

緩衝材の膨出現象に伴う密度変化に関する解析的評価

(株)ハザマ 正会員 ○山下 亮, 正会員 雨宮 清

(株)地域地盤環境研究所 正会員 長屋 淳一, 正会員 塚田 泰博

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 正会員 中島 均, 非会員 朝野 英一

1. 背景と目的

高レベル放射性廃棄物処分で検討されている人工バリアの材料品質には、施工時品質と、性能評価時に初期状態となる飽和時の初期品質とがあり、所定の初期品質を満足する施工品質の指標の提示が重要になる。緩衝材と埋戻し材は、再冠水過程で膨潤挙動を示し、図1のように、ベントナイト含有量の多い緩衝材が、埋戻し材側に膨出し、緩衝材の密度および遮水性が低下する可能性がある。本研究では、施工時の緩衝材の乾燥密度および透水係数が膨出現象によりどのように変化するかを、定量的に評価し、適切な施工時品質の設定に資することを目的とする。

2. 飽和・不飽和を考慮できる応力-浸透連成解析手法

膨出現象が定常状態に至るまでには、数年あるいはそれ以上の時間を要し、実験的な手法による検討が困難である。また不飽和～飽和状態における水分移動と膨潤変形が連成した現象であり、これらを考慮できる数値解析手法として、熱-応力-浸透連成解析コード Thames を用いた。Thames は、Ohnishi et al¹⁾により構築され、JNC の第2次取りまとめ²⁾において再冠水の解析に適用されている。その後も、千々松ら³⁾によって改良がなされ、小峯による緩衝材の膨潤評価式⁴⁾が導入されている。

3. 解析条件

解析に用いた有限要素モデルを図2に示す。モデルの境界条件は、側面の水平変位および底面の鉛直変位を固定し、側面および底面の全水頭を500mに設定した。

施工時の緩衝材と埋戻し材の乾燥密度と透水係数の再冠水後の変化を定量的に評価するために、施工時の緩衝材(ベントナイト混合比70%)の乾燥密度を1.6, 1.8Mg/m³の2種類に、施工時の埋戻し材(ベントナイト混合比30%)の乾燥密度を、1.3, 1.5, 1.7Mg/m³の3種類に設定した。JNCの第2次取りまとめ⁵⁾では、緩衝材と埋戻し材の力学モデルとして弾性モデルが用いられたが、土質材料としての特性を考慮するために、不飽和土の弾塑性モデル⁵⁾を用いた。埋戻し材に関してはベントナイトにケイ砂を30%混合した材料を想定し、乾燥密度1.3~1.7Mg/m³の材料について圧密試験により圧縮指数を取得して解析に用いた。その他の材料には、線形弾性モデルを用いた。浸透水は、淡水と塩水の2種類を設定した。材料特性は、JNCの第2次取りまとめ⁵⁾を参考にして決定した。材料特性の一部を表1に示す。

4. 解析結果

解析結果の例として、施工時乾燥密度が緩衝材1.8Mg/m³、埋戻し材1.3Mg/m³、淡水の場合の飽和時(処分孔閉鎖500年後)の変形図を図3に乾燥密度分布図を図4に示す。同図から、緩衝材が埋戻し材側に膨出し(膨出量は、緩衝材上端中央で18.26cm)、緩衝材の乾燥密度は、1.67Mg/m³程度まで低下していることがわかる。

全解析ケースの結果を、緩衝材と埋戻し材の施工時乾燥密度および飽和時の緩衝材上端中央の緩衝材乾燥密度の関係として整理すると、図5(淡水)および図6(塩水)に示すチャートになる。同図中の近似曲面は、解析結果より推定される飽和時の緩衝材上端中央の緩衝材乾燥密度の予測値を示している。図5から、淡水の場合

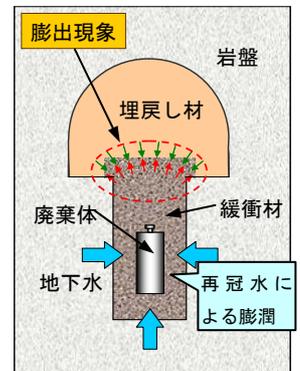


図1 膨出現象

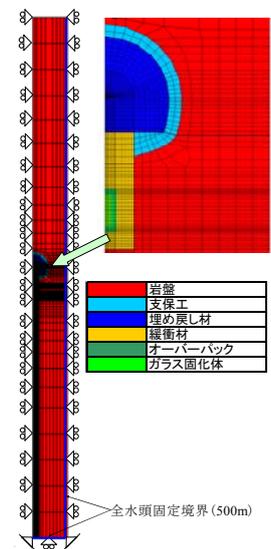


図2 有限要素モデル

キーワード 放射性廃棄物, 地層処分, 緩衝材, 膨出現象, 乾燥密度, 透水係数

連絡先 〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5 (株)ハザマ TEL 03-3588-5793

には、緩衝材の施工時乾燥密度が大きく、埋戻し材の施工時乾燥密度が小さいほど、飽和時の密度低下が大き
いことがわかる。緩衝材の乾燥密度が大きいほど、膨潤圧が大きい膨出量は大きくなる。また、埋戻し材
の乾燥密度が小さい方が膨出による緩衝材の密度低下が大きくなる傾向があるが、これは埋戻し材の乾燥密度
が小さいと圧縮されやすく、埋戻し材自体の膨潤圧も小さくなるためと考えられる。一方、図6の塩水の場合
にも、淡水の場合と同様の傾向を示すが、緩衝材の施工時乾燥密度が小さなるほど密度低下量が小さくなっ
ている。これは、淡水の場合に比べて、塩水の場合の緩衝材の最大膨潤圧が小さいことによる(表1に示す乾燥
密度 1.6Mg/m³の淡水の最大膨潤圧 0.632MPa>塩水の最大膨潤圧 0.293MPa)。同様にして、緩衝材と埋戻し材の施工時乾燥密度および飽和時の緩衝材上端中央の透水係数の関
係を示すと、図7(淡水)および図8(塩水)のようになる。同図より、埋戻し材の施工時乾燥密度が小さいほど、透水係数の増加量が大きくなっていることがわかる。拡散場維持
の観点からは、淡水系のケースはいずれも問題がないと考えられるが、塩水系に関しては施工時に、1.8Mg/m³程度の高い密度の緩衝材を用いることが望まれる。

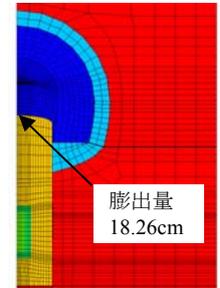


図3 変形図
(変形倍率5倍)

5. まとめ

Thames を用いた膨出現象の数値解析により、緩衝材と埋戻し材の施工時乾燥密度と飽
和時の緩衝材の乾燥密度および透水係数の関係を示した。膨出抑制の観点から、埋戻し
材については密度が高く、有効粘土密度の高い材料が望ましいと考えられる。また、今後は、実測による定量的
な妥当性の確認が必要である。なお、本報告は、経済産業省からの委託による「高レベル放射性廃棄物処分関
連:処分システム工学要素技術高度化開発」の成果の一部である。

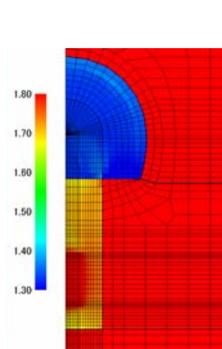


図4 乾燥密度分布
(単位: Mg/m³)

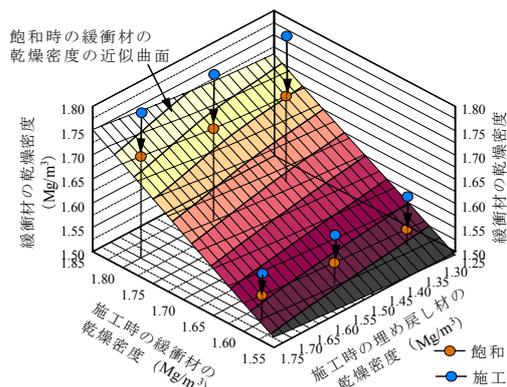


図5 飽和時の緩衝材の乾燥密度変化(淡水)

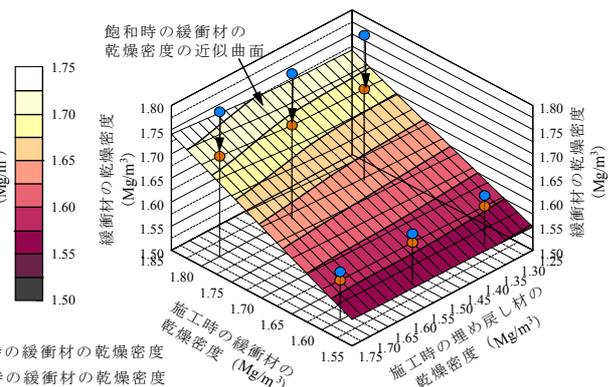


図6 飽和時の緩衝材の乾燥密度変化(塩水)

表1 緩衝材と埋戻し材の材料特性

物性		単位	緩衝材		埋戻し材			
乾燥密度		Mg/m ³	1.80	1.60	1.30	1.50	1.70	
不飽和弾塑性モデル	淡水系	圧縮指数C _c	-	0.270	0.270	0.380	0.290	0.175
		膨潤指数C _u	-	0.160	0.160	0.288	0.220	0.133
	塩水系	圧縮指数C _c	-	0.270	0.270	0.190	0.145	0.088
		膨潤指数C _u	-	0.099	0.099	0.086	0.066	0.040
	限界状態パラメータ	-	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	
	飽和圧密降伏応力	MPa	-	-	-	-	-	
飽和時の平均有効応力								
ポアソン比	-	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4		
初期平均有効応力	MPa	1.45	1.45	0.60	0.60	0.60		
間隙率	-	0.333	0.403	0.511	0.440	0.360		
透水係数	m/s	淡水:1.61×10 ⁻¹³ 塩水:2.06×10 ⁻¹²	淡水:5.30×10 ⁻¹³ 塩水:1.34×10 ⁻¹²	淡水:5.18×10 ⁻¹² 塩水:2.62×10 ⁻⁹	淡水:4.29×10 ⁻¹² 塩水:1.12×10 ⁻⁹	淡水:2.92×10 ⁻¹² 塩水:3.69×10 ⁻¹⁰		
比透水係数: k _v =S _v ² のm	-	-	-	2	-	-		
最大膨潤応力	MPa	淡水:1.284 塩水:1.085	淡水:0.632 塩水:0.293	淡水:0.056 塩水:0.00005	淡水:0.122 塩水:0.00062	淡水:0.224 塩水:0.00067		
VGモデル	飽和体積含水率θ _s	-	0.333	0.403	0.511	0.440	0.360	
	最小揚水量θ _i	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
	a	1/m	8.0×10 ⁻³	8.0×10 ⁻³	1.5×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁴	1.5×10 ⁻⁴	
	n	-	1.6	1.6	3.0	3.0	3.0	
初期水頭(圧力水頭)	m	-170.0	-170.0	-63.5	-63.5	-63.5		

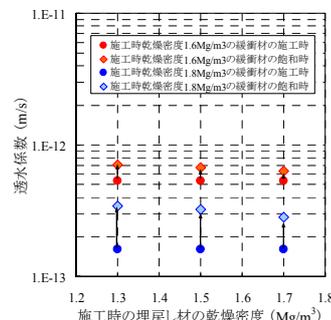


図7 飽和時の緩衝材の
透水係数変化(淡水)

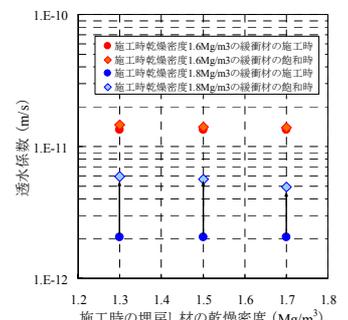


図8 飽和時の緩衝材の
透水係数変化(塩水)

参考文献

1). Ohnishi, et al. : Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium, Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, pp.263-268, 1985. 2). JNC : 地層処分研究開発第2次取りまとめ, 1999. 3). 千々松 他 : 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価, 土木学会論文集, No.687/III-56, pp. 9-25, 2001. 4). Komine, et al. : Coupled thermal, hydraulic and mechanical simulation with a theoretical model for swelling characteristics, Proc. of Int. Conf. on Coupled T-H-M-C Processes in Geo-systems, Stockholm, pp.550-555, 2003. 5). 大野 他 : 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 C Vol.63 No.4, pp.1132-1141, 2007.