

余裕深度処分施設におけるベントナイトの膨潤挙動に関する検討

(株) 間組 正会員 ○千々松正和
日本原燃 (株) 正会員 堀江 正人
東電設計 (株) 正会員 谷 智之

1. はじめに

余裕深度処分施設における人工バリアの一つであるベントナイトは処分後数 10 年から数 100 年程度で飽和に至ると考えられている。ベントナイトは水の浸潤に伴い膨潤圧を発生させることから、どの時期にどのような分布で膨潤圧が発生し、余裕深度処分施設のコンクリートピットやセメント系バリア等に対してどの程度影響をおよぼすのかについて評価することを目的として検討を実施した。

2. 解析条件

解析は熱-水-応力連成解析コード THAMES¹⁾ (岩盤内の熱-水-応力連成挙動を評価することを目的に開発され、その後、不飽和粘土中の水分移動等を考慮するとともに、不飽和粘土の膨潤挙動を評価するために、膨潤評価式を不飽和領域に拡張したモデルを導入している)を用いた。解析モデルは図-1 に示すが、モデル外側から岩盤、外側セメント層、低透水層 (ベントナイト層)、内側セメント層である。低透水層の前提条件は以下の通りである。

・材料:クニゲル GX、・乾燥密度: $\rho_d = 1.6\text{Mg/m}^3$ 、・間隙率: $n = 0.40$

また、解析に用いる物性値を表-1 に示す。岩盤の透水係数に関しては実測値から設定した。また、弾性係数に関しては、実測値 (780MPa)と空洞掘削解析の逆解析²⁾から得られた値 (2,000MPa)の2ケースを設定した。セメント層に関しては、文献等から設定したが、外側セメント層に関しては、劣化を考慮し、弾性係数を 1/10 としたケースも実施した。ベントナイトの弾性係数に関しては、含水比の異なる供試体による一軸圧縮試験結果から含水比の関数として表-1 のように設定した。ベントナイトの不飽和浸透特性に関しては、水分ポテンシャルの測定を行い、水分特性曲線を設定した。図-2 には類似材料のクニゲル OT-9607³⁾の水分ポテンシャル値も示すが、今回の測定値とほぼ同じ値が得られている。その後、水分拡散試験を実施して不飽和透水係数を設定した。膨潤圧に関しては、膨潤圧試験結果⁴⁾の解析を行い、膨潤評価式の適用性の確認を行なった。適用性の確認を、解析手順としては、①坑道の掘削解析 (50 年)、②人工バリア定置後の再冠水解析の順で実施した。また、岩盤の初期全水頭は 150m、外側セメント層の初期飽和度は 90%、ベントナイト層の初期飽和度は 70%とした。

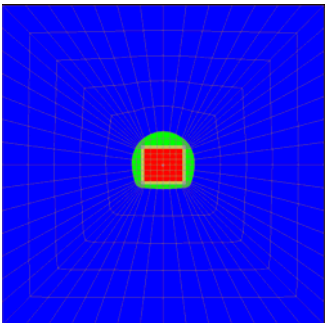


図-1 解析モデル

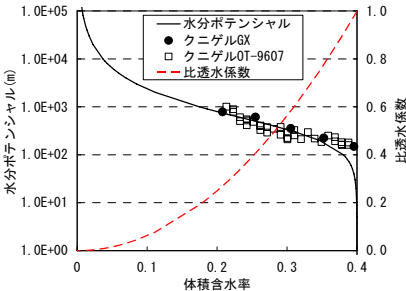


図-2 ベントナイトの水分特性

表-1 解析に用いるその他の材料の物性値

物性値	内側セメント層	低透水層	外側セメント層	岩盤
密度(Mg/m ³)	2.45	1.60(乾燥密度)	2.30	1.90
間隙率	0.13	0.66	0.13	0.30
飽和透水係数(m/s)	9.59×10 ⁻¹²	2.00×10 ⁻¹³	9.59×10 ⁻¹¹	1.00×10 ⁻⁸
弾性係数(MPa)	46,600	0.848 ω^2 -47.193 ω +669.98	25,000 or 2,500	2,000 or 780
ポアソン比	0.20	0.43	0.20	0.47

3. 解析結果

表-2 に解析ケースを示す。岩盤および外側セメント層の強度を変えた4ケースと、岩盤をモデルに入れず、外側セメント層の右下部からのみ地下水が浸潤してくるケースの解析を行なった。図-3 および図-4 には Case1-1 の人工バリア定置後のベントナイト層内の飽和度および有効応力の経時変化である。ベントナイトはほぼ 100 年程度で飽和に達していること、および、ベントナイトが飽和に達すると応力も定常に達していることが分かる。この傾向は岩盤、外側セメント層の強度に関係無く同じである。図-5 および図-6 は Case1-1 の変位コンターである。このケースが最も Case1-1~Case1-4 で最も変位が大きくなったが、それでも最大で 12mm 程度である。また、乾燥密度のばらつきは Case1-1 で 1.571~1.608Mg/m³、Case1-4 で

キーワード 余裕深度処分施設, ベントナイト, 膨潤圧, 連成解析
連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門 2-2-5 / TEL:03-3588-5793 / mchiji@hazama.co.jp / 千々松正和

表-2 解析ケース

解析ケース	浸潤	弾性係数 (MPa)	
		岩盤	外部セメント層
Case1-1	均一	780	2,500
Case1-2		2,000	2,500
Case1-3		780	25,000
Case1-4		2,000	25,000
Case2	不均一	無し	2,500

1.580~1.616Mg/m³程度であった。図-7は Case1-1 の平均有効応力コンターである。ベントナイト層より内側は圧縮場となっている。図-8 は Case2 の境界条件である。右下部のみより地下水が浸潤してくる設定である。図-9 および図-10 はそれぞれ 10 年後、100 年後の飽和度コンターである。右下より順次飽和度が上昇しているが 100 年後にはベントナイト層内はすべてほぼ飽和に達している。飽和後の平均有効応力コンターを図-11 に示すが、ベントナイト層より内側は全て圧縮場となっている。図-12 は変位図であるが、最大変位は 2mm 程度となっており、それほど変位も大きくない。また、Case2 は外側セメント層の外側を固定境界としているが、外側を自由境界としても解析を行った。この場合は、変位は固定境界に比べ大きくなる。最大値で 40mm 程度となった。しかしながら、この場合でもベントナイト層よりも内側は全て圧縮場となった。

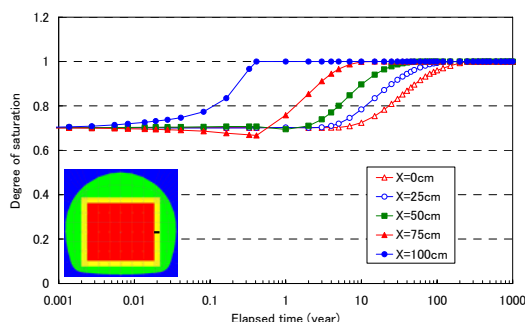


図-3 ベントナイト層内の飽和度の経時変化 (Case1-1)

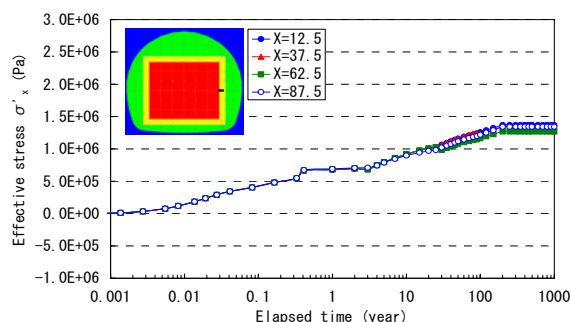


図-4 ベントナイト層内の有効応力の経時変化 (Case1-1)

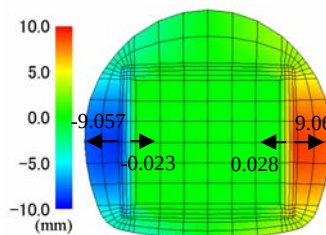


図-5 水平方向変位 (Case1-1)

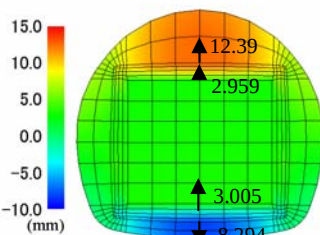


図-6 鉛直方向変位 (Case1-1)

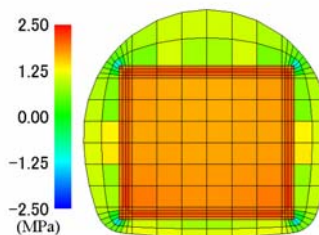


図-7 平均有効応力図

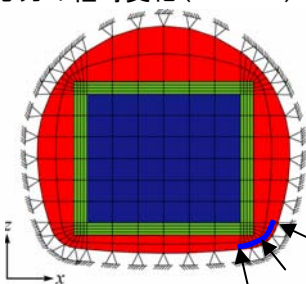


図-8 境界条件 (Case2)

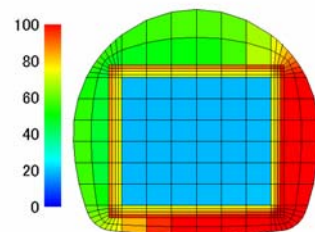
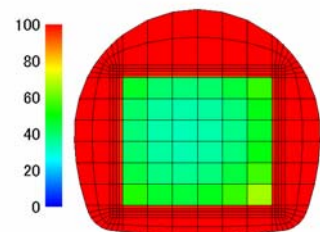
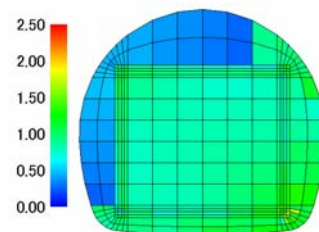
図-9 飽和度分布
(Case2, 10 年後)図-10 飽和度分布
(Case2, 100 年後)

図-11 平均有効応力図 (Case2)

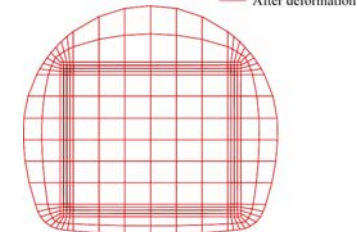


図-12 変位図 (Case2)

4. まとめ

得られた結果は以下の通りである。1) 低透水層が飽和するのに要する時間は 100 年程度である。2) 低透水層に地下水が浸潤するに従い膨潤圧が発生し応力状態が変化するが、低透水層が飽和すると膨潤圧の発生に伴う応力変化はなくなる。3) 膨潤による低透水層の変位は数 mm 程度である。4) 低透水層が飽和後は、低透水層および低拡散層は圧縮場となる。5) 膨潤変形による低透水層の乾燥密度のばらつきは 1.571~1.616Mg/m³ 程度であり、それほど大きくはない。6) 不均一浸潤が生じた場合でも低透水層および低拡散層は圧縮場を保持される。

【参考文献】1) 操上ら: 膨潤評価式を適用した熱-水-応力連成解析, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.21-31, 2004, 2) 富田ら: 空洞掘削時の応力状態を考慮した要素試験による堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の一考察, 第 35 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.213-218, 2006, 3) Fujita et al.: Coupled thermo-hydro-mechanical experiment at Kamaishi mine, Technical Note 11-96-04, Fundamental properties of bentonite OT-9607, PNC TN8410 97-071, 1997, 4) 小野ら: 現場締固め工法における締固め層境での透水係数測定結果, 土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集, CS05-059, 2006