

THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関する一考察

大林組 正会員 ○山本 修一
茨城大学 正会員 小峯 秀雄

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分における人工バリアシステムは長期にわたってその機能を維持することが求められるが、岩盤からの地下水浸入によるベントナイト系緩衝材の膨潤変形、廃棄体の核種崩壊熱による膨張、乾燥や物性の変化、廃棄体の腐食によるガス圧やガス移行の影響などを同時に受ける。そのため、人工バリアシステム、特に緩衝材の長期挙動の評価には、間隙水の移動、骨格の変形、熱伝達と熱影響、ガス発生・移行現象の連成作用を考慮できる解析が必要となる。本研究は欧米で広く使われている熱・水・応力・ガス連成解析コード Code Bright¹⁾を導入し、我が国の処分問題への適用に向けて、適用性の確認、構成則等のモデルの改良、物性値取得方法の確立、物性値データベース整備など、熱・水・応力・ガス連成挙動のモデル化技術の確立を目指すものである²⁾。

本稿では、緩衝材ベントナイトの最も重要な特性の1つである膨潤特性について、Code_Bright に導入されている構成則(BB モデル: Barcelona Basic Model)^{1),3)}と小峯らの膨潤評価式⁴⁾を対比して、通常考えられる膨潤ひずみ量の範囲においては両者が整合的であること、したがって、要素試験をすることなく小峯らの膨潤評価式に基づいて BB モデルの膨潤パラメータを決定し得ることを示す。次に、上載荷重一定でベントナイトを飽和膨潤させた試験に対するシミュレーション解析を行い、飽和過程における膨潤ひずみ量の経時変化を実験と比較することで BB モデルと Code_Bright の適用性を検討する。

2. 飽和度の変化による体積変化のモデル化

BB (Barcelona Basic) モデルは、修正カム・クレイモデルを不飽和粘土に拡張した弾塑性構成モデルであり、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しても適用できるよう拡張されている(飽和状態での挙動は修正カム・クレイモデルと一致する)。

一般に不飽和粘土ではサクシジョンの変化により体積ひずみが発生する(ここに、サクシジョンは水分特性曲線を介して飽和度と一義的に関係付けられるので、サクシジョンを飽和度と読み替えることもできる)。BB モデルではこれを表現するために、応力変化による圧縮・膨潤(すなわち圧密)と類似した下記の関係を導入している。圧密における圧密降伏応力の概念と同様に、過去に受けた最大のサクシジョン(以下、降伏サクシジョンと呼ぶ)を超えてサクシジョンが増加(すなわち乾燥)する場合には式(1)で示される塑性的な体積減少が起こると仮定している(図-1 参照)。一方、サクシジョンが減少(すなわち湿潤)する場合、あるいは降伏サクシジョン以下の範囲でサクシジョンが増加(乾燥)する場合の体積変化は式(2)で定義される。

$$de = -\lambda_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (1), \quad de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (2)$$

ここに、 s :サクシジョン、 p_{atm} :大気圧、 λ_s :乾燥による圧縮指数、 κ_s :湿潤による膨潤指数である。一般の粘土に対しては λ_s 、 κ_s は応力に依存しない定数と見なせるが、ベントナイトのような膨潤性粘土に対しては、湿潤による膨潤指数 κ_s は平均ネット応力 p' ($=p-p_g$ 、 p :平均応力、 p_g :間隙空気圧)に依存する次式が提案されている。

$$\kappa_s(p') = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \quad (3)$$

ここに、 κ_{s0} : p'_{ref} での湿潤による膨潤指数、 p'_{ref} :参照平均ネット応力、 α_{sp} :湿潤による膨潤指数の応力依存性の度合いを表すモデルパラメータ

である。一方、小峯らの膨潤評価式⁴⁾では、陽な形では表現できないが飽和膨潤ひずみ ε_{smax} と膨潤応力の関係が得られる。そこで、小峯らの膨潤評価式と式(3)の BB モデルの関係を以下に考察する。式(3)の BB モデルを用いれば、湿潤膨潤(サクシジョンの減少)による体積ひずみ増分 $d\varepsilon_s$ (圧縮を正)は次式で表される。

$$d\varepsilon_s = \frac{\kappa_s(p')}{1 + e_0} \frac{ds}{s + p_{atm}} = \frac{1}{1 + e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (4)$$

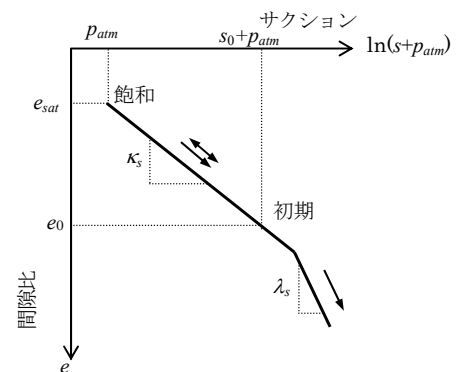


図-1 BB モデルにおけるサクシジョン (s) と間隙比 (e) の関係

従って、平均ネット応力 p' 一定条件の場合の体積ひずみは、

$$\varepsilon_s = \frac{1}{1+e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \cdot \ln \frac{s + p_{atm}}{s_0 + p_{atm}} \quad (5)$$

ここで、式(5)で $s=0$ (飽和) とすれば、一定応力下で飽和させた時の飽和時の膨潤ひずみ ε_{smax} は次式で表される (ε_{smax} は膨張が正)。

$$\varepsilon_{smax} = -\frac{1}{1+e_0} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \ln \frac{p_{atm}}{s_0 + p_{atm}} \quad (6)$$

初期乾燥密度 1.6g/cm^3 のベントナイト (クニゲル V1) に対し、小峯らの膨潤評価式を適用して得られたネット応力と飽和膨潤ひずみの関係を図-2に示す (白丸)。この膨潤評価式による結果を式(6)でフィッティングした結果を実線で示している。両者のよい一致は、膨潤評価式と式(3)の膨潤モデルの整合性を意味しており、式(3)の膨潤パラメータ (κ_{s0} , p'_{ref} , α_{sp}) は要素試験をすることなく膨潤評価式によって決定可能であると言える。

3. ベントナイトの吸水膨潤試験のシミュレーション

小峯らは膨潤評価式の妥当性を確認するため、ベントナイトの種類、ケイ砂混合比、乾燥密度などを変えて上載荷重一定の膨潤試験をオエドメータ型試験装置を用いて多数行っている。図-3 には、ケイ砂を混合したクニゲル V1 (ケイ砂混合重量比 30%, 乾燥密度 1.6g/cm^3) に対する試験結果 (上載荷重と膨潤ひずみの関係) をプロット (○印) で示している。ここに、飽和膨潤時の応力状態は等方的である (上載圧=平均ネット応力 p') と仮定し横軸は p' で表した。実線は BB モデルのパラメータを同定するために試験結果を式(6)でフィッティングしたものである。このとき、初期サクシオン s_0 は、初期含水比を 6% と仮定して試料の水分特性曲線⁵⁾から設定した ($s_0=14\text{MPa}$)。同定された膨潤パラメータと、当該材料に対する既存の力学パラメータ (膨潤指数 c_s など) および 2 相流パラメータ (透過係数や水分特性)⁵⁾を用いて Code_Bright により膨潤試験のシミュレーション解析を行った。図-3 の矢印で示す試験ケース (上載圧 0.01MPa のケース) に対するシミュレーション解析の結果を試験結果と比較して図-4に示す。最終的な飽和時の膨潤ひずみは解析結果も図-3 と一致するので、解析と実験がほぼ一致しているのは当然であるが、着目すべきは飽和膨潤過程における膨潤ひずみの発達挙動もよく一致していることである。飽和膨潤過程の挙動は解析的には BB モデルの力学パラメータだけでなく二相流パラメータにも依存するので、この結果だけで BB モデルの妥当性を主張することはできないが 1 つの可能性が示されたと考える。今後、飽和膨潤過程のモデルを検証するため、一般の不飽和粘土の力学試験で行われるサクシオン制御試験 (拘束圧一定サクシオン・除荷試験など) を適用、実施する予定である。

4. おわりに

BB モデルでは、飽和膨潤特性とともに不飽和状態における飽和度に依存する圧密特性やせん断強度特性も構成則として定式化されているが、モデルの適用性検討やパラメータの取得が十分とは言えない。今後、サクシオンを制御したオエドメータ試験や三軸試験を体系的に実施してデータの拡充とモデルの検証を行う必要がある。

参考文献

- 1) UPC: Technical University of Catalonia : CODE_BRIGHT User's Guide.
- 2) 山本, 中岡, 納多, Alonso, E.E. (2007): 人工バリアシステムの熱・水・応力・ガス連成解析, 土木学会 第 62 回年次学術講演会.
- 3) Alonso, E.E., A.GENS and A.JOSA, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, Geotechnique 40, No. 3, 405-430.
- 4) Komine, H., and Ogata, N. (2003). New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. Canadian Geotechnical Journal, 40, No. 2, pp.460-475.
- 5) 核燃料サイクル開発機構 (1999): わが国における高レベル放射能廃棄物地層処分技術的信頼性-地層処分研究開発第 2 次取りまとめ

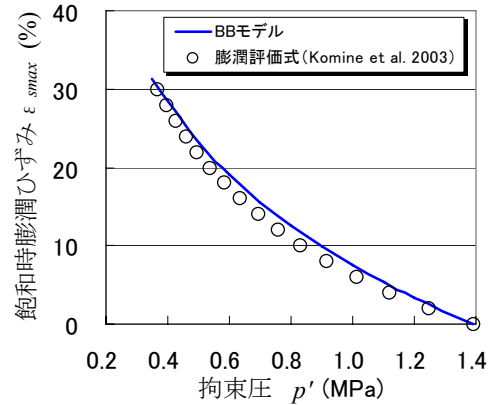


図-2 拘束圧 (平均ネット応力 p') と飽和時膨潤ひずみ (ε_{smax}) の関係: BB モデルと膨潤評価式の比較

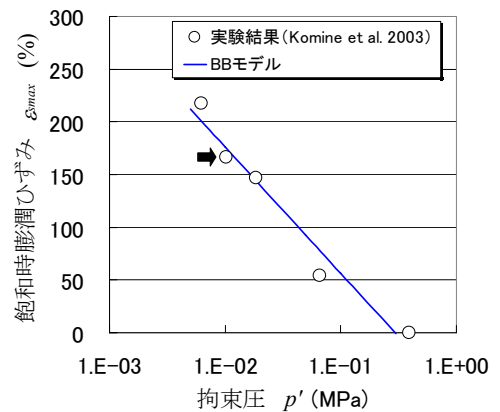


図-3 拘束圧 (平均ネット応力 p') と飽和時膨潤ひずみ (ε_{smax}) の関係: BB モデルによる実験結果のフィッティング

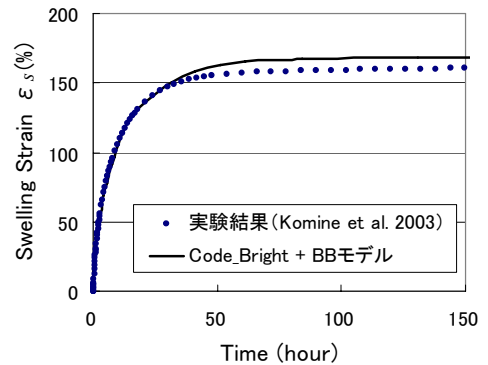


図-4 拘束圧一定膨潤試験における膨潤ひずみの経時変化: 実験と解析の比較