

(論文)

低透水層用充填材「ベントボール」[®]Low Permeability Layer "BENTBALL"[®]

和田隆太郎*
Ryutaro Wada



山口憲治*
Kenji Yamaguchi



竹内靖典*
Yasunori Takeuchi



隈元純二**
Junji Kumamoto



小峯秀雄***
Hideo Komine



中西 宏****
Hiroshi Nakanishi

In underground nuclear waste disposal sites, bentonite clay is used as backfills or plugs to stop water leakage and ensure low permeability and nuclide adsorption. In this study, a new material (BENTBALL) developed by Kobe Steel to solve the problems which traditional bentonite has used in the execution is evaluated.

まえがき = 放射性廃棄物の地下処分場では、止水・低透水係数維持・核種吸着保持及び物理的緩衝能などの性能を期待したベントナイト¹⁾系材料の充填材(緩衝材など)・プラグなどへの適用が検討されている。

これらの性能を担保するには、ベントナイトを高密度に施工することが必要とされている。しかし、その搬送・定置などの現地施工性及び品質管理には課題が残されている。

これらの課題を解決すべくベントナイトを高密度の球状に成形したベントボールを開発した。

緩衝材などにベントボールを使用すると、高密度ベントナイト層(低透水層)が施工可能、重力・空気搬送による施工性向上、コストの低減、施工用アクセスエリアの低減による処分場構造の合理化などのメリットが見込める。

ここでは、高密度ベントナイト層が施工可能であることを確認するため、異種粒径のベントボールを用い充填試験と膨潤特性評価を実施したので報告する。

1. ベントボールの概念

原子力発電所の使用済燃料再処理施設などから発生する放射性廃棄物は、その放射能濃度に応じて地下の適切

な深度に埋設処分することが計画されている。例として、高レベル放射性廃棄物処分の概念図を図1に示す。鉄製容器の周りには地下水の流れを遮断し、核種を吸着する目的でベントナイト系材料が充填される。

ベントナイトは、地表などに堆積した粘土で、非常に薄い層状の結晶構造を持っている。吸水すると10倍以上に膨潤し、さらに水と混合すると粘性を発揮する。しかも、長時間静置しても沈殿せず、無機物のため公害の心配がない物質である。

ベントナイト系材料の所期性能を担保するには、ベントナイトを高密度に施工することが必要とされており、その施工法としては現場締固め、ブロック状成形体の積重ねがあるが、前者は目標密度が達成できない可能性や粉塵が舞上がる問題があり、後者はそのハンドリング性に問題がある。当社は、それらの問題点を解決すべく、高密度な(施工時の所期乾燥密度以上)球状ベントナイト成形体であるベントボールを充填する施工法を考案した(図2)。

ベントボールに関しては施工時に隙間があるが、ベントナイトの膨潤特性により隙間は閉鎖される。それぞれ同様の平均乾燥密度で施工された場合、時間が経過すると同様の止水性を発揮することが期待される。

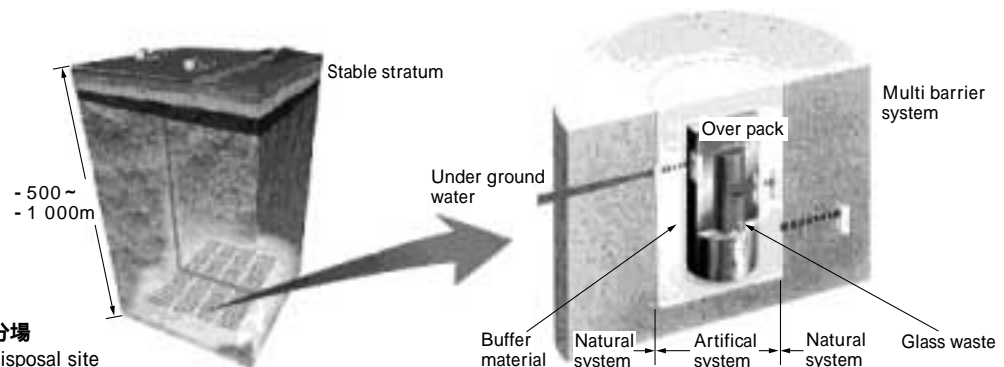


図1 高レベル放射性廃棄物処分場
Fig. 1 High level nuclear waste disposal site

*エンジニアリングカンパニー 原子力本部 技術部 **技術開発本部 化学環境研究所 ***茨城大学 工学部 都市システム工学科
****神戸市立工業高等専門学校 都市工学科

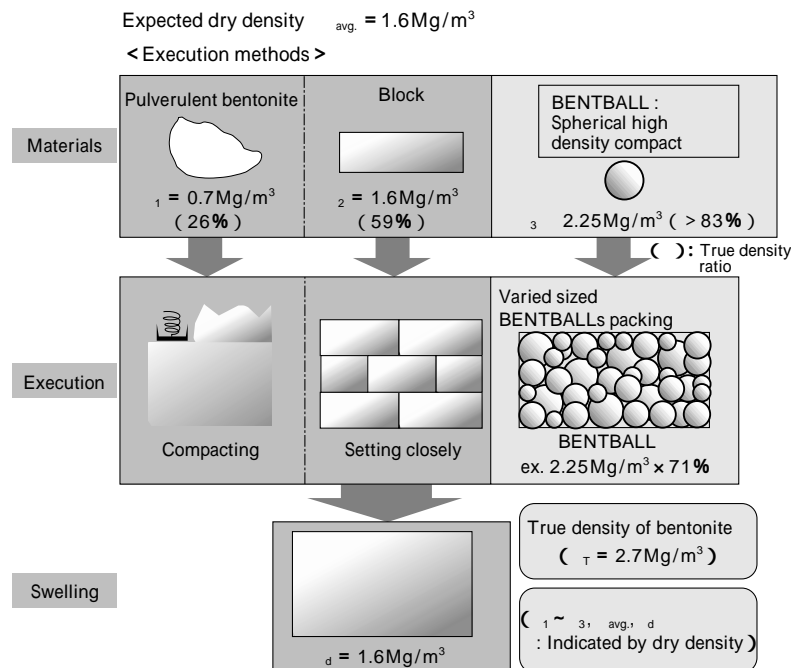


図2 ベントボールの施工概念
 Fig. 2 Concept of BENTBALL execution

3章にて、ベントボールを用いることで実際に高密度ベントナイト層（低透水層）が施工可能であること、またほかの施工法ではできない隙間への充填について検証した。4章では、ベントボールの膨潤特性についての研究一例を報告する。

2. ベントボールの製作

現在、ベントボールの材料として使用したのは、ベントナイトがクニミネ工業製のクニゲルV1（Na型）とクニポンド（Ca型）、及び日商ベントナイト製のMX-80（Na型）の3種類で、ケイ砂が三河珪石製の5, 8, 9号三河 鳳屋製N-30の4種類である。これらの材料をベントナイト / ケイ砂 = 20 ~ 100% / 80 ~ 0%で均質混合し、造粒や等方圧加圧処理（最大600MPa）などを施し、球状の成型品を作製した。製作例として、クニゲルV1：100%の50mm, 20mm, 2mmのベントボールを表1に示す。

3. 施工試験

ベントボールは、1) 高強度、2) 密度管理が容易、3) 搬送が容易、3) 施工用の隙間掘削及び隙間充填材が不要、4) ブロック組立・位置決めが不要、5) 遠隔で施工することが可能などの特徴があり、地下処分場の廃棄体内部 / 外周充填材、坑道ベントナイトプラグ、坑道埋戻し材添加物などへ適用できる可能性がある。ここでは2), 3), 5) に関連する試験を実施したので報告する。

表1 ベントボール製作例
 Table 1 Example of BENTBALL

Average ball size (mm)	50	20	2
Appearance			
Dry density (Mg/m³)	2.25	2.25	2.25

3.1 重力充填試験

数種類の粒径に圧縮成型された高密度のベントボールを混合充填することにより、高密度に充填密度を制御できる見通しを得た。以下に試験の一例を示す。

3.1.1 充填試験方法

充填容器（SUS製：240mm × H240mm）に、充填物を重力充填し、その充填率（= 充填物体積 / 充填容器体積）、充填乾燥密度を測定した。充填物には2種粒径ベントボール、3種粒径ベントボール、参考としてガラスビーズなどの模擬材を使用した。ベントボールは表1に示すものを使用した。

充填方法は2種粒径以上の充填物を事前に混合し、充填容器に3回に分けて充填した。

3.1.2 実験及び検討結果

2種粒径、3種粒径ベントボールの充填試験結果を図3に示す。試験結果を以下に整理する。

- ベントボールの2種粒径混合（20 + 2）充填試験では、最高充填乾燥密度： 1.61Mg/m^3 （2 / (2 + 20) : 40vol%）であった。
- 3種類の粒径（50 + 20 + 2）を混合して充填試験した結果、最高充填乾燥密度は 1.78Mg/m^3 となり、2種充填に比べて大幅に向上した。
- 2種類粒径混合充填を同径の模擬材（ガラスビーズなど）で実施した結果、ベントボールに比べて、充填率（= 充填物体積 / 充填容器体積）が約10%高かった。

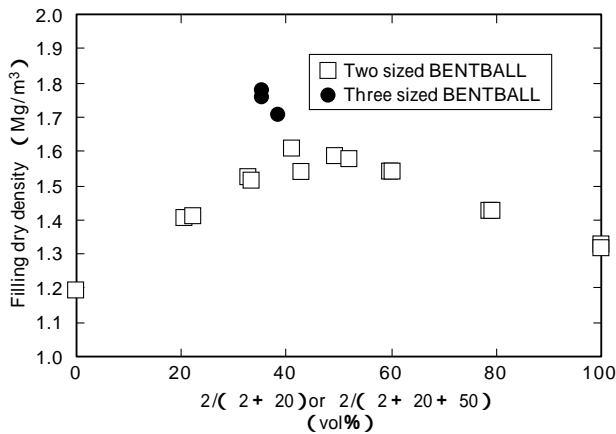


図3 ベントボール充填特性
Fig. 3 Packing property of BENTBALL

これは真球度の差であると考えられる。

今回の小規模充填密度試験により、ベントボールを用いると処分場で要求される止水性を確保できる高密度充填が達成できると考えられる。今後、今回の結果を踏まえて更なる高密度充填方法の検討（最適粒径比と混合比の選定、表面性状の向上、充填方法（振動充填など）の選定、大型容器充填におけるデータの採取）を実施していく予定である。

3.2 吹付け施工試験

処分孔道の埋戻しや、高レベル廃棄物処分においてオーバーバックを横置きする場合は、その上部に隙間ができるため吹付け施工が検討されている。

ここでは高レベル廃棄物処分におけるオーバーバック横置き定置を模擬し、ベントボールの吹付け施工を実施した。試験状況を図4に示す。粒径1.7～2mmベントボールを充填したときの充填乾燥密度は $\rho_d = 1.20 \text{ Mg/m}^3$ であった。ただし、重力充填試験において1.7～2.0mmを充填したときと1.0～3.0mmを充填したときでは、後者の方が 0.15 Mg/m^3 高かった。これにより、1.0～3.0mm球の吹付け施工により、2mm球単独よりも充填密度が向上する見通しがあり、現時点で吹付け施工により得られる充填密度 ρ_d は 1.35 Mg/m^3 と推定される。

今後の課題としては、吹付け充填するベントボールの配合比・透水抑制性能の評価、ベントボール吹付け施工装置の概念の具体化、ベントボール吹付け施工における品質管理方法の検討が挙げられる。

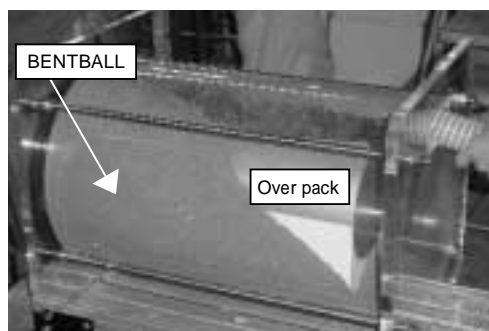


図4 ベントボール吹付け
Fig. 4 Spraying of BENTBALL

4. ベントボールの浸潤・膨潤特性

4.1 ベントボールの浸潤特性試験

ベントボールの浸潤・膨潤特性を、茨城大学で開発したメスシリンダ法²⁾により実験的に調査した。取得した実験結果を、突固めにより締固めたベントナイトの実験結果と比較することにより、ベントボールの緩衝材としての利用の可能性を検討した。

4.1.1 実験方法

使用した試料は、山形県月布産のNa型ベントナイト（クニミネ工業製のクニゲルVI，含水比：9.1～13.5%）と、このベントナイトを高密度に加工したベントボールを使用した。ベントボールの粒径、乾燥密度、初期含水比は表2に示すとおりである。試料に供給する水には蒸留水を使用した。供試体作製方法は次のとおりである。すなわち容量1000mlメスシリンダの500ml位置まで、ランマ（質量：1.2kg）で試料を5層に分けて突固める。その後、鉛直圧としてステンレスボールを供試体上部に投入する。今回実施した条件では、鉛直圧は3.1kPaであった。次に蒸留水をメスシリンダ内に給水し実験開始とする。実験条件は表3に示すとおりである。実験中は供試体の上端面（ V_a ）と水溶液の浸潤面（ V_b ）をメスシリンダの目盛りから読取る（図5参照）。実験期間は90日間とした。浸潤特性については式(1)により定義される浸潤速度 v_n ，膨潤特性については膨潤した体積を蒸留水の浸潤した体積で除し百分率で表示した式(2)により定義される膨潤率（ η ）の時間変化としてデータを整理する。

$$V_n = \frac{V_a - V_b}{A \times t_n} \times 100 (\text{mm/min}) \dots \dots \dots (1)$$

$$\eta = \frac{V_a - V_b}{V_a - V_0} \times 100 (\%) \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 A は供試体断面積 (cm^2)， t_n は経過時間 (min) である。

ベントボールにおいては、メスシリンダ壁面と供試体に微小な隙間が生じてしまうため、実験開始直後にメスシリンダ壁面付近の一部で、給水と同時に浸潤が進行してしまう場合がある。図6は実験開始直後の様子を示した一例である。色の濃い部分は、給水と同時に浸潤が進行してしまった箇所である。以上のことから、ベントボールをメスシリンダ法で実験する際、水溶液の浸潤面は供試体とメスシリンダ壁面の隙間によらず、水溶液が均一に浸潤したと思われる浸潤面（ V_b ）を読取り浸潤速度

表2 ベントボールの基本データ
Table 2 Basic data of BENTBALL

	BENTBALL
Ball size (mm)	1.70～2.00
Dry density (Mg/m ³)	2.03
Initial moisture ratio (%)	1.37

表3 実験条件
Table 3 Experimental condition

Experimental condition	A	B
Kind of test pieces	BENTBALL	Compacted bentonite
Feedwater	Distilled water	
Capacity of graduated method	1 000ml	
Initial volume of test pieces	500ml	
Waterstage of feedwater	1 000ml cons.	
Filling dry density (Mg/m ³)	1.23	1.01
Pressure (kPa)	3.1	

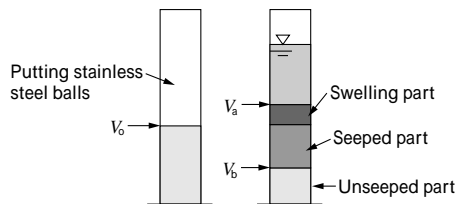


図5 メスシリンダ法の概略図
Fig. 5 Schematic diagram of graduated method

を算出した。

図7に浸潤速度と膨潤率の経時変化を示す。今回の実験条件において、ベントボールは突固め供試体に比べ、浸潤速度の値は低く、膨潤率も高い値を示した。ベントボールは突固め供試体に比べて供試体の初期乾燥密度が高いため、上記のような結果を示したと考えられるが、給水前の供試体において水みちとなり得る部分の割合はベントボールの方が大きく、供給水の浸潤が進行しやす

い条件にあるものと思われた。しかし、上記の実験結果から、給水前のベントボールは水みちとなり得る部分の占める割合は大きい、その止水性は高く長期間にわたり維持されるものと考えられる。図6右は、給水開始から90日経過した後の実験の様子を示したものである。この写真からも、ベントボールの長期間にわたる高い止水性と高い膨潤性が確認できる。今回行ったベントボールの場合、図6左に示したように、メスシリンダ壁面と供試体の間に若干の隙間が生じてしまったため、実験開始直後にメスシリンダ壁面付近の一部で給水と同時に浸潤が進行してしまった。しかし、給水と同時に浸潤が進行した部分は、時間が経過しても浸潤がそれ以上進行することなく、供給水が均一に浸潤していると判断される浸潤面のみが時間の経過に伴い進行している状況が観察された。

以上の実験結果から、早期浸潤しやすいと懸念されるベントボールでも地下水の流速が小さい条件では、このように急速に再冠水する状況は少なく、緩衝材として適

図6 ベントボール中の浸潤特性
(左：ベントボール，右：突固め供試体)
Fig. 6 Saturating property of BENTBALL

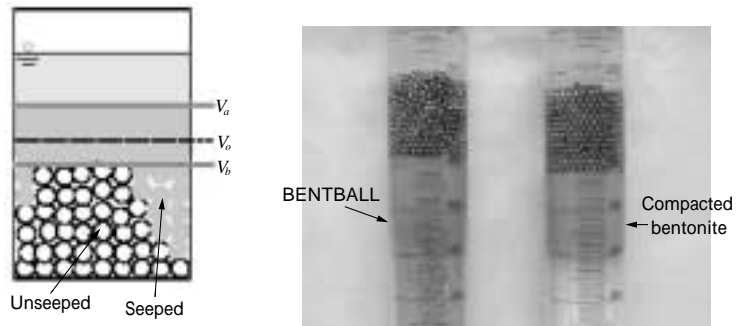
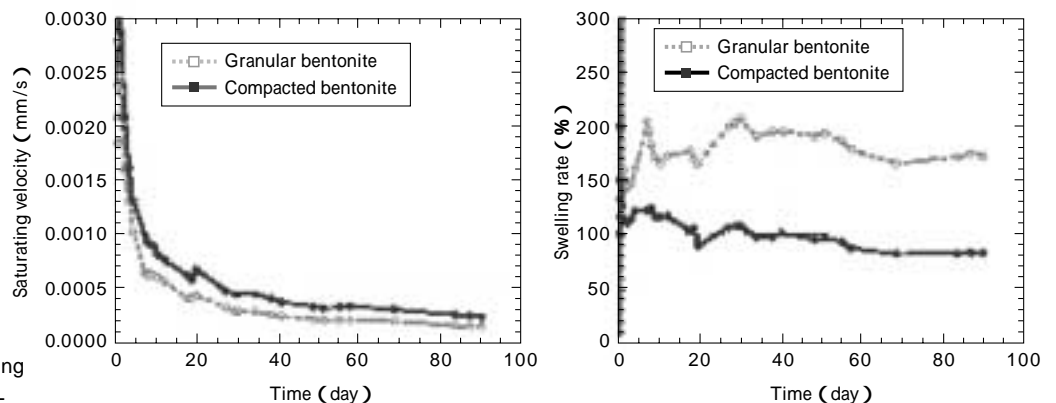


図7 ベントボールの浸潤・膨潤特性
Fig. 7 Saturating and swelling property of BENTBALL



用できるものと思われる。現在、動水勾配、溶液組成の影響について調査中である。

4.2 ベントボールの膨潤挙動シミュレーション

ベントボール充填層は水分移動・膨潤挙動のデータが乏しい。そのため単一のベントボールを取上げて、水分移動・膨潤のデータを取得し、膨潤挙動を再現できる数値シミュレーションを検討した。

4.2.1 シミュレーション概要

直径19mmの高密度のベントボール(ベントナイト:クニゲルV1 100%,乾燥密度2.25Mg/m³)の外側より水分が移動する現象を解析する。水分移動では、飽和状態ではダルシー則に基づく水浸透解析を、不飽和状態では低水分領域での水蒸気拡散と高水分領域では液状水の移動が卓越する水分移動の拡散解析を行う。また膨潤圧によるベントボール全体の变形解析を行い、ベントボール各部の密度修正を行う。

シミュレーションは、空間的には有限要素近似し、時刻ごとに、上記の一連の解析の解を反復計算により求めるものである。

4.2.2 解析手法

まず、粒子をNe個の要素に分割し、r=0の点より順に1, 2, ..., Ne+1と節点番号を振る。

飽和浸透解析で対象とする部分は、図8に示す飽和部である。水の流速をu、透水係数をk、間隙水圧をp、体積含有率を θ 、体積ひずみを ϵ_v とすると、球対称浸透基礎式及び時刻tでの飽和先端部の位置X'は、

$$k \frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{2k}{r} \frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \dots\dots\dots(3)$$

$$X' = X' \cdot t + \left\{ -k \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=X} + D \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=X} \right\} t \dots\dots\dots(4)$$

ここに、 $-k \frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=X} = -k(p_c - p_1) / L$ 、LはFEM解析における要素長、 p_c はサクションであり、次の p_c に逆符号を付したものである。

$$\log p_c = 6.035 + 0.02594w - 0.01132w^2 + 4.156 \times 10^{-4}w^3 - 4.531 \times 10^{-6}w^4 \text{ (cmH}_2\text{O)} \dots\dots\dots(5)$$

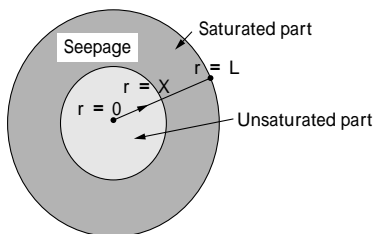


図8 ベントボール解析モデル
Fig. 8 BENTBALL analytical model

wは含水比、 p_1 は p_c が作用する要素の右側隣接節点の間隙水圧、 $D \frac{\partial \theta}{\partial r} \Big|_{r=X}$ は飽和先端部での水分拡散の速度である。透水係数kは、乾燥密度 ρ_s を当初2.25Mg/m³とし、変位による体積変化から ρ_s を求めて次式より計算する。 ρ_w は水の密度、 μ は水の粘性係数、gは重力加速度である。

$$k = K g / \mu, K = \exp(-42.1 + 1.1447 \rho_s - 2.1232 \rho_s^2) \text{ (m}^2\text{)} \dots\dots(6)$$

つぎに不飽和浸透解析であるが、前述の飽和浸透解析によりr=Xの位置まで飽和しているとして、その隣から各節点の体積含水率 θ を求める。Dは拡散係数³⁾で、

$$D = \frac{a_1(\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} + \frac{a_2}{b_2(\theta - b_2)} \text{ (cm}^2\text{/s)} \dots\dots\dots(7)$$

各係数は $a_1 = 1.76 \times 10^{-8}T - 3.04 \times 10^{-7}$ 、 $a_2 = -1.48 \times 10^{-7}T - 2.98 \times 10^{-6}$ 、 $b_1 = -3.68 \times 10^{-3}$ 、 $b_2 = 5.22 \times 10^{-3}T + 2.68 \times 10^{-1}$ 、 $\theta_s = 0.333$ である。Tは温度(°C)で、実験中の水温は10~20°Cであったが、T=20°Cとした。

応力-ひずみ関係を非線形弾性として、JNC報告書の膨潤実験結果⁴⁾とベントボール密度を考慮し、弾性係数Eは

$$E = 4.221 + 4.889 \epsilon_v^{-2/3} \text{ (MPa)} \dots\dots\dots(8)$$

とする。 ϵ_v はひずみである。また、各要素ごとに内圧としてつぎの膨潤圧 p_{bm} を与える。 S_r は飽和度である。

$$p_{bm} = S_r \exp(3.8497 \theta^2 - 7.3332 \theta + 2.0856) \text{ (MPa)} \dots\dots(9)$$

ポアソン比 ν は0.4として、球対称系の有限要素解析を行った。

4.2.3 実験とシミュレーション

ベントボールを半球に切り、切面を止水処理し、アクリル容器に置く。その後水を投入し、定期的に切面を写真撮影し膨潤を計測する(図9)とともに、これを数値シミュレートした。

要素数は40である。図10に計測点の変位の実験値と計算値を示す。計算値は実験値より若干小さいが、ほぼ近いものとなっている。このときの飽和部先端位置、体積含水率の推移、変位分布の推移の計算結果を図11~図13に示す。ベントボール中央までの飽和は計算では30時間強と若干短く、ひずみを若干大きく評価していると思われる。ひずみは外周部で最大13%弱であった。体積含水率は飽和後の増加はない。

4.2.4 今後の予定

本数値シミュレーションでは、ベントボールの小ひずみレベルの膨潤を試みた。今後、応力-ひずみ関係の一般式や吸水メカニズム、大ひずみレベルの膨潤の検討などを実施していく予定である。

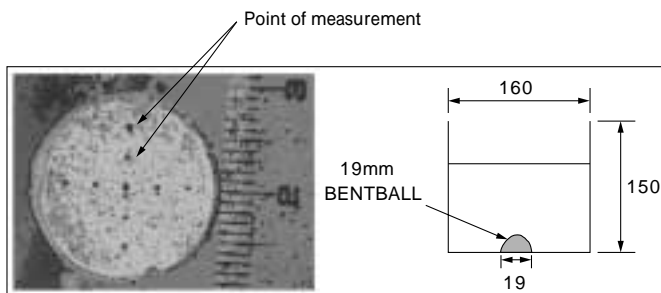


図9 ベントボール膨潤試験
Fig. 9 Swelling experiment of BENTBALL

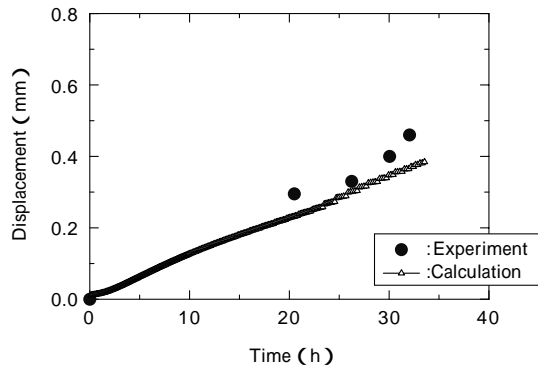


図10 計測点の変位の実験値と計算値の比較
Fig.10 Comparison of experiment and calculation

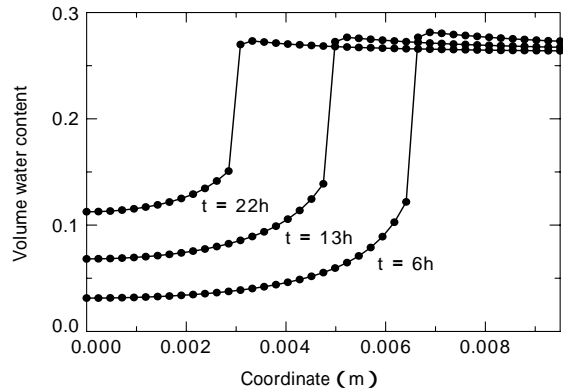


図12 体積含水分布の推移
Fig.12 Volume water content distribution

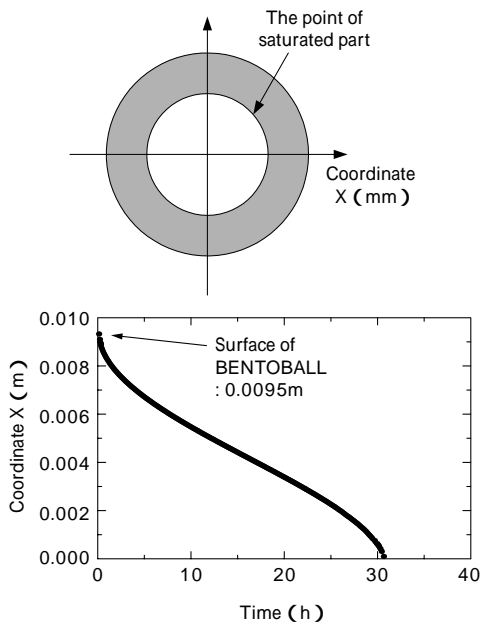


図11 飽和部先端の座標
Fig.11 Coordinate of saturated part

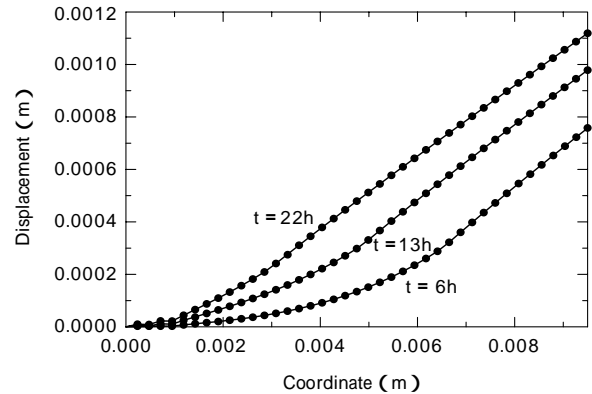


図13 変位分布の推移
Fig.13 Displacement distribution

むすび = 放射性廃棄物の地下処分場において使用されているベントナイト系材料に対して、搬送・定置などの現地施工及び品質管理の容易なベントポールを開発した。

数種類の粒径に圧縮成型された高密度のベントポールを混合充填することにより、高密度に充填密度を制御できる見通しを得た。また、吹付け施工可能であることが確認された。

浸潤特性に関して調査した結果、地下水の流速が小さい条件では、ベントポールは急速に再冠水する可能性は少ないものと推定された。また、ベントポールの膨潤解析について基盤を構築できた。

これらの研究において、ベントポールの放射性廃棄物処分場への適用性が確認された。今後は、実施工を模擬した試験の実施や特性データを増加させることにより、ベントポールの適用性を検証していく予定である。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次とりまとめ - 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN 140099 - 022 (1999), p. V72.
- 2) 井上誠ほか：メスシリンダを用いたベントナイト系緩衝材・埋戻し材の浸潤・膨潤特性の簡易な実験法の提案, 第37回地盤工学研究発表会平成14年度発表講演集 (2002), p.2411.
- 3) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 - 地層処分研究開発第2次とりまとめ - 分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN 140099 - 022 (1999), p. V89.
- 4) 核燃料サイクル開発機構：緩衝材の膨潤特性, JNC TN 8400 - 99 - 038 (1999)