

ひめゆりの塔および隣接した石灰岩空洞の 安定性評価

渡嘉敷 直彦^{1*}・藍壇 オメル²・Melih GENIS³

¹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)

²東海大学 海洋研究所 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸三丁目20-1)

³Zonguldak Karaelmas University Department of Mining Engineering (67100 Zonguldak, Turkey)

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

ひめゆりの塔は、第二次大戦の沖縄戦の最中、糸満市の壕内で戦没した霊を祀った祈念碑である。ひめゆりの塔の管理財団は、石灰岩空洞上部にあるひめゆりの塔の拡張を計画しており、拡張にともなう塔荷重の増加に対する塔および直下の石灰岩空洞の安定性の検討が求められている。

本研究は、塔荷重の増加にともなう空洞の安定性を検討するため、岩盤分類による周辺岩盤の物性値の評価を行って、モデル解析、数値解析および経験的手法を用いて空洞の安定性を評価した。数値解析による安定性の検討では、2次元および3次元のFEM解析を行っている。塔荷重増加による空洞の安定性が、各手法によって求めた結果の比較から検討され、空洞の崩壊に対する可能な対策を提案している。

Key Words : Karstic cave, Ryukyu limestone, rock mass classification, stability analysis

1. はじめに

沖縄本島の中南部には、琉球石灰岩層が分布し、層内には多くの自然空洞が存在している。近年、都市化に伴う開発や遺跡保存の面から、これらの自然空洞に対する安定性の評価が問題となっている^{1,2)}。

第2次大戦中、沖縄糸満市周辺の自然空洞の多くが、民間人や軍の避難壕として利用されてきた。現在、ひめゆりの塔として知られる空洞もその一つである(図-1)。ひめゆりの塔は、この壕で戦没した女学生を祀った祈念碑である。このひめゆりの塔を管理するひめゆり財団は、空洞上部にある納骨堂の拡張を計画しており、拡張にともなう荷重増加による空洞の安定性について検討が求められている。

本研究は、現在の空洞ならびに空洞上部の荷重増加に伴う空洞の安定性を評価することを目的とし、岩盤分類に基づく空洞周辺岩盤の物性値の推定³⁾、空洞上部の各載荷条件を考慮した浅所空洞モデル⁴⁾の解析、および2次元、3次元FEM解析を行って空洞の安定性を比較検討する。

最初に、ボーリングコアによる岩盤分類を行い、RMR値を求める。岩盤全体のRMRを評価するため、著者らが提案するRMRと空洞の安定状態の分類の関係を適用し、現在の空洞状態に対応するRMR値を逆解析し

て、コアから推定されるRMR値とともに岩盤のRMR値を特定する。こうして評価された岩盤のRMR値を用いて、著者らが提案するRMRと岩盤の物性値の関係の経験式²⁾を適用して空洞周辺岩盤の岩盤物性値を推定する。

つぎに、評価された岩盤物性値を用いて、空洞部の片持ちばりモデルによる解析、および空洞の2次元、3次元FEMモデルによる数値解析を行って、各載荷条件に対する空洞の応力状態を比較検討する。

最後に、これらの解析結果に基づいて、ひめゆりの塔自然空洞の安定性を確保する対策案について述べる。



図-1 ひめゆりの塔 (沖縄県糸満市)

2. 空洞周辺地盤の地質と物性値の推定

本節では、空洞周辺地盤の地質と空洞の安定解析に必要な岩盤物性値の推定について示す。

(1) 空洞周辺地盤の地質と岩盤分類

図-2 に示すように、過去に実施された地質調査の結果、空洞周辺の地盤は、上層に琉球石灰岩層、下層に島尻層群泥岩層から構成され、上部の石灰岩層 (LS) には、層理面や亀裂が広く存在している。下層の琉球石灰岩層 (LSG) は、上層よりも薄く、縦亀裂が密に分布している。また、上部の石灰岩よりも空隙が多い。下層部には、島尻層泥岩が分布している。空洞は、正断層と断層に沿う石灰岩の溶解によって形成されたと思われる。

過去の地質調査において、空洞周辺で 13 カ所のボーリングが行われている。最近再調査が実施され、4 カ所のボーリングが追加された。この 4 カ所のボーリングから得られたコアを用いて、RMR による岩盤分類を行った。岩盤分類によって得られた各ボーリングコアの深さ方向に対する RMR 値の分布を、図-3 に示す。2つの石灰岩層の RMR 値は、表層部を除き全体的に 50 を越える傾向を示している。なお、用いたボーリングのビットの径が小さいため、穿孔によって生じたコアの乱れによる RQD の値が、多少小さくなっている。

(2) 琉球石灰岩の材料特性と岩盤物性値の推定

琉球石灰岩の材料特性を求めるため、ボーリングコアから成形した供試体を用いて、物理試験および一軸・三軸圧縮試験を実施した。これらの試験から得られた琉球石灰岩のインタクト岩としての物理、力学的特性を表-1 に示す。これらの材料物性値は、構成する岩盤の力学的特性を評価するために参照される。

筆者らは、岩盤分類による評価値 RMR と、岩盤物性値の関係を総合的に評価できるつぎのような経験式を提案^{2),4),5),6)}している。

$$\frac{\phi_m}{\phi_i} = \alpha_0 - (\alpha_0 - \alpha_{100}) \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \quad (1)$$

ここで、 ϕ_m および ϕ_i は、それぞれ、各種の岩盤物性および岩石物性値を示す。 α_0 と α_{100} は、RMR=0 と RMR=100 に該当する各物性に対応する α の値である。また、 β は、実験データに対する上記の関数の最小化から決定される定数である。Aydan & Kawamoto⁴⁾ が示した岩盤分類による岩盤物性値の無次元化関係式を琉球石灰岩岩盤に適用すると、琉球石灰岩岩盤の各物性値を推定する際の式(1)における各係数は、表-2 のように与えられる。表-1 に示す岩石物性値および表-2 に示す定数を用

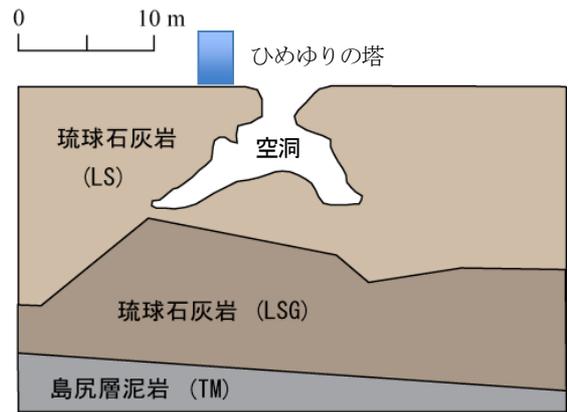


図-2 空洞代表断面における地質図

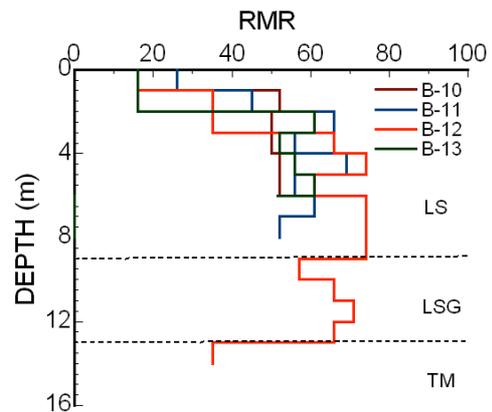


図-3 空洞周辺ボーリングコアから評価された深さ方向の RMR 値の分布

表-1 琉球石灰岩の物理、力学的特性

層	γ_t kN/m ³	E_i GPa	ν	c_i MPa	ϕ (°)	σ_t MPa
LS	22.1	13.5	0.20	6.6	55	1.50
LSG	22.1	8.10	0.30	4.6	50	1.00
TM	20.0	1.09	0.25	0.7	30	0.50

表-2 琉球石灰岩岩盤の各物性値の評価に関する式(1)の定数 $\alpha_0, \alpha_{100}, \beta$ の値

力学特性	α_0	α_{100}	β
弾性係数 E	0.0	1.0	6
Poisson 比 ν	2.5	1.0	0.3
圧縮強度 σ_c	0.0	1.0	6
引張り強度 σ_t	0.0	1.0	6
摩擦係数 μ	0.3	1.0	1.0

表-3 琉球石灰岩岩盤の物理、力学的特性

層	γ_i kN/m ³	E_i GPa	ν	c_i MPa	ϕ (°)	σ_i MPa
LS	22.1	4.90	0.22	1.3	40	0.92
LSG	22.1	2.70	0.30	0.92	32	0.43
TM	20.0	0.15	0.27	0.10	26	0.07



図-4 ひめゆりの塔の近辺にある陥没空洞の例

いて対応する琉球石灰岩岩盤の各物性値を算定した。琉球石灰岩の岩盤としての物性値を表-3に示す。岩盤の摩擦角 ϕ は、新城ら⁷⁾によって報告された破碎された石灰岩の摩擦角に基づいて定めている。

3. 経験的手法による空洞の安定性評価

ひめゆりの塔の近辺には、図-4に示すような陥没した空洞が数カ所存在している。ひめゆりの塔直下の空洞も陥没空洞である。著者らは、表-4に示す空洞の安定性を表す4段階の区分を定め^{3),5)}、琉球諸島に分布する自然空洞や鍾乳洞の調査結果に基づいて、岩盤のRMR値と空洞スパンとの関係に、安定性区分の重ね合わせを行った。図-5に、空洞の調査結果と安定性の区分の重ね合わせを示す。図には、岩盤のRMR値と空洞スパンをプロットし、さらに安定状態の区分を別記号で区別示した。この調査結果に、安定性の4区分を重ね合わせた。各領域の境界は、直線で近似している。また、各領域の境界をべき関数で近似した場合を図-6に示す。図-5および図-6には、着目しているひめゆり壕(空洞)および隣接した陥没空洞の調査結果を重ねて示してある。

図-5および図-6を用いることにより、琉球石灰岩空洞の大まかな安定性評価が可能である。また、設計の際には、図-5の直線近似による安定性評価が便利であるが、調査結果に基づく空洞の安定性評価については、図-6に示すべき関数近似による評価が適切であろう。

表-4 空洞の安定性を表す4段階区分と状態の図示

区分	空洞の状態	図示
I	局所・全体的に安定である。	
II	局所的に天端からブロックの落下や側壁からブロックのすべりなどが発生する。しかし、空洞は全体的に安定である。	
III	局所的に発生するブロックの落下や、すべりによる崩壊領域が大きく、崩壊領域の高さが空洞幅より大きい。また、長期的には、崩壊に至る可能性が大きい。	
IV	空洞は不安定で、空洞上部が陥没している。	

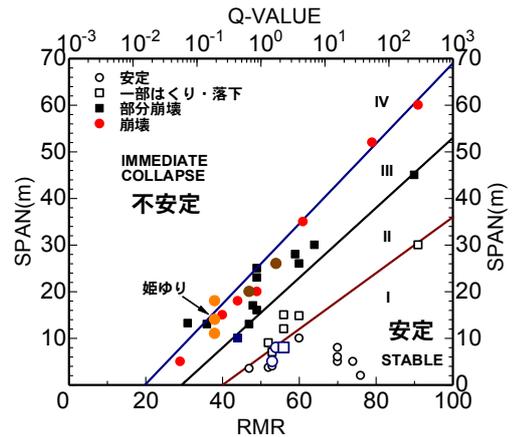


図-5 空洞調査結果に基づく空洞の安定性区分(直線近似)

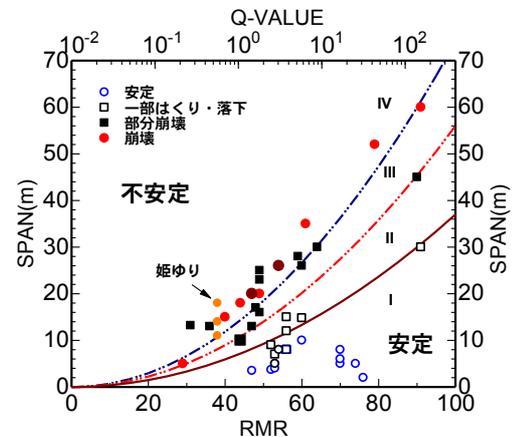


図-6 空洞調査結果に基づく空洞の安定性区分(べき関数近似)

つぎに、著者らは、浅所空洞上部の安定性を評価するため、構造力学における梁の曲げ理論およびアーチ理論を適用し、空洞上部の安定性を評価する手法を提案³⁾している。図-7は、図-5および図-6に示した調査空洞のRMR値と空洞スパンのプロット値と、空洞上部の厚さ $h_r = 2\text{m}, 4\text{m}, 6\text{m}$ に対する曲げ理論とアーチ理論による限界スパンの解析値の比較が示されている。この図より、岩盤のRMR値が30以下の場合には、曲げ理論およびアーチ理論による空洞上部の安定性の評価が困難であることを示している。また、曲げ理論による空洞上部の安定性の評価は、局所的評価であるのに対し、アーチ理論の安定性の評価は、自然空洞の崩壊に対する限界スパンを予測している。

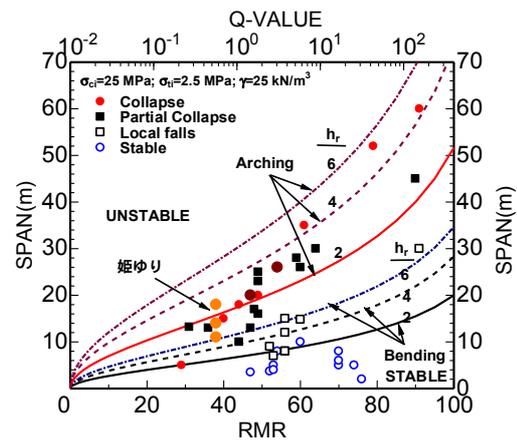


図-7 空洞調査結果と曲げ理論およびアーチ理論による空洞上部崩壊の限界スパンの比較

4. ひめゆり壕（空洞）の安定解析

ひめゆりの塔納骨堂拡張による荷重増加に対し、壕の安定性の検討が求められている。本節では、理論解析および2次元、3次元FEM解析により、空洞の安定性を評価する。

(1) 壕の解析モデルと荷重条件

理論解析による壕の安定性を検討するため、図-8に示す解析モデルを設定した。空洞自重、塔および納骨堂を上載荷重として、空洞上部を片持ちばりとしてモデル化する。荷重条件は、岩盤の自重のみの場合、現在の塔荷重状態および納骨堂拡張による荷重状態の3ケースを考慮する(表-5)。図-8に示すように、塔直下の岩盤自重と塔、納骨堂の荷重は、片持ちばりに分布荷重として荷重する。

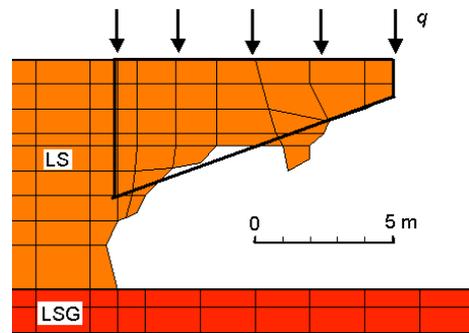


図-8 ひめゆり壕の解析モデル

表-5 解析で考慮する荷重条件

現在		納骨堂増設時	
荷重 (kN)	分布荷重 (kPa)	荷重 (kN)	分布荷重 (kPa)
96	5	293	15

(2) 片持ちばり解析結果

各荷重条件下で算定された片持ちばりの曲げ応力の分布を図-9に示す。表-3に示したように、推定した岩盤の引張り強度は、 $\sigma_{ta} = 0.92 \text{ MPa}$ であるので、現在の塔荷重および納骨堂拡張時の曲げ応力は、岩盤の引張り応力よりも小さいことを示している。図中の片持ちばり断面減少による応力分布の算定は、空洞内の再調査時に岩盤の一部に不連続岩塊が認められ、その岩塊が片持ち構造として寄与しないと考え、片持ちばりの断面減少の条件と拡張時の荷重条件で応力を算定した。この片持ちばり断面減少による固定端の応力は、 $\sigma_t = 0.991 \text{ MPa}$ となり、納骨堂拡張時には、岩盤の引張り強度より大きくなること示され、岩盤の亀裂発生が予想される。

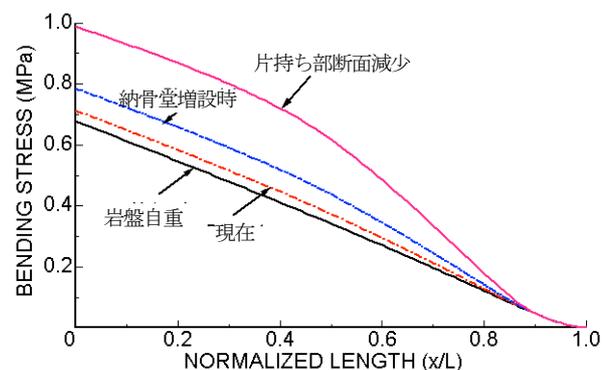


図-9 各荷重条件下における片持ちばりの曲げ応力分布

(3) 2次元、3次元FEM解析

片持ちばりによる解析モデルで考慮した空洞の同一断

面で、周辺岩盤を弾性体と仮定した2次元FEM解析を行った。解析を行った2次元FEM解析のメッシュ図を図-10に示す。解析に用いた材料特性は、表-3に示した物理、力学特性を用いた。図-11に、納骨堂拡張による荷重増加時の解析断面における主応力分布を示す。空洞オーバーハング上部に、引張り応力の大きい領域が認められる。引張り応力の最大値は、 $\sigma_t = 0.770$ MPa である。

岩盤の引張り強度が $\sigma_{ta} = 0.92$ MPaと推定されるので、引張り亀裂を発生させる応力レベルに近いことがわかる。

表-6に、片持ちばり解析と2次元FEM解析によって算定された片持ちばり固定端上部における最大引張り応力の比較を示す。FEM解析によって算定された引張り応力の値は、片持ちばりの曲げ理論から求めた引張り応力の値よりも小さく評価されている。これは、曲げ理論で考慮している応力評価点とFEM解析における応力評価点の位置が異なることと、片持ちばりモデルにおける固定端の仮定とFEMモデルにおける同位置での条件が異なることによると思われる。すなわち、片持ちばりの曲げ理論による応力評価は、FEM解析による応力に比べて、安全側に評価されている。

ひめゆり壕の安定性を評価するもう一つの解析として、3次元FEM解析を行った。解析を行った3次元解析モデルを、図-12に示す。解析に用いた材料特性は、2次元解析と同じ材料特性を用いている。荷重条件は、表-5に示す納骨堂増設時における分布荷重15kPaを考慮している。解析の結果、地表面における最大引張り応力は、理論

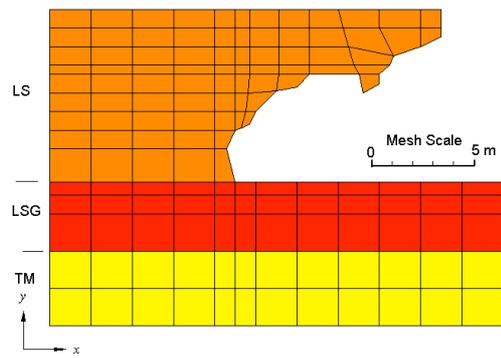


図-10 2次元FEM解析メッシュ図

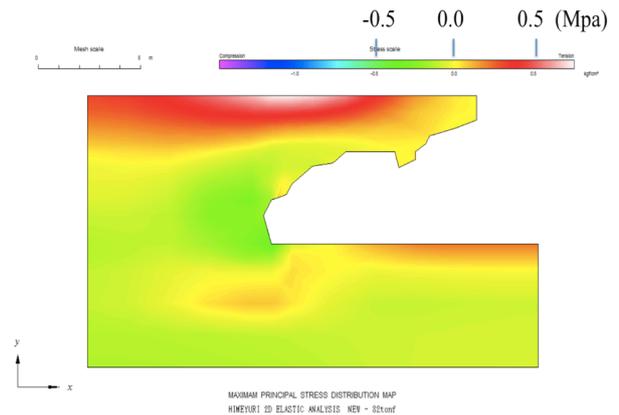


図-11 最大主応力分布

表-6 片持ちばり解析およびFEM解析による最大引張り応力の比較

荷重条件	解析法	最大引張り応力 (MPa)	最大圧縮応力 (MPa)
塔設置前 (岩盤自重)	FEM	0.557	-1.363
	理論	0.677	
現在	FEM	0.631	-1.402
	理論	0.713	
納骨堂拡張時	FEM	0.770	-1.478
	理論	0.991	

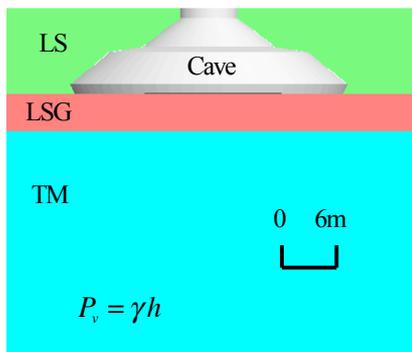


図-12 3次元FEM解析モデル

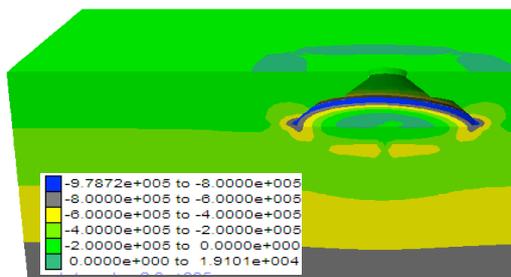


図-13 3次元解析によるモデルの最大主応力分布

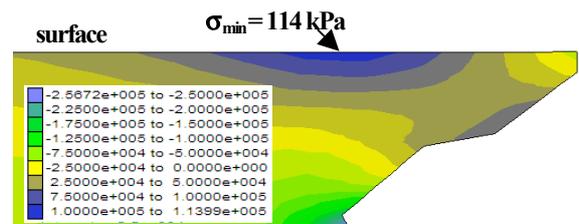


図-14 3次元解析による空洞上部の応力分布

解析および2次元FEM解析による最大引張り応力の値と比べて、かなり小さな値(0.114MPa)を示している(図-13および図-14)。これは、空洞の幾何学的状態が3次元状態であり、空洞周辺岩盤の応力分布に3次元効果が現れていると考える。

(4) 空洞の不安定性に対する対策

空洞の安定性を評価する解析の結果、納骨堂拡張に対する理論解析および2次元FEM解析が示す空洞上部の引張り応力は、岩盤の引張り強度に近接しており、荷重増加に対する対策が必要である。ひめゆり壕を現状のまま保存する制約から部分充填は困難であり、空洞オーバーハング部を支える杭工法、スラブ工法、ロックアンカー工法などの対策工を考慮する必要がある。

5. 結論

本研究は、ひめゆり壕の納骨堂拡張計画に伴う空洞の安定性を評価するため、地質調査、岩盤分類に基づく空洞の安定性評価、および2次元、3次元FEM解析を行い、解析による応力分布と、推定した岩盤の引張り強度の比較を行った。得られた結果を要約する。

- 1) 著者らが提案した岩盤分類に基づく空洞の安定性を評価する経験式を適用し、ひめゆり壕に隣接する陥没空洞の逆解析を行って、推定した岩盤のRMR値の妥当性を示した。得られた岩盤のRMR値から岩盤の物性値を推定した。
- 2) 片持ちばりの曲げ理論から算定した固定端部の曲げ応力は、自重、および現状の荷重条件下において、岩盤の引張り強度よりも小さな値を示している。納骨堂拡張に伴う荷重条件では、岩盤の引張り強度を超えた引張り応力が生じており、空洞オーバーハングの端部に引張り亀裂が生じる可能性を示している。

- 3) 2次元FEM解析によって算定された引張り応力は、各載荷条件において曲げ理論から求めた引張り応力よりも小さいことが示された。これは、モデルの幾何学的条件および応力評価点の差異によると思われる。
- 4) 3次元FEM解析による空洞地表面付近の最大引張り応力は、曲げ理論および2次元FEM解析による引張り応力に比べてかなり小さく、空洞の3次元効果が現れている。

琉球列島では、地震の発生が活発であり、今後予定される納骨堂拡張時の壕直下の空洞の安定性を検討するに際しては、動的解析による検討が必要である。

参考文献

- 1) 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, pp.203-208, 2008.
- 2) 渡嘉敷直彦, アイダン オメル: 琉球石灰岩岩盤に対する岩盤分類の適用とその力学的特性の評価, 第40回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会岩盤力学委員会, pp.387-392, 2010.
- 3) Aydan, Ö. And Tokashiki, N.: A comparative study on the applicability of analytical stability assessment methods with numerical methods for shallow natural underground openings, *13th International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Melbourne, Australia, pp.964-969, 2011.
- 4) Aydan, Ö. and Kawamoto, T.: Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method, *GeoEng. 2000 Symposium*, Sydney, OA0926, 2000.
- 5) Tokashiki, N.: A Fundamental Research on the Engineering Properties and the Evaluation of the Stability of Rock Mass and Masonry Structures of Ryukyu Limestone, *Doctorate Thesis, Waseda University*, pp.219, 2011.
- 6) Tokashiki, N., Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass, *Journal of Geotechnical Engineering, JSCE*, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 7) Sinjo, T., Miyagi, N. and Nagayoshi, K.: Mechanical properties of crushed Ryukyu limestone sands (in Japanese), *Technical Report of Agricultural Faculty, University of the Ryukyus*, No.48, pp.113-118, 2001.

STABILITY ASSESSMENT OF HIMEYURI MONUMENT AND ADJACENT KARSTIC CAVE

Nahohiko TOKASHIKI, Ömer AYDAN and Melih GENIS

Himeyuri monument is built over a partly collapsed karstic cave in Itoman City in Okinawa Islands of Japan in the memory of people died during the Second World War. The authorities have been recently considering enlarging the monument and they are concerned whether the cave would be stable under new loading conditions. In this study, the authors have investigated the stability of the cave under new loading conditions using the empirical, analytical and numerical methods. For this purpose, 2D and 3D numerical analyses were carried out. The stability of the cave under new loading conditions is discussed in view of results from different methods and possible counter-measures against collapse of the cave are presented.