

トンネル型処分施設における人工バリアの長期力学挙動解析

(株)大林組 正会員 山本 修一, ○佐藤 伸, 武内 邦文
日本原燃(株) 非会員 佐々木 規行

1. はじめに

トンネル型処分施設の安全評価に用いる人工バリア性能の検討の一環として、周辺岩盤を含む人工バリアシステムの長期力学解析評価を実施した。本検討では、長期に影響を及ぼす重要な力学要因として、廃棄体容器の腐食膨張、ベントナイトの膨潤変形、セメント系材料の劣化、岩盤のクリープ及び自重を考慮し、廃棄体、人工バリア、埋戻し、岩盤の相互影響を直接的に考慮する全体モデルによる連続体解析（非線形解析）を行った。解析では3万年間を対象に、これらの力学要因とその時間的変化を段階的に考慮した。

2. 解析条件

本解析では汎用非線形有限要素法プログラムABAQUS¹⁾を用いて、図-1 に示す解析モデルによる非線形解析を行った。形状と力学的な対称性を考慮して半断面モデルとし、空洞周辺岩盤の影響を考慮するため岩盤を上下、側方にそれぞれ空洞直径程度含めた領域を解析対象とした。

本検討で考慮した力学要因・特性を表-1 に示す。岩盤のクリープは大久保ら²⁾によるコンプライアンス（＝ひずみ/応力）が時間と共に増加するコンプライアンス可変型モデルを用いた。人工バリア内のコンクリートピット、廃棄体周りの充填モルタル及び低拡散層のコンクリート系部材は分散ひび割れモデル³⁾による材料非線形性を考慮した。ベントナイト系材料の構成モデルは、弾塑性理論に基づいた粘土系材料の代表的な構成式である修正Cam-Clayモデル⁴⁾を用いた。従って、膨潤に関しては、初期有効応力として与える膨潤圧と膨潤指数に応じた膨潤特性が表現される。廃棄体容器の腐食膨張は数値解析上、熱膨張として取り扱った。すなわち、腐食膨張と等価な熱膨張が起こるように線膨張係数と温度上昇量を与え模擬した。コンクリート系材料の変質特性については、溶脱解析により評価された溶脱速度（表-2）に応じて剛性と強度を岩盤側または低透水層側から逐次 1/10 に低下させることにより表現した。

時間軸としては、表-3 に示すとおり岩盤の掘削、支保の設置、岩盤クリープ、人工バリア・廃棄体・埋戻しの設置、ベントナイトの膨潤、セメント系材料の溶脱劣化、廃棄体容器の腐食膨張を適切な時期に考慮した。

キーワード トンネル型処分施設、長期力学的影響、コンクリートのひび割れ、化学的劣化、岩盤クリープ

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)大林組東京本社原子力環境技術部 TEL03-5769-1309

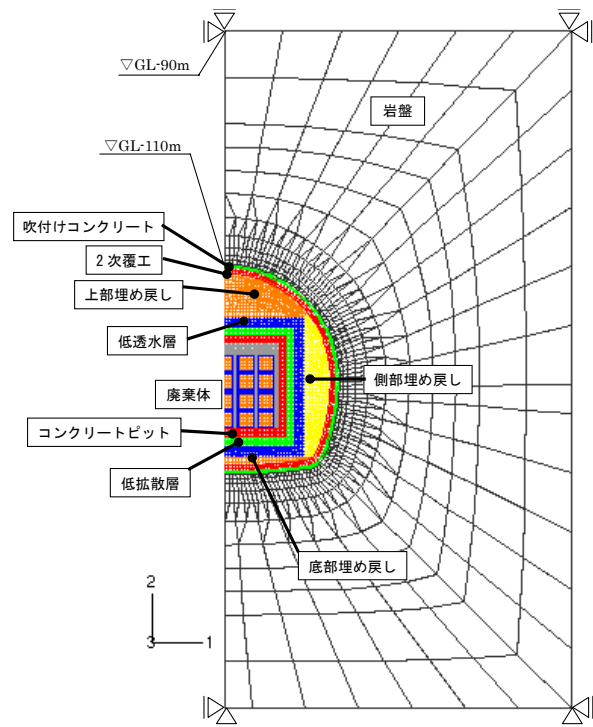


図-1 解析モデル

表-1 解析で考慮した力学要因・特性とモデル

特性	使用モデル
岩盤の変形・破壊・クリープ	大久保モデル ²⁾ 、Janach破壊条件
セメント系材料の変形・破壊	非線形（引張側は分散ひび割れモデル、圧縮側はひずみ硬化・軟化を考慮）
セメント系材料の劣化	ひずみ軟化（弾性係数、強度の低減） 溶脱速度(mm/y)：移流場 0.5 拡散場 0～0.1
ベントナイト系材料の変形・破壊	修正カム・クレイ
膨潤圧	膨潤指数に応じた膨潤、膨潤応力発現（最大 2MPa）
ベントナイト系材料の劣化	考慮せず
廃棄体腐食膨張	腐食速度 0.02μm/y、腐食部の体積は 3 倍に膨張

表-2 コンクリートの変質劣化特性

状態	溶脱速度（mm/y）
移流場	0.5
拡散場 （ベントナイトと接する材料）	0.1（t<1,000 年） 0.02（1,000 年<t<5,000 年） 0.013（5,000 年<t）

また、廃棄体容器厚さの影響を見るため、板厚 $t=50\text{mm}$ を基本とし、 100mm 、 150mm の3ケースを実施した。なお、廃棄体容器内の廃棄体や充填材の剛性は無視した。

3. 解析結果と考察

解析結果の一例として廃棄体容器の板厚が $t=50\text{mm}$ 、 $t=150\text{mm}$ のひび割れ図を図-2 に示し、板厚 $t=50\text{mm}$ の場合の低透水層の変形図を図-3 に示す。ひび割れは2000年を過ぎたあたりから充填モルタルに発生し始める。その後、廃棄体容器の板厚が $t=50\text{mm}$ の場合は1万年後付近で、板厚が $t=150\text{mm}$ の場合は5千年程度で低拡散層に貫通ひび割れが生じる。板厚 $t=150\text{mm}$ のケースのほうが、貫通ひび割れの発生する時間が早く3万年後のひび割れも顕著であることが分かる。これは、廃棄体容器の板厚が厚い場合、容器は変形しにくく腐食膨張を人工バリア側の変形やひび割れで吸収することになるが、容器の板厚が小さい場合、容器の変形が相対的に大きくなり、その分だけ人工バリアへの影響が少なくなることが原因と考えられる。3万年後には側部および底部の低拡散層には複数の貫通ひび割れが発生するが、ひび割れによる部材の伸び量の割合(伸び量/部材長さ)はいずれのケースも0.1%以下であった。これは、ひび割れ幅の割合も部材平均では0.1%以下であることを意味しており、低拡散層の極端な性能低下はないことが推定される。

一方、低透水層は飽和膨潤時(100年後)に上部中央で密度が最も小さくなるが、その変化量は乾燥密度で $0.01\text{g}/\text{cm}^3$ 以下と微小である。また、層厚が最も薄くなるのは3万年後の底部中央であるが、圧縮量は僅か7mm以下である。なお、低透水層には3万年後においても塑性的なひずみは発生していない。

4. おわりに

廃棄体容器の腐食膨張により、低拡散層にはひび割れが発生し時間と共に発達するが、3万年間に安全評価上問題となるような低拡散層の性能低下は起こらないこと、また、低透水層には塑性ひずみは発生せず、十分な厚みと密度が確保できることが示された。ただし、容器応力は局所的に降伏応力に達することがあり得るため、容器の陥没を否定できない。この場合、人工バリアの性能維持は困難となることが予想されることから容器の陥没については今後の課題である。

参考文献

- 1) Dassault Systemes Simulia Corp. : ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.5, 2004.
- 2) 大久保ら：非線形粘弾性モデルによる坑道変形のシミュレーション, 日本鉱業会誌, Vol. 103, pp. 293-296, 1987.
- 3) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第474号, pp. 163-170, 1995. 8
- 4) 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.

表-3 各事象と経過年数

事象	経過年
岩盤掘削, 吹付コンクリート, 2次覆工, 側部・底部埋戻し設置, 岩盤のクレーン開始, 吹付コンクリート溶脱開始	0
1年経過	
人工バリア(側部・上部ベントナイト, 上部埋戻し以外)設置及び自重載荷	1~10
10年経過	
上部・側部ベントナイト及び上部埋戻し設置 上部・側部底部埋戻し溶脱開始	20
80年経過	
ベントナイトの膨潤圧発生, 廃棄体腐食開始 (吹付コンクリート完全溶脱, 2次覆工溶脱開始) (底部埋戻し完全溶脱) (2次覆工完全溶脱) (側部埋戻し完全溶脱) (上部埋戻し完全溶脱) 以降も岩盤クレーン, 廃棄体腐食膨張継続	100 (600) (1294) (1600) (2910) (4464) ~30000

