力学連成二相流解析におけるクニゲル GX ベントナイトの力学特性の検討

大林組 正会員 山本 修一, 正会員 武内 邦文 日本原燃 非会員 熊谷 守, 非会員 大石 英希

1.はじめに

放射性廃棄物処分施設においては金属の嫌気性腐食等によりガスが発生し,蓄積したガス圧の力学的影響に より人工バリアの機能が損なわれることが懸念される.この問題に対しては,気液二相流解析に基づいて処分 施設内に蓄積するガス圧を評価し,これを外力と考えた間接的な方法による影響検討が実施されている例があ る^{1),2)}.ガス移行やガス圧の発達と人工バリアの変形や応力は相互連成する現象であり,より現実的な評価の ためには力学連成二相流解析に基づいて直接的に力学的影響を検討するのが望ましい.力学連成二相流解析を 行うためには,処分場閉鎖後の再冠水に伴う人工バリアベントナイトの不飽和から飽和の過程や,その後のガ ス移行時の間隙水押出しに伴う飽和から不飽和の過程で起こる膨潤挙動や圧密挙動を適切に表現するモデル とパラメータが必要となるが,十分な知見やデータが取得されているとは言い難い.

本研究では力学連成二相流解析に基づいてガス発生・移行による力学影響評価を行うことを前提に,余裕深 度処分施設における人工バリア(低透水層)の候補材料であるクニゲルGXベントナイトの力学特性について, 既往の力学モデルと実験データに基づき両者の整合性とモデルパラメータについて検討した.

2. 適用する力学モデルと既存データの概要

本検討では, Alonso et al.(1990)³⁾の提案する力学構 成則(BBモデル: Barcelona Basic Model)の適用を 考える.BB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).

BB モデルでは,ベントナイトの水和膨潤変形を表-1 の式(1)に示すように飽和度の変化に

伴うサクションの変化と関係づけて いる⁴⁾.また,圧密特性に関しては圧 縮指数(λ)と膨潤指数(κ)にサクシ ョン依存性を考慮した式(2),(3)が提案 されており,その妥当性検討も実施さ れている⁵⁾.なお,降伏曲面はサクシ ョンの増加により拡大し引張強度も 表-1 BB モデル

膨潤変形特性	$d\varepsilon_{s} = \frac{1}{1+e_{0}} \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p'}{p'_{ref}} \right) \frac{ds}{s+p_{atm}}$ $\varepsilon_{s} : 体積ひずみ, s: サクション,$ $e_{0} : 初期間隙比, p': 平均ネット応力,$ $p_{atm} : 大気圧, \kappa_{s0}, \alpha_{sp}, p'_{ref}, : 材料定数$	(1)
圧密特性	$\lambda(s) = \lambda_0 \{(1 - \gamma) \exp(-\beta \cdot s) + \gamma\}$ $\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s)$ λ_0, κ_0 : 飽和時の圧縮指数,膨潤指数, α, β, γ : 材料定数	(2) (3)

表-2 BB モデルの物性パラメータとクニゲル GX データ

特性	パラ メータ	パラメータ設定のための 試験(下線:最適試験)	クニゲル GX に対する 既存データの現状	設定方法	
飽和圧密	λο, κο	<u>圧密試験</u>	圧密試験結果あり	試験結果を使用	
不飽和圧密	α, β, γ	<u>サクション制御圧密試験</u> or 不飽和試料の1軸圧縮試験	不飽和試料の一軸圧縮 試験値あり	αは不飽和試料の1軸圧縮試験から推定 圧縮指数のサクション依存性は無いもの と保守的に仮定(β=γ=0)	
膨潤	Ка0, Сер	サクション載荷・除荷試験 応調圧試験、膨潤量試験 or 小峯らの膨潤評価式	膨潤圧試験、膨潤量試 験の結果あり	試験結果に基づき設定	
せん断強度	φ , c	三軸圧縮試験	三軸圧縮試験結果あり	試験結果を使用	
引張強度	k	サクション制御三軸圧縮試験	試験データなし	飽和と同じく粘着力も引張強度もゼロと仮 定(k=0、保守的設定)	

サクションに比例して増加するが,内部摩擦角はサクションに依存しない定数と仮定されている.

表-2 に上記の材料パラメータを設定するのに必要な試験,クニゲルGX(乾燥密度 1.6Mg/m³)に対する既存のデータ,既存情報に基づくパラメータ設定方法の概略を示した.このうち,膨潤特性と圧密特性について以下で詳細に記述する.

3. クニゲル GX ベントナイトの膨潤特性とモデルパラメータ

図-1 はクニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係 ⁶⁾を示している.膨潤変形試験から得られた結果(□プロットなど)は飽和して膨潤変形した後の有効粘土密度とそのときの拘束応力との関係であるが,膨潤圧試験結果と同じ回帰式で近似されていることがわかる.したがって,図中の回帰式を飽和時膨潤体積ひずみと有効拘束応力との関係と読み替えることができる.例えば,初期乾燥密度1.6Mg/m³のベントナイトが飽和膨潤して乾

キーワード ガス影響, 力学連成二相流解析, ベントナイト, 膨潤特性, 圧密特性, 放射性廃棄物処分 連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 低レベル放射性廃棄物処分プロジェクト TEL 03-5769-1860

燥密度 1.5 Mg/m³となった場合(体積ひずみ換算では 6.67%)を考えると、このときの有効拘束圧は約0.4MPa であることを意味している.このように、図-1 の実験 回帰式から飽和膨潤ひずみと有効拘束圧の関係をプロ ットしたのが図-2(破線)である.図中にはこの関係を 式(1)の BB モデルでフィッティングした結果も実線で 示している.BB モデルによりベントナイトの膨潤特性 を表現できること、BB モデルパラメータが図-1の実験 結果から求まることがわかる.

4 . クニゲル GX ベントナイトの圧密特性とモデルパラ メータ



$$d\varepsilon_{\nu} = \frac{\kappa(s)}{1+e_0} \frac{dp'}{p'} \tag{4}$$

で表されるので,表-1の式(3)を用いればヤング率 *E* は膨潤指数 x₀ とサ クション *s* により次式で示される.

$$E = 3(1-2\nu)\frac{dp'}{d\varepsilon_{\nu}} = 3(1-2\nu)\cdot(1+e_0)\cdot\frac{p'}{\kappa_0(1+\alpha\cdot s)}$$
(5)

ここに, パはポアソン比である.ヤング率 E は平均ネット応力 p'に比例し,サクションの増大(飽和度の低下)に伴って増加することがわかる.また,サクションは水分特性曲線を用いて飽和度に置き換えられるので,式(4)から飽和度とヤング率の関係が得られる.そこで,平均ネット応力 p'を平衡膨潤圧(0.733MPa)として図-3の実験値を BB モデルによりフィットしたのが図中の実線である.このとき,膨潤指数 κo,ポアソン比パは既知の値を用いた.BB モデルによりヤング率の飽和度依存性を良く表現できることがわかる.また,不飽和圧密試験データが無い場合には不飽和試料の一軸圧縮試験に基づいて上記の方法により 膨潤指数のサクション依存パラメータαを評価可能である.

5.まとめ

クニゲル GX ベントナイトの膨潤特性と剛性の飽和度依存性につい



図-1 クニゲル GX の乾燥密度と膨潤圧の関係 6)



図-2 クニゲル GX (乾燥密度 1.6Mg/m³)の飽和膨潤ひずみに関す る実験と BB モデルの比較



図-3 クニゲル GX (乾燥密度 1.6Mg/m³)のヤング率の飽和度依存 性に関する実験と BB モデルの比較

て,既往の実験結果とBBモデルとの整合性を示すとともに,力学連成二相流解析によるガス影響評価のためのBBモデルパラメータを既往の実験結果に基づいて評価した.今後は余裕深度処分施設を対象とした力学連成二相流解析を実施し,ガス発生・移行の人工バリアへの力学的影響を検討する予定である.

参考文献

- 1) 武内ほか:トンネル型処分施設におけるガス発生・移行に伴う力学的な影響について,土木学会第64回年次学術講演会,2009.
- 2) 電事連ほか: TRU 廃棄物処分技術検討書, 2005.
- 3) E. Alonso et al.(1990) : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3.
- 4) 山本ほか: 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, 土木学会第63回年次学術講演会, 2008. 5) 山本ほか: 飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化, 土木学会年第64回年次学術講演会, 2009.
- 6) 伊藤ほか:ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その3) 膨潤変形挙動に関する検討,土木学会第64回年次学術講演会,2009.
- 7) 千々松ほか:ベントナイトクニゲルGXの基本特性試験(その2)不飽和支持力に関する検討,土木学会第63回年次学術講演会,2008.