

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 4 月 25 日現在

機関番号：12101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2008～2011

課題番号：20360207

研究課題名（和文） コンクリート共存環境下におけるベントナイト系材料の膨潤特性評価手法の確立

研究課題名（英文） Evaluation on swelling properties of bentonite based materials in coexisting condition with concrete materials

研究代表者

小峯 秀雄 (KOMINE HIDEO)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90334010

研究成果の概要（和文）：本研究は、放射性廃棄物処分の内、最も緊急性の高い余裕深度処分に資する研究・技術開発である。具体的には、処分施設内におけるコンクリート系材料との共存環境を模擬して、バリア材となるベントナイト系緩衝材の膨潤圧・膨潤変形特性に関する実験を行い、ベントナイト系緩衝材の仕様設計に資するデータベースを構築すると共に、乾燥密度や寸法、材料選定などの仕様設計が可能な実用的な理論評価手法の構築を行った。

研究成果の概要（英文）：This study is for developing technology to dispose radioactive waste, especially for low-level radioactive wastes disposal that is most urgent. In this study, swelling pressure and swelling deformation properties of bentonite as barrier materials were investigated by experiment. Experiment condition was coexisting condition with concrete materials in disposal facility. As a result, database for specification of bentonite buffer was produced. And theoretical method for practical evaluation to specification such as selection dry density, size and materials was proposed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2009年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2010年度	3,100,000	930,000	4,030,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：環境地盤工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：ベントナイト、余裕深度処分、膨潤、高アルカリ、粘土鉱物、モンモリロナイト、室内実験、陽イオン

1. 研究開始当初の背景

余裕深度処分とは、原子力発電所で使用された制御棒等を処分する技術であり、地下 50～100m の深度にトンネル状の施設を建設し処分することが検討されている。余裕深度処分は、最も近い将来において処分事業が開始される予定であり、課題解決の緊急性が高いとされている。余裕深度処分施設では、ベン

トナイト系緩衝材とコンクリート系材料の複合構造により人工バリアを構築することが有力視されている。これを実現するためには、ベントナイト系緩衝材がコンクリート系材料と共存しながら、人工バリアとしての膨潤による自己シール性能を発揮しなければならない。しかし、このような観点からの実験的な調査が極めて不足しており、理論的な

検討も進められていない。

2. 研究の目的

前章に述べた背景から、本研究では、コンクリート系材料との共存環境を模擬して、高アルカリ環境およびコンクリート溶脱水環境下におけるベントナイト系緩衝材の膨潤圧・膨潤変形特性に関する実験を行い、余裕深度処分におけるベントナイト系緩衝材の仕様設計に資するデータベースを構築する。さらにベントナイト系緩衝材の仕様設計に使用できる実用的な理論評価手法の構築を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、図1に示す膨潤圧・膨潤変形特性試験装置を使用し、粉碎したベントナイト原鉱石であるベントナイト GX(クニゲル GX・山形県産)の膨潤特性調査を行った。さらに、比較のため、ベントナイト GXの他に基本特性の異なる粉体状ベントナイトとしてベントナイト A(クニゲル V1・山形県産)および E(MX-80・アメリカ・ワイオミング産)を使用し、同様に膨潤特性調査を行った。



(a) 膨潤圧試験装置



(b) 膨潤特性容器



(c) 低鉛直圧膨潤変形試験装置

図1 本研究において使用した試験装置

供試体の寸法は直径 28mm、高さ 10mm および直径 60mm、高さ 10mm の 2 種類とした。余裕深度処分では、緩衝材の施工性向上のため、ベントナイトの含水比を 21% に調整し、重機を用いた現場締固めによる施工が考えられている。そのため、本研究では、ベントナイト GX の含水比を 21% 付近に調整し、質量 501.56g、直径 19.95mm の変水位透水試験用突棒を用いた突固めにより円柱型供試体を作製した。また、試料の材料特性を把

握し、既往の研究との比較を行うため、自然含水比の試料を用い、上下二方向からの静的締固めによる供試体作製方法も採用した。

本研究において使用した供給溶液の種類および濃度を表1に示す。供給水として、人工バリアにおけるコンクリート系材料からの溶脱水を想定し、高アルカリ溶液および高濃度塩溶液を使用した。

表1 供給溶液の種類および濃度

	供給溶液	濃度 M(mol/L)	pH
高アルカリ溶液	NaOH	0.02	12.
		0.1	13.
		1.0	14.
	KOH	0.02	12.
		0.1	13.
	Ca(OH) ₂	0.02	12.
液 高濃度塩溶	NaCl	0.1	5-7
		1.0	
	CaCl ₂	0.02	5-7
		0.1	
		0.1	
		1.0	

さらに、コンクリート系材料との長期共存環境を考慮し、コンクリート溶脱模擬水溶液にベントナイト GX を浸漬させることにより、高アルカリ変質ベントナイトを作製した。この試料を使用することにより、コンクリート系材料との長期共存後の緩衝材を模擬した試料の膨潤特性調査を行った。高アルカリ変質ベントナイトの作製手順は、図2に示す通りである。供給水溶液は、蒸留水を使用した。

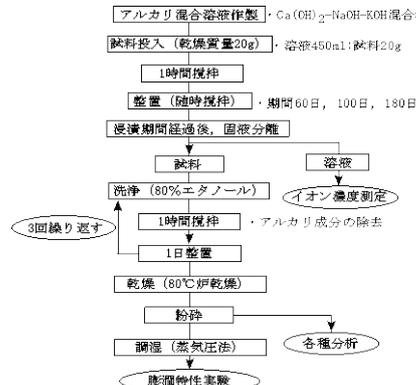


図2 高アルカリ変質ベントナイト作製フロー

本研究にて実施した膨潤圧試験とは、膨潤する試料の体積増加を抑止する際に発生する圧力を計測する試験である。本試験では、膨潤による鉛直方向への変形を抑えた状態で実験を行う。結果は時間ごとに整理し、膨潤圧が定常化した状態での最大値を最大膨潤圧とした。また、試験期間は膨潤圧が定常する7日間とした。式1に定義する最大膨潤圧の低下率 R_{s-p} (%) を算出し結果を整理した。

$$R_{s-p} = \frac{P_{s\max-dw} - P_{s\max-solution}}{P_{s\max-dw}} \times 100 \dots (式 1)$$

ここに、 $P_{s\max-dw}$ ：指数回帰曲線より算出した蒸留水での最大膨潤圧 (kPa)， $P_{s\max-solution}$ ：指数回帰曲線より算出した各供給溶液での最大膨潤圧 (kPa) とする。

一方、膨潤変形試験とは、一定鉛直圧下においてベントナイトが吸水し膨潤変形する際に発生する一次元変形量を計測する試験である。本研究では、比較的低い鉛直圧として 19.6kPa を載荷した。試験より計測した一次元変形量 ΔS を初期供試体高さ H_0 で除し、その値を百分率表示したものを膨潤率 $\varepsilon_s (= \frac{\Delta S}{H_0} \times 100)$ と定義した。また、膨潤変形が定常化するまでには長期間を要するため、試験期間を 7 日間とし、膨潤率の経過時間曲線に対し、双曲線で近似を行い、その漸近線から求めた値を最大膨潤率として結果を整理した。さらに、高アルカリ溶液による影響を定量的に評価するため、式 2 に定義する最大膨潤率の低下率 R_{s-d} (%) を算出し結果を整理した。

$$R_{s-d} = \frac{\varepsilon_{s\max-dw} - \varepsilon_{s\max-solution}}{\varepsilon_{s\max-dw}} \times 100 \dots (式 2)$$

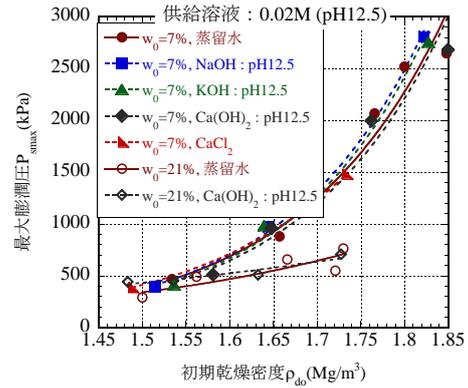
ここに、 $\varepsilon_{s\max-dw}$ ：回帰曲線より算出した蒸留水での最大膨潤率 (%)， $\varepsilon_{s\max-solution}$ ：回帰曲線より算出した各供給溶液での最大膨潤率 (%) とする。

4. 研究成果

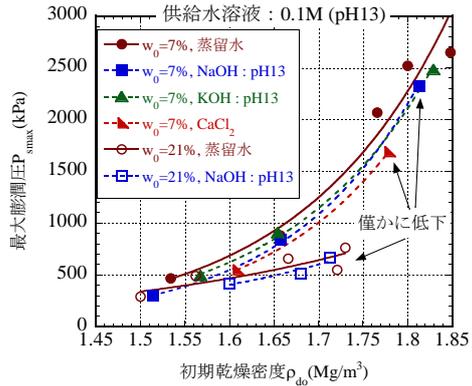
(1) コンクリート溶脱水環境下におけるベントナイト GX の膨潤特性

図 3 および図 4 に、ベントナイト GX の各溶液を用いた最大膨潤圧と初期乾燥密度の関係、最大膨潤率と初期乾燥密度の関係を示す。0.02M の濃度の供給溶液の場合、膨潤圧特性および膨潤変形特性共に影響は見られなかった。0.10M の濃度の供給溶液の場合、膨潤変形特性は顕著な低下を示したが、膨潤圧特性は 10% 程度の低下であった。0.10M 以下の濃度の供給溶液の場合、溶液の種類による膨潤特性への影響はなかった。一方、1.0M の濃度供給溶液の場合、顕著な膨潤特性の低下を示しており、高濃度塩溶液に比べ、高アルカリ溶液の影響が大きいことが分かった。高アルカリ溶液の場合、シリカの溶出に伴い、初期乾燥密度やモンモリロナイト含有率の低下が考えられる。したがって、ベントナイトの膨潤特性に及ぼす供給溶液の影響は、ベントナイト供試体の膨潤変形の拘束条件により変化するといえる。

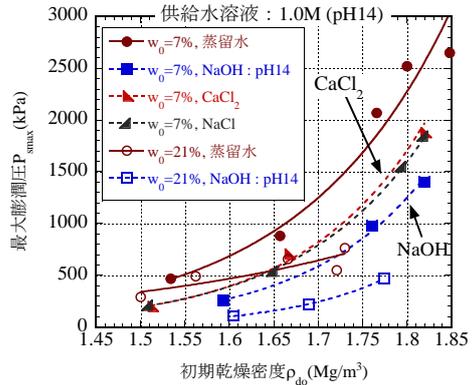
図 5 に膨潤変形挙動メカニズムを示す。高い鉛直圧における膨潤変形試験の場合、供給溶液の吸水に伴う膨潤変形量が小さく、供試体の有効モンモリロナイト密度の変化は小



(a) 供給溶液 0.02M



(b) 供給溶液 0.1M



(c) 供給溶液 1.0M

図 3 各溶液を用いた最大膨潤圧と初期乾燥密度の関係

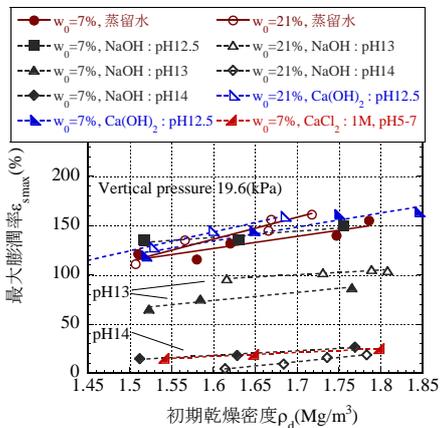


図 4 各溶液を用いた最大膨潤率と初期乾燥密度の関係

コンクリート系材料からの溶脱水溶液の濃度とベントナイト緩衝材の膨潤特性に関する適用範囲を提案するものである。

余裕深度処分事業への適用案を図9に示す。拘束条件下において、コンクリートからの溶脱水溶液の濃度を0.1M(pH13)以下にすることで、緩衝材としての機能を維持できると考えられる。非拘束条件下の場合、0.1M(pH13)の濃度の供給溶液の影響を受けて膨潤特性は低下することから、人工バリアにおける狭隘部等に施工上の隙間等が発生した場合、緩衝材としての十分な機能を発揮することが難しい。したがって、上記の条件の場合、コンクリートからの溶脱水溶液の濃度は0.02M(pH12.5)程度に設定することが望ましい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 『人工海水環境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 (地圏工学), Vol. 67, No. 2, 276-287, 2011, 査読有
- ② 小峯秀雄, 『土の化学・物理と高レベル放射性廃棄物処分』, 地盤工学会誌, Vol. 59, No. 3, 44-54, 2011, 査読有
- ③ Komine, H., 『Predicting hydraulic conductivity of sand-bentonite mixture backfill before and after swelling deformation for underground disposal of radioactive wastes』, Engineering Geology, Vol. 114, 123-134, doi: 10.1016/j.enggeo.2010.04.009, 2010, 査読有
- ④ Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S., 『Reply to Discussion by Kaya et al. on “Swelling characteristics of bentonite in artificial seawater”』, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46(10), 1236-1238, doi: 10.1139/T09-101, 2009, 査読有
- ⑤ 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 『人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, 389-400, 2009, 査読有
- ⑥ Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S., 『Swelling characteristics of bentonites in artificial seawater』, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 46(2), 177-189, doi: 10.1139/T08-120, 2009, 査読有
- ⑦ 増田良一, 雨宮清, トラン デュク フィオアン, 小峯秀雄, 『ベントナイト系緩衝材の乾燥に伴う含水比低下・体積収縮の

傾向』, 原子力バックエンド研究, Vol. 15, No. 2, 131-136, 2009, 査読有

- ⑧ Komine, H., 『Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes』, Engineering Geology Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 134, No. 4, 497-508, 2008, 査読有

[学会発表] (計20件)

- ① 遠藤さち恵, 小峯秀雄, 村上哲, 関口高志, 関根一郎, 『ベントナイトの吸水特性と水分拡散係数としての評価における供試体寸法, 初期含水比, 拘束条件の影響』, 第9回環境地盤工学シンポジウム, 2011.10.6, 京都
- ② 小峯秀雄, 『メチレンブルー吸着量と液性限界・塑性限界の観点からの最大粒径10mmと2mmの粒状ベントナイトの膨潤圧特性に関する考察』, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.7, 愛媛
- ③ 遠藤さち恵, 小峯秀雄, 村上哲, 関口高志, 関根一郎, 小山田拓郎, 『一次元膨潤変形に伴うベントナイトの吸水量測定試験方法の提案と水分拡散係数の評価』, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.7, 愛媛
- ④ 小山田拓郎, 小峯秀雄, 村上哲, 遠藤さち恵, 千々松正和, 中島貴弘, 『粒状ベントナイトの吸水特性とその水分拡散係数としての評価』, 土木学会第66回年次学術講演会, 2011.9.7, 愛媛
- ⑤ 小峯秀雄, 『余裕深度処分のための粒状ベントナイトの膨潤圧特性に関する基礎的研究～最大粒径10mmと2mmの粒状ベントナイトの膨潤圧特性の比較～』, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.7.7, 神戸
- ⑥ 遠藤さち恵, 小峯秀雄, 村上哲, 関口高志, 関根一郎, 小山田拓郎, 『不飽和ベントナイトの吸水特性と水分拡散係数としての評価に及ぼす初期含水比と寸法効果の影響』, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.7.6, 神戸
- ⑦ 小山田拓郎, 小峯秀雄, 村上哲, 関根一郎, 関口高志, 遠藤さち恵, 『不飽和状態における各種ベントナイトの水分拡散特性の評価』, 第46回地盤工学研究発表会, 2011.7.6, 神戸
- ⑧ Komine, H., 『Predicting hydraulic conductivity of bentonite backfill after swelling』, 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and

- Geotechnical Engineering, 2011.05.25, 香港
- ⑨ Sugiura, K., Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S., 『Swelling characteristics of bentonites under high-alkali condition for radioactive waste disposal』, ISSMGE's : 6th International Congress on Environmental Geotechnics, 2010.11.10, インド・ニューデリー
- ⑩ Komine, H., 『Bridge between physics and chemistry of bentonite from the viewpoint of geotechnical engineering, Bentonite』, Workshop on Physics and Chemistry of Bentonite for Radioactive Waste Disposal, 2010.9.18, 北海道
- ⑪ 小峯秀雄, 『水質分析, メチレンブルー吸着量, X線回折の観点からのベントナイトへの温度履歴の影響に関する考察』, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9.8, 北海道
- ⑫ 遠藤さち恵, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 関口高志, 関根一郎, 『不飽和ベントナイトの吸水量と膨潤圧の同時測定可能な新しい実験手法の提案と水分拡散係数の評価』, 土木学会第65回年次学術講演会, 2010.9.8, 北海道
- ⑬ 杉浦航, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 『高アルカリ環境下におけるベントナイトの膨潤挙動メカニズムの考察』, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.23, 愛媛
- ⑭ 遠藤さち恵, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 関口高志, 関根一郎, 『供試体の吸水方向の違いによるベントナイトの膨潤圧特性』, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.20, 愛媛
- ⑮ Komine, H., 『Self-sealing capability of some bentonite buffers in conditions of artificial seawater』, 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2009.10.6, エジプト・アレキサンドリア
- ⑯ 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 佛田理恵, 『モンモリロナイト結晶層間距離の観点からの海水環境下におけるベントナイト系緩衝材の透水係数に関する一考察』, 土木学会第64回年次学術講演会, 2009.9.3, 福岡
- ⑰ 小峯秀雄, 『ベントナイトの透水現象と拡散現象に関する一考察』, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.8.19, 神奈川
- ⑱ 小峯秀雄, 『放射性廃棄物処分における環境地盤工学的課題と展望』, 第8回環境地盤工学シンポジウム, 2009.7.17,

秋田

- ⑲ 杉浦航, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 後藤宣彦, 『高アルカリ環境下におけるベントナイト原鉱石の膨潤圧特性調査』, 第43回地盤工学研究発表会, 2008.7.9, 広島
- ⑳ 杉浦航, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 『高アルカリ環境下におけるベントナイト原鉱石の膨潤変形特性調査』, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008.9.3, 宮城

〔その他〕

ホームページ等

茨城大学研究者情報総覧

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

小峯秀雄のHP

<http://wwwgeo.civil.ibaraki.ac.jp/komine/>

<http://info.ibaraki.ac.jp/scripts/websearch/index.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小峯 秀雄 (Komine Hideo)

茨城大学・工学部・教授

研究者番号：90334010

(2) 研究分担者

村上 哲 (Murakami Satoshi)

茨城大学・工学部・准教授

研究者番号：10261744

安原 一哉 (Yasuhara, Kazuya)

茨城大学・地球変動適応科学研究機関・教授

研究者番号：20069826