温度を制御した環境下での高強度高緻密コンクリートの 高精度透水係数測定†

加藤 昌治* 奈良 禎太** 渋谷 和俊***

Precise Permeability Measurement for High Strength and Ultra Low Permeability Concrete under Controlled Temperature

by

Masaji KATO*, Yoshitaka NARA** and Kazutoshi SHIBUYA***

High strength and ultra low permeability concrete (HSULPC) is being considered as a material used to package transuranic (TRU) waste for disposal in geological repositories. Therefore, information on the permeability of HSULPC is essential. Permeability tests need to be highly accurate to determine the hydraulic conductivity of HSULPC because of its ultralow permeability. In our study, we measured the permeability of HSULPC samples using the transient pulse method. The temperature of the concrete was finely controlled and held constant. The hydraulic conductivities were determined from the measurements to be around 10^{-13} to 10^{-12} m/s for confining pressures between 2 and 10 MPa. The pore pressure was a constant 1 MPa. The results further showed that the permeability of HSULPC had a hysteretic dependence on the effective confining pressure. We found that the hydraulic conductivity of HSULPC is comparable to or less than that of intact Toki granite obtained from Gifu Prefecture in central Japan. It was also considered that the hydraulic conductivity of HSULPC stabilized at around 10^{-13} m/s after being buried and stressed. The high density and impermeability of HSULPC would enable it to effectively confine ^{14}C radionuclides found in TRU waste.

Key words:

High strength and ultra low permeability concrete, Permeability, Transient pulse method,
Radioactive waste disposal

1 緒 言

放射性廃棄物の地層処分は、人工バリアのベントナイトによる放射性核種の移行の抑制、岩盤などの天然バリアによる放射性核種の吸着による処分システムの閉じ込め機能により設計が行われている^{1,2)}。それゆえ、これらの材料特性の調査は不可欠である。しかしながら、使用済み核燃料の再処理施設等から発生する長半減期低発熱放射性廃棄物 (Transuranic waste, TRU 廃棄物) においては、ヨウ素(^{129}I)や炭素(^{14}C)等の人工バリアや天然バリアに吸着されにくい核種の濃度が高い廃棄物が存在する。そのような場合でも十分な閉じ込め機能が働くように、安全評価上の主要核種である ^{129}I や ^{14}C に対して適用できる代替処分技術の検討が行われている³⁾。それらのうち、 ^{14}C への対策のための代替技術として、廃棄体パッケージの長期閉じ込めによる方法が考えられている⁴⁾。

長期閉じ込め型のコンクリート容器は、その代替技術の一つである。具体的には、Fig.1 に示すように、キャニスタに入れた放射性廃棄物を鋼製ボックスに入れ、その周りを高い緻密性を持つ高強度高緻密コンクリート

(High strength and ultra low permeability concrete, HSULPC) を選定して、覆うことで、 ^{14}C からの放射能が十分に減衰するまでの長期間 (6 万年間程度)、放射性物質と地下水との接触を防止するというものである⁴⁾。それを実現させるためには、高強度高緻密コンクリートの透水性やき裂進展・閉塞挙動の時間依存性など様々な観点から調査を行う必要がある。

奈良ら⁵⁾および Nara et al.⁶⁾は、高強度高緻密コンクリートを用いてサブクリティカルき裂進展の測定を行い、周辺環境がき裂進展速度に及ぼす影響を調べている。その結果、水中環境でき裂進展速度が顕著に増大すること⁵⁾、大気環境下では温度・湿度ともにき裂進展速度に影響を及ぼさないことを示している⁶⁾。Fukuda et al.^{7,8)}は、巨視き裂を含む高強度高緻密コンクリートを用いて、人工海水中でき裂閉塞について調べている。特に、き裂閉塞に伴う開口幅の変化を X 線 CT を用いて非破壊で観察し、材料の端部でき裂閉塞が起こりやすいことを報告した⁷⁾。さらに、き裂開口幅が小さい場合に高強度高緻密コンクリートのき裂閉塞が生じやすいことが示されている⁸⁾。また、電子顕微鏡観察を行った結果、炭酸カルシウムの析出

† 原稿受理 令和元年8月6日 Received Aug. 6, 2019 ©2020 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 北海道大学 大学院工学研究院 〒060-8628 札幌市北区北13条西
Faculty of Eng., Hokkaido Univ., Kita-ku, Sapporo 060-8628

** 正 会 員 京都大学 大学院工学研究科 〒615-8540 京都市西京区京大大学桂
Graduate School of Eng., Kyoto Univ., Nishikyo-ku, Kyoto, 615-8540

*** (株)太平洋コンサルタント 〒103-0004 東京都中央区東日本橋
Taiheiyo Consultant Co., LTD, Chuo-ku, Tokyo, 103-0004

が水中での高強度高緻密コンクリートのき裂閉塞に大きく寄与していることが示された⁹⁾。

このように、高強度高緻密コンクリートのき裂進展とき裂閉塞に関しては様々な手法によって研究が進められてきた。一方で、透水係数の評価も試みられているが^{10),11)}、高強度高緻密コンクリートは緻密な材料であり透水性が低く、インプット法¹²⁾等の従来法では測定が難しいことから、試験手法によって結果がばらつくことが報告されている^{13),14)}。したがって、低透水性材料に対応した試験手法での測定が必須であると考えられる。

そこで本研究では、トランジェントパルス法¹⁵⁾により、高強度高緻密コンクリートの透水係数測定を行った。特に、周辺環境の温度変化を抑えた透水試験を行い、高精度に透水係数を評価している。また、廃棄体定置後の処分施設の埋め戻しに伴い発生する外力の影響を考慮して、透水係数の拘束圧依存性も検討した。さらに、難透水性岩石の代表例である花崗岩の透水係数との比較を行うことにより、高強度高緻密コンクリートの透水特性の調査を行った。

High-Strength and Ultra-Low Permeability Concrete

Fig. 1 Schematic illustration of alternative concept using HSULPC to radioactive waste packaging⁹⁾.

2 試 料

本研究では、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)¹⁶⁾に従い設計された高強度高緻密コンクリートを試料として用いる。Table 1 に高強度高緻密コンクリートの組成を示す。本研究で用いた試料は、型枠に打設した後2日間20℃の恒温室中に静置し、型枠を取り除いた後2日間、90℃の蒸気養生を施した。このときの相対湿度は99%である。その後、大気環境下において2ヶ月以上無載荷状態で保存したものを用意した。この材料の直交する3方向で測定したP波速度は4.98, 5.06, 5.08 km/s、一軸圧縮強度は203 MPa、圧裂引張強度は10.9 MPaである⁹⁾。

本試験には、Fig. 2 に示すような円柱状供試体を用いた。サイズは、直径50 mm、高さ25 mmである。供試体は、デシケーター内で蒸留水に沈めた状態で数時間真空脱気

し、含水飽和させた。その後、圧力容器にセットするまでの間、デシケーター内で蒸留水に沈めたまま負圧を作用させた状態で保存した。

Table 1 Composition of HSULPC⁵⁾.

Contained amount	[kg/m ³]
Low-heat Portland cement	744~1014
Silica fume	158~496
Fillers (fly ash, blast furnace slag, etc.)	225~541
Aggregates	631~947
Water-reducing admixture	24
Water	180

Fig. 2 Photo of cylindrical specimen of HSULPC for permeability test.

The diameter and height of the specimen are 50 and 25 mm, respectively.

3 試 験 方 法

3・1 透水試験システム

本研究では、Fig. 3 に示すような透水試験システムを使用した。本システムの特徴は、実験室内に建てられた恒温室が三重の断熱構造となっており^{17),18)}、恒温室内の一番外側にルームエアコン(東芝社製RAS-2851ST)を設置して空調し、圧力容器が置いてある一番内側の断熱スペースには熱源や光源を置いていないことである(Fig. 4)。これらの結果として、白金測温抵抗体で測定された圧力容器周囲の環境温度変化は、試験中は±0.1℃以内に抑えられている。

3・2 透水試験手法

3・1 節で説明した透水試験システムは、複数種類の透水試験手法を連続して適用可能である。本研究では、供試体である高強度高緻密コンクリートは難透水性と予想されていたため、それに最も適しているトランジェントパルス法¹⁵⁾を採用した。

トランジェントパルス透水試験の実験手順は以下のようである。

(1) 含水飽和した供試体を二つの間隙水供給用のエンドピースの間にはさみ、熱収縮チューブで側面を覆うことによって、封圧媒体が岩石内に侵入するのを防ぐ。それを固定円盤にはさみ、圧力容器の上蓋の裏側(内側)に設置

Fig. 3 Schematics of permeability test system.

(IC: Triple insulated chamber, AC: Air conditioner, RT1-3: Resistance thermometer 1 to 3, BR: Barometer, PT: Pressure transducer, DPT: Differential pressure transducer, PV: Pressure vessel, ER: Extra reservoir, UL: Upstream line, DL: Downstream line, SV: Separation valve, PV: Pressure pulse valve, EP: Evacuating port, AP: Air discharge port, WP: Water supply port, SC: Specimen, EC: End caps, HT: Heat shrinkable tube, DP: Double plunger pump, SP: Syringe pump, CU: Controlling unit for syringe pumps, LG: Data logger, PC: Laptop computer.)

Fig. 4 Photo of triple insulated chamber.

し、間隙水配管類を接続して、封圧媒体（水）で満たされている圧力容器内に収める。

(2) ダブルプランジャーポンプで封圧を 1 MPa 程度まで上げ、それを一定に維持した状態で、貯留槽や配管・継手・バルブに残っている空気や間隙水に溶存している気泡を

取り除くために真空脱気をする。脱気後はシリンジポンプを使って間隙水を供給し、一定圧力（封圧の半分以下の値）を維持する。

(3) 断熱室内の環境温度変化や一定圧力で動作させているシリンジポンプの流量をモニタリングする。これにより、室温の安定化を図ると同時に漏水のチェックも行う。

(4) 室温の変化が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内で漏水がない（シリンジポンプの流量が安定的にゼロ）と判断した時点で、ポンプを操作し封圧と間隙水压を所定の値に設定する。今回の実験では、封圧を 2~10 MPa で設定し、間隙水压は 1 MPa とした。封圧と間隙水压を調整した後は、供試体が落ち着くまで数時間の静置が必要である。なお、封圧の変化経路は、2, 3, 4, 6, 8, 10, 8, 6, 4, 3, 2 MPa の順番とし、ヒステリシスの確認も行った。

(5) 静かにセパレートバルブ（上流側と下流側を切り離すバルブ）を閉じる。このとき、もし前段階で発見できなかった微小な漏水が起っていた場合には、それが差圧の変化に表れることになる。その場合、(3) の手順に戻り、再度調整を実施する。なおセパレートバルブを閉じた後に供試体内の水頭分布が一樣となるには、供試体の透水性にもよるが、数時間が必要である。

(6) 差圧の変動が見られなくなっていれば、所定のパルス圧力（25~100 kPa）を上流側に負荷する。負荷されたパルス圧が減衰し、差圧がパルスをかける前の状態に戻ったときに実験を終了する。なお、封圧が 2, 3, 4 MPa のときには透水試験を 2 回ずつ実施している。それ以外の封圧では、試験に時間を要するため、1 回だけ透水試験を実施している。

(7) 透水試験で得られた差圧の減衰データに対して、Brace et al.¹⁵⁾に基づき加藤ら¹⁹⁾で提案された解を用いて、非線形最小二乗法により透水係数だけを評価する。

$$\frac{\Delta h(t)}{H} = \exp \left\{ -\frac{KA}{l} \left(\frac{1}{S_u} + \frac{1}{S_d} \right) t \right\} \quad (1)$$

ここで、 t はパルス負荷後の経過時間 [s]、 $\Delta h(t)$ は上流側と下流側の貯留槽内の水頭差 [m] であり、それを水頭パルスの大きさ H [m] で規格化している。実験で圧力を用いる場合には、差圧をパルス圧力で規格化すれば、規格化された水頭差をそれで置き換えてそのまま扱うことができる。 l と A はそれぞれ供試体の高さ [m] と断面積 [m²] である。 K は供試体の透水係数 [m/s] を表す。式中の S_u と S_d は、上流側と下流側それぞれの貯留槽と配管を含めた貯留系の圧縮貯留量と定義される。これらは、Zhang et al.²⁰⁾で示された手法より求めることができ、今回の実験では、 $S_d = S_u = 8.5 \times 10^{-10}$ [m²] である。

4 試験結果

トランジェントパルス法による透水試験では、差圧の減衰データから透水係数を評価する。環境温度の変化があると、差圧計固有の温度依存性および上流側と下流側

で貯留槽容積や熱伝達速度に違いがある場合に生じる熱膨張（あるいは収縮）圧の差によって、この差圧の減衰データに乱れが生じることになる。本実験で得られた差圧の減衰曲線の一つを Fig. 5 に示す。この図は、封圧 2 MPa、間隙圧 1 MPa の条件下で、パルス圧を 28 kPa かけたときの実験データを表している。

この試験中の恒温室内の温度変化は Fig. 6 のようであった。周期的な上下動のある下方の線がエアコンで空調された恒温室内の最も外側の温度変化を表しており、エアコンの動作を如実に反映したものとなっている。一方で、Fig. 6 中の上方の線が恒温室内の最も内側にある圧力容器周りの温度変化を表しており、試験中の温度変化は 0.1℃程度に抑えられていることが確認できる。この温度制御が、差圧の実験データの正確さを保障し、透水係数の高精度な測定を実現する¹⁷⁾。

このような差圧の減衰データから評価された高強度高緻密コンクリートの透水係数をまとめると、Fig. 7 のようになる。このコンクリートの透水係数として $10^{-13} \sim 10^{-12}$ m/s のオーダーの値が得られている。この図から、封圧の載荷過程では、封圧の増加に伴い透水係数が減少する（有効）封圧依存性が認められる。また、封圧の除荷過程で透水係数が元の値に戻らないヒステリシスの現象も示されている。なお、Fig. 7 には、次節の考察で使用する花崗岩の透水係数もあわせてプロットしてある。

Fig. 5 Decline curve of differential pressure during transient pulse permeability test.

Fig. 6 Temperature variations in air-conditioned room during permeability test corresponding to Fig. 3.

Fig. 7 Hydraulic conductivities of HSULPC comparing to those of intact Toki granite.

5 考 察

緒言で述べたように、高強度高緻密コンクリートを用いてき裂進展やき裂修復に関する研究が行われてきた^{5)~9)}。この材料では水中環境下でき裂進展が促進されるため、廃棄体埋め戻し後に考えられる坑道が再冠水状態となる場合、き裂進展の促進による水路の形成には注意が必要と言える。ただし、鉱物析出によるき裂閉塞が水中環境下で認められているため、放射性廃棄物の閉じ込めに適した材料であると考えられる。ゆえに、この材料の透水係数測定を行うことは極めて有意義である。

一般に、低透水性材料の透水試験を行う場合、試験時間が長くなり、環境温度変化の影響を受けるため、精度の低い結果が得られることになる。本研究で採用したトランジェントパルス法は、他の手法に比べて試験時間を短くすることができるため、温度変化の影響を受けにくくすることができる。さらに、本研究では、恒温室内で温度を制御した試験を実施することにより、高精度な透水試験を実施している。Fig. 6 にあるように、恒温室内の最も内部の圧力容器周辺の温度変化は、試験中において 0.1℃程度であった。このような温度条件下でトランジェントパルス透水試験を実施することにより、低透水性の高強度高緻密コンクリートの透水係数の測定に成功している。

Fig. 7 には、高強度高緻密コンクリートの透水係数に加えて、花崗岩の透水係数もプロットされている。花崗岩の透水係数としては、Nara et al.²¹⁾で得られたインタクトな土岐花崗岩の透水係数を使用している。両者の比較から、高強度高緻密コンクリートの透水係数は、インタクトな土岐花崗岩のそれと同程度か、それよりも低い値を示していることがわかった。したがって、このコンクリートは緻密な材料であり、透水性が低く、放射性核種の閉じ込めには有効であると考えられる。

固体材料中に含まれるき裂や空隙のネットワークは水の流路となるため、き裂や空隙の存在が材料の透水特性に大きく影響する²²⁾。緻密な材料では、開口したき裂が導入されると透水係数が大きく増大することが知られ

ており²³⁾⁻²⁵⁾, き裂が圧力や鉱物充填の影響により閉塞すると透水係数が低下することが知られている²⁶⁾⁻³⁰⁾. 高精度な透水試験から高強度高緻密コンクリートは透水係数が極めて低いことが示されたが, わずかに存在するであろう流路を確認することは極めて重要である. そこで, 薄片を作成して, 顕微鏡観察を行った. その結果, 全体的に緻密であることが確認され, 連結性の乏しい球形の空隙と透水性に寄与すると思われるマイクロクラックの存在が確かめられた. マイクロクラックにフォーカスして撮影した顕微鏡写真を Fig. 8 に示す. この写真ではクラックが画像を縦に貫いているが, その開口幅は $1\mu\text{m}$ 程度と小さく, アスペクト比は 10^3 未満と低いことが確認できる.

Fig. 8 Photomicrograph of HSULPC showing microcracks.

一般にき裂や空隙のアスペクト比が高くなると, それらを力学的に閉塞させるには高い圧力が必要となる³¹⁾. Benson et al.³²⁾や奈良ら³³⁾の研究では, アスペクト比が高い空隙が数多く含まれる材料の場合, 圧力が上昇した場合でも空隙の閉塞が起らず, 透水係数が変化しないことが示されている. ゆえに, Fig.8 のようなアスペクト比の低いき裂が, 封圧の増加に伴い閉塞するため, 透水係数が低下する現象が現れたと考えられる.

また, 封圧の除荷時に透水係数が元の値に戻らないヒステリシスについては, 岩石の透水試験の結果においてもよく似た傾向が示されている³⁴⁾. TRU 廃棄物のパッケージを定置した後は, 緩衝材や埋め戻し材で処分施設全体を埋め戻すことになる. その結果, 緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧の発生, 埋め戻しに伴う土被り圧の増大, 地下水位の上昇による間隙圧の増大が想定される. このような過程により, 地下に埋設されて外力を受けた後は, 透水係数は 10^{-13} m/s のオーダーで安定すると考えられる.

6 結 言

本研究では, 高強度高緻密コンクリートを供試体として, 封圧を 2~10 MPa, 間隙圧を 1 MPa 一定として, 温度を制御した環境で高精度なトランジェントパルス透水試験を実施した. その結果, 高強度高緻密コンクリートの透水係数は 10^{-13} ~ 10^{-12} m/s のオーダーであった. このコンクリートの透水係数は, インタクトな花崗岩のそれと同程度か, それよりも低い値を示した. また, 透水係数にはヒステリシスが見られた. つまり, Fig.7 に示す通り, 静

水圧載荷時には圧力上昇とともに透水係数は低下していくが, 除荷時には透水係数は低いまま保たれていた.

したがって, 高強度高緻密コンクリートは, 緻密で低透水性の材料であることから, TRU 廃棄物における放射性核種 ^{14}C の長期閉じ込めには有効であると考えられる. また, このコンクリートの透水係数にはヒステリシスが見られている. TRU 廃棄物のパッケージを定置した後は, 緩衝材や埋め戻し材で処分施設全体を埋め戻すことになる. その結果, 緩衝材や埋め戻し材の膨潤圧の発生, 埋め戻しに伴う土被り圧の増大, 地下水位の上昇による間隙圧の増大が想定される. このような過程により, 地下に埋設されて外力を受けた後は, 透水係数は 10^{-13} m/s のオーダーで安定すると考えられる.

参 考 文 献

- 1) Nuclear Waste Management Organization of Japan, "Chisou shobun jigyou no anzen kakuh", NUMO-TR-11-01 (2011).
- 2) Nuclear Waste Management Organization of Japan, "Houkatsuteki gijyutsu houkoku: wagakuni ni okeru anzenna chisou shobun no jitsugen (review)", NUMO-TR-18-03 (2018).
- 3) Japan Nuclear Cycle Development Institute, "TRU haikibutsu shobun gijyutsu kentou sho (2nd TRU report)", JNC TY1400 2005-013, FEPC TRU-TR2-2005-02 (2005).
- 4) H. Owada, N. Nakanishi, H. Asano, H. Ogawa, D. Mori, T. Hiraishi and K. Shibuya, "Development of waste packages for the long-term confinement of C-14 in TRU waste disposal: 1. Study on the long-term durability of the concrete package made from high strength and ultra low permeability concrete", Journal of Nuclear Fuel Cycle and Environment, Vol.15, No.1, pp.3-11 (2009).
- 5) Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko, "Subcritical crack growth and long-term strength in rock and high-strength and ultra low-permeability concrete", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.58, No.6, pp.525-532 (2009).
- 6) Y. Nara, M. Takada, D. Mori, H. Owada, T. Yoneda and K. Kaneko, "Subcritical crack growth and long-term strength in rock and cementitious material", International Journal of Fracture, Vol.164, pp.57-71 (2010).
- 7) D. Fukuda, Y. Nara, Y. Kobayashi, M. Maruyama, M. Koketsu, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko, "Investigation of self-sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete in water using micro-focus X-ray CT", Cement and Concrete Research, Vol.42, pp.1494-1500 (2012).
- 8) D. Fukuda, Y. Nara, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko, "Influence of fracture width on sealability in high-strength and ultra-low-permeability concrete in seawater", Materials, Vol.6, pp.2578-2594 (2013).
- 9) D. Fukuda, M. Maruyama, Y. Nara, D. Hayashi, H. Ogawa and K. Kaneko, "Observation of fracture

- sealing in high-strength and ultra-low-permeability concrete by micro-focus X-ray CT and SEM/EDX", *International Journal of Fracture*, Vol.188, No.2, pp.159-171 (2014).
- 10) H. Sakamoto, A. Takei, T. Kawasaki, M. Katagiri, T. Nawa and K. Uomoto, "Koukyoudo kouchimitsu mortar wo mochiita housyasei haikibutsushobun haikitai no kaihatsu (1)", *Proceedings of 57th JSCE Annual Meeting*, pp.487-488 (2002).
 - 11) K. Shibuya, H. Ogawa, D. Mori and H. Owada, "Chika kankyou ni okeru koukyoudo kouchimitsu concrete no mizu shintou kyodou ni kansuru kentou", *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol.30, No.1, pp.567-572 (2008).
 - 12) J. Murata, "Studies on the permeability of concrete", *Transactions of the Japan Society of Civil Engineers*, No.77, pp.69-103 (1961).
 - 13) E. Sakata, M. Hironaga, Y. Yoshizawa and S. Komatsu, "Jinkou-barrier-cement-kei zairyou no tousui-kakusan keisu sokutei houhou no kentou", *Proceedings of 57th JSCE Annual Meeting*, pp.493-494 (2002).
 - 14) S. Miyahara, E. Oowaki, A. Ishihara and T. Igarashi, "Transient-pulse-hou oyobi suigin-atsunyu-hou wo mochiita nan-toususei mortar no tousui-keisu", *Proceedings of 57th JSCE Annual Meeting*, pp.955-956 (2002).
 - 15) W.F. Brace, J.B. Walsh and W.T. Frangos, "Permeability of granite under high pressure", *Journal of Geophysical Research*, Vol.73, No.6, pp.2225-2236 (1968).
 - 16) Concrete Committee of Japan Society of Civil Engineers, "Chou koukyoudo sen-i-hokyou concrete no sekkei-sekou shishin (an)", *Concrete Library*, No.113 (2004).
 - 17) M. Kato, Y. Nara, D. Fukuda, M. Kohno, T. Sato, T. Sato and M. Takahashi, "Importance of temperature control in surrounding environment during permeability test for measuring hydraulic constants of rock", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.65, No.7, pp.489-495 (2016).
 - 18) M. Kato, Y. Nara, Y. Okazaki, M. Kohno, T. Sato, T. Sato and M. Takahashi, "Application of transient pulse method to measure clay permeability", *Materials Transactions*, Vol.59, No.9, pp.1427-1432 (2018).
 - 19) M. Kato, M. Takahashi and K. Kaneko, "Highly precise evaluation of hydraulic constants of low-permeability rocks using the transient pulse method", *Journal of MMIJ*, Vol.129, No.7, pp.472-478 (2012).
 - 20) M. Zhang, M. Takahashi, R.H. Morin and T. Esaki, "Evaluation and application of the transient-pulse technique for determining the hydraulic properties of low-permeability rocks - Part 2: experimental application", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.23, pp.91-99 (2000).
 - 21) Y. Nara, M. Kato, R. Niri, M. Kohno, T. Sato, D. Fukuda, T. Sato and M. Takahashi, "Permeability of granite including macro-fracture naturally filled with fine-grained minerals", *Pure and Applied Geophysics*, Vol.175, pp.917-927 (2018).
 - 22) Y. Gueguen and J. Dienes, "Transport properties of rocks from statistics and percolation", *Mathematical Geology*, Vol.21, No.1, pp.1-13 (1989).
 - 23) P.A. Witherspoon, J.S.Y. Wang, K. Iwai and J.E. Gale, "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock failure", *Water Resources Research*, Vol.16, pp.1016-1024 (1980).
 - 24) J.B. Walsh, "Effect of pore pressure and confining pressure on fracture permeability", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Vol.18, pp.429-435 (1981).
 - 25) C. David, "Geometry of flow paths for fluid transport in rocks", *Journal of Geophysical Research*, Vol.98, pp.12267-12278 (1993).
 - 26) P. Benson, A. Schubnel, S. Vinciguerra, C. Trovato, P. Meredith and R.P. Young, "Modeling the permeability evolution of microcracked rocks from elastic wave velocity inversion at elevated isostatic pressure", *Journal of Geophysical Research*, Vol.111, B04202, doi:10.1029/2005JB003710 (2006).
 - 27) Y. Nara, P.G. Meredith, T. Yoneda and K. Kaneko, "Influence of macro-fractures and micro-fractures on permeability and elastic wave velocities in basalt at elevated pressure", *Tectonophysics*, Vol.503, No.1-2, pp.52-59 (2011).
 - 28) J. Fortin, S. Stanchits, S. Vinciguerra and Y. Gueguen, "Influence of thermal and mechanical cracks on permeability and elastic wave velocities in a basalt from Mt. Etna volcano subjected to elevated pressure", *Tectonophysics*, Vol.503, No.1-2, pp.60-74 (2011).
 - 29) G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara and Z. Wu, "Influence of gouge thickness on permeability of macro-fractured basalt", *Journal of Geophysical Research - Solid Earth*, Vol.121, pp.8472-8487 (2016).
 - 30) P. Pérez-Flores, G. Wang, T.M. Mitchell, P.G. Meredith, Y. Nara, V. Sarkar and J. Cembrano, "The effect of offset on fracture permeability of rocks from the Andean Southern Volcanic Zone, Chile", *Journal of Structural Geology*, Vol.104, pp.142-158 (2017).
 - 31) J.B. Walsh, "The effect of cracks on the compressibility of rock", *Journal of Geophysical Research*, Vol.70, pp.381-389 (1965).
 - 32) P.M. Benson, P.G. Meredith, E.S. Platzman and R.E. White, "Pore fabric shape anisotropy in porous sandstones and its relation to elastic wave velocity and permeability anisotropy under hydrostatic pressure", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol.42, pp.890-899 (2005).
 - 33) Y. Nara, R. Nakabayashi, T. Yoneda, K. Kaneko and P.G. Meredith, "Permeability and elastic wave velocities in sandstones under hydrostatic pressure", *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol.61, No.3, pp.214-221 (2012).
 - 34) Z. Xue, Y. Ishijima and M. Takahashi, "Permeability and microgeometry of sandstones under hydrostatic pressure", *Journal of MMIJ*, Vol.108, No.11, pp.769-775 (1992).