Kobe University Repository : Kernel

PDF issue: 2025-07-02

ベントナイトの特異性の解明と構成関係の導出

前田，圭介
飯塚，敦
河井，克之
高山，裕介

(Citation)
神戸大学都市安全研究センター研究報告,17:39-48

(Issue Date)
2013-03

(Resource Type)
departmental bulletin paper

(Version)
Version of Record

(JaLCDOI)
https://doi.org/10.24546/81011407

(URL)
https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011407

神戸大学都市安全研究センター
研究報告，第17号，平成25年３月

ベントナイトの特異性の解明と構成関係の導出

Elucidation of specific properties of bentonite and derivation of constitutive model

前田圭介 [1)]
Keisuke Maeda
飯塚敦 [2)]
Iiduka atauahi
河井克之 [3)]
Katuyuki Kawai
高山裕介 [4)]
Yuusuke Takayama

概要：原子力発電の問題点として放射性廃棄物の処分方法が挙げられる．その中で最も研究が進められている処分方法が地層処分というものだ．この時の緩衝材として期待されている材料がベントナイトである．地層中の複雑な環境に数万年という超長期間晒されるベントナイトがどのような挙動を示すのかを正確に把握し，かつそれを踏まえた上で処分場の安全性を保障できるシステムが必要となってくる．本研究では，ベントナイト材料を用いた実験を土質力学の観点から整理を行い，そこから判明したベントナイトの特性を表現できるような構成モデルを構築し，それを用いた有限要素解析を行い，その結果と実験結果の比較を行うことで構成モデルの性能の評価を行った．

キーワード：地層処分　ベントナイト　力学モデル

1.　はじめに

原子力発電が抱える問題の一つとして発電終了後に発生する放射性廃棄物の処分の問題がある．放射性廃棄物は人体に対して悪影響を与えるので，悪影響が出なくなる程度に放射能が弱まるまで人の生活圏から隔離しなければならないが，高レベル放射性廃棄物や TRU 放射性廃棄物の中には放射能が弱まるまで，数万年という非常に長い期間が必要なものもある．現在のところ実用性の高い処分方法として研究が進められているのが地層処分という方法である．そしてその地層処分の際の緩衝材としてベントナイトという材料の利用が検討されている．ベントナイトとはモンモリロナイトを主成分とした粘土鉱物の一種で，難透水性・吸水膨潤性を特徴としている．

処分施設の長期性能保証のため，数万年という長期にわたって地層中の複雑な環境に晒されるベントナイトがどのような挙動を示すのかを正確に把握し，かつそれを踏まえた上で処分場の安全性を保障できるシステムが必要となってくる．そこで本研究では，ベントナイト材料を用いた室内試験結果を土質力学の観点から整理を行い，そこから判明したベントナイトの特性を表現できるような構成モデルを構築し，その構成モデルを土/水/空気有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)に組み込み，その結果と実験結果の比較を行うことで構成モデルの性能の評価を行った．

2. 土質力学から見た実験結果の解釈

2.1 飽和ベントナイトの圧密特性

土の等方圧縮・除荷による変形特性については，三軸試験機を用いた実験結果が用いられることが一般的である．しかし，ベントナイト材料に対して直接的に三軸試験機を用いた実験例は現状ほとんど存在しない．そこで，ベントナイト材料での実験例が比較的多い一次元圧密試験の結果を用いて圧密特性の整理を行う．

2.1.1 飽和ベントナイト一次元圧密試験

図-1 に石川ら[1)]が行った飽和ベントナイト一次元圧密試験の結果を示す．これを見ると実験では載荷から除荷にかけて塑性ひずみが発生していることがわかる．しかし，この結果は一次元圧密試験の結果は鉛直応力と間隙比の関係で整理されている．そのため，この結果をそのまま等方応力条件での変形特性の議論に用いることはできない．そこで，笹倉ら[2)]が計測した一次元圧密中の側方土圧データを用いて鉛直上載圧を平均応力に変換し，その結果を用いて等方応力条件下での変形特性について議論を行う．

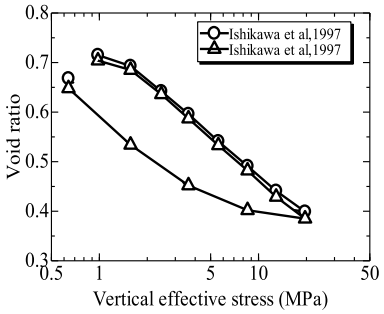


図-1 一次元圧密試験結果

2.1.2 K_0圧密除荷試験

笹倉らはベントナイトに対して側方方向の土圧が計測可能な一次元圧密試験装置を用いて一次元圧密～除荷時の鉛直・側方圧力を測定する実験を行っている．図-2 に笹倉らの実験結果をまとめる．図は上からそれぞれ，鉛直有効応力と間隙比関係，鉛直有効応力と側方有効応力関係，鉛直有効応力と土圧係数関係である．これを見ると，正規圧密時には土圧係数はほぼ 1 であるが，除荷に伴いその値が上昇していることがわかる．また，過圧密比(OCR)と土圧係数(K_0)の関係については以下の経験式を用いた．

$$K_{0-OC} = K_{0-NC} OCR^{m} \tag{1}$$

ここで，K_{0-NC}：正規圧密時の土圧係数，K_{0-OC}：除荷時の土圧係数，OCR：過圧密比，m：材料パラメータである．フィッティングには K_{0-NC}=1，m=0.6 を用いた．

次に，鉛直方向の有効応力，土圧係数と平均有効応力の間には次の関係式

$$p' = \frac{\sigma'_v + 2K_0\sigma'_v}{3} \tag{2}$$

が成り立つ．ここで，p'：平均有効応力，σ'_v：鉛直有効応力，K_0：土圧係数である．以上の式（1），（2）を用いて，一次元圧密試験結果を平均有効応力で整理する．

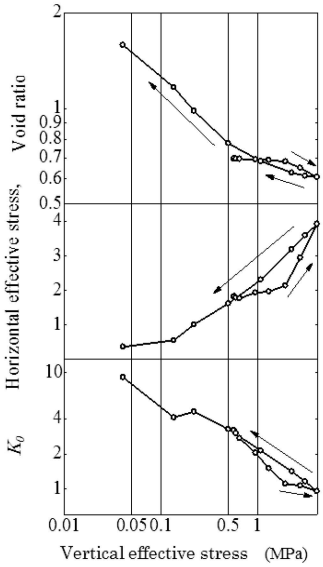


図-2　K_0除荷試験結果

2.1.3　等方変形特性

図-3 にクニゲル V1 の一次元圧密試験結果を平均応力で整理した結果を示す図-1 と比べると，載荷から除荷の過程でほぼ同一の線上を辿っており，ヒステリシスがなくなっていることがわかった．ここから，図-3 をそのまま等方圧縮・除荷による変形と考えると飽和ベントナイトは塑性変形のない弾性体であることが分かる．更に，小峯らの実験結果については完全飽和線を用いると等方圧縮・除荷による間隙比変化をうまく表現できることが分かる．

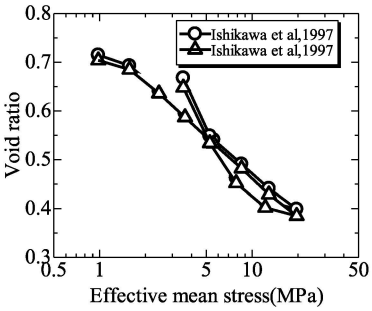
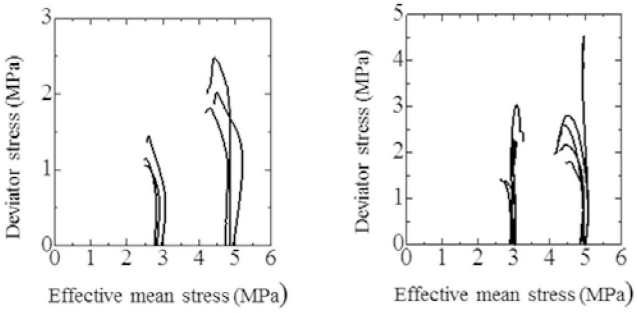


図-3　等方圧縮・除荷による変形特性

2.2　飽和ベントナイトのせん断特性

本研究では三軸非排水せん断試験中の応力経路に注目した．　複数の飽和ベントナイト（Na 型クニゲル V1[3)]・Ca 型クニゲル V1[2)]）の非排水せん断中の応力経路をまとめたものを図-4 に示す. これらはベントナイトであるが，モンモリロナイト含有率などの基本的性質が異なっている．



Na 型クニゲル V1　　Ca 型クニゲル V1

図-4　飽和ベントナイトの三軸非排水せん断試験結果

これらの図を見ると，ベントナイトの非排水せん断中の応力経路の特徴として，軸差応力の増加に対して平均有効応力の増減がほとんどないのがわかる．ここで圧密特性から，飽和ベントナイトは塑性ひずみがほとんど発生せず，平均有効応力と間隙比は 1:1 の関係にあり，平均有効応力が変化しなければ間隙比は変化しないことがわかっている．つまり，圧密特性とせん断特性合わせて考えるとベントナイトはせん断中の間隙比の変化，すなわち体積変化（ダイレタンシー）をほとんど示さない特殊な材料であると考えられる．ここで，ダイレタンシー特性や塑性ひずみの発生は，土粒子同士の噛み合わせによる配列構造が変化することにより起こるものと考えられている．小峯ら[4)]は，ベントナイト材料は飽和状態では膨潤したモンモリロナイトが間隙を埋め尽くすことで，土粒子の配列構造を有することが出来なると推定している．この推定はここまでの実験事実とも整合する．よってここまでの検討から，本研究では，「ベントナイトの飽和化」を「ダイレタンシー特性の消失」であると考えモデル化を行っていく．

3. ベントナイトの構成モデルの導出

3.1 不飽和構成モデル

近年，不飽和土の研究の発展により，その力学特性の表現する多数の不飽和構成モデルが提案されている．本研究で用いるのは大野ら[5)]によって提案されている S_e-Hardening モデルである．このモデルは剛性に関する状態量として有効飽和度を用い，他のモデルより簡易に不飽和土の力学特性の表現している点が特徴である．

大野らは不飽和土の有効応力を次式のように定義した．

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij}^{net} + p_s \delta_{ij} \tag{3}$$

ただし

$$\sigma_{ij}^{net} = \sigma_{ij} - p_a \delta_{ij}, \qquad p_s = sS_e \tag{4}$$

$$s = p_a - p_w, \qquad S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \tag{5}$$

ここで σ'_{ij} ：不飽和土の有効応力テンソル，σ_{ij}^{net} ：ネット応力テンソル，σ_{ij} ：全応力テンソル，s ：サクション，p_s ：サクション応力，p_a ：間隙空気圧，p_w ：間隙水圧，S_r ：飽和度，S_e ：有効飽和度，S_{rc} ：飽和度の吸着水分である．

さらに一般的な含水状態にある土の体積変化を

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \tag{6}$$

とし，不飽和土による圧密降伏応力の増大を飽和状態における圧密降伏応力 p'_{sat} の ξ 倍という形で表現した．大野らは ξ を表す具体式として有効飽和度を用いて

$$\zeta = \exp\left[\left(1 - S_e\right)^n \ln a\right] \tag{7}$$

としている．ただし n,a：フィッティングパラメータである．特に n は $e-\ln p'$ 面上の等飽和度線の間隔を調整するパラメータであり，$n=1$ のとき $S_e=\ln\xi$ 関係は線形となる．

ここで間隙比を体積ひずみに変換し，塑性ひずみを表すと

$$\varepsilon_v{}^p=\frac{\lambda-\kappa}{1+e_0}\ln\frac{p'}{\xi p'_{sat}} \tag{8}$$

となる．さらに，不飽和土の圧密降伏応力の変化を表す式は，

$$p'_c=\xi p'_{sat}\exp\left(\frac{\varepsilon_v{}^p}{MD}\right) \tag{9}$$

となる．ただし，p'_c：平均有効主応力で表された先行圧密主応力，M：q'/p で表された限界応力，D：ダイレタンシー係数であり，

$$MD=\frac{\lambda-\kappa}{1+e_0} \tag{10}$$

で表される．

降伏関数の導出については，下負荷面を適用した EC モデルの降伏関数を使用する．EC モデルの降伏関数は，次式である．

$$f(\boldsymbol{\sigma}',p'_c)=MD\ln\frac{p'}{p'_c}+\frac{MD}{n_E}\left(\frac{q}{Mp'}\right)^{n_E}-\varepsilon_v^p=0 \tag{11}$$

ただし，

$$q=\sqrt{\frac{3}{2}\mathbf{s}:\mathbf{s}},\quad \mathbf{s}=\boldsymbol{\sigma}'-p'\mathbf{1}=\mathbf{A}:\boldsymbol{\sigma}',\quad \mathbf{A}=\mathbf{I}-\frac{1}{3}\mathbf{1}\otimes\mathbf{1} \tag{12}$$

であり，$\mathbf{I}$：4 階のテンソル，n_E：EC モデルのフィッティングパラメータである．

EC モデルの降伏関数、式(11)に式(7)・(11)を代入すると，不飽和土の降伏関数は次式のように導かれる．

$$f(p',q,S_e,\varepsilon_v{}^p,R)=MD\ln\frac{p'}{p'_{sat}\exp\left[(1-S_e)^n\ln a\right]}+\frac{MD}{n_E}\left(\frac{q}{Mp'}\right)^{n_E}-\varepsilon_v^p=0 \tag{13}$$

式(13)は，$S_e=1$，$n_E=1$ のとき

$$f(p',q,S_e,\varepsilon_v{}^p,R)=MD\ln\frac{p'}{p'_{sat}}+D\frac{q}{p'}-\varepsilon_v{}^p=0 \tag{14}$$

となり，オリジナル Cam-Clay モデルに帰着する．

3.2 ベントナイトの力学挙動のモデル化

Ohta and Hata[6)]によれば，土質材料のダイレタンシーによる土の体積変化は，p' 一定条件下の排水せん断試験における $e-q/p'$ 関係において式(15)のように直線によってモデル化することが提案されている．

$$e = e_0 - D(1+e_0)\frac{q}{p'} \tag{15}$$

ここで，e_0：初期間隙比である．また，ダイレタンシー係数 D を

$$D = \frac{\lambda - \kappa}{(1+e_0)M} \tag{16}$$

と仮定する．ここで κ：膨張線の傾きである．

ここまでの検討からベントナイト材料が飽和化したことによる粒状特性の消失が起これば，せん断時の体積変化が 0 になる．つまり，ダイレタンシーによる土の体積変化を支配するダイレタンシー係数 D が 0 になるということになる．λ については小林ら [7]による不飽和ベントナイト一次元圧密試験より得られた各飽和度の時の正規圧密線に相当する等飽和度線の傾きから，飽和度に関わらず一定値を持つと思われる．また，M については石川ら [1]が行った CU 試験結果等から，飽和化してもある一定の値を取ることが知られている．そこで式(16)の中で残された κ について次の条件を満たすような飽和度に依存する関数とすれば，ベントナイト材料の飽和化による粒状特性の消失のモデル化が可能になると考えられる．

(条件 1) $\kappa < \lambda (Sr > 1)$

(条件 2) $\kappa \cong \lambda (Sr = 1)$

本研究ではこれらの条件を満たした以下のような具体式を想定した．

$$\kappa = \kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l \tag{17}$$

また，κ_0：飽和度 0 のときの膨張線の傾き，κ_{sat}：飽和度 1 のときの膨張線の傾き（$\cong \lambda$） Se：有効飽和度，l：フィッティングパラメータである． 本研究では式（17）を用いてベントナイト材料が持つ膨潤によるダイレタンシー特性の消失の表現を行える構成モデルの導入し，構築したモデルを土/水/空気有限要素解析プログラム(DACSAR-MP)に組み込み，解析を行った．

4. 有限要素シミュレーション

4.1 膨潤量シミュレーション

膨潤量試験シミュレーションについては鈴木・藤田 [8]による膨潤量試験を対象とする．ここで試験についての説明を行う．初期状態として乾燥密度 $1.8Mg/m^3$，含水比 10%とした．試験温度は室温とし，試験水には蒸留水を用いた．以下に試験手順を示す．

1. 初期状態（ρ_d=1.8Mg/m^3，w=10%）の不飽和ベントナイト材料に対して載荷圧 4MPa を与える．
2. 圧密による体積変化が落ち着いたところで供試体下端から注水を行い，ベントナイト材料を飽和させる．
3. 膨潤による体積変化量が落ち着くまで放置を行う．
4. 載荷圧を 2MPa まで除荷し，体積変化が落ち着くまで放置する．

5.　手順 4 と同様の作業を 1MPa，0.5MPa について行う．

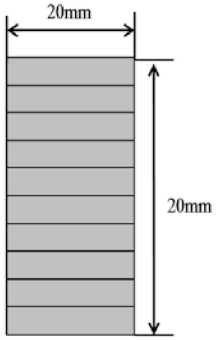


図-5　解析領域

4.1.1　解析条件

図-5 のような軸対象条件での解析領域を設定した．　変位境界として解析領域下端は水平方向・鉛直方向ともに固定とし，左端・右端は水平方向のみ固定とした．また，解析領域下端に排水境界を，解析領域上端に排気境界をそれぞれ設定した．また初期条件は初期含水比を 10%，初期乾燥密度を 1.8Mg/m^3 とした．吸水については膨潤圧シミュレーションと同様に解析境域下端から 1~2 時間をかけてサクションを与えた．また放置期間については実験に合わせて，2MPa まで除荷→1000 時間放置→1MPa まで除荷→500 時間放置→0.5MPa まで除荷→1500 時間放置とした．また，用いたパラメータは以下の通りである．

表-1　解析に使用したパラメータ

k_w(m/day)	k_a(m/day)	M	ν	Gs
7.0×10^{-8}	6.8×10^{-6}	0.45	0.454	2.73
a	n	n_E	λ	e_{ref}
10	2.0	1.6	0.125	0.46
p'_{ref}(MPa)	A^D	B^D	A^W	B^W
10	-24	3.2	-20	2.9
Sr_0	l	κ_0	κ_{sat}	
0.1	10.0	0.01	0.1249	

※ A, B はサクションの単位 kPa に対する値

4.1.2　解析結果

解析結果を示す図-7 は 4MPa 載荷後・吸水後・各除荷後の載荷圧と間隙比の関係図である．これをを見ると，実験結果と解析結果では間隙比とその変化量は非常に近い値となっている．ここまでの結果から，ベントナイト材料の膨潤特性については飽和に至るまでの過程においては若干実験結果との差異は見られるが，飽和化した時の結果は実験結果に則した結果が得られた．

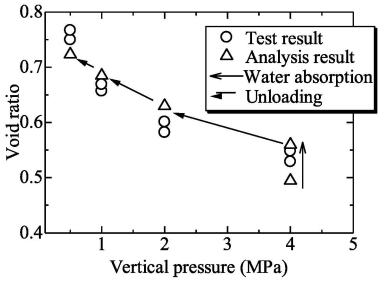


図-7　載荷圧と間隙比の関係図

4.2　静的締固めシミュレーション

地層処分場におけるベントナイト材料の施工方法にはブロック方式，現場締固め方式の二通りが検討されている．ブロック方式とはあらかじめ地上施設にて製作したベントナイトブロックを現場に持ち込み定置するものである．二つの施工方法は費用面、品質面等で一長一短であり，研究者によってどちらを選択すべきか別れている．

そこでこの二つの施工方法によるベントナイト材料の挙動の違いを明らかにし，将来的な施工方法の検討を行うことも重要であると考えられる．その検討のためにベントナイト材料に対する締固め試験は大きな意味を持っている．そこでベントナイト材料の締固め特性の検討について，千々松ら[9]が行った不飽和ベントナイト材料静的締固め試験のシミュレーションを行った．さらにその後，供試体下端から吸水させその時の膨潤圧を測定し締固めによる膨潤圧の変化の検討を行った．

4.2.1　解析条件

図-8 のような軸対象条件での解析領域を設定した．　変位境界・排水境界・排気境界は膨潤量試験と同様とした．また初期条件は初期乾燥密度を 1.5Mg/m^3 とし，初期含水比を 5~17%まで 2%毎にケーススタディを行った．締固め圧力は試験時同様 20MPa とし，1 時間かけて載荷と除荷を行った．さらに締固め終了後，解析領域上端を鉛直方向固定条件とし，約 2 時間かけて吸水を行い，膨潤圧を測定した．　締固め圧力は試験時同様 20MPa とし，1 時間かけて載荷と除荷を行った．締固め終了後，解析領域上端を鉛直方向固定条件とし，約 2 時間かけて吸水を行い，膨潤圧を測定した．膨潤圧とは吸水によって膨張しようとする圧力のことである．膨潤圧試験については鈴木・藤田[8]による膨潤圧試験結果を参考とした．

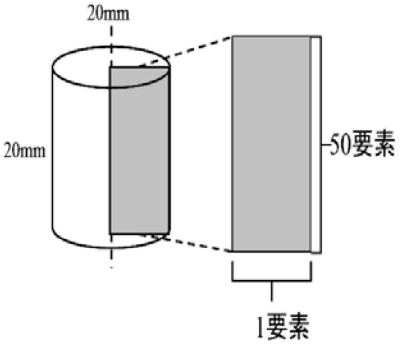


図-8　解析領域

4.2.2　解析結果

まずはベントナイト単体の解析結果を図-4.17 に示す．左側が締固め試験結果であり，右側が締固め試験後に行った膨潤圧試験結果である．

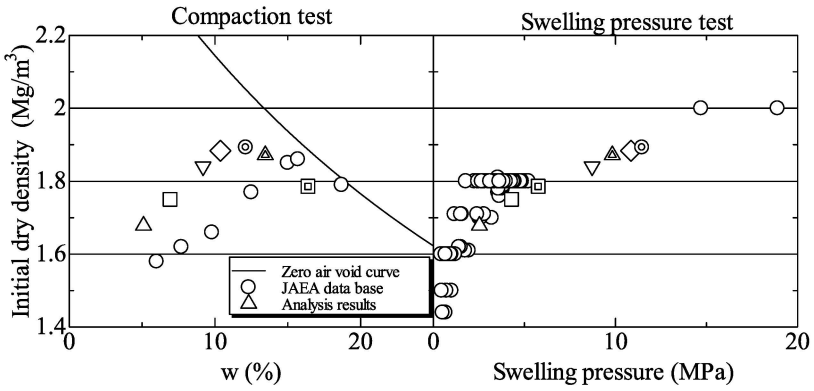


図-9　締固め曲線と乾燥密度毎の膨潤圧

これをみると，最大乾燥密度は実験結果と非常に似通った値が得られた．さらに膨潤圧も実験結果に則した傾向が得られた．しかし締固め曲線は実験と比べると全体的に左側にずれていることがわかる．

5. 結論

本研究では飽和ベントナイト材料の力学特性を土質力学的に解釈し，その結果を基にベントナイト材料の構成モデルの構築を行い，得られた応力‐ひずみ関係を用いた解析結果と実験結果の比較を行った．その結果，ベントナイト材料の力学挙動をある程度精度よく評価できるモデルの構築に成功した．今後は締固め曲線のズレの解消等の検討を行い，より実用的な構成モデルの導入が必要であると言える．

参考文献

1) 石川博久，並河努，菅野毅，石黒勝彦：緩衝材のせん断特性 1，動力炉・核燃料開発事業団研究開発報告書，PNC TN8410 97-051 ，1997

2) 笹倉剛，岬柳幹雄，岡本道孝：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査，核燃料サイクル開発機構契約業務報告書，JNCTJ8400-2002-025，2002

3) 笹倉 剛，畔柳 幹雄，小林 一三，岡本 道孝：ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得Ⅱ，核燃料サイクル開発機構契約業務報告書，JNC TJ8400 2003-048，2003

4) 小峯秀雄，緒方信英砂：ベントナイト混合材料および各種ベントナイトの膨潤特性，土木学会論文集，No.701/III-58，pp373-385，2002.3

5) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63/No.4，pp.1132-1141，2007

6) Ohta,H and Hata,S：A theoretical study of the stress-strain relations for clays，Soils and Foundations，Vol.11(3)，pp195-219，1971

7) 小林一三，戸井田克，笹倉剛，太田秀樹：等含水比線と等飽和度線を用いた締固めベントナイトの圧縮・膨潤挙動の解釈，土木学会論文集，Vol.63/No.4，pp.1065-1078，2007

8) 鈴木 英明，藤田 朝雄：緩衝材の膨潤特性，核燃料サイクル開発機構業務報告書，JNC-TN8400 99-038，1999

9) 千々松 正和，杉田裕，雨宮 清：緩衝材の製作・施工技術に関する検討，核燃料サイクル開発機構業務報告書，PNC TN8400 99-035，1999

著者：1) 前田圭介，電源開発株式会社；2) 飯塚敦，都市安全研究センター，教授；3) 河井克之，都市安全研究センター，准教授；4) 高山裕介，工学研究科市民工学専攻，博士課程

Elucidation of specific properties of bentonite and derivation of constitutive model

Keisuke Maeda

Iiduka atauahi

Katuyuki Kawai

Yuusuke Takayama

Abstract

Nuclear power generation has a problem how to dispose of radioactive waste. Geological disposal is the most studied of the various disposal methods. Bentonite is expected as a cushioning material when performing geological disposal. Bentonite is a clay which has the swelling characteristics and low permeability. It takes tens of thousands of years in order that radioactivity of radioactive waste is sufficiently small. So, geological disposal facility is required to keep safety in the long time. Therefore, it is important to understand exactly the behavior of bentonite which is exposed to a complex environment in the formation in the stratum and to guarantee the safety of the disposal facility to account for it.

In this study, we have examined l the results of laboratory tests with bentonite material from the point of view of soil mechanics. From the result , we build a configuration model that can represent the characteristics of bentonite, and incorporated the model into soil / water / air coupled finite element analysis code(DACSAR-MP). And, We evaluated the performance of the model by comparing the analysis result with the test results. As a result, We was able to represent analytically the behavior of the bentonite.