

地層処分施設における 多連設坑道の設計手法に関する検討

平本 正行^{1*}・小林 保之¹・水谷 和彦²・森田 篤²

¹日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門（〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33）

²前田建設工業株式会社 土木技術部（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-26）

*E-mail: hiramoto.masayuki@jaea.go.jp

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設では、地下300m以深に多数の坑道を並列に配置（以下、多連設坑道）することが想定されている。これは、従来の土木構造物にはあまり例のない構造物であり、坑道の設計および建設ではこの特徴を十分勘案する必要がある。さらに、地層処分施設では、建設・作業中における坑道の力学的安定性を確保することに加え、閉鎖後の長期安全性評価のため、掘削に起因する岩盤の影響領域（EDZ）の力学的特性を適切に把握しておく必要がある。本検討では、一処分パネル規模の坑道群をモデル化した「多連設坑道モデル」を対象に解析的検討を実施し、EDZの発生挙動について考察した。

Key Words : high level radioactive waste repository, multi tunnels, excavation disturbed zone(EDZ)

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設は、地下300m以深に多数の坑道を並列に配置することが想定されている。施設を構成する坑道レイアウトの例を図-1に示すが、廃棄体を埋設する一つの処分パネルは、一般に数十本の坑道から構成されている。「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—」¹⁾（以下、第2次取りまとめ）（核燃料サイクル開発機構、1999）では、これらの坑道群に対する空洞安定性評価手法として、従来の双設トンネルの設計例を参考に、坑道間の局所的な破壊挙動に着目した設計が行われているが、処分パネル規模での掘削影響領域（Excavation Disturbed Zone, 以下 EDZ）の挙動に関し

ては十分に検討されておらず、青柳ら²⁾は、坑道群全体の構造安定に関わる破壊モードの検討の必要性を指摘している。EDZは、坑道の力学的安定性への影響に加え、施設の閉鎖後、放射性核種の移行経路へ進展することが懸念されるため、従来よりも精緻に予測評価し、設計に反映する必要がある。

そこで、多連設坑道の設計手法の詳細化を図ることを最終的な目的とし、本検討ではその一環として、一処分パネル規模の坑道群をモデル化した「多連設坑道モデル」（図-2）を対象に解析的検討を実施し、EDZの発生挙動について考察した。

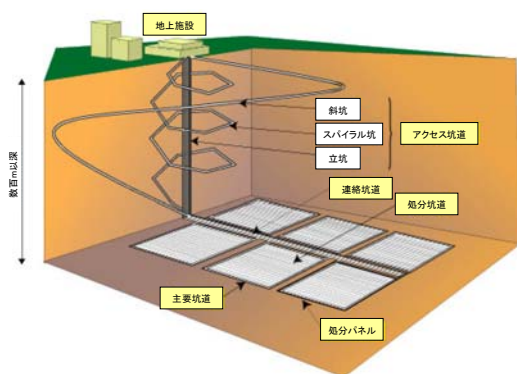


図-1 地層処分施設の基本概念

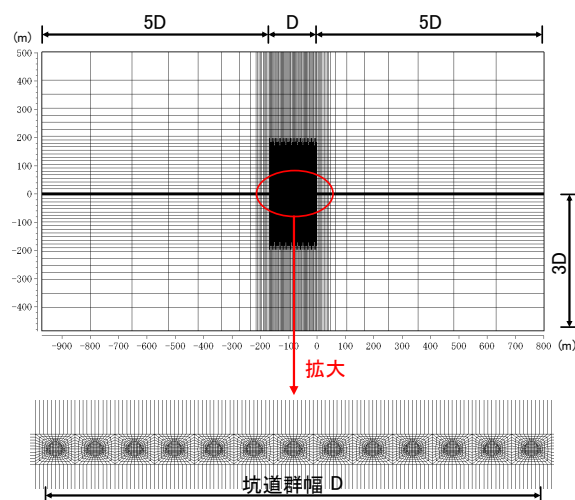


図-2 多連設坑道モデル

2. 検討方針

対象とする処分坑道のレイアウトは、第2次取りまとめの軟岩系岩盤（処分孔縦置き方式）とした。解析モデルの違いによる影響を把握するため、多連設坑道モデルに加え、第2次取りまとめの解析モデル（図-3）を地表面まで考慮したモデル（図-4）（以下、簡略化モデル）についても検討し、坑道群全体をモデル化した多連設坑道モデルと多連設坑道モデルの対称性を考慮し、坑道群の一部分をモデル化した簡略化モデルの両モデルにおいて、EDZの発生挙動を比較検討した。

ただし、EDZの発生挙動をより明確化するために、岩盤物性値は、第2次取りまとめの軟岩系岩盤データセット「SR-C」に対し、弾性係数（E）、粘着力（C）、内部摩擦角（ ϕ ）、引張強度（ σ_t ）を1/5と極端に低減させ、さらに支保工は考慮しないこととした。

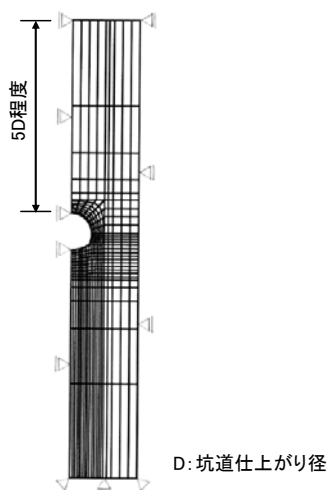


図-3 第2次取りまとめの解析モデル

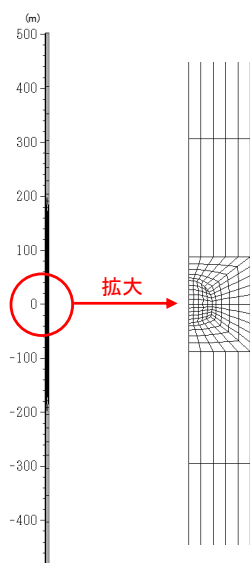


図-4 簡略化モデル

3. 解析条件

(1) モデル化

第2次取りまとめの解析モデル（図-3）は、坑道掘削の影響がないと考えられている5D程度（D：坑道仕上がり径）の範囲のみのモデル化であるため、このままでは広範囲にわたるEDZの発生挙動を把握できない。そこで第2次取りまとめの解析モデルを地表面まで考慮したモデルを「簡略化モデル」と称し、多連設坑道モデルの結果と比較した。多連設坑道モデルの解析領域は、解析結果に境界の影響が出ないように、坑道群幅Dに対して、左右に5D、下方に3Dを確保した。また、第2次取りまとめの軟岩系岩盤、縦置き方式のレイアウト例示には50本の坑道が示されているが、本検討では、解析コードにおける要素数の制約上、13本の坑道をモデル化した。

(2) 境界条件

境界条件は、両モデルともに表-1に示す通りとした。側面の境界条件は、変形の対称性を考慮し、水平方向固定、鉛直方向自由とした。

(3) 坑道仕様

坑道仕様は、表-2 および 図-5、6 に示す通りとした。なお、本検討では、処分坑道掘削時のEDZの発生挙動を対象としており、簡略化のため、処分孔はモデル化しないこととした。

表-1 境界条件

上面	水平方向自由，鉛直方向自由
側面	水平方向固定，鉛直方向自由
下面	水平方向自由，鉛直方向固定

表-2 坑道仕様

処分方式	処分孔縦置き方式
処分坑道の深度 h[m]	500
坑道仕上がり径 D[m]	5
坑道離間距離 [m]	13 (=2.6D)
支保工	考慮しない

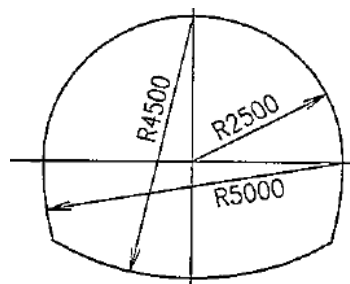


図-5 処分坑道の仕様（軟岩系岩盤）

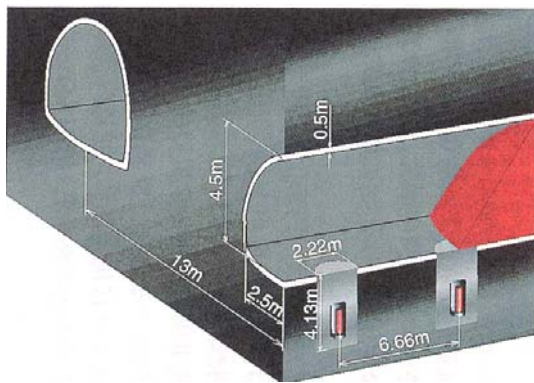


図-6 処分孔縦置き方式の仕様（軟岩系岩盤）

(4) 解析手法

解析手法は、両モデルともに 2 次元有限要素法（FEM）による弾塑性解析とし、岩盤は Mohr-Coulomb の破壊規準に従うものとした。解析コードは、前田建設工業㈱が開発した「FEM23」を使用した。

(5) 解析ステップ

STEP1は、両モデルともに自重解析により、初期地圧を各要素に付与した。STEP2以降は、多連設坑道モデルでは左側の坑道から順に13本の坑道を逐次掘削し、簡略化モデルでは1本の坑道を掘削した。掘削は全断面掘削とし、応力解放率100%とした。

(6) 岩盤物性値

EDZ の発生挙動をより明確化するために、岩盤物性値は、両モデルともに第 2 次取りまとめの軟岩系岩盤データセット「SR-C」に対し、 E 、 C 、 ϕ 、 σ_t を 1/5 と極端に低減させ、表-3 に示す通りとした。

表-3 岩盤物性値

飽和密度 ρ [Mgm^3]	2.20
一軸圧縮強度 q_u [MPa]	15
弾性係数 E [MPa]	3,500 $\rightarrow$ 700 (1/5 に低減)
ポアソン比 ν [-]	0.30
粘着力 C [MPa]	3.0 $\rightarrow$ 0.6 (1/5 に低減)
内部摩擦角 ϕ [$^\circ$]	28 $\rightarrow$ 5.6 (1/5 に低減)
引張強度 σ_t [MPa]	2.1 $\rightarrow$ 0.42 (1/5 に低減)
側圧係数 K_0 [-]	1.07 (164/h+0.74, h=500m)

4. 解析結果

本検討では、EDZに関連する指標として、鉛直変位量分布、安全率分布、塑性領域分布、最大せん断ひずみ分布に着目し、両モデルの比較検討を行った。

(1) 鉛直変位量分布

図-7に鉛直変位量分布を示す。ここでの鉛直変位量は、各節点における鉛直方向の変位量である。なお、多連設坑道モデルにおいては、13本の坑道を全て完了した状態である。

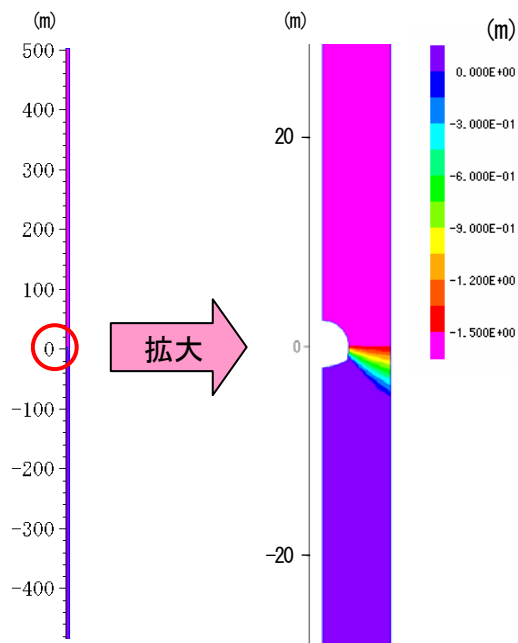


図-7(a) 簡略化モデル

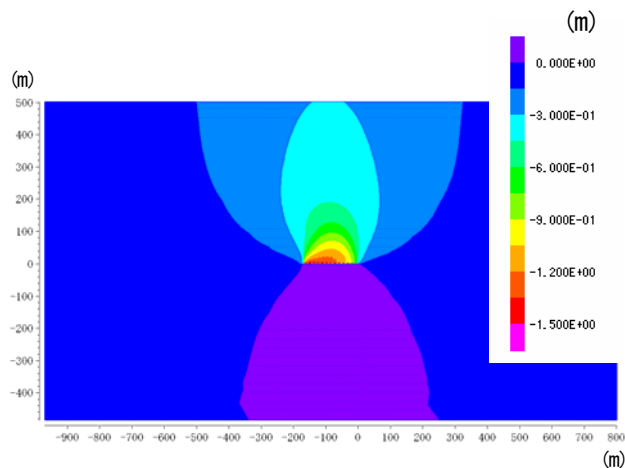


図-7(b) 多連設坑道モデル

図-7 鉛直変位量分布

図-7(a)に示す簡略化モデルでは、坑道天端から地表面まで同程度の変位量が生じている。この現象を本検討では共下がりと呼ぶこととするが、その値は多連設坑道モデルに比べて大きい。一方、図-7(b)に示す多連設坑道モデルでは、坑道群の上部に対して山状に鉛直変位量が分布し、その値は坑道付近で大きく、地表面では小さい傾向にある。

(2) 安全率分布

図-8に安全率分布を示す。ここでの安全率は、Mohr-Coulombの破壊規準に対する破壊接近度であり、各要素の応力から算出されたものである。なお、本解析は弾塑性解析であるため、安全率が1を下回ることはない。

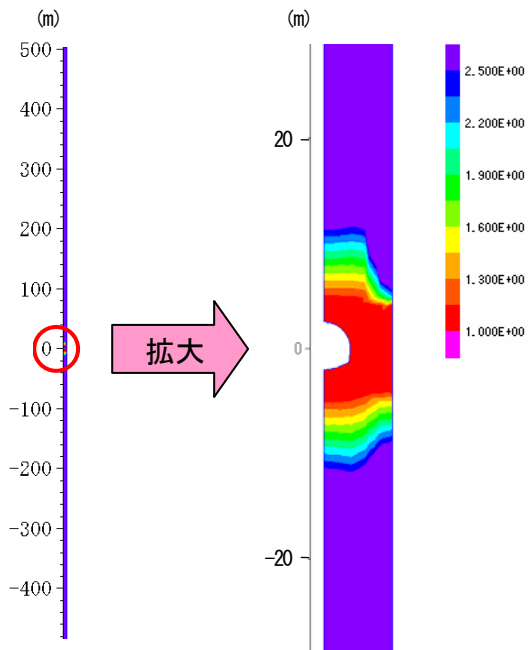


図-8(a) 簡略化モデル

(3) 塑性領域分布

図-9に塑性領域分布を示す。ここでの塑性領域は、Mohr-Coulombの破壊規準に抵触し、安全率が1に達した領域であり、本質的には安全率分布と同様の意味を持つ。

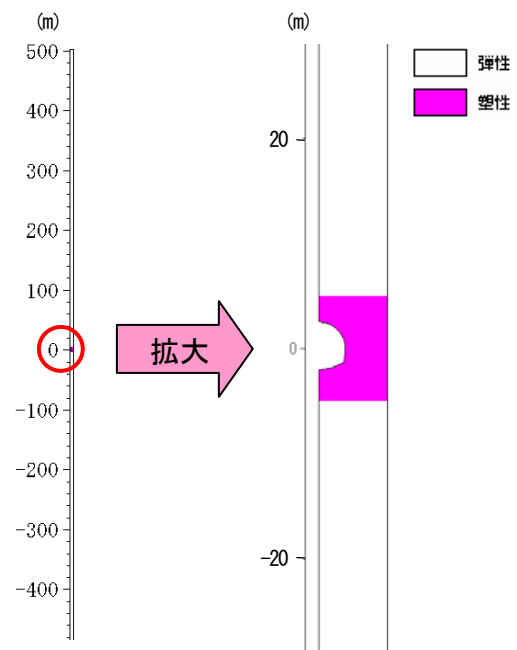


図-9(a) 簡略化モデル

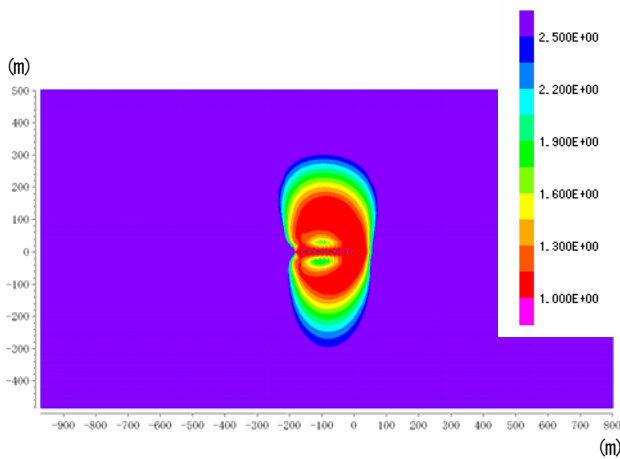


図-8(b) 多連設坑道モデル

図-8 安全率分布

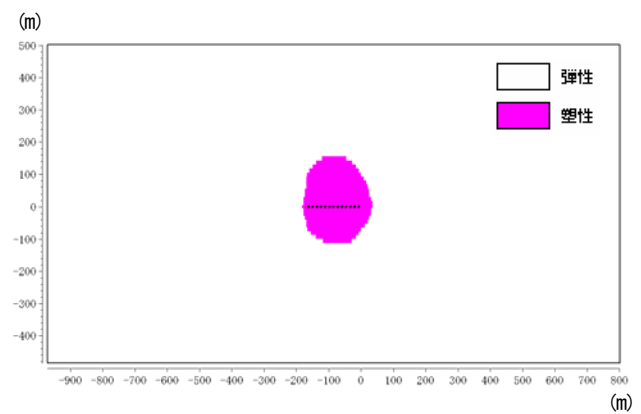


図-9(b) 多連設坑道モデル

図-9 塑性領域分布

図-8(a)に示す簡略化モデルでは、坑道周辺にのみ安全率の小さい領域が見られる。これは、地山が共下がりすることにより、地山内にせん断モードが生じにくいと考えられる。一方、図-8(b)に示す多連設坑道モデルでは、安全率が小さく破壊に近い領域が広範囲に広がる傾向にある。

安全率分布と同様、簡略化モデルに比べ、多連設坑道モデルの方が塑性領域が広範囲に広がる傾向にある。

(4) 最大せん断ひずみ分布

図-10に最大せん断ひずみ分布を示す。ここでの最大せん断ひずみは、最大主ひずみと最小主ひずみの差である。

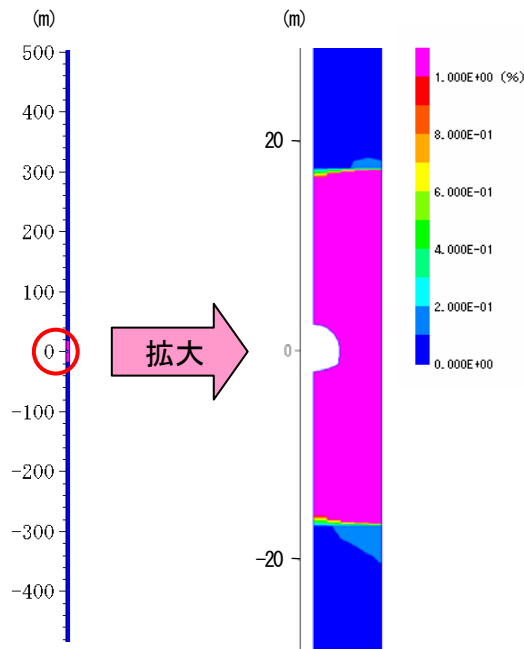


図-10(a) 簡略化モデル

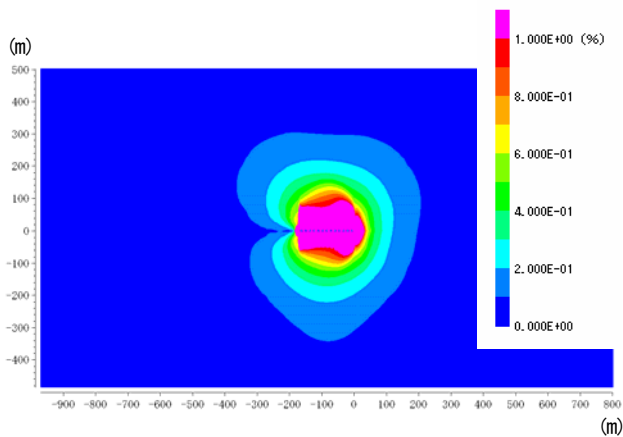


図-10(b) 多連設坑道モデル

図-10 最大せん断ひずみ分布

図-10(a)に示す簡略化モデルでは、坑道周辺にのみ最大せん断ひずみの大きな領域が見られる。これは、地山が共下がりすることにより、地山内にせん断モードが生じにくいと考えられる。一方、図-10(b)に示す多連設坑道モデルでは、最大せん断ひずみが大きく破壊に近い領域が広範囲に広がる傾向にある。

5. EDZ の発生挙動に関する考察

以下に、簡略化モデルと多連設坑道モデルにおけるEDZの発生挙動の違いについて考察する。

図-11(a)に示す簡略化モデルは、坑道の離間距離の関係から、坑道径に対して解析領域の幅が小さいため、坑道を掘削すると側面の境界条件（鉛直方向自由）の影響を受けやすい。よって、坑道を掘削すると坑道上部の地山が共下がりし、地山内にせん断モードが生じにくい。その結果、多連設坑道モデルよりも(1)鉛直変位量を大きく評価し、(2)安全率の小さな領域、(3)塑性領域、(4)最大せん断ひずみの大きな領域を小さく評価する。

一方、図-11(b)に示す多連設坑道モデルは、広い解析領域の中に有限個の坑道をモデル化しているため、坑道を掘削しても側面の境界条件（鉛直方向自由）の影響を受けにくい。よって、坑道を掘削すると、掘削部分と未掘削部分との間にせん断モードが生じる。つまり、EDZの発生挙動は、解析領域の取り方が影響する。

本検討ではEDZの発生挙動をより明確化するために、岩盤物性値を1/5と極端に低減させたが、低減しないケースの解析結果においても、簡略化モデルの鉛直変位は変位量としては小さいが、共下がりが生じた。また、簡略化モデルの安全率、塑性領域、最大せん断ひずみの分布は、多連設坑道モデルの分布と差異は小さく、両モデルともにEDZが広範囲に広がらないことを確認した。

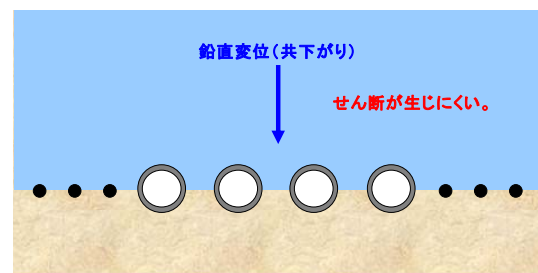


図-11(a) 簡略化モデル

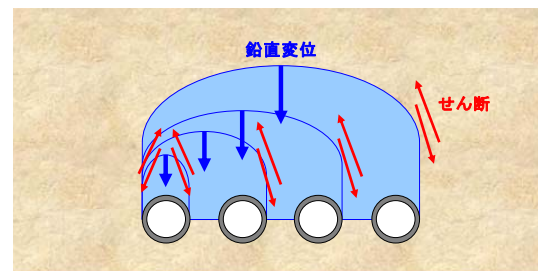


図-11(b) 多連設坑道モデル

図-11 EDZ の発生挙動の模式図

表-4 簡略化モデルと多連設坑道モデルの比較

	簡略化 モデル	多連設坑道 モデル
(1)鉛直変位量	岩盤物性値に関係なく共下がりが生じ、多連設坑道モデルに比べ大きく評価する.	解析領域の影響を反映した適切な評価ができる.
(2)安全率の小さな領域	岩盤物性値によっては、多連設坑道モデルに比べ小さく評価する可能性がある.	
(3)塑性領域		
(4)最大せん断ひずみの大きな領域		

6. まとめと今後の課題

多連設坑道の設計手法の詳細化を図ることを最終的な目的とし、本検討ではその一環として、一処分パネル規

模の坑道群をモデル化した「多連設坑道モデル」を対象に解析的検討を実施し、EDZ の発生挙動について考察した。解析モデルの違いによる影響を把握するため、第2次取りまとめの解析モデルを地表面まで考慮した「簡略化モデル」についても検討した。その結果、両モデルは、EDZ の発生挙動が大きく異なることから、EDZ の発生挙動を正確に予測評価するには、多連設坑道モデルを用いて解析領域を十分確保することが重要であると考ええる。

ただし、今回の検討は、岩盤物性値を低減しかつ支保工を考慮しない条件での検討であるため、実際の処分環境を模擬した解析ではなく、地層処分施設の成立性を示したものではない。

今後の課題としては、支保工 および 補助工法によるEDZ の抑制効果の検討などが挙げられる。最終的には支保工の仕様や坑道離間距離などの合理的な設計手法を構築していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 地層処分の工学技術，pp.IV216-IV246, IV311, 1999.
- 2) 青柳茂男，藤田朝雄，新孝一，大久保誠介，西村和夫：多連設坑道の設計の考え方に関する検討，土木学会第61回年次学術講演会，CS05-035, 2006.

A STUDY ON THE DESIGN METHOD OF MULTI TUNNELS IN GEOLOGICAL DISPOSAL FACILITY

Masayuki HIRAMOTO, Yasushi KOBAYASHI, Kazuhiko MIZUTANI
and Atsushi MORITA

In the geological disposal facility of the high-level radioactive waste, a group of galleries is designed in parallel at the depth of more than 300m below surface. This is an unprecedented structure in the field of conventional engineering, and it is necessary to take this characteristic into consideration in the design of the galleries. In the geological disposal facility, as well as ensuring the dynamic stability of the gallery during construction and operational periods, it is necessary to evaluate the EDZ adequately for long-term stability after the closure. In this study, analysis of the "multi tunnels model" which represents the whole gallery group was performed and the results about the outbreak behavior of EDZ were summarized.