

釜石鉱山における新規坑道掘削を対象とした変形挙動予測解析

Prediction of excavation response of a new drift in Kamaishi mine

松井 裕哉*・杉原 弘造*・木梨 秀雄**・三上 哲司*

Hiroya MATSUI, Kozo SUGIHARA, Hideo KINASHI, Tetsuji MIKAMI

Good prediction of excavation response in fractured rock is effective to optimize underground design and construction. Authors have attempted to predict excavation response of a new drift in fractured rock by different numerical methods(FEM,DEM) to examine the applicability of each methods. In this prediction, measured in-situ stress condition by overcoring and hydrofracturing methods has been used. It has been predicted that 1)the predicted displacements and stress condition around a new drift by FEM and DEM are different from each other, particularly within $0.5D$ (D =drift diameter) from a drift wall, fracture geometry used in the DEM prediction affects the predicted result strongly under low stress condition. 2)the displacement predicted using the in-situ stress condition are consistent with the measured drift shape change.

1.はじめに

結晶質岩を代表とする不連続性岩盤を対象とし大規模地下構造物の設計・施工の最適化を計る上では、空洞掘削に伴う空洞周辺岩盤中の不連続面の挙動を精度良く予測することが重要となる。今日、不連続性岩盤のモデル化手法については多種多様な手法が提案されている¹⁾が、不連続性岩盤の挙動予測のための調査・解析という一連の流れや不連続体解析手法自体は未だ一般的に確立されているとは言えないのが現状である。

動力炉・核燃料開発事業団は、結晶質岩を対象とした坑道を掘削した場合に生じる周辺岩盤への影響に関する調査研究(掘削影響試験)を岩手県釜石市にある釜石鉱山において実施している²⁾が、本研究の一環として不連続性岩盤に対するモデル化手法の適用性評価のための解析も実施している。本論文では、新規の坑道掘削を対象として実施した岩盤のモデル化および解析結果について報告する。

2. 解析の概要

掘削影響試験(図-1)のために、釜石鉱山内の250mレベル坑道(地表下約730m)の栗橋花崗閃緑岩体中で実施中の計測坑道、試験坑道掘削を対象としている。計測坑道は高さ2.5m幅3.0mの矩形断面、試験坑道は、高さ3.5m、幅3.5mの馬蹄形断面を有する。解析領域は、両坑道を垂直に切る2次元断面内で、両坑道を中心とした $60\text{m} \times 50\text{m}$ の領域とし、側方境界は $5D$ (D :坑道径)、上下境界は $10D$ とした(図-2)。なお、既存解析手法の比較の観点から、

* 動力炉・核燃料開発事業団 東濃地科学センター

** 大林組技術研究所

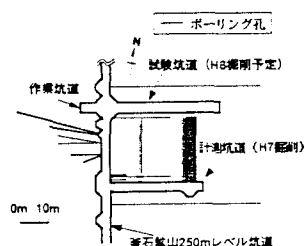


図-1 掘削影響試験レイアウト

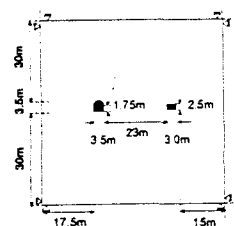


図-2 解析領域

連続体解析手法としてFEMを、不連続体解析手法としてDEMを選択した。解析コードは前者がSIGNAS、後者はUDECB-BBを用いている。解析は、すべてのケースで2次元平面ひずみ状態を仮定した。

3. 初期応力

今日の掘削影響試験では、計測坑道近傍に掘削したボーリング孔にて、水圧破砕法および円錐孔底ひずみ法による初期応力測定を実施した。図-3は、両手法による測定結果を解析断面内に投影したものであるが、主応力方向並びに絶対値とも大きく異なっている。本解析の時点で、両測定結果の妥当性が判断ができなかったため、両測定結果を用いて2ケースの解析を実施した。以下、円錐孔底ひずみ法による初期応力を用いた場合をケース1、水圧破砕法のそれを用いた場合をケース2と呼ぶ。

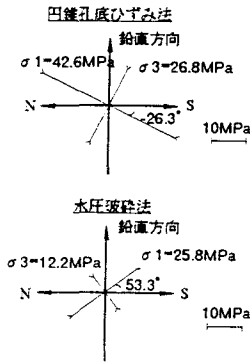


図-3 解析断面内の初期応力

4. 解析対象岩盤のモデル化

4.1 連続体モデル

FEM解析では、岩盤を等方・均質な弾塑性体と仮定し、Drucker-Pragerの降伏基準を適用した。設定した入力パラメータを表-1に示す。弾性係数は、計測坑道近傍に掘削したボーリング孔の健岩部で実施した孔内载荷試験結果の平均値を採用し、C, φは計測坑道近傍のボーリングコアを用いた3軸圧縮試験結果より求めた。

表-1 入力パラメーター一覧

弾性係数 (GPa)	14.82
ポアソン比	0.27
C (MPa)	40
φ (°)	45

4.2 不連続体モデル

不連続体モデルによる解析では、割れ目の幾何学的配置とその力学特性が解析結果に大きな影響を与える。他方、一般に岩盤中には地質学的に異なる種類の割れ目が存在し、それらの割れ目の幾何学的特性（走向、傾斜、分布、大きさ）や力学特性は異なることが想定される。このような観点から本DEM解析では、地質学的に分類された割れ目の特徴を反映した不連続性岩盤のモデル化を試みた。なお、DEM解析は、基質部を弾性体と仮定し、割れ目の破壊基準にはBarton-Bandisモデルを採用した。

1)異なる形態を持つ割れ目の分布特性と力学特性の検討

地質学的な割れ目の性状（変質の有無、充填物の有無や種類、厚さ等）と力学特性との相関性を検討するため、室内ジョイントせん断試験を実施した。ここでは、コア観察で記載のある項目と割れ目の力学特性との関係を事前に検討し、最終的に充填物の幅、充填物の種類、変質の程度を割れ目の力学特性と相関性のある指標として抽出した。表-2、図-4にせん断試験結果及び割れ目分類指標～力学特性との関係の一例を示す。サンプル数は少ないが、前述のパラメータの中では割れ目充填物の種類（A,B,C,D）と割れ目の力学特性との間に相関が見られた。また、本試験結果をMohr-cloumb及びBarton-Bandisモデルでフィッティングした結果、Aタイプと他の3種の割れ目の力学特性に明瞭な差が見られた(図-4)。この結果に基づき、Aタイプとそれ以外の割れ目を区別して取り扱うこととした。

表-2 ジョイントせん断試験結果一覧

充填物の種類	A	B	C	D	B,C,Dの平均値
初期垂直応力 (MPa/mm)	49.2	60.9	58.1	44.8	54.6
せん断臨界性 (MPa/mm)	4	3.9	2.3	7	4.4
摩擦角(deg.)	45.5	54.8	57	56	55.9
粘着力(MPa)	0.08	0.11	0.14	0.11	0.12
JCS(MPa)	45.3	57.1	63.2	68.8	63
JRC	5.3	6.2	7.1	4.5	5.9

(注) 各充填物の種類は、以下の通りである。
A 充填物のほとんどが粘土鉱物で、母岩及び充填鉱物の分離や破壊があるもの
B 充填物のほとんどが鉱物で、母岩及び充填鉱物の分離や破壊がないもの
C フィルム状の充填物を含むもの。または、充填物を含まず割、変質があるもの
D 充填物を含まず変質がないもの

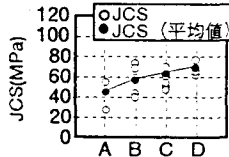


図-4 割れ目充填物の種類～JCS

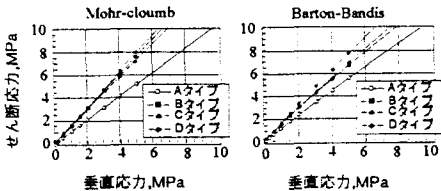


図-5 割れ目の力学特性と充填物の種類

2)DEM 解析モデルの作成

本解析では、2 種類の方法で解析用モデルを作成している。1 つは、割れ目調査データに基づき 2 次元断り扱っている。面内に割れ目を直線として発生させたモデル(モデル 1)³⁾であり、もう一つは水理解析で用いられる手法と同様 3 次元空間内に割れ目を円盤として発生させ、任意の 2 次元断面を切り出す方法で作成したモデル(モデル 2)⁴⁾である。モデル 1.2 の作成に要する割れ目の幾何学的特性に関する統計量の算出には、本解析対象領域を含む釜石鉱山 250m レベル坑道で実施したスキャンライン調査(測線長 400m)³⁾と BTV(総延長 190m)の結果得られた割れ目データを用いた。なお、割れ目の統計量の算出に当たり、測定方向に依存するバイアスを Priest らの方法⁹⁾により補正している。

モデル 1 は、全割れ目データのクラスター分析を行った後、クラスター毎の割れ目傾斜角の確率密度関数を求めるとともに、割れ目調査結果から方向別の割れ目平均間隔を算出し、これらに合致するよう割れ目を発生させた。トレース長については、解析断面内で合理的にブロックが形成されるように試行錯誤的に決定している。モデル 2 は、割れ目の傾斜角分布に Fisher 分布を仮定し、クラスター毎に Fisher 定数を求めるとともに、3 次元空間内に仮想のスキャンラインを設定し、それと交わる割れ目密度が実測値と一致するまで試行錯誤的に発生した。トレース長については対数正規分布を仮定し、割れ目モデルと実際のスキャンライン調査から得られた半トレース長分布と比較して誤差が最小となるような形のものを採用した。

以上の手順で作成したモデル 1.2 を図-6 に示す。モデル 1 は大きさ、形状、配列が規則的なブロックが配列するのに対し、モデル 2 は相対的にランダムになっている。なお、モデル 1.2 作成にあたっては、前述のジョイントせん断試験結果を考慮し、クラスター別に割れ目充填物 A タイプの存在率を計算した後、クラスター内の全割れ目からその存在率に相当する数を A タイプの割れ目とした(図-7)。また、割れ目の力学特性については、ジョイントせん断試験の平均値として表-3 に示すように設定した。基質部の弾性係数は、先の FEM と同様に孔内載荷試験結果の平均値を用いている。

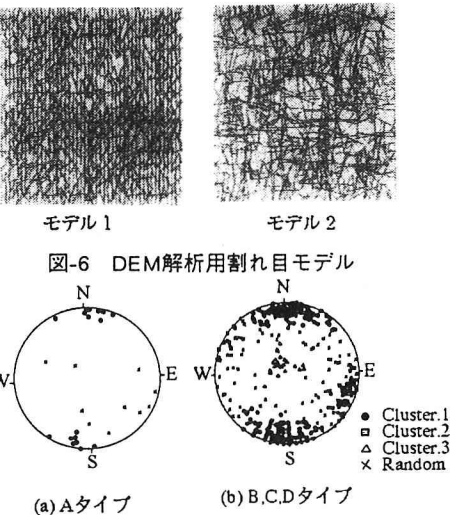


図-6 DEM解析用割れ目モデル

(a) Aタイプ (b) B,C,Dタイプ

図-7 クラスター分析結果

表-3 入力パラメーター一覧

	充填物の種類 (A)	充填物の種類 (B,C,D)
初期垂直剛性 (MPa/mm)	49.2	54.6
せん断剛性 (MPa/mm)	4	4.4
摩擦角(°)	45.5	55.9
粘着力(MPa)	0.08	0.12
JCS 0 (MPa)	45.3	63
JRC0	5.3	5.9

5.解析ステップ及び解析ケース

FEM、DEM とも、①初期応力解析②計測坑道の掘削③試験坑道の掘削という 3 ステップで実施した。解析数は、前述の結果を組み合わせ、全 6 個設定した(表-4)。

表-4 解析手法、初期応力の組み合わせ

	FEM	DEM	
		モデル 1	モデル 2
ケース 1	円錐孔底ひずみ法による初期応力測定結果を使用		
ケース 2	水圧破砕法による初期応力測定結果を使用		

6.解析結果

6.1 解析結果

全体的な傾向としては、FEM、DEM 解析いずれにおいても、計測坑道周辺の変位・応力分布は、初期応力を反映し、ケース 1 では左上側と右下側が、ケース 2 では右上側と左下側の変位が大きくなっており、最大せん断応力はそれと対称な位置に集中する傾向を示す(図-8)。最

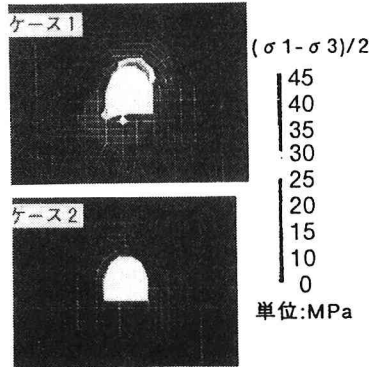


図-8 試験坑道掘削時のせん断応力分布(FEM)

大変位量は、FEMが、mmオーダーの変位量に対し、DEMが数cmオーダーの変位を示す（表-5）。これは、DEM解析の割れ目モデルにおいて、可動ブロックが坑道壁面近傍に形成されていることによる（図-9）。

試験坑道周囲の変位分布（図-10）については、ケース1の場合、坑道壁面から1D程度まで解析手法による差が見られるが、それ以深ではFEM,DEMの差はほとんどない。他方、ケース2については、FEMおよびモデル2が前述の傾向と同様であるのに対し、モデル1については、特に天盤部において坑道壁面から3D以上離れた地点までFEM等と比べ大きな鉛直変位が生じている。これは、①ケース2は初期応力が小さく、不連続面上の垂直応力が小さくなるため、不連続面の変位が生じやすい、②モデル1は、モデル2に比べブロック配列が規則的でありかつ解析に考慮した割れ目の多くがほぼ垂直傾斜であった、といった2つの要素が複合した結果と考えられる。

坑道周囲の応力分布については、モデル1.2の場合、分布形が不連続面の影響によりかなり不連続になっている。また、応力値はFEMに比べ全般的に低く、特に坑道壁面から約0.5D（D=3.5m）までの領域で差が大きい（図-11）。これは、坑道壁面近傍での変形の大部分が不連続面に支配されているためと考えられる。なお、いずれの解析ケースにおいても、計測坑道および試験坑道掘削時に周辺岩盤中の塑性領域及び不連続面の破壊は発生していない。試験坑道周囲の不連続面挙動は、平均開口量が0.1mm未満で、坑道壁面近傍を除き大きな変位は認められない（図-9、表-6）。

表-6 解析結果一覧(DEM)

	モデル1		モデル2	
	ケース1	ケース2	ケース1	ケース2
最大開口変位(mm)	2.9	2.3	1.5	2.7
最大せん断変位(mm)	9.5	15.5	4.32	10.92
平均開口変位(mm)	0.02	0.09	0.05	0.07
平均せん断変位(mm)	0.04	0.07	0.04	0.05
開口した接触点数	34	101	84	41
せん断破壊した不連続面数	0	0	0	0

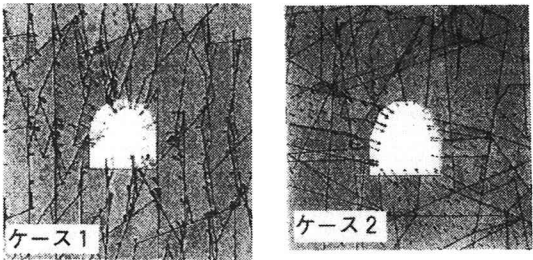


図-9 変位ベクトル図

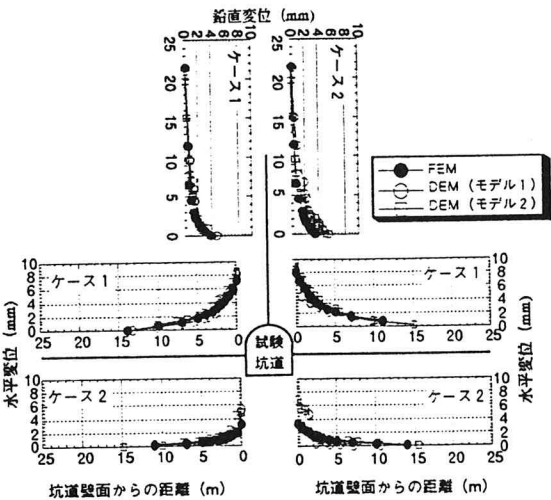


図-10 試験坑道周囲の変位分布

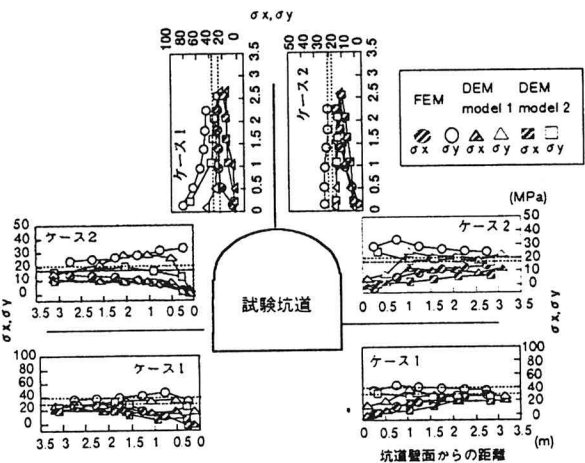


図-11 試験坑道周囲の応力分布

7. 予測解析結果の妥当性の検討

本予測解析においては、異なる手法で得られた異なる初期応力場を用いた解析を実施した。これらの予測解析としての妥当性を検討するため、計測坑道掘削時の坑道断面形状測定結果と解析結果を比較した。図-12に測定結果を示す。なお、本測定は、坑道壁面近傍に生じた浮き石を完全に除去した後実施した。

計測坑道掘削中の状況を観察すると、浮き石は発破直後から小規模な山なりを伴い時間の経過とともに発生した。その発生箇所は、坑道形状測定結果に顕著に現われているように計測坑道右上部に集中しており、この現象は250mレベル坑道周辺の応力場を反映したものと考えられる。一方、この結果とケース1、2の解析から得られた最大せん断応力分布を比較すると、ケース1の場合の最大せん断応力集中域は計測坑道右上側および左下側に生じており、坑道掘削時の浮き石発生箇所とはほぼ対応している。他方、ケース2の場合には、最大せん断応力集中域が左上側および右下側に生じており、浮き石発生箇所とは対応していない。解析上得られる最大せん断応力は一軸圧縮強度の3割程度であるが、カナダURLのように一軸圧縮強度の30%程度でき裂が生じる事例が報告されていることを考慮すると、予測解析としては、円錐孔底ひずみ法により計測された初期応力場を採用するのが妥当であると考えられる。

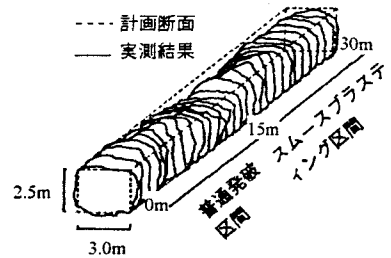


図-12 計測坑道断面形状測定結果

8. まとめ

新規坑道掘削に伴う坑道周辺岩盤の変形挙動予測解析を実施した結果、以下の知見が得られた。

- 1) FEM 及び DEM 解析結果とも、計測坑道および試験坑道周辺岩盤の変位の方向、大きさ及び応力状態は初期応力に依存しているが、掘削影響試験サイト周辺では、坑道壁面から0.5D程度の範囲での変位・応力分布に解析手法の違いによる影響が顕著に現われることがわかった。また、2種類の異なる不連続体モデルを用いた解析の結果、初期応力が小さい場合に、不連続面の幾何学的配置の違いが解析結果に大きな影響を与えることがわかった。
- 2) 計測坑道掘削後の断面形状測定結果等と本予測解析結果を比較した場合、初期応力として円錐孔底ひずみ法による結果の妥当性が高いと考えられる。

今後、試験坑道掘削時に取得する変位、ひずみ、亀裂開口量データ等と解析結果の比較を行い予測の妥当性を検証するとともに、事後解析を実施し不連続性岩盤のモデル化に関する既存手法の適用性評価を行う。

9. 参考文献

- 1) 桜井春輔、清水則一：不連続性岩盤の解析手法の現状，土と基礎 Vol40-11, pp.39~44, November 1992
- 2) 佐藤稔紀・杉原弘造・松井裕哉：Geoscientific studies at the Tono mine and the Kamaishi mine in Japan, Proc. of the 1995 ISRM International symposium, pp.47~51, September, 1995
- 3) 木梨秀雄、白旗秀紀、永久和正、玉野達、田中達也：原位置き裂調査に基づく岩盤内き裂分布の推定とDEM解析への応用、第26回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.431~435, 1995
- 4) 天野悟、木梨秀雄、田中達也：不連続性岩盤におけるケーブルボルトの作用効果に関する解析的検討、第5回トンネル工学研究発表会論文報告集, pp.155~160, 1995
- 5) 笹本 広 他：釜石鉱山250mレベル坑道における割れ目特性の予察的調査、動燃 KTR-93-02, 1993.10
- 6) 木梨秀雄、天野悟、田中達也：不連続面分布の確率論的モデル化と地下空洞の安定解析、第27回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp.16~20, 1996