



# ベントナイト材料の力学挙動のモデル化

飯塚, 敦  
河井, 克之  
高山, 裕介  
前田, 圭介

---

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 15:13-20

(Issue Date)

2011-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011336>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011336>



# ベントナイト材料の力学挙動のモデル化

## The modeling of mechanical behavior of bentonite

飯塚 敦<sup>1)</sup>

Atsushi Iizuka

河井 克之<sup>2)</sup>

Katsuyuki Kawai

高山 裕介<sup>3)</sup>

Yusuke Takayama

前田 圭介<sup>4)</sup>

Keisuke Maeda

概要：ベントナイトのような膨張性土質材料は、吸水により著しく膨張する性質を有している。その性質ゆえに放射性廃棄物の地層処分分野においてベントナイト材料の利用が検討されている。放射性廃棄物処分施設の長期的な力学挙動を予測するためにはベントナイトの膨潤特性を表現し得る構成モデルが必要であるが、既存の不飽和土弾塑性構成モデルではベントナイトの膨潤特性の表現が難しいのが現状である。そこで本研究では、吸水による膨潤が表現可能な弾塑性構成モデルを定式化し、膨潤圧試験シミュレーションを行うことで、構成モデルの示す膨潤圧特性について検討を行った。

キーワード：ベントナイト 不飽和土 膨潤特性

### 1. はじめに

現在、発電量の約 3 割は原子力発電であり、非常に重要な発電方法の一つである。しかしながら原子力発電からは放射性廃棄物が発生する。放射性廃棄物は地中深くに埋設することが検討されている。地中深くに建設予定の処分施設では、多重バリアシステムにより放射性廃棄物を生活環境から隔離することができると考えられている。多重バリアのうち、緩衝材、埋戻材としてベントナイト材料の利用が検討されている。その理由は、ベントナイトの持つ難透水性と吸水膨潤特性により放射能に汚染された地下水の水みちを自己シールし、生活圏へ漏れ出すことを十分に延期することや、オーバーバックの支持性能や岩盤のクリープ変位などに起因しオーバーバックに発生する応力の応力緩和性能が長期に発揮されることが期待されているからである。また、放射性廃棄物は非常に長い期間生活環境から隔離しなければならず、処分施設の複雑な挙動を長期にわたって予測する必要がある。そのためにはベントナイト材料の力学挙動を精度よく表現できる構成モデルの構築が必要である。

## 1.1 ベントナイト

ベントナイトとは海底・湖底に堆積した火山灰や溶岩が変質することで出来上がった粘土鉱物の一種である。「ベントナイト」という名称は、岩石名（鉱物集合体の総称）であり、その成分は地域や場所によって異なる。成分構成としてはモンモリロナイトという鉱物を主成分とし、他に石英や雲母、長石、ゼオライト等の鉱物を含んでいる。多くの鉱物が混ざっているが、モンモリロナイトの持つ特異的な物性がある。そのベントナイトの大きな特徴である吸水膨潤特性について、そのメカニズムを概説する<sup>1)</sup>。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトは、粒子の細かい含水珪酸アルミニウムで、3層粘土構造物の一種である。この3層は通常次のように呼ばれている。

第一層シリコン酸素四面体層…1個のシリコン原子を4個の酸素原子が囲んでいる四面体から成っている。

第二層アルミニウム八面体層…1個のアルミニウム原子を6個の水酸基で囲んでいる八面体から成っている。

第三層シリコン酸素四面体層…第一層と同じ

図-2-1 にこのようなモンモリロナイトの結晶構造を示す。

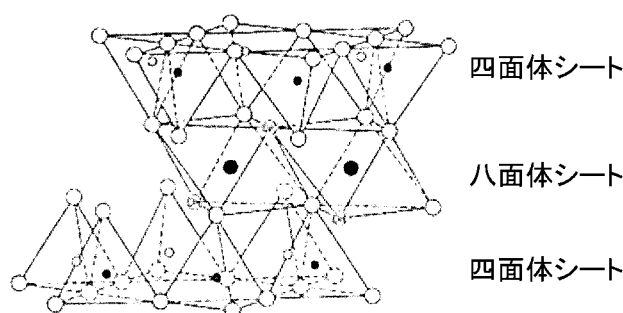


図-2-1 モンモリロナイトの結晶構造

ここで、第二層は、完全なアルミニウム・水酸基ではなく、アルミニウムの一部がマグネシウムと鉄の両方、あるいは一方と置換される。この際、三価のアルミニウムと二価のマグネシウムなどと置換されることになり不均衡が生じるが、この役割を担うのが「交換イオン」と呼ばれる遊離したイオンである。天然ベントナイトにおいては、ナトリウム、カルシウム、マグネシウムあるいは水素である。このうち交換イオンがナトリウムのものはナトリウム型ベントナイトと呼ばれ、吸水膨潤性が高く、高レベル放射性廃棄物処分施設で適用が考えられている。モンモリロナイトは、水の単分子層がシリコン酸素層上に吸着する。隣接する結晶層間にこのように吸着した水と交換イオンが水和イオンとして存在する。このように層間に多くの水を吸着して膨潤する性質をベントナイトは有している。

## 2. 弾塑性構成モデル

### 2.1 完全飽和線

小林ら<sup>2)</sup>によればベントナイトの正規圧密線は、いくつかの含水比に調整した材料を一次元圧縮した際の飽和点を結ぶことで得られる完全飽和線（式(1)、図.1-1）と一致し、ゼロ空隙曲線やベントナイトの平衡膨潤圧と平衡膨潤量の上限値を連ねたものとも一致するとしている。

$$e = \lambda_p \ln \frac{\sigma'_{v\max}}{\sigma'_v} \left/ \left( G_s - \lambda_p \ln \frac{\sigma'_{v\max}}{\sigma'_v} \right) \right. \quad (1)$$

ここで、 $G_s$ ：土粒子密度、 $\lambda_p$ ：材料パラメータ、 $\sigma'_{v\max}$ ：空隙がゼロとなる圧縮力である。また  $\lambda_p = 0.156$ 、 $G_s = 2.733$ 、 $\sigma'_{v\max} = 3.73\text{GPa}$  である。

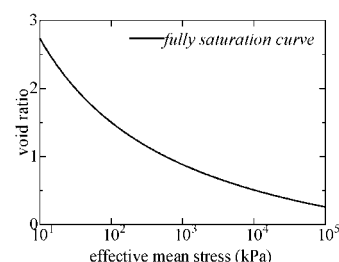


図.1-1 完全飽和線

## 2.2 飽和状態での応力-間隙比関係

構成のモデル化において、多次元応力場への展開をはかるため式(1)中の鉛直有効上載圧  $\sigma'_v$  を平均有効主応力  $p'$  と解釈する。さらに飽和状態における間隙比  $e$  を以下の二つの間隙比に分解できると仮定する。

$$e = e^* + e^{ad} \quad (2)$$

ここで  $e^*$  は **Cam-clay** モデルなどのような従来の飽和土構成モデルで表現される間隙比とする。本研究では **EC** モデル<sup>3)</sup>を用いることとする。**EC** モデルとは、コントラクタンシーの表現関数として指数関数を用いたモデルであり、正規圧密状態、過圧密状態での圧密における等方状態における  $e^*$  の変化は

$$e^* = -\frac{\lambda}{p'} dp' \quad (3)$$

$$e^* = -\frac{\kappa}{p'} dp' \quad (4)$$

である。式(3)、(4)は実験的に定まるものではなく任意性が強い。そこである基準応力  $p'_{ref}$  における完全飽和線上

の接線を  $e^*$  の正規圧密線とし、圧縮指数  $\lambda$ 、正規圧密線は、

$$\lambda = -\frac{de}{d(\ln p')} \Big|_{p'=p'_{ref}} = G_s \lambda_p \left/ \left( G_s - \lambda_p \ln \frac{p'_{max}}{p'_{ref}} \right) \right. \quad (5)$$

$$e^* = e_{ref} - \lambda \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \quad (6)$$

と考える。ここで  $e_{ref}$  は  $p'_{ref}$  に対する間隙比である。また膨潤指数  $\kappa$  は非可逆比:  $\Lambda = 1 - \kappa/\lambda$  によって定まる。

式(2)で定義した  $e^{ad}$  は、ベントナイトに特徴的な膨潤挙動を表すために新たに設定した概念であり、式(2)、(6)より

$$e^{ad} = \lambda_p \ln \frac{p'_{max}}{p'} \left/ \left( G_s - \lambda_p \ln \frac{p'_{max}}{p'} \right) \right. - e_{ref} + \lambda \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \quad (7)$$

と考える。図.2-1 に各状態における諸量の関係を示す。

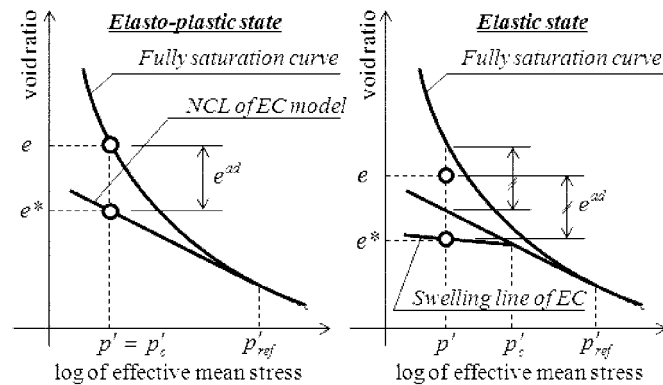


図.2-1 正規、過圧密状態での諸量の関係

また体積ひずみ増分が、以下のように分解できるとする。

$$d\varepsilon_v = \frac{-de}{1+e_0} = \frac{-(de^e + de^p + de^{ad})}{1+e_0} = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^{ad} \quad (8)$$

ここで、 $d\varepsilon_v^e$   $d\varepsilon_v^p$   $d\varepsilon_v^{ad}$  は式(3) (4) (7)より

$$d\varepsilon_v^e = \frac{\kappa}{1+e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (9)$$

$$d\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (10)$$

$$d\varepsilon_v^{ad} = \frac{\lambda^{ad}}{1 + e_0} \frac{dp'}{p'} \quad (11)$$

$$\lambda^{ad} = G_s \lambda_p \left/ \left( G_s - \lambda_p \ln \frac{p'_{\max}}{p'} \right)^2 \right. - \lambda \quad (12)$$

となる。また EC モデルの降伏関数は

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_c} + \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \frac{1}{n_F} \left( \frac{q}{p' M} \right)^{n_F} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (13)$$

で表わされる。ここで、 $n_F$  : フィッティングパラメータである。

### 2.3 不飽和状態への拡張

不飽和状態における土の有効応力は、次のように与えられるとする。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (14)$$

$$\text{ただし, } \boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1}, \quad p_s = S_e s, \quad s = p_a - p_w, \quad S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}}$$

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$  : 不飽和土の有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$  : ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$  : 2 階の単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$  : 全応力テンソル、 $s$  : サクシオン、 $p_s$  : サクシオン応力、 $p_a$  : 間隙空気圧、 $p_w$  : 間隙水圧、 $S_r$  : 飽和度、 $S_e$  : 有効飽和度、 $S_{rc}$  : 吸着水が占める飽和度である。

また、サクシオンと飽和度の関係を表したものが水分特性曲線であり、水分特性曲線は土のコンシステンシーと密接な関係があり試料によって異なる曲線となる。また、同一の試料であっても初期状態や乾湿履歴への依存性が指摘されている。河井ら<sup>4)</sup>は、それらの走査曲線が乾燥時と吸水時ではそれぞれ相似な形であることを利用して、ヒステリシス表現が可能な水分特性曲線モデルを提案している。任意のサクシオン、飽和度状態から描く脱水、吸水曲線は、杉井、宇野<sup>5)</sup>のロジスティック曲線式を用いる (図.2-3, 図.2-3)。

また、不飽和状態への拡張に際し、 $e^*$  の算出に大野らによって提案されている  $S_g$ -hardening モデル<sup>6)</sup>を用いる。これは不飽和状態における剛性の変化を表わすパラメータとして有効飽和度を用いたモデル (図.2-4) であり、圧密降伏応力が次式で定められる。

$$p'_c = p'_{sat} \zeta \exp \frac{\varepsilon_v^p}{(\lambda - \kappa)/(1 + e_0)}; \quad \zeta = \exp \left[ (1 - S_e)^n \ln a \right] \quad (15)$$

ここで、 $a$ 、 $n$  : 材料パラメータである。また正規圧密状態、過圧密状態での等方状態における  $e^*$  の変化は

$$e^* = e^*_{*0} - \lambda \ln \frac{p'}{\zeta p'_0} \quad (16)$$

$$e^* = e^*_{*0} - \kappa \ln \frac{p'}{\zeta p'_0} \quad (17)$$

となる。次いで不飽和状態での  $e^{ad}$  について、以下の二式の発展則を仮定した。

$$e^{ad} = (S_e)^m e_{sat}^{ad} \quad (18)$$

$$e^{ad} = (S_e)^{(m_0 \times [\exp(-ce_i)] + m_i)} e_{sat}^{ad} \quad (19)$$

ここで  $e_{sat}^{ad}$  は式(6)で定義した飽和時での  $e^{ad}$  の値である。また  $m$ 、 $m_0$ 、 $c$ 、 $m_i$  : フィッティングパラメータ、 $e_i$  : 初期間隙比である。式(18)、(19)をそれぞれタイプ 1、タイプ 2 とする。

従って、不飽和状態における体積ひずみ増分は

$$d\varepsilon_v = \frac{-de}{1+e_0} = \frac{-(de^e + de^p + de^{ad})}{1+e_0} = d\varepsilon_v^e + d\varepsilon_v^p + d\varepsilon_v^{ad} \quad (20)$$

$$d\varepsilon_v^e = - \left[ \kappa \frac{dp'}{p'} - \kappa n (1-S_e)^{n-1} \ln ad S_e \right] / (1+e_0) \quad (21)$$

$$d\varepsilon_v^p = - \left[ (\lambda - \kappa) \frac{dp'}{p'} - (\lambda - \kappa) n (1-S_e)^{n-1} \ln ad S_e \right] / (1+e_0) \quad (22)$$

$$d\varepsilon_v^{ad} = - \left[ -\lambda^{ad} (S_e)^m \frac{dp'}{p'} + m e_{sat}^{ad} (S_e)^{m-1} dS_e \right] / (1+e_0) \quad (23)$$

となる。ここで、タイプ2の場合、式(23)中の  $m$  が  $m = m_0 [\exp(ce_i)] + m_i$  となる。また  $S_e$ -hardening モデルの降伏関数は

$$f = MD \ln \frac{p'}{p'_{sat} \exp[(1-S_e)^n \ln a]} + \frac{MD}{n_e} \left( \frac{q}{Mp'} \right)^{n_e} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (24)$$

となる。

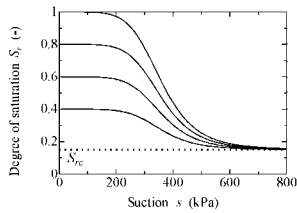


図.2-2 脱水曲線の表現

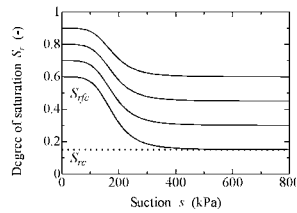


図.2-3 吸水曲線の表現

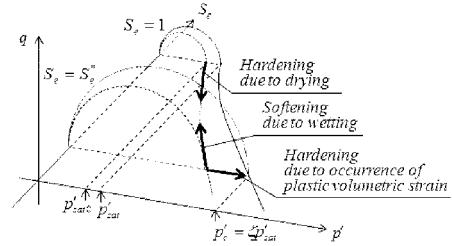


図.2-4  $S_e$ -hardening モデルの降伏曲面の概念図

### 3. 膨潤圧試験シミュレーション

#### 3.1 シミュレーション概要、条件

ベントナイトの膨潤特性を評価するための室内試験として膨潤圧試験が挙げられる。膨潤圧試験は、「変形が拘束された条件下での飽和化現象」とみなすことができ、この飽和化過程における全応力の変化量が、「膨潤圧」とであるとみなすことができる。本研究で行う膨潤圧試験シミュレーションでは、ある初期条件の下、飽和度を1になるまで逐次上昇させることを考える。構成関係式に変形なし条件を課すことで構成モデルの示す膨潤圧の理論値を計算し、飽和化過程における各値の変化について検討を行う。シミュレーションに用いたパラメータを表-1に、水分特性曲線を図.3-1に示す。ここでは初期含水比が8%の供試体を想定し、初期乾燥密度が1.5, 1.7, 1.9  $\text{Mg/m}^3$ の場合について計算を行う。またそれぞれの初期乾燥密度において水分特性曲線の主吸水曲線側、主脱水曲線側の2点(図.3-1中のA~F)から飽和化を開始した。また初期状態を過圧密状態、初期全応力を0としている。従って全応力がそのまま膨潤圧となる。

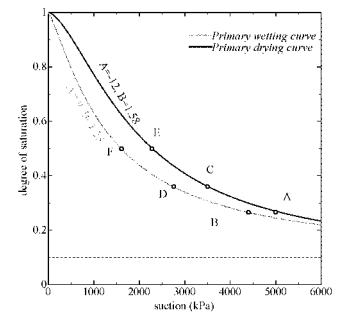


図.3-1 水分特性曲線

表-1 パラメータ

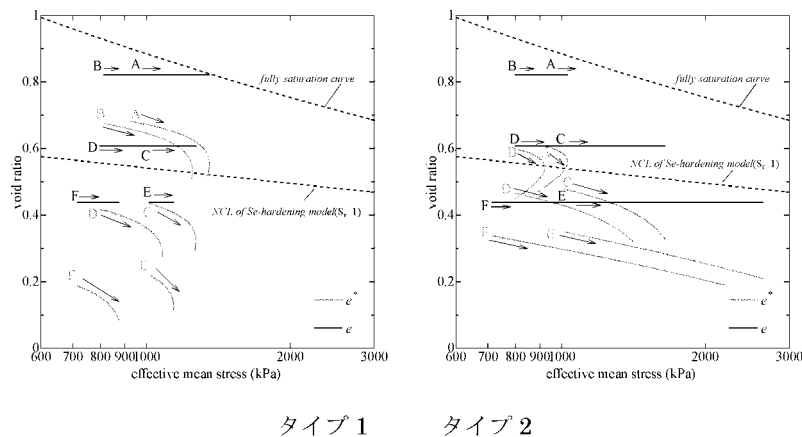
$G_s$	$\lambda_\rho$	$p'_{max}$ (GPa)	$p'_{ref}$ (GPa)	$A$	$M$	$\nu$	$n$	$a$
2.733	0.156	3.73	1.0	0.4	1.33	0.33	1	100
$n_E$	$m$	$m_0$	$c$	$m_l$	$S_{r0}$	$A_w$	$B_w$	
1.3	0.55	12	4.5	0	0.1	-9	1.25	

ただし,  $A_w$   $B_w$ はサクション (kPa) に対する値

### 3.2 結果

図.3-2に有効応力・間隙比関係を示す. 図中にはタイプ1, タイプ2のA~Fの $e$ ,  $e^*$ の有効応力変化を示してあるが,  $e$ に関しては体積が固定されているので飽和化の過程で一定の値を保っていることが分かる. また $e^*$ の変化に着目すると, タイプ1ではどのケースにおいても飽和化過程で有効応力が増加しそれに伴い $e^*$ が減少している. またタイプ2では, 全てのケースで飽和度の上昇に伴い $e^*$ は減少している. またA, Bは始め有効応力が増加し途中から減少している. C, DとE, Fを比べてみると密度が密なケースほど飽和化過程での有効応力の増加量が大きくなっているのが分かる.

図.3-3にタイプ1, タイプ2の有効応力, サクション応力, 全応力の飽和度変化を示す. 有効応力の変化は, タイプ1では飽和度の上昇に対して, 全てのケースで単調に増加しているのが分かる. それに対しタイプ2では, 初期乾燥密度の違いが有効応力の変化に対して大きな影響を与えているのが分かる. 具体的にいえば, 初期乾燥密度が密なE, Fでは有効応力は単調に増加し, 初期乾燥密度が小さくなればC, Dのように有効応力の増加量は小さくなる. そして初期乾燥密度が最も小さなA, Bでは有効応力が上に凸を描くように変化している. サクション応力に関しては水分特性曲線から決まるのでタイプ1, タイプ2ともに同じ変化を示している. 全応力(膨潤圧)に関しては飽和度の上昇に対してすべてのケースで増加しているのが分かる. また横軸に初期乾燥密度, 縦軸に最大膨潤圧をプロットした図を図.3-4に示す. タイプ1では密度が密なほど最大膨潤圧が小さくなる傾向, タイプ2では密度が密なほど最大膨潤圧が大きくなる傾向を示しているのが分かる. また主吸水曲線側の点から飽和化を開始した場合と, 主脱水曲線側の点から飽和化を開始した場合を比べてみると(AとB, CとD, EとF), いずれのケースにおいても主脱水曲線側の点から吸水を開始した場合(A, C, E)の方が生じる膨潤圧は大きくなっていることが分かる. 実際の膨潤圧試験では初期乾燥密度が密なほど生じる膨潤圧は大きくなると言われている<sup>7)</sup>. 従ってタイプ2の方が実際の膨潤圧試験の実験事実のような傾向を示しているのが分かった.



タイプ1      タイプ2  
図.3-2 有効応力・間隙比関係

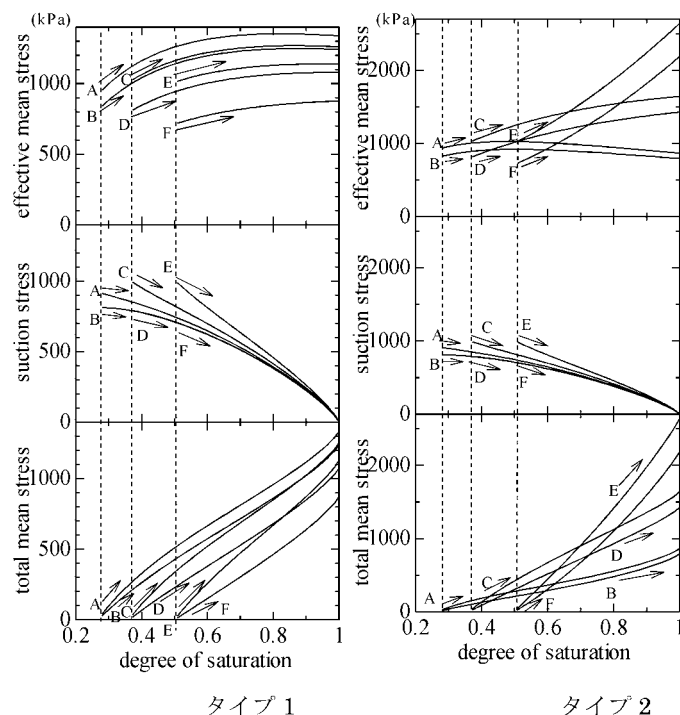


図.3.3 応力の飽和度変化

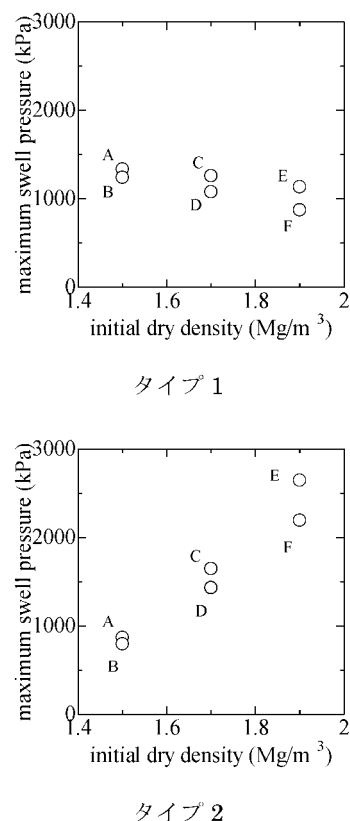


図.3.4 初期乾燥密度と最大膨潤圧の関係

#### 4. 結論

本研究で用いた構成モデルは、従来の土の構成モデルに従う間隙比 $e^*$ に、新たに膨潤挙動を表すための間隙比 $e^{ad}$ を加えることにより飽和時における非線形的な正規圧密曲線を再現可能なモデルである。また不飽和時において、 $e^{ad}$ に対して2つのモデル化を行い、初期含水比一定のもと複数の初期乾燥密度に対して膨潤圧を計算した。どちらも膨潤圧が発生することが確認されたが、タイプ2のほうがより現実的な傾向を示していることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 雨宮清：ベントナイトの基本特性調査，サイクル機構技術資料，PNC TN8410 89-033
- 2) 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.4，1065-1078，2007.12
- 3) 大野進太郎，飯塚敦，太田秀樹：非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル，応用力学論文集 vol.9，pp.407-414，2006.8
- 4) 河井克之，汪偉川，飯塚敦：水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化，応用力学論文集，Vol.5，pp.777-784，2002.
- 5) 杉井俊夫，宇野尚雄：新しい水分特性曲線のモデル化について，土木学会第50回年次学術講演会概要集，pp.130-131，1995.
- 6) 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.1132-1141，2007.12
- 7) 小峯秀雄，緒方信英：砂・ベントナイト混合材料及び各種ベントナイトの膨潤特性 土木学会論文集 no.701/III-58，373-385，2002.3

著者：1) 飯塚敦、都市安全研究センター、教授；2) 河井克之、都市安全研究センター、准教授；3) 高山裕介、神戸大学；4) 前田圭介、神戸大学



# The modeling of mechanical behavior of bentonite

Atsushi Iizuka  
Katsuyuki Kawai  
Yusuke Takayama  
Keisuke Maeda

## Abstract

The radioactive waste disposal facility is planned to be constructed under the ground. And to use a multi-barrier system is considered. Bentonite is planned to be used as buffer and backfill because bentonite has the swelling characteristics. The nuclear waste has to be stored indefinitely. To predict the long term mechanical behavior of the disposal facility, the constitutive model, which can express the mechanical behavior of bentonite, is needed. So, this study presents a new constitutive model for expansive soils. Under any arbitrary state of degree-of-saturation, the mechanical void ratio predicted by the elasto-plastic constitutive models, i.e. EC model and Se-hardening model are combined with the additional void ratio in order to characterize the typical swelling behavior of expansive soil. Herein, the fully saturation curve which derived from compaction and consolidation experimental tests are taken into consideration. The proposed model is examined by simulating the swelling pressure tests.