

地層処分における地下空洞の 力学的安定性評価

亀岡 慎也¹ 道廣 一利² 吉岡 尚也³

¹ 学生会員 摂南大学大学院 工学研究科 (〒572-8508 寝屋川市池田中町 17-8)

E-mail: 05m203ks@edu.setsunan.ac.jp

² 正会員 摂南大学 工学部 (〒572-8508 寝屋川市池田中町 17-8)

³ 正会員 大阪工業大学短期大学部 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

高レベル放射性廃棄物は、花崗岩と泥岩を対象に地層処分する事が考えられており、日本にも対象となる岩盤は多く分布している。そして、活断層、隆起・侵食、火山活動等の地質学的な影響を考慮した場合にも処分場建設が可能なサイトは存在すると考えられる。そこで、将来建設が予定されている処分場の主に処分坑道について変形量や安全率に着目し、3次元有限要素法による数値解析を行った。すなわち泥岩では深度 500m、花崗岩では深度 1000m の地点に廃棄物を埋設すると想定し、岩盤の粘着力と坑道離間距離の関係や処分孔が処分坑道に及ぼす影響などについて考察した。

Key Words : high-level nuclear waste disposal tunnel disposal hole finite element method cohesion

1. 序

核燃料サイクル開発機構が進めている泥岩を主な対象とする幌延深地層研究所と、花崗岩を主な対象とする瑞浪超深地層研究所では、それぞれ地下 500 m、1000m の深度において、水平坑道群からなる研究施設を建設しようとしている¹⁾。これは、サイトを特定し、原位置調査結果に基づく処分場の設計・施工計画を行うことは、現時点では不可能に近いためである。そこで、処分場の対象岩盤である花崗岩・泥岩の分布、他の地質学的な影響を考慮したサイトについて検討した。

また、処分坑道と処分孔の力学的安定性について、3次元有限要素法による数値解析を行った。同様な数値解析が核燃料サイクル開発機構によってなされている¹⁾。しかし、文献 1) で設定された岩盤の強度特性としての粘着力と本研究で設定した粘着力が大きく異なっている。そのため、粘着力の相違が離間距離に影響を及ぼすと考えられる。そこで、粘着力と離間距離の関係を明らかにした。ただし、花崗岩を対象とした場合はすでに解析済みのため(文献 2) 参照)、ここでは泥岩を対象とした。さらに、花崗岩・泥岩を対象に処分孔掘削が処分坑道に与える影響と処分孔周辺岩盤の安定性についても考察した。

2. 地質学的検討

日本は世界の中で有数の地殻変動帯に位置している。日本で地層処分を考える場合、まず、わが国は変動帯に位置しているという地質学的な特徴を念頭に置く必要がある。そのため、他の大陸と比較して、地震・断層活動および火山・火成活動の頻度が高い事が考えられ、このような自然現象が処分の安全性



に影響を及ぼさないようにすることが、安全に地層処分を行う前提となる。そこで主に考慮すべき事項について述べる。

(1) 対象岩盤

高レベル放射性廃棄物処分場は花崗岩、泥岩を主に対象としている¹⁾。その理由は、花崗岩は他の岩種と比較して①均質で異方性がほとんどない②透水性が小さい③強度が大きい、といった事が挙げられる。また泥岩は①透水性が小さい②強度は低い、機械化掘削に適しており施工が容易である、といった点である。これらの岩盤は図-1のように日本には広く分布している。

(2) 地震・断層活動

地震については、地下深部では地上と比較してゆれが小さいことから、影響は小さく、地下水の変化は一時的であり、数ヵ月後にはもとの水位に戻ることから処分場に大きな影響を与えることはないと考えられる⁶⁾。

しかし、断層活動については処分場の直接的な破断・破砕をもたらすため、大規模な活断層や活断層の密集した存在する地域は避ける必要がある。

(3) 火山活動

火山活動はマグマの貫入・噴出などによって生じる岩盤の破壊・陥没や地下のマグマから放出される熱エネルギーによる周辺岩盤や地下水の温度の上昇などが考えられる。一般に日本では火山は規則的に

分布しており(火山フロント)、200 万年前から現在に至るまで、火山の活動地域はほとんど変わっていない⁷⁾。将来も新たな火山の発生が考えられるが、火山が既存火山の分布範囲から大きく離れた場所に発生する可能性は低いと推察される⁸⁾。つまり、火山フロントの近くには火山が発生する可能性があるため、そのような地域は避ける必要がある。

(4) 隆起・沈降

隆起については処分場の露出が考えられる。しかし長期的な隆起の速度は 50(m/10 万年)以下⁶⁾であるため数万年オーダーで想定すれば問題はない。また沈降は処分地の深度が増すため考慮する必要はない。

以上より活断層、火山の場所を除いても日本国内には、処分場に適したサイトが存在することがわかる(図-1 参照)。

3. 処分坑道の離間距離の検討

(1) 解析概要

花崗岩を対象とした処分坑道の離間距離については、文献 2) のような結果を得ているので、ここでは泥岩における処分坑道の離間距離について検討する。

処分坑道の離間距離を検討するための解析は、図-2 に示すような断面形状を有する縦置き方式、横置き方式を対象として行った。そのための解析モデルは実際には多数の処分坑道があるが、図-3 に示すように簡略化し 3 本の処分坑道のみとした。これは、4 本以上の坑道を掘削した場合においても、安全率分布や変形量に差異がなかったためである。また、処分坑道長も 50m に短縮した。

処分深度は 500m を想定し、解析領域は、上下方向は坑道直径の 4 倍、側方は坑道の連続性を考慮し坑道離間距離の半分とした。要素の分割については、坑道周辺及び坑道間の岩盤は、掘削影響を詳細に検討するために、0.2~0.5m ピッチとし、他の領域は 1~2m ピッチとした。数値解析は 3 次元有限要素法を用い、周辺岩盤は完全弾塑性体を仮定し、地山はソリッド要素、吹付けコンクリートはシェル要素として扱った。

境界条件は上面を自由境界とし、他の面をローラー境界とした。また周辺岩盤の初期応力は、鉛直方向は土かぶり圧、水平方向については、「第 2 次取りまとめ」で示された側圧係数を 1.0 として算出した。

(2) 入力定数

数値解析に用いる周辺岩盤の入力定数については、幌延の深地層研究所が実施した堆積軟岩のボーリン

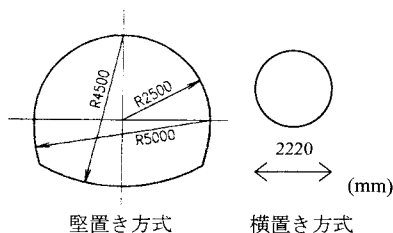


図-2 断面形状

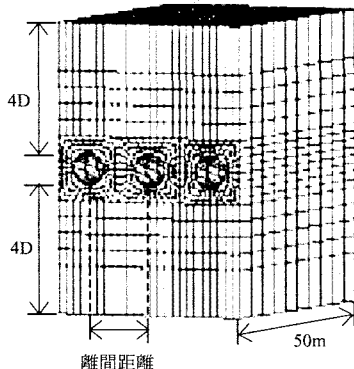


図-3 解析モデル

グコアの一軸圧縮強度⁹⁾から、鶴来ら¹⁰⁾が提案した算出方法をもとに変形係数を推定した。また、粘着力、内部摩擦角についてはビニアウスキーの提案値を引用した。支保工は、吹付けコンクリートを想定し、その弾性係数は土屋¹¹⁾の値を用いた(表-2)。また、比較のために「第2次取りまとめ」の値も用いた¹⁾。これらの入力定数を表-1にまとめると、粘着力が大きく異なっていることがわかる。したがって、粘着力に着目した数値解析も行った。

(3) 検討条件

岩盤構造物には2つの問題がある。一つは、荷重を受けた岩盤が変形することにより破壊するという変形上の問題である。もう一つは、岩盤内の応力が最大レベルまで達し、破壊が起こるという応力上の問題である。応力上の問題は、岩盤の亀裂や不連続面に起因するせん断破壊について考える。ここではこれら2つの問題について検討する。

坑道離間距離を設定する際には、坑道間の岩盤(ピラー部)が重要な構造部材となる。そこで、数値解析から得たSL付近の坑道間の安全率を平均化した値を平均安全率とし、ピラーの平均安全率($F_s=1.5$)¹²⁾を用いる事により安定性を評価した。

変形については断面変形率により安定性評価を行う。空洞周辺の岩盤が不安定になり、施工面で難渋し坑道の設計断面を確保することが困難になると考えられるおおよその断面変形率(内空変位 ΔD と掘削径 D との比の百分率)は、最大0.8%であることが指摘されている¹³⁾。

(4) 解析結果に基づく考察

a) 縦置き方式

まず、応力上の問題について検討するため、粘着力と平均安全率との関係を図-4に示す。粘着力の増加とともに平均安全率も増加していることがわかる。しかしながら、坑道離間距離が2.5D(掘削径の2.5倍)以下の場合においては今回設定した粘着力では、坑道間の岩盤の平均安全率が1.5を上回らないため、ピラー部が不安定になる可能性がある。一方、坑道離間距離が3Dの場合には粘着力が2000kN/m²以上、3.5Dの場合は設定した粘着力300kN/m²でピラー部の安定性を確保できることがわかる。

つぎに変形上の問題を検討するため、応力上ピラー部の安定性が確保できる粘着力がわかっている場合の変形量について考える。図-5に坑道離間距離3.5D(粘着力300kN/m²)の場合、図-6に坑道離間距離3D(粘着力2000kN/m²)の場合の処分坑道の変形量を示す。図-5では変形量は天端部で18mm、インバート部では10mmであり、これを断面変形率に換算すると0.56%となる。また、図-6では、変形量は

表-1 岩盤の入力定数

泥 岩		SR-C	
D(kN/m ²)	3.88×10^6	E(kN/m ²)	3.5×10^6
C(kN/m ²)	300	C(kN/m ²)	3000
$\phi(^{\circ})$	30	$\phi(^{\circ})$	28
ν	0.3	ν	0.3
γ (kN/m ³)	24	γ (kN/m ³)	22

表-2 支保工の入力定数

弾性係数(kN/m ²)	3.4×10^6
ポアソン比	0.3
厚み(cm)	10

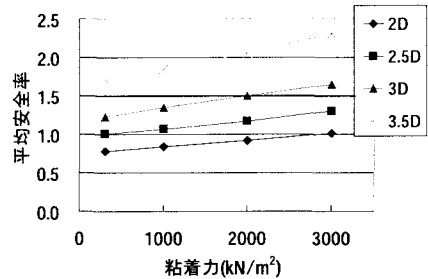


図-4 粘着力と平均安全率(縦置き方式)

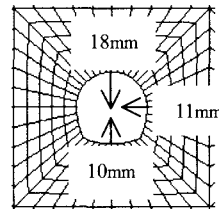


図-5 縦置き方式(3.5D)
C : 300kN/m²

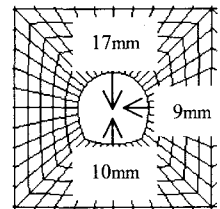


図-6 縦置き方式(3D)
C : 2000 kN/m²

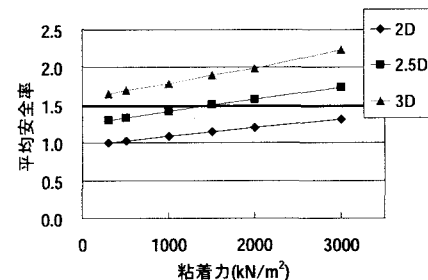


図-7 粘着力と平均安全率(横置き方式)

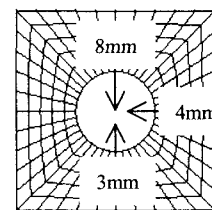


図-8 横置き方式(3D)
C : 300kN/m²

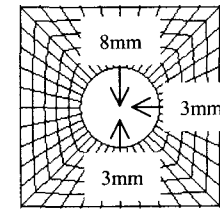


図-9 横置き方式(2.5D)
C : 1500kN/m²

天端部では17mm, インバート部では10mmであり, 断面変形率は 0.52%となる. このことから, 断面変形率は 0.8%以下であるため, 処分坑道は変形上も安定性を確保できると考えられる.

b)横置き方式

応力上の問題を検討するため, 粘着力と平均安全率との関係を図-7 に示す. 坑道離間距離が 3D で粘着力が 300kN/m^2 以上であれば平均安全率が 1.5 を上回る結果が得られた. しかし, 坑道離間距離が 2.5D の場合は 1500kN/m^2 以上でなければならないことがわかる.

つぎに変形の問題について検討する. 図-8 に坑道離間距離 3D (粘着力 300kN/m^2) の場合, 図-9 に坑道離間距離 2.5D (粘着力 1500kN/m^2) の場合の処分坑道の変形量を示す. 図-8, 9 から, 最大変形量は, 天端で 8mm と小さく, 天端とインバート部の変形量を断面変形率に換算すると 0.5%である. したがって, 坑道の安定性は確保できると考えられる.

a), b)の結果から, 堅置き方式, 横置き方式における処分坑道の安定性が確保できる粘着力と坑道離間距離との関係は表-3 のようになる.

表-3 ピラーの安定性を確保するための粘着力

堅置き方式	離間距離	3D (15m)	3.5D (17.5m)
	粘着力	2000kN/m^2	300kN/m^2
横置き方式	離間距離	2.5D (5.55m)	3D (6.66m)
	粘着力	1500kN/m^2	300kN/m^2

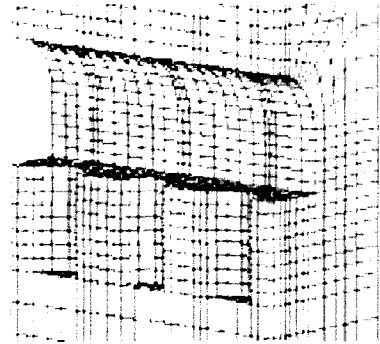


図-10 解析モデル

(硬岩系岩盤: 処分坑道離間距離 2.5D 処分孔離間 2d)

表-4 岩盤の入力定数

泥 岩		花 崗 岩	
$D(\text{kN/m}^2)$	3.88×10^5	$D(\text{kN/m}^2)$	1.49×10^7
$C(\text{kN/m}^2)$	2000	$C(\text{kN/m}^2)$	2400
$\phi(^{\circ})$	30	$\phi(^{\circ})$	45
ν	0.3	ν	0.3
$\gamma(\text{kN/m}^3)$	24	$\gamma(\text{kN/m}^3)$	25

4. 処分孔掘削が処分坑道に及ぼす影響

(1)解析概要

処分孔掘削が処分坑道に及ぼす影響は, 処分孔掘削に伴う力学的な損傷領域(塑性域)や周辺地山の挙動について着目した. 解析モデルを図-10 に示す. 解析領域は, 上下方向は坑道直径の 4 倍, 側方は坑道の連続性を考慮し坑道離間距離の半分とした.

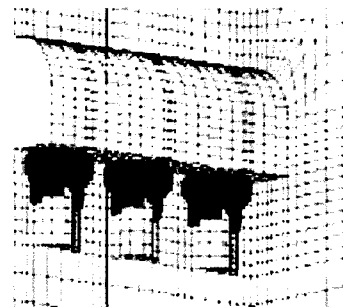
解析対象は, 花崗岩が地下 1000m, 泥岩が地下 500 m の処分坑道を想定し, 岩盤の入力定数は表-4 の値を用いた. 表-4 の粘着力 C は花崗岩では坑道離間距離が 2.5D²⁾, 泥岩は 3D において処分坑道及びピラー部の安定性を確保できる値である. 花崗岩は無支保, 泥岩は吹付けコンクリート厚を 10cm として掘削したのち, 処分孔径(2.22m)は, 無支保で孔底まで一度で掘削を行った.

境界条件は上面を自由境界とし, 他の面をローラー境界とした. 周辺岩盤の初期応力は, 鉛直方向は土かぶり圧, 水平方向については, 「第 2 次取りまとめ」で示された側圧係数を 1.0 として算出した.

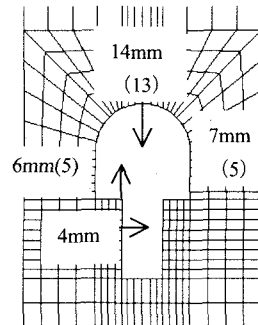
解析ケースは処分孔の離間距離(中心間隔)を処分孔径の 2 倍(2d)と 4 倍(4d)の 2 ケースとした. 処分孔は解析モデルを簡略化するために 3 本とした.

(2)解析結果に基づく考察

解析結果を図-11~図-14 に示す. 括弧内の値は処分坑道のみ掘削した場合の変形量であり, 赤く示し

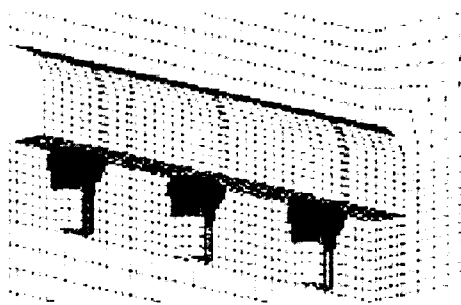


(塑性域)

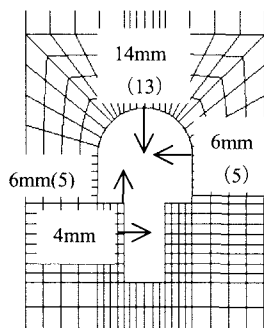


(変形量)

図-11 花崗岩(処分孔間隔 2d)

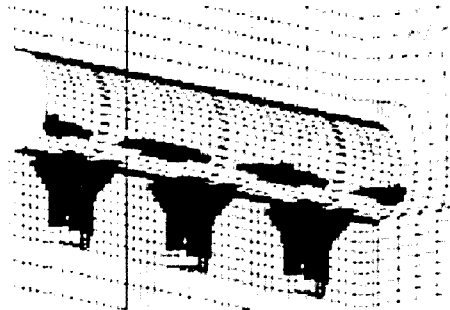


(塑性域)

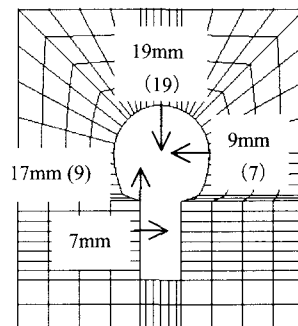


(変形量)

図-12 花崗岩(処分孔間隔 4d)

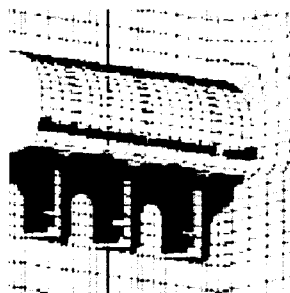


(塑性域)

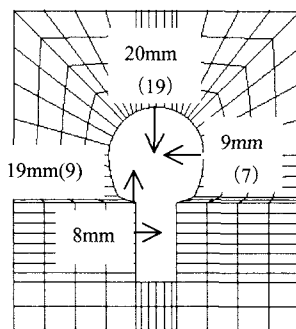


(変形量)

図-14 泥岩(処分孔間隔 4 d)



(塑性域)



(変形量)

図-13 泥岩(処分孔間隔 2d)

た部分が塑性域である。

まず、花崗岩を対象にした処分坑道及び処分孔の解析結果を示す。図-11 が処分孔間隔 2d, 図-12 が処分孔間隔 4d の結果である。処分孔掘削に伴って、処分坑道の天端沈下、内空変位が若干ではあるが大きくなることがわかる。したがって、処分孔の離間距離が、処分坑道に与える影響はほとんどないといえる。一方、処分孔の壁面には 4mm, 処分孔の上部(処分坑道と処分孔が接する部分)では 6mm の変位が生じる。変位そのものは小さいが、複雑な坑道形状であるため、処分孔周辺には掘削の影響により、応力が集中するため、処分孔周辺の岩盤には塑性域が発生している。したがって、処分孔周辺の岩盤が不安定になることが予測される。

つぎに、泥岩を対象にした処分坑道及び処分孔の解析結果を示す。図-13 が処分孔間隔 2d, 図-14 が処分孔間隔 4d の場合である。花崗岩の場合と同様に処分孔掘削に伴って、処分坑道の天端沈下、内空変位が若干大きくなる。しかし、処分孔の上部では、処分孔掘削前には 9mm であった変位が、掘削後には処分孔間隔 2d の場合 19mm, 4d の場合は 17mm の変位が生じる。また、処分孔の壁面では処分孔間隔が 2d の場合 8mm, 4d の場合 7mm の変位が生じて

いる。処分坑道及び処分孔の変形量を断面変形率に換算すると 0.8%以下であるが、複雑な坑道形状であるため、応力集中が考えられる。その結果、周辺には塑性域が大きく発生していることがわかる。そのため、処分孔が不安定になることが推察される。

5. まとめ

本稿では、処分坑道の間隔、処分孔掘削が処分坑道に及ぼす影響について、数値解析結果に基づく力学的な安定性評価を行った。その結果以下のことがわかった。

- ①堅置き方式では、粘着力が 300kN/m^2 の場合には坑道離間距離 3.5D で坑道の安定性を確保できる。
- ②横置き方式では、粘着力が 300kN/m^2 の場合には坑道離間距離 3D で坑道の安定性を確保できる。
- ③処分孔掘削が処分坑道の天端・側壁部に与える影響は、ほとんどない。
- ④処分孔周辺の岩盤には、塑性域が発生し不安定になる。

以上より、堅置き方式では、処分孔周辺岩盤が不安定になると予測できるが、横置き方式では粘着力に見合った離間距離を設定することが必要である。

なお、③と④については、原位置での計測事例がほとんどなく、今後、原位置試験などを行うことによって評価する必要がある。

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、サイクル機構技術資料、JNC TN1400 99-020-024、1999.
- 2) 亀岡慎也、道廣一利、吉岡尚也：高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分坑道の力学的安定性評価、第 40 回地盤工学研究発表会、pp.1813-1814、2005.
- 3) 米倉信之、貝塚爽平ほか：日本の地形 1、総説、pp. 4-7、東京大学出版会、2001.
- 4) 花岡尚之ほか：日本列島の地質、CD-R、丸善.
- 5) 渡辺満久、鈴木康弘：活断層地形判読、p. 1、古今書店、1999.
- 6) 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 1 わが国の地質環境、サイクル機構技術資料、JNC TN1400 99-021-024、1999.
- 7) 畑元浩樹ほか：高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る概要調査地区選定上の考慮事項について(地震・断層活動)、pp. 327-328、CS7-025、土木学会第 58 回年次学術講演会、2003.
- 8) 小林正典ほか：高レベル放射性廃棄物の地層処分に係る概要調査地区選定上の考慮事項について(噴火・火成活動)、pp. 327-328、CS7-024、土木学会第 58 回年次学術講演会、2003.
- 9) 木山保、石島洋二ほか：幌延における大深度ボーリングコアの採取後の強度特性の変化、資源・素材学会平成 17 年度春季大会講演集 (I) 資源偏、pp. 143-144.
- 10) 鶴来克俊、道廣一利、吉岡尚也：岩盤の工学的分類方法に対応した入力定数の提案、第 40 回地盤工学研究発表会、pp. 1815-1816、2005.
- 11) 土屋敏：トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究、土木学会論文集、No.364/III-4、pp. 31-40、1985.
- 12) E・フック、E・T・ブラウン(小野寺透ほか共訳)：岩盤地下空洞の設計と施工、pp. 148-155、土木工学社、1985.
- 13) 谷本親伯、吉岡尚也：山岳トンネルにおけるコンバージェンス計測の意義、材料、第 40 巻第 452 号、pp.122-128、1991.

STABILITY EVALUATION OF HIGH-LEVEL WASTES DISPOSAL TUNNEL IN GEOLOGIC REPOSITORY

Shinya KAMEOKA, Kazutoshi MICHIIHIRO and Hisaya YOSHIOKA

In order to examine the distance of the disposal tunnel and the excavation effect of the disposal hole, the three dimensional FE analyses has been carried out. As a result, the stability in the pillar and around the disposal tunnel depends on the cohesion in the rock mass. However, when the disposal hole is excavated, the stress concentration in the floor of the disposal tunnel can cause instability of the disposal hole.