

# 琉球石灰岩層における自然岩盤構造物の 静的および動的挙動に関する研究

渡嘉敷 直彦<sup>1\*</sup>・アイダン オメル<sup>2</sup>・Melih GENIS<sup>3</sup>・太田 良己<sup>4</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> 東海大学 海洋学部海洋建設工学科 (〒 424-8610 静岡県静岡市清水区折戸三丁目 20-1)

<sup>3</sup> Zonguldak Karaelmas University Dept. of Mining Eng. (67100 Zonguldak, Turkey)

<sup>4</sup> 東海大学 大学院総合理工学研究科 (〒 424-8610 静岡県静岡市清水区折戸三丁目 20-1)

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

琉球諸島に広く分布する琉球石灰岩層内には、自然岩盤構造物と呼ばれる大小の自然空洞や海食崖が多数見られる。開発の拡大や遺跡の保護などの面から、これらの空洞や崖の崩壊に対する安定性の評価が求められている。本研究は、修復が予定されている城址の基礎岩盤である琉球石灰岩層内にある2つの自然空洞と海食崖を有する周辺岩盤の安定性評価を事例として上げ、現状の基礎岩盤の静的・動的安定挙動および空洞充填を考慮した空洞充填後の静的・動的安定挙動について、実測調査、各種の静的・動的解析および動的モデル実験から検討を行った。これらの静的・動的安定挙動を示すと同時に、現状の基礎岩盤の安定性に比べ、空洞部充填後における基礎岩盤の安定性が大きくなることを示している。

**Key Words** : karstic caves, cantilever cliffs, stability assessment, Ryukyu limestone, dynamic model tests and analysis

## 1. はじめに

自然岩盤構造物と呼ばれる自然空洞、鍾乳洞、海食崖は、海波、風、河川流、あるいは雨水などにより、岩盤が溶解あるいは浸食されて生じたものであり、琉球石灰岩層が分布する海岸周辺や内陸部に多数存在している。近年、都市化に伴う開発や遺跡保存の面から、これらの自然岩盤構造物における岩盤の陥没や崖の崩壊に対する安定問題の対応が求められている。

筆者らは、文化財に指定されている具志川城址の修復保存に関係して、城址直下に位置する2つの自然空洞と城址先端にある海食崖を有する基礎岩盤の安定性評価について種々の手法を用いて検討を行っている。本研究は、琉球石灰岩層における自然岩盤構造物の静的および動的挙動を検討する事例として、具志川城址基礎岩盤の安定性評価を取り上げ、現在の基礎岩盤の静的・動的安定挙動と安定化対策工として考慮されている空洞充填による静的・動的挙動について、解析および模型実験の両面から検討を行った。

現在の自然空洞における基礎岩盤の静的安定性を評価するため、RMR および Q- システムの岩盤分類に基づいた空洞の自立時間と空洞スパンの関係による検討、筆者

らの提案する空洞および崖の単純化支持モデルによる解析的検討、および空洞、海食崖を有する基礎岩盤の2次元、3次元モデルによる静的有限要素解析を実施した。また、現在の自然空洞が、地震力を受けた際の動的挙動を検討するため、3次元モデルによる動的有限要素解析、および2次元状態の基礎岩盤模型による動的載荷実験を行った。

一方、自然空洞の充填による基礎岩盤の静的・動的安定性を評価するため、2次元静的有限要素解析、3次元モデルによる静的・動的有限要素解析を行い、また、空洞部を充填した模型による動的載荷試験を実施した。

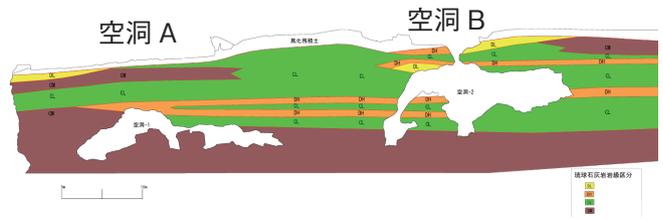
本論文では、これらの静的・動的安定挙動の結果を示すと同時に、現在の基礎岩盤の安定挙動との比較から、自然空洞の充填による安定性の向上について検証した。

## 2. 具志川城址基礎岩盤の力学的特性

具志川城址は、沖縄本島南端(糸満市)に位置し、長年にわたる風雨や海食を受けて、琉球石灰岩層を基礎岩盤とする岩盤内には、2つの大きな自然空洞と海食崖が形成されている(図-1)。図-1に示す2つの空洞を、それぞれ空洞A、空洞Bと呼び、空洞Aの形状は、幅25m、



(a) 現在の基礎岩盤の状況



(b) 空洞断面図 (空洞長軸方向)

図-1 具志川城址基礎岩盤と空洞部断面図

高さ 6m, 空洞 B は, 幅 23m, 高さ 9.5m であり, 空洞 B の天端部に, 直径 3m の縦穴が存在している. 基礎岩盤の安定性評価に必要な岩盤評価, 岩盤物性値および空洞部の形状寸法を得るため, ボーリング調査, 空洞周辺の測量および岩盤試験を実施した. 基礎岩盤は, 表土を除き珊瑚質石灰岩と砂質石灰岩で構成されている. 基礎岩盤の岩盤区分は, DL, DH, CL, CH で構成されている. 各岩級の力学試験による物理特性を表-1 に示す. また, 表-2 に, 基礎岩盤の各種岩盤分類 RMR<sup>1)</sup>, Q-値<sup>2)</sup> および GSI<sup>3)</sup> による評価値を示す. アイダン, 川本<sup>4)</sup> は,

表-1 基礎岩盤の岩盤区分における物理特性

Rock Class	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$\sigma_{ci}$ MPa	$\sigma_{ti}$ MPa	$E_i$ MPa	$\nu_i$	$V_{pi}$ Km/s	$\phi_i$
DL	18.2	0.69	0.14	220	0.33	0.86	37.8
DH	18.0	2.22	0.25	2060	0.32	2.75	43.7
CL	23.1	25.5	3.34	39680	0.29	4.85	50
CM	23.5	41.8	4.11	48400	0.29	4.91	55

表-2 基礎岩盤の岩盤分類

JGS Classification	Basic RMR	Q-Value	GSI
DL(sandy)	15-16	0.025	15
DH(sandy)	32-34	0.333	30
CL(coral)	45-49	1.563	50
CM(coral)	60-64	10.42	60

表-3 RMR より推定された岩盤の物性値

Rock Class	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E_i$ MPa	$\nu_i$	$\phi_i$	$c_m$ kPa
Surface soil	17	4	0.30	0	25
DL	18	6	0.36	15	8
DH	18	150	0.29	23	50
CL	23	5000	0.26	31	900
CM	23	10000	0.23	40	2000

岩盤の安定性評価に必要な岩盤の力学的特性を RMR 値から推定する手法を提案しており, 表-2 における岩盤分類 RMR へ適用すると, 基礎岩盤の力学的特性の推定値は, 表-3 のようになる.

### 3. 具志川城址基礎岩盤の静的安定性評価

#### (1) 岩盤分類に基づく空洞の安定性評価

表-2 に示された RMR および Q-値を用いて, 基礎岩盤内に存在する 2 つの空洞の現時点における安定性を評価する. Bieniawski<sup>1)</sup> は, RMR, 空洞スパンと自立時間の関係を提案している (図-2). また, Barton ら<sup>2)</sup> は, Q-

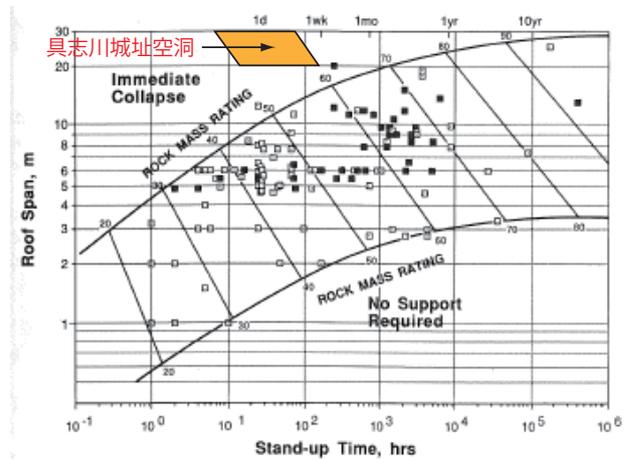


図-2 RMR に基づく具志川城址空洞の安定性評価

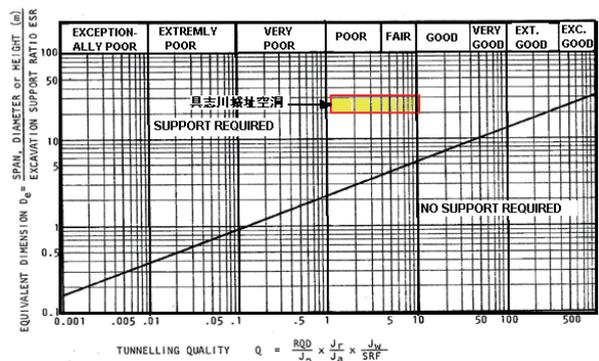


図-3 Q-値に基づく具志川城址空洞の安定性評価

値と空洞スパン，自立時間の関係を提案している（図-3）．具志川城址の2つの自然空洞におけるRMR, Q-値と空洞スパンの関係を図-2および図-3に示す．図より明らかなように，RMRに基づく評価（図-2）では，空洞の形成後に不安定になることが示唆されている．現状は，2つの空洞ともに天端からの岩塊の落盤は認められるものの，空洞全体の安定性は保たれている．一方，Q-値に基づく評価（図-3）では，何らかの支保が必要であることを示している．

## (2) 解析および経験的手法による安定性評価

筆者らは，空洞や崖の安定性を解析的に評価するため，図-4に示すような空洞部およびオーバーハングした崖の支持モデルを仮定し，土かぶり高さ $h$ と，支持部に引張り亀裂が発生する際の限界空洞幅 $L$ の関係を示している<sup>5)</sup>．ここでは，図-4に示す空洞を支持する単純ばりモデル，両端固定ばりモデル，およびアーチングモデル

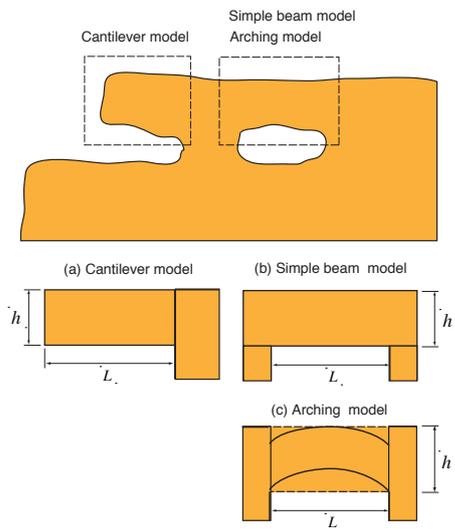


図-4 空洞及び崖の支持を仮定した単純力学モデル

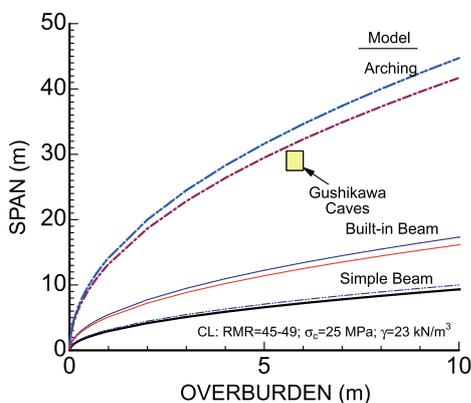


図-5 各支持モデルが示す限界空洞幅と具志川城址自然空洞の安定性評価

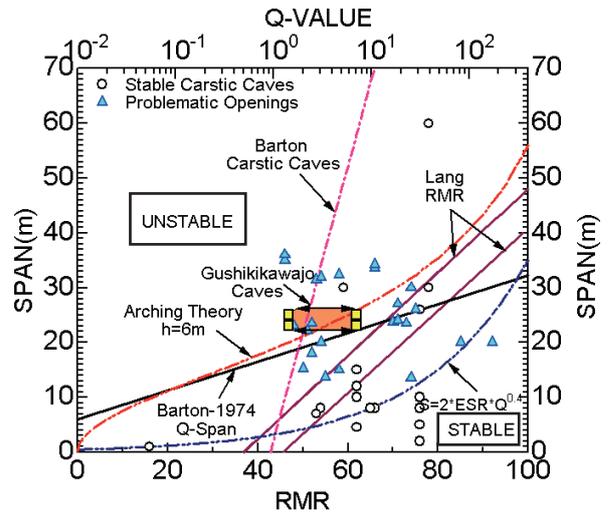


図-6 空洞の自立スパン，岩盤評価と空洞の安定性

による限界空洞幅と土かぶり高さの関係を図-5に示し，具志川城址の自然空洞の条件を同図に示している．2つの空洞の安定性は，単純針ばりモデル，および両端固定ばりモデルによる限界空洞幅を超えて，アーチングモデルの限界空洞幅に近接しており，周辺岩盤のアーチング作用が小さくなると，空洞の破壊が発生する可能性があり，不安定な状況にあると思われる．

つぎに，経験的手法による空洞の安定性について示す．図-6は，空洞の自立スパンとRMR, Q-値の関係を示している．同図には，実測された世界各地の空洞スパンと，鉱山を対象とした自立スパンとRMRの関係<sup>6)</sup>，アーチング理論による自立スパンとRMRの関係を同時に示してある．具志川城址の空洞スパンを適用すると，両空洞

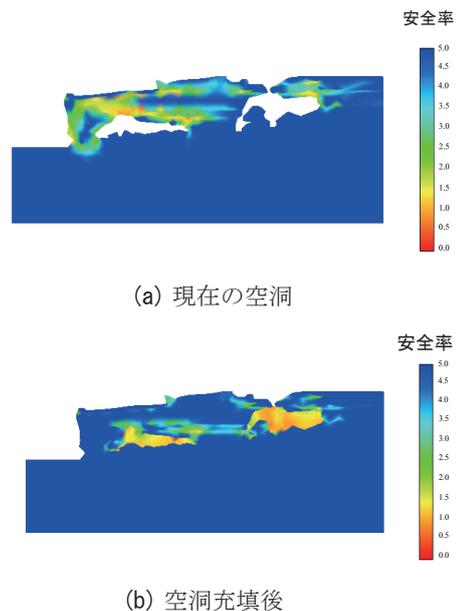


図-7 自重解析による現在および充填後の基礎岩盤の安全率

のスペンは、提案されている多くの自立スペンの上限値を超え、不安定領域にあることを示しており、両空洞の崩壊の危険性が暗示されている。

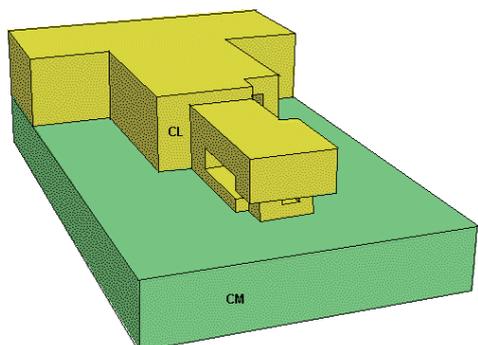
### (3) 2次元有限要素解析による空洞の安定性評価

現在の空洞の安定性と、安定化対策工として考慮されている空洞充填による安定性向上の効果を比較検討するため、空洞周辺岩盤の2次元有限要素モデルによる自重解析を行って、変形・応力特性を求めた。解析に用いた岩盤物性値は、表-3に示した物性値を採用した。なお、空洞充填材の物性値は、表-4に示す値を用いた。図-7に、自重解析によって求めた現在および充填後の空洞周辺岩盤の安全率の分布を示す。現在の空洞周辺岩盤の安全率(図-7(a))に比べ、充填後における空洞周辺岩盤の安全率(図-7(b))が大きくなっており、空洞充填による安定性の効果が認められる。

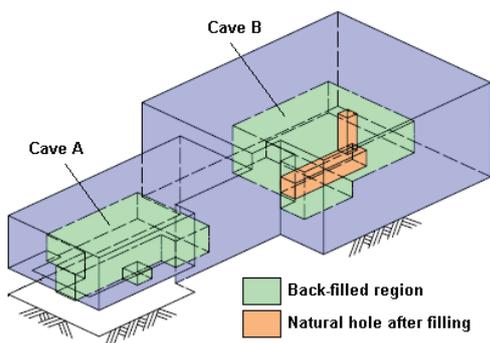
### (4) 3次元有限要素解析による空洞の安定性評価

図-1に示すように、2つの空洞を含む基礎岩盤は、複雑な形状を呈しており、2次元解析では大まかな安定性評価に留まるため、追加解析として、3次元状態での安定性を評価する3次元弾塑性有限要素解析を行った。解析の際の単純化を考慮し、現在の空洞モデルと充填後の空洞モデルを図-8のように単純化した。解析における岩盤の物性値として、表-3に示す物性値を用いた。また、空洞の充填効果を把握する解析に用いた充填材料の物性値を表-4に示す。

解析によって得られた現在の空洞の周辺岩盤、および空洞充填後の基礎岩盤における塑性域の発生を図-9に示す。空洞を有する静的3次元解析では、空洞Aの西側表層部周辺および空洞天端部周辺に塑性域の発生が認められる(図-9(a))。また、空洞充填後における解析では、2次元解析による結果と同様に、両空洞の周辺に大きな塑性域の発生は見られない。空洞Bの充填時に形成されるトンネル下部周辺に塑性域が発生している。これらの結果から、2次元の解析による評価と同様に、空洞充填による安定性の効果が認められる。



(a) 現在の空洞モデル



(b) 空洞充填におけるモデル

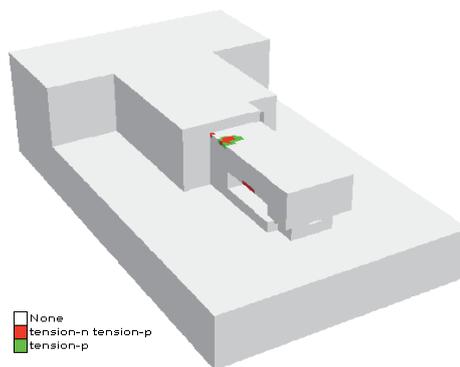
図-8 3次元解析における空洞の単純化モデル

表-4 3次元解析における充填材料の物性値

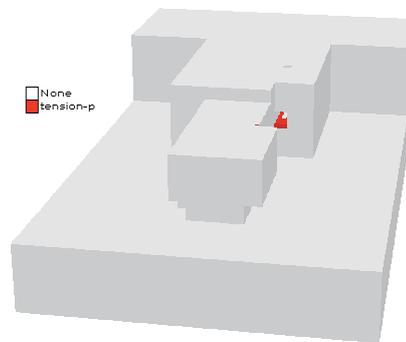
$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	$E$ MPa	$\nu$	$\phi$	$\sigma_c$ kPa
20	200	0.26	30	1000

## 4. 具志川城址基礎岩盤の動的安定性評価

2つの自然空洞を有する基礎岩盤および充填後の基



(a) 現在の基礎岩盤における塑性域の発生



(b) 空洞充填後における塑性域の発生

図-9 3次元静的解析による現在の空洞および充填後の塑性域の発生

礎岩盤が、地震力を受けた際の動的安定挙動を検討するため、3次元動的有限要素解析と、2次元状態における基礎岩盤模型を用いた動的載荷実験を実施した。

### (1) 3次元有限要素解析による空洞の安定性評価

3次元動的解析に用いた解析モデルは、2次元解析に用いたモデルを利用した。動的載荷は、解析モデルの軸方向および直交方向からの載荷を仮定した。また、この地域の地震記録を考慮し、加速度0.3g、周期2Hzの正弦波を入力した。

図-10に示すように、現在の空洞を有する基礎岩盤内には、塑性域が広範に広がり、仮定される地震の発生によって、両空洞が崩壊する可能性を示している。空洞Aは、西側（空洞の短軸方向）に転倒するように崩壊することが予想され、また、空洞Bは、空洞の内側にドリーネを形成するように崩壊すると推測される。

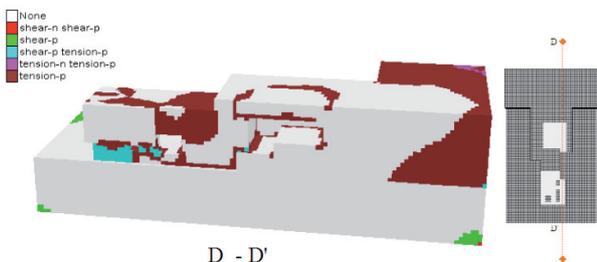


図-10 動的載荷による現在の空洞周辺の塑性域の発生 (D-D'断面)

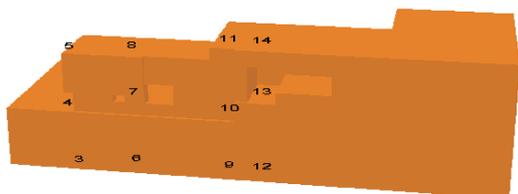


図-11 解析モデルにおける加速度応答の着目点

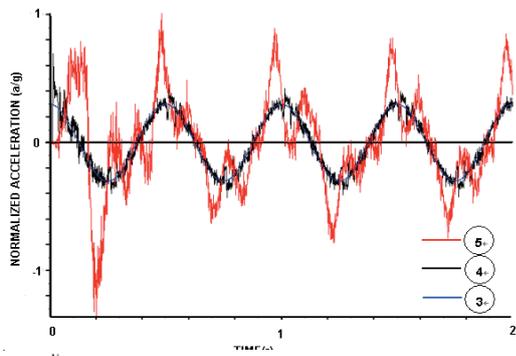


図-12 着目点3, 4, 5（城址先端部）における加速度応答

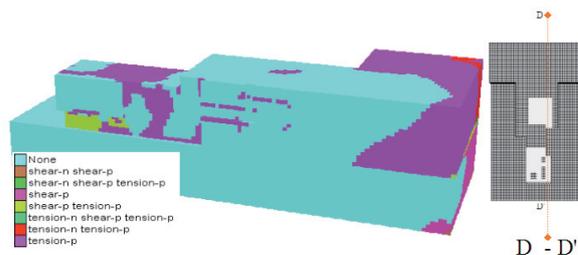


図-13 動的載荷による空洞充填後の塑性域の発生 (D-D'断面)

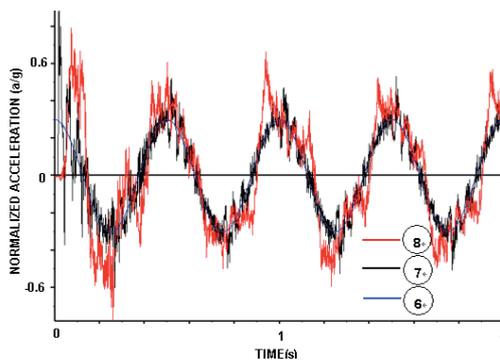
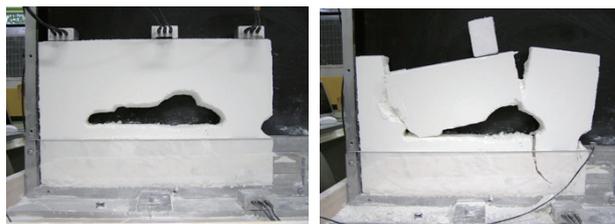


図-14 着目点6, 7, 8（空洞A部）における加速度応答

加速度応答の一例として、図-11に示す加速度応答の着目点において、基礎岩盤先端（着目点3, 4, 5）における応答を図-12に示す。基礎岩盤先端の加速度応答は、基盤から地表面の方向に加速度の振幅が増幅する傾向を示しており、頂部（着目点5）における加速度振幅は、入力加速度のおよそ4倍になっている。

つぎに、充填された基礎岩盤の動的挙動について述べる。図-13に、動的載荷による塑性域の分布を示す。空洞Aの充填部に塑性域が見られるが、これは充填材の強度や弾性係数が小さいことによる。現在の空洞を有する基礎岩盤の塑性域と比べ、充填後の基礎岩盤における塑性域が小さくなっており、充填による動的安定性に対する効果が認められる。加速度応答の一例として、図-14に、空洞A中央部付近（着目点6, 7, 8）の加速度応答を示す。図-12の加速度振幅と同様に、基礎岩盤頂部付近の加速度振幅が基盤と比べ、増幅され



(a) 現在の空洞モデル (b) 載荷後の破壊状況

図-15 空洞A部岩盤の模型動的載荷実験

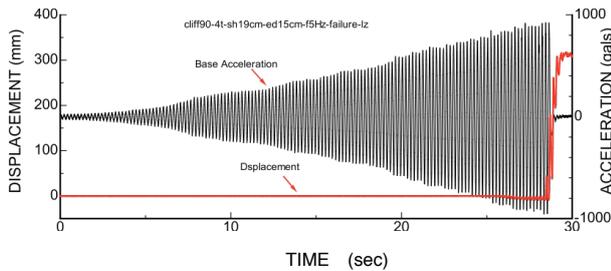


図-16 破壊実験における入力加速度と空洞先端の水平変位

る傾向を示している。また、頂部付近（着目点8）の応答加速度は、入力加速度の約2倍を示している。

## (2) 2次元模型載荷実験による空洞の安定性評価

現在の自然空洞および充填後の動的挙動を検討する2次元模型載荷実験を実施した。図-15(a)に示すような空洞A部基礎岩盤の模型および空洞充填の模型を作り、5Hzの正弦波を載荷して一連の破壊実験を実施した。現在の空洞モデルによる振動載荷後の破壊状況の一例を図-15(b)に示す。また、図-16に、入力加速度と空洞先端部の水平変位の挙動を示す。入力加速度1000gal付近で図-15(b)に示すような破壊が生じている。同じ載荷条件で空洞充填による模型実験を行った結果、入力加速度が1000galを超えても破壊が起こらず、空洞充填による効果が認められた。なお、本模型実験による結果の詳細は、改めて報告することとする。

## 5. 結論

琉球石灰岩層における自然岩盤構造物の静的および動的挙動を検討する事例として、城址の直下に位置する2つの空洞と海食崖を有する基礎岩盤の安定性評価を取り上げ、現状および空洞充填による安定性評価について、実測調査、各種の静的・動的解析および動的

モデル実験を通して検討を行った。本研究によって明らかになった事項を示す。

- (1) RMR および Q-値による岩盤分類による安定性評価、および解析的モデルによる評価では、2つの空洞は自立の限界にあることが示され、城址保存の上から、空洞充填などの対応が必要である。
- (2) 2次元および3次元静的有限要素解析の結果、現在の空洞を充填することにより、安定性が向上することが示された。
- (3) 3次元動的有限要素解析では、想定される地震に対し、現空洞の破壊の可能性が示された。
- (4) 空洞模型による動的載荷実験の結果、空洞部に充填材を有する場合、破壊が生じず、空洞充填の効果が認められた。
- (5) 自然岩盤構造物の力学的安定性評価手法として、経験的評価法、解析的評価法、数値解析手法および模型実験の各評価手法を提示した。これらの安定性評価手法は、空洞や海食崖などの静的、動的安定性を検討する手法として有用であることが示された。

## 参考文献

- 1) Bieniawski, Z. T. : Engineering rock mass classifications, New York: Wiley, 1986.
- 2) Barton, N., Lien, R. and Lunde, I. : Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports, *Rock Mechanics*, 6(4), pp.189-239, 1974.
- 3) Hoek, E. and Brown, E. T. : Practical estimates of rock mass strength, *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34(8), pp.1165-1186, 1997.
- 4) Aydan, Ö. and Kawamoto, T. : Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method, *Geoeng. 2000 Symposium*, Sydney, CD-ROM, OA0926, 2000.
- 5) 渡嘉敷直彦, アイダン オメル, 本村好彦, 照屋優, 湖城清, 上良卓 : 琉球石灰岩層における自然岩盤構造物の安定性評価に関する研究, 第12回岩の力学国内シンポジウム, CD-ROM, 2008.
- 6) Lang, B. : Span design for entry type excavations, *M. Sc. Thesis*, British Columbia Univ., Vancouver, BC, 1994.

## ASSESSMENT OF STATIC AND DYNAMIC STABILITY OF NATURAL ROCK STRUCTURES IN RYUKYU LIMESTONE FORMATION

Naohiko TOKASHIKI, Ömer AYDAN, Melih GENIS and Yoshimi OTA

The caves and cantilever-like cliffs, which are called natural rock structures in this article, are widely distributed all over Ryukyu Islands. The stability problems may arise in the form of huge sinkholes and cliff failures. This article presents an assessment of static and dynamic stability of Gushikawa Castle remains with two karstic caves using different techniques such as empirical and analytical techniques, two and three dimensional numerical analyses, and dynamic model tests. These assessment studies were carried out to check the present situation and the effect of filling these caves as a countermeasure. These analyses and the model tests showed that filling the cavities would increase the safety of natural rock structures.