

三軸圧縮試験による硬岩の力学特性評価と 数値解析によるその構成式の評価

青野 泰久^{1*}・奥野 哲夫¹・中谷 篤史¹・西 琢郎¹

¹清水建設株式会社 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17）

*E-mail: y.aono@shimz.co.jp

大規模岩盤空洞の基本設計では、種々の調査による大まかな岩盤等級分布の推定結果や岩石の室内試験結果等を用いて、数値解析により概略検討を行う場合がある。本研究ではこのような段階の検討において、現位置岩盤の強度、変形特性の評価を行うために、岩石の多段階三軸圧縮試験を行い、破壊時の挙動からHoek-Brownの破壊規準のパラメータを決定し、数値解析により構成式の妥当性の検討を行った。

試験では降伏時には塑性ひずみ増分ベクトルが破壊曲線に直交せず、体積膨張が生じない場合があることが分かった。また、数値解析では弾性域の線形な変形挙動から、破壊後のひずみ軟化、残留強度までの全体的な挙動について概ね再現できた。また、試験と同様のせん断帯の発達が再現できることも確認した。

Key Words : triaxial test, Hoek-Brown criteria, hard rock, plastic strain incremental vector, flow rule

1. はじめに

硬岩を対象とした大規模岩盤空洞に関する事前の基本設計等では、対象領域全般にわたる詳細な地質情報が得られていない段階であることから、地質踏査や限られたボーリング調査結果から大まかな岩盤等級分布の推定結果や岩石の室内試験結果等を用いて、弾塑性掘削解析により空洞の成立性検討や支保工の概略検討を行う場合がある。¹⁾²⁾

本研究ではこのような段階の検討において、GSI (Geological Strength Index)³⁾⁴⁾⁵⁾による現位置岩盤の強度、変形特性の評価を行うことを前提に、試験値からHoek-Brownの構成式のパラメータの評価と塑性ひずみ増分ベクトルについて検討を行った。

一般に岩石・岩盤の破壊後の挙動も含めた予測解析では、降伏規準、降伏後の塑性流動則、硬化・軟化則に基づく構成則が必要である。Hoek-Brownの破壊規準は多数の岩石試料に基づいて構築された破壊規準であるが、Pan et al.⁶⁾やCundall et al.⁷⁾は、これを近似的に降伏規準とみなして塑性変形時の挙動を検討している。岩石の破壊後の挙動も含めた一般的な概念として、偏差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ と最大主ひずみ ε_1 の関係、体積ひずみ ε_{vol} と ε_1 の関係を図-1に示す。図-1は体積ひずみの増分が正(圧縮)から負(膨張)に変化する点で降伏し、ひずみ軟化が生じることを示している。

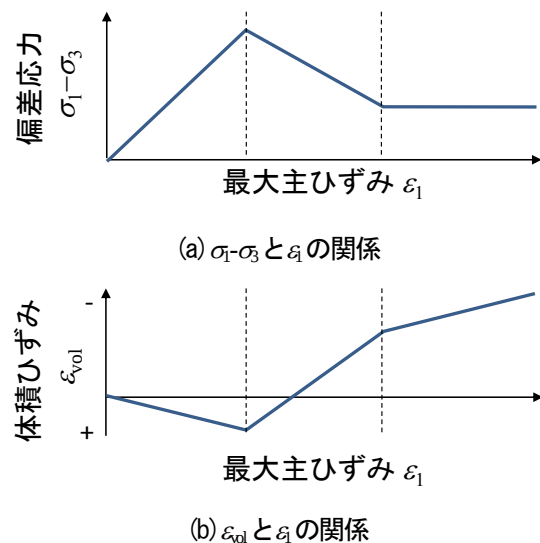


図-1 岩石の挙動の概念図

本論文では ε_{vol} の増分が正から負に変化する点を降伏点と見なした試験とHoek-Brownの破壊規準を用いた解析を行った。試験では花崗岩と角閃岩を用いて三軸圧縮試験を実施し、載荷と除荷から得られた塑性ひずみから降伏時の塑性ひずみ増分ベクトルを求めその特性を考察した。また、一軸圧縮試験を実施し、三軸圧縮試験の結果を含めて構成式のパラメータを決定し、その構成式を用いて三軸圧縮試験を模擬した数値解析を行い、その力学挙動の再現性から本モデルの妥当性を検討した。

2. 試験方法

(1) 岩石試料とその物性値

a) 岩石試料の種類

本論文では1個のブロックから供試体を形成した花崗岩(茨城県笠間市稲田産)と、複数の地点から採取した角閃岩(岐阜県飛騨市神岡産)を用いて試験を行った。(図-2)

b) 試験に用いた試料の物性値

本論文で用いた岩石試料の湿潤状態の物性値の平均値を表-1に示す。

(2) 試験方法

a) 三軸圧縮試験装置の構成

三軸圧縮試験装置は制御PC、油圧により稼働する軸方向載荷装置と拘束圧を加えるための液圧発生装置、間隙水圧を加えるための空気圧制御盤により構成される。

b) 試験方法

本試験は地盤工学会基準(JGS2534-2009)⁹⁾を基に圧密排水条件で多段階三軸圧縮試験と一軸圧縮試験を実施した。試験は供試体の作製、飽和、B値チェック、圧密、載荷の手順で実施した。載荷速度は0.005mm/s、除荷速度は3kN/sで1s毎にサンプリングを実施した。拘束圧は三軸セル内に油を満たした状態で加え、0.5MPaの間隙水圧を加えた。

試験ケースを表-2に示す。1本の供試体に3種類の有効拘束圧を作用させ、載荷と除荷を3サイクル分を行い、4サイクル目に3サイクル目の拘束圧の状態のまま供試体が破壊するまで載荷を行った。除荷を行うタイミングは、体積ひずみ ε_{vol} の増分が正から負に反転するときとした。 ε_{vol} の増分は測定機器のノイズを含んでおり、 ε_{vol} は0.001~0.002%の増減を繰り返しながら徐々に増加しているため、 ε_{vol} が0.003%以上減少したときに除荷を行った。 ε_{vol} は軸方向ひずみ ε_{axi} 、径方向ひずみ ε_{rad} を用いて、以下の式から算出した。

$$\varepsilon_{vol} = \varepsilon_{axi} + 2\varepsilon_{rad} \quad (1)$$

花崗岩は各ケースで2本ずつ、角閃岩は各ケースで1本ずつ試験を実施した。

c) 計測項目、計測機器

本試験では供試体に加える軸方向の荷重を載荷装置の上部のピストンに取り付けたロードセルにより計測を行った。また、塑性ひずみ増分ベクトルを求めるために、供試体の平均的な変位から軸と径方向のひずみを求める必要があったため、軸方向と径方向の変位の計測機器にLDT(Local Deformation Transducer)を2個ずつ用いて計測を行った。供試体の変位を直接計測するために、供試体にナットを設置しメンブレンを被せ、ナットの部分に穴を開け、ナットにLDTのターゲットとヒンジを設置した

表-1 岩石試料の物性値

試料名	単位 体積 重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	P波 速度 V_p (km/s)	S波 速度 V_s (km/s)	間隙率 $n(\%)$
花崗岩	25.8	5.30	2.60	0.677
角閃岩	27.0	5.87	2.88	0.444

表-2 試験ケース

ケース	岩種	有効拘束圧(MPa)			
		1 (サイクル目)	2	3	4
1-1, 1-2	花崗岩	2.0	4.0	6.0	6.0
1-3	角閃岩				
2-1, 2-2	花崗岩	8.0	10.0	12.0	12.0
2-3	角閃岩				
3-1, 3-2	花崗岩	13.0	14.0	15.0	15.0
3-3	角閃岩				
4-1, 4-2	花崗岩	16.0	17.0	18.0	18.0
4-3	角閃岩				



(a) 花崗岩 (b) 角閃岩

図-2 岩石試料の写真

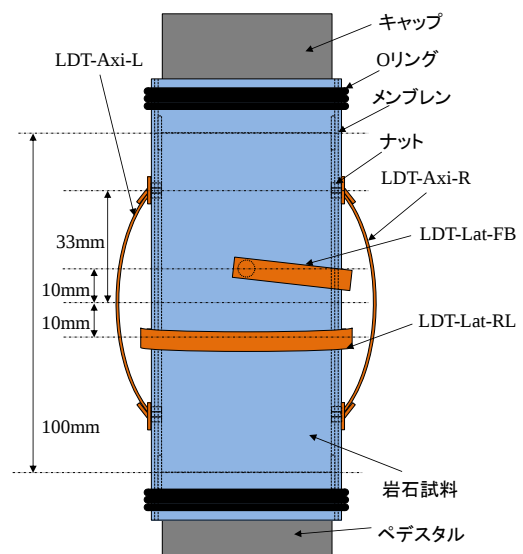


図-3 LDT の設置箇所(正面図)

(図-3). 三軸セル内に満たした油が供試体に流入するのを防ぐために、穴はシーラントで塞いだ。

3. 試験結果

(1) 三軸圧縮試験、一軸圧縮試験の結果

本論文では多段階三軸圧縮試験の1サイクル目の結果を中心に示し、以下の検討を行う。

a) 各拘束圧での降伏時の軸応力

三軸圧縮試験、一軸圧縮試験結果の降伏時、破壊時の軸応力 σ_1 と有効拘束圧 σ_3 の関係と、破壊曲線を図-4に示す。図中の丸数字はサイクル数を示している。破壊曲線の求め方は後述する。同じ岩種でも使用した岩石試料により σ_1 の大きさが異なりばらつきが見られたが、拘束圧が大きくなるほど σ_1 が大きくなる傾向が見られる。

b) 応力-ひずみ曲線

有効拘束圧 σ_3 が 8.0MPa における花崗岩と角閃岩の軸応力と軸ひずみ、径ひずみ、体積ひずみの関係を図-5に例示する。下の図は上の図の目盛りの値を変更したものである。2種類の岩種ともに軸方向の残留ひずみ(塑性ひずみ)は圧縮側(正)に、径方向の塑性ひずみは膨張側(負)に生じている。

(2) 変形・破壊挙動に関する考察

a) Hoek-Brown の破壊規準のパラメータ決定

Hoek-Brown の破壊規準を式 (2) に示す。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (2)$$

ここで、 σ_{ci} は一軸圧縮強さ、 m_i はHoek-Brownの岩石

の破壊規準定数、 s 、 a は岩盤特性に依存する材料定数である。Hoek-Brownの構成式は以下の特徴を持つ。

- ① 拘束圧の増加により、圧縮強さが増加し、その増加割合は減少する。
- ② GSI と室内岩石試験の結果を用いて岩盤の構成式のパラメータを決定することができる。^{3,4,5)}
- ③ 拘束圧が大きくなるほど塑性ひずみ増分ベクトルの塑性体積ひずみ成分が減少する効果を表現することができる。(非関連流れ則にも適用可能である)⁷⁾

構成式の σ_{ci} 、 m_i はHoek et al.(1997)³⁾の文献をもとに一軸圧縮強さと三軸圧縮試験の結果から求めることができ、 s と a はGSIを用いて式(3)、(4)から求まる。⁹⁾

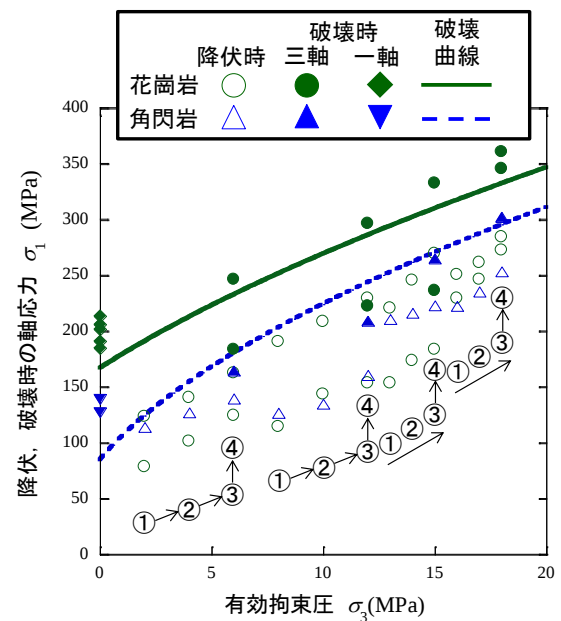
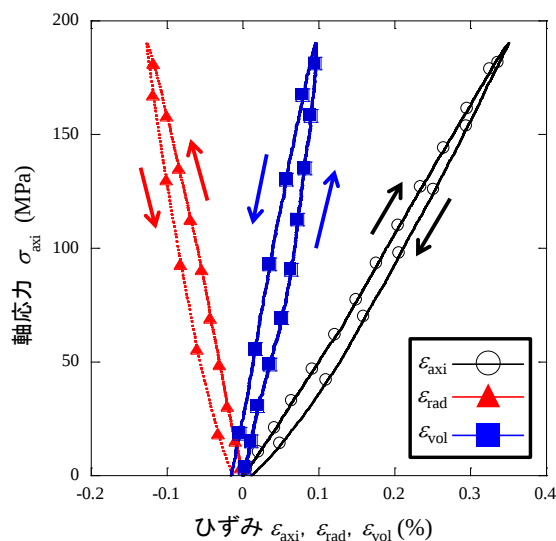
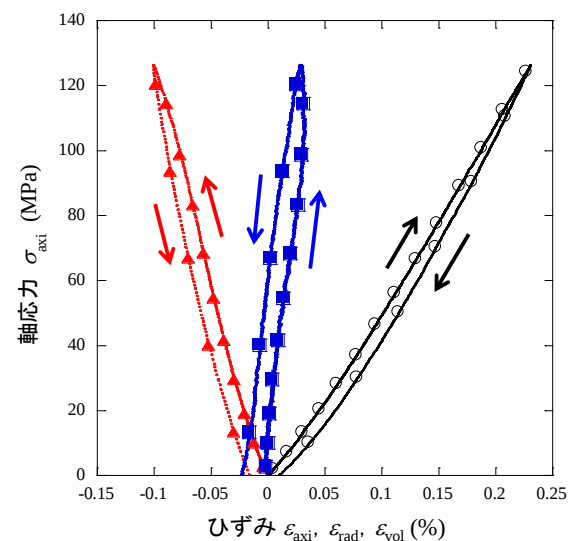


図-4 σ_1 - σ_3 関係



(a) 花崗岩



(b) 角閃岩

図-5 σ_{axi} と ε_{axi} 、 ε_{rad} 、 ε_{vol} の関係

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left\{ \exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right\} \quad (4)$$

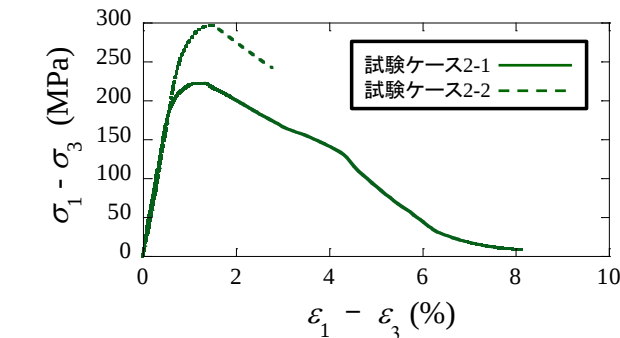
D は岩盤の乱れの度合いを示す因数であり、岩石試料はインタクトであると考えられることから、 D は0、 GSI は100となり、式(3)、(4)より s は0、 a は0.5となる。本試験では4サイクル目(破壊時)の試験結果を用いて σ_b 、 m の値を決定した。

b) 塑性ひずみ増分

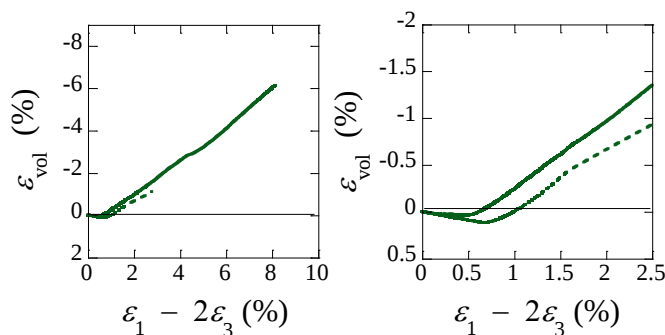
主応力空間における塑性ひずみ増分ベクトル、破壊曲線を図-6に示す。花崗岩では4ケースともに塑性体積ひずみ増分ベクトルが破壊曲線に直交せず、体積膨張が生じていないことがわかる。角閃岩では多少ばらつきもみられるが、塑性ひずみ増分ベクトルは破壊曲線に必ずしも直交していない。

c) 供試体の全体的な挙動

について、花崗岩の三軸圧縮試験結果(ケース2-1、2-2における4サイクル目)における、 $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 関係、 ε_{vol} と $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ 関係を図-7に示す。試験ケース2-2ではひずみ軟化中にLDT-Axi-Rが外れたため、外れるまでのデータを記載した。供試体はピーク強度に達した後にひずみ軟化していることがわかる。



(a) $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 関係



(b) ε_{vol} と $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ 関係(左:全体図, 右: ε_{vol} 反転部拡大)

図-7 試験結果

4. 数値解析による三軸圧縮試験再現解析

本解析では弾性域から破壊後の軟化、残留強度までの全体的な挙動を再現することを目的とした。モデル化を行うに当たり、既往の文献^{3), 7), 9), 10)}より引用した方法を用い求めた各パラメータを表-3に示す。 $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 関係におけるひずみ軟化時の傾きの係数 η とダイラタンシー角 ψ ¹⁰⁾は試験ケース2-1、2-2の平均値を用いて $\eta=0.14$ 、 $\psi=44.5^\circ$ とし、残留強度への低下率を示すパラメータ β ⁷⁾は花崗岩を用いて行った全試験結果の平均値を用い、 $\beta=0.80$ とした。このモデル化の概要を図-8

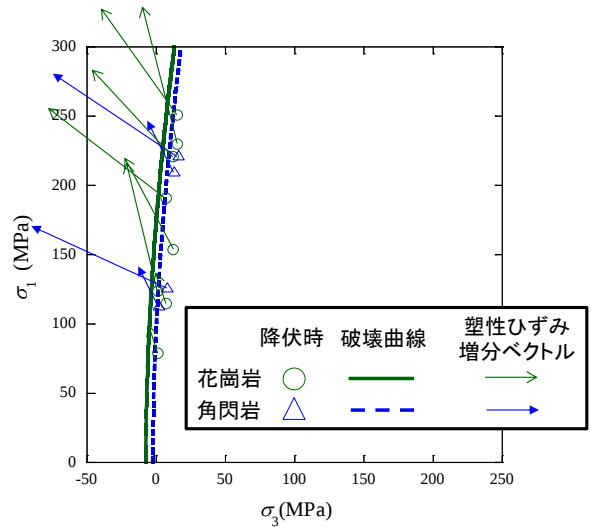
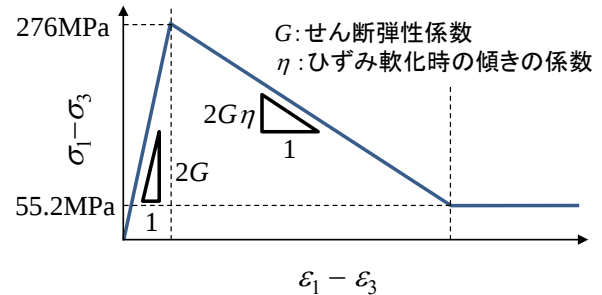
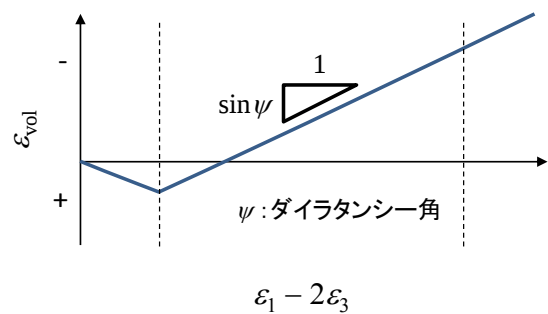


図-6 主応力空間における破壊曲線、塑性ひずみ増分ベクトル



(a) $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ 関係



(b) ε_{vol} と $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ 関係

図-8 モデル化した供試体の挙動(拘束圧 12MPa での载荷例)

に示す。試験結果では残留応力に達した以降のデータが無いが、図-1より残留応力は一定と見なしモデル化を行った。

(1) 三軸圧縮試験の解析方法

本解析には3次元有限差分法解析プログラムであるFLAC3Dを使用した。以上に示したHoek-Brownの破壊規準に加えて、構成式の詳細はCundall et. al.(2003)⁷⁾と同様である。

メッシュ数は 15360 個(径方向に 8 分割, 周方向に 48 分割, 高さ方向に 40 分割)であり, 花崗岩の円柱供試体を対象に解析を実施した。構成式の各パラメータは表-3の値を用いた。本解析の拘束圧は, 試験ケース 2-1, 2-2 の破壊時の拘束圧である 12.0MPa とし, 境界条件は下端を完全固定で統一し, 上端の水平方向の変形は解析ケース 1 では拘束, 解析ケース 2 では自由とした。载荷過程では供試体の上端を圧縮側に強制変位させ, 収束計算を行った。载荷はひずみ軟化後, 残留応力に達してから $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ が 8.0%に達するまで行った。

(2) 解析結果と考察

a) 応力-ひずみ曲線の比較

試験結果と解析結果における $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ の関係と, ε_{vol} と $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ の関係を図-9に示す。図-9(a)の弾性域では解析ケース1, 2はピーク直前まで線形な応力ひずみ関係を

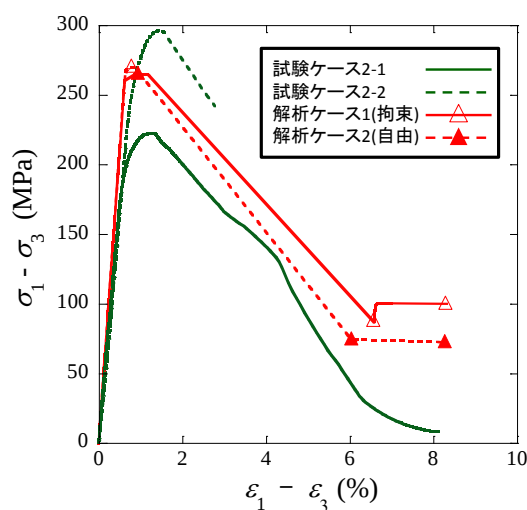
示しているが, 試験ケース 2-1, 2-2は図-4の降伏時の軸応力以上(破壊時の軸応力以下)の軸応力が作用した場合, ひずみ硬化が生じている。ピーク後のひずみ軟化では試験より得られた $2G\eta$ が 5923MPa に対し, 解析ケース 1, 2 では傾きが若干緩い値を示した。また, $\sin\psi$ の値は試験より得られた値が 0.70 に対し, 解析ケース 1, 2 では 0.67, 0.68 であり, 体積膨張に関して良い一致を得た。以上より, 降伏後のひずみ硬化現象の導入について検討が必要と考えられる。

b) 破壊後のせん断帯の比較

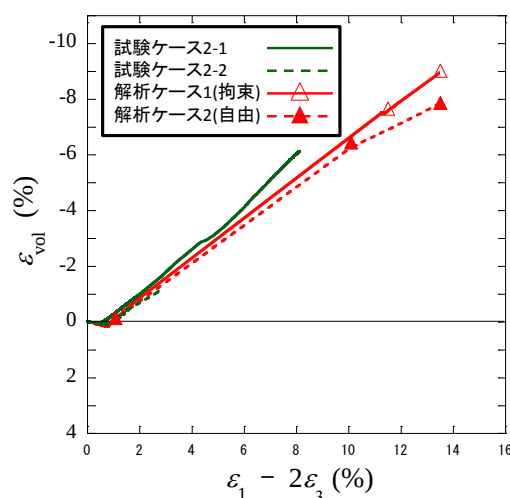
拘束圧が 12.0MPa の花崗岩の供試体の試験後(破壊後)の写真を図-10 に, 解析結果の供試体の最大せん断ひずみのコンター図を図-11 に示す。なお, 図には示していないが, せん断帯が顕著に生じるのはピーク直後のひずみ軟化過程である。図-11 より, せん断帯は軸応力がピーク時までは生じていない。また, 図-10 より試験ケース 2-2 ではたすき状のせん断帯が形成されており, これは図-11 の解析結果上部の境界条件が水平方向が自由の場合に一致している。これより上端の境界条件は水平方向自由に近いと考えられる。解析ケース 1 では下端と上端の水平方向の変位を完全に拘束しており, V 字型のせん断帯が発達している。V 字型のせん断帯は, たすき状のせん断帯に比べ, 水平方向へのずれが生じないため, 図-9(a)の解析ケース 2 に比べ, 解析ケース 1 の残留応力が大きい値を示していると考えられる。

表-3 解析に用いるパラメーター一覧

e_3^p	σ_c (MPa)	m_b	s	a	σ_3 (MPa)	μ	E (MPa)	55000
0.000(破壊発生時)	167.4	23.64	1.0	0.5	0.000	0.609	ν	0.30
3.761×10^{-2}	6.696	0.946	1.0	0.5	12.00	1.000	β	0.80
∞	6.696	0.946	1.0	0.5	1674	9.375	η	0.14
							$\psi(^{\circ})$	44.5



(a) $\sigma_1 - \sigma_3$ と $\varepsilon_1 - \varepsilon_3$ の関係



(b) ε_{vol} と $\varepsilon_1 - 2\varepsilon_3$ の関係

図-9 試験, 解析結果

5. おわりに

花崗岩と角閃岩を用いて多段階三軸圧縮試験を実施し、載荷と除荷から得られた塑性ひずみから降伏時の塑性ひずみ増分ベクトルを求めその特性を考察した。その結果、本試験で用いた花崗岩と角閃岩では塑性ひずみ増分ベクトルが破壊曲線に必ずしも直交せず、体積変化が生じない場合があることが分かった。

また、Hoek-Brown の破壊規準を用いて、試験から評価した構成式のパラメータを用いて三軸圧縮試験を模擬した数値解析を行い、その力学挙動の再現性から本モデルの妥当性を検討した。解析結果は弾性域の線形な変形挙動の後に破壊し、モデル化した破壊、ひずみ軟化、残留強度までの全体的な挙動は概ね良い一致を示した。破壊後のせん断帯形成も含めて三軸圧縮試験の全体的な挙動を再現することができたと考えられる。

今後はより岩石の実挙動に近づけるために降伏後のひずみ硬化現象の導入について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 日本材料学会：ロックメカニクス，pp.190-191，技報堂出版，2002.
- 2) 工藤奎吾，小山俊博，鈴木康正：大規模地下空洞支保設計への数値解析の適用について，土木学会論文集，No.588/VI-38，pp.37-49，1998.
- 3) Hoek, E. and Brown, E. T. : Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 34, pp.1165-1186, 1997.
- 4) 田坂嘉章，宇野晴彦，大森剛志，南 将行，日比野悦久：GSI システムによる地下深部の岩盤物性の推定，土木学会第 57 回年次学術講演会，III-466，pp.931-932，2002.
- 5) 南 将行，日比野悦久，宇野晴彦，田坂嘉章，大森剛志：GSI システムと電研式岩盤分類の関係について，土木学会第 57 回年次学術講演会，III-467，pp.933-934，2002.
- 6) Pan, X. D. and Hudson, J. A. : A simplified three dimensional Hoek-Brown yield criterion. *Rock Mech. & Power Plants*, pp. 95-103. 1988.
- 7) Cundall, P., C. Cananza-Torres and Hart, R. : A new constitutive model based on the Hoek-Brown criterion. *Proc of the Third Int. FLAC Symp.*, pp.17-25, 2003.
- 8) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説，pp.847~853，2009.
- 9) Hoek, E., C. Cananza-Torres and Corkum, B. : Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition, *Proc. NARMS-TAC Conf.* pp.267-273, 2002.
- 10) Javier, A. and Leandro, R.A. : Dilation in granite during servo-controlled triaxial strength tests. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 61, pp.43-56, 2013.



(a) ケース 2-1 (b) ケース 2-2

図-10 破壊後の供試体

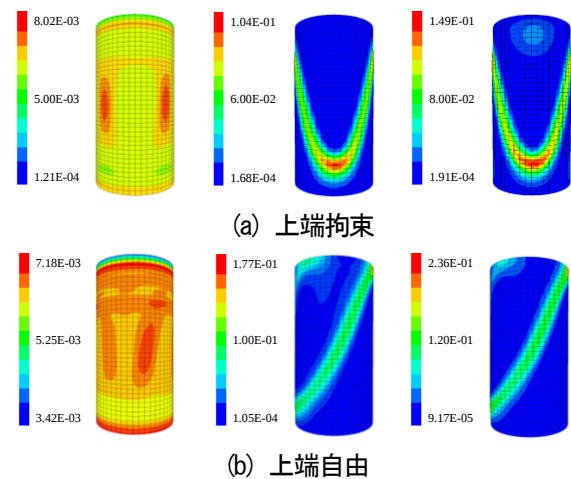


図-11 最大せん断ひずみのコンター図

(左： $\sigma_1 - \sigma_3$ ピーク時，中央：ひずみ軟化終了時，右： $\varepsilon_1 - \varepsilon_3 = 8.2\%$)

EVALUATION OF CONSTITUTIVE EQUATIONS CONSIDERED MECHANICAL CHARACTERISTICS OF HARD ROCKS BY THE TRIAXIAL COMPRESSION TEST AND THE NUMERICAL ANALYSIS

Yasuhisa AONO, Tetsuo OKUNO, Atsushi NAKAYA and Takuro NISHI

Outline design of rock cavern and support is conducted by excavation analysis based on elasto-plasticity. The results of geological reconnaissance, boring and laboratory tests are used in this analysis. In this paper, for the examination of strength and deformation proprieties of rock mass, multiple stage triaxial compression tests are conducted and the parameters of the constitutive equation are evaluated.

As the result, it is showed that when a specimen yields, plastic strain incremental vectors are not normal to the failure curve and the dilatation does not always occur. Moreover, whole behavior of triaxial compression test is simulated by the numerical analysis and the simulated shear band grows in the same formation as the test result. The both results of the analysis and the test show good correspondence.