

第2次取りまとめにおける地層処分の工学技術的検討（その4）

—ニアフィールドの力学的長期安定性評価—

核燃料サイクル開発機構 正会員 高治一彦・杉野弘幸

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分場地下施設の建設時には、坑道の掘削にともなって岩盤に応力再分配が起こる。また、オーバーバックおよび緩衝材の定置後から、緩衝材内へ水が浸潤することにより膨潤応力が発生し、さらに、オーバーバックの自重による沈下、腐食膨張、岩盤のクリープ変形等が相互に作用することにより、緩衝材や坑道周辺岩盤の応力状態が経時的に変化することが予想される。これらの応力状態の変化が緩衝材、岩盤に与える影響を確認することは、安全評価上重要であることから、経時変化や相互作用の程度を把握するために解析を行い、長期構造力学安定性を検討、評価した。

まず、岩盤の構成モデルとして、長期にわたる粘性的挙動を表現できる、大久保らにより提案されたコンプライアンス可変型モデル¹⁾を用い、岩盤のクリープ変形による力学的な経時変化挙動を検討した。次に、緩衝材の構成モデルとして、修正 Cam-Clay モデル²⁾を用い、岩盤クリープ解析で得られたクリープ変形挙動およびオーバーバックの腐食膨張変形を与えたときのニアフィールドの力学的挙動を検討した。最後に、緩衝材の構成モデルとして、関口・太田により提案された弾粘塑性モデル（関口-太田モデル³⁾）を用い、オーバーバックの自重による沈下挙動を検討した。以上、3つのケースの解析条件の一覧を表1に示す。

2. 岩盤クリープ解析

本解析は、処分坑道横置き方式硬岩系、軟岩系岩盤を対象に行った。人工バリアの設置後、0 秒～10,000 年における絶対変位量およびクリープによる変位量を表2に示す。表中、上段の値は絶対変位量、下段の（）内の値はクリープによる変位量を示す。表より、硬岩系岩盤では、空洞掘削時の弾性変形は約 1.5mm であり、10,000 年経過してもクリープ変形量は発生しなかった。また、応力分布にも経時的な変化は見られず、影響領域（ここでは、コンプライアンスが 1 以上となる領域と定義する）も確認されなかった。軟岩系岩盤では、空洞掘削時の弾性変形は天端で約 7.8mm、側壁で約 9.0mm であった。クリープ変形は年々増加し、10,000 年後では天端で約 21.8mm、側壁で約 15.9mm であった。また、年数を経るごとに周辺岩盤のコンプライアンスが増大（剛性が低下）することにより影響領域が広がり、10,000 年後における影響領域は、半径の 3 倍弱まで広がる結果となった。

3. オーバーバック腐食膨張解析

本解析は、オーバーバックが腐食速度 0.04mm y^{-1} で全量腐食し、腐食生成物は相似形に体積の 3 倍膨張すると仮定し、また緩衝材外周から上記で得られた岩盤クリープ変形を与えることにより、硬岩系、軟岩系岩盤想定ケースを対象に行った。緩衝材の仕様は、ベントナイトにケイ砂を乾燥重量比で 30%混合した乾燥密度 1.6 Mg m^{-3} の材料とし、解析に必要なパラメータは、室内試験結果により設定した。図1に、軸対称モデルにより隅角部をモデル化した硬岩系岩盤想定ケースのオーバーバック胴部中心直下とオーバーバック隅角部、および2次元平面ひずみモデルで検討した軟岩系岩盤想定ケースのオーバーバック直下の緩衝材の応力経路を示す。緩衝材外周が排水条件であるため、岩盤クリープおよび腐食膨張の発生とともに平均有効応力、せん断応力ともに増加しているのがわかる。硬岩系岩盤では、オーバーバック胴部中心部直下および隅角部で平均有効応力、せん断応力の大きさは異なっているが、増加経路としてはともに破壊状態を示す限界状態線（C.S.L.； $M=0.63$ ）に沿いながら大きくなっている。10,000 年後の緩衝材の応力比の最大値は、硬岩系岩盤で 0.60、軟岩系岩盤で 0.49 となった。ただし、ここでは図示していないが、硬岩系岩盤では $M=0.55$ を超える領域は緩衝材厚さ 700mm に対し、オーバーバック近傍 100mm 程度の限られた部分であった。

4. オーバーパック沈下解析

本解析は、処分孔縦置き方式、処分坑道横置き方式を対象に行った。緩衝材仕様は腐食膨張解析と同様で、解析に必要なパラメータは、室内試験結果により設定した。オーバーパック中心位置でのそれぞれの沈下量の経時変化を図 2 に示す。縦置き方式では、自重载荷直後に 1.0mm 程度、横置き方式では 0.3mm 程度の瞬時沈下が生じており、また、10,000 年経過時の沈下量は、縦置き方式では 5.1mm 程度、横置き方式では 2.6mm 程度となった。また、図にはオーバーパック直下の過剰間隙水圧の経時変化も併せて示している。縦置き方式では、約 1 年で過剰間隙水圧が最大値（約 27kPa）に達し、約 100 年で消散している。横置き方式では、载荷直後に最大値（約 15kPa）に達し、約 10 年で消散している。縦置き方式は軸対称モデルで検討したため、平面ひずみモデルで検討した横置き方式に比べて緩衝材の体積が大きく、緩衝材内部で間隙水圧の再配分と消散が交互に生じたため、過剰間隙水圧の消散が遅れたものと考えられ、過剰間隙水圧については縦置き方式の挙動の方が実現象的であると思われる。ただし、過剰間隙水圧の上昇は、オーバーパック直下に限られており、また、静水圧と比べると、非常に小さい値であるといえる。

5. おわりに

静的な外力が作用すると予想される 3つの現象に対し、力学的長期安定性について評価を行った。その結果、今回考慮した現象の範囲内では、人工バリアおよび周辺岩盤は、長期にわたって大きく安定性が損なわれる状態には至らないことが確認された。今後、複合現象としてのモデル化についてのさらに詳細な検討や岩盤および緩衝材の長期データ、高温環境下のデータ等を蓄積し、室内模擬試験や工学規模試験等による検証を行い、モデルの高度化を図る必要がある。

参考文献 1) 大久保誠介, 金豊年：非線形粘弾性モデルによる円形坑道周辺岩盤挙動のシミュレーション, 資源と素材, Vol.109, p.209-214, 1993, 2) Roscoe,K.H. and Burland,J.B.：On the generalized stress-strain behavior of ‘wet’ clay, Engineering Plasticity, Cambridge University Press, pp.535-609, 1968, 3) Sekiguchi, H. and Ohta, H.：Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equations of Soils, Proc. Specialty Session 9, 9th ICSMFE, Tokyo, pp.306-315, 1977

表 1 解析条件一覧

解析現象		①岩盤クリープ解析		②オーバーパック 腐食膨張解析	③オーバーパック 沈下解析
評価指標		岩盤のクリープ変形量、応力状態の経時変化等		緩衝材の応力状態、過剰間隙水圧の経時変化等	オーバーパック沈下量、緩衝材の応力状態、過剰間隙水圧の経時変化等
対象岩種		硬岩系岩盤 軟岩系岩盤		硬岩系岩盤 想定	軟岩系岩盤 想定
モデル化 および 構成 モデル	岩盤	コンプライアンス 可変型モデル		—	
	緩衝材	弾性体		弾塑性体 (修正 Cam-Clay モデル)	
	オーバー パック	—		弾塑性体 (温度ひずみ考慮)	
解析コード		上記モデルを組み込んだ専用 FEM コード		ABAQUS	
解析次元		2次元平面ひずみ		軸対称 2次元 平面ひずみ	横置き方式：2次元 縦置き方式：軸対称
評価期間		10,000年			
備考		岩盤クリープ変形を①の解析結果より設定、自重は考慮しない			

表 2 絶対変位量およびクリープによる変位量

時間 [年]	硬岩系岩盤		軟岩系岩盤	
	天端 [mm]	側壁 [mm]	天端 [mm]	側壁 [mm]
0	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	7.77 (0.00)	8.95 (0.00)
1	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	13.7 (5.89)	13.8 (4.87)
10	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	15.9 (8.10)	15.4 (6.49)
100	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	18.9 (11.1)	17.6 (8.65)
1,000	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	23.2 (15.4)	20.5 (11.6)
10,000	1.50 (0.00)	1.50 (0.00)	29.6 (21.8)	24.9 (15.9)

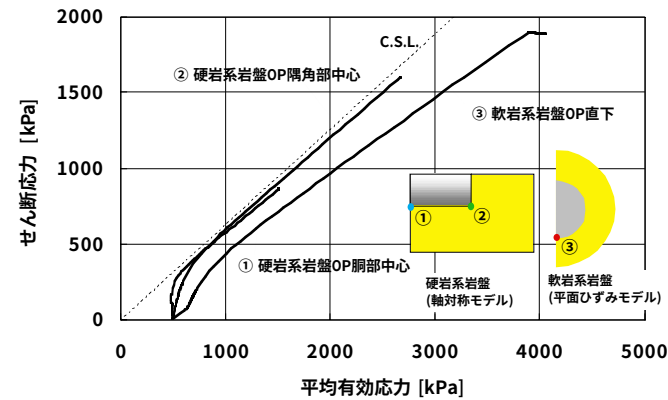


図 1 オーバーパックの腐食膨張による緩衝材の応力経路

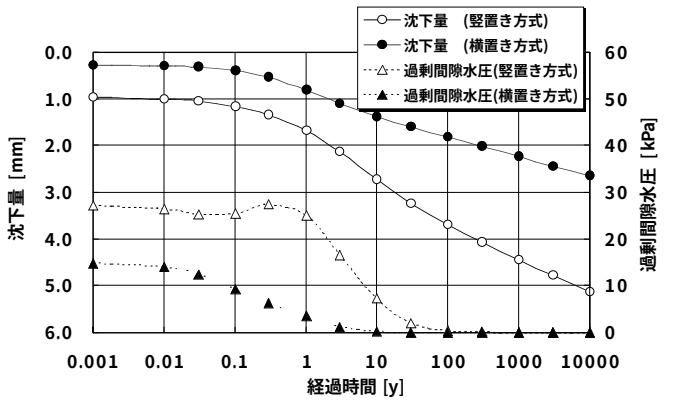


図 2 オーバーパック沈下量、過剰間隙水圧と時間の関係