

ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察[†]

穂刈利之^{††} 沖原光信^{††} 石井卓^{††} 小島圭二^{†††}

ベントナイト混合土の難透水性が、ガスの透過により影響を受けるか否か、数種類の流体を用いた透水・透気試験および顕微鏡観察により検討した。本試験では、ベントナイト混合土にヘリウムガスを透過させ、その前後の透水性を測定した。その結果、ガスはベントナイト混合土中に選択的に気みちを形成すること、および再飽和時にはベントナイトは膨潤することで気みちを充填するため、透水性は変化しないことが確認できた。
キーワード：ベントナイト混合土、ガスの透気、自己修復性、透水性

Effects of gas permeation on the impervious characteristics of bentonite/sand mixtures were studied experimentally by conducting permeability tests with various fluids and microscopic observations. In this test, hydraulic permeabilities were measured before/after helium gas was applied to permeate through the mixtures.

It was found that gas formed preferential paths to migrate through the mixtures, and that the bentonite/sand mixtures never deteriorated in impervious capacity because the paths were-filled with swelling bentonite in re-saturation.

Key word : Bentonite / sand mixtures, Gas permeation, Self-healing, Hydraulic permeability

1. 概要

ベントナイト混合土は、膨潤性に富んだモンモリロナイトを含有するため、遮水性に優れている。そのため、放射性廃棄物の処分場などにおいては天然の遮水材[1]として期待されており、廃棄物もしくは埋設施設の外周を取り囲むような形態で使用される。一方、廃棄物と地下水の反応によって処分場から数種類のガスが発生する可能性があると考えられている[2]。この場合、ベントナイト混合土層の内側にはガスが蓄積し、やがては透過することになる。

ベントナイト混合土の透水機構については、小峯[3]が報告しており、水によって膨潤したベントナイトゲルが骨材間隙を充填するため、ベントナイト混合土は難透水性を発揮するとしている。また、Pusch[4]はベントナイト混合土の構造を微視的にモデル化し、様々な要因の中でも骨材間隙中のベントナイトゲル密度がその透水特性、膨潤圧力およびガス透過特性に影響を

与えるとしている。この中でPuschはベントナイト混合土のガス透過特性として、ガスがベントナイト混合土に侵入を開始する圧力（以下、臨界圧力と呼ぶ）に着目しており、低配合の混合土の場合、臨界圧力と膨潤圧はほぼ等しくなるとしている。また、Pusch[5]はベントナイト混合土に飽和過程とガス加圧過程を繰り返し作用させる実験を行い、臨界圧力の値に変化が見られない結果を得たことから、特性値の再現性つまり自己修復性を持つと説明している。

本報告では、ベントナイト混合土に期待される遮水性が、ガス透過という影響を受けても変化しないことを自己修復性と捉え、実験・考察を行った。

2. 試験方法

遮水性の程度は浸透率で表現されるため、飽和したベントナイト混合土にガスが透過する前後で、透水試験を実施し、その透水性がどのように変化するかを調査した。また、ガス破過後の透水試験において、ベントナイトと流体との親和性の違いにより、修復の状態に差が生ずるか否かを検討するため、一部疎水性の流体を使用して、比較データを取得した。

さらに、透水性という物性値からだけではなく、構造的な見地からも自己修復性を理解するため、ガス破過後における供試体の顕微鏡観察も併せて実施した。

[†] Experimental Study on Self-healing of Bentonite/Sand Mixtures in Hydraulic Permeability, by Toshiyuki Hogari, Mitsunobu Okihara(okihara@atom.shimz.co.jp.), Takumi Ishii and Keiji Kojima

^{††} 清水建設株式会社 電力・エネルギー本部 Shimizu Corporation Power & Energy Project Division 〒105-07 東京都港区芝浦1-2-3 シーパンス館

^{†††} 東京大学地球システム工学科 Dept. Geosystem Engineering, The University of Tokyo

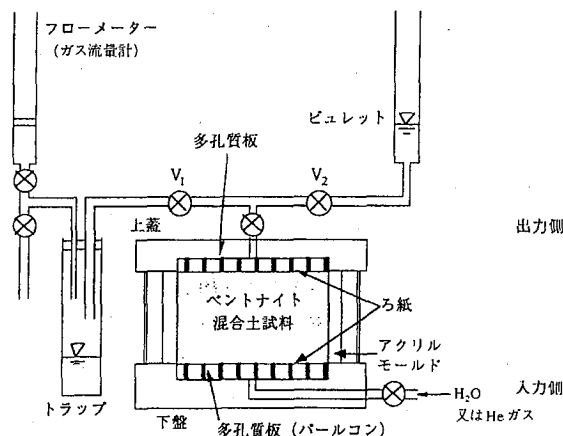


図1 1軸透水・透気ガス試験装置

3. 試験装置

本試験で使用した1軸透水・透気試験装置の概念図を図1に示す。モールドは内径100mm、高さ50mmである。装置側面あるいは供試体上端面を目視観察できるようにアクリル製とした。

顕微鏡による観察の際には供試体を試験装置から取り出して直接観察した。供試体観察に使用した装置は、KEYENCE社のモニタマイクロスコプVH-5910である。映像をビデオテープに録画するため連続観察ができ、また、画面のハードコピーによって写真にする

ことも可能な装置である。使用レンズ(同社製VH)を交換することにより、倍率を50,100,200,500,1000倍に出来る。

4. 試験条件

自己修復性評価のための1軸透水・透気試験を、様々な供試体条件において実施した。その供試体条件の一覧を表1に示す。

使用したベントナイトは、クニミネ工業(株)製のナトリウム型ベントナイト、クニゲルVI[6]である。

表1 供試体条件一覧

試験条件				突固め試験結果 ⁴⁾	
B/B ¹⁾ +S ²⁾ (%)	細粒分 ³⁾ 含有率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	最大乾燥密度 (g/cm ³)	最適含水比 (%)
20	8	1.682	16.2	1.732	16.2
	1	1.774	14.0		
17.5	1	1.714	14.1	1.794	14.1
		1.734	14.1		
		1.818	14.1		
15	8 ⁵⁾	1.626	17.9	1.762	15.8
		1.667	15.8		
	1	1.675	15.8		
		1.780	12.6		
		1.806	14.6		
		1.817	14.6		
	1.812	14.6	1.799	14.6	

1) B: ベントナイトの乾燥重量を示す

2) S: 砂の乾燥重量を示す

3) 細粒分: 砂より粒径の小さい(0.075mm以下)のものを示す

4) 突固め試験はJIS A 1210に則して実施した

5) 再飽和にケロシンを使用した供試体

また、骨材には、第四紀洪積世の段丘堆積砂のうち、細粒分（粒径が砂より小さい0.075mm以下のものを示す）含有率の差に着目して代表的な2材料（細粒分の多・少）を使用した。

疎水性流体による再飽和および透水試験は比較データ取得のものであるため、1条件に絞って実施した。また、疎水性流体には入手の容易なケロシンを採用した。

顕微鏡観察は定性的な挙動を把握することが目的であるため、上記と同様1条件に絞って実施した。

5. 手順

5.1 1軸透水・透気試験

(1) 作製

所定の含水比および乾燥密度となるように、砂、ベントナイト、水を計量する。その後、同材料をモールド内にて所定の方法（JIS A 1210[7]）により突固める。

(2) 飽和

通水圧0.2kgf/cm²程度にてモールド下部から注水する。出力側の通過水量をビューレットにて1日毎に測定し、単位時間の通過水量が一定となる時点を安定状態と見なし、飽和と判断した。

(3) 透水試験

バルブV1を閉じてV2を開き、入力側ではガス圧によって一定水圧を加え、出力側では通過水量をビューレットで測定する。

出力側流量は、ビューレット内の水位変化を目視観測することにより計測する。

圧力条件は0.1, 0.2, 0.3kgf/cm²の3圧力とする。

(4) 透気試験準備

上下部の蓋、多孔質板、ろ紙を外し、上部にはアクリル有孔板を設置する。下部多孔質板は乾燥させた後再設置し、ヘリウムガスで満たす。下部配管の水をヘリウムガスに置換し、上部アクリル有孔板より上部を水で満たす。

(5) ガス破過試験

0.1kgf/cm²のガス圧を作用させて、排水量の観察を行う。所定時間（1日）計測して、0.2kgf/cm²に昇圧する。

以下同様にして0.1kgf/cm²づつ昇圧し、排水量

の計測された圧力を初期移動圧とする。排水量は、出力側のビューレット内の水位変化を目視することで計測する。

その後は、所定時間（1日）ごとに0.2kgf/cm²づつ昇圧して、排水量を測定するとともに、ガス破過を観察する。ガス破過は供試体上部の目視観察によるものとして、破過圧および破過時間を測定する。

ただし、最大ガス圧は2.0kgf/cm²とする。

(6) 透気試験

バルブV2を閉じてV1を開き、入力側に破過した時のガス圧を作用させて透気量を測定する。透気量は、出力側におけるフローメーター内の水位変化で測定する。

ガス圧を段階的に上昇および下降させて、各ガス圧における透気量を測定する。

(7) 再飽和および透水試験

通水圧0.2kgf/cm²程度にてモールド下部から注水し、出力側の通過水量をビューレットで測定する。通過水量が安定した時点で再飽和と判断し、その流量と圧力により透水係数を算出する。

試験手順の流れを図2に示す。

5.2 顕微鏡観察

顕微鏡観察は次の状態における供試体の上表面にて実施する。

(1) 供試体作製直後

所定の乾燥密度および含水比となるよう、突固められた供試体は、作製直後は不飽和状態である。ベントナイトが飽和によって膨潤する前の供試体の観察を行う。

(2) 飽和完了後

供試体中の間隙は、水によって膨潤したベントナイトゲルで満たされているはずである。飽和状態においてベントナイトゲルによって閉塞されている骨材間隙の様子を観察する。

(3) ガス破過後

飽和時の上表面と比較することで、ガスの透過機構に関する情報を得る。

(4) 再飽和過程

スポイトを用いて破過した供試体の上表面に水

を滴下によって供給し、その後の給水部の変化を顕微鏡観察することにより、再飽和による影響を把握する。

6. 試験結果

6.1 浸透率の算出

本試験では、流体を変えて試験を実施しているため、ベントナイト混合土の透水性または透気性能を、流体の粘度および密度を取り除いた浸透率で表す。

透水試験および透気試験における浸透率はダルシーの線形定常流の式[8]により算出した。液体の場合、非

圧縮流体のため式(1)、気体の場合、圧縮性流体のため式(2)を用いた。

$$K = \frac{\mu L Q}{A (P_1 - P_3)} \quad (1)$$

$$K = \frac{2\mu L Q_b P_b}{A (P_1^2 - P_3^2)} \quad (2)$$

ここで、 K ：浸透率(m^2)、 μ ：流体の粘度($Pa \cdot s$)、 L ：供試体長さ(m)、 Q ：流量(m^3/s)、 A ：断面積(m^2)、 P ：絶対圧力(Pa)、添字 b ：測定時、添字 $1, 2$ ：入力、出力。

本試験においては、出力側の圧力を解放することにより、ガス流量測定を大気圧状態で行った。

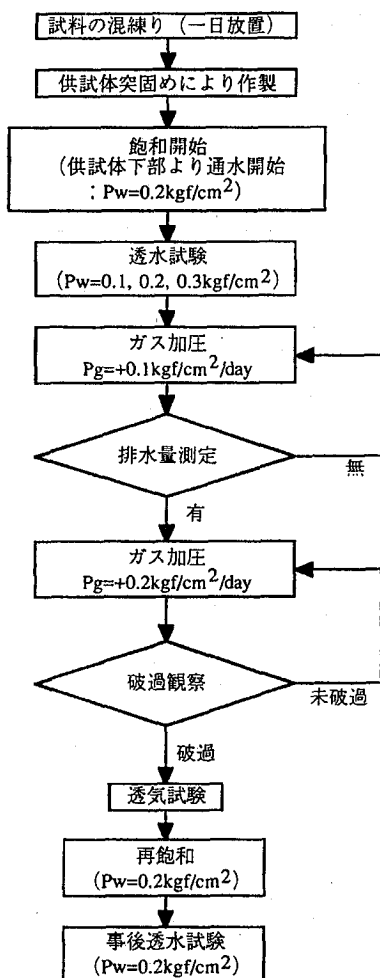


図2 1軸透水・透気試験の手順

6.2 流体特性

本試験においては、3種類の流体を使用して、1軸透水・透気試験を実施した。それぞれの場合における、ベントナイト混合土の浸透率を算出するには、各流体の粘度・密度など物理特性が必要となる。

表2にそれぞれの流体の粘度および密度を示す。なお、両者ともに温度依存性があるため、値は各試験温度における値で示した。

6.3 浸透率

6.1節の算出式および6.2節の物性値を用いて、各試験における浸透率を算出した結果を表3に示す。事後透水試験は他の試験とは異なり、水圧1条件のみで実施した。ここでは、同条件にするため、他の試験の浸透率も同圧力における値とする。

6.4 顕微鏡観察結果

顕微鏡観察の映像を図3～6に示す。

図3は、供試体作成時のベントナイト混合土を観察したものである。飽和開始前であるため、骨材間隙はベントナイトによって満たされていない。

図4は、飽和終了後の供試体を観察したものである。骨材間隙は、水で膨潤したベントナイトゲルで満たされていることがわかる。

図5は、ガス透過による影響を調べるため、ガス破過後の供試体を観察したものである。多くの骨材間隙は、ベントナイトゲルで満たされているが、中には、間隙中のゲルが存在しない穴が見られる。ガス破過後の供試体であるため、この穴はガスが移動してきた

気みちであると判断した。この場合、ガスは形成された気みちをパイプフロー状に流動するため、水よりもガスの方が大きな浸透率となることが予想された。

図6は、ガス破過時に形成された気みちに滴下によって水を供給し、再飽和による影響を観察した。その結果、水の供給によってベントナイトゲルが膨潤し、気みちを閉塞した様子が見られた。なお、この図は、ベントナイトゲルの再膨潤現象の最終段階、すなわち、ベントナイトゲルが再び間隙を満たした状態の映像である。

図6で示される現象、つまり、再飽和によりベントナイトゲルが気みちを閉塞して骨材間隙を再び満たす挙動は、ベントナイト混合土の自己修復性のメカニズムと捉えることができる。

7. 自己修復性に関する考察

顕微鏡観察より、再飽和によってベントナイトゲルが膨潤して気みちを閉塞し、飽和時のようにゲルが骨材間隙を再び満たすことがわかった。このベントナイトゲルの挙動は、ベントナイト混合土の自己修復性の可能性を示すものである。

ここでは、ベントナイト混合土の求められている難透水性という性能面から、自己修復性があるか否かを、3種類の流体（ヘリウムガス、水、ケロシン）を使った1軸透水・透気試験の浸透率測定結果に基づいて考察する。

ガス破過前後の透水試験結果と透気試験結果を図7～図9に示す。同図は3種類の流体を使ったそれぞれの試験から得られた浸透率の相互の関係を示したものである。これらの図と顕微鏡観察で得られた知見から、以下のように自己修復性について解釈した。

(1) ガス破過前

表2 試験に使用した流体の物理特性一覧

流体	密度 (g/cm ³)	粘度 (Pa·s)	備考
水	0.99820 ¹⁾	1.002E-3 ¹⁾	試験温度 20℃
ヘリウム	0.1663E-3 ²⁾	19.6E-6 ¹⁾	試験温度 20℃
ケロシン	0.7892 ³⁾	1.72E-3 ⁴⁾	試験温度 25℃

1) 理科年表 [9] 参照。

2) 理科年表 [9] の値より Charles の法則によって算出した。

3) 出光興産 (株) の試験成績表による。測定温度は 15℃ であるが、試験温度における値がないため、近似値として採用した。

4) ウベローテ粘度計により動粘度を測定後 (3) の密度により換算した値

表3 1軸透水・透気試験結果一覧

試験条件				浸透率 (m ²)		
B/B+S (%)	細粒分含有率 (%)	乾燥密度 (g/cm ³)	含水比 (%)	事前透水	透気	事後透水
20	9	1.682	16.2	1.61E-18	2.01E-16	7.96E-19
	1	1.774	14.0	5.53E-19	8.27E-15	5.23E-19
17.5	9	1.714	14.1	1.14E-18	3.26E-15	9.03E-19
	1	1.734	14.1	1.11E-18	2.95E-15	9.92E-19
15	1	1.818	14.1	4.65E-19	1.45E-14	2.32E-19
	9 ¹⁾	1.626	17.9	2.60E-18	4.80E-17	2.90E-17
	9	1.667	15.8	1.57E-18	1.58E-15	1.96E-18
	9	1.675	15.8	1.50E-18	3.63E-16	1.61E-18
	1	1.780	12.6	4.60E-19	3.41E-15	7.17E-19
	1	1.806	14.6	4.92E-19	8.36E-15	1.64E-20
	1	1.817	14.6	8.49E-19	6.31E-16	7.68E-19
	1	1.812	14.6	7.07E-19	3.23E-17	6.65E-19

1) 再飽和・透水試験にケロシンを使用した供試体

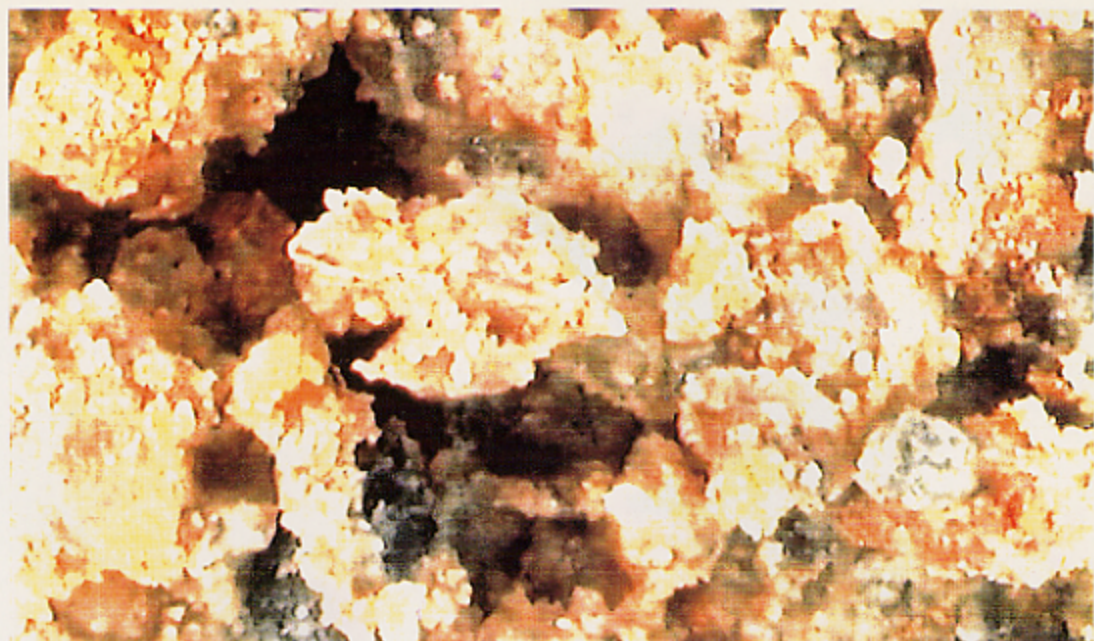


図3 供試体作成時におけるベントナイト混合土 (倍率50倍)

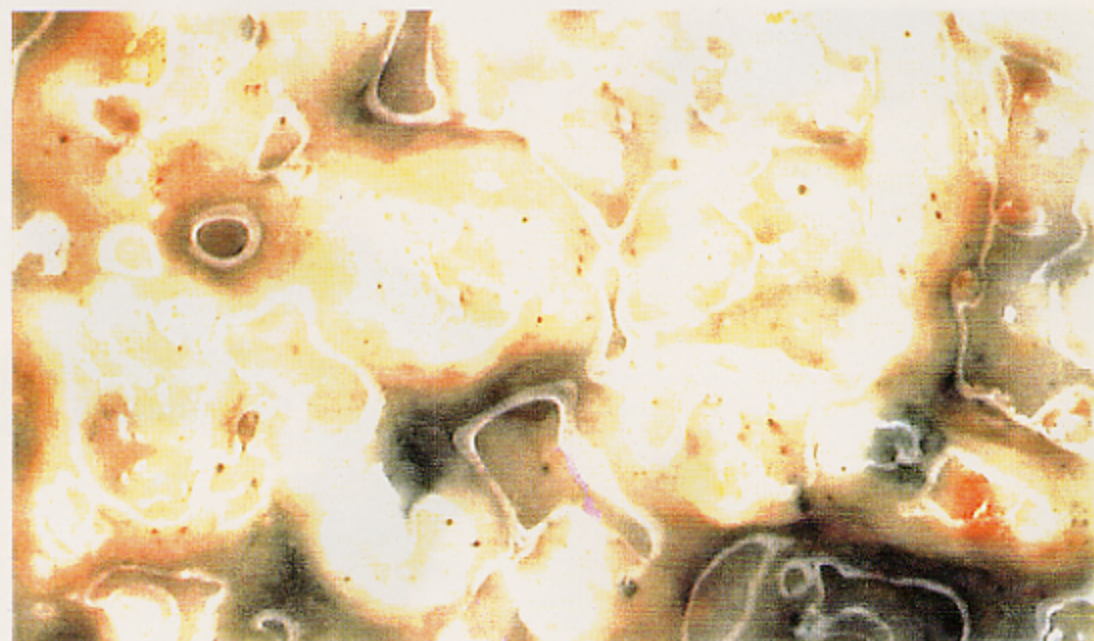


図4 飽和したベントナイト混合土 (倍率50倍)

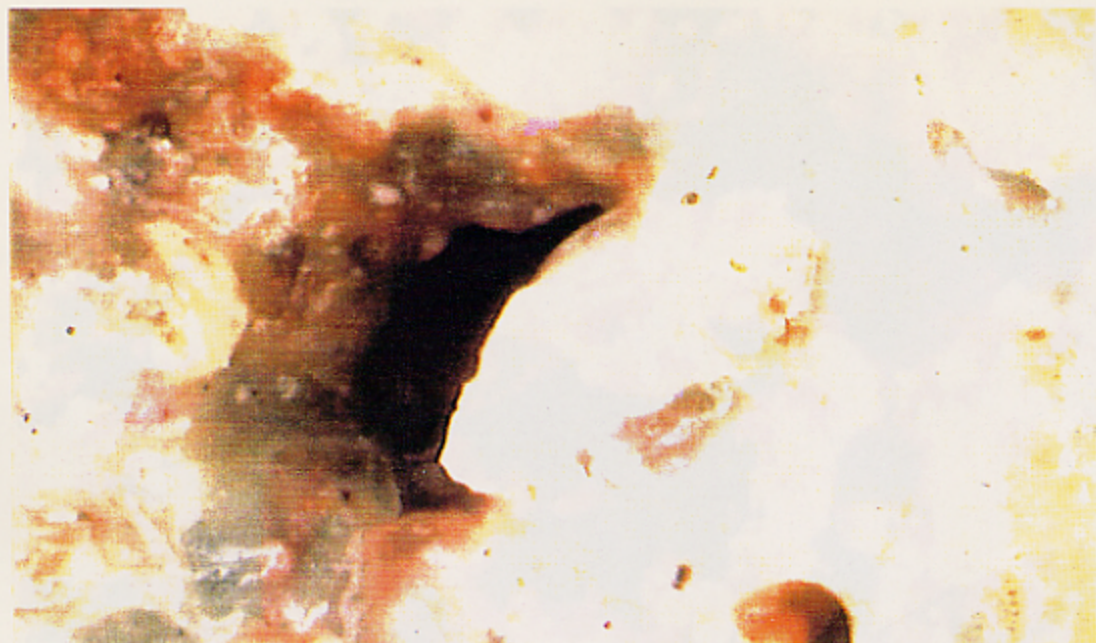


図5 ガス破過後のベントナイト混合土 (倍率100倍)

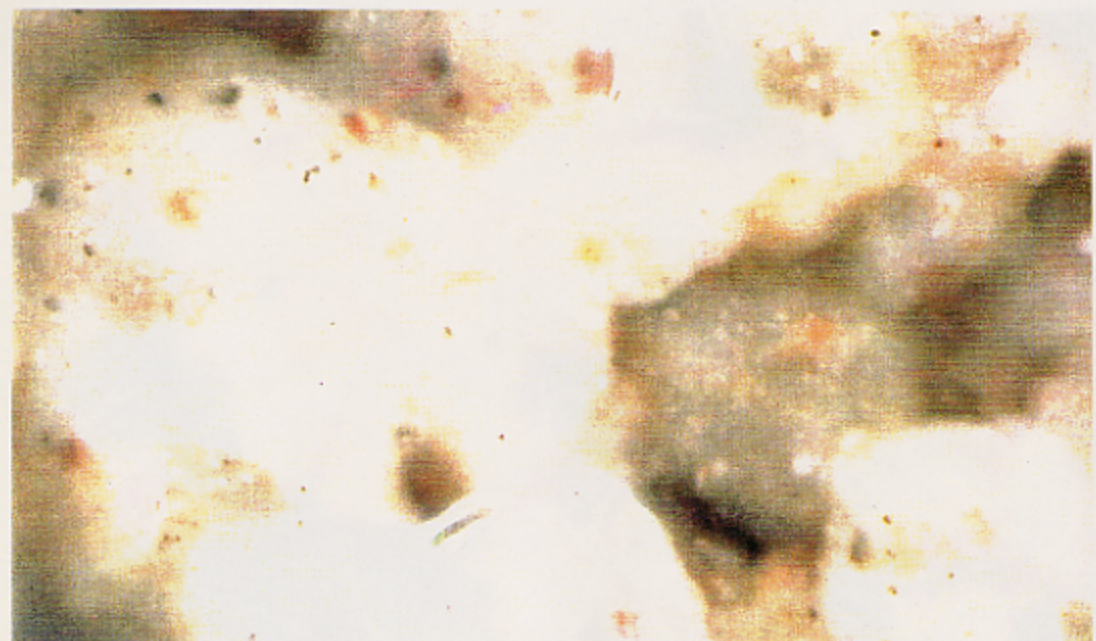


図6 再飽和したベントナイト混合土 (倍率100倍)

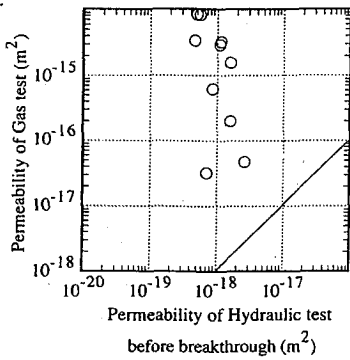


図7 破過前の透水試験と透気試験における浸透率

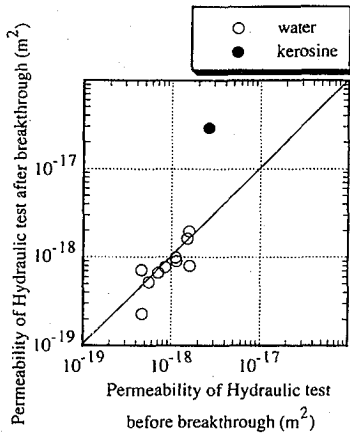


図8 破過前後の透水試験における浸透率

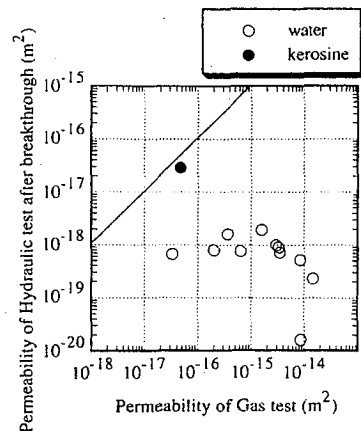


図9 透気試験と破過後の透水試験における浸透率

飽和したベントナイト混合土の骨材間隙は、水によって膨潤したベントナイトゲルで満たされている。その結果、卓越する水みちが閉塞されている。その結果、卓越する水みちが閉塞されて、水はベントナイトゲル中を一様浸透状態で流動するため、混合土は難透水性を示すと解釈できる。実際、本試験で使用した供試体（ベントナイト配合率15%～20%）の浸透率は $3 \times 10^{-18} \text{m}^2$ 以下（透水係数では $3 \times 10^{-9} \text{cm/s}$ に相当する）であり、明らかに難透水性を示している。

(2) ガス破過時

ガスを供試体に作用させた場合、供試体から水が排出される現象が見られた。ガス破過過程においては、ヘリウムガスが間隙中のベントナイトゲルを脱水・収縮させることで、気みちを形成すると考えられる。この場合、全ての骨材間隙が均一なゲル密度を持つベントナイトゲルで満たしているのではなく、希薄なベントナイトゲルの領域と濃密なベントナイトゲルの領域が分布しているため、ヘリウムガスの侵入は、ベントナイトゲルの希薄な間隙に集中し、気みちは選択的に形成される。このことは、図3の顕微鏡観察によって得られた写真において、骨材間隙の分布状況に斑があることから推定することが出来る。

図7を見ると、透気試験による浸透率はガス破過前の透水試験による浸透率と比較して1～4オーダーも大きな値となっている。これは、ガスの流れは選択的に形成されたパイプフローとなること、これに対して、水の場合は卓越する水みちの存在しない一様浸透状態で流動するためだと解釈出来る。

(2) ガス破過後

図8を見ると、ケロシンの値を除き、ガス破過前後の透水試験による浸透率がほとんど同等の値を示しており、ガス透過による難透水性能への影響は見られないことがわかる。

この挙動は次のように考えることで説明できる。ガス透過後の透水試験においては、ガスの透過によって脱水・収縮していたゲルが、水の供給によって再び膨潤し、最終的には、膨潤したゲルが再び気みちを閉塞し、初期状態のようにゲルが骨材間隙を満たす状態に戻るため、透水性能にも変化が生じない。

図9には、ケロシンによる浸透率が、初期の透水試験による値よりも大きくなっていることも示されている。これは、水と異なり、疎水性のケロシンではベントナイトが膨潤せず、気みちが閉塞されないからと解釈できる。

ケロシンの流動し得る場合は、ガス破過によって生じた気みちとベントナイトゲル中である。しかし、前者の方がはるかに流動しやすいため、ケロシンの流れは気みちに集中する。つまり、ガスの流れと同様にパイプフローとなるため、水よりも大きな値となる。実際に、ガスとケロシンの流動径路が同様なものであることは、図9において両者の浸透率が一致することからも、支持される。

以上のことから、ベントナイト混合土は、間隙構造の観察および流体の種類を変えた場合の浸透率の比較によって、遮水性能の再生能力つまり、自己修復性を有することを確認することが出来た。

8. 参考文献

- p.504 (1983).
- [9]国立天文台編：理科年表，丸善株式会社，p.446-448 (1992).
- [1]下田秀雄 他：六ヶ所所蔵センターの概要と安全確保策，日本原子力学会誌 **33**，35-42 (1991).
- [2]Voinis S. et al. : The analytical modelling of gas generation, *Proc. of Workshop organised by NEA in cooperation with ANDRA: Gas Generation and Release*, p111-119, OECD, 1992.
- [3]小峯秀雄 他：電子顕微鏡観察による砂・ベントナイト混合材料の膨潤挙動と透水特性に関する考察，第40回地盤工学シンポジウム平成7年度発表論文集 VI-5, p.299-306 (1995).
- [4]Pusch, R et al. : GMM-A general microstructural model for qualitative and quantitative studies of smectite clays, KBS, technical report 90-43 Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (1990).
- [5]Pusch et al. : "MEGAPERMEAMETERSTUDIE AV GASTRANSPORT GENOM SFR-buffertar", SFR 87-06, SKB (1987).
- [6]伊藤雅和 他：ベントナイトの鉱物組成分析，日本原子力学会誌 **36**, 11, 63-66 (1994).
- [7]日本規格協会編：突固めによる土の締固め試験方法，JIS A 1210 (1990).
- [8]石油技術協会編：石油鉱業便覧，石油技術協会，