

三次元応力の異方性を考慮した 処分坑道の力学的安定性評価

Stability evaluations of repository drift considering anisotropy of initial stresses

亀岡慎也¹・道廣一利²・吉岡尚也³

Shinya Kameoka, Kazutoshi Michihiro and Hisaya Yoshioka

¹学生会員 摂南大学大学院 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8)

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

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

³正会員 博(工) 大阪工業大学工学部 (〒535-8585 大阪市旭区大宮5-16-1)

Three-dimensional FE analyses have been carried out in order to consider the distance of the disposal tunnel and the excavation effect of the disposal hole under the anisotropy of initial stress. As the result, when the disposal tunnel has been excavated in a minimum stress direction, the stress in a pillar decreases. On the other hand, when it has been excavated in a maximum stress direction, the stress of pillar increases. Furthermore, the average safety factor of pillar around disposal tunnel increases as the width of pillar becomes wider, and it decreases as the strength ratio becomes larger.

Key Words: initial stress, anisotropy, strength ratio, disposal tunnel, disposal hole

1. 序

日本列島はアジア大陸と太平洋の間の大陸縁辺部に位置し地殻変動が活発であることから、日本列島における地殻応力場は概ね東西方向に卓越しているという計測結果がある¹⁾。すなわち、水平面内における応力は東西方向の成分が鉛直方向の応力より大きく、南北方向の成分は鉛直方向の応力とほぼ等しい状態にある。このような初期応力状態のもとで、放射性廃棄物処分場²⁾(図-1)のような連続した処分坑道の構築を想定した場合、水平面内の応力に対して処分坑道を掘削する方向の違いが坑道および坑道間の岩盤の力学的安定性に大きく影響を及ぼすものと考えられる。そこで、処分坑道および処分孔が受ける影響を考察するため三次元FEM解析を行った。

また、弾塑性FEM解析などにより空洞掘削に伴う力学的な塑性域や周辺岩盤の挙動を予測するためには、岩盤の強度定数である岩盤の亀裂や不連続面に起因する内部摩擦角および粘着力の設定が重要になる。換言すれば、強度定数の設定の相違が空洞の安

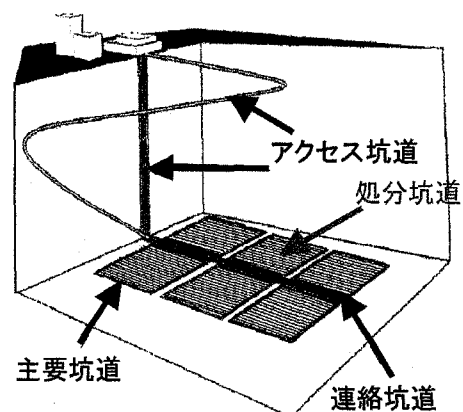


図-1 概要図²⁾

定性にも影響を及ぼすと考えられる。そのため、ここでは岩盤の強度定数が処分坑道および処分孔の安定性に及ぼす影響についても考察した。

2. 処分坑道の離間距離の検討

(1) 解析概要

処分坑道の離間距離における解析は、図-2に示すような断面形状を有する坑道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、局所安全率分布や変形量に差異が生じなかったためである。また、処分坑道長も実際には500m程度である²⁾が、ここでは10分の1(50m)に短縮した。なお、処分坑道の深度は花崗岩が地下1000m、泥岩が地下500mを想定した。

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。

(2) 入力定数

1) 岩盤の物性値

数値解析に用いる周辺岩盤の入力定数を表-1に示す。これらの入力定数のうち、変形係数の値は鶴来³⁾が岩種を火成岩・堆積岩に分けて提案している式から推定した。その際、花崗岩はRMRを61～80、泥岩はRMRを41～60と仮定した。強度定数としての内部摩擦角については、竹林⁴⁾が提案した泥岩および花崗岩の平均値を用いた。

粘着力Cは次式に示すように一軸状態における破壊時のモールの応力円とクーロンの破壊線の関係から強度比(すなわち室内試験における一軸圧縮強度と原位置強度の比)を用いて設定した。

$$C = \frac{(q_u / \alpha) \times (1 - \sin \phi)}{2 \times \cos \phi} \quad (1)$$

ここで、 q_u は室内試験における一軸圧縮強度、 ϕ は内部摩擦角、 α は強度比である。

ビニアウスキー⁵⁾は、特に割れ目系を持つ岩石は顕著な寸法効果を示し、強度比が10以上になる可能性があることを指摘している。また、森岡⁶⁾は、幌延堆積軟岩の強度比をヘークラックの存在を考慮しおよそ3に設定している。本稿では、花崗岩については強度比を1から50、泥岩では3から10とし

て検討を行った。また、一軸圧縮強度は泥岩および花崗岩の平均的な値である15MPa、100MPaとした^{6,7)}。

2) 支保工

支保工部材としての吹付けコンクリートの厚さは、断面変形率(内空変位 ΔD と掘削径 D との比の百分率)が0.8%以下になるために必要な支保圧力⁸⁾を算出し、内圧効果を評価できる解析法である岡⁹⁾の理論式を用い設定した。断面変形率を0.8%以下にしたのは、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が指摘されている⁸⁾ためである。

吹付けコンクリートの弾性係数は土屋¹⁰⁾の値を用いた(表-2)。

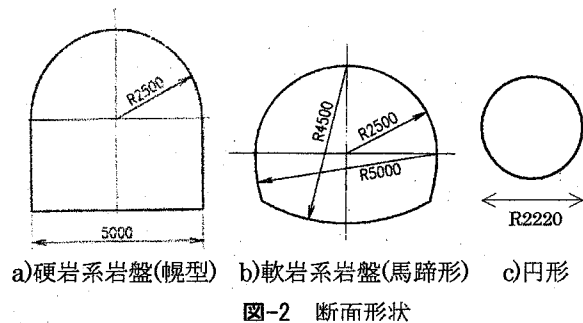


図-2 断面形状

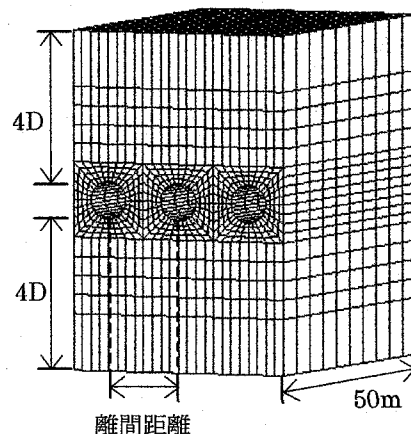


図-3 解析モデル

表-1 周辺岩盤の物性値

	RMR	変形係数 (kN/m^2)	内部摩擦角 ($^\circ$)
火成岩	61～80	1.0×10^7	45
堆積岩	41～60	2.0×10^6	25

表-2 吹付けコンクリートの物性値

弾性係数 (kN/m^2)		3.4×10^6
ポアソン比		0.2
厚さ (cm)	花崗岩	0
	泥岩(円形)	10
	泥岩(馬蹄)	30

3) 初期応力

初期応力については、これまでに国内で測定された岩盤内の初期応力測定結果に基づいて長¹⁾が提案した式を用いて設定した。

岩盤密度が $20 \sim 22 \text{ kN/m}^3$ の地層の場合では次式のように表される。

$$\text{最小応力} = 0.019D \times 1.13 \text{ (MPa)}$$

$$\text{最大応力} = 0.027D \times 1.45 \text{ (MPa)}$$

また、岩盤密度が $23 \sim 25 \text{ kN/m}^3$ の地層では

$$\text{最小応力} = 0.027D \times 0.72 \text{ (MPa)}$$

$$\text{最大応力} = 0.043D \times 0.97 \text{ (MPa)}$$

である。ここで、Dは深度(m)である。

その結果、鉛直応力は被り圧に相当し、水平面内における応力については、泥岩では最小応力が被り圧に等しく、最大応力は被り圧の1.5倍となることが判明した。一方、花崗岩では最小応力が被り圧の1.1倍、最大応力が被り圧の1.7倍になることが明らかになった。

(3) 離間距離の検討条件

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、このピラーの平均安全率($F_s=1.5$)¹¹⁾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った。紙面の都合上、変形量に関する解析結果を提

示できないが、ピラー部が応力上安定性を確保できる離間距離であれば断面変形率は0.8%以下であった。

(4) 解析結果と考察

連続した処分坑道の構築を想定した場合、水平面内の応力に対して処分坑道を掘削する方向の違いが坑道および坑道間の岩盤に与える影響および強度比が空洞の安定性に及ぼす影響について考察した。

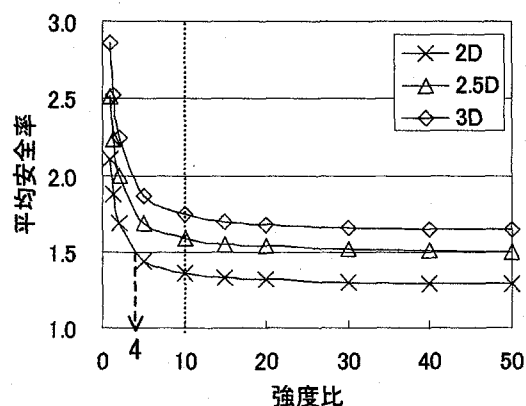
1) 最大応力方向に掘削した場合

花崗岩を対象に解析を行った結果を図-4に示す。図より、強度比が小さくなると平均安全率は増加していることがわかる。

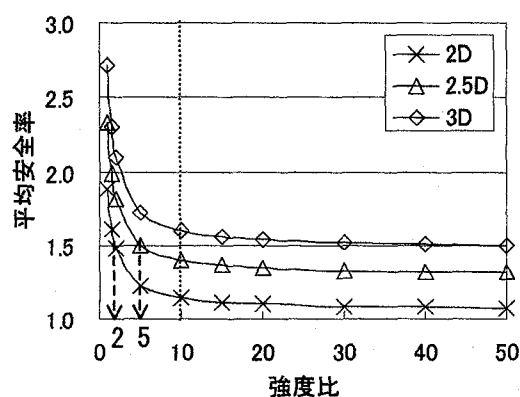
処分坑道の断面が円形の場合には、坑道離間距離が2Dでは強度比が4以下で坑道間の岩盤の平均安全率が1.5を上回るため、ピラー部の安定性を確保することができる。また、強度比が10以上になると、平均安全率はほぼ一定になる。一方、坑道離間距離を2.5D以上設けると強度比が50の場合でも、ピラー部が安定することがわかる。

幌型の場合には、円形断面と比較すると同じ強度比、同じ離間距離において、坑道間の岩盤の平均安全率は小さくなることわかる。これは、連続した坑道において円形断面の方が、ピラー部に作用する応力が小さくなるため、力学的に安定しやすいことを示している。坑道離間距離が2Dの場合には強度比が2以下、2.5Dの場合には5以下であればピラー部の安定性を確保できる。また、ビニアウスキー⁹⁾が指摘している強度比(10以上)であれば坑道離間距離を3D設けることによりピラー部は応力上安定することがわかる。

図-5は泥岩の解析結果である。円形断面では、坑道離間距離が3D以下になると、ピラー部の安定性を確保できない。これは、ピラー部分から崩壊する可



a) 円形断面



b) 幌型断面

図-4 平均安全率と強度比の関係(最大応力方向, 花崗岩)

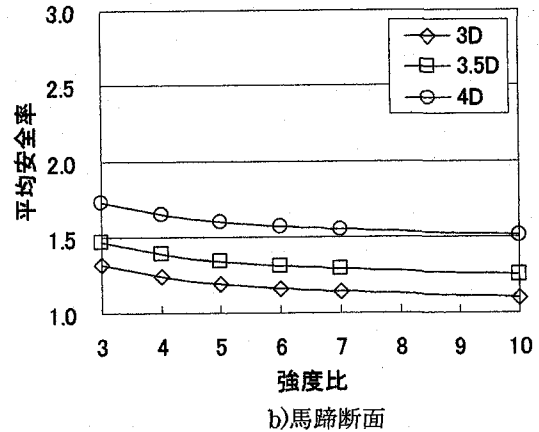
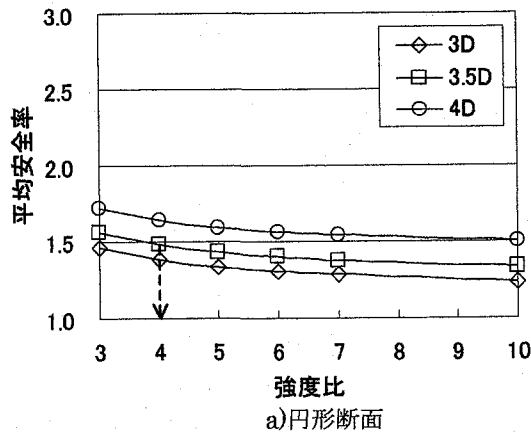


図-5 平均安全率と強度比の関係(最大応力方向, 泥岩)

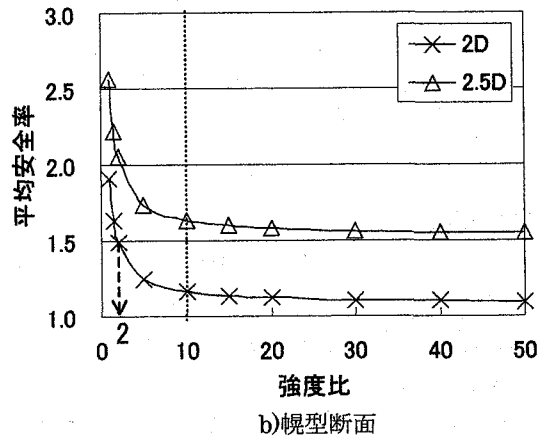
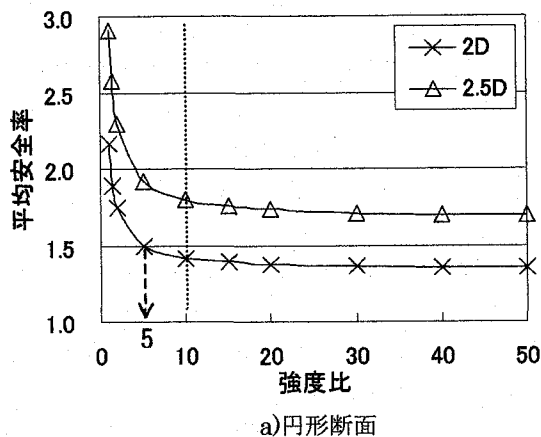


図-6 平均安全率と強度比の関係(最小応力方向, 花崗岩)

能性のあることを示唆したものである。強度比が4以下の場合には、坑道離間距離が3.5D設ける必要がある。さらに、強度比が10程度に低下した場合には、4Dで平均安全率が1.5以上になるため、ピラー部の安定性を確保することができる。

馬蹄形の場合は、坑道間の岩盤の平均安全率は円形断面の場合より小さくなるが、大きな差異はみられない。これは、馬蹄形は円形断面に近いためであると考えられる。森岡ら⁶⁾が設定している強度比が3であれば、3.5Dでピラー部は安定することがわかる。それよりさらに強度比が大きい場合には、坑道離間距離を4D設けることによりピラー部の安定性を確保できるものと考えられる。

2) 最小応力方向に掘削した場合

花崗岩の解析結果を図-6に示す。処分坑道が円形断面の場合、坑道離間距離が2Dでは、強度比が5以下のとき、坑道間の岩盤の平均安全率が1.5を上回る。一方、坑道離間距離が2.5Dの場合は、強度比に関係なく安定性を確保できる。

最大応力方向に掘削した場合(図-4)と比較すると平均安全率が大きくなることがわかる。そのため、

同じ強度比であっても離間距離を小さくできる。最小応力方向に空洞を掘削した場合にはピラー部に作用する応力が小さく考えられるためである。

幌型の場合は、強度比が2以下であれば、坑道離間距離が2Dでピラー部の安定性を確保できる。さらに、離間距離2.5Dの場合には強度比が50程度になっても安定性を確保することができる。

図-7は泥岩を対象に解析を行った結果である。円形断面では、坑道離間距離が3Dの場合には、全ての強度比においてピラー部の応力上の安定性を確保できる。坑道離間距離2.5Dで施工を行うためには強度比が5.5以下でなければならないことがわかる。馬蹄形の場合では、坑道離間距離が2.5Dの場合、強度比が3以下の場合のみ、ピラー部の安定性を確保できる。強度比が3より大きくなる場合には、坑道離間距離が3D必要である。

1)と2)から得られた結果を表-3, 4に示す。連続した処分坑道を構築する場合、円形断面ではピラー部の力学的安定性を得やすいことがわかった。また、水平面内における応力方向に対する空洞の掘削方向は空洞の力学的安定性に影響を与え、特に泥岩にお

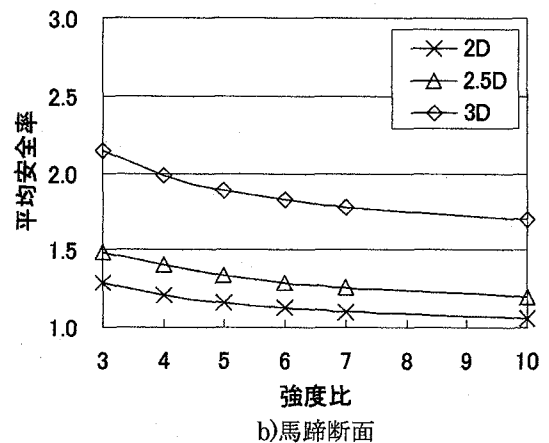
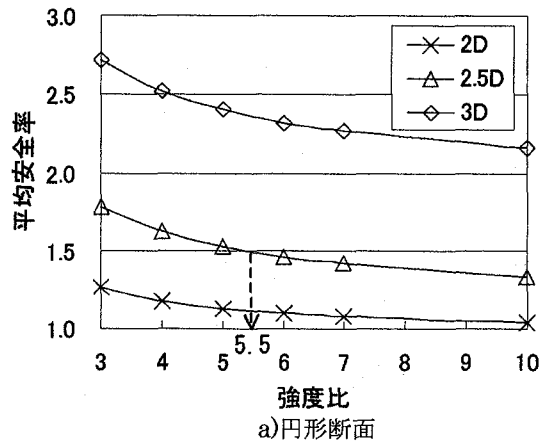


図-7 平均安全率と強度比の関係(最小応力方向, 泥岩)

表-3 離間距離と強度比の関係(花崗岩)

掘削方向	断面形状	2Dの場合	2.5Dの場合	3Dの場合
最大	円形	4以下	50以下	-
	幌型	2以下	5以下	50以下
最小	円形	5以下	50以下	-
	幌型	2以下	50以下	-

表-4 離間距離と強度比の関係(泥岩)

掘削方向	断面形状	2.5Dの場合	3Dの場合	3.5Dの場合	4Dの場合
最大	円形	不安定	不安定	4以下	10以下
	馬蹄形	不安定	不安定	3	10以下
最小	円形	5.5以下	10以下	-	-
	馬蹄形	3	10以下	-	-

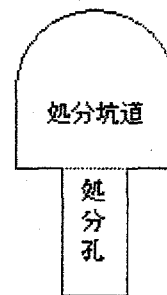


図-8 断面形状(花崗岩)

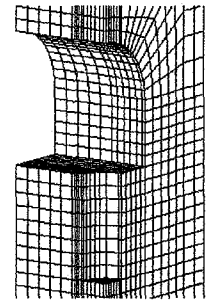


図-9 モデル(花崗岩)

いては、離間距離の違いが顕著に現れる。この原因として、接続する空洞横断面における応力の集中が考えられる。すなわち、空洞が最大応力方向に並ぶ場合には、空洞の天端とインバート部に応力が集中し、側壁部分では緩和されるためである。また、最大応力方向に掘削すると、離間距離を大きく設定しなければならないのは、ピラー部に最大応力が作用するためである。

3. 処分孔周辺岩盤の力学的安定性

(1) 解析概要

図-8のような形状をした処分坑道および堅置き方式の処分孔を構築した場合においても水平面内の応力が周辺岩盤の力学的安定性に影響を及ぼすものと考えられる。既存の研究¹²⁾では、等方的な初期応力状態を仮定した場合には、処分孔の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ことが指摘されている。しかし、処分孔周辺岩盤では塑性域が発生し不安定になることも推測されている。したがって、異方性を有する初期応力のもとで処分孔を掘削した場合には、より厳しい状態になると考え

られる。そのため、処分孔掘削に伴う塑性域の拡大状態について考察するための三次元FEM解析を行った。

さらに、処分孔堅置き方式を適用することのできる岩盤の粘着力の目安について検討を行った。すなわち、処分孔周辺岩盤が弾性挙動を示す条件の把握を行った。

解析モデルを図-9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500mの処分坑道を想定した。ここでは一例として、花崗岩は坑道離間距離が2.5D、泥岩は4Dにおいて最大応力方向および最小応力方向に処分坑道を掘削した場合に処分坑道及びピラー部の安定性を確保できる強度比から、式(1)を用いて粘着力を設定した。その際、花崗岩では強度比を10、泥岩では5とした。

花崗岩における処分坑道の掘削は無支保、泥岩は吹付けコンクリート厚を30cmとして掘削した。その後、処分孔(直径2m・深さ4m)は、花崗岩は無支保、泥岩は吹付けコンクリート10cmを施工し孔底まで一度で掘削を行った。

解析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)とした。

(2) 解析結果と考察

1) 掘削方向の違いによる塑性域の拡大状態

水平面内の応力方向に対する処分坑道の掘削方向の影響による処分孔周辺岩盤の塑性域の拡大状態を調べた。解析結果を図-10～図-13に示す。

まず、花崗岩を対象にした処分坑道および処分孔の解析結果を図-10, 11に示す。処分孔間隔が2dの場合は、処分坑道の掘削方向によらず、処分孔周辺岩盤の塑性域は処分孔間に連続的に発生することがわかる。一方、処分孔間隔を4dにすると、最大応力方向に掘削した場合における塑性域の広がりには0.8mであるが、最小応力方向に掘削した場合は約1m発生する。すなわち、最小応力方向に処分坑道を掘削し、かつ処分孔間隔が小さい場合には処分孔周辺の塑性域が拡大することがわかる。これは、最小応力方向にまず処分坑道を掘削すると処分坑道の天端・インバート部に応力が集中する。そのような状態のインバート部に処分孔を掘削すると、さらに応力が集中するためであると考えられる。このように、処分孔の塑性域の拡大は、水平面内の応力方向に対する処

分坑道の掘削方向に依存していることがわかった。

つぎに図-12, 13に泥岩を対象とした処分孔周辺岩盤の解析結果を示す。全ての場合において、処分孔間には大きく塑性域が発生している。そして、花崗岩の場合と同様に最大応力方向に掘削した場合よりも最小応力方向に掘削したときのほうが処分孔周辺岩盤に塑性域が拡大していることがわかる。また、処分坑道にも処分孔掘削の影響がでていることもわかる。

以上より、処分孔の力学的な安定性に関しても水平面内の応力方向に対する処分坑道の掘削方向が影響を及ぼすことが明らかになった。

2) 強度比の違いによる塑性域の拡大状態

強度比をパラメータとした数値解析を行い、処分孔掘削に伴う塑性域の拡大状態を調べた。その結果から、処分孔縦置き方式を適用することのできる岩盤定数の目安がどの程度になるのかを検討した。すなわち、処分孔周辺岩盤が弾性挙動を示す条件の把握を行った。

処分孔周辺の強度比の違いによる塑性域の拡大状態を図-14～図-17に示す。ここで、処分孔間隔が2dの場合には塑性域の幅が1mに、4dの場合には塑性域の幅が3mに達すると処分孔間に塑性域が連続して発

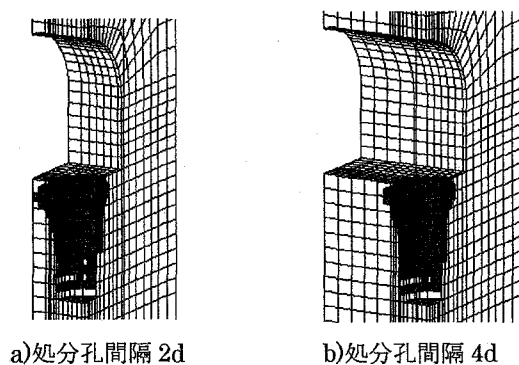


図-10 最大応力方向に掘削した場合(花崗岩)

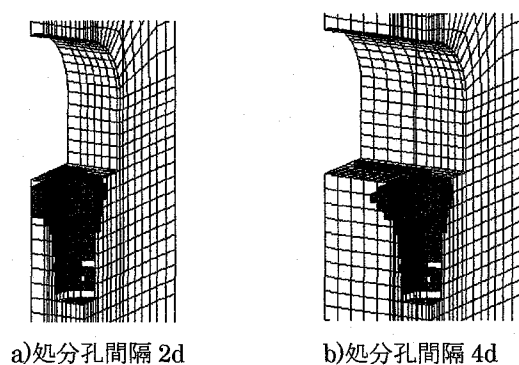


図-11 最小応力方向に掘削した場合(花崗岩)

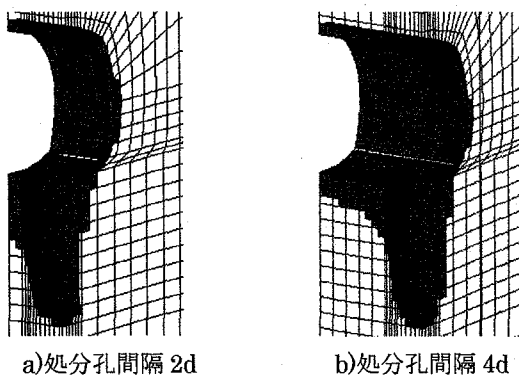


図-12 最大応力方向に掘削した場合(泥岩)

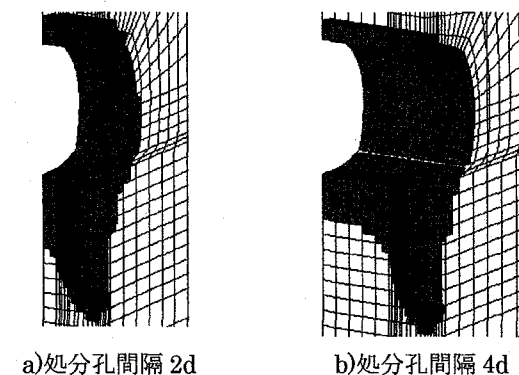


図-13 最小応力方向に掘削した場合(泥岩)

生することを意味している。

花崗岩(図-14, 15)の場合, 最大応力方向に掘削すると, 処分孔間隔が2dでは強度比が1.5以下, 4dでは2以下であれば処分孔周辺に塑性域が発生しない。一方, 最小応力方向に掘削した場合は, 最大応力方向に掘削した場合よりも塑性域が拡大する。そのため, 処分孔間隔2dでは強度比が1, 4dでは1.5以下で弾性挙動を示すことがわかる。

泥岩(図-16, 17)は, 最小応力方向に掘削した場合には, 処分孔間隔が2dでは強度比が1.5以上, 4dでは強度比が2以上になると処分孔間に連続的に塑性域が発生する。さらに, 強度比が1の場合にも処分孔周辺には塑性域が発生し, 力学的に不安定になるものと考えられる。

最大応力方向に掘削した場合, 処分孔間隔が2dでは, 強度比が1の場合においても処分孔周辺には塑性域が少し発生しており, 補強が必要になるものと考えられる。処分孔間隔が4dになると強度比が1であれば, 塑性域はほとんど発生せず, 弾性に近い挙動を示すことがわかる。

以上より, 処分坑道を掘削した場合には応力方向によらず強度比が大きくなるとともに処分孔周辺岩盤の塑性域が拡大することがわかる。換言すれば, 強度比が大きければ, 水平面内の応力による影響を受けやすいことを意味している。具体的に言及すれば, 処分孔縦置き方式を適用するためには, 花崗岩では強度比が2程度必要である。泥岩では, 最大応力方向に処分坑道を掘削し, 処分孔間隔を4dに設定すると, 強度比が1のとき処分孔周辺岩盤は, ほぼ弾性挙動を示す。

4. まとめ

異方性を有する初期応力のもと, 処分坑道および処分孔が受ける影響を考察するため三次元FEM解析を行った。その結果, 以下のようなことが明らかになった。

- ①連続した空洞を最小応力方向に掘削するとピラー部に作用する応力が小さくなることが明らかになった。
- ②最大応力方向に空洞を掘削するとピラー部に作用する応力が大きくなるため, ピラー部の安定性を確保するためには坑道離間距離を大きく設定することが必要である。
- ③さらに, 強度比が小さければ水平面内の応力方向に対する空洞掘削方向の違いが離間距離に与える影響は小さいが, 強度比が大きくなればその影響は大きくなる。特に, 強度の低い泥岩では顕著に表れる。
- ④処分孔を掘削する場合, 最大応力方向に処分坑道

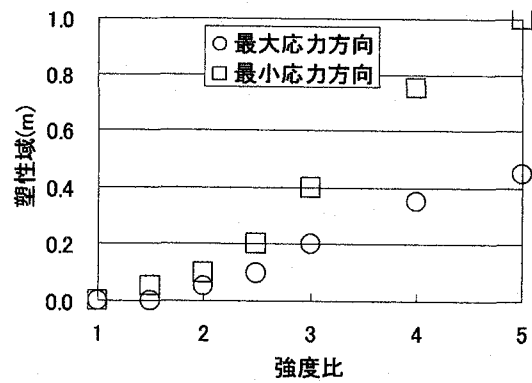


図-14 処分孔間隔 2d(花崗岩)

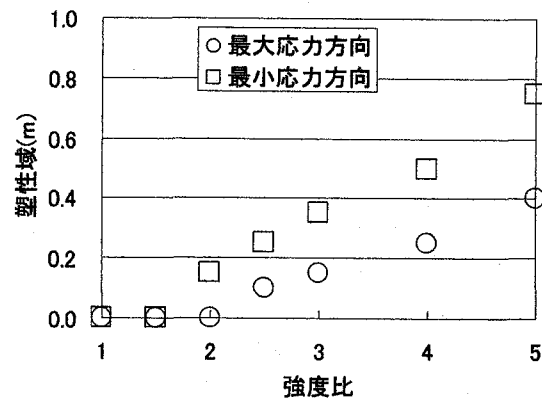


図-15 処分孔間隔 4d(花崗岩)

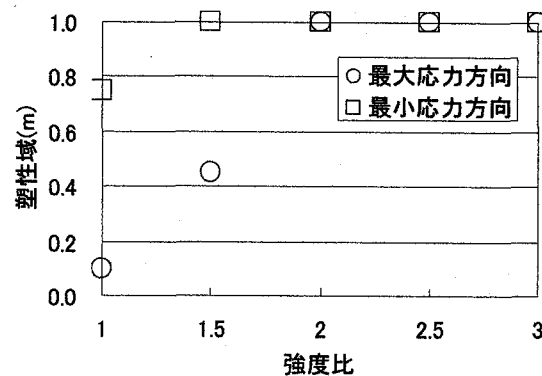


図-16 処分孔間隔 2d(泥岩)

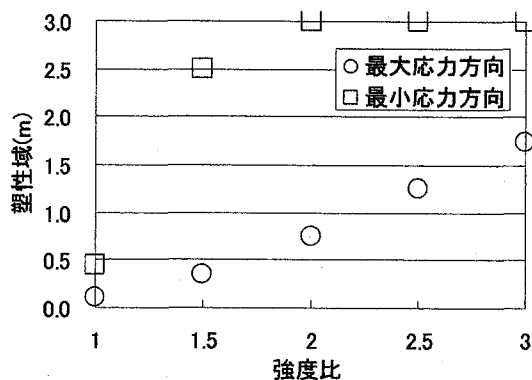


図-17 処分孔間隔 4d(泥岩)

を掘削することにより周辺岩盤に発生する塑性域は小さくなる。

⑤強度比が2程度の花崗岩であれば処分孔堅置き方式を用いることができる。

⑥泥岩では、強度比が1であれば最大応力方向に処分坑道を掘削し、処分孔間隔を4d設けた場合のみ、処分孔堅置き方式を適用できる可能性がある。

【参考文献】

- 1) 長秋雄：国内の超深地層の初期応力状態，平成12年度研究発表会講演論文集，pp. 129-132，日本応用地質学会，2000.
- 2) 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.
- 3) 鶴来克俊，道廣一利，吉岡尚也：原位置試験に基づくトンネル挙動解析のための入力定数，第39回地盤工学研究発表会，pp.1707-1708，2004.
- 4) 竹林亜夫，三上元弘，國村省吾，奥井裕三，吳旭：地山の内部摩擦角に着目したトンネルの岩種分類の提案，土木学会第58回年次学術講演会，pp.109-110，2003.
- 5) 大西有三，谷本親伯：わかりやすい岩盤力学，

pp.60-62，鹿島出版会，1996.

6) 森岡宏之，尾留川剛，村川史朗，菅原健太郎，小林隆志：幌延深地層研究計画における地下研究坑道の支保設計，第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.69-74，土木学会，2006.

7) 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，IV-228，JNC TN1400 99-020-024，1999.

8) 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.

9) 岡行俊：NATMにおける支保理論，施工技術，第10巻，第11号，pp.10-11，1977.

10) 土屋敦：トンネル設計のための支保と地山物性値に関する研究，土木工学会論文集，No.364/III-4，pp.31-40，1985.

11) E・フック，E・T・ブラウン：岩盤地下空洞の設計と施工，pp.148-155，土木工学社，1985.

12) 亀岡慎也，道廣一利，吉岡尚也：地層処分における地下空洞の力学的安定性評価，第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.203-208，土木学会，2006.