

空洞掘削時の応力状態を考慮した要素試験による堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の一考察

富田 敦紀¹・大槻 英夫²・戸井田 克³・岸田 潔⁴・足立 紀尚⁵

¹正会員 工修 日本原燃株式会社 開発設計部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駱野附504-22)
E-mail: atsunori.tomita@jfnfl.co.jp

²フェロー会員 工修 日本原燃株式会社 開発設計部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村尾駱野附504-22)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

⁴正会員 工博 京都大学 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁵フェロー会員 Ph. D 財団法人地域地盤環境研究所 (〒550-0012 大阪市西区立売堀4-3-2)

余裕深度処分埋設施設の試験空洞掘削時において、空洞壁面に平行方向に発生する新規割目および剥離が確認された。この空洞壁面に平行方向に発生する割目、剥離の発生要因と破壊規準について検討するため、応力経路を模擬した要素試験を実施した。その結果、低拘束圧下での応力経路を模擬した三軸圧縮試験では、破壊モードがSplitting破壊と判断されたのに対して高拘束圧下ではせん断破壊であった。上記の空洞掘削時の割目発生領域は、掘削に伴い応力が解放されて低拘束圧状態にあると考えられることから、空洞周辺に発生した割目はSplitting破壊であると判断した。また、上記要素試験結果に基づく破壊規準により解析を行った結果、空洞周辺岩盤の割目分布状況と整合する解析結果が得られた。

Key Words : test cavern, soft rock, spalling, splitting failure, failure criterion, radioactive waste disposal, excavation disturbed zone

1. はじめに

日本原燃(株)では余裕深度処分埋設施設の基本設計を目的とした調査を実施しており、その一環として青森県六ヶ所村の敷地内で空洞の力学的安定性および掘削影響領域 (Excavation Disturbed Zone : EDZ) の把握を目的とした試験空洞の掘削を実施している。試験空洞は2004年10月に先進導坑の掘削を開始し、2005年6月に掘削工事が終了した。

この試験空洞掘削時において、空洞壁面に平行方向に発生する新規割目および剥離が確認された。この破壊現象は掘削による岩盤応力が誘発するSpallingと考えられる。一般的には、このSpallingは地下深部の塊状岩盤で発生するといわれている¹⁾。当サイトの地山強度比は2以下であり、地圧に比べて強度が低いことから、相対的には高地圧な岩盤に相当する。

そこで、この空洞壁面平行方向に発生する割目および剥離等のSpallingの要因を掘削時の拘束圧変化、応力集中に伴う誘発応力によるSplitting (割裂) 破壊であると解釈し、その破壊メカニズムを検討するために空洞掘削時の応力状態を模擬した要素試験を実施した。さらに、上

記要素試験結果に基づく破壊規準を設定し、FEMによるシミュレーション解析を行い、空洞周辺岩盤を対象に実施したBTV観察結果の割目発生状況と比較した。

本論文は上記検討結果について報告するものである。

2. 試験空洞の概要

(1) 試験空洞諸元および掘削の概要

試験空洞の縦断面図、横断面図を図-1に示す。空洞形状は幅17.7m、高さ16.2mの三心円形状で、空洞延長は71.2mである。なお、試験空洞の土被りは空洞天端位置で約100mである。

試験空洞の掘削は自由断面掘削機等による機械掘削であり、掘削手順は、先進導坑掘削後、アーチ部を切上げ、3段(1段:約3m)のベンチカット工法で施工した。また、各ベンチは中央部を先行掘削した後、側壁部の掘削を行った。

岩盤補強工は吹付コンクリート:300mm、ロックボルト:アーチ部4m、側壁部6m、鋼製支保工(H型钢:250×250×9×14、1mスペーシング)である。

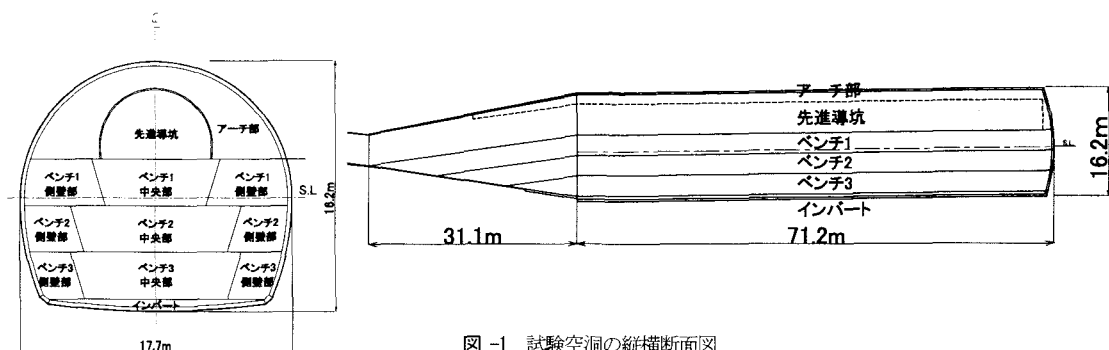


図-1 試験空洞の縦横断面図

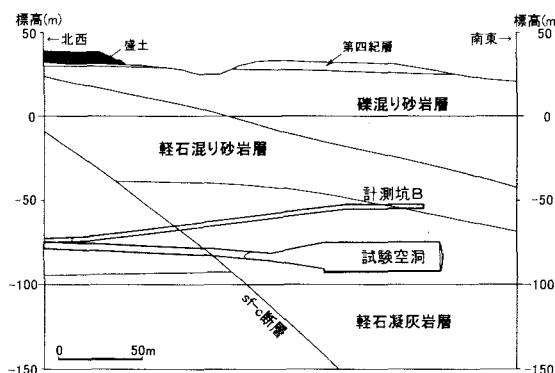


図-2 試験空洞位置付近の地質断面

(2) 試験空洞周辺の地質概要

試験空洞沿いの地質断面図を 図-2 に示す。試験空洞周辺の主な地質は、新第三紀中新世の海成堆積岩からなる鷹架層で、試験空洞は軽石凝灰岩層内に位置しており、径数 mm ～ 10 cm 程度の軽石を 20 ～ 40 % 程度含有している。この軽石凝灰岩層については、全体的には乱堆積構造を呈しているが、軽石の大きさ、含有量から以下の岩質に細区分している。

- ・ 軽石凝灰岩(pt) : 径 2 cm 以上の軽石を多く含む
- ・ 軽石凝灰岩小(tfp) : 径 1 cm 以下の軽石を多く含む
- ・ 凝灰岩(tf) : 径 1 cm 以下の軽石をわずかに含む

試験空洞掘削前に実施したボーリング調査および計測坑掘削時の観察結果では、軽石凝灰岩層には既存の割目はほとんど認められていない。

(3) 初期地圧特性

当サイトの初期地圧測定は、試験空洞の対象岩種である軽石凝灰岩層内で多軸ひずみ法 (3 箇所) および円錐孔底ひずみ法 (3 箇所) により実施している。空洞の水平面内および横断面内の地圧測定結果は 図-3 に示すとおりであり、両測定手法で得られた初期地圧の測定結果は良く一致している²⁾。

水平面内の主応力は等方的な地圧分布であるが、横断面内の主応力は鉛直方向に比べて水平方向の地圧が卓

越しており、側圧比 (σ_z/σ_y) は 1.5 程度である。したがって、試験空洞掘削にあたってはアーチ天端およびインバート部で掘削に伴い応力集中することが予測された。

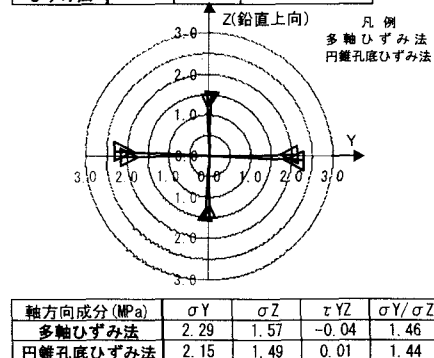
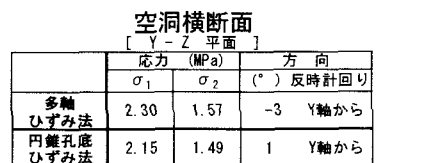
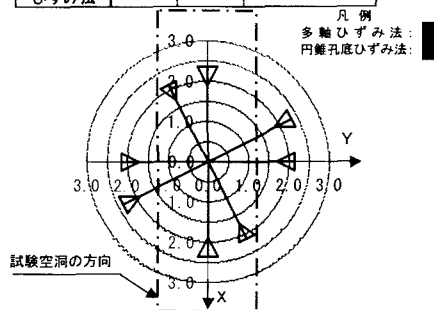
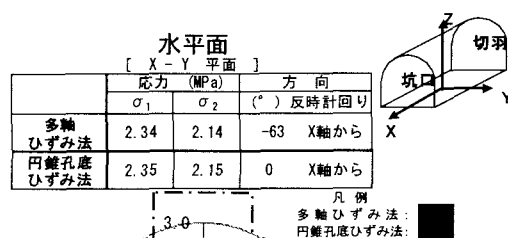


図-3 初期地圧測定結果²⁾

3. 空洞掘削時の剥落、割目の発生状況

(1) 先進導坑、アーチ切上げ時における剥落の状況

先進導坑掘削時に生じた剥落は 13 箇所、アーチ切上げ時に生じた剥落は 38 箇所で見られた。その剥落状況の一例を図-4 に示す。発生位置は天端に集中し、剥落の形状は楕円状に薄く剥がれている場合が多い。また、剥落と岩質との関係については、岩質境界および比較的軽石の少ない軽石凝灰岩小(tf)～凝灰岩(tf)中に生じている傾向にある。



図-4 天端付近の剥落状況

(2) 各ベンチにおける割目の発生状況

ベンチ中央部の掘削後にベンチ側壁部に新規割目が発生しており、その一例を図-5 に示す。この割目は各ベンチ中央部の掘削時に同様の発生傾向を示しており、空洞軸方向に連続している。発生状況の特徴は以下のとおりである。

- ①ベンチ側壁部上部に認められる傾斜角の緩い割目。1段上のベンチ底盤から概ね0.5 m～1.0 m程度の範囲に分布する。
- ②ベンチ側壁部の法尻から1段上のベンチ根足部に向かって延びる割目。一部に割目が雁行し、せん断割目を示す構造が認められるものもある。

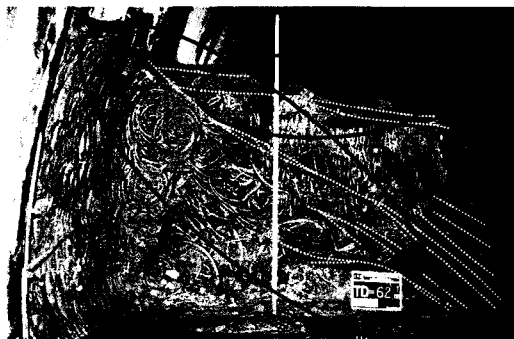


図-5 ベンチ掘削時の側壁ブロックの割目状

(3) 空洞掘削による周辺岩盤の新規割目の発生状況

空洞の各掘削箇所において、BTV および地質観察により確認された新規割目を坑壁からの離間距離および割目と坑壁面の成す角度で整理したものを図-6 に示す。

新規割目の坑壁からの離間距離はアーチ部で最大1.0 mの深度、側壁部で0.4 mの深度、インバート部で2.0 mの深度である。これらの割目のうちBTVにより観察されたものについては、空洞のベンチ掘削過程で新規割目の増加、深部への進展の有無を追跡調査したが、掘削の過程で開口幅の増加、進展は認められていない。

割目の発生深度が比較的に浅い0.7 m以下の割目は、割目と坑壁の成す角度が30°以下と低角度であるが、深度0.7 m以上では高角度の割目となっているのが特徴である。この低角度割目の発生原因は掘削に伴う拘束圧の減少（一軸化傾向）によるSplitting破壊によるものと想定され、高角度の割目は応力集中によるせん断破壊によるものと想定される。

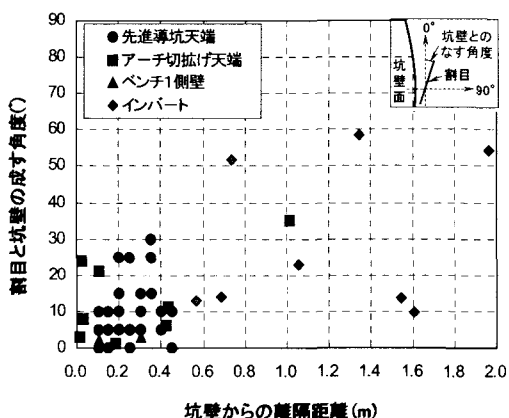


図-6 割目と坑壁の成す角度と掘削壁面からの距離の関係

4. 応力経路を模擬した要素試験

前項までに示したように、空洞掘削時剥落および新規割目の発生状況から、低角度割目および剥落は掘削に伴う拘束圧の減少によるSplitting破壊によるものと想定された。このため、この破壊現象のメカニズムを検証する目的で空洞掘削時の応力状態を模擬した要素試験を実施し、その結果をもとに破壊規準を設定した。さらに、その破壊規準を適用したシミュレーション解析を実施し、掘削により発生した新規割目分布状況の検証計算を実施した。以下にその内容を記載する。

(1) 要素試験概要

剥落および低角度割目の現象を模擬するため、応力経路模擬試験(三軸圧縮試験、一軸圧縮試験ならびに圧

裂引張試験を実施した。

掘削時の岩盤応力変化を模擬する応力経路模擬試験の試験条件は以下のとおりである。

- ・ 供試体寸法は径 50 mm×高さ 100 mm
- ・ 試験条件は圧密非排水(CU)条件とし、圧密圧力は 0.1 MPa
- ・ 載荷速度は 0.072 MPa/min (応力制御)
- ・ 初期地圧条件は多軸ひずみ法による初期地圧測定結果 (空洞横断面) を適用する (図-3 参照)。

$$\sigma_{0\max}=2.30 \text{ MPa}, \quad \sigma_{0\min}=1.58 \text{ MPa}$$

試験時の応力経路は 図-7 に示すとおりであり、供試体の軸圧(σ_1)、側圧(σ_3)をそれぞれ初期地圧状態 $\sigma_{0\max}$ 、 $\sigma_{0\min}$ まで増加させる。その後、軸圧 σ_1 は空洞掘削後状態に相当すると判断される $2\sigma_{0\max}$ まで増加させ、側圧 σ_3 は軸圧 σ_1 が $2\sigma_{0\max}$ になった時点で 0 となるように制御した。

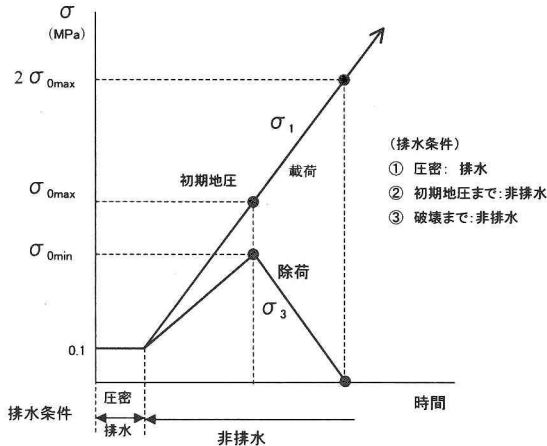


図-7 応力経路と排水条件

(2) 破壊モード

応力経路模擬試験による軸差応力($\sigma_1 - \sigma_3$)、間隙水圧とひずみの関係を 図-8 に示す。軸差応力は側圧の除荷後も上昇している。一方、間隙水圧は側圧を除荷した後に減少し、破壊時には消散していることから、空洞掘削時の挙動を模擬していると考えられる。

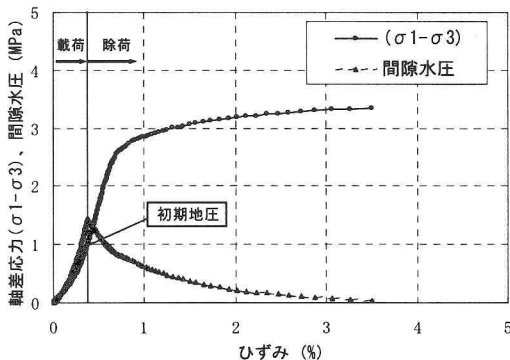


図-8 軸差応力、間隙水圧とひずみの関係

各要素試験で得られた σ_1 と σ_3 の関係を 図-9 に示す。

なお、図中には試験結果から導いた破壊規準(Hoek-Brown, Mohr-Coulomb)を併せて記載しているが、破壊規準については後述する。供試体の破壊状況の一例を 図-10 に示す。応力経路模擬試験の破壊モードは、低拘束圧 ($\sigma_3 < 0.4 \text{ MPa}$) で破壊した場合には、Splitting 破壊であるが、0.4 MPa 以上の高拘束圧ではせん断破壊となっている。なお、一軸圧縮試験では 3 供試体ともに Splitting 破壊である。

この Splitting 破壊は、空洞の掘削解放により生じた剥落および壁面平行方向に生じた低角度割目の現象を説明できるものと判断される。

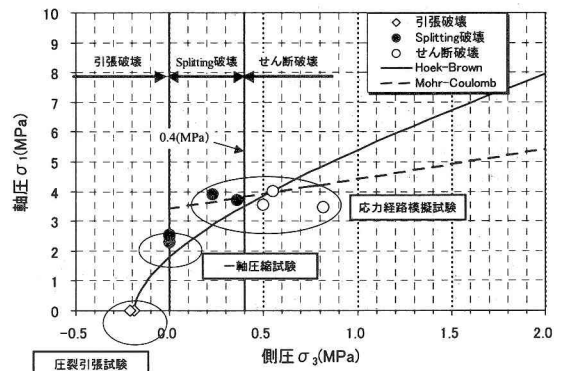


図-9 軸圧と側圧の関係 (要素試験)



Splitting破壊
($\sigma_3=0.23 \text{ MPa}$)



せん断破壊
($\sigma_3=0.82 \text{ MPa}$)

図-10 要素試験供試体の破壊状況

(3) 破壊規準について

空洞掘削時の破壊現象を解析的に検証するため、岩石破壊に伴う主応力関係を実験的に導いた Hoek-Brown による破壊規準と Mohr-Coulomb による破壊規準を下記のとおり設定した。

式(1)に Hoek-Brown による破壊規準³⁾を示す。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 m 、 s ：岩石の性質と応力 σ_1 および σ_3 を加える前の岩石が受けていた破壊の程度に依存する定数。

σ_c ：インタクトな供試体の岩石の一軸圧縮強さ。

定数 m は、 $\sigma_c=1.8\text{MPa}$ 、 $s=1$ として求め $m=9$ とした。

式(2)に Mohr-Coulomb による破壊規準を示す。

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = C + \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \tan \phi \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 C ：通常の三軸圧縮試験から求めた土被り相当の非排水せん断強さ(1.7MPa)、 ϕ ：内部摩擦角(0°)

(4) シミュレーション解析

二次元弾性 FEM 解析により Hoek-Brown による破壊規準と Mohr-Coulomb による破壊規準を適用した解析を実施し、空洞掘削に伴う周辺岩盤の破壊状態を比較検討した。解析条件は下記のとおりであり、解析結果を図-11に示す。

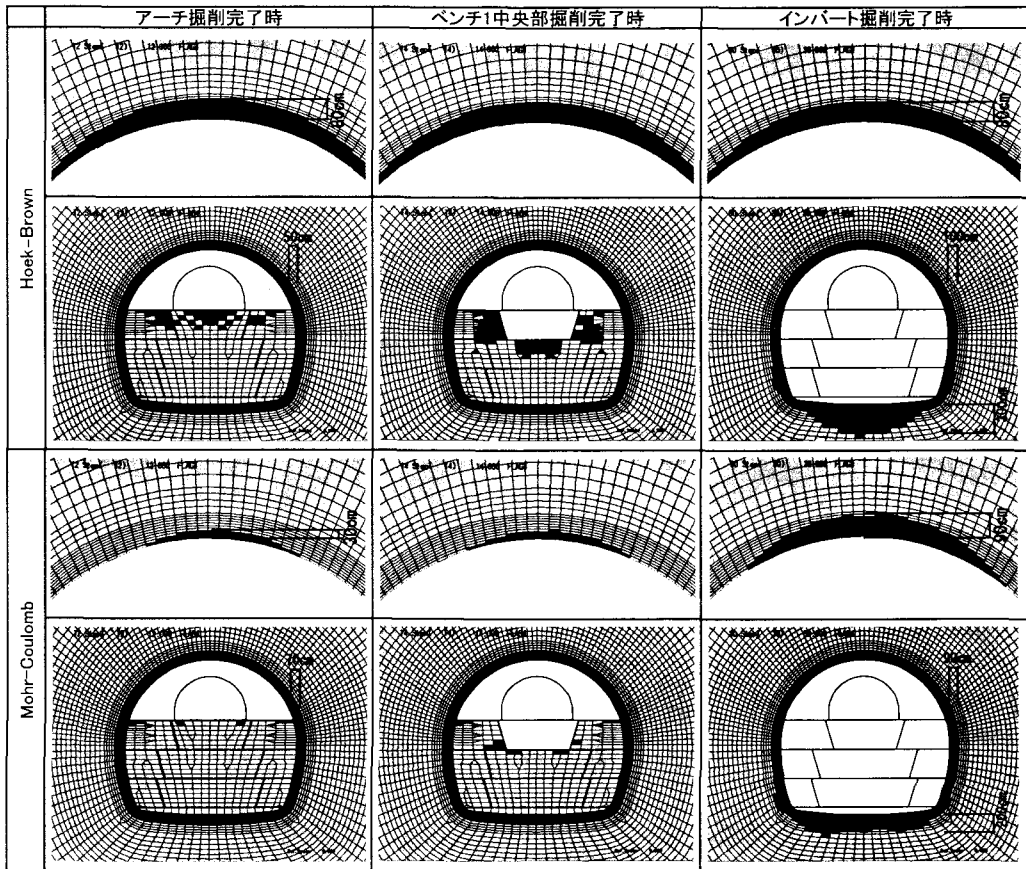
- 掘削解放率：アーチ掘削時 50%，ベンチ掘削時 70%
- 岩盤の弾性係数：2,000 MPa（軽石凝灰岩）

a) Hoek-Brownによる破壊規準

- アーチ部はアーチ切上げにより壁面から 80cm 程度まで Splitting 破壊が生じ、ベンチ掘削の過程で深部への進展は認められない。
- ベンチ側壁部はベンチ中央部掘削時に側壁部において引張破壊および Splitting 破壊が生じている。
- 掘削完了時には、側壁で空洞壁面から約 1.0 m 程度の破壊が認められ、インバート中央部で底盤から約 3.0 m までの破壊が認められる。

b) Mohr-Coulombによる破壊規準

- アーチ部はアーチ切上げにより壁面から 30 cm 程度まで Splitting 破壊が生じ、ベンチ掘削の過程で深部への進展が認められる。掘削完了時点では壁面から 90 cm 程度まで Splitting とせん断の複合破壊となる。
- ベンチ側壁部は、ベンチ中央部掘削時には、側壁部の法尻部に一部認められるが、ほとんど破壊していない。



—凡例—
 引張破壊
 splitting破壊
 せん断破壊

図-11 Hoek-Brownおよび Mohr-Coulomb で設定した破壊規準による解析結果の比較

- 掘削完了時には側壁で深さ約 90 cm 程度までせん断破壊、インバート中央部では底盤から約 2.0 m までの破壊が認められる。

掘削時にはアーチ部において、ベンチ掘削の過程で割目の深部への進展は認められていないこと、ベンチ中央部の掘削ではベンチ側壁部の破壊が認められていることから、この破壊現象は Hock-Brown の破壊規準により説明できると判断される。

図-12 はアーチ部要素における応力履歴を示したものであるが、この図より、掘削解放により σ_3 が減少し、拘束圧が低下することがわかる。したがって、低拘束圧域での強度低下を考慮した破壊規準を設定することにより破壊現象の再現性が高くなると言える。

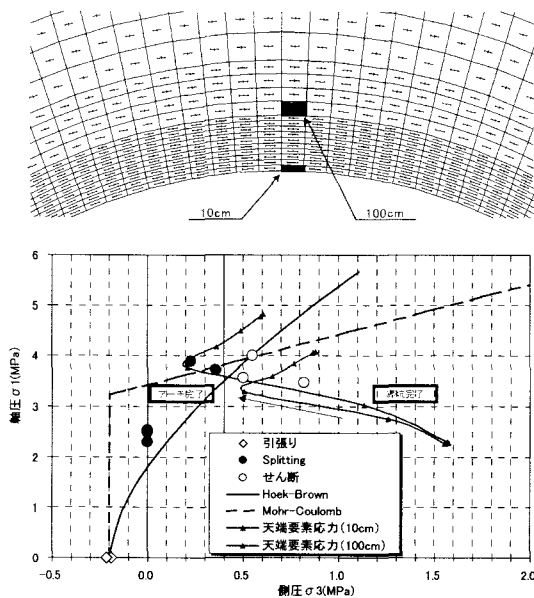


図-12 アーチ部要素における応力履歴

5. まとめ

堆積軟岩に掘削した余裕深度処分施設の試験空洞掘削時に、以下に示すような特徴的な破壊現象が認められた。

- アーチ天端部で発生した剥落は、楕円状に薄く剥がれている。
- 壁面近傍に発生した新規割目は、壁面に対して低角度（壁面平行方向）である。

これらの破壊現象は掘削による岩盤応力が誘発する Spalling であると仮定し、空洞掘削時の応力状態を模擬した要素試験を実施した。

その結果、低拘束圧での破壊モードを Splitting 破壊と考えることにより、空洞の掘削で発生した剥落および壁面に対して平行方向の低角度割目の現象を説明できるものと判断される。

上記要素試験結果に基づく破壊規準を設定して解析を行った結果、低拘束圧域での強度低下を考慮した破壊規準を設定することにより破壊現象の再現性が高い。また、軟岩地盤でのトンネル・空洞掘削等、応力除荷問題を扱う際には、応力状態を模擬した試験による評価は有効な手法であると言える。

現在、試験空洞掘削後の空洞周辺岩盤内応力測定を実施しており、これらの結果も勘案して総合的な評価を行う予定である。

参考文献

- E. Hock, P. K. Kaiser, W. F. Bawden: Support of Underground Excavations in Hard Rock, A. A. BALKEMA, 2000.
- 富田敦紀, 高橋一憲, 小川浩司, 横山幸也: 軟岩地盤における円錐底ひずみ法の現場適用性に関する一考察, 第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp267-272, 2004.
- E. フック・E. T. ブラウン共著: 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, 1985.

A STUDY ON SPALLING IN SOFT ROCK EXCAVATION BY APPLYING TRIAXIAL TEST IN CONSIDERATION OF INDUCED STRESS DURING UNDERGROUND OPENINGS

Atsunori TOMITA, Hideo OHTSUKI, Masaru TOIDA, Kiyoshi KISHIDA and Toshihisa ADACHI

The aim of this paper is to study spalling in soft rock excavation. During the test cavern excavation for investigating the Excavation Disturbed Zone (EDZ) of the radioactive waste disposal cavern, the rockfall and the crack caused by spalling from the roof and the wall occurred. This is why the triaxial test in consideration of the induced stress during the underground openings was carried out. As a result, the failure mode was the splitting failure in case of low confining pressure, therefore, it is supposed that the spalling is caused by the splitting failure in low confining pressure due to underground openings. Furthermore, the failure zone surrounding the cavern was proved by the numerical analysis applying the failure criterion based on the results of the above-mentioned triaxial test.