

幌延の地下水環境下におけるベントナイト混合材料の力学特性

(株)竹中工務店 正会員○高治一彦、重野喜政、下河内隆文
核燃料サイクル開発機構 非会員 中山雅

1.はじめに

緩衝材は、塩水環境下では淡水環境に比して膨潤特性の低下や透水係数の上昇などが起こることが知られているが、力学特性についてもその挙動を把握することは塩水環境下での処分場設計や安全評価上の基盤情報を得る上で重要である。本研究では、サイクル機構で建設中である幌延の地下研究施設から近い場所にある試錐孔から採取された地下水（以下「幌延地下水」）や NaCl 水溶液を用いた圧縮成型ベントナイトの一軸圧縮試験、圧密試験を実施した結果についてまとめ、淡水条件での試験結果との比較検討を行った。

2.試験概要

実施した室内力学試験は、一軸圧縮試験と一次元圧密試験である。表 1 に試験条件を示す。幌延地下水は地下研究施設から近い場所にある HDB-6 孔から採取された水であり、イオン強度は約 0.21mol/l である。幌延地下水の化学分析結果を表 2 に示す¹⁾。また、イオン強度の影響を把握するために一軸圧縮試験は 0.2, 0.4, 0.8mol/l、一次元圧密試験は 0.2, 0.8mol/l の NaCl 水溶液による試験も行った。

一軸圧縮試験の試験手順は、自然含水比状態の粉末ベントナイトとケイ砂を所定の寸法、有効粘土密度になるように圧縮成型し、変形を拘束した状態で飽和セル中で約 1 ヶ月吸水飽和させた後取り出し、所定の載荷速度で軸ひずみ 15%まで応力載荷を行った。なお、飽和度は、試験前の重量および試験後の絶乾重量よりほぼ 100%となっていることを確認している。

一次元圧密試験も自然含水比状態の粉末ベントナイトとケイ砂を所定の寸法、有効粘土密度になるように圧縮成型し、試験機にセット後変形拘束状態で溶液中に浸漬し、膨潤応力がほぼ一定になった時点を初期条件として所定の圧密応力を載荷した。載荷過程は 19.6MPa まで 8step、除荷過程は初期膨潤応力相当まで 4step、再載荷過程は 19.6MPa まで 4step で応力を載荷／除荷した。各 step の圧密終了は 3t 法により判断した。

表 1 試験条件

項目	内容	
試験名	一軸圧縮試験	一次元圧密試験
材料	ケイ砂混合ベントナイト ベントナイト クニゲル V1（重量比：70wt%） ケイ砂 3号（重量比：15wt%）、5号（重量比：15wt%）	
試験溶液	蒸留水、幌延地下水 NaCl 溶液(0.2, 0.4, 0.8mol/l)	幌延地下水 NaCl 溶液(0.2, 0.8mol/l)
寸法	直径φ30mm×高さ h60mm	直径φ60mm×高さ h20mm
初期含水比	6.04%	6.04%
初期有効粘土密度	1.2, 1.6 Mg/m ³ （蒸留水、幌延地下水のみ） 1.4 Mg/m ³ （上記全試験溶液）	1.4 Mg/m ³
試験条件	載荷速度：0.17%/min 軸ひずみ 15%まで載荷	膨潤応力から 19.6MPa まで 8step 載荷、膨潤応力まで 4step 除荷、19.6MPa まで 4step 再載荷
試験数	試験溶液×初期乾燥密度毎各 3 本、計 27 本	各試験溶液条件 1 本、計 3 本

3.試験結果

蒸留水供試体、幌延地下水供試体の実質有効粘土密度と一軸圧縮強度 q_u および弾性係数 E_{50} の関係を図 1 に示す。図より、有効粘土密度 1.2Mg/m³では一軸圧縮強度、弾性係数とも蒸留水供試体より幌延地下水供試体の方が若干 q_u 、 E_{50} とも低い、有効粘土密度が高くなるほど蒸留水結果との差が小さくなっている。

次に、有効粘土密度 1.4Mg/m³の供試体の各試験溶液条件で行ったイオン強度と q_u および E_{50} の関係を図 2 に示す。図 2 において、イオン強

表 2 HDB-6 孔地下水分析結果

試験区間	m	363.95-409.00
pH		6.87
水温 (pH計)	°C	20.5
Na ⁺	meq/L	183.56
K ⁺	meq/L	2.81
NH ₄ ⁺	meq/L	7.76
Ca ²⁺	meq/L	6.99
Mg ²⁺	meq/L	9.05
Cl ⁻	meq/L	177.72
SO ₄ ²⁻	meq/L	0.00
アルカリ度	meq/L	46.20

キーワード：放射性廃棄物、ベントナイト、力学特性、幌延地下研究施設、地下水、NaCl 水溶液
連絡先：〒270-1395 千葉県印西市大塚 1-5-1 TEL:0476-47-1700 FAX:0476-47-7744

度 0 は蒸留水を意味する。図より、イオン強度が高くなるほど概ね一軸圧縮強度、弾性係数とも低くなっており、蒸留水供試体に対して 0.8mol/l 供試体は一軸圧縮強度で約 62%、弾性係数で約 70%低下している。また、幌延地下水供試体は、ほぼ同じイオン強度 (0.2mol/l) の NaCl 水溶液供試体より強度、弾性係数とも低くなっており、NaCl 以外の地下水成分がせん断挙動に影響している可能性も考えられる。

せん断試験終了後の供試体状況は、ほぼ全ての供試体で一方の端部から荷重に伴って軸方向に亀裂が進展しながら押し広げていくような圧縮破壊であった。

次に、一次元圧密試験による各 step の荷重応力 (圧密応力) p と間隙比 e の関係 (e -log p 関係) を図 3 に示す。図には蒸留水条件で実施した試験結果も併せて示している。荷重過程は試験溶液条件によらずほぼ同一の関係を示し、また、蒸留水試験結果ともほぼ同じ挙動を示すといえる。除荷・再荷重過程では、19.6MPa 荷重時からの相対的な変形の戻りが総じて蒸留水条件よりも小さく、特に 0.8mol/l 供試体が最も小さい。また、除荷・再荷重による e -log p 曲線のヒステリシスも降水系よりも小さい。これは、ベントナイト材料は膨潤特性を有するため、除荷が進むと弾性変形によるリバウンド加えて膨潤による変形も加わり、下に凸のラインを描くが、膨潤圧 (変形量) が小さい塩水系供試体ではこの傾向が降水系供試体に比して小さいため、除荷時の勾配が降水系に比して小さくなったものと考えられる。蒸留水条件の圧密除荷時の膨潤変形量は、小峯らにより提案されている膨潤評価式³⁾から求められる膨潤変形量とよく整合しているという結果も得られており⁴⁾、塩水環境下でもこの評価が成立するかどうかを検討する必要がある。

本結果より圧縮指数 C_c は、試験溶液の種類に係らず、降水系 (蒸留水) の結果²⁾と同様 $C_c=0.27$ となる。

膨潤指数 C_s は 19.6MPa 荷重時の点と膨潤圧 (0.36MPa) 時の点を結んだ勾配として求めると、蒸留水では $C_s=0.16$ であったのに対し、0.2mol/l 供試体と幌延地下水は $C_s=0.1$ 、0.8mol/l 供試体は $C_s=0.06$ となった。

4. おわりに

溶液の塩濃度が高いほどモンモリロナイト層間距離が減少し、これによって膨潤応力の低下や透水係数の上昇を引き起こすと考えられている。今回実施した一軸圧縮試験結果からは、塩濃度の上昇によって緩衝材ベントナイトの剛性や強度が若干低下することが明らかとなり、圧密試験からは膨潤変形量の低下により除荷時のリバウンド変形量が蒸留水条件より低下することが明らかとなった。しかし、正規圧密領域の挙動が蒸留水条件とほぼ同じであることやイオン強度がほぼ同じである幌延地下水と NaCl 水溶液のせん断特性が異なること等に関しては、今後さらに詳細な試験データの蓄積やマイクロレベルでの挙動の解明を行う必要がある。

【参考文献】

- 1) 濱 克宏, 國丸貴紀, 中山 雅: 幌延深地層研究計画その(2)新第三紀堆積岩の水理・地球化学特性について, 日本原子力学会 2005年春の年会要旨集, 第III分冊, p631, 2005
- 2) 高治一彦, 鈴木英明: 緩衝材の静的力学特性, サイクル機構技術資料, JNC TN8400 99-041, 1999
- 3) 小峯秀雄: 高レベル放射性廃棄物処分におけるベントナイト粘土の役割と技術開発動向, 粘土科学, 第41巻, 第4号, pp.182-189, 2002
- 4) 平井 卓他: 圧密ベントナイトを用いた緩衝材の弾塑性挙動評価モデルに関する研究, 第 48 回地盤工学会シンポジウム, 地盤工学会, pp.389 ~ 396, 2003

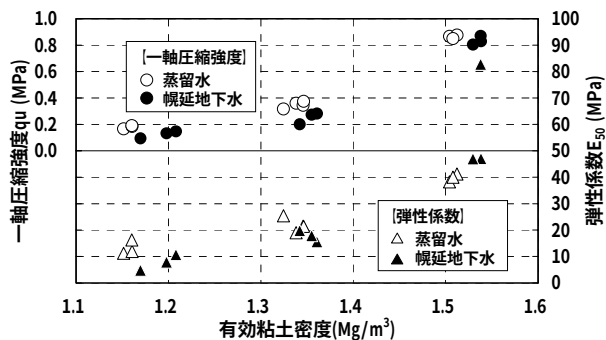


図1 有効粘土密度と一軸圧縮強度、弾性係数の関係

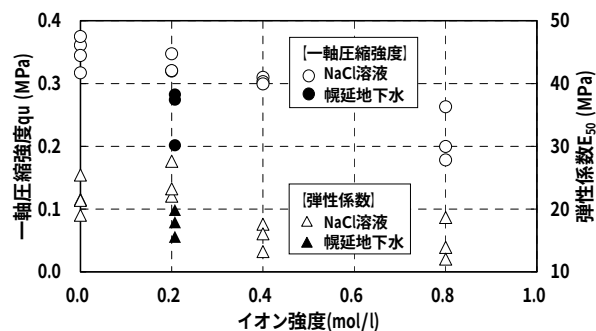


図2 イオン強度と一軸圧縮強度、弾性係数の関係

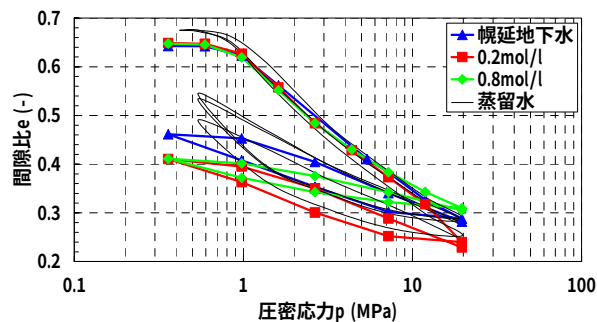


図3 e-log p 関係