締固めたベントナイトの吸水膨潤挙動のシミュレーション

(一財) 電力中央研究所 フェロー会員 ○田中幸久 正会員 渡邊保貴 (一財) 電力中央研究所 正会員 中村邦彦

1. はじめに

放射性廃棄物処分においては,放射性核種の移行を抑止するためなどの理由により締固められたベントナイトが用いられる. 周辺岩盤が均一であれば、処分坑道閉鎖後の再冠水過程において、廃棄体の下部に位置するベントナイトが先に冠水するため、 膨潤圧により廃棄体が上方へ変位する可能性がある.実際,遠心模型実験結果では,給水に伴って廃棄体模型が上方へ変位す る現象が観察されている^{1),2)}.こうした非一様に発生する膨潤圧による変位や傾きを正確に予測することにより初期状態の不 確実性を低減できるため廃棄体の長期的な安定性を検討する上でも重要である。本論文では、再冠水時の廃棄体の変位予測に 資するため、締固めたベントナイトに対する不飽和膨潤モデルを開発するとともに、数値シミュレーションにより遠心模型実 験結果における廃棄体模型に作用する土圧の経時変化を表 すことを試みた.

2. 膨潤圧試験における試験容器の軸方向剛性を考慮した吸 水飽和過程における軸方向応力の計算方法

締固めたベントナイトが ①等方弾性体であること, ②無 拘束の場合の吸水による膨潤が等方的に発生すること,を仮 定すると膨潤圧試験における軸方向応力増分は次式で表さ れる.なお、式の誘導に関しては文献3)を参照されたい.

$$\mathrm{d}\sigma_{a1} = \mathrm{d}\sigma_{a0} / \left(1 + K_{d1} / K_{svs\,a} \right) \tag{1}$$

ここで、 $d\sigma_{a1}$: 容器の有限な等価軸方向剛性を考慮した軸 方向応力増分, doga : 容器の等価軸方向剛性が十分大きい 場合の軸方向応力増分, K_d:供試体の体積剛性率, K_{d1}:供 試体の一次元体積剛性率, K_{sys.a}: 容器の等価軸方向剛性 (=h/D, h:供試体高さ, D:容器の軸方向変形性), v_a:ポアソ ン比(=0.3). さらに $d\sigma_{a,0}$ は次式で表される.

浸透圧による膨潤の場合($\sigma_m \leq u_{osm} - u_c$): $d\sigma_{a,0} = -du_c$

図1 膨潤圧試験における軸方向応力の計算手順 サクション減少による膨潤の場合($u_{osm} - u_c < \sigma_m$): $d\sigma_{a,0} = dK_d / K_d \cdot \sigma_m - K_d \cdot \kappa_s / (1 + e_0) \cdot du_c / (u_c + p_{at})$ (2a)

(2b) ここで, $d\sigma_m$:平均応力, u_c 、 du_c :サクションならびにサクション増分, u_{osm} :モンモリロナイト層間に作用する浸透圧, κ_s :サ クション減少による膨潤に関するパラメータ, eo: 初期間隙比, pa: 大気圧.また,計算手順を図1に示す.

3. 膨潤圧試験結果の数値シミュレーション

(1) 平衡膨潤圧に及ぼす容器の等価軸方向剛性の影響

図2は、容器の軸方向等価剛性が平衡膨潤圧に及ぼす影響を 示したものである. ベントナイトの種類が同一であり, 乾燥密 度,初期含水比,モンモリロナイト含有率もほぼ同一であるが, 容器の等価軸方向剛性が大きく異なる2つの実験ケースでは平 衡膨潤圧の実測値には5倍程度の違いがある. 容器の等価軸方 向剛性の違いを考慮した数値シミュレーション結果でも、そう した実験結果が再現されておいる.

供試体高さが平衡膨潤圧に及ぼす影響を調べた既往の実測結 果⁴⁾を図3に示す.図3によれば,密度が大きい場合,供試体 高さhの増大に伴って平衡膨潤圧は増大する. 容器の軸方向変 形性Dが一定でも供試体高さhの増大に伴って容器の等価軸方 向剛性 K_{svs.a} (=h/D)が増大することを考慮して数値シミュレー ションを行った結果も図3中に示す.計算結果は実験結果の特 徴を表すことができている.





キーワード 放射性廃棄物処分、ベントナイト、膨潤圧、シミュレーション 連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (一財) 電力中央研究所 TEL 0471-82-1181

-21-



(2) 初期飽和度が平衡膨潤圧に及ぼす影響

初期飽和度が平衡膨潤圧に及ぼす影響を調べた既往の実測結果 5)によれば、 乾燥密度が大きい場合,初期飽和度の増大に伴って平衡膨潤圧は減少する(図 4参照). 図4中には数値シミュレーション結果も示されている. 計算結果は 実験結果の特徴を表すことができている.

(3) 膨潤圧の経時変化

図5は、膨潤圧試験における膨潤圧の経時変化の実測値^のと計算値を示し たものである.図5右と図5左のいずれの乾燥密度も約1.6 (Mg/m³)であるが、 初期含水比が異なるため,膨潤圧~経過日数関係の曲線の形状が異なる.計 算結果は、いずれの場合の曲線の形状も再現できている.

4. 遠心模型実験結果の数値シミュレーション

中村・田中は、図6に示す模型を用いて、飽和過程における模型の変位と 模型に作用する膨潤圧を測定した¹⁾.図5に膨潤圧に関して実験結果の一部 を示す.図 6(a)に示すように模型は高レベル放射性廃棄物(HLW)処分 を想 定しているが、廃棄体模型がほぼ一定の厚さのベントナイトで囲まれている という点では図 6(b) に示す余裕深度処分(L1)施設と同様であるため、飽和 過程における廃棄体の挙動はL1施設の場合と同様であると思われる.

図7に本論文で示した不飽和膨潤モデルによる数値シミュレーション結果 を示す. 図 6(a)に示すように、ポーラスメタルが模型の下方と側方のみにあ ること,比較的小さな飽和度で平衡膨潤圧に近い値まで達する傾向があるこ

3.0

2.5

2.0

1.5

0.5

0.0

(MPa)

週圧

影 1.0

とから、上方ベントナイトは初期含水比の ままであると仮定した.

図7中には、実測結果と共に上記の仮定 による数値シミュレーション結果も示さ れている.計算結果は実験結果の特徴を表 せている.ただし、遠心模型では地下水圧 相当の加圧水で給水したことを考慮し,図 5の場合より大きな水分拡散係数を用いた.

5. まとめ

本論文で示したベントナイトの不飽和 膨潤モデルにより, 試験容器の剛性, 供試 体高さならびに初期含水比の影響を考慮 した膨潤圧試験結果をほぼ再現できるこ とがわかった.また、境界条件などを簡略 化して計算したにもかかわらず遠心模型 実験結果の特徴を表すことができていた.

参考文献:1)中村・田中:ベントナイトの種類 と密度が~, 土木学会論文集C, Vol.65, No.1, pp.85-96, 2009. 西本ほか:遠心力載荷装置 を用いた~(その2), ニアフィールド試験法~ 電中研研究報告N11040, 2012. 3) Tanaka, Y. and Modelling the effects of test Watanabe, Y. : conditions~, Soils and Foundations (投稿中), 4) 棚井・菊池:緩衝材の膨潤応力測定手法~,原 子力学会2008年秋の大会予稿集,講演番号M26, p.722, 2008. 5) 鈴木・藤田:緩衝材の膨潤特 性(研究報告),核燃料サイクル開発機構東海事 業所, JNC TN8400 99-038, 1999. 6) 渡邊・田 : 締固め時の含水比に着目した~, 土木学 中 会年次学術講演会講演概要集, CS13-030, pp.59-60, 2016.7) 土木学会・低レベル放射性廃 棄物の余裕深度処分に関する研究小委員会:余 裕深度処分の安全評価における地下水シナリオ に用いる~, 2008.



図3供試体高さが平衡膨潤圧に及ぼす影響



図4初期飽和度が平衡膨潤圧に及ぼす影響









(b) 余裕深度処分(L1)施設の断面⁷⁾ 図6 遠心模型実験における模型とL1 施設の対応

