

ベントナイト混合土の透気特性における寸法効果について†

穂刈利之†† 沖原光信†† 石井孝夫††† 水無瀬直史††† 斉田勇三†††† 生瀬博之††††

実際の構築物におけるベントナイト混合土の透気特性を推定する場合には、ベントナイト混合土の小型供試体による室内実験結果に基づいて設定することが現実的である。本報告では、供試体の寸法を変えて透水・透気試験を実施し、当該特性の寸法効果について検討を行った。

Keywords : ベントナイト混合土、ガスの透気、透水性、寸法効果

Gas migration properties of bentonite/sand mixture in a full-scale structure are actually estimated on the basis of laboratory test results obtained by small test specimen. Water and gas migration tests are carried out for clarifying the scale effect of the mixture on migration properties.

Keywords : bentonite/sand mixture, gas migration, hydraulic conductivity, scale effect

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鉱物を含有するため、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設置される。一方、処分場からは廃棄体と地下水の反応によって、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の内側にはガスが蓄積し、やがては透過することになる。

Pusch[3]は、ベントナイト混合土の持つ特性、例えば透水特性、膨潤圧力およびガス透過特性を説明するべく、微視的な構造モデルを考案しており、様々な要因の中でも骨材間隙中の吸水膨潤したベントナイトと間隙水からなる懸濁液（以下、ベントナイトゲルと呼ぶ）密度が特性に大きな影響を持つとしている。この中でPuschは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、critical pressureと呼ぶ）と膨潤圧との関係に着目している。

ベントナイト混合土はベントナイトと砂を適度な水分量にて混合し、転圧機械で所定の密度に施工するため、均質な天然土質材料である。したがって、基礎的な特性データは小型供試体の室内試験で取得することが可能である。室内試験で得られた物性値から、実際の構築物における挙動を予測するには、寸法の

影響や施工におけるばらつきを考慮する必要がある。本報告では、ベントナイト混合土の透気特性における寸法効果に関する試験を行い、考察を行った。

2. 試験方法

今村他[4]は室内で作製した寸法100 mm ϕ \times 50 mmHの供試体について透気試験を実施し、ガスが破過する現象にはばらつきが大きいことを認識した上で、既往の2相流解析で見かけ上評価することが可能としている。しかしながら、供試体の寸法に応じてガスが移行する経路の長さやガス圧が作用する面積は異なるので、供試体の寸法によって透気特性の試験結果に違いが出てくる可能性がある。この試験では、透気特性に対する供試体の寸法効果を把握することを目的として、高さ及び直径の異なる供試体を作製して透気試験を行った。

2.1 試験装置

本試験で使用した1軸透水・透気試験装置およびモールドを図1及び図2に示す。所定の含水比と密度の供試体を図2に示すモールド内にて作成し、図1の左図（飽和時）に示すようにモールドの底面から注水することによって供試体を水で飽和させて透水試験を実施し、その後、図1の右図（透気時）に示すようにモールドの底面側にガス注入装置を、さらにモールド上面にはガスあるいは水の浸出量を計測できる装置を連結して透気試験を実施した。なお、200 mmH以上のモールドでは飽和に時間を要することが予想されたため、側面からも注・排水が可能な構造とした。モールドは供試体の観察が可能なアクリル製円筒とした。

† Experimental Study on Scale Effect of Bentonite/Sand Mixture on Gas Migration Properties, by Toshiyuki Hogari (hokari@atom.shimz.co.jp), Mitsunobu Okihara, Takao Ishii, Naohumi Minase, Yuzo Saita, Hiroyuki Ikuse

†† 清水建設株式会社 〒105-07 東京都港区芝浦一丁目2-3 シーノビスS館 Shimizu Corporation

††† 三菱マテリアル株式会社 〒112 文京区小石川1-3-15 小石川大国ビル Mitsubishi Materials Corporation

†††† (財)原子力環境整備センター 〒105 港区虎ノ門2-8-10 第15森ビル Radioactive Waste Management Center.

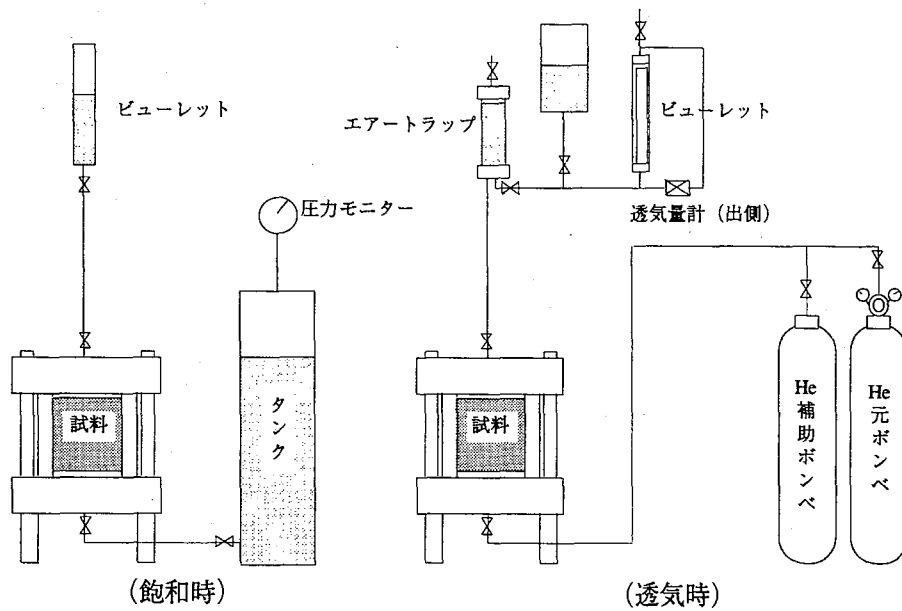


図1 試験装置

2.2 供試体

寸法を次のように変化した供試体により、ベントナイト混合土の透気特性に関する試験を実施した。試験は下記のA,Bシリーズに分けて実施した。

【Aシリーズ供試体】

- ・ 100 mm φ × 25 mmH × 2個
 - ・ 100 mm φ × 50 mmH × 2個
 - ・ 100 mm φ × 100 mmH × 2個
 - ・ 100 mm φ × 200 mmH × 2個
 - ・ 100 mm φ × 400 mmH × 2個
- } 高さの違いに着目した供試体

【Bシリーズ供試体】

- ・ 200 mm φ × 200 mmH × 1個
 - ・ 300 mm φ × 200 mmH × 1個
 - ・ 760 mm φ × 200 mmH × 2個
 - ・ 200 mm φ × 100 mmH × 1個
 - ・ 200 mm φ × 200 mmH × 1個
 - ・ 200 mm φ × 400 mmH × 2個
- } 透気面積に着目した供試体
- } 高さの違いに着目した供試体

使用したベントナイトは国内の代表的な製品であるクニミネ工業(株)製のクニゲルV1[5]、骨材には同一地点の段丘堆積砂を採取して使用したが、細粒分含有率には若干のバラツキがあった。供試体作製条件は以下の通りである。

【Aシリーズ供試体】(細粒分含有率9%程度の砂を使用)

- ベントナイト配合率 : B/S+B 15 %
- 乾燥密度 : 1.626 g/cm³ (JIS A 1210 [7]による最大乾燥密度に相当する)

- 含水比 : 17.9 % (JIS A 1210 [7]による最適含水比に相当する)

【Bシリーズ供試体】(細粒分含有率2%程度の砂を使用)

- ベントナイト配合率 : B/S+B 15 %
- 乾燥密度 : 1.799 g/cm³ (同上)
- 含水比 : 14.6 % (同上)

AおよびBシリーズの供試体において使用した砂は細粒分含有率に若干の差が認められるが、石原 他[6]は、同じ段丘堆積砂について細粒分が5%未満、5~10%、10~15%の3種類を別々に使用したベントナイト混合土の現場施工試験を実施し、透水係数はそれぞれ $7.0 \times 10^{-10} \sim 1.7 \times 10^{-9}$ cm/s、 $8.0 \times 10^{-10} \sim 2.0 \times 10^{-9}$

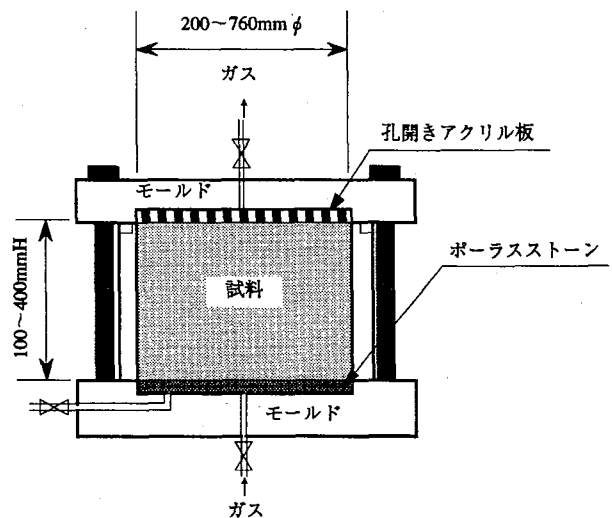


図2 透水・透気試験モールド

cm/s、 $5.0 \times 10^{-10} \sim 1.5 \times 10^{-9}$ cm/sの範囲であって、砂の細粒分による透水係数の差はほとんど無いことを報告している。また、五十嵐 他[7]はBシリーズと同等の段丘堆積砂を使って、ベントナイト配合率15%の供試体の乾燥密度を変化させた場合の透水係数への影響を測定し、乾燥密度が 1.6 g/cm^3 以上であれば透水係数に大きな変化は無いことを報告している。透水挙動と透気挙動には強い相関があると考えられるため、AおよびBシリーズの供試体の挙動に大きな違いは無いとして以下の試験を行った。

2.3 試験手順

試験手順の流れ図を図3に示す。

(1) 供試体作製

所用の含水比および乾燥密度となるよう、砂、ベントナイト、水を計量し、均一に混合する。その後、同材料をモールド内にて所定の方法 (JIS A 1210 [8]) により締め固めた。

(2) 飽和

供試体上下端にろ紙とポーラスストーンを設置し、通水圧 $0.2 \sim 0.3 \text{ kgf/cm}^2$ にてモールド下部から注水した。出力側の通過水量をビューレットで測定し、その安定した時点を飽和と判断した。なお、200 mmH以上の供試体については、側面より供試体下部から上部方向へ向かって螺旋状に注水・排水を行うことで、飽和促進を行った。

(3) 透水試験

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した。

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した。

圧力条件はできるだけ低圧の3条件とし、観測可能な通水量となるように適宜決定した。

(4) 透気試験準備

上下部の蓋、ポーラスストーン、ろ紙を外し、上部にはアクリル有孔版を設置する。下部ポーラスストーンは乾燥させた後再設置し、ヘリウムガスで満たす。下部配管の水をガスに置換し、上部アクリル有孔版より上部を水で満たす。200 mmH以上のモールドの場合、100 mmHモールドを重ね合わせているため、取り外しは上部のみとする。下部ポーラスストーンはモールドに設置したまま水抜きを行う。

(5) ガス破過試験

0.1 kgf/cm^2 のガス圧を作用させて、排水量の観測を行う。所定時間計測して排水量が計測されなかった場合には 0.2 kgf/cm^2 に昇圧する。

以下同様にして 0.1 kgf/cm^2 づつ昇圧し、排水量が最初に計測された圧力を初動圧とした。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により計測した。

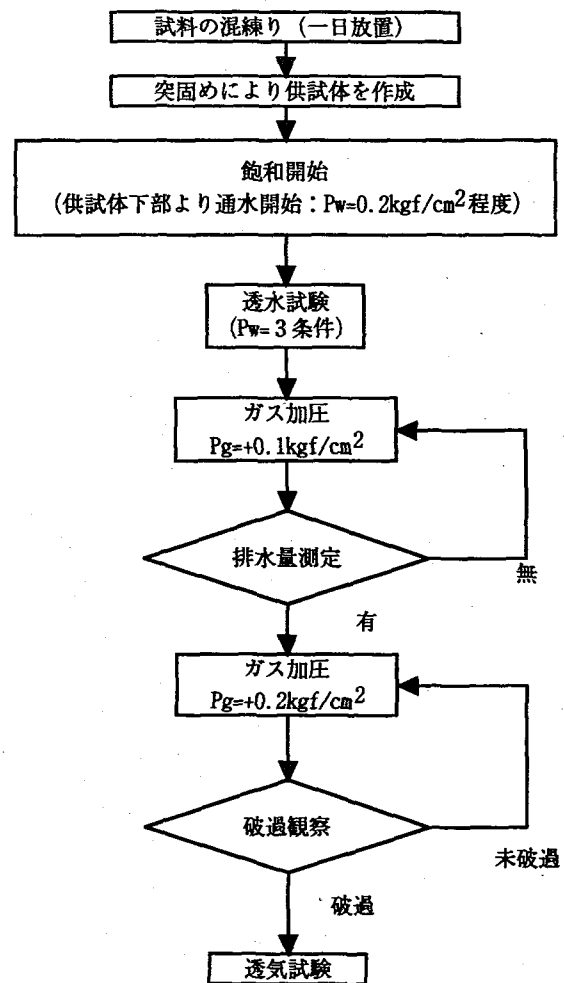


図3 1軸透水・透気試験の試験手順

その後は、所定時間ごとに 0.2 kgf/cm^2 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って判定した。供試体上面でガス破過が観測された時点のガス圧を破過圧、またその破過圧に昇圧した直後からガス破過した時点までの時間を破過時間とした。

ガス圧による排水挙動は供試体の透水性に依存することが予想される。したがって、測定精度・試験実施上の容易さを考慮して、各ガス圧段階における保持時間については各寸法ごとの通りのとした。

- | | | |
|---|------------------------------------|------|
| ① | 100 mm ϕ \times 25 mmH | : 1日 |
| ② | 100 mm ϕ \times 50 mmH | : 1日 |
| ③ | 100 mm ϕ \times 100 mmH | : 2日 |
| ④ | 100 mm ϕ \times 200 mmH | : 4日 |
| ⑤ | 100 mm ϕ \times 400 mmH | : 4日 |
| ⑥ | 200 mm ϕ \times 100 mmH | : 1日 |
| ⑦ | 300、200 mm ϕ \times 200 mmH | : 2日 |
| ⑧ | 760 mm ϕ \times 200 mmH | : 4日 |
| ⑨ | 200 mm ϕ \times 400 mmH | : 4日 |

(6) 透気試験

破過した時のガス圧にて透気量を測定する。透気量は、出

力側における2重管ビューレット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。

3. 試験結果

図4にはAシリーズ試験の100 mm φ × 200 mmH 供試体の透水試験における流量と水圧の関係を示す。透水係数は、ダルシーの定常線形状流の式によって、透水量と水圧のデータ3点から接線法によって算出した。

水で飽和した供試体にガス圧を作用させると、間隙を満たしていた水はガスによって排除され、次第に透気経路が形成され、やがてはガスは破過する。図5にはAシリーズ試験の100 mm φ × 50 mmH 供試体の透気試験における破過にいたるまでの過渡特性として、ガス圧と排水量の関係を示す。ガスの侵入に伴う供試体からの時間当たり排水量はガス圧の上昇とともに増加しており、水の排水挙動はダルシー則で説明できることがわかる。

図6にはAシリーズ試験の100 mm φ × 25 mmH 供試体の透気試験におけるガス圧と透気量の関係を示す。透気係数は、圧縮性流体の定常線形状流 [9]の次式によって、透気量 Q と $(P_1^2 - P_2^2)/P_N$ のデータから接線法によって算出できる。本試験においては出力側の圧力を大気圧開放することにより、ガス流量測定を大気圧状態 (常温) で行った。

$$K_g = \frac{\rho_{H_2} g}{\mu_{H_2}} \frac{2\mu_{He} L Q_N P_N}{A(P_1^2 - P_2^2)} \quad (1)$$

ここで、 K_g : 透気係数 (m/s)、 ρ : 密度 (kg/m³)、 μ : 粘度 (Pa·s)、 L : 供試体長さ (m)、 Q : (流量 m³/s)、 A : 供試体の断面積 (m²)、 P : 絶対圧力 (Pa)、 g : 重力加速度 (m/s²)、添字 H₂, He: 水素、ヘリウム、添字 1, 2, N: 入力、出力、標準状態。

透気に関する各物性値と寸法との関係を図7~図14に示す。図中において■▲●印のプロットはAシリーズの試験データであり、□△○▽印のプロットはBシリーズの試験データである。透気挙動に関する各物性値と寸法 (高さ寸法あるいは直径寸法) との関係を整理した結果を以下に記す。

3.1 透水係数

図7、8に供試体寸法が透水係数 (hydraulic conductivity) に与える影響を示す。透水係数は、供試体の直径や高さによらず 10⁻⁹ cm/secオーダーの値をとっており、寸法による変化がないと判断できる。

3.2 初動圧

図9、10に供試体寸法が初動圧 (threshold gas pressure) に

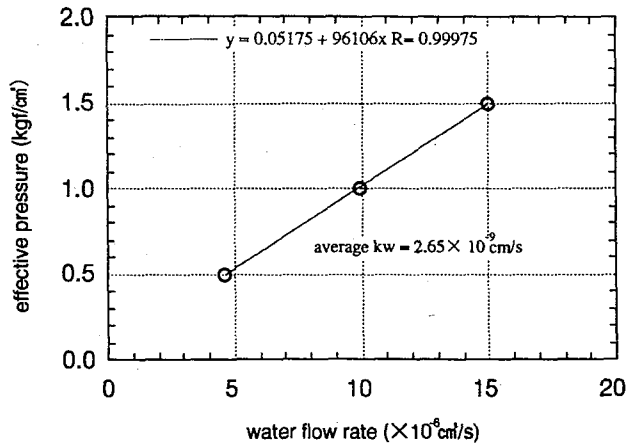


図4 透水試験結果の一例

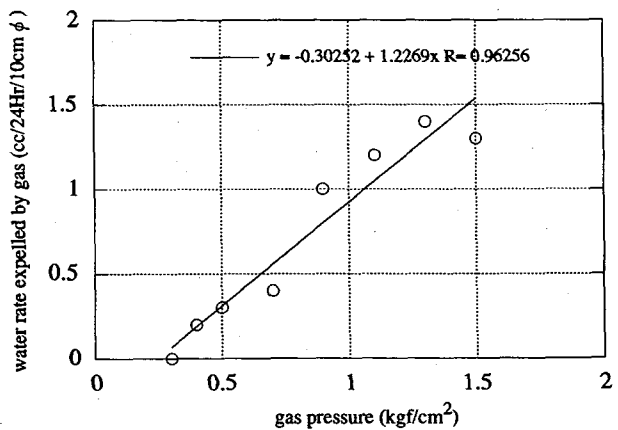
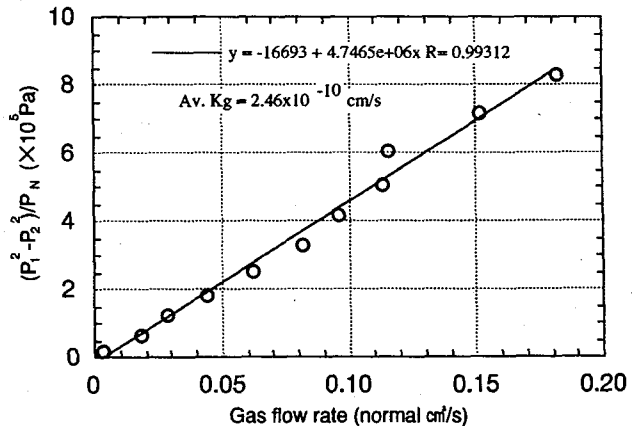


図5 ガス圧による排水量変化の一例



P₁: 入力側ガスの絶対圧
P₂: 出力側ガスの絶対圧 (大気圧開放)

図6 透気試験結果の一例

与える影響を示す。初動圧は供試体からの排水量が最初に観測されたときのガス圧であり、前述の critical pressure に相当する試験実測値である。初動圧が小さいほどその材料は速やかに透気する。

初動圧は供試体の高さ寸法による影響と直径寸法による影響を別々に整理して傾向を把握する必要がある。図9は供試体の高さ条件が同じ 200 mmH の供試体に着目して、供試体

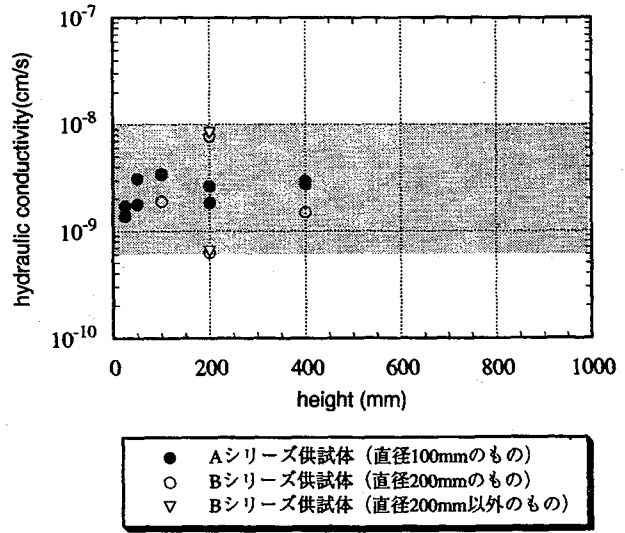
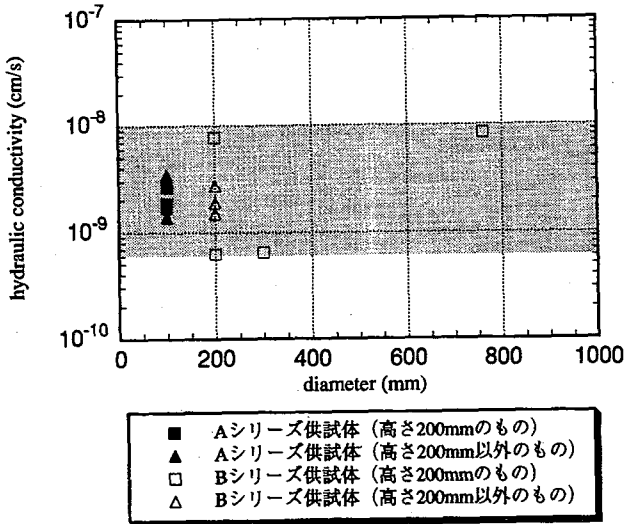


図7 透水係数に与える供試体の直径寸法の影響

図8 透水係数に与える供試体の高さ寸法の影響

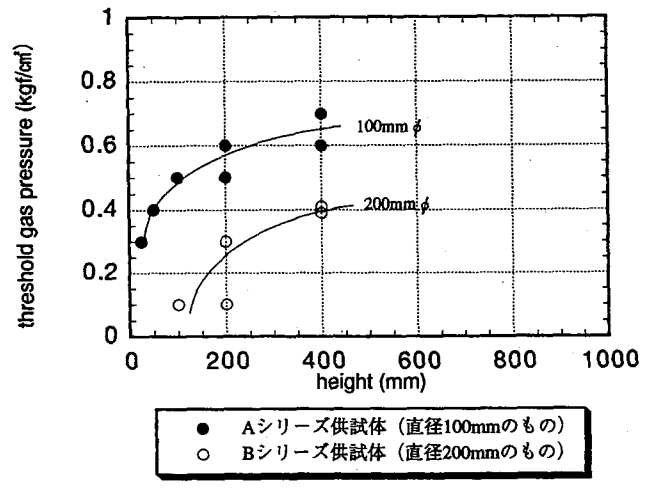
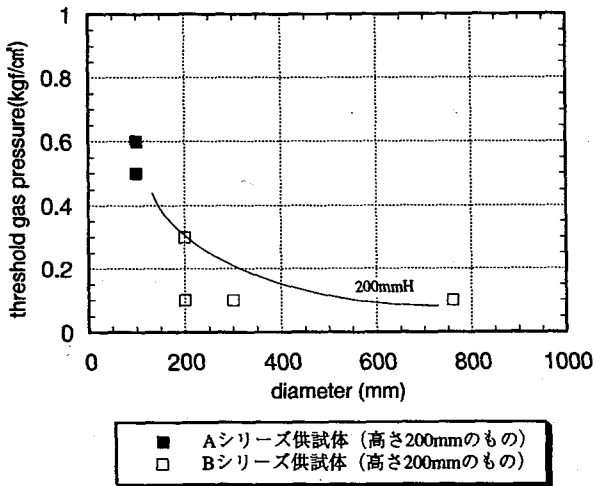


図9 初動圧に与える供試体の直径寸法の影響

図10 初動圧に与える供試体の高さ寸法の影響

の直径の影響を整理したものである。直径寸法が大きくなると初動圧が小さくなる傾向がある。

一方、図10に示すように直径寸法が同じ100 mm φの供試体に着目すると、供試体高さ寸法が大きくなると初動圧が増加する傾向がある。また、直径寸法が200 mm φの供試体に着目しても同様の傾向が見られる。図10において100 mm φと200 mm φを比較すると直径寸法が大きくなると初動圧が小さくなる傾向を同時に読み取ることができる。

の比で表した値である。ガスの透気経路に相当する間隙の量は、ガスが破過した後も供試体に透気し続けた場合には次第に大きくなるものと予想されるが、有効ガス間隙率はガスが最初に破過した時点までの排水量の値から求めた。したがって、有効ガス間隙率が小さいほどその材料は速やかに透気すると言える。

図11において、供試体の高さ条件が同じ200 mmHの供試体に着目して、供試体の直径の影響を整理すると、直径寸法が大きくなるにつれて有効ガス間隙率が緩やかに減少する傾向がある。同様に、図12に示すように直径寸法が同じ100 mm φの供試体に着目すると、供試体高さ寸法が大きくなるにつれて有効ガス間隙率が減少する傾向がある。

3.3 有効ガス間隙率

図11, 12に供試体寸法がガスの透気に有効な間隙率（以下、有効ガス間隙率：effective gas porosity と称す）に与える影響を示す。有効ガス間隙率は土質工学における定義とは違う概念であり、供試体にガスの透気経路が形成されるまでに供試体中の間隙水が排除された量の累計を供試体の全体積と

3.4 透気係数

図13, 14に供試体寸法が透気係数 (gas conductivity) に与え

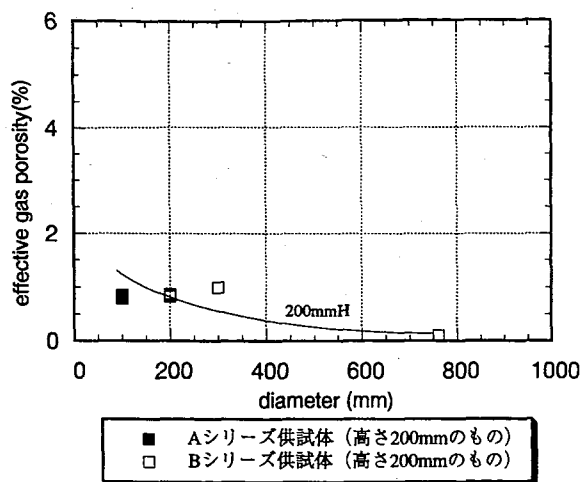


図11 有効ガス間隙率に与える供試体の直径寸法の影響

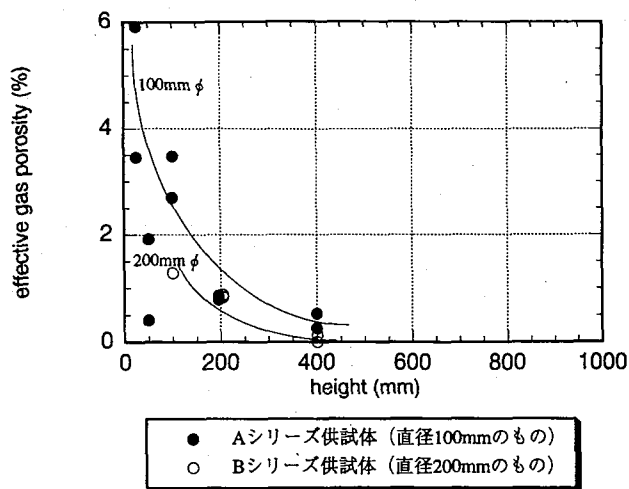


図12 有効ガス間隙率に与える供試体の高さ寸法の影響

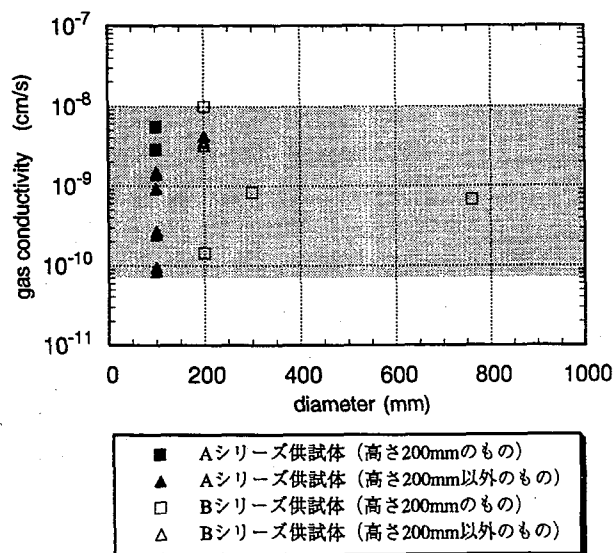


図13 透気係数に与える供試体の直径寸法の影響

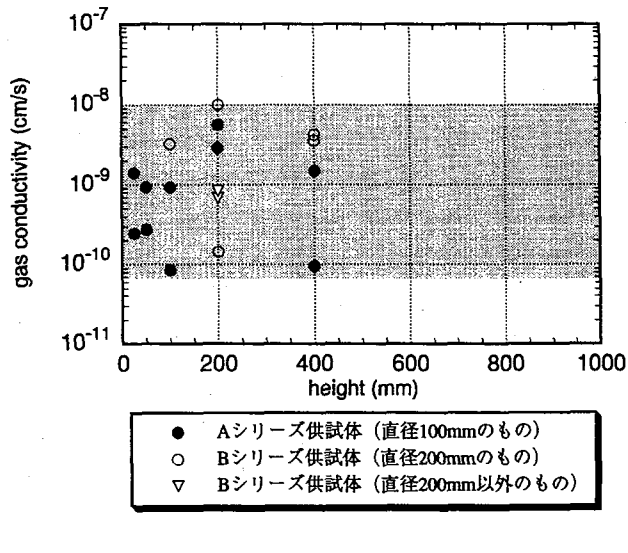


図14 透気係数に与える供試体の高さ寸法の影響

の影響を示す。透気係数は 10^{-9} cm/secを中心に分散している。透気係数は供試体寸法の影響を受けないと考えられる。

4. 考察

寸法を変えた供試体の試験結果によれば、ベントナイト混合土の透気に関する物性値のうち透水係数及び透気係数についての寸法による影響は認められなかった。一方、有効ガス間隙率および初動圧については寸法との相関が認められた。

ベントナイト混合土が水で飽和している場合には、骨材間隙をベントナイトゲルが満たしており、ガスはこのベントナイトゲルを圧密脱水させながら脈状に侵入し、次第に透気経路を形成していくものと考えられる。図15は骨材間隙に透気経路が形成される状況を微視的に想定した概念図である。筆者ら[10]は類

似の透気試験を実施した供試体において上下の端面を顕微鏡観察して、このような透気経路の入口部と出口部の存在を確認した。実際の構築物では同図のようにイメージした透気経路が3次元的に網目状に成長して、貫通した経路が最初に形成完了した時点でガスの破過が観測されることになる。

このような透気メカニズムの概念に基づいて推察すると、供試体の直径が大きくなる場合には、小型供試体の透気経路よりも透気しやすい経路の存在確率が増加するので、脈状に先行する貫通経路の形成速度が速くなると考えられる。その結果、直径が大きくなると有効ガス間隙率は小さく観測されることになる。すなわち、最初に透気経路が貫通するまでの時間は直径の小さい供試体よりも大きな供試体の方が短時間となる。この時点では一部の透気経路のみが貫通しており、他の透気経路はまだ成長段階であるため、有効ガス間隙率は小さく計測されたの

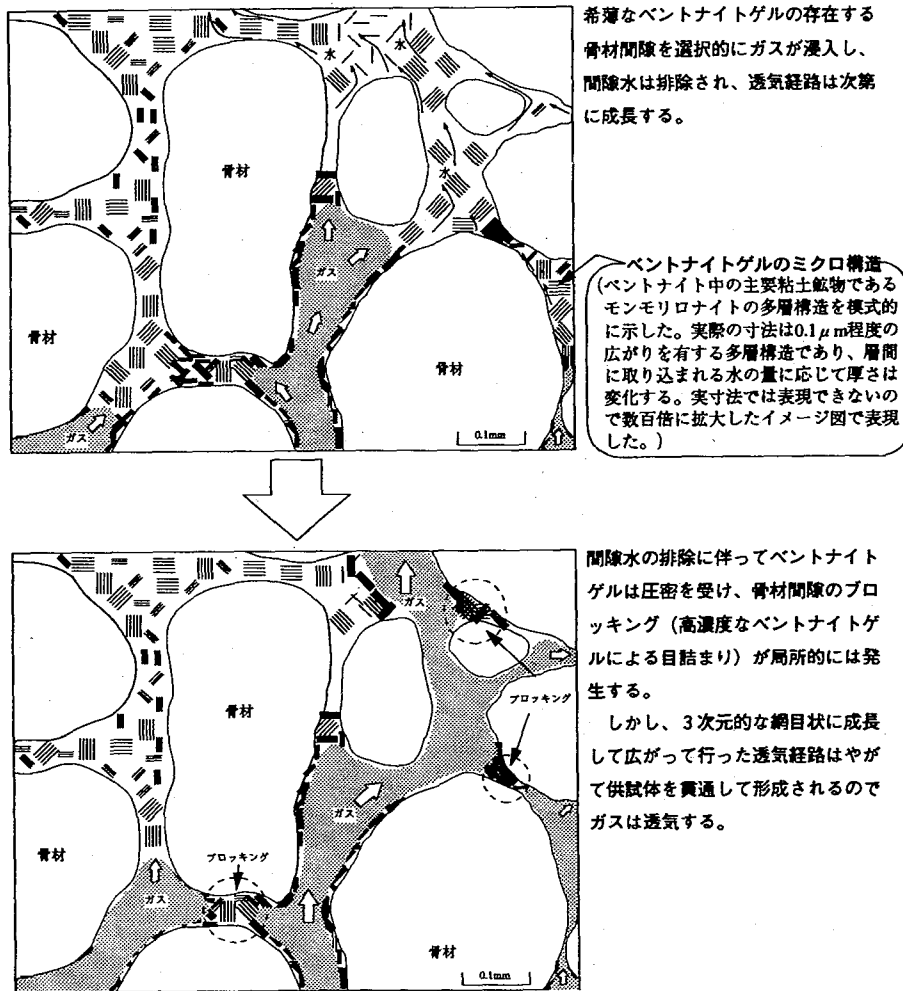


図15 ベントナイト混合土の透気現象の概念

であろう。やがては時間遅れを伴って他にも多数の透気経路が貫通して形成されるので、最終的には図13に示した透気係数の値よりも大きな透気係数を確保できるものと考えられる。一方、供試体高さが増加する場合には、透気経路の水平方向への進展が側部境界面によって規制されるため、貫通経路の本数は若干減少する傾向を示すであろう。したがって、直径が増加した場合あるいは高さが増加した場合のいずれの場合においても、有効ガス間隙率は小さくなる傾向を呈するのである。

一方、初動圧については次のように考察することができる。最初にガス圧によって間隙水が押し出される現象は、間隙水の透水抵抗と間隙中に存在する気液界面の摩擦抵抗のみで決まるはずである。有効ガス間隙率の値が間隙率に比べて1桁～2桁小さいことから類推できるように、ガス圧によって押し出される間隙水の流量は透水試験における流量に比べてはるかに小さいから、透水抵抗は大きくはない。したがって、初動圧は間隙中における気液界面の摩擦抵抗 (すなわち毛管圧) によって決まる。直径が大きくなる場合には透気しやすい経路の存在確率が増加するので、初動圧は小さく観測される傾向となる。初動圧を観測するのは供試体の底部端面にガスの侵入が始まったときである

から、気液界面は供試体の底部端面付近に位置している状態である。いずれの供試体においても底部端面付近の間隙条件は同等であるから、気液界面の摩擦抵抗は高さ寸法の影響を受けない。このように考えるならば、高さが増加しても初動圧は大きくならないことを原理的に推定することができる。初動圧は供試体の上端面から排水される間隙水の量がゼロではないことをビューレットの目盛りによって確認できたときをデータとして採用している。ガス段階加圧の各段階における計測時間を前述2.3節に示すような1～4日間としたが、比較的短時間であったために高さの影響が出たと考えられる。実際の材料の性質としては、高さが増加しても初動圧は大きくならないであろう。

そこで、再度高さ寸法の違いに着目した供試体を作成して、計測時間を供試体高さ寸法25、50、100、200、400 mmに応じてそれぞれ1、2、4、8、16日間として初動圧の計測を追加実施した。初動圧の計測に十分な時間を使った結果では図16に示すように供試体の高さ寸法の影響が無かった。

高さ寸法が初動圧には影響しないことは図16に示すように追加試験によって確認できた。図9に示すように直径寸法が大きくなるにつれて初動圧は小さくなる傾向がある。実際の構築物

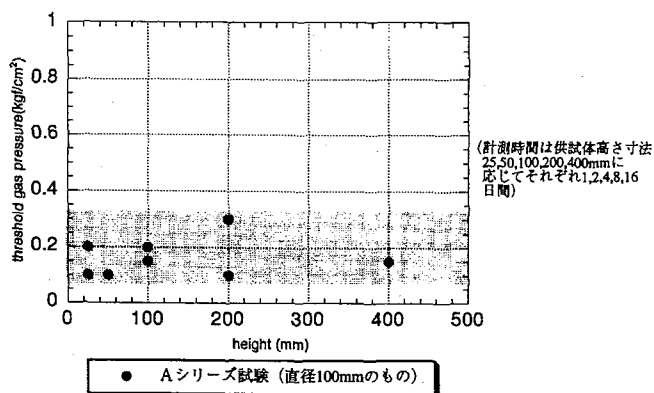


図16 初動圧に与える供試体の高さ寸法の影響

は、厚さ2 mに対して水平方向の広がり30 m以上であり、高さ寸法と直径の比は10倍以上である。実際の構築物では初動圧が小型供試体の値よりも大きくなることはない。

ガスがベントナイト混合土に侵入開始してから透気経路を形成して、供試体を貫通するまでの挙動は図15に示すような骨材間隙ごとのマイクロな破過の繰り返し挙動であるから、非常にばらつきの大きな現象である。各々の寸法条件における供試体数は1～2個であったためにこのばらつきの影響を無視できるようなデータ群ではないが、供試体寸法が大きくなるにつれて、速やかにガス透気を開始する傾向、すなわち初動圧は大きくなることは無く、有効ガス間隙率は小さくなる傾向を示すことを実験データによって確認できた。

5. まとめ

ベントナイト混合土の透気特性における寸法効果を把握するべく、高さ寸法および直径寸法（透気面積）を変えた供試体を作製して、透気試験を実施した。その結果、透気特性に与える寸法の影響には以下の傾向が認められた。

- ① 透水係数には寸法の影響は認められなかった。
- ② 初動圧は高さ寸法の影響がないことを確認できた。一方、直径寸法とは負の相関を示した。実際の施設規模では直径方向の寸法の方が高さ方向の寸法よりも卓越するので、初動圧が小型供試体の値よりも大きくなることはない。
- ③ 有効ガス間隙率は高さ寸法および直径寸法の増加とともに減少する傾向にある。
- ④ 定常状態における透気特性であるところの透気係数には寸法の影響は認められない。

ベントナイト混合土の供試体を水で飽和させて透水係数を測定し、さらにガス破過させてから透気係数を測定する一連の試験に要する時間は長期間を必要とするので、透気特性のようなばらつきの大きい特性を把握する際には、多数の小型供試体を

使って試験することが現実的である。上記のような寸法効果の傾向を総合すると、実際に構築されたベントナイト混合土がガスを十分に透過できることを評価する際に、数10 mm級の小型供試体による試験データにて設定したパラメータを採用することは妥当である。実際の施設規模のベントナイト混合土の内側にガスが蓄積して透過するまでの過渡的挙動は、小型供試体における挙動よりも速やかとなる傾向にあると言える。

参考文献

- [1] 下田秀雄 他：六ヶ所低レベル放射性廃棄物貯蔵センターの概要と安全確保策，日本原子力学会誌，30，11，1049-1056 (1991)。
- [2] Voinis, S. et al.: The analytical modelling of gas generation, *Proc. of Workshop organized by NEA in cooperation with ANDRA: Gas Generation and Release*, pp111-119, OECD, 1992.
- [3] 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).
- [4] 今村聡 他：ベントナイト混合土のガス透気に関する実験的研究，日本原子力学会1996年春の大会予稿集，p.651 (1996)。
- [5] 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，36，11，1055-1058 (1994)。
- [6] 石原輝行 他：ベントナイト・砂混合土の現場施工性，第31回地盤工学研究発表会（北見）講演要旨集，B-12，pp.335-336 (1996)。
- [7] 五十嵐孝文 他：ベントナイト・砂混合土の透水特性，第31回地盤工学研究発表会（北見）講演要旨集，B-12，pp.329-330 (1996)。
- [8] 日本規格協会編：突固めによる土の締め固め試験方法，JIS A 1210 (1990)。
- [9] 石油技術協会編：石油鉱業便覧，石油技術協会，p.504 (1983)。
- [10] 穂刈利之 他：ベントナイト混合土の自己修復性に関する考察，放射性廃棄物研究，3，15-23 (1996)。