

剛性容器を用いた透水試験における飽和状態の評価方法の検討

電力中央研究所 正会員 ○渡邊 保貴, 田中 幸久, 廣永 道彦

1. 目的

放射性廃棄物処分施設ではベントナイト系材料が使用される可能性があり, その透水係数を精度よく求めることが重要である. しかし, JIS A 1218: 2009¹⁾「土の透水試験方法」では, 10^{-9} m/s 以下の透水係数を直接測定するための方法が規格化されておらず, 我が国では, 透水係数 10^{-9} m/s 以下の土質材料を対象とした透水試験方法は定まっていない現状にあると言える. 透水性の低い材料を飽和させることは難しく, 不完全な飽和は透水性に影響を及ぼしうる. ASTM D5084²⁾では三軸試験装置を用いるため, B 値測定により透水前の飽和状態を評価できるが, JIS 規格では透水前の飽和状態を確認することはできない. そこで, 本研究では, JIS 規格のように剛性容器を用いた透水試験において, B 値に代わる飽和状態の評価方法を検討した.

2. 飽和度の推定方法

2.1 河野・西垣³⁾による飽和度の推定方法

JIS A 1218: 2009¹⁾の解説には, 剛性容器内の供試体の飽和状態を判断する方法の一つとして河野・西垣³⁾による方法が紹介されている. 供試体が不飽和であれば, 片面吸水条件下で背圧を増加させた際に空隙に水が浸入する. ある間隙圧から背圧 ΔP を作用させた時の吸水量 ΔV を計測することにより, 式(1-1)または式(1-2)を用いて背圧作用直前の供試体の飽和度が推定される. ただし, 式(1-1)または式(1-2)の誘導においてメニスカスの影響は無視するとともに, チューブの膨らみなどのシステムコンプライアンスも無視する.

$$S_r = \frac{1}{1-H} - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_v} \quad (1-1), \quad S_r = 1 - \frac{P_0 \cdot \Delta V}{\Delta P \cdot V_v} \quad (1-2)$$

ここに, S_r は飽和度, P_0 は初期間隙圧(絶対圧力), V_v は空隙の体積[m³], H はある温度下における空気の溶解度に相当するパラメータである. P_0 は大気圧あるいは間隙水压にほぼ等しいと考えられるが, 本研究では背圧を 0→50→100kPa と漸増する過程で一つ前段階の背圧が間隙圧に相当すると考えた. また, 本研究では, 後述する B 値の計算式において H は考慮されていないことにより, $H=0$ とした式(1-2)を用いた.

2.2 推定した飽和度の B 値への換算方法

2.1 節の方法を用いる場合, 飽和度 100%以外のときは, 飽和とみなせる閾値がないために飽和判定が曖昧になることが予想される. ASTM²⁾では, $B \geq 0.95$ で供試体は十分に飽和しているとみなしていることから, 式(1-2)で求めた飽和度と B 値を関連付けることで飽和の判断基準 $B \geq 0.95$ を準用することにする. 式(1-2)の誘導の場合と同様にメニスカスの影響ならびに間隙水压測定経路の変形量, メンブレンペネトレーションなどのシステムコンプライアンスは無視するとともに, $H=0$ と仮定すると B 値と飽和度の関係は式(2)となる^{4), 5)}.

$$B = \frac{1}{1+n \left\{ P_a \cdot S_r \cdot \frac{K_s}{K_w} + (1-S_r) \cdot K_s \right\} / P_a} \quad (2), \quad S_r = 1 - \frac{(1-B) \cdot P_a}{n \cdot B \cdot K_s} \quad (3), \quad K_s = \frac{E}{3(1-2\nu)} \quad (4)$$

ここに, n は間隙率, P_a は水の絶対圧力[kPa], K_s はベントナイトの構造の体積弾性係数[kPa], K_w は水の体積弾性係数[kPa]である. K_w が K_s に比べて十分に大きいとすれば, $K_s/K_w=0$ とみなせるので, 式(3)により飽和度と B 値の関係が得られる. 体積弾性係数 K_s は平均有効主応力 σ'_m と体積ひずみ ε_v の各増分から式(4)で求めた. E はヤング率, ν はポアソン比である. ケイ砂 30%混合クニゲル V1 の飽和度 90%付近の変形係数 $E_{50}=2.9 \sim 3.6$ MPa⁶⁾を参考にヤング率を 2~4MPa と仮定し, 文献⁷⁾の飽和状態におけるケイ砂 30%混合クニゲル

キーワード ベントナイト, 透水, 飽和度, B 値, 体積弾性係数

連絡先 〒270-0021 千葉県我孫子市我孫子 1646 TEL 04-7182-1181

V1の動的ポアソン比を参考に ν は0.3とした。また、パラメータ設定上の不確実性も考慮し、ここでの検討では以下二通りの方法も用いた。圧縮指数 C_c を用いて土骨格の圧縮率を求めると式(5)になる⁸⁾。

$$K_s \cong \frac{2.3(1+e)}{C_c} p'_0 \quad (5) \quad , \quad K_s \cong \frac{2.3(1+e_m)}{C_{swell}} P_s \quad (6)$$

ここに、 e は間隙比、 p'_0 は平均有効主応力である。 C_c は文献⁹⁾を参考に0.5~0.7とした。また、ある有効モンモリロナイト間隙比 e_m のベントナイトの平衡膨潤圧 P_s を圧縮圧力とみなすと、 $e \sim \log p'$ 関係と $e_m \sim \log P_s$ 関係は統一的に解釈することができるため、膨潤圧試験の結果(図-1)¹⁰⁾を用いて K_s を式(6)により求めた。平均有効応力は平衡膨潤圧に等しいとし、膨潤圧試験の結果における $e_m \sim \log P_s$ の傾き $C_{swell}=0.98$ とした。

3. 飽和度推定方法の透水試験への適用

Ca型ベントナイト(クニボンド)および三沢産砂を用いて透水試験を実施し、2章に示した飽和状態の評価方法を適用した(図-2, 図-3)。クニボンド単体の場合、式(3)~(6)による $B=0.95$ に相当する飽和度は99.56~99.76%の範囲となり(表-1)、異なる方法で体積弾性係数を与えても飽和度にほとんど差はなかった。図-2において式(1-2)で得られた飽和度99.9%は、 $B \geq 0.95$ を満足する飽和度であり、背圧を変化させた時に透水係数は増加しなかったことから供試体は飽和していたと判断できる。力学物性値の設定や飽和度が低い条件に関しては課題が残るが、式(3)~(6)を用いることで飽和状態を定量的に評価できるものと考えられる。

参考文献 1) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説(二冊分の一)、土の透水試験方法(JIS A 1218:2009), 2009. 2) ASTM: D5084-10. 3) 河野伊一郎, 西垣誠：室内透水試験法に関する2, 3の考察, 土質工学会論文報告集, Vol. 22, No. 4, pp. 181-190, 1982. 4) 土質工学会：土質試験の方法と解説, 1990. 5) Lade, P. V. and Hernandez, S. B.: Membrane penetration effects in undrained tests, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, Proc. of the ASCE*, Vol. 103, No. GT2, pp. 109-125, 1977. 6) 高治一彦, 鈴木英明：緩衝材の静的力学特性, JNC TN8400 99-041, 1999. 7) 高治一彦, 谷口航：緩衝材の動的力学特性, JNC TN8400 99-042, 1999. 8) 並河努, 菅野毅：緩衝材のせん断特性 1, PNC TN8410 97-074, 1997. 9) 畔柳幹雄, 岡本道孝, 小林一三, 笹倉剛：ベントナイト系難透水性材料の透水・圧密試験時間短縮の試み, 土木学会第58回年次学術講演会, CD-ROM, 2003. 10) 田中幸久, 中村邦彦：海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響とその評価, 土木学会論文集, No. 806, III-37, pp. 93-111, 2005.

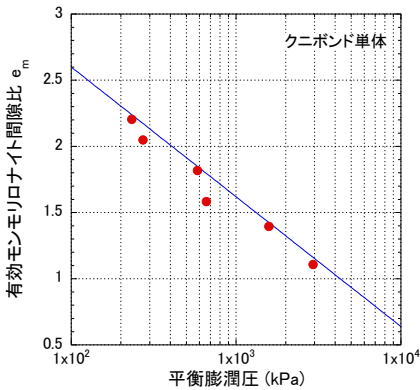


図-1 平衡膨潤圧と有効モンモリロナイト間隙比の関係

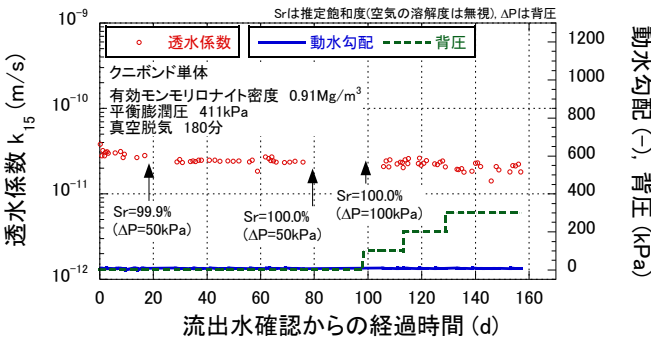


図-2 クニボンド単体の透水試験結果

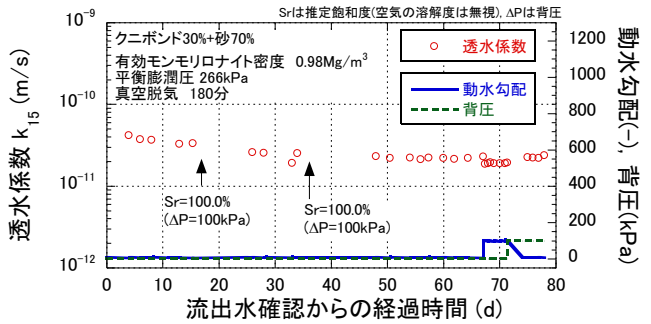


図-3 クニボンド 30%混合土の透水試験結果

表-1 B=0.95 に相当する飽和度の計算結果

計算条件				B=0.95 に相当 する飽和度(%)
パラメータ		供試体の作製条件		
ヤング率 E (MPa)	E=2	クニボンド単体	n=0.64	99.26
		クニボンド 30%	n=0.35	98.65
	E=3	クニボンド単体	n=0.64	99.51
		クニボンド 30%	n=0.35	99.10
	E=4	クニボンド単体	n=0.64	99.63
		クニボンド 30%	n=0.35	99.32
圧縮指数 C _c	C _c =0.5	クニボンド単体	e=1.78	99.76
		クニボンド 30%	e=1.81	99.20
	C _c =0.6	クニボンド単体	e=1.78	99.71
		クニボンド 30%	e=1.81	99.04
	C _c =0.7	クニボンド単体	e=1.78	99.66
		クニボンド 30%	e=1.81	98.88
e _m ~logP _s の傾き	0.98	クニボンド単体	e _m =2.02	99.56
		クニボンド 30%	e _m =2.04	99.21