

空洞掘削後の岩盤内応力測定結果に基づく 堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象の一考察

富田 敦紀^{1*}・戸井田 克²・白鷺 卓²・蛭名 孝仁³・岸田 潔⁴・足立 紀尚⁵

¹東電設計㈱ 地下環境技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

²鹿島建設㈱ 技術研究所 (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

³日本原燃㈱ 開発設計部 (〒039-3212 青森県上北郡六ヶ所村大字尾駸字野附504-22)

⁴京都大学 工学研究科 都市社会工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂C-1)

⁵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)

*E-mail: a-tomita@tepsco.co.jp

余裕深度処分埋設施設の試験空洞掘削時において、誘発応力に起因する Spalling 現象が確認されたため応力経路を模擬した要素試験を実施した。その結果から、低拘束圧下での破壊モードを Splitting 破壊と考えることにより空洞掘削により生じた Spalling 現象の説明を行ってきた。本論文では、空洞掘削後に実施した空洞周辺岩盤応力の測定結果を用いて、上記要素試験で設定した破壊規準およびオーバーコアリング時に確認されたコアディスキング現象も勘案して空洞周辺岩盤の応力場について検討した。その結果、空洞周辺岩盤は掘削時の応力解放に伴う法線方向の拘束圧の低下により一軸応力状態に移行しており、Spalling は低拘束圧状態での誘発応力に起因する引張破壊あるいは Splitting 破壊であることが証明された。

Key Words: *soft rock, spalling, splitting failure, failure criterion, induced stress, excavation disturbed zone*

1. はじめに

軟岩は一軸圧縮強さが 1 ~ 10 MPa 程度で、土と岩の中間的な力学挙動を呈する材料と定義される¹⁾。その力学的な挙動に関する研究は岩石試験レベルでは多くの知見が得られているが、地下深部において大規模な地下空洞掘削時の挙動を評価した研究は硬岩に比べると十分とは言えない。

青森県六ヶ所村において、低レベル放射性廃棄物のうち比較的放射能レベルの高い廃棄物を埋設するための余裕深度処分埋設施設の調査が進められている。余裕深度の基本的考え方は「人間が廃棄物に接触することの無いような深度を確保すること」を要件とされており、「例えば 50 ~ 100 m 程度の深度」とされている。その調査の一環として、処分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た (図-1参照)。この試験空洞は、地下深部約 100 m の位置に埋設施設処分空洞と同規模の径約 18 m 級の大規模空洞であり、2004 年 10 月に先進導坑の掘削を開始し、2005 年 6 月に掘削が終了した。

この試験空洞掘削時において、掘削時の岩盤応力が誘

発する Spalling (空洞壁面に平行方向に発生するクラックおよび剥落) が確認された。一般的に Spalling は高地圧下の塊状岩盤で発生すると言われている²⁾。試験空洞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。地下空洞掘削時の壁面近傍の岩盤は、掘削解放により壁面に対して接線方向の載荷 (応力集中) および法線方向の拘束圧低下により一軸応力状態に移行する。その結果、地下空洞周辺岩盤の強度は低拘束状態での岩盤破壊メカニズムに支配されることになる。筆者らは、試験空洞掘削時の Spalling は、掘削時の拘束圧変化、応力集中など、誘発応力に起因するものと解釈し、その破壊メカニズムを検証するために、空洞掘削時の応力状態を模擬した要素試験を実施した^{3),4)}。その試験での破壊モードは、低拘束圧下では Splitting 破壊であり、高拘束圧下ではせん断破壊であった。したがって、低拘束圧下の破壊モードを Splitting 破壊と考えることで空洞掘削時に発生した Spalling 現象を説明できるものと判断された。さらに、低拘束圧域での強度低下を考慮した破壊規準 (Hoek-Brown) を設定して数値解析により検証した結果、掘削時の破壊現象の再現性が高いことが確認された。

上記の研究結果は要素試験および数値解析により検討したものである。そこで、実岩盤における空洞掘削後の岩盤内応力場を把握するために、円錐孔底ひずみ法による岩盤内応力測定を実施した。本論文は岩盤内応力測定結果に基づき、要素試験で設定した破壊規準およびオーバーコアリング時に確認されたコアディスクング現象も勘案して堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象に関する考察を加えたものである。

2. 岩盤内応力測定の概要と測定方法

(1) 試験空洞諸元及び地質

試験空洞の形状は幅 17.7 m、高さ 16.2 m の三心円形状で、空洞延長は 71.2 m である（図-1参照）。土被りは空洞天端位置で約 100 m である。岩盤補強工は吹付けコンクリート厚さ: 300 mm の高強度コンクリート、ロックボルトがアーチ部: 4 m、側壁部: 6 m のねじり棒鋼、鋼製支保工が 250H の高規格鋼で建込み間隔は 1 m である。

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。

(2) 測定位置

岩盤内応力（二次応力）測定は B 断面から坑口側 4 m の断面において、天端 (OC01)、左側壁 (OC07)、右側壁 (OC09) およびインバート (OC12) の 4 測線について 4 深度の計 16 点にて実施した。測定深度は天端および左右側壁が 0.5 m、1.5 m、3.5 m、5.5 m の各深度、インバートが 1.0 m、2.0 m、3.0 m、6.0 m の各深度とした。座標系は空洞軸方向を X、空洞横断方向を Y、空洞鉛直方向を Z とした（図-2参照）。

(3) 測定方法

原位置での三次元応力測定法には種々のものがあるが、測定は応力解放法のひとつである円錐孔底ひずみ法⁵⁾を適用した。この手法は硬岩での実績が豊富であり原理が明快で信頼性が高く、コストパフォーマンスも高いが、軟岩地盤での計測実績は埋設ひずみ法⁶⁾と比較して乏し

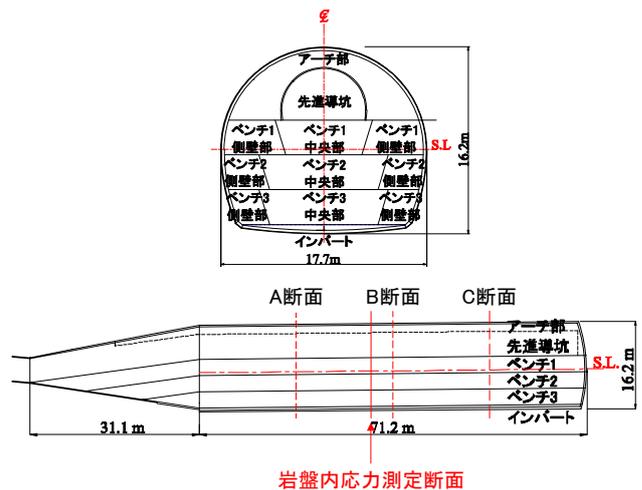


図-1 試験空洞の横・縦断面図

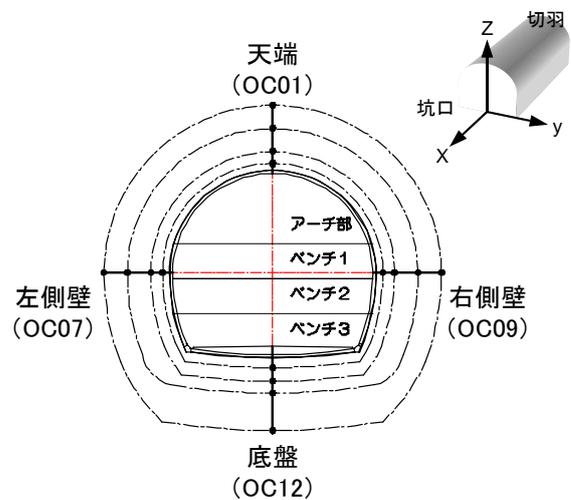


図-2 二次応力測定実施位置

い。間隙が水で飽和している堆積軟岩を対象にする場合には、孔底表面から水が浸出する孔底面にストレインセルを接着することになる。また、下向きボアホールの場合にはボアホールが水没もしくは掘削ズリが沈積する孔底面に接着することになる。このため、通常使用されているシアノアクリレート系接着剤では接着不良となり測定できない可能性がある。

富田ら⁷⁾は堆積軟岩における初期応力測定に際し、エポキシ系の接着剤を用いて検討しているが、水平孔での測定であったことから完全水中および孔底に掘削ズリがある場合の接着性能は考慮していない。そこで白鷺ら⁸⁾は、完全飽和かつ水中においてエポキシ系接着剤の配合を変えた事前確認試験を室内で実施し、接着剤の時間依存性を把握して原位置試験に最も適すると考えられる接着剤の配合を設定した。また、原位置試験では孔底に沈積する掘削ズリの除去方法の検討を行うとともに、感度低下の補正を目的とした原位置用封圧試験装置による感度校正試験を行った結果、岩盤内の三次元応力を精度良く測定することができた。

3. 岩盤内応力測定結果

(1) 空洞横断面 (YZ面内) の岩盤内応力

図-3に空洞横断面 (YZ面内) の主応力図および図中の空洞内に初期地圧を示す。また、表-1に岩盤内応力一覧を示す。これより、試験空洞掘削後には天端および左右側壁の深度0.5mの測点と底盤の深度1.0m, 2.0mの測点では最小主応力 (σ_3) が引張応力となっている。また、天端および底盤では掘削による応力再分配によって初期地圧の側圧比 $\sigma_y/\sigma_z = 1.46$ に対して天端深度3.5mで2.16、底盤深度3.0mで3.98となっている。一方、左右側壁においては、初期地圧では水平に近い最大主応力が回転し、空洞接線方向に向いていることがわかる。

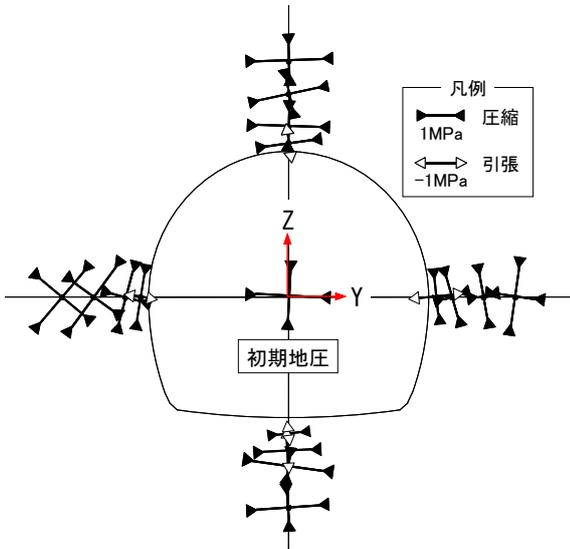


図-3 YZ面内主応力図

表-1 岩盤内応力一覧

場所	深度 (m)	σ_y	σ_z	τ_{yz}	側圧比 σ_y/σ_z	YZ面内主応力		
						σ_1	σ_3	θ
天端	0.5	1.62	-0.46	0.32	—	1.67	-0.51	8
	1.5	2.18	1.04	-0.04	2.10	2.18	1.04	-2
	3.5	2.12	0.98	0.25	2.16	2.17	0.93	12
	5.5	2.34	1.05	0.04	2.23	2.34	1.05	2
左側壁	0.5	-0.36	1.50	0.30	—	1.55	-0.40	81
	1.5	1.21	1.74	0.15	0.70	1.78	1.17	75
	3.5	2.03	2.24	0.31	0.91	2.46	1.80	54
	5.5	2.07	2.12	0.12	0.98	2.22	1.97	50
右側壁	0.5	-1.15	1.17	-0.27	—	1.20	-1.18	96
	1.5	0.72	1.25	-0.16	0.58	1.30	0.68	106
	3.5	0.49	1.48	-0.18	0.33	1.51	0.46	100
	5.5	1.45	1.95	0.07	0.74	1.96	1.44	82
底盤	1.0	0.76	-0.10	0.11	—	0.78	-0.11	7
	2.0	1.64	-0.81	0.15	—	1.65	-0.82	3
	3.0	2.43	0.61	-0.25	3.98	2.47	0.58	-8
	6.0	2.17	0.95	0.08	2.28	2.18	0.95	4
初期地圧	—	2.29	1.57	-0.04	1.46	2.3	1.57	-3

※応力の単位はすべてMPaで、圧縮を正、引張を負
 ※ θ : y軸から反時計回りを正とする σ_1 の角度(°)

(2) 初期地圧と二次応力との比較

図-4にYZ方向応力成分と初期地圧との比率の深度分布グラフを示す。比が1のとき、二次応力成分は初期地圧と等しいことを示す。これより、掘削解放による空洞半径方向応力 (σ_r) の低下は認められるが、応力再分配による健岩域での顕著な空洞接線方向応力 (σ_θ) の集中は認められない。したがって、空洞壁面近傍における応力状態は、試験空洞掘削により σ_θ が増大して一軸応力状態を形成しているというよりも、 σ_r が減少することで一軸応力状態が形成されていると考えられる。

(3) コアディスクングの発生

天端のボーリング削孔時に、円盤状にコアが割れるコアディスクング現象が発生した。このコアディスクングには、コアが割れてしまうもの(図-5参照)とコアが割れずに筋が入るものの2種類が確認された。コアディスクングについては、孔軸方向の応力に対して孔軸直交方向の応力が大きい場合に発生すると言われており、この現象の発生条件を実験的に検討した菅原ら⁹⁾および解析的に検討した本郷ら¹⁰⁾により、発生判定式が提唱されている。これら発生判定式のうち菅原ら⁹⁾の式(1)でコ

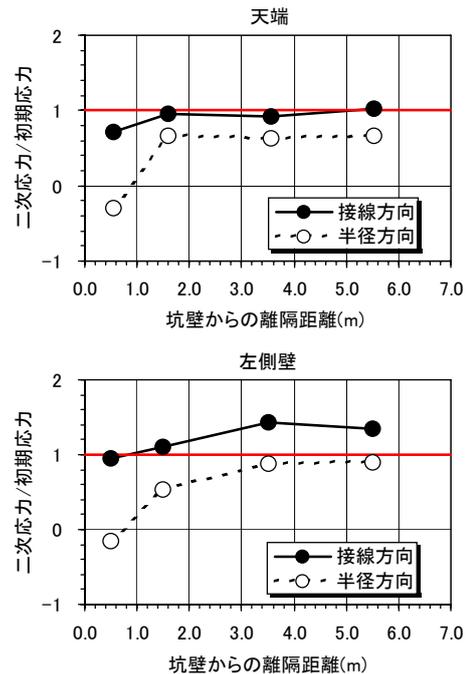


図-4 YZ面内応力成分の二次応力/初期地圧比



図-5 コアディスクング写真 (天端深度5.0m~5.7m)

アディスクキングの発生を判別した結果を表-2および図-6に示す。

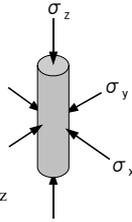
$$\frac{P_r - P_z}{-4} \geq S_t \quad (1)$$

ここで、 S_t = 軽石凝灰岩の

引張強さ (平均値) 0.2MPa

P_r = ボーリング軸に直行する2応力成分 σ_x, σ_y の平均

P_z = ボーリング軸方向の応力成分 σ_z



その結果、空洞掘削後の天端、左右側壁の壁面近傍ならびにインバート部において、コアディスクキングが発生する可能性のある応力場となっている。これは、空洞を掘削することによって掘削前の三軸応力状態が変化し、孔軸直交方向の応力 (σ_θ に相当) が増大する代わりに孔軸方向の応力 (σ_r に相当) が減少することで相対的な一軸応力状態下にあると考えられる。

しかしながら、実際にコアディスクキングが発生したのは天端に限られるため、コアディスクキングと地質との関連を調べた。コア1m区間内の凝灰岩の占める割合とコアディスクキング本数を比較した結果、図-7に示すように凝灰岩(tf)が占める割合とコアディスクキング本数との間に正の相関が認められる。したがって、応力場としては天端以外にもコアディスクキングが発生する可能性はあるが、本サイトにおけるコアディスクキング発生は軽石を含む地質か否かに依存していると考えられる。なお、これは空洞掘削時に認められた剥落が、凝灰岩(tf)で発生しているものが多いこととも整合している³⁾。

(4) 実測応力値と解析値との比較

図-8にYZ面内の実測主応力 (二次応力) と二次元弾性FEM解析による解析値との比較を示す。これより最大主応力 (σ_1) については、応力集中の見られない実際の二次応力とは大きさも傾向も一致しない。一方、最小主応力 (σ_3) については、壁面に近づくにつれ減少する σ_3 の大きさおよび傾向を良く表現していることがわかる。

4. 空洞周辺の二次応力と破壊規準

富田ら³⁾は空洞掘削時の応力状態を考慮した要素試験を実施した結果、0.4 MPa 以下の低拘束圧下の破壊モードを Splitting 破壊と考えることで空洞掘削時に発生した Spalling 現象を説明した。さらに、低拘束圧域での強度低下を考慮した Hoek-Brown の破壊規準 (式(2)) と Mohr-Coulomb の破壊規準をそれぞれ設定し、数値解析により前者の再現性が高いことを確認している。

表-2 コアディスクキング発生判定表

	判定	σ_x	σ_y	σ_z	P_r	P_z	式(1) 左辺	S_t
天端-1	○	-1.16	-1.62	0.46	-1.39	0.46	0.46	0.2
天端-2	○	-2.27	-2.18	-1.04	-2.23	-1.04	0.30	0.2
天端-3	○	-2.57	-2.12	-0.98	-2.34	-0.98	0.34	0.2
天端-4	○	-2.14	-2.34	-1.05	-2.24	-1.05	0.30	0.2
左側壁-1	○	-1.62	0.36	-1.50	-1.56	0.36	0.48	0.2
左側壁-2	○	-2.10	-1.21	-1.74	-1.92	-1.21	0.18	0.2
左側壁-3	○	-2.64	-2.03	-2.24	-2.44	-2.03	0.10	0.2
左側壁-4	○	-2.65	-2.07	-2.12	-2.38	-2.07	0.08	0.2
右側壁-1	○	-1.04	1.15	-1.17	-1.10	1.15	0.56	0.2
右側壁-2	○	-1.29	-0.72	-1.25	-1.27	-0.72	0.14	0.2
右側壁-3	○	-1.83	-0.49	-1.48	-1.65	-0.49	0.29	0.2
右側壁-4	○	-2.22	-1.45	-1.95	-2.09	-1.45	0.16	0.2
底盤-1	○	-0.72	-0.76	0.10	-0.74	0.10	0.21	0.2
底盤-2	○	-1.39	-1.64	0.81	-1.51	0.81	0.58	0.2
底盤-3	○	-2.10	-2.43	-0.61	-2.27	-0.61	0.41	0.2
底盤-4	○	-2.09	-2.17	-0.95	-2.13	-0.95	0.29	0.2
初期地圧	○	-2.18	-2.29	-1.57	-1.93	-2.18	-0.06	0.2

※丸はコアディスクキング発生

※単位はすべてMPaで、圧縮が負、引張が正

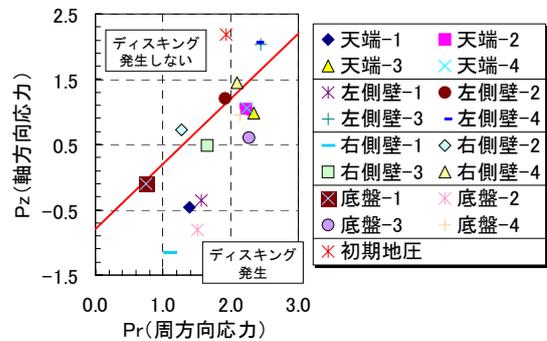


図-6 コアディスクキング発生判定図

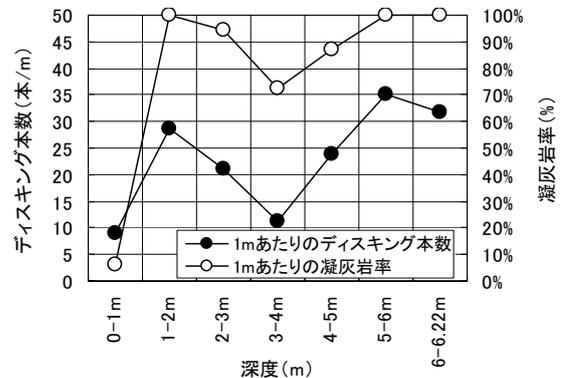


図-7 地質とコアディスクキング本数の関係

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

ここで、 m, s = 岩石の性質と応力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: $m=9, s=1$

σ_c = 供試体の一軸圧縮強さ: 1.8MPa

Hoek-Brown および Mohr-Coulomb の破壊規準は、高い拘束圧下において粘着力および内部摩擦が同時にピーク強度に寄与するという仮定に基づき、岩石が延性的な挙動を示す場合には十分適用可能である。Martin et al.¹¹⁾は

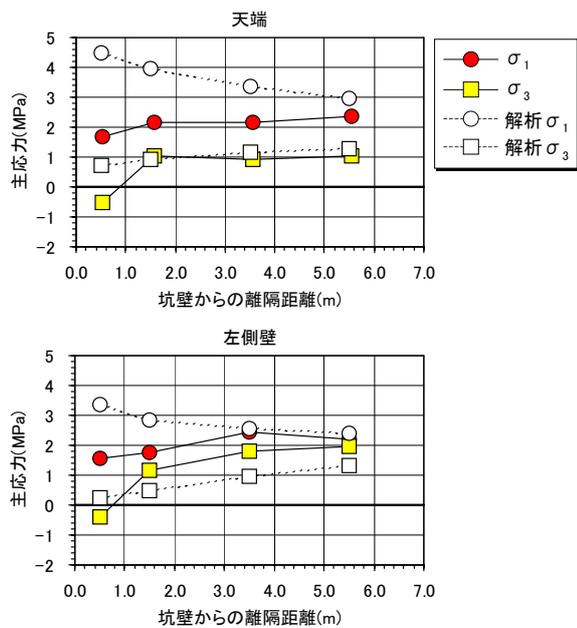


図-8 YZ面内主応力と解析結果との比較

低拘束圧下において、脆性的な破壊をする場合には亀裂が開くため、粘着力と内部摩擦が同時に強度に寄与することはないとしている。また、Martin and Chandler¹²⁾ や Hajiabdolmajid *et al.*¹³⁾ によって、破壊までの挙動は内部摩擦によらず粘着力に支配されると室内実験で裏付けられている。そこで Martin *et al.*¹¹⁾ は、この破壊は摩擦力を考慮しない粘着力の低下に支配されるものと位置付け、AEが発生し始める境界を損傷しきい値 (Damage Threshold) として、 $m=0$, $s=0.11$ (Massiveから Moderately fractured rock に対する値) としている。また、Kaiser *et al.*¹⁴⁾ は空洞壁面近傍の低拘束圧域における Spalling Limit の範囲を $\sigma_1 / \sigma_3 = 10 \sim 20$ としている。

当サイトにおける Damage Threshold については、坑壁

近傍の応力状態は低拘束圧下であることから、摩擦力を考慮しない粘着力の低下に支配されるものと考え $m=0$ とした。また、地質はほぼ均質・無層理で既存割目のないインタクトな軽石凝灰岩であることから、 $s=1$ とした。これらを式 (2) に代入して求めた Damage Threshold と Spalling Limit をあわせて示した図に応力測定結果をプロットしたものを図-9に示す。これより、天端および左右側壁の深度 0.5m, 底盤の深度 2.0 m では引張破壊しているが、その他の測点は Damage Threshold 以下であることから破壊には至っていないと判定できる。なお、底盤の深度 1.0 m は未破壊領域であるが、ボアホールカメラ (BTV) による孔内観察により、空洞掘削に伴って発生した割目が底盤深度 2.0 m まで確認されている¹⁵⁾ ことから、深度 1.0 m はすでに破壊し、主応力が 0 に近づいていると判断した。

したがって、空洞掘削によりアーチ天端および左右側壁の深度 0.5 m, インバート部の深度 2.0 m 程度まで破壊されているが、それより深部は健全な領域であると言える。

5. まとめ

堆積軟岩空洞掘削時にアーチ天端における楕円状の剥落や壁面に対して低角度 (壁面平行方向) の割目といった Spalling 現象が認められた。本論文では空洞掘削後の岩盤内応力測定結果に基づき、要素試験で設定した破壊規準およびボーリング時に確認されたコアディスキング現象を勘案して堆積軟岩空洞掘削時の破壊現象に関して検討を行った結果、以下の知見が得られた。

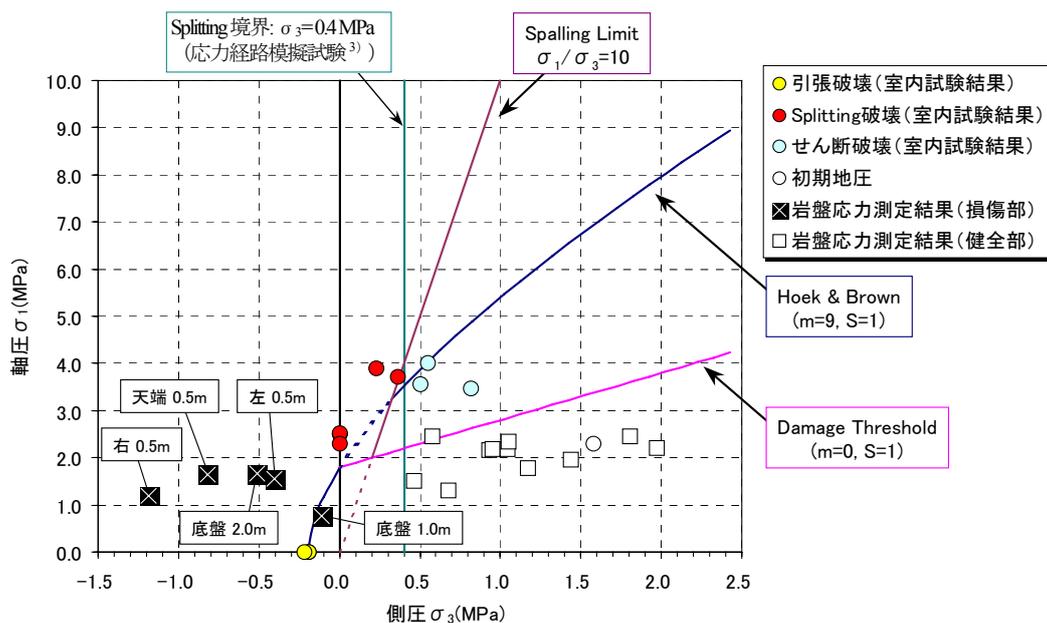


図-9 破壊および Spalling 発生規準と応力測定結果

- 空洞周辺の塑性化領域はアーチ天端，左右側壁で深度1.0mまで，インバート部では深度2.0～3.0m程度までと判断される。この結果はBTV観察結果による割目発生深度とほぼ合致している。
- アーチ天端，左右側壁の深度0.5mおよびインバート部の1.0m，2.0mの測点では σ_3 が引張応力となっており，空洞壁面近傍は応力再配分により一軸応力状態に移行している。これはアーチ天端にコアディスクキングが発生したことから裏付けられる現象である。
- 応力再配分による一軸応力状態は， σ_θ が増大して形成しているというよりも， σ_r が減少することで相対的な一軸応力状態が形成されている。
- したがって，掘削時の空洞周辺岩盤は，応力解放に伴う半径方向の拘束圧低下により一軸応力状態に移行し，低拘束圧状態下で発生したSpallingは引張破壊あるいはSplitting破壊であると言える。

参考文献

- 1) 土木学会岩盤力学委員会：軟岩評価－調査・設計・施工への適用，社団法人土木学会，1992。
- 2) Hoek, E., Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.: *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, A.A. Balkema, 2000.
- 3) 富田敦紀，大槻英夫，戸井田克，岸田潔，足立紀尚：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，第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，CD-ROM，pp. 213-218，2006。
- 4) Tomita, A., Ohtsuki, H., Toida, M., Kishida, K., and Adachi, T.: Estimation of Mechanical Behavior of Soft Rock Under Low Confining Stress, *In Proceedings of the Golden Rocks 2006, The 41st U.S. Symposium on Rock Mechanics*, CD-ROM, ARMA/USRMS 06-956, 2006.
- 5) Sugawara, K and Obara, Y.: Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.* 36(3), pp.307-322, 1999.
- 6) Kanagawa, K., Hibino, S., and Ishida, T.: In-situ stress measurements by the over-coring method –Development of an 8 elements gauge for 3-dimensional estimation–, *CRIEPI REPORT EU88002*, Central Research Institute of Electric Power Industry, 1988.
- 7) 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孔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，pp.267-272，2005。
- 8) 白鷺卓，戸井田克，富田敦紀，坂口清敏：堆積軟岩における湧水のある下向きボアホールでの円錐孔底ひずみ法の適用，資源・素材 2006（福岡）講演資料，A2-7，pp.53-54，2006。
- 9) 菅原勝彦，亀岡美友，斎藤敏明，岡行俊，平松良雄：コアディスクキング現象に関する研究，日本鉱業会誌，Vol.94，pp.797-803，1978。
- 10) 本郷公，松木浩二，坂口清敏：一般的地圧下におけるコアディスクキングの発生条件，資源と素材，Vol.133，pp.155-161，1997。
- 11) Martin, C.D., Kaiser, P.K., and McCreath, D.R.: Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical J.*, 36(1): pp.136-151, 1999.
- 12) Martin, C.D. and Chandler, N.A.: The progressive fracture of Lac du Bonnet granite. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 31(6), pp.643-659, 1994.
- 13) Hjiabdolmajid, V., Martin, C.D., and Kaiser, P.K.: Modelling brittle failure. *Proc. 4th North American Rock Mechanics Symp.*, Seattle, Washington. A.A. Balkema, Rotterdam, 8p, 2000.
- 14) Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, D., Sharpe, J. and Steiner, W.: Invited Keynote: Underground Works in Hard Rock Tunnelling and Mining. *GeoEng2000*, Melbourne. CD-ROM. 87 pgs, 2000.
- 15) 蛭名孝仁，富田敦紀，白鷺卓，戸井田克，岸田潔，足立紀尚：堆積軟岩における空洞掘削に伴う周辺岩盤の変形特性変化，第61回土木学会年次学術講演会，CD-ROM，3-009，pp.17-18，2006。

A STUDY ON SPALLING IN SOFT ROCK BASED ON THE INDUCED STRESS MEASUREMENT AFTER UNDERGROUND OPENINGS

Atsunori TOMITA, Masaru TOIDA, Suguru SHIRASAGI, Takahito EBINA,
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, spalling failure occurred from the roof and the wall. The triaxial test in consideration of the induced stress during the underground openings explained that the failure mode was the splitting failure at low confinement levels due to underground openings. In this paper, it is proved by using in situ stress, core diskling at the crown of opening and numerical analysis that the spalling failure around the cavern is tensile or splitting failure which is induced as σ_3 approaches zero or a tensile state in the radial direction.