動的な間隙水圧が破壊した砂岩の透水係数の 変化に与える影響

李 楊1,2・川北 章悟3・朝比奈 大輔1*

¹国立研究開発法人産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門(〒160-0004 茨城県つくば市東1-1-1) ²日本大学大学院 総合基礎科学研究科(〒156-0045 東京都世田谷区桜上水三丁目25-40) ³日本大学大学院 理工学研究科(〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台1丁目8-14) *E-mail: d-asahina@aist.go.jp

地震時の地下水位の変動は世界各地で観測されており,周辺岩盤の水理・力学特性の変化及び断層の再 活動性などに関係していると考えられている.本研究では,地震時における地下水位変動と岩盤の物理特 性の関係を解明することを目的として,間隙水圧の周期的振動変化が破壊した岩石の透水係数に与える影 響について調べるため室内物理実験を行った.岩石は透水性の比較的高い白浜砂岩と,透水性の低い来待 砂岩を用いた.どちらの岩石においても,間隙水圧の振動後に透水係数が上昇する傾向が得られた.また, 破壊した岩石の透水係数は,来待砂岩に比べて白浜砂岩の方が高く違いが明瞭に確認できた.本研究によ って,動的な間隙水圧が来待砂岩と白浜砂岩の透水係数の変化に与える影響が明らかになった.

Key Words : dynamic pore pressure, permeability enhancement, sandstone, fractured rock

1. はじめに

地震時における地下水位の変動は、岩盤の力学的・水 理学的特性に密接に関係しており、地震に伴う地下岩盤 の変動を把握する上で重要な指標とされている.地震に よる帯水層を含む地下岩盤の水理特性の変動は、地域的 な地下水流路の変化、断層の再活動への影響、油ガス田 開発等における資源の生産性の変化など様々な事象に関 連している¹.

地震時における地下水位は、主に短周期の振動を伴う 変動と長期的に変動が継続する変動の二つに分けられる. 前者の振動を伴う地下水位の変動は、地震波の通過が帯 水層の間隙水圧を振動させることによって生じると解釈 されている.この地下水位の変動の周期は15~30秒であ る.一方、継続的な地下水位の変動は、地震発生後数週 間にわたり段階的に上昇・下降し、場合によっては緩や かに回復する.Wang and Manga (2014)³は、これらの地下 水位の変動について、多孔質媒体の静的な弾性ひずみ、 非排水圧密特性、及び地震による透水性の増加等が関係 しておりそれらの相互作用の可能性について言及してい る.しかし、地震時における岩盤の水理・力学特性の変 化が、地下水位変動に与える空間的・時間的影響につい て詳細に検討されている例は少ない.また、地震波の通 過に伴って変化する帯水層の岩盤の状態を直接観測する ことは困難であるため、継続的な地下水位の変動と岩盤の物理特性を関係づけることは容易ではない.

本研究では、地震時における地下水位変動と岩盤の物 理特性の関係を解明することを目的として、間隙水圧の 周期的振動変化における岩石の透水係数の変化について の室内物理実験を行った.実験は圧力容器を用いて行い、 間隙水圧を動的に制御し、振幅の違いが岩石の透水係数 に与える影響を調べた.岩石は透水性の比較的高い白浜 砂岩と透水性の低い来待砂岩を用い、岩石特性の違いに ついても検討した.

2. 岩石試料と試験方法

(1) 岩石試料

試験に用いた岩石試料は、島根県宍道湖に分布する来 待砂岩及び、和歌山県西牟婁郡白浜町の白浜砂岩を用い た.丁場からブロック試料を切り出し、直径50mm、高 さ25mmの円柱に整形した.インタクトな試料における 間隙率・透水係数はそれぞれ、来待砂岩で21.3%・ 1.6×10¹¹m/s、白浜砂岩で12.5%・5.0×10⁹m/sである^{3,4}.本 研究では、き裂を含む岩石の透水特性を調べるために、 図-1に示すように岩石試料を貫通するような巨視き裂を 鏨の打ち込みによって発生させた.

(2) 試験方法

間隙水圧の振動を伴う封圧試験は圧力容器を用いて行った(図-2)⁵.本試験装置は、封圧、間隙水圧、並びに温度を制御する3つのシステムで構成されている.間隙水圧はシリンジポンプA(上流),B(下流),封圧はシリンジポンプCによってそれぞれ制御されている.

図-2に示すように、円柱供試体の両端部にエンドピースを取り付け、低粘性シリコンゴム、熱収縮チューブ、 及びOリングを使用して岩石試料表面の被覆及び岩石試 料とエンドピースの接合を行った⁰.供試体は含水飽和 状態であり、試験は封圧と間隙水圧を7MPaと3MPaまで それぞれ上昇させ、その後間隙水圧を周期24秒で10サイ クル振動させた.本研究では、間隙水圧の振幅が岩石試 料の透水係数に与える影響を検討するため、振幅を 1.5MPaと0.15MPaの2通り行った.最初に,振幅1.5MPaで 振動させ,その後上流側と下流側の流量の安定を確認し た後,振幅0.15MPaで振動させた.なお,振動中は下流 側は非排水とした.透水試験は間隙水圧を振動させる前 と後で行い,フローポンプ(下流側定圧制御)法によっ て測定した.振動後の透水係数は時間がたつにつれて初 期透水係数に戻る傾向が観測されているため,透水試験 は振動後速やかに行った⁷⁾.供試体の両端の水頭差の定 常状態を確認した後,透水係数を次式によって算出した.

$$k = \frac{qL}{AH} \tag{1}$$

ここで、kは供試体の透水係数(m/s), qは流量(m³/s), Aは供試体の断面積(m²), Hは供試体両端の水頭差



図-1 破壊した岩石試料: (a) 来待砂岩, (b) 白浜砂岩.



図-2 透水試験測定装置の模式図.

表-1 岩石試料の透水係数.

振幅(MPa)		来待砂岩透水係数(m/s)			白浜砂岩透水係数(m/s)		
		KM1	KM2	KM3	SR1	SR2	SR3
1.5	振動前	1.30E-09	4.24E-10	1.72E-08	8.08E-08	8.13E-08	6.17E-08
	振動後	3.09E-08	2.18E-10	1.85E-08	9.84E-08	8.33E-08	8.28E-08
0.15	振動前	3.54E-08	1.85E-10	1.72E-08	8.10E-08	9.98E-08	6.06E-08
	振動後	4.09E-08	1.56E-10	2.00E-08	8.38E-08	9.99E-08	8.18E-08



1.5MPa, (b) KM2,振幅 0.15MPa, (c)SR2,振幅 1.5MPa, (d) SR2, 振幅 0.15MPa.

(m), Lは供試体の高さ(m)である. 試験は同じ条
件下で3つの試料について行った. 以下来待砂岩及び白
浜砂岩の3つの試料をそれぞれ, KM1, KM2, KM3, 及
びSR1, SR2, SR3と呼ぶ.

3. 試験結果と考察

図-3に代表的な例として来待砂岩(KM2)と白浜砂岩 (SR2)における上流と下流の間隙水圧の変動を示す. KM2は透水係数が低いため、上流側と下流側の間隙水 圧に違いが生じたが、SR2は透水係数が比較的高くほぼ 同程度になった.

表-1及び図-4に振動前後の透水係数の変化を示す.透水係数は岩石試料ごとに数オーダーの違いがみられた. これは、巨視き裂のラフネスやき裂面のかみ合わせの違



いが反映したものだと考えられる.限られた試料数では あるものの、全体の傾向として、透水係数は振動前より 振動後の方が上昇した.特に、振幅1.5MPaを作用させた 岩石試料については、透水係数の低かったKM2を除き、 すべての試料で振動後の透水係数は上昇した.振幅の違 いが透水係数に与える影響は明確には現れなかったもの の、透水係数の上昇量は振幅1.5MPaの方が大きい傾向が あった.

岩石の種類に着目してみると,振幅1.5MPa,0.15MPa どちらにおいても来待砂岩に比べて白浜砂岩の方が振動 後の透水係数が高く,違いが明瞭に確認できた.本研究 で用いた岩石試料には巨視き裂が存在するため,透水係 数の計算に用いられる流量はマトリックス部ではなく主 に巨視き裂を通るものと考えられる.したがって,本試 験結果は岩石の種類が,巨視き裂の水の流れやすさに影 響を与えていることを示している.巨視き裂の透水係数 の違いは,主にき裂幅やラフネスの違いが反映している と考えられる.き裂幅やラフネスは,母岩を構成する粒 子の形状やサイズ等に影響を受けるため,母岩の違いが

表-2 透水係数の変化率.

振幅	0.15 MPa	1.5 MPa
KM1	1.16	23.8
KM2	0.84	0.51
KM3	1.16	1.07
SR1	1.03	1.22
SR2	1.00	1.02
SR3	1.35	1.34

巨視き裂の透水係数に反映したのは妥当な結果である. ただし、破断面のラフネスは岩石引張強さや破壊時の応 力状態等も大きく影響するため、ラフネスとの比較など による詳細な検討が今後必要である⁸.

表-2に、振動前の透水係数で正規化した透水係数の変 化率を示す.オーダーの違う変化のあったKM1のデー タを除くと、透水係数の変化率については、母岩の影響 が明瞭に見られなかった.振動による透水係数の変化は、 母岩の影響が支配的と考えられるラフネスやき裂面のか み合わせの違いよりも、振動による微粒子の移動の影響 が大きいと考えられる.Elkhoury et al. (2011)は、地震時に おける断層き裂内の微粒子の移動に関する研究を行って おり、本研究においても、微粒子の影響が現れたと考え ることが妥当である⁷.微粒子が透水係数に与える影響 をより定量的に把握するためには、流体中の微粒子の総 量を計測し、間隙水圧振動前後で移動した微粒子と透水 係数の変化の関係を調べることが必要であり、今後の課 題とする.

4. まとめ

本研究では、動的な間隙水圧が破壊した岩石の透水係 数の変化に与える影響について、母岩の透水係数の異な る来待砂岩と白浜砂岩を用いて実験的な検討を行った.

限られた試料数ではあるものの,間隙水圧の振動によって透水係数が上昇する傾向が得られた.破壊した岩石の透水係数は,巨視き裂のき裂幅やラフネスの影響を受

けていることが示唆された.間隙水圧の振幅の影響は明 瞭には認められなかった.本試験では、下流側は非排水 としており、振動は間隙水圧の変動に焦点を絞ったが、 今後は下流側を排水条件にした流量の変化について検討 を行う予定である.また、本試験は砂岩のみを対象とし たため、花崗岩などの結晶質岩の影響についても検討を 行う.

謝辞:本研究の一部はJSPS科研費JP19K15092の助成を受けて遂行したものである.ここに記して感謝の意を表する.

参考文献

- Manga, M., Beresnev, I., Brodsky, E.E., Elkhoury J.E., Elsworth, D., Ingebristen S.E., Mays, D.C., and Wang, C. : Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, expreiments, and mechanisms, *Reviews of Geophys.*, Vol.50, 2012.
- Wang, C. and Manga, M. : Earthquake and water, *Encyclopdia of complexity and systems science*, 2014.
- 3) Asahina, D., Pan, P-Z., Sato, M., Takeda M., and Takahashi, M. : Hydraulic and Mechanical Responses of Porous Sandstone During Pore Pressure-Induced Reactivation of Fracture Planes: An Experimental Study, *Rock Mechanics* and Rock Engineering., Vol.52, pp 1645-1656, 2019.
- 高橋学・薛自求・小出仁:稲田花崗岩・白浜砂岩・来 待砂岩・新第三期泥質岩の透水性について、地質調査 所月報, Vol. 42, No. 6/7, pp.305-331, 1991.
- Sato, M., Kato, M., and Takahashi, M. : Experimental evaluation of specific storage in mudstone considering error using the flow pump method, *Materials Transacitions*, Vol. 57, No.2, pp.112-118, 2016.
- 林為人・高橋学・李小春・鈴木清史:異なる方法で被 覆した白浜砂岩供試体の透水係数測定結果の比較,応 用地質, Vol.40, No.5, pp.299-305, 1999.
- Elkhoury, J.E., Niemeijer, A., Brodsky, E.E. and Marone C. : Laboratory observations of permeability enhancement by fluid pressure oscillation of in situ fractured rock, *Journal of Geophysical Research*, Vol.116, 2011.
- 佐藤稔・朝比奈大輔・高橋学:真三軸試験で形成された来待砂岩のは断面性状解析,応用地質,Vol.60, No.3, pp.110-119, 2019.

EFFECT OF PORE PRESSURE OSCILLATION ON PERMEABILITY CHANE OF FRACTURED SANDSTONES

Yang LI, Shogo KAWAKITA, and Daisuke ASAHINA

We conducted laboratory experiments to study the effect of pore pressure oscillation on the permeability of fractured sandstones. The sandstones used were Shirahama sandstone, which has relatively higher permeability, and Kimachi sandstone, which has lower permeability. The results show that the permeability of both rocks tends to increase due to the oscillation of pore pressure. The permeability of the fractured rock was higher in Shirahama sandstone than in Kimachi sandstone, and the difference was clearly confirmed.