

## 各種電解質水溶液で膨潤するベントナイトペレットの開発とその性能評価

## Development and Performance Evaluation of Bentonite that Swells with Various Aqueous Electrolyte Solutions

中村 朋弘 Tomohiro NAKAMURA	(岡山大学大学院)
皆瀬 慎 Makoto MINASE	(株ホージュン)
柴田 卓詞 Takuji SHIBATA	(株環境総合テクノス)
加藤 裕将 Hiromasa KATO	(株環境総合テクノス)
西山 哲 Satoshi NISHIYAMA	(岡山大学大学院)
西垣 誠 Makoto NISHIGAKI	(岡山大学大学院)

地下水の熱利用にあたっては、水位変動による不具合を防止するため、各帯水層の水位を個別に監視する必要がある。そのため観測井の構築では、帯水層の上下を遮水する必要があるが、地下水に電解質が確認されることがあるため、電解質水溶液でも確実に膨潤し、施工性の良いベントナイトの開発が望まれる。本研究では、電解質水溶液中でのベントナイトの遮水性を確認する方法として、各種電解質水溶液中で膨潤するベントナイトを溶液中で溶解するコーティング材でペレット化したものを孔内に充填させることによって遮水を確認する試験を行った。その結果、ベントナイトペレットが膨潤を抑え込んだ状態を維持できれば、十分な遮水性を有する層を形成することが確認できた。

キーワード：ベントナイト, 地下水, 熱利用, 塩水, 膨潤, 透水係数 (IGC : D04, E07, D05)

## 1. 研究の背景

近年、都市部への人口の集中、産業構造の変化や地球温暖化に伴う気候変動等の様々な要因が水循環に変化を生じさせ、それに伴い、河川の氾濫や水質汚濁、洪水等様々な自然災害が発生している。そのほか、工場などからの有害な物質の漏えいによる地下水汚染事例が、毎年継続的に確認され、その中には、事業場等の周辺住民が利用する井戸水から検出された例もある。そうした社会情勢からか、地下水汚染を未然に防ぐための水質汚濁防止法や健全な水循環を維持、または回復させることを目的とした水循環基本法といった地下水の保全や管理に関する法律が施行されており、法律に基づいた地下水に悪影響を与えない施設の施工や、管理する地下水の調査が行われていくことが必要となっている<sup>1)</sup>。

そんな中、地下水の豊富な大阪平野では、地下水を用いた再生熱エネルギーの利活用として、ビル空調の熱需要を賄うために、熱利用効率の良いオープンループ型地中熱利用システムの導入に期待が高まっている。大阪平野の西側には、深さ 100m 程度までに 3 層の洪積砂礫層（帯水層）があり、地下水利用に当たっては、これらの帯水層の水位を個別に監視する必要がある。そのため、筆者らは帯水層を効率よく監視するための観測井システムを構築する技術を模索している。しかし、3 層の帯水層の内、最も浅部にある Dg1 層では、導電率の高い地下水（塩濃度  $\text{Na}^+$ : 2,500ppm,  $\text{Cl}^-$ : 4,500ppm, 海水 4 倍希釈程度）が観測されており、導電率の高い状態においても帯水層の上下を遮水する技術が求められる。

浅層地下水の熱利用のための井戸、観測井の設置において、複数の帯水層間の止水の課題に対して、一般にはベントナイトペレットや高分子吸水膨潤剤を帯水層間の止水剤として用いている<sup>2)</sup>。しかし、地下水が塩水化している環境下では、ベントナイトが膨潤しにくく、確実な帯水層間の止水を行うことは困難である。この研究に関して、澤田<sup>3)</sup>は電解質水溶液中でも膨潤するベントナイト(以下、多目的ベントナイト)を開発した。しかし、すでに液体が満たされた状態で、粉体の多目的ベントナイトをそのまま投入しても、締め固められず、難透水層を生み出すことは困難である。そのため、投入後しばらくしてから膨潤し始め、かつ導電率の高い液体中でも膨潤する材料が必要となった。そこで本研究では多目的ベントナイトの表面に電解質水溶液で溶融するコーティング材で覆ったベントナイトペレット<sup>4)</sup>(以下、多目的ベントナイトペレット)を作成し、地下水での確実な止水を行う方法を開発した。

## 2. 多目的ベントナイトペレットの概要

多目的ベントナイトは、従来のベントナイトと膨潤活性物質を混合加工処理することによって得られる。従来のベントナイトは海水で図-1 のようにモンモリロナイトのごく制限された結晶性膨潤にとどまるが、多目的ベントナイトはモンモリロナイトの結晶層間に多量の水を吸収して、体積増加を伴う浸食性膨潤を発現する。さらに、この浸食性膨潤は膨潤活性物質の働きによって残余層間引力が作用し合っているため純Na-ベントナイトのように自由分散して流亡することがない。これらのことから海水だけでな

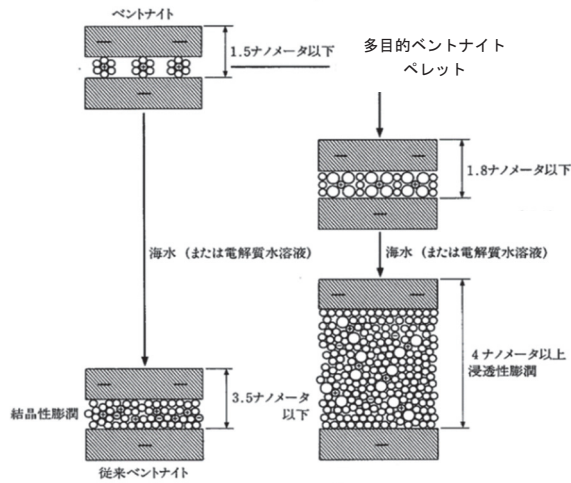


図-1 海水での膨潤のメカニズム<sup>3)</sup>

表-1 各種溶液中での膨潤力<sup>3)</sup>

溶液	膨潤力(mL/2g)	
	多目的ベントナイト	原料ベントナイト
太平洋海水	27.0	7.0
日本海海水	26.5	9.0
人工海水	32.0	9.0
セメント飽和上澄み液	49.0	28.0
1 規定硫酸溶液	32.0	15.0
1/2 規定苛性ソーダ溶液	27.0	10.0
蒸留水	20.0	24.0

くセメントミルク処方に直接添加して膨潤、分散させることができ、ベントナイトを上水で事前に循環熟成させてから使用するプレハイドレーションや多量の特種界面活性剤の併用を必要としない。また無毒性の膨潤活性物質で活性化されたベントナイトから構成されるため、使用による2次公害の恐れがないことが挙げられる。多目的ベントナイトは表-1のような各種電解質中で高い膨潤力を発現することが確認されている。拘束された空間にこれらの多目的ベントナイトを充填すれば、時間とともに水溶液を吸収、膨潤し、難透水層ができる。この多目的ベントナイトは今回の縦穴の遮水のほかに、廃棄物処分場から集水した有害物質槽や汚染物質拡散防止のための難透水性バリア材、耐海水性および耐セメント性ジオシンセティッククレイライナー、海水処方によるボーリングの調泥材などの用途が期待される<sup>3)</sup>。

### 3. 多目的ベントナイトペレットを用いた充填状況の確認試験

計画している観測井は、図-2 に示すような井戸構造である。そこで図-2 のモデルを模擬した孔径 φ150mm の塩ビパイプ内に 2 本の孔径 50mm の塩ビパイプと 1 本の φ40mm の塩ビパイプを設置する。各帯水層の水位を個別に測定するためには各帯水層間の遮水が重要で、ベントナ

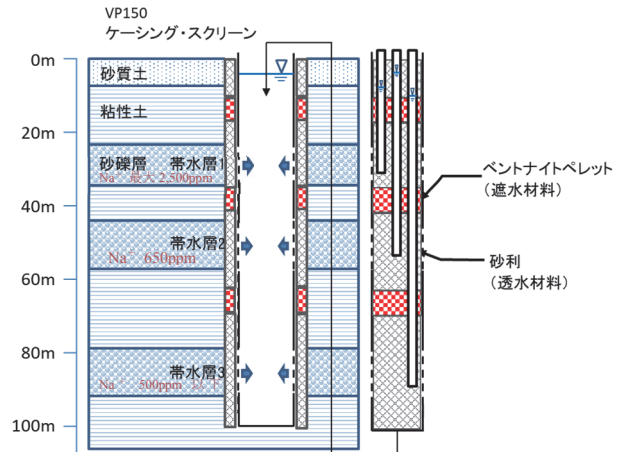


図-2 浅層の様子

表-2 多目的ベントナイトの諸元<sup>3)</sup>

かさ密度 (g/cm <sup>3</sup> )	膨潤力(mL/2g)		pH(2%soln)	
	3.5%食塩水	蒸留水	3.5%食塩水	蒸留水
0.68	24	20	7	9.8

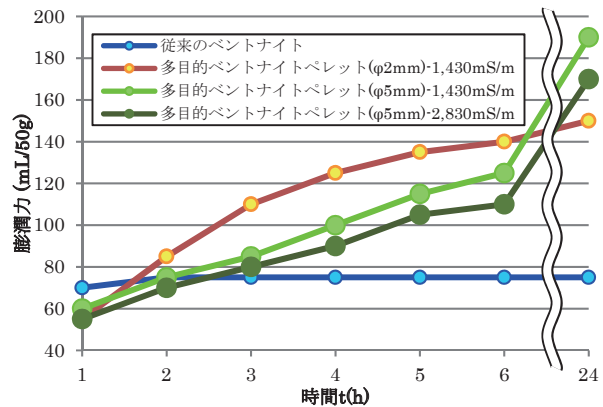


図-3 各種試料の膨潤力

イトペレットが充填され、膨潤することにより遮水性能が発揮される必要がある。

試験は、現地状況を模擬するため、内径 150mm の透明の塩ビパイプ内に 3 本の塩ビパイプを設置し、水溶液で満たした後、砕石及び多目的ベントナイトペレットを投入し、ベントナイトの充填状況や膨潤の状況を確認した。

多目的ベントナイトペレット作成に用いる多目的ベントナイトの諸元を表-2、溶媒と試料ごとの膨潤力の時間経過を表-3 に示す。溶液として、現地の条件を加味した海水の 4 倍希釈ほどの導電率である 1,430mS/m のもの、海水の 2 倍希釈ほどの導電率である 2,830mS/m のものを使用した。通常、ベントナイトの膨潤力を測定する際はメスシリンダーに資料を 2g 投入するが、ペレットの資料は正確に 2g 投入することができず、膨潤防止の加工のため分割もできないため、50g 投入して測定する。

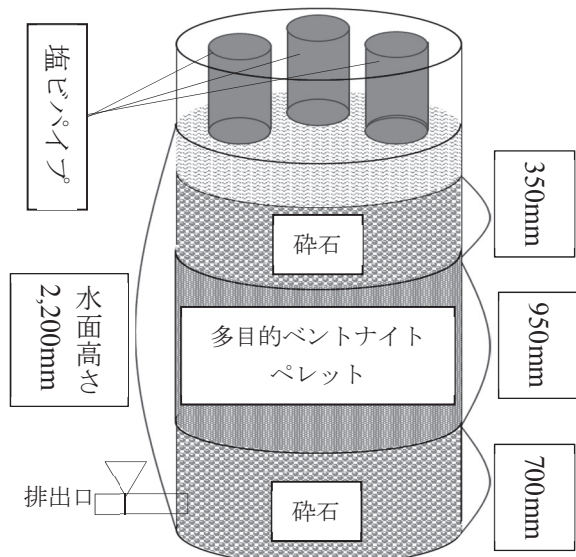


図-4  $\phi 2\text{mm}$  の多目的ベントナイトペレットを充填させた塩ビパイプの模式図

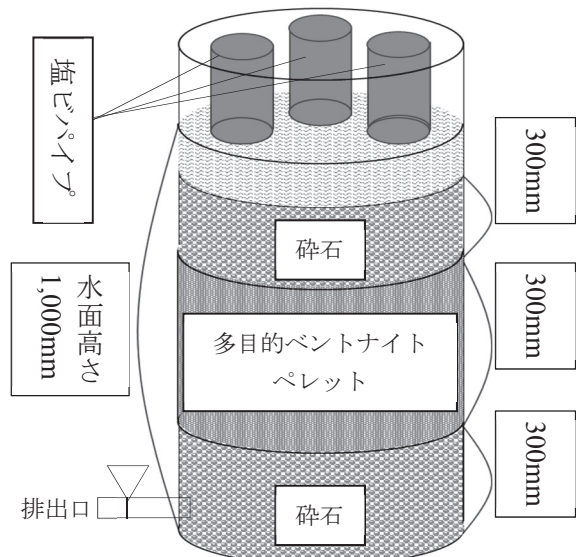


図-5  $\phi 5\text{mm}$  の多目的ベントナイトペレットを充填させた塩ビパイプの模式図

### 3.1 試験フロー( $\phi 2\text{mm}$ )

塩ビパイプの中に現場状況を疑似的に再現し、電解質水溶液と多目的ベントナイトペレットを充填させた。具体的な材料と手順を以下に示す。

#### 3.1.1 材料

使用溶液は海水(瀬戸内海水)導電率 $4,010\text{mS/m}$ を採取し、海水4倍希釈を目標として水道水にて希釈した導電率 $1,430\text{mS/m}$ のものを用意。

遮蔽材は $\phi 2\text{mm}$ の多目的ベントナイトペレットを用意。

砕石は粒の大きさが $2.5\text{mm}$ から $5.0\text{mm}$ の7号砕石を用意した。

#### 3.1.2 手順

底部に排水口を設けた内径 $150\text{mm}$ ×長さ $2,500\text{mm}$ の透明塩ビパイプ(①)を立て、その中に $\phi 50\text{mm}$ ×2本(②)、 $\phi 40\text{mm}$ ×1本(③)を配置する。①中の②、③の隙間に砕石を底面から $700\text{mm}$ まで充填させた後、②、③に浮き上がり防止のために希釈海水を投入。①中へ底面から $1,700\text{mm}$ 程度まで希釈海水を投入した後、多目的ベントナイトペレットを底面から $1,650\text{mm}$ まで投入した。最後に砕石を底面から $2,000\text{mm}$ まで充填する。作成した試験装置の模式図を図-4に示す。

### 3.2 試験フロー( $\phi 5\text{mm}$ )

塩ビパイプの中に現場状況を疑似的に再現し、電解質水溶液と多目的ベントナイトペレットを投入した。具体的な材料と手順を以下に示す。

#### 3.2.1 材料

使用溶液として海水(瀬戸内海水)導電率 $4,010\text{mS/m}$ を採取し、海水4倍希釈を目標として水道水にて希釈した導電率 $1,430\text{mS/m}$ と、海水2倍希釈を目標として水道水にて希釈した導電率 $2,830\text{mS/m}$ のものを用意した。

遮蔽材は $\phi 5\text{mm}$ 多目的ベントナイトペレットを用意。

砕石として粒の大きさが $2.5\text{mm}$ から $5.0\text{mm}$ の7号砕石

を用意した。

#### 3.2.2 手順

底部に排水口を設けた内径 $150\text{mm}$ ×長さ $2000\text{mm}$ 透明塩ビパイプ(①)を立て、その中に塩ビパイプ $\phi 50\text{mm}$ ×2本(②)、 $\phi 40\text{mm}$ ×1本(③)を①中に配置する。①中の②、③の隙間に砕石を底面から $300\text{mm}$ まで充填し、②、③に浮き上がり防止のために希釈海水を投入する。①中へ底面から $1000\text{mm}$ 程度まで希釈海水を投入した後、隙間に多目的ベントナイトペレットを底面より $600\text{mm}$ まで投入。最後に隙間に砕石を底面から $900\text{mm}$ まで充填する。作成した試験装置の模式図を図-5に示す。

### 3.3 試験後のモニタリング

#### 3.3.1 $\phi 2\text{mm}$ のモニタリング

多目的ベントナイトペレット投入から1日後、試験開始から11日後の管内部の多目的ベントナイトペレットと砕石の境界面を赤い線で示した膨潤状況を写真-1に示す。写真中の赤線はペレット投入直後の砕石とペレットの境界線であり、ペレットの流出を調べるためのものである。ベントナイトペレットと砕石との接触部分は膨潤した多目的ベントナイトの層が形成されているが、ベントナイトペレット層の中間部分には粒状のままのペレットが確認された。塩ビパイプに取り付けている排出口を開放した結果、約13分で $300\text{cm}^3$ ほどの排水を確認した。その後10秒に1滴ほどの排水を確認し、徐々に排水量が低下した。その際に海水最上部の水位変化が起きなかったため、多目的ベントナイトペレット層を通しての漏水でないことがわかる。

次に、砕石と多目的ベントナイトペレットとの境目の状況を確認した。写真-1の状況から、砕石の位置が変化していないこと、ベントナイトが砕石側に見られないことから砕石の重量はベントナイトの膨潤を抑え込み圧密状態にしており、なおかつ砕石側に多目的ベントナイトペレット

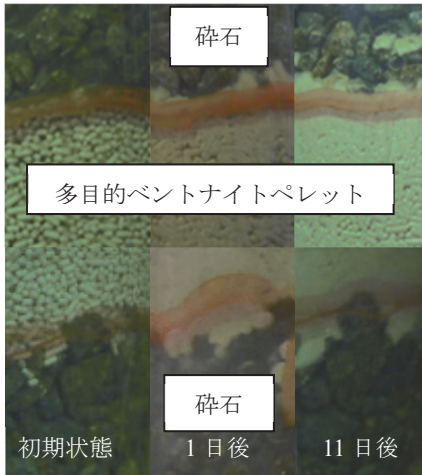


写真-1 多目的ベントナイトペレットと砕石の境界面

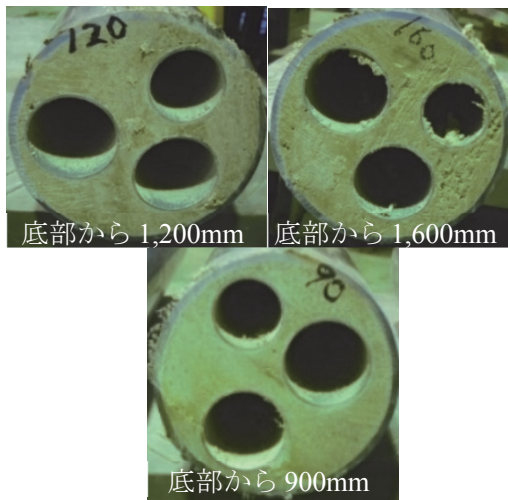


写真-2 φ2mm 多目的ベントナイトペレットの切断面

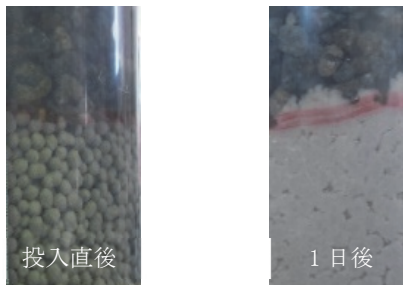


写真-3 φ5mm 導電率 1,430mS/m の溶液中の多目的ベントナイトペレットの膨潤

のモンモリロナイトが流出していないことがわかる。

最後に塩ビパイプから海水を取り除き、多目的ベントナイトペレットの切断面を確認した。切断面の様子を写真-2に示す。底部から900mm・1,200mm・1,600mm部分を切断した。いずれの切断面も充填されていた。切断面の一部をカッターで掘り返すと粒状体となった多目的ベントナイトペレットが確認された。指で用意につぶれ、変形の度合いからも膨潤していることが確認できる。これらからベントナイトペレット層の中間部分に存在した間隙はペレット内の空気が水置換で排出され、上下の密閉で生じたも

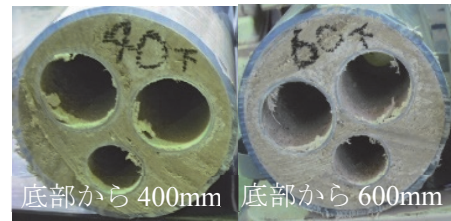


写真-4 φ5mm 多目的ベントナイトペレットの切断面

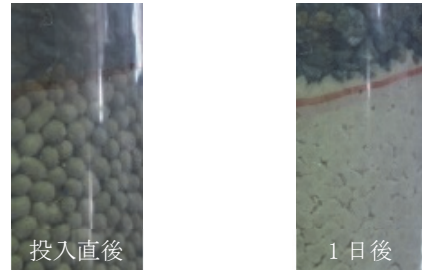


写真-5 φ5mm 導電率 2,830mS/m の溶液中の多目的ベントナイトペレットの膨潤

のではないかと推測される。また、上層、下層に関係なく多目的ベントナイトペレットが膨潤することがわかる。

### 3.3.2 φ5mm(使用溶液:導電率 1,430mS/m)のモニタリング

φ5mm 導電率 1,430mS/m の溶液を満たした塩ビパイプに多目的ベントナイトペレット投入した直後と、1日後の管内部の状況、砕石と多目的ベントナイトペレットとの境界面の様子を写真-3に示す。砕石との接触部分は膨潤し、多目的ベントナイトと密着した層が形成されている。ペレット層中間にも間隙は観測されるが、φ2mmの結果より粒の形状が崩れ、間隙が埋められていることが確認された。

まず、砕石に挟まれた多目的ベントナイトの膨潤を確認した。写真-3の状況から、写真-1同様に砕石の位置が変化していないこと、ベントナイトが砕石側に見られないことから砕石の重量はベントナイトの膨潤を抑え込み、なおかつ砕石側に多目的ベントナイトペレットのモンモリロナイトが流出していないことがわかる。

次に、塩ビパイプ下部に取り付けている排出口を開放した。開放直後の通水量は10秒で240mL、その後開放したままの状況の通水量が19時間で100mLとなった。

最後に、塩ビパイプから海水を取り除き、底部から400mm、600mm部分を切断し、その切断面を確認した。切断面の様子を写真-4に示す。いずれの切断面も充填されていた切断面の一部をカッターで掘り返すとφ2mmの時と同様に粒状体となった多目的ベントナイトペレットが確認され、上層、下層関係なく膨潤していることがわかる。φ2mmのものとは膨潤による閉塞が確認された。

### 3.3.3 φ5mm(使用溶液:導電率 2,830mS/m)のモニタリング

φ5mm 導電率 2,830mS/m の溶液を満たした塩ビパイプに多目的ベントナイトペレット投入した直後と、1日後の管内部の状況を写真-5に示す。砕石との接触部分は膨潤し、多目的ベントナイトが密になった層を形成している。ペレット層中間にも間隙は観測されるが、φ5mm 導電率

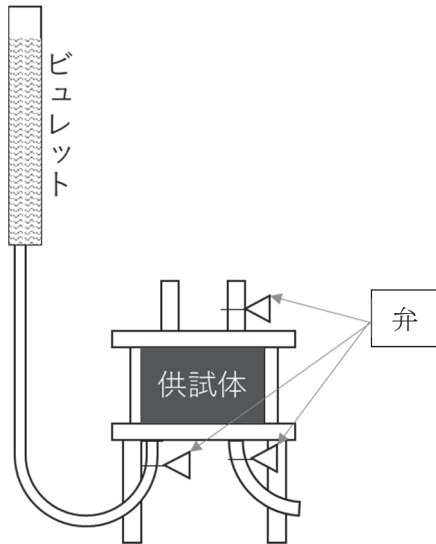


図-6 変水位透水試験(φ2mm)の模式図

1,430mS/m と同様に φ2mm の結果より粒の形状が崩れ、間隙が埋められていることが確認された。

φ5mm 導電率 2,830mS/m の水溶液は、長期安定性の確認を行うこととし、同大学室内の中央部分に固定し、定期的な透水状況の確認を行うこととした。

試験開始から 93 日後に塩ビパイプに取り付けている排出口を開放した結果、開放直後の通水量は 20 秒で 17.8mL となった。

#### 4. 多目的ベントナイトの透水係数の経時的な変化

多目的ベントナイトペレットが有する透水性能を調査するために φ2mm, φ5mm の多目的ベントナイトペレットを JISA 1218 に基づいて変水位透水試験をおこない、透水係数を測定した。それぞれ供試体に擦切りいっばいの多目的ベントナイトペレットを充填し、定容積の状態にして測定した。現場、塩ビパイプの状況に合わせ、多目的ベントナイトペレットの供試体を作成する際に作成容器を電解質水溶液で満たした状態にする。

##### 4.1 変水位透水試験(φ2mm)

φ2mm の多目的ベントナイトペレットの透水性能を調査するため、図-6 のような変水位透水試験機を用いて透水係数を測定した。作成した供試体は高さ 50mm、直径 φ100mm の円柱形で、そこに入る多目的ベントナイトペレットは擦切りで 481.4g である。供試体、およびビュレットに用いる溶液は導電率 1,430mS/m のものを使用した。

測定した透水係数の経時変化を図-7 で示す。地下流水がないと仮定した際の試験は通水直後しばらく測定した後 1 日通水を停止させ、十分に膨潤させてから再び通水を開始して測定した。地下流水があると仮定した際の試験は、通水後に一時停止させずに常に通水させた。

現場で予想される状況の一つである地下流水がある場合のデータの最低の透水係数である  $5.51 \times 10^{-12} \text{m/s}$  と、十

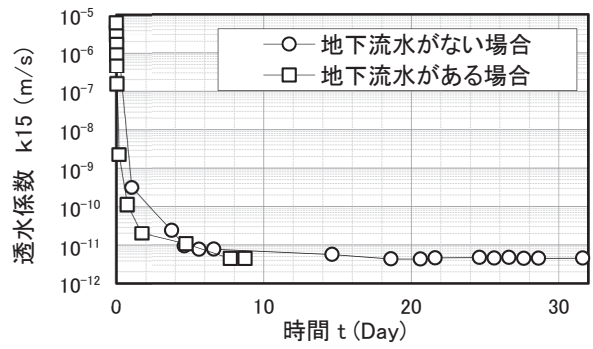


図-7 変水位透水試験(φ2mm)の結果

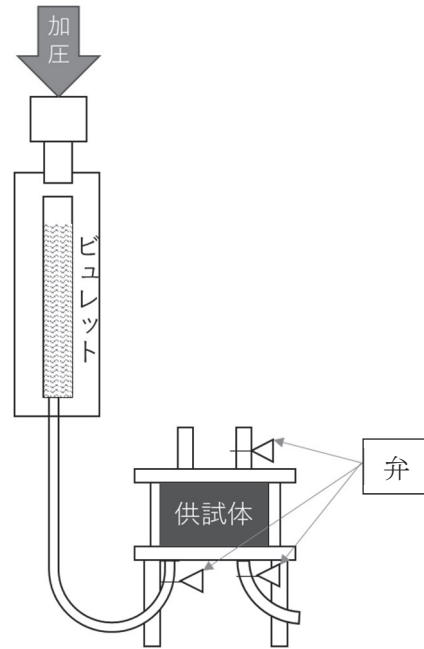


図-8 変水位透水試験(φ5mm)の模式図

分に膨潤させた状況である地下流水がない場合の試験の最低の透水係数  $5.36 \times 10^{-12} \text{m/s}$  と比較しても透水係数に大きな変化は見られない。したがって海水が流れている状況、流れていない状況でも多目的ベントナイトペレットは水分を吸収し、かつ十分に低い透水係数を持つことがわかる。

##### 4.2 変水位透水試験結果(φ5mm)

φ5mm の多目的ベントナイトペレットの透水性能を調査するため、当初図-6 のような変水位透水試験機を用いて透水係数を測定した。しかし、水位差が 1,500mm ほどでは、ビュレットの水の水位が上昇してしまい、正確な透水係数を測定することが困難であった。そこで、図-8 のような上部に空気圧をかけ続けることによって疑似的に水位差を作り、水位上昇を抑制する試験機を用いた。作成した供試体は高さ 50mm、直径 φ100mm の円柱形で、そこに入る多目的ベントナイトペレットは擦切りで 481.0g である。供試体およびビュレットに用いる溶液は導電率 1,430mS/m と導電率 2,830mS/m の 2 種類用意した。

測定した透水係数の経時変化を図-9 で示す。図-9 からわかるように、導電率 1,430mS/m の水溶液の最低透水係

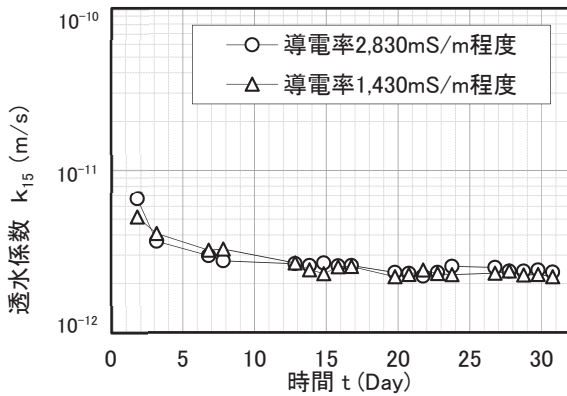


図-9 変水位透水試験(φ5mm)の結果

数は  $2.20 \times 10^{-12} \text{m/s}$ , 導電率 2,830mS/m の水溶液の最低透水係数は  $2.23 \times 10^{-12} \text{m/s}$  である。したがって導電率による透水係数の違いは見られず, 導電率による膨潤力の差は電解質水溶液が含まれた地下水程度では生まれないと考えられる。また, 図-7 と比較して, 粒が大きくなると透水係数が減少し, より水を通しにくくなった。考えられる要因として, 粒が大きくなったことにより, 単位体積当たりが占める多目的ベントナイトペレットの表面コーティング材の質量が減り, 膨潤から庇護する物質の総量が減ったこと, 粒が大きいため形が崩れやすく, 粒の間隙をより密に埋められたこと, などが考えられる。

供試体作成後, ビュレット内部の水を使って供試体内部の空気を抜く作業が必要だが, 空気圧がかかった状態では一瞬でビュレット内の水を使ってしまい, 供試体内部の空気を抜くことができない。そのため φ5mm の試験は試験開始直後の透水係数を求められなかった。

## 5. 結論および今後の課題

### 5.1 結論

本研究では, 日本の都市の沖積平野での浅い地盤において, 塩分を含んだ地下水を有する複数の帯水層での水位や水圧を一本の観測井で計測する際に遭遇する各帯水層間を如何に確実に止水するかの手法について探求した。

すなわち塩水環境内においても膨潤する新しいベントナイト(多目的ベントナイト)を用いて, その圧縮ペレットを試作した。また, このペレットの表面を水溶性の材料でコーティングし, 観測井内に地上から投入できる二種の直径(φ2mm, φ5mm)の多目的ベントナイトペレットを作成した。

これらの止水材料の塩水環境下での止水性を確認するために, 実験室内で実際の大阪平野での多層帯水層を模擬した実験を実施した。すなわち, 観測井内に三層の帯水層の水圧を計測するための三本の観測管を挿入して, それぞれの帯水層間の止水が確保出来るかどうかを確認した。

上記の研究より得られた結果を列挙すると以下になる。

- (1) φ2mm と φ5mm の多目的ベントナイトペレットは圧密状態であれば両方とも塩水環境下で十分に止水性を

を確保出来ることがわかった。

- (2) 止水層の膨潤後の透水係数を計測すると直径が 5mm のペレットのほうが低い透水係数を得られることがわかった。
- (3) 変水位透水試験で静水条件と流水条件での透水係数を計測した。その結果, 流水条件でも十分に膨潤し, 止水性が確保出来ることがわかった。
- (4) 上記の結果より, 実際の現場で帯水層間である程度の地下水の流動があっても本研究で用いたペレットは十分に止水性が確保出来ることがわかった。

### 5.2 今後の課題

本研究では二種類のみが多目的ベントナイトペレットを試作して, 実際の現場の観測井を模擬して帯水層間の止水性が確保出来ることを示した。しかし, 実際の現場ではそれぞれの場所での帯水層の深度も難透水層の厚さも異なるため, 以下に示し課題の解決が必要である。

- (1) 実際の現場に即した止水層までのペレットの沈降速度を加味して, それぞれの深度で十分に充填した後, ペレット層の上部を砂層の形成が完了するまでの時間が確保出来るだけのペレットの表面コーティング層の厚さを事前に検討しておく必要がある。
- (2) ペレットを作成する際にどの程度の圧縮性を確保するかについて事前に検討する必要がある。
- (3) 塩水環境下で膨潤したペレットの耐久時間についてのデータがまだ蓄積されない。従ってこれからも多くの現場に適用してその耐久性を吟味する必要がある。
- (4) 多目的ベントナイトペレットの安価な作成方法に関する研究が必要である。

### 参考文献

- 1) 小峯 秀雄, 安原 一哉, 村上 哲: 人工海水影響下における各種ベントナイトの透水係数, 土木学会論文集 C, Vol.67, No.2, pp.276-287, 2011.
- 2) 湊 正雄, 小池 清: 地質調査法, 古今書院, pp.131-135, 1985.
- 3) 澤田 武夫: 多目的ベントナイト「マルチゲル」の開発, いんだすと, 1995年6月号, pp.55-59, 1995.
- 4) Filho, P.R.: Laboratory tests on a new borehole seal for piezometers, *Ground Eng.*, Vol.9, No.1, Jan., pp.16-18, 1976.
- 5) 小峯 秀雄, 安原 一哉, 村上 哲: 工海水環境下におけるベントナイトの一次元自己シール性, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.2, pp.389-400, 2009.
- 6) Fetzer, C.A.: Pumped Bentonite Mixture Used to Seal Piezometers, *J. Geotech. Eng. Div. ASCE*, Vol.108, No. GT2, Feb., pp.295-299, 1982.

(2018年6月18日 受付)