

第Ⅲ部門

初期応力状態の違いに注目した締固めベントナイトの一次元膨潤挙動シミュレーション

神戸大学工学部市民工学科 学生員 ○塚田 健人
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 橘 伸也
 神戸大学大学院工学研究科 正会員 竹山 智英
 神戸大学都市安全研究センター 正会員 飯塚 敦

1. はじめに

地層処分に用いられるベントナイト系緩衝材は、緩衝材と周辺岩盤の間に生じうる隙間を自己の膨潤特性を発揮することによって充填することが期待されている。一方、地下水の再冠水の過程においては、隙間を流れる地下水によって緩衝材が浸食され、流出することも懸念される。したがって、緩衝材の自己シーリングに対する健全性の評価には、膨潤特性と浸食特性の両方の把握と考慮が求められる。

本研究では、モールド中に突き固めたベントナイト緩衝材に対して実施する浸食・流出試験の予備的検討として、不飽和ベントナイト緩衝材の一次元膨潤挙動シミュレーションを実施する。流速のない浸水条件での緩衝材の膨潤挙動を解析することが目的である。一般に、モールド中に突き固められたベントナイト緩衝材の側圧は未知である。そのため、用いる解析モデルが、浸水開始時の初期側圧の大きさに応じて、その後の膨潤挙動をどのように予測するかを解析的に調べた。

2. 解析概要

モールド中に締固められたベントナイト緩衝材を水に沈め、300日経過させる水浸試験を、土/水連成有限要素プログラム DACSAR-1¹⁾を用いてシミュレーションした。想定する緩衝材は、ケイ砂混合率 30%の混合ベントナイトである。解析では、モールド内（高さ 127mm、直径 100mm）のベントナイト緩衝材を、高さ方向に均等に 60 要素分割した有限要素モデルを用いた。解析領域は供試体高さ方向の一断面とする。境界条件は、供試体上端面を排水境界とし、そのほかの面をすべて非排水境界とする。また、供試体下端面に位置する節点以外は軸方向の変位が許される。供試体の初期状態は、均一・一様と仮定した。本解析では、初期側圧の影響を調べることが目的とし、表 1 に示すように、3通りの初期側圧を

設定した。ケース 1 は初期に等方応力状態、ケース 2、3 は異方応力状態である。いずれも初期の軸圧、サクシオン応力は同じであると仮定した。ケース 3 の側圧は、初期応力状態が降伏曲面上に位置するように定めた。ケース 2 はケース 1 とケース 3 の中間の側圧が作用する状態を設定した。

材料の構成モデルは伊藤²⁾による弾塑性構成モデルを用いている。透水係数モデルのパラメータは、Börgesson³⁾による透水係数モデルを採用した。解析に用いたパラメータを表 2 にまとめる。

表 1 各解析ケースの初期条件

case	乾燥密度 (Mg/m ³)	含水比 (%)	飽和度 (%)	軸圧 (MPa)	側圧 (MPa)	サクシオン 応力(MPa)
1	2.0	10	0.74	0	0	1.54
2	2.0	10	0.74	0	4.5	1.54
3	2.0	10	0.74	0	9.0	1.54

表 2 解析パラメータ

圧縮指数	λ	0.14
飽和膨潤指数	$\bar{\kappa}$	0.028
限界状態パラメータ	$\bar{M}$	0.63
塑性膨潤パラメータ	ξ	0.45
有効ポアソン比	ν'	0.40
NCL の基準状態点	p_{ref}	0.84
	e_{ref}	0.64
初期間隙比	e_i	0.368
$e = e_i$ に対する透水係数	k_0	1.02e-08
間隙比依存性の程度 を表すパラメータ	λ_k	2.15
不飽和パラメータ	α	6.37
	θ	0.65
	1	2.23

3. 解析結果

各ケースの供試体高さの経時変化を図1に示す。各ケースの結果はほとんど重なっており、初期の側圧は、水浸におけるベントナイト緩衝材の膨潤量にほとんど影響しないことがわかる。

図2に、ベントナイト供試体中央の間隙比-平均有効応力-軸差応力の関係を示す。平均有効応力-軸差応力関係の図上における破線は、軸圧ゼロ・サクシオン応力1.54MPaを表す状態線であり、どのケースもこの破線の上に初期点が位置する。いずれのケースも、浸水に伴って間隙比が増加し、膨潤する傾向にある。紙面の都合上、位置による間隙比の時間変化は図示しないが、位置が同じであれば、どのケースも間隙比はほぼ同じスピードで増加する結果となり、このことが図1に示した供試体全体の膨潤量の時間的に変化に違いが見られないことに繋がる。一方、応力経路はケース後に異なる経路を辿る。初期の側圧がゼロであり平均有効応力が最も小さいケース1は、浸水初期に平均有効応力が増加し、その後、減少に転じる。ケース2とケース3では、平均有効応力はほぼ単調に減少する。また、ケース1では、軸差応力が一旦減少した後、増加するが、ケース2、3では、ほとんど増加する傾向にある。異なる経路を辿るものの、飽和化が進行すると、いずれのケースも同じ状態に収斂する解析結果が得られた。

4. 結論

初期の側圧を変えても、水浸時におけるベントナイト緩衝材の膨潤挙動に変化が見られないという結果が解析結果から得られた。供試体中央部での間隙比変化と有効応力経路を見ると、間隙比変化はケースによってほとんど違いはないが、有効応力経路は初期応力状態に応じて異なる。ただし、一次元膨潤における飽和化が進むと、異なる初期状態であっても、同じ状態に収斂する解析結果となった。

参考文献：

- 1) Takeyama et al.: Int. J. Mater. Science and Eng., 2 (1), 20-25, 2015.
- 2) 伊藤真司：膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質評価への適用，博士論文2020.
- 3) Börjesson, L. et al.: Modelling of the physical behavior of water saturated clay barriers. SKB, 1995.

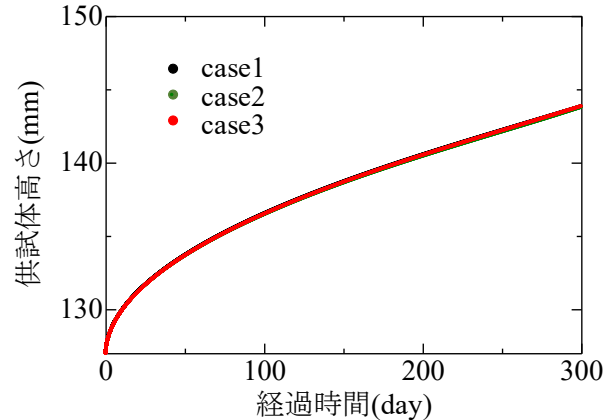


図1 供試体高さの経時変化

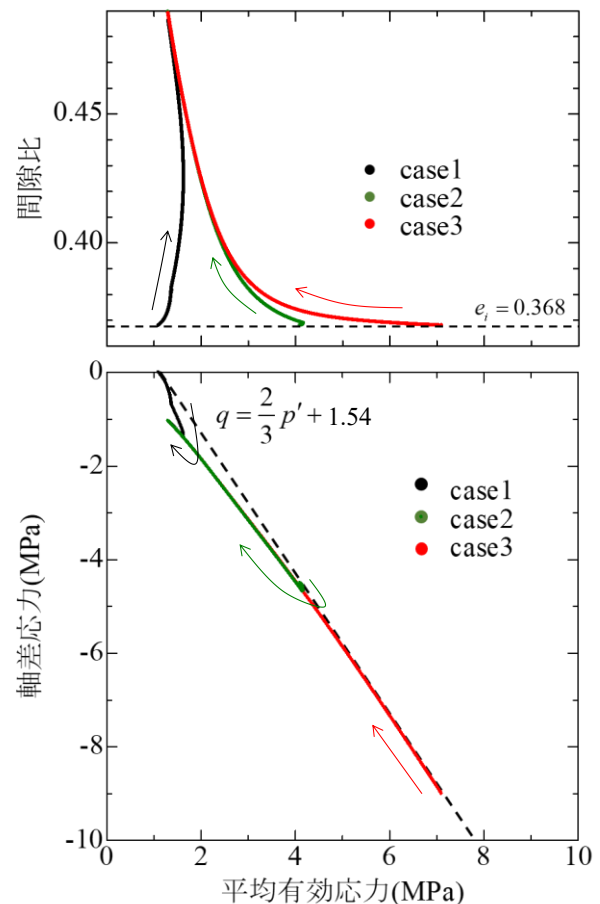


図2 供試体中央の間隙比・軸差応力・
平均有効応力の変化