

# 人工・自然地下空洞の充填効果に関する実験および自然空洞充填施工現場における効果の検証

藍檀 オメル<sup>1\*</sup>・渡嘉敷 直彦<sup>2</sup>・田野 久貴<sup>3</sup>

<sup>1</sup>琉球大学 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

<sup>2</sup>元琉球大学 工学部環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

<sup>3</sup>日本大学 工学部土木工学科 (〒963-1165 福島県郡山市田村町徳定中河原1)

\*E-mail: aydan@tec.u-ryukyu.ac.jp

日本各地に存在する多くの人工・自然地下空洞の陥没事故が多数発生し、社会生活に大きな被害を与えている。本研究は、空洞充填による地下空洞の安定性の向上を図ることを目的とし、残柱式空洞模型載荷実験を実施して充填による充填効果を把握するとともに、石灰岩自然空洞の充填施工事例について、空洞の安定性を評価する手法を示し、その充填効果を検証する。

残柱式空洞模型載荷実験は、空洞充填による耐荷・変形特性、AE挙動を把握する実験と、クリープ載荷実験を行い、水飽和の有無によるAE挙動を検討する。また、実岩盤の空洞充填施工事例について、AE発生の有無による空洞安定性評価手法を示し、その充填効果について検証する。

**Key Words** : *experimental study, back filling effect, natural and artificial underground openings, verification of the backfilling effect in actual practices*

## 1. はじめに

日本の各地には、廃鉱、防空壕、採石場、鍾乳洞など、多くの人工・自然地下空洞が存在し、地震や岩盤の風化などにより空洞の陥没事故が相次いで発生し、社会生活に大きな被害を与えている。今後予想される巨大地震によるさらなる陥没の発生が危惧される。

筆者らは、これらの人工・自然地下空洞の静的・動的応答や安定性について、実験、理論解析および数値解析の面から検討<sup>1,2,3)</sup>を行ってきた。本研究は、充填による人工・自然地下空洞の安定性の向上を図ることを目的とし、一連の残柱式空洞模型載荷実験を実施して、その充填効果を把握するとともに、実際の空洞充填施工現場における充填効果を評価する手法を示し、充填効果を検証する。

## 2. 短期載荷による残柱式空洞模型載荷実験

人工・自然地下空洞の充填による充填効果を把握するため、残柱式空洞模型による静的繰り返し載荷試験を実施した。残柱式空洞模型に用いる岩盤材料は、愛知県長久手町の亜炭、大谷石および琉球石灰岩である。充填材料は、砂および粘着性の充填材を用いた。粘着性の充填

材は、セメントおよびセラミック製造時の残留物である粘土質材料および砂質材料の混合物である。この充填材は、東海地域に存在する亜炭廃鉱の充填に広く用いられている。本試験では、この充填材をNSK材と呼ぶ。

実験では、残柱の岩盤材料と、充填材を組み合わせた条件下で、無充填および充填時の繰り返し載荷による耐荷力、変形状、AE挙動の充填効果を把握した。

### (1) 残柱式空洞模型と充填効果載荷実験

残柱式空洞載荷実験に用いる空洞模型を、図-1に示す。残柱式空洞を形成するため、高さ250mm、内径100mm、厚さ10mmの亚克力容器を用意し、中央部に直径46~50mm、高さ96~100mmの残柱材を配置する。残柱材は、長久手亜炭、大谷石および琉球石灰岩の3種類とし、残柱材の相違による充填効果への影響を考慮する。残柱を挟む上下岩盤材料は、直径98mm、高さ100mmの寸法とし、長久手亜炭と大谷石の残柱式空洞実験では、大谷石の上下岩盤材料を用い、琉球石灰岩の残柱の場合は、琉球石灰岩の上下岩盤材料を用いる。

残柱式空洞模型による充填効果載荷実験の様子を図-2に示す。残柱材料と充填材料の組み合わせの条件下で、充填効果を比較検討した。載荷方法は、載荷に伴うAE挙動を同時に把握するため、静的繰り返し載荷を行った。

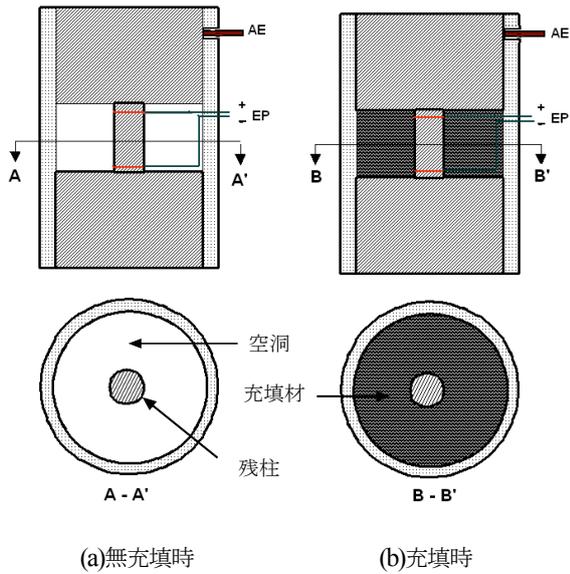


図-1 残柱式空洞模型と充填材の有無



図-2 残柱式空洞模型載荷実験

載荷による残柱式空洞の充填効果を把握するため、載荷時の荷重、残柱軸方向変位およびAEを測定した。また、いくつかの実験ケースにおいては、残柱間の電気抵抗を計測した。

充填された残柱式空洞模型の載荷試験は、NSK充填材の養生期間を考慮して、水中養生後28日を経過した時点で実施した。

## (2) 長久手垂炭残柱式空洞の実験結果

空洞無充填時、砂材、および粘着性のNSK材で充填した空洞充填時における繰り返し載荷による荷重、変位、AE性状を図-3～図-5に示す。無充填の残柱破壊(図-3)は、充填された残柱の破壊(図-4、図-5)に比べて、支持力が小さく、より脆性的な破壊性状を示している。ま

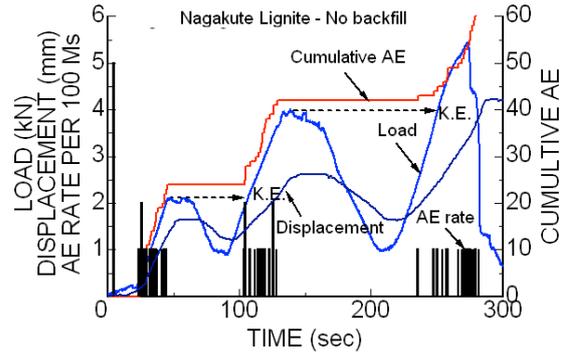


図-3 空洞無充填時の繰り返し載荷による荷重、変位およびAE性状(長久手垂炭残柱式空洞)

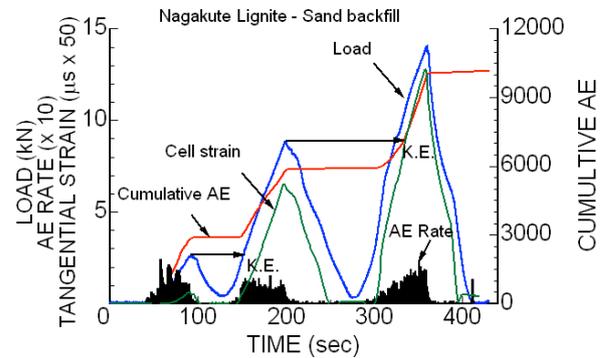


図-4 砂材空洞充填時の繰り返し載荷による荷重、変位およびAE性状(長久手垂炭残柱式空洞)

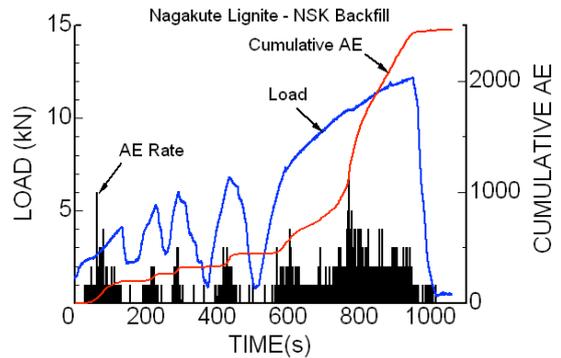


図-5 NSK材空洞充填時の繰り返し載荷による荷重、変位およびAE性状(長久手垂炭残柱式空洞)

た、無充填時、充填時の累積AE挙動は、繰り返し載荷に伴う永久ひずみに関係し、カイザー効果(Kaiser-effect)が認められる。残柱式空洞模型の亚克力容器の円周方向に取り付けられたひずみゲージによる円周方向ひずみの挙動を調べた。図-4に、砂材空洞充填時の繰り返し載荷によるセル円周方向ひずみの挙動を示す。セルの円周方向ひずみの発生は、残柱のひずみがある程度進行したレベルで発生し、残柱の変形と破壊の開始に関係

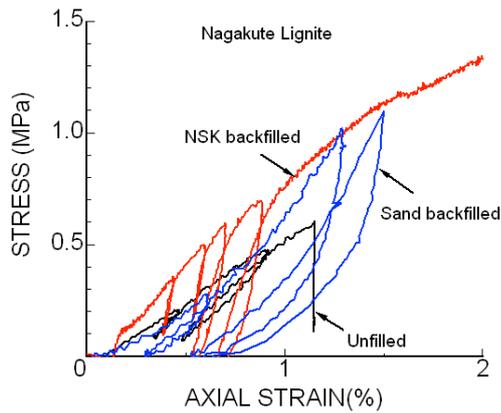


図-6 無充填時およびNSK材空洞充填時の繰り返し荷重によるひずみ・応力性状の比較（長久手垂炭残柱式空洞）

していることが認められる。図-6に、無充填および砂材、NSK充填材で充填された残柱式空洞の繰り返し荷重による残柱の応力・ひずみ関係の比較を示す。充填された残柱の支持力は、同じひずみレベルで、無充填の残柱の支持力に比べて、1.3 - 1.5 倍の増加が認められる。さらに、充填された残柱の挙動は、残柱が降伏状態に達したあとも軟化することなく、弾塑性状態が続いている。また、充填された残柱空洞の支持力は、無充填の残柱空洞に比べてかなり増加している。NSK材で充填された残柱空洞の支持力は、砂材で充填された残柱空洞の支持力に比べて、より大きくなっている。

### (3) 大谷石残柱式空洞の実験結果

栃木県大谷町では、現在もなお採石場で採石が行われており、空洞の大規模な陥没も発生している。これらの地下採石場の安定性を図るため、空洞充填も考慮されている。

図-7～図-9に、空洞無充填時、砂材およびNSK材で充填した残柱空洞模型の繰り返し荷重による荷重、変位およびAE性状を示す。これらの結果から、無充填の大谷石残柱は荷重後早い段階で脆性破壊するのに対し、充填された残柱の破壊時の支持力は大きくなっていることがわかる。また、繰り返し荷重の各サイクルにおける永久ひずみに着目すると、累積AEの挙動は、このひずみと密接に関係し、カイザー効果（Kaizer-effect）が認められる。

乾燥状態および飽和状態の大谷石の挙動を比較する荷重試験を行った。飽和した大谷石の一軸圧縮強度は、乾燥状態の強度よりも低いことが報告<sup>4,5)</sup>されており、乾燥状態の一軸圧縮強度に比べて、強度が30 - 50% 減少することを示している。図-7に、無充填時の飽和残柱の繰り返し荷重試験による荷重、変位およびAE性状を示す。

図-8は、砂材を充填した残柱空洞模型の繰り返し荷重

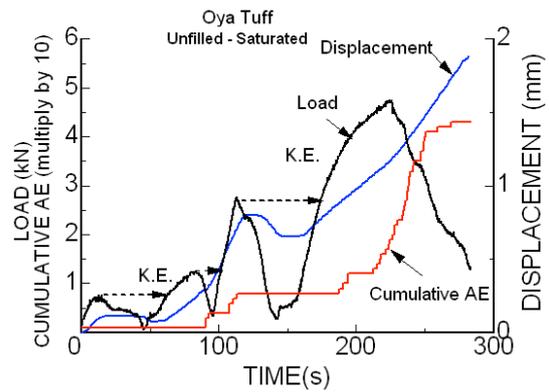


図-7 無充填時の飽和残柱の繰り返し荷重による荷重・変位およびAE性状の比較（大谷石残柱式空洞）

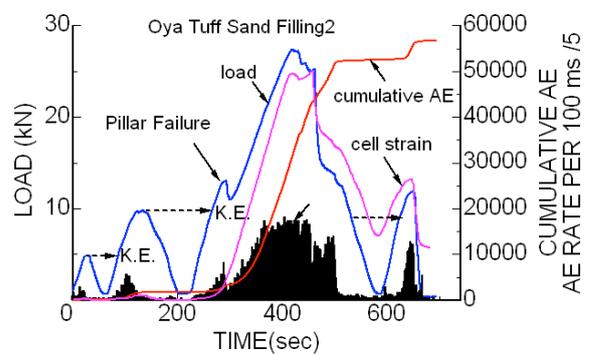


図-8 砂材空洞充填時の繰り返し荷重による荷重・AE性状の比較（大谷石残柱式空洞）

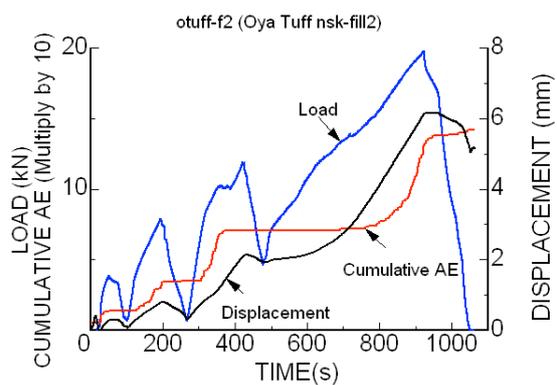


図-9 NSK材空洞充填時の繰り返し荷重による荷重・変位およびAE性状の比較（大谷石残柱式空洞）

試験による荷重、変位、AE性状とアクリルセルの円周方向のひずみの挙動を示している。アクリルセルの円周方向のひずみの挙動は、残柱の降伏が始まると同時に、ひずみが急激に大きくなり、ダイレーションが生じていることを示している。アクリルセルの拘束により、残柱の降伏後に生じる軟化挙動を押さえ、残柱の支持力が増

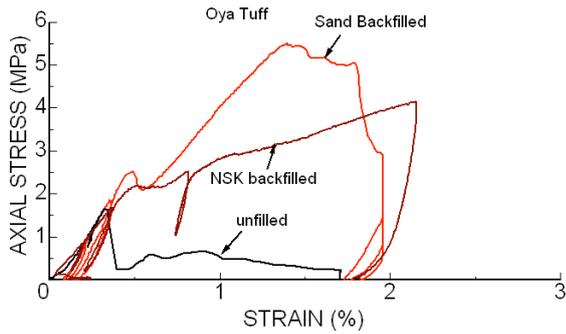


図-10 無充填時および砂材、NSK材空洞充填時の繰り返し荷重による応力・ひずみ性状の比較（大谷石残柱式空洞）

加することを示している。

図-10は、繰り返し荷重実験による無充填時における応力・ひずみ性状と、砂材およびNSK材で充填された大谷石残柱空洞の応力・ひずみ性状の比較を示している。無充填の支持力と比較すると、同じひずみレベルにおける充填された残柱の支持力は、1.3 - 1.5倍増加している。さらに、充填された残柱の挙動は、残柱の降伏後のわずかな軟化状態を伴う弾塑性を示し、続いてひずみ硬化状態となる。粘着性の充填材は、残柱に効果的な抵抗力を与えるが、NSK充填材で充填された飽和残柱の平均的な応力・ひずみ挙動と、砂材で充填された乾燥残柱の平均的な応力・ひずみ挙動の差異は、大谷石残柱の強度の差異によるものと思われる。

#### (4) 琉球石灰岩残柱式空洞の実験結果

琉球石灰岩は、琉球諸島に広く分布し、琉球石灰岩層には、種々の大きさを持つ溶解した空洞が存在している。これらの溶解した空洞（鍾乳洞）の存在が、琉球石灰岩層地帯で、空洞陥没の問題を発生させている。このような問題に対応するため、琉球石灰岩層の支持力に関する充填の影響を検討する実験を実施した。

図-11～図-13に、無充填の琉球石灰岩残柱、砂材およびNSK材で充填した琉球石灰岩残柱空洞の繰り返し荷重による荷重およびAE性状を示す。琉球石灰岩は、亜炭や大谷石に比べ、強度の高い岩石であるが、琉球石灰岩残柱供試体の全体的な挙動は、亜炭残柱および大谷石残柱の実験結果と同じ傾向を示している。無充填および充填時の実験結果から、無充填時の残柱は、ピーク強度後脆性的に破壊が生じるに対し、充填された残柱の破壊性状は、無充填時の破壊強度を越えて挙動し、より高い破壊強度を示している（図-11～図-13）。繰り返し荷重の各サイクルにおける永久ひずみに着目すると、累積AEの挙動は、このひずみと密接に関係している。また、無

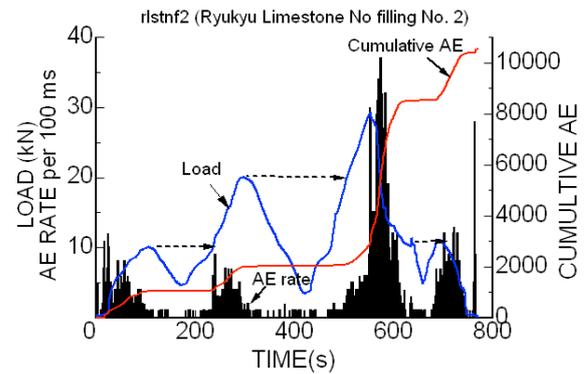


図-11 無充填時の繰り返し荷重による荷重およびAE性状（琉球石灰岩残柱式空洞）

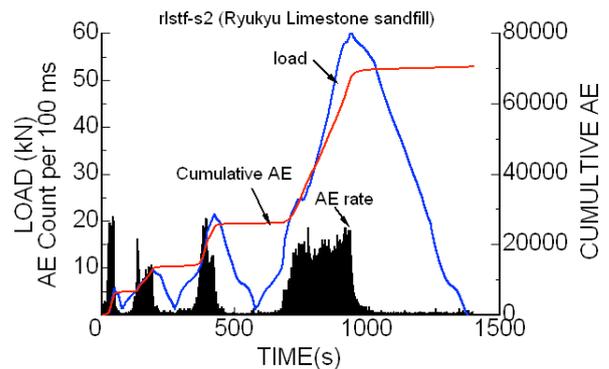


図-12 砂材空洞充填時の繰り返し荷重による荷重およびAE性状（琉球石灰岩残柱式空洞）

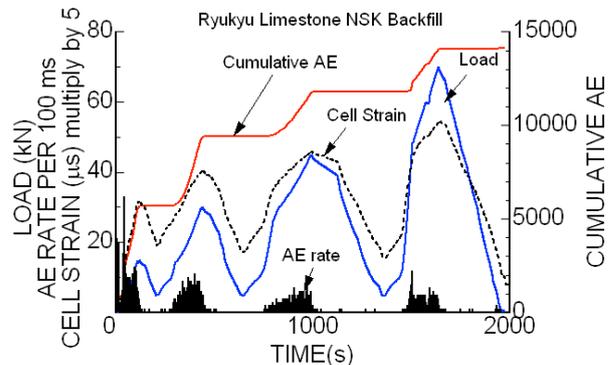


図-13 NSK材空洞充填時の繰り返し荷重による荷重およびAE性状（琉球石灰岩残柱式空洞）

充填残柱、充填残柱の実験結果は、ともにカイザー効果（Kaizer-effect）が認められることを示している。

図-14に、繰り返し荷重実験による無充填時における応力・ひずみ性状と、砂材およびNSK材で充填された琉球石灰岩残柱空洞の荷重・ひずみ性状の比較を示している。無充填の支持力と比較すると、同じひずみレベルにおける充填された残柱の支持力は、1.2 - 1.3倍増加している。充填された残柱の挙動は、残柱の降伏後も軟化挙動

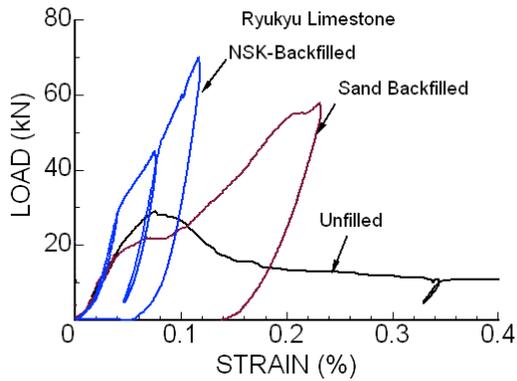


図-14 無充填時，砂材および粘着充填材で充填された残柱の繰り返し载荷による荷重・ひずみの比較（琉球石灰岩残柱式空洞）

を生じずに弾塑性挙動を示している。NSK充填材料で充填された残柱空洞の全体の支持力は、無充填の支持力に比べ、顕著な増加が認められる。なお充填された供試体の载荷試験では、アクリル容器に加わる拘束圧による破損を考慮し、供試体全体の強度破壊レベルより小さい载荷で試験を終了している。

### 3. 長期载荷による残柱式空洞模型の载荷実験

残柱の大气による風化や水の飽和状態による長期的な挙動を検討するため、御嵩町亜炭供試体による長期载荷試験を実施した。亜炭<sup>4)</sup>は、水分量の変化に敏感でもろく、収縮による亀裂が生じると、水の浸透で強度が減少する。現地で採取した亜炭を、大气に触れる環境にするため36時間大气にさらしたあと充填を行った。この供試体を用いて1360時間（約2ヶ月間）水浸させた残柱供試体（ACT1）を用意した。なお、無充填の残柱試験に用いる供試体（ACT3）は、現地で直接大气にさらされた試料を用いている。これらの供試体を用いて、無充填時および充填時におけるクリープ試験を実施した。

図-15に、充填した残柱供試体の経過時間に伴う供試体変位と累積AE挙動を示す。無充填の試験結果が、供試体の変位と累積AEカウントが载荷後の経過時間とともに増加しているのに対し、充填した残柱供試体の累積AEカウントは、充填時、荷重増加時および飽和状態維持の時点を除き、ほとんど増加が見られない。

### 4. 実岩盤における充填効果の検証

充填効果の一つであるAE発生を減少させるという知見に基づき、この知見を実岩盤の空洞充填における充填効果の検証に応用した事例を示す。図-16は、空洞充填後、累積AEカウントが減少することにより、空洞の安

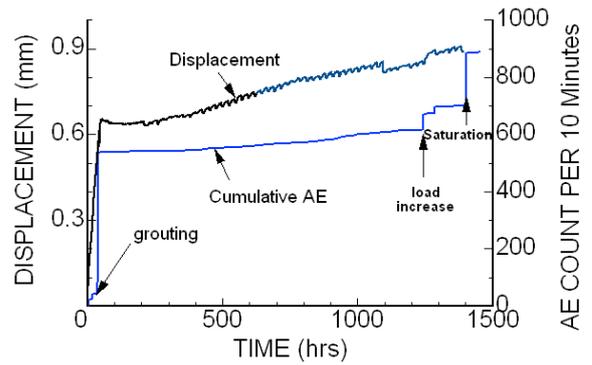


図-15 充填した供試体（ACT1）クリープ試験による変位および累積AE挙動（御嵩亜炭）

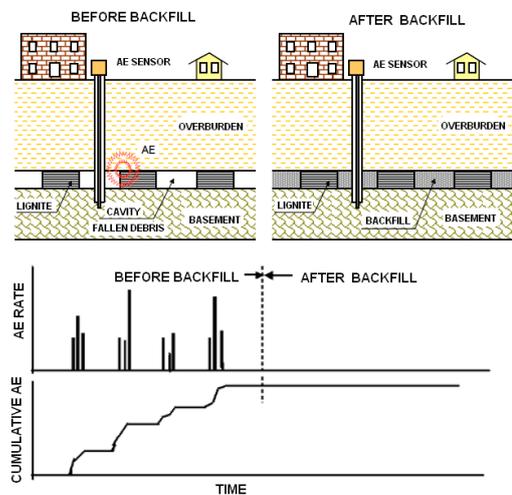


図-16 空洞充填前後の累積AEカウントの変化を適用した空洞充填後の空洞安定性を評価する基本的な手法

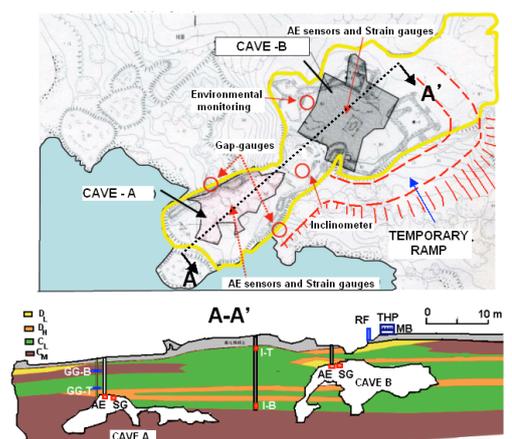


図-17 充填施工が行われた具志川城址地下空洞の断面図（沖縄県糸満市）

定性を評価する基本的な手法を示している。図-17は、城址の整備が予定されている沖縄県糸満市在の具志川城址地下に広がる琉球石灰岩層内の自然空洞の充填施工の事

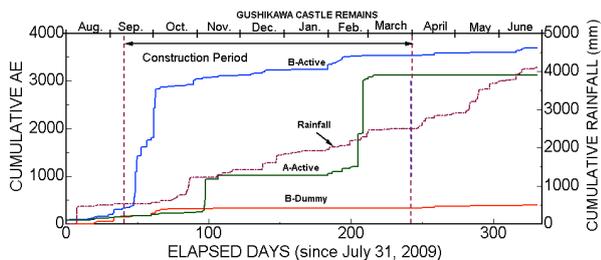


図-18 2009年8月～2010年7月間に観測したA空洞およびB空洞の累積AEカウンターの推移

例である。この充填施工後の二つの空洞（空洞A、空洞B）の安定性を検証するため、空洞充填前後におよぼモニタリングが実施された。両空洞内に設置したAEセンサーによって計測された累積AEカウンターの推移を図-18に示す。充填工事期間中、累積AEカウンターの増加が顕著であったが、充填施工後は、両充填空洞の累積AEカウントが極端に減少している。この結果は、両空洞の充填が、空洞の安定性に大きく寄与していることを示している。また、空洞の充填効果を検証するため、本手法の適用が有効であることが示された。

## 5. 結論

空洞充填による地下空洞の安定性の向上を図ることを目的とし、残柱式空洞模型載荷実験を実施して充填による充填効果を把握するとともに、実岩盤空洞の充填による安定性を検証する手法を示した。本研究で得られた主な結果を示す。

- (1) 充填された残柱の支持力は、同じひずみレベルにおいて、無充填残柱の支持力に比べて1.2～1.5倍を示した。
- (2) 各繰り返し載荷・除荷直後の永久ひずみと累積AE挙動は、密接に関係しており、無充填および充填の残柱にカイザー効果 (Kaizer-effect) が認められた。

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SUPPORTING EFFECT OF BACK-FILLING ON NATURAL AND MAN-MADE UNDERGROUND OPENINGS AND ITS IN-SITU VERIFICATION

Ömer AYDAN, Naohiko TOKASHIKI and Hisataka TANO

In this study, the outcomes of an experimental program on the supporting effect of backfilling on the response and stability of natural and man-made underground openings and its verification in actual backfilling applications are presented. The backfilling materials were granular and cohesive, and rock samples were lignite, mudstone, and sandstone of Mitake, Nagakute lignite, Oya tuff and Ryukyu limestone. An acrylic cell with an internal diameter of 100 mm was prepared to provide lateral confinement for back-filled samples. Several examples of applications for the verification of the backfilling effect are described and the implications in actual practices are discussed.

- (3) 充填による供試体のAE発生量の減少は、温度や湿度などの環境変化に対する防護と、残柱の拘束によるカイザー効果に関連した偏差応力の減少によると思われる。
- (4) 充填による供試体のAE発生量の減少の知見は、残柱空洞はもとより、自然空洞の充填による安定性の検証に適用することができる。
- (5) 実岩盤自然空洞の充填施工による空洞の安定性を評価するため、施工前後のAEモニタリングを実施し、充填後の累積AEカウントの減少を確認した。本手法の適用は、残柱式空洞などの人工空洞、鍾乳洞などの自然空洞の充填による安定性を検証するために有効であることが示された。

## 参考文献

- 1) Aydan, Ö. and Tokashiki, N. : A comparative study on the applicability of analytical stability assessment methods with numerical methods for shallow natural underground openings. *The 13<sup>th</sup> International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Melbourne, Australia, pp. 964-969, 2011.
- 2) Aydan, Ö., Sakamoto, A., Yamada, N., Sugiura, K. and Kawamoto, T. : The characteristics of soft rocks and their effects on the long-term stability of abandoned room and pillar lignite mines. *Post Mining 2005*, Nancy, 2005.
- 3) Aydan, Ö., Ohta, Y., Geniş, M., Tokashiki, N., Ohkubo K. : Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Vol.43, No.6, pp. 857-875, 2010.
- 4) Aydan, Ö. : The moisture migration characteristics of clay-bearing geomaterials and the variations of their physical and mechanical properties with water content. *2<sup>nd</sup> Asian Conference on Saturated Soils, UNSAT-ASIA 2003*, pp. 383-388, 2003.
- 5) Aydan, Ö., F. Rassouli and T. Ito : Multi-parameter responses of Oya tuff during experiments on its time-dependent characteristics. *Proc. 45<sup>th</sup> US Rock Mechanics / Geomechanics Symp.* San Francisco, ARMA 11-294, 2011.
- 6) Aydan, Ö., Tokashiki, N., Tano, H. : Report on the monitoring of rock mass behaviour before and after backfilling at Gushikawa castle Remains. *Institute of Technology and Science of Nagoya*, 38 pages, 2011.