真三軸試験による 空洞掘削時の岩盤破壊現象の再現

佐藤 稔^{1*}·朝比奈 大輔²

¹電力中央研究所 サステナブルシステム研究本部(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646)
 ²産業技術総合研究所 活断層・火山研究部門(〒305-8567茨城県つくば市東1-1-1中央第七)
 *E-mail: sato3763@criepi.denken.or.jp

地下の掘削時の空洞周辺の岩盤に生じる割れ目性状は,掘削による空洞半径方向の応力解放と中間主応 力の影響を受けると考えられる.本研究では岩石供試体に与える独立した3方向の応力と,ピストンの位 置を制御可能な真三軸試験装置を使用して,応力解放による岩石供試体の変形試験を行った.結果として, 試験として設定した最大主応力は高い条件であったが,異なる三主応力下で最小主応力の応力解放による 供試体の破壊現象を確認できた.また,ピーク応力時の中間主応力の大きさによって破壊時の割れ目性状 が異なる傾向を示した.本手法により空洞掘削時の初期地圧からの複雑な応力経路を模擬でき,より適切 な力学・透水特性を取得できると考えられる.

Key Words : true triaxial test, extension tests, stress paths, stress conditions, sandstone

1. はじめに

地下の空洞掘削の際,応力の変化や掘削時の振動によ り壁面周辺の岩盤内部にき裂が生じ,岩盤の剥落や岩盤 内部でのEDZ (Excavation Damaged Zone;掘削損傷領域) の発生が問題となる.壁面周辺の岩盤の応力状態の変化 としては,初期応力状態から掘削により半径方向に応力 開放され,周方向に応力集中をもたらす.また,これま での多くの地下の初期応力(初期地圧)測定の結果から 初期応力も異方性があることが知られており^{1,2},空洞 掘削が完了するまでにより複雑な応力経路をたどる.

掘削時の応力経路を模擬した要素試験の例として、富 田ほか³⁾では三軸圧縮試験装置を使用し、初期の設定応 力から最小主応力(ज)を減少させながら最大主応力 (ज)を載荷する試験を行い、堆積軟岩にSpalling(板状 の剥落および空洞壁面に平行方向に発生するき裂)現象 が確認された事例の破壊メカニズムの検討を行った.青 柳ほか⁴⁾では、一軸圧縮試験および三軸圧縮試験結果と、 CI(Crack initiation stress)およびCD(Crack interaction stress) という応力一ひずみ線図から得られる値から、壁面近傍 の破壊規準と破壊様式に関する考察を行った.これらの 試験結果は、壁面近傍において空洞半径方向の応力開放 により®が減少し、一軸圧縮に近い条件で半径方向に割 れる破壊が生じたことを示した.しかし、三軸圧縮試験

では空洞の軸方向の応力を再現することが難しく、破壊 様式を整理するためには三主応力のうち中間主応力 (g) の影響を考慮する必要がある. 例えば三軸試験において, 中間主応力のがのと等しい条件で供試体を伸張させる三 軸伸張試験では、一軸圧縮試験よりもo3が高い条件でも 引張割れ目が形成されることがわかっている⁵. 異なる 三主応力条件を模擬できる真三軸試験では、 のの増大に ともないぜい性度が増加し^{0,7},破断面の角度がσi方向に 対して低角になる⁸. また,破断面はσ2方向と平行に発 生する⁹. すなわち現場でEDZやSpalling現象を生じる岩 盤内部の方向性のある割れ目の発生は、σ2による影響が 大きいと言える. したがって, 掘削によって生じる岩盤 内部の割れ目の発生を室内岩石試験で再現するためには, 三主応力を制御できる真三軸試験装置を用いた試験が適 していると考えられる. 空洞周辺の岩盤の破壊現象の把 握のため,近年では真三軸試験装置を用いた様々な応力 経路での試験が行われている^{例えば9,10,11)}が、手法は統一的 でなく、また研究対象の多くは花崗岩を主とする硬岩で あり、堆積岩を対象とする研究は少ない.

そこで本研究では、堆積岩である来待砂岩の供試体に 対して、真三軸試験装置を使用して3方向の応力をかけ た状態からのを減少させる試験を行った.この手法によ り、地下の初期応力状態から掘削によるのの応力解放を 再現した試験が可能になると考えられる.

2. 試料

試験手法の確認のため、本研究では岩石力学分野で広 く利用され^{5,12,13,14},物性が既知の来待砂岩を試料とし て使用した.来待砂岩は島根県宍道湖に分布する中粒凝 灰質砂岩であり、粒径は0.5mm~1.0mmが多く、安山岩 片、輝石、角閃石、斜長石と少量の石英、カリ長石、花 崗岩質岩片などで構成される⁵⁾.また、まれに斜交葉理 が確認され、粒子配列による力学的異方性がみられる¹⁰. 丁場からブロックを切り出し、直交する3方向のうち鉛 直方向をZ方向、任意の軸をX、Y方向とし、35×35× 70 mm³の角柱形に成形した(**写真-1**).本研究では3つ の供試体(KM01, KM02, KM03)を使用して試験を行 った.

3. 試験方法

(1) 供試体条件

真三軸試験は油圧による拘束圧下で2方向の主応力を 独立制御する真三軸試験手法で行った (図-1).本手 法のメリットとしては、3方向剛体ピストンよりも角の 影響が小さく、高い拘束圧下で間隙水圧を制御した試験 が可能なことである.各方向の変位は高感度変位計LDT (Local Deformation Transducer)を使用して測定し、3方向そ れぞれのひずみを算出した.岩石供試体の上下左右にエ ンドピースを取り付け、シリコンゴムを使用して供試体 表面を被覆した.なお、供試体表面とエンドピースの間 に生じる摩擦を防ぐために、高橋ほか¹⁵を参考に減摩剤 としてシリコングリスを塗布したテフロンシートと銅箔 を供試体とエンドピースの間に装着した.

(2) 試験条件と応力経路

載荷する応力は切り出した供試体の鉛直方向を ∞ , 互 いに垂直な2軸を σ x, σ yとした. 基本的には σ x= σ s, σ y= σ , σ z= σ として載荷を行うが,試験段階によって応力 値の大きさの順序が入れ替わることもある. 応力経路は 図-2に示される通り,最初に拘束圧を目標値まで上昇さ せ ($\pm O \rightarrow A$),その後 σ yの設定値まで σ y= σ zとなるよう にストローク制御で載荷した ($\pm A \rightarrow B$). 拘束圧を保 ったままY方向のピストンを固定させ,Z方向を一定速 度ストローク制御(0.02 mm/min)で載荷した ($\pm B \rightarrow \pm$ C). σ zの目標値に到達した後ストローク制御によりZ 方向のピストンを固定し、 σ xを1.0MPa/minで下げた(\pm C→ $\pm D$).供試体が破壊して十分に σ zが応力降下した ところで試験を終了した.図-2の点線で示されている応 力値は、ピストン位置を固定しているために、岩石の変 形・破壊に応じて応力値が変化することを示している.



写真-1 来待砂岩の角柱形供試体



図-1 真三軸試験の圧力容器内の様子



図-2応力経路の概念図

表-1点Cにおける応力値(測定値)

点C	$\sigma_{\!X}^{}\!(MPa)$	$\sigma_{Y}\!(MPa)$	$\sigma_{Z}(\text{MPa})$	$\sigma_{Z}\text{-}\sigma_{X}\!(MPa)$	$\epsilon_{V}^{(i)}$
KM01	11.5	13.7	69.9	58.4	0.11
KM02	13.8	27.2	73.7	59.9	0.09
KM03	23.0	26.8	82.4	59.4	0.21

まとめると、点C以降はZ方向とY方向の変形を拘束した 状態でoxの除圧をする、真三軸試験装置を用いた2方向 の平面ひずみ-伸張試験と言える.

なお、今回の試験では応力解放にともなう供試体の破壊現象を把握するため、oxを下げる段階(点C)までに約60MPaの高い差応力を設定した(表-1). 応力の測定はoxは制御されている油圧、oz_oxは圧力容器内部の荷重計により測定した荷重値、oxは剛体を通し圧力容器外側の荷重計で測定した荷重値をそれぞれ応力に変換した値である.

4. 試験結果

図-3はそれぞれの試験の応力値を時系列で整理した図 である. 点A~点Dは図-2に対応しており,始点は点A とした. 点Cでは一度差応力(σz-σx)の値が少し減少し ているが,これは点Cでσzの載荷を止めたことによるリ ラクゼーションである. リラクゼーションの後はいずれ の供試体も, σxの減少とともにσzも減少しているが,比 較的σzの減少量はσxよりも小さく,結果的にσz-σxは上昇 した. σz-σxがピークを迎えたあとには急激に応力降下 をともなう破壊を示した.

図-4に応力-ひずみ線図を示す. ひずみは圧縮を正, 膨張を負としており、 ax, ay, azはそれぞれ応力(ox, oy, oz)と一致する方向のひずみである. avは体積ひず みであり、 av=ax+ay+azである. 点A~点Dは図-2に対応 する. 点C以降はY方向とZ方向をストローク制御により ピストンを固定しているが、 ayとazは両方とも供試体破 壊後(点D)まで膨張を示した. axは応力解放により膨 張を示し、特に応力降下以降は膨張量が大きくなり、 av も膨張を示した. av⁰は非弾性体積ひずみであり、点Cに おけるavと、載荷初期から弾性変形を続けた場合のavを 補外した直線(図-4破線部)の差とした. 直線部はozの みを載荷し始める点Bから、差応力ピーク時の半分程度 であるoz-ox=30MPaまでとした. なお、av⁰はKM03で0.21 と大きく、続いてKM01で0.11、KM02で0.09であった (表-1).

表-2は差応力がピークとなったときの応力値とひずみ に関する結果をまとめたものである. σ_m は平均主応力, τ_{cx} は八面体せん断応力, bは中間主応力係数 b = $(\sigma_2 - \sigma_3)/(\sigma_1 - \sigma_3)$ である. bは $\sigma_2 = \sigma_3$ ($\sigma_Y = \sigma_Z$) であれ ばb = 0, $\sigma_2 = \sigma_1$ ($\sigma_Y = \sigma_Z$) であればb = 1となる. 今回の試験 ではKM02でb = 0.3と大きくなった. ひずみに着目すると, ε_Y はbの増加にともない小さくなる傾向が見られた. ま た, ε_X は3供試体とも-0.3%程度を示した.

試験後,供試体を試験装置から取り出し,Y(の)方向から見た状況を写真-2に示す.KM01はせん断破壊を

示しているが、一部は鉛直方向のき裂が連結して破壊に 至った状態が観察された.Z方向と破断面の角度は25° であった.KM02は鉛直方向のき裂同士が連結した状態 が確認された.Z方向と破断面の角度は供試体中央部で 14°であった.KM03は通常の三軸試験と同様なせん断 破壊が観察された.Z方向と破断面の角度は35°であっ た.

5. 考察

oxを減少させる除圧段階(点C以降)ではozも減少し たが、差応力(ozox)は上昇してピーク応力を迎えた. 今回の試験では点C以降ではZ方向のピストン位置を固 定していたため、oxの除圧による&の変化はほとんどな く、ozが減少したと考えられる.現場での計測や弾性モ デルでは掘削時に応力集中が見られるため¹⁰、より実現 象に近い応力変化を再現するためには、応力値もしくは 供試体のひずみ量で制御する必要がある.oyはKM02で は点Cから供試体が破壊に至るまで徐々に減少したもの の、大きくは変化しなかった.この傾向はoy方向のピス トンのみを固定した平面ひずみ試験¹⁴と同様の傾向であ った.

供試体の破壊様式に注目すると、KM01およびKM03 は、通常の三軸試験に近いせん断割れ目が形成された. 一方でKM02はZ方向に対して低角な割れ目を形成して 破壊した. ピーク差応力時のbを比較するとKM02は KM01, KM03よりも大きく、中間主応力による破壊様 式の違いが確認できた. なお、KM02のピーク応力時の oxは6.1MPaであり、中間主応力の大きさ次第では必ずし も拘束圧(最小主応力)が低くない状況においても割裂 に近い破壊が生じると考えられる.

空洞周辺の岩盤中に発生するEDZやSpallingは、いずれ も空洞の半径方向に開口する割れ目が連結することで生 じるため、掘削時の応力変化による実現象把握、力学特 性や透水特性の取得には真三軸試験装置を用いた試験手 法が有力であると考えられる.

6. まとめ、および今後の課題

地下の初期応力状態から掘削による応力解放を再現す るため、真三軸試験装置を使用して3方向の応力をかけ た状態から最小主応力を減少させる試験を行った.結果 としてピーク応力時の中間主応力の大きさによって、破 壊時の割れ目性状が異なる傾向を示した.一方で、各計 測値を用いて比較するには試験数が少ないため、試験数 を増やすことが課題である.また、応力降下後の残留応



力状態の物性評価を行い,既往の三軸試験結果,真三軸 試験結果との比較をすることも,今後工学的利用のため にも重要である.本研究手法の技術的な課題としては以 下の通りである.

・点C以降はY,Z方向のピストンはストローク制御により固定されていたが、供試体の変形により、ひずみが増

peak	σ _X (MPa)	$\sigma_{\rm Y}({\rm MPa})$	σ _Z (MPa)	$\sigma_Z - \sigma_X(MPa)$	σ _m (MPa)	$\tau_{oct}(MPa)$	b	ε _X %	ε _Y %	ε _Z %	ε _V %
KM01	5.8	10.9	65.4	59.6	27.3	27.0	0.09	-0.32	-0.13	0.84	0.40
KM02	6.1	25.3	69.8	63.7	33.7	26.7	0.30	-0.28	0.19	0.72	0.63
KM03	9.0	17.1	73.8	64.8	33.3	28.8	0.12	-0.32	0.03	0.95	0.66

表-2差応力ピーク時の応力値とひずみ



KM02





35mm

写真-2試験後の供試体の様子

減した. これは図-1の通り, LDTによってエンドピース の変位を測定していたため,減摩材や岩石供試体とエン ドピースの隙間の影響があった可能性が考えられる. ひ ずみゲージによる計測と比較を行う.

・より現場で生じる現象に近い応力変化を再現するため、 Z方向応力制御の状態で試験を行えるようにする.

参考文献

Z ↓Y

►X

70mm

- 1) Tanaka, Y. : State of crustal stress inferred from in situ stress measurements, *J. Phys. Earth*, 34, S57-S70, 1986.
- 今西和俊,内出崇彦,大谷真紀子,松下レイケン,中 井未里:関東地域の地殻内応力マップの作成,地質調 査研究報告, Vol. 70, No. 3, pp. 273-298, 2019.
- 3) 冨田敦紀,海老名孝仁,戸井田克,白鷺卓,岸田潔, 足立紀尚:低拘束圧下における堆積軟岩空洞の破壊現 象の考察,土木学会論文集 C, Vol. 63, No. 4, pp. 1054-1064, 2007.
- 5) 藤井幸泰,高橋直樹,高橋学,竹村貴人,朴赫:三軸 伸張試験で形成された来待砂岩中の割れ目の性状と形 成メカニズム,応用地質, Vol. 52, No. 5, pp. 176-183, 2011.
- Mogi, K. : Fracture and flow of rocks under high triaxial compression, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 76, No. 5, pp. 1255-1269, 1971.

- Takahashi, M. and Koide, H. : Effect of the intermediate principal stress on strength and deformation behavior of sedimentary rock at the depth shallower than 200m, *Rock at Great Depth*, ISRM-SPE International symposium, pp. 19-26, 1989.
- 8) Haimson, B. : Consistent trends in the true triaxial strength and deformability of cores extracted from ICDP deep scientific holes on three continents. *Tectonophysics*, Vol. 503, pp. 45-51, 2011.
- 9) Su, G., Shi, Y., Feng, X., Jiang, J., Zhang, J. and Jiang, Q : True-triaxial experimental study of evolutionary features of the acoustic emissions and sounds of rockburst processes, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 51, pp. 375-359, 2018.
- 10)Bai, Q., Tibbo, M., Nasseri, M. H. B. and Young, R. P. : True triaxial experimental investigation of rock response around the mine-by tunnel under an in situ 3D stress path, Rock *Mechanics and Rock Engineering*, Vol. 52, pp. 3971-3986, 2018.
- 11)Wang, S., Xu, W., Yan, L., Feng, X. T., Xie, W. C. and Chen, H. : Experimental investigation and failure mechanism analysis for dacite under true triaxial unloading conditions, *Engineering Geology*, Vol. 264, 105407, 2020.
- 12)朴赫,高橋学,藤井幸泰,竹村貴人,高橋直樹:来待砂岩の力学異方性と堆積構造に関する研究,その2-弾性波速度・一軸圧縮強度について-,応用地質, Vol. 52, No. 3, pp. 112-120, 2012.
- 13)高橋直樹,高橋学,竹村貴人,藤井幸泰,朴赫:三軸 圧縮および三軸伸張条件における来待砂岩の強度・変 形特性,応用地質, Vol. 53, No. 3, pp. 121-128, 2012.

14)佐藤稔,朝比奈大輔,高橋学:真三軸圧縮試験で形成 された来待砂岩の破断面正常解析,応用地質,Vol.60, No.3, pp. 110-119, 2019. 15)高橋学,李小春,林為人,成田考,冨島康夫:中間主

応力方向の透水係数測定技術について,応用地質, Vol. 43, No. 1, pp. 43-48, 2002.

REPLICATION OF ROCK FAILURES BY UNDERGROUND EXCAVATION USING THE TRUE TRIAXIAL TESTING SYSTEM

Minoru SATO, Daisuke ASAHINA

In rock mass around a cavern, Stress release of radial direction by excavation and the influence of intermediate principal stress can have multiple effects on characteristics of fractures. This study utilized the true triaxial testing system to examine rock deformation under stress release conditions. The results showed that the rock deformation by releasing minimum principal stress in case of high initial stress conditions. In addition, the occurrence of fractures is affected by intermediate principal stress at peak differential stress. Using a true triaxial test apparatus to investigate stress release is applicable for the replication of complex stress paths during excavation and to obtain accurate mechanical and permeability properties of a rock mass around a cavern.