽和および乾燥方法

Saturating and Drying Techniques to Determine the Porosity of Rock

林 為 人 (りん いじん)

(株)ダイヤコンサルタント技術研究所 主任研究員
(地質調査所環境地質部 重点研究協力員)

杉 田 信 隆 (すぎた のぶたか)

(株)ダイヤコンサルタント技術研究所 部長

故 西 田 薫 (にしだ かおる)

(株)ダイヤコンサルタント技術研究所 部長

高 橋 学 (たかはし まなぶ)

地質調査所環境地質部 主任研究員

1. はじめに

岩石組織中に存在する間隙の量が多ければ、岩石の強度および変形係数などは低下し、透水係数は増大する。地盤調査などにおいては、岩石の力学特性や透水特性などを把握するとともに、正確な間隙特性に関する情報を得ることも必要不可欠である。岩石試料の中に存在する間隙の容積が試料全体の体積に対して占める割合を間隙率という。実際には、内部の間隙には水が流通し得ない部分があるため、試験上すべての間隙を知ることは困難である。そこで、外部と通じている測定可能な間隙の体積率を有効間隙率と呼ぶ¹⁾。一方、有効間隙率という用語は「重力水が流れ得る土中の間隙率」と定義される²⁾場合もあるが、本稿では前者の定義として用いる。

岩石の有効間隙率の測定は試料の飽和状態と乾燥状態との重量差で行うことが一般的であるが、試料を飽和させる方法および乾燥させる方法については、現行の各試験基準等は必ずしも統一されていない。飽和方法について、『岩の調査と試験¹⁾』をはじめとする多くの基準等^{3)~6)}は大気圧下での浸水と規定あるいは推奨しているが、ISRM 指針⁷⁾は真空で1時間以上の浸水と規定している。また、ほかの飽和方法としては、脱気してから浸水する手順を採用した例⁸⁾がある。一方、乾燥方法については、前述の基準等^{1),3)~7)}はすべて60~110°Cの炉乾燥としているものの、乾燥温度が完全に統一されていない。そこで、岩石の有効間隙率の測定結果に及ぼす飽和方法および乾燥方法の影響を調べる必要がある。本研究では、計8種類の花崗岩、火砕岩、砂岩、凝灰岩および泥岩を用いて、有効間隙率の測定結果に対する飽和方法および乾燥方法の影響を明らかにする比較実験を実施した。

2. 実験方法

本研究の実験内容は、飽和方法が有効間隙率の測定結果に及ぼす影響を検討するための比較実験1および2と、乾燥温度が有効間隙率の測定結果に及ぼす影響を検討するための比較実験3からなる。

3種類の比較実験用の試料として、有効間隙率が約1~55%の範囲に分布する計8種類の岩石を用いた。そ

表—1 研究用岩石試料の一覧表

岩石名	産地	年代	湿潤密度 (g/cm ³)	乾燥密度 (g/cm ³)	比較実験 項目
稲田花崗岩	茨城県	60 Ma	2.64	2.63	1, 2
呉花崗岩	広島県	85 Ma	2.63	2.62	1, 2
オコツナイ層石英 安山岩質火砕岩	北海道	新第三紀中新世	2.39	2.23	1
多胡砂岩	群馬県	新第三紀中新世前期17 Ma	2.36	2.20	1, 2
白河溶結凝灰岩	福島県	第四紀更新世1 Ma	2.26	2.02	1, 3
田下凝灰岩	栃木県	新第三紀中新世中期	2.09	1.76	1, 3
上総層群 長南層泥岩	千葉県	第四紀中期更新世0.5 Ma	1.76	1.22	2
上総層群 梅ヶ瀬層泥岩	千葉県	第四紀前期更新世0.8 Ma	1.91	1.46	2

それぞれの岩石名、産地、地質年代、湿潤密度、乾燥密度および実施する比較実験の項目を表—1に示す。実験用試料は非整形のものとし、その概略寸法がおおむね直径5 cm×長さ5 cmないしそれと同等な大きさとした。また、1岩種につき3試料を用いた。

比較実験1は、(1)大気圧下において岩石試料を浸水させて飽和させる方法(図—1(a)、以下では浸水法と称する)、(2)浸水状態の岩石試料を真空デシケーターに移して真空脱気しながら飽和させる方法(図—1(b)、以下では浸水脱気法と称する)を取り上げたもので、具体的な手順は次のとおりである。

- ① 各試料の初期含水状態を同様にするために60°Cで約2日予備乾燥を行った後、初期重量を測定した。
- ② 浸水法としては、試料を浸水させてから、約24時間後、約48時間後、約72時間後、約8日後、約15日後および約21日後に湿潤状態の重量を各々測定した。
- ③ 浸水法の測定を終えた試料を60°Cで約2日予備乾燥した後、浸水脱気法での初期重量を測定した。この重量は浸水法の初期重量とほぼ等しいことを確認した。
- ④ 図—1(b)に示すように、岩石試料の浸水容器を真空デシケーターに移して、真空ポンプを動作させ

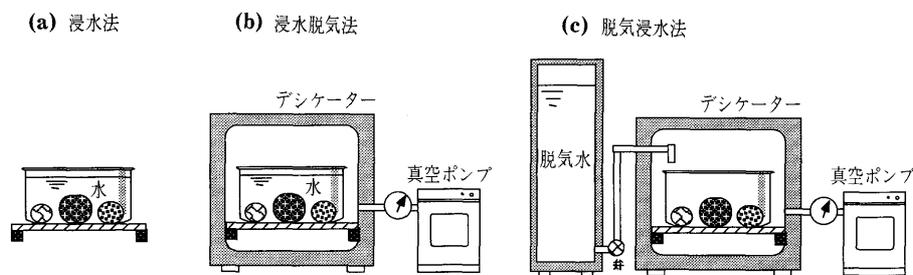


図-1 岩石試料を飽和させるための装置の模式図

真空脱気を行った。真空脱気してから約1時間後、約6時間後、約24時間後、約48時間後、約72時間後および約18日後に湿潤状態の重量を測定した。約18日後には、浸水容器を揺らしても気泡が発生しなくなったので、この状態を完全飽和状態と仮定した。

- ⑤ 試料を110°Cで48時間以上乾燥させて、乾燥状態の重量を測定した。

比較実験2では、(1)岩石試料を真空脱気してから脱気浸水に浸水して飽和させる方法(図-1(c)、以下では脱気浸水法と称する)と(2)浸水脱気法との比較検討を行った。具体的な実験手順は次に示すとおりである。

- ① 試料を60°Cで約2日予備乾燥して初期重量を測定した。
- ② 図-1(c)に示す装置を用いて、試料を約4日間真空脱気した後、真空状態を保持したまま脱気水を容器に注入して、試料を浸水させた。その後、デシケーターを大気圧に解放した。
- ③ 脱気浸水法の測定としては、試料が浸水して約4日後に第1回目の重量測定を行った。次に飽和促進のために、浸水容器を圧力チャンバーに移して約0.3 MPaの空気圧を4日間加え、その後第2回目の測定を行った。
- ④ 脱気浸水法測定後の試料を60°Cで約2日予備乾燥を行った後、浸水脱気法での初期重量を測定した。
- ⑤ 浸水状態で真空脱気を開始してから約8日後、約10日後および約18日後に湿潤状態の重量を測定した。
- ⑥ 試料を110°Cで48時間以上乾燥させて、乾燥状態の重量を測定した。

比較実験3では、(1)試料の乾燥温度が有効間隙率測定結果に及ぼす影響、また、(2)その影響は膨潤性粘土鉱物の有無との関連性を調べた。乾燥用の恒温室は密閉されておらず、試料が大気に触れるタイプのものである。実験期間中の試験室内の相対湿度は晴天の場合約40%、雨天では約80%であった。恒温室内の湿度は測定できなかったが、試験室内の湿度変動に伴って変動したものと考えられる。比較実験3の具体的な測定手順を次に示す。

- ① 各試料の初期含水状態をほぼ同様にするために浸水脱気法で約13日間真空脱気を行った後、初期湿潤状態の重量を測定した。
- ② 試料を80°Cで乾燥させ、約8日後(測定日の天

候は晴)、約13日後(晴)および約19日後(雨)に乾燥重量を測定した。

- ③ 温度を110°Cに上げて、約6日後(晴)に乾燥重量を測定した。さらに温度を210°Cに上げて、約7日後(晴)に乾燥重量を測定した。

すべての重量測定は0.01 gの精度を有する同一電子天秤を用いて行った。また、飽和用の水は水道水を用いた。

3. 実験結果

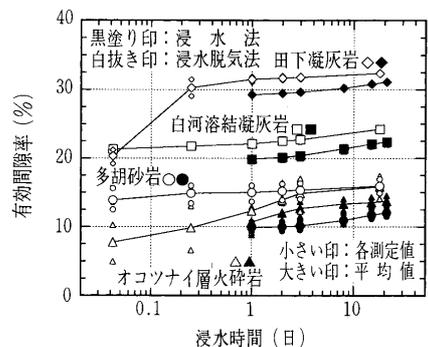
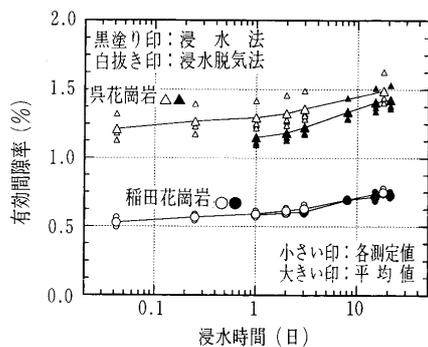
各種比較実験による試料の有効間隙率の測定値 $n(\%)$ は次式で算出した。

$$n = 100 \times (W_s - W_d) / (W_s - W_w)$$

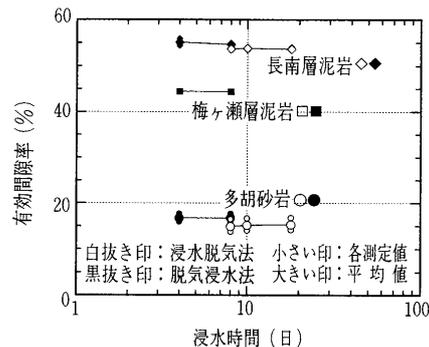
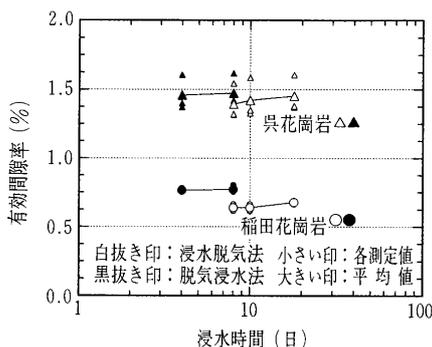
ここで、 W_s は湿潤状態の岩石試料を空気中で測定した重量(質量)、 W_d は乾燥状態の空気中での重量(質量)、 W_w は湿潤状態の水中での重量である。試料の飽和の程度が高ければ高いほど、 W_s は大きくなり、有効間隙率の測定値も大きくなる。したがって、有効間隙率測定の比較実験の結果について、測定値の著しく小さい試料は十分に飽和に至っていないと判断することができる。

比較実験1において測定した6岩種の有効間隙率と浸水時間との関係を図-2に示す。浸水法と浸水脱気法との比較については、すべての岩種は同一浸水時間で比べると、浸水脱気法の有効間隙率(3試料の平均値、以下も同様)が浸水法のそれより大きかった。したがって、浸水脱気法による岩石試料の飽和促進は浸水法より有効であることが確認できた。ただし、岩種が異なれば、両手法による有効間隙率の測定値の差も異なっている。多胡砂岩の場合、1時間の浸水脱気法の飽和促進は21日間の浸水よりも有効であった。一方、稲田花崗岩の場合では、浸水脱気法の有効間隙率は浸水法のそれより若干大きい傾向であったが、ほぼ同様な測定値である。

稲田花崗岩、呉花崗岩および田下凝灰岩の浸水法で測定した有効間隙率(21日)は、浸水脱気法(18日)の有効間隙率とほぼ同様で、両有効間隙率の比はそれぞれ0.97、0.96、0.96であった。白河溶結凝灰岩とオコツナイ層火砕岩は、両有効間隙率の差がやや大きく、両者の比はそれぞれ0.92と0.87であった。また、多胡砂岩の場合では、浸水法の有効間隙率は顕著に小さく、浸水脱気法のその0.75倍にとどまった。したがって、多胡砂岩、白河溶結凝灰岩、オコツナイ層火砕岩では、浸水法による試料の飽和は不十分であったことが判明した。



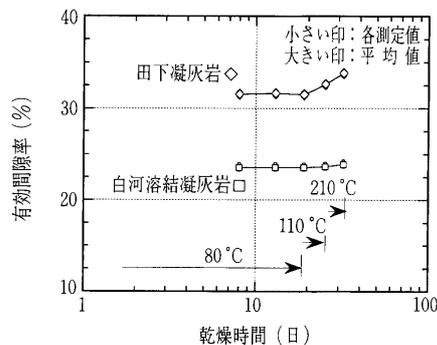
図一 比較実験 1 における有効間隙率の測定値と浸水時間との関係



図一 比較実験 2 における有効間隙率の測定値と浸水時間との関係

比較実験 2 において測定した 5 岩種の有効間隙率と浸水時間との関係を図一 3 に示す。上総層群長南層泥岩は浸水過程で、スレーキング特性に起因する若干の崩れが認められたが、崩れ落ちた分の重量を用いて結果の補正を行った。上総層群梅ヶ瀬層泥岩の場合、試料が浸水脱気法の飽和段階で浸水と脱気に起因して激しく崩れたため、続きの測定は不能となった。

脱気浸水法と浸水脱気法との比較について、梅ヶ瀬層泥岩以外の 4 種類の岩石とも、脱気浸水法で測定した有効間隙率は浸水脱気法のそれよりわずかに大きい傾向



図一 4 比較実験 3 における有効間隙率の測定値と乾燥時間

となった。稲田花岗岩、呉花岗岩、多胡砂岩、上総層群長南層泥岩の脱気浸水法 (4 日) で測定した有効間隙率は浸水脱気法 (18 日) のそれより大きくなり、両有効間隙率の比はそれぞれ 1.13, 1.00, 1.09, 1.03 であった。

脱気浸水法の浸水過程において、第 2 回目の測定では飽和促進のために、約 0.3 MPa の圧力を加えたが、各岩種とも第 2 回目の有効間隙率の測定値と第 1 回目の測定値との間で明瞭な差が認められなかった。したがって、脱気浸水法では空気圧を加える必要がないと考えられる。

比較実験 3 において、各種乾燥方法で測定した白河溶結凝灰岩および田下凝灰岩の有効間隙率を図一 4 に示す。まず、乾燥温度による影響について、白河溶結凝灰岩の全 5 回の有効間隙率測定値は 23.6~23.9% の範囲にあり、温度を 80°C から 210°C に高くしても、有効間隙率がわずか 0.3% 程度大きくなった。80°C (8 日) の有効間隙率と 210°C の有効間隙率との比は 0.99 で、すなわち、80~210°C の領域における乾燥温度の影響はわずか 1% にとどまっている。一方、田下凝灰岩では、80°C (8 日)、110°C および 210°C の乾燥温度で測定した有効間隙率はそれぞれ 31.6%, 32.6%, 33.8% であり、80°C (8 日) の有効間隙率と 210°C のそれとの比は 0.93 であった。

また、80°C の乾燥温度における日数の影響については、8 日、13 日および 19 日の有効間隙率測定値は白河溶結凝灰岩の場合で 23.6%, 23.6%, 23.5% で、田下凝灰岩の場合では 31.6%, 31.6%, 31.5% であった。したがって、8 日以上においては乾燥日数の影響が認められなかった。ただし、乾燥開始から 19 日後の測定は前夜から雨天となり、試験室内の相対湿度が約 80% となっていたため、両岩種とも空気中の水分を吸収して、乾燥状態の重量が大きくなり、有効間隙率の測定値がわずかに小さくなった。

4. 考察

4.1 飽和方法について

本研究で取り上げた三つの飽和促進方法については、真空脱気を行う浸水脱気法および脱気浸水法は浸水法より飽和促進効果が大きいことが確認された。ただし、岩種が異なれば、各方法による飽和促進の効果も異なっている。このような岩種による飽和効果の相違は、各岩種の内部間隙の構造、不飽和透水係数、毛管現象、サクシ

ン等の違いに起因するものと推測される。なお、飽和作業に要する時間について、脱気浸水法は3方法の中で最も短いことが認められた。

浸水法は実施簡便の長所を有しているが、本稿で用いた多胡砂岩、白河溶結凝灰岩およびオコツナイ層火砕岩の場合、飽和が不十分であることが認められた。脱気浸水法の長所としては、試料内の空気がより完全に脱気できると同時に、内部の負圧が脱気水の浸入をより一層促進できると考えられる。一方、浸水しない状態で脱気するので、試料内の含水が一部蒸発するため、再浸水の際、試料に乾湿の繰返しを与える短所がある。スレーキングの恐れがある試料には適さないと考えられる。浸水脱気法については、試料の外部から内部へと徐々に浸潤した水が、内部の残存空気の排出を妨げる可能性があるため、脱気浸水法と比べると飽和しにくいと推測されるが、試料に乾燥の履歴を与える欠点はない。

4.2 乾燥条件について

80~210°Cの範囲における乾燥温度について、白河溶結凝灰岩はその影響をほとんど受けておらず、一方、田下凝灰岩は明らかにその影響を受けている。林ほか⁹⁾が白河溶結凝灰岩と田下凝灰岩のX線回折分析を行った結果、前者は膨潤性粘土鉱物を含んでおらず、後者は代表的な膨潤性粘土鉱物モンモリロナイトを含有しているとされている。両岩種における乾燥温度による影響の相違は田下凝灰岩にモンモリロナイトが含まれていることに起因している。モンモリロナイトに含まれる層間水は100~200°Cで脱水する¹⁰⁾ので、110°Cおよび210°Cで乾燥させた場合、田下凝灰岩試料の乾燥重量が軽くなり、有効間隙率の測定値が大きくなった。ただし、層間水はフィロ珪酸塩の成分層間に含まれる水分子層であるため、これらを岩石内の間隙として扱うことができないのではないかと考えられる。なお、非膨潤性の粘土鉱物（例えば、セリサイト）は層間水を含まないため、膨潤性粘土鉱物と同様な影響はないと推測される。

白河溶結凝灰岩の結果は、膨潤性粘土鉱物を含まない場合、80°Cの乾燥温度が十分であることを示唆していると考えられる。ただし、本研究では8日未満の範囲において乾燥日数の影響は詳細に調べていないため、80°Cにおける必要最小限の乾燥日数は不明である。

また、80°Cで行った3回の測定では、乾燥時の実験室内の湿度環境は有効間隙率の測定結果に軽微な影響を及ぼすことがわかったが、それによる相対誤差は白河溶結凝灰岩と田下凝灰岩でそれぞれ0.4%と0.3%であり、無視できる程度と考えられる。

5. おわりに

岩石試料の飽和方法および乾燥方法が有効間隙率の測

定結果に及ぼす影響を明らかにする目的で、花崗岩、火砕岩、砂岩、凝灰岩および泥岩を用いた比較実験を実施した。得られた結果を要約すれば以下ようになる。

(1) 大気圧下での浸水法、試料を浸水させてから真空脱気を行う浸水脱気法、試料を真空脱気してから浸水させる脱気浸水法の三つの飽和促進方法について比較検討した。その結果、真空脱気を行う浸水脱気法と脱気浸水法は浸水法より飽和促進効果が大きいことが確認された。

(2) 脱気浸水法と浸水脱気法とで測定した有効間隙率の比較について、前者は若干大きめの値を示す岩種が認められた。ただし、脱気浸水法は岩石試料に乾湿の繰返しを与える欠点がある。

(3) 飽和に要する時間について、脱気浸水法は3方法の中で最も短かった。また、浸水脱気法では、大きさ5 cm程度の試料を完全に飽和させるためには、本研究で用いた花崗岩や凝灰岩などの場合、10数日要することが明らかになった。

(4) 80~210°Cの範囲における乾燥温度が有効間隙率の測定結果に及ぼす影響は、試料内の膨潤性粘土鉱物の有無と関係することが判明した。膨潤性粘土鉱物がない場合、乾燥温度の影響は認められず、80°Cで試料を十分に乾燥させることができた。一方、膨潤性粘土鉱物を含有する場合、有効間隙率の測定結果はその影響を受けることが判明した。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会（現名称、地盤工学会）編：第46章 有効間隙率試験、岩の調査と試験、pp. 385~387, 1989.
- 2) 地盤工学会編：土質工学標準用語集、p. 163, 1996.
- 3) 日本規格協会編：A 1110 1999 粗骨材の密度及び吸水率試験方法、JISハンドブック 土木、pp. 182~183, 1999.
- 4) 建設省：5.4 岩石試験、土木試験基準（案）、上、全日本建設技術協会、pp. 98~108, 1970.
- 5) 日本鉄道建設公団：14. 岩石試験、地質調査標準方書、鉄公サービス、pp. 101~103, 1991.
- 6) ASTM: Standard test methods for absorption and bulk specific gravity of dimension stone, Designation C 97-96, p. 2, 1996.
- 7) Franklin, J. A. (Coordinator): Suggest methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 16, pp. 141~156, 1979.
- 8) 斉藤徳美：乾燥および浸水による火成岩の含水率の変化について、物理探鉱、Vol. 26, pp. 287~293, 1973.
- 9) 林 為人・高橋 学・杉田信隆：堆積岩を用いたトランジェントパルス法と変水位透水試験法との比較、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp. 353~358, 1998.
- 10) 地学団体研究会：地学事典（増補改訂版）、平凡社、p. 1101, 1981.

（原稿受理 2000.1.20）