

琉球諸島における琉球石灰岩海食崖の 最近の崩壊事例とその分析

堀内 浩貴^{1*}・藍檀 オメル²・渡嘉敷 直彦³

¹琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

²琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

³琉球大学島嶼防災研究センター 研究開発室 (〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

*E-mail: e145317@eve.u-ryukyu.ac.jp

海食崖の崩壊は海波、雨水の溶解および化学的風化、物理的風化による、岩盤劣化や地震などによって発生する。しかし、詳しい崩壊要因などは複雑であるため、安定性評価をする上で、それらを解明することが重要であると思われる。本論文は、琉球諸島における海食崖の実態を露頭調査やドローンによる計測および最近崩壊した瀬底島海食崖の崩壊メカニズムについて赤外線カメラおよび有限要素解析を用いて安定性評価の検証を行い、その結果を報告する。また、RMQR法による岩盤物性値の評価に対して、今回新たに岩盤の空隙を考慮して、実際の崩壊事例に対して適用を検討した。

Key Words : cliff failure, infrared camera, drone, FEM, rock mass quality rating(RMQR)

1. はじめに

琉球諸島には海食崖が数多く存在し、海食崖上や周辺には歴史的建造物や道路などが存在するため、安定性の検討が求められている。その中には崩壊している事例も多数存在する。急峻な岩盤斜面が海岸に面している場合、その岩盤斜面は海水の作用（波浪、潮流、海流）、凍結・融解、日射、塩類、乾湿や化学反応などの化学的風化や物理的風化作用を受ける。化学的風化や物理的風化によって岩盤内の強度低下や幾何学的形状の変化に伴う不安定性を招く。そのうえ、浸食作用による不安定現象によって自然発生的な崩壊が起こり、平坦地が少ない海岸近傍の開発に伴う人工的な要因が加わって、岩盤の崩壊形態によっては、重大な事故が生じることがある。

著者らは、琉球諸島における琉球石灰岩海食崖の実態調査と、それに伴う岩盤についての各種計測を実施した。調査時にみられた琉球石灰岩海食崖の現場調査の結果報告を示し、最近瀬底島で崩壊した海食崖の事例を取り上げ、そのメカニズムと崩壊要因について現場計測および数値解析により検討を行った。

本論文は、現地調査を行う際に新たに取り入れたドローンによる地形測量とその結果、調査による各種検討結果および、有限要素モデルによる最近崩壊した海食崖の安定性評価の結果を示したのち、それを踏まえたうえで

琉球石灰岩海食崖の主な崩壊要因を詳しく考察していく。

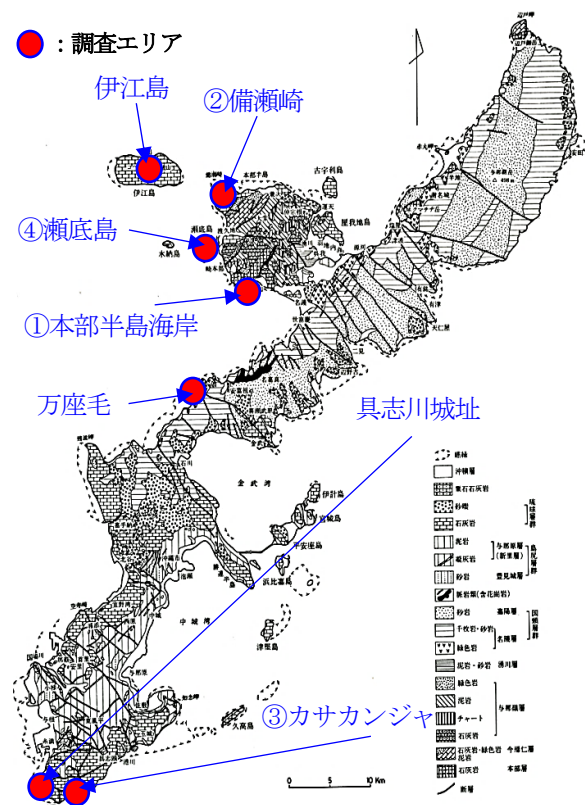
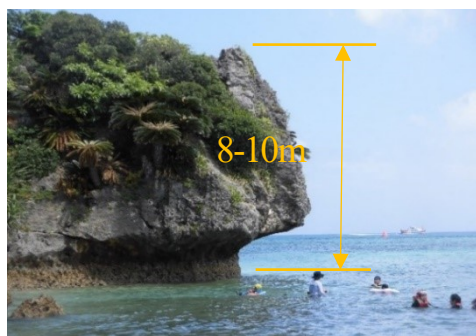


図-1 沖縄本島の調査エリアおよび地質（木崎ら¹⁾）



(a) 沖縄本島本部半島周辺の海食崖
(図-1の①地点)



(b) 最近崩壊した備瀬崎周辺の海食崖そのⅠ
(図-1の②地点)

図-2 琉球諸島における海食崖



図-3 飛行制限区域
(ドローン飛行支援飛行地図サービスより)

2. 琉球諸島における海食崖の実態

(1) 調査エリアおよび地質状況

本研究の調査エリアは、琉球石灰岩が分布する沖縄県本島、伊江島、石垣島および竹富島である。今回の検討エリアである瀬底島を含めて、沖縄本島における調査エリアおよび地質状況を図-1に示す。本研究は、琉球石灰岩海食崖を調査対象としており、琉球石灰岩層の分布エリアを重点的に調査した。

(2) 琉球諸島の海食崖の実態

本調査によって確認された各エリアにおける海食崖の事例を図-2に示す。図-2(a)にみられるように海岸付近には、観光客や家族連れが多数見られ、海食崖の安定性評価を行うことで海食崖崩壊に伴う人身事故を事前に防ぐことができると思われる。そのうえ、調査時には断崖絶壁でかつ崖の周りには海が広がっているため、容易には、調査できない場所も多々存在した。また、図-2(b)は、最近崩壊した備瀬崎周辺の海食崖の様子である。これをみると、崩壊した岩盤の面の色が、明らかに周りの岩盤と異なっていることがわかり、海食崖の岩盤の劣化および風化状況を確認することができた。

3. ドローンによる地形測量の海食崖調査への適用

(1) 海食崖調査の従来の課題

海食崖の調査は、海波の影響や、断崖絶壁の調査をする際に危険が伴い、崖の形状や浸食の状況を把握するための測量や、人間が直接的に測定が行えないような高所の岩盤調査が困難であった。直接的に、観察・計測が可能な場合には実際に計測を実施し、岩盤評価を行っていたが、直接測定ができなかった箇所については観察のみによる推定が行われていた。

上記のように、海食崖の安定性を評価する際の詳細な調査結果が得られていないのが現状である。

(2) 調査概要

最近注目されているドローンは、災害時や危険区域などの人間の立ち入りが困難な場所への侵入が安全かつ容易、小型でかつ軽量なため、持ち運びに便利であり、有人ヘリや大型機と比較して低コストなどの様々な利点を有している。

本研究では、上記の課題を解決するため、ドローンによる調査を実施した。ドローンによる調査は飛行制限区域の都合上、糸満海岸の具志川城址周辺を対象に行った。具志川城址周辺は、地上や海上からの測量が困難であり、海食崖の詳細な調査をするために、今回具志川城址の海食崖に、ドローンによる地形測量の活用を検討した。

また、今回のドローンは、PHANTOM 4 PROを用いた。このドローンは、周りの障害物などがなければ1km先まで遠隔操作できるため、広範囲におよぶ調査に優れており、崖の詳細な地形を把握するには最適であると考えた。しかし、ドローンは空港周辺などには飛行が制限されており、万が一制限区域にドローンが侵入した場合、自動で止まる仕組みになっている。そのため事前に本研究の調査領域が飛行可能エリアかどうかの確認も同時に行った(図-3)。

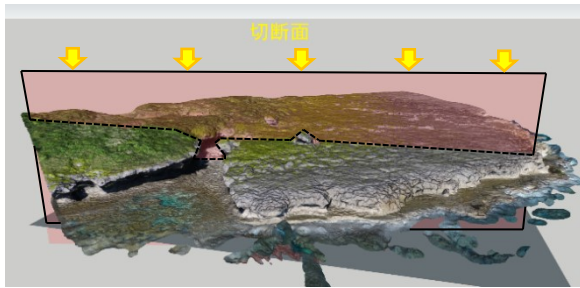


図-4 カサカンジャ周辺の地形断面図 (図-1③の地点)

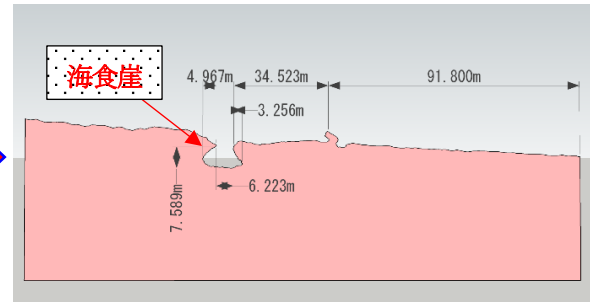


図-5 地形断面図および海食崖の寸法 (図-1③の地点)

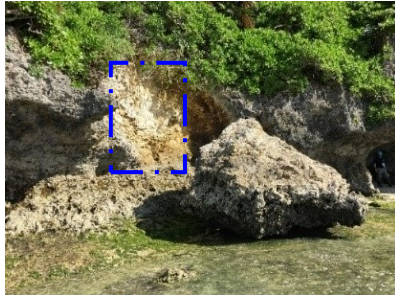


図-6 最近崩壊した瀬底島海食崖 (図-1④の地点)

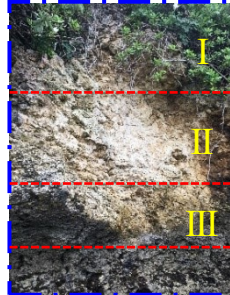


図-7 海食崖の崩壊面

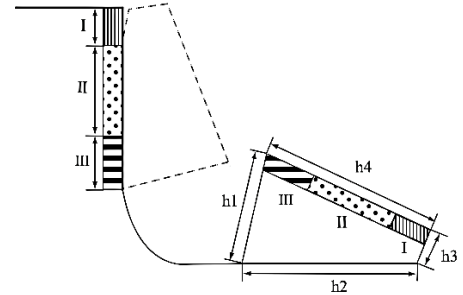


図-8 最近崩壊した瀬底島海食崖の簡易モデル

(3) 調査方法

ドローンにデジタルカメラを搭載させ、一定間隔で撮影することで高解像度のステレオ画像を撮影する。そして、3次元モデルは、写真測量技術によりSfMと呼ばれるソフトを用いて、先ほどのステレオ写真から地形の点群データを利用し、作成していく。

本調査は、糸満海岸周辺の具志川城址およびカサカンジャを中心に、その周辺エリアをドローンであらゆる角度から撮影を行った。また、安全かつ効率的な作業を両立させるために、自動航行だけでなく、撮影画像をリアルタイムで監視しながら飛行姿勢を補正した。特に、崩壊した海食崖の岩塊形状を把握するため、可能な限りドローンによる計測を実施し、鮮明な画像を取得するために、日照条件と対象箇所の崖の撮影方向を勘案し、最適な調査時間を設定した。これらを考慮したうえで、図-4にカサカンジャ周辺の地形断面図の結果および地形の切断位置を示す。

(4) 調査結果

従来、調査が困難であった海食崖の浸食状況の把握および崩壊した岩塊の形状把握に対して、ドローンの活用により、得られた知見を以下に示す。

- 1) 調査が困難な場所にある海食崖の浸食状況をドローンの適用により把握することができる。
- 2) 今回のドローンの測定による精度はGPS測量とドローンによるステレオ画像をSfMソフトで解析した時の誤差がミリ単位であったため、従来の測定精

度よりもはるかに高い精度となった。

- 3) 調査に最適な気象条件下（雨無、無風）で、ドローンを活用することにより、海食崖付近の詳細な地形を得ることが可能である。
- 4) ドローンによる地形測量により、地形の3Dモデル化が可能であるため、任意の海食崖および地形の断面やその断面の詳細な寸法を把握することが可能である（図-5）。

4. 最近の崩壊事例に関する各種検討

最近崩壊した海食崖の事例として、瀬底島の海岸周辺の海食崖の崩壊事例を図-6に示す。調査時に得られた海食崖の特徴として、崩壊面の観察により堆積状況が異なる3層の構造が見受けられた（図-7）。崩壊面の劣化状況より、上下の層（図-7, I, III）は劣化が進行しており、中央の層（図-7, II）は、劣化の進行があまり進んでいないことが確認された。藍檀、川本（1986）²⁾は岩盤の亀裂について、一様な岩盤内部に亀裂が発生し始めると、途中で破壊は止まることなく、崩壊は避けられないことを示している。この指摘によれば、亀裂発生とともに岩盤の崩壊が起こり、岩盤が一様であれば面内で同様の劣化が生じていたと考えられる。しかしながら、図-7に示す崩壊面にみられるように上下の岩盤劣化が異なっている上、中央の層（図-7, II）は劣化があまり見られなかった場合、上下の層（図-7, I, III）より中央の層（図-7, II）の岩盤強度が高くなければ、このような現象が起こらないと推定できる。今回の検討では、崩壊

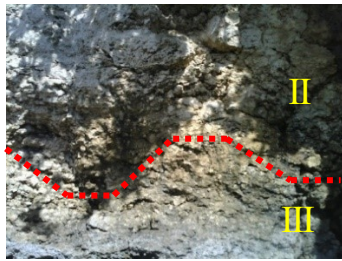


図-9 赤外線カメラで撮影した崩壊面の一部

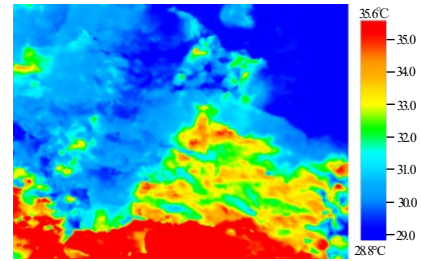


図-10 赤外線カメラによる崩壊面の劣化状況

表-1 破壊面の各表層面の幅

I	II	III
0.7m	1.6m	0.9m

表-2 崩壊した岩塊の寸法

h1	h2	h3	h4
2.9m	4.3m	0.8m	3.2m

表-3 シュミットハンマーによる測定結果

測定回数	反発度		
	①	②	③
I	—	—	—
II	98	98	98
III	30	46	36

面および崩壊した岩塊の形状寸法の測定、シュミットハンマーの反発測定による物性値の推定および赤外線カメラによる崩壊面の劣化評価を行った。

(1) 崩壊面および岩塊の寸法測定

最近崩壊した瀬底島の海食崖岩塊の簡易モデルを図-8に示す。崩壊面については、各層をI, II, IIIとし、それぞれの形状寸法を直接的に測定を行った。また、崩壊した岩塊の形状寸法をh1, h2, h3, h4と設定し、同様に直接的に測定を行った。これより、それらの測定結果をそれぞれ表-1と表-2に示す。

(2) シュミットハンマーによる強度測定

図-8に示すIIおよびIIIの領域にある崩壊面についてSanyoのシュミットハンマーで簡易測定を行った。Iの領域については、安全上の理由で測定はできなかった。これより、シュミットハンマーによる測定結果を表-3に示す。測定結果より、IIの領域とIIIの領域を比較して、1/3-1/2ほど反発度が小さいことが分かった。

(3) 赤外線カメラによる岩盤劣化評価への適用

海食崖崩壊の1つの大きな要因として岩盤の劣化がある。そのため今回、岩盤劣化を評価する方法として、赤外線カメラを用いて岩盤劣化の評価が可能であるかの検討を試みた。赤外線カメラの評価には、物体に熱を与えて、その冷え方を観察するactive型と自然の状態で物体の温度分布を観察するpassive型が存在する。なお、

Aydan³⁾の研究より、本研究ではactive型で、海食崖の崩壊面に赤外線カメラを通し、岩盤表面の温度の下がり具合から岩盤劣化の評価が可能であるかの検討を試みた。エネルギー保存則の原理を用いて、一様な熱を加えてから冷えていく際に、その熱吸収率の違いで温度分布が異なり、岩盤の劣化箇所の違いについて評価が可能ではないかと考えた。ここで、赤外線カメラ照射対象岩盤の表面を図-9に、崩壊面に赤外線カメラを照射した際の結果を図-10に示す。シュミットハンマーで計測した岩盤表面を赤外線カメラで観察した結果、計測された海食崖の崩壊面を見ると、岩盤の元々の空隙部を除き、IIの領域は温度が低くなっていることが確認でき、その領域は岩盤表面の色が白くなっていた。一方で、IIIの領域は岩盤表面の温度が高くなっている箇所ほど、岩盤の表面が黒くなっていることが確認できた。つまり、岩盤の表面が黒くなっているほど、劣化が進行しており、熱吸収率が高いことが確認でき、赤外線カメラを用いることにより岩盤の劣化を評価することが可能であると思われる。しかし、今回の場合、地形の影響、岩盤の空隙により均等に熱は当たらない箇所があり、その影響で±1℃の温度差が確認された。また、赤外線カメラは岩盤の風化度合いによる定量的な評価は未だ研究段階であり、現段階では困難であると思われる為、今後の課題とさせていただく。

5. 各種解析による最近崩壊した海食崖の安定性評価

解析による評価として、瀬底島の崩壊した海食崖の崩壊形態および崩壊時の引張応力状態を把握するため簡易解析および有限要素法による数値解析を実施した。

(1) 簡易解析による評価

Tokashiki and Aydan⁴⁾が海食崖の破壊条件をすでに示しており、せん断破壊が発生する限界深さ L (m)は次のように与えられる。

$$L > \frac{c}{\gamma} \quad (1)$$

ここで、 c 、 γ および L は、それぞれ岩盤の粘着力、

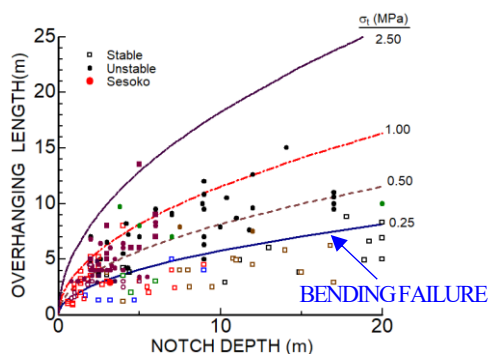


図-11 片持ちばりの曲げ理論による崖崩壊の限界条件と琉球諸島における海食崖の調査による崩壊の有無

単位体積重量および浸食深さである。同様に、オーバーハング部を短形と仮定すると、曲げ破壊が生じる限界深さは式 (2) によりつぎのように与えられる。

$$L > H \sqrt{\frac{\sigma_t}{3\gamma H}} \quad (2)$$

ここで、 σ_t 、 H は、岩盤の引張強度及びオーバーハング部の高さである。なお、4章(1)で測定した瀬底島の最近崩壊した海食崖の寸法形状を海食崖の破壊条件のグラフに適用したものが図-11である。図-11より、崩壊したときの海食崖の引張応力は0.25-0.5MPaの間であることがわかり、崩壊した事実から曲げ破壊で崩壊した可能性が高いことが推定できる。

(2) 有限要素法による海食崖の安定性評価

筆者らは、最近崩壊した海食崖の崩壊メカニズムを調べるため、調査で得られた形状寸法をもとに海食崖の解析モデルを作成し、弾性有限要素解析を行った。それに伴い、解析モデルおよび境界条件を図-12に示し、有限要素解析を行う際に設定した海食崖の物性値を表-4に示す。着目点は各解析によって得られた上端亀裂の最終進展位置（上端から0.7m）における引張応力の値である。その結果を図-13に示す。これより、海食崖の上端と下端の亀裂が次第に進展する場合の解析およびすでに下端に0.9mの亀裂が存在した場合での解析を行い、今回の海食崖は図-11より、Tokashiki and Aydan⁴⁾がすでに示した、曲げ破壊が発生する引張応力の値付近で崩壊していることが図-13に示す結果から示された。しかし、岩盤は不連続面の数、不連続面の方向によっても岩盤の強度に若干の変動がみられるため、その影響により0.20-0.30MPaの間で崩壊が起こりうると推定できる（図-13）。そのうえ、図-13より、ある上端の亀裂進展深さから引張応力の上昇率が上がり、亀裂の先端部に応力が集中し、それにより、海食崖の崩壊強度に達したのち、崩壊に至ったものと思われることが推定できる。

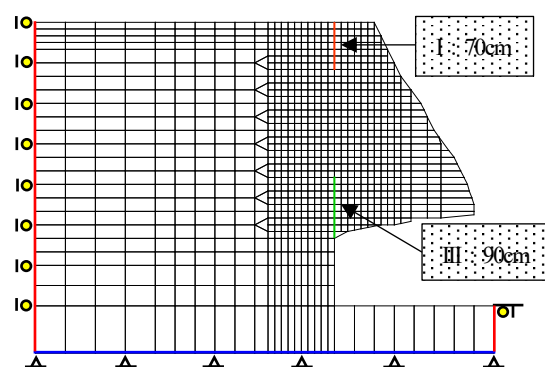


図-12 最近崩壊した海食崖モデルおよび境界条件

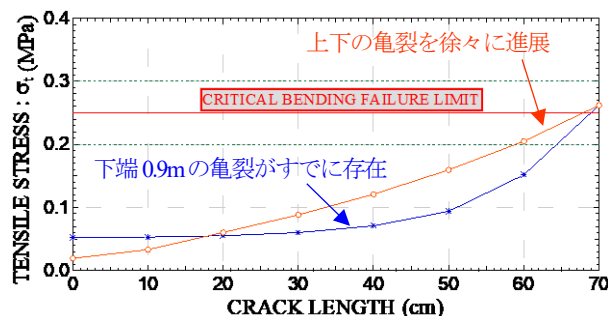


図-13 着目点における引張応力の推移

表-4 有限要素法で用いた物性値

単位体積重量 (kN/m ³)	弾性係数 (GPa)	ポアソン比
25	10	0.25

6. 岩盤空隙を考慮したRMQRによる評価

従来の岩盤評価法としてAydan et al.⁹⁾が提案したRock Mass Quality Rating (RMQR) 岩盤評価法がある。しかし、この評価法には琉球石灰岩特有の空隙の影響は考慮されていない。そのため、今回新たに、岩盤表面の空隙の影響を考慮した形で、岩盤評価を行い、最近崩壊した瀬底島の海食崖の岩盤としての評価を行う。

$$\frac{\sigma_{tm}}{\sigma_{ti}} = \frac{RMQR}{RMQR + \beta(100 - RMQR)} \cdot \left(1 - \frac{n}{n + \alpha(1 - n)}\right) \quad (3)$$

各パラメータについての説明として、 σ_{tm} ：岩盤の引張強度、 σ_{ti} ：母岩の引張強度、 β ：係数（参考文献参照⁶⁾）、 n ：空隙率（参考文献参照^{7) 8)}）、 α ：1または1以上の係数である。表-5より、RMQRの値および、 $\beta = 6$ 、 $n = 0.5$ 、 $\alpha = 1.0$ を式(3)から評価したところ母岩の引張強度が、 $\sigma_{tm} = 0.245 - 0.35(\text{MPa})$ となった。この値は、既往の研究⁴⁾ですでに示されている、海食崖の曲げ崩壊時の引張応力の値を基準として、5章(2)で求めた有限要素法の結果で得られた崩壊時の引張応力の値と今回のRMQR法を用いて算出した結果は近い値を示したため、崩壊時の引張応力値の推定に関して、妥当性を示した。

表-5 RMQRによる最近崩壊した海食崖に対する岩盤評価

R _{DD} (劣化度)	R _{CSN} (不連続面群数)	R _{DS} (不連続面の間隔)	R _{DC} (不連続面の状況)	R _{GWSC} (地下水の浸透状況)	R _{GWAC} (地下水の吸水状況)	RMQR
6-9	12-16	8-12	22	7	4	59-70

7. 結論

琉球諸島における海食崖の調査を実施し、その一例として、最近崩壊した瀬底島の海食崖について各種検討および数値解析的に検討を行い、崩壊メカニズムや崩壊要因について検討を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) ドローンを調査で用いることにより、本来測定不可能な高所な地点を3Dモデルより任意の断面で切断し、詳細な形状寸法を確認することが可能である。
- (2) 海食崖の岩盤劣化を評価する方法として、赤外線カメラによる岩盤劣化の評価の検討を試みた。その結果、**active**型で行った場合には、崩壊面の劣化状況を観察することが可能であると思われる。しかし、岩盤の劣化度合いの検討について、現段階では、赤外線カメラでの検討は可能ではあるが、定量的な評価は難しいため、引き続き研究が必要であると思われる。
- (3) Tokashiki and Aydan⁴⁾の研究結果をもとに、調査で確認された海食崖の崩壊した様子、簡易解析、有限要素法およびRMQRによる岩盤評価の引張応力の値により、今回の海食崖の崩壊メカニズムは曲げ破壊である可能性が高いことが明らかになった。
- (4) 従来のRMQRに岩盤内の空隙を考慮した新たな岩盤分類による引張強度の評価は、簡易解析および有限要素解析が示す引張強度の比較から、その妥当性が認められた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、調査およびその解析に協力していただいたNPO法人グリーンアース代表理事鈴木浩一氏と、(株)オカベメンテの宮城貴大氏、宮良正彦氏に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 木崎甲子郎：琉球弧の地質誌，沖縄タイムス社，pp.93-114,1985.
- 2) アイダンオメル，川本朧万：不連続性岩盤斜面のトップリング破壊とその安定化について，日本鉱業会誌/103 1197, pp.764-770,1986.
- 3) Aydan, Ö. N. Malistani, N. Tokashiki.: The possibility of infrared camera thermography for assessing the real-time stability of tunnels against rockburst. US Rock Mechanics Symp., ARMA-17-0479, 10p, 2017.
- 4) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass. 土木学会論文集 C 部門, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 5) Aydan, Ö. Ulusay, R. and Tokashiki, N.: A New Rock Mass Quality Rating (RMQR) and Its Application to the Estimation of Geomechanical Characteristics of Rock Masses. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47, pp.1255-1276, 2014.
- 6) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of cliffs of Ryukyu Limestone in Ryukyu Archipelago from rock mechanics perspective. 1st Int. WS on Role of Microorganism and Thermo-Hydro-Chemico-Mechanical Process in Geoengineering and Geoscience, pp.51-60, 2017.
- 7) 渡嘉敷直彦，藍檀オメル，大洞光央，赤木知之：多孔質琉球石灰岩の空隙率評価と変形・強度特性，土木学会論文集 C 部門, Vol.66, No.4, pp.815-823, 2010.
- 8) 渡嘉敷直彦：琉球石灰岩の工学的特性と琉球石灰岩盤および石積み構造物の安定性評価に関する研究，博士論文，pp.39-71, 2011.

RECENT FAILURE OF LIMESTONE CLIFFS IN RYUKYU ARCHIPELAGO AND ITS ANALYSES

Kouki HORIUCHI, Ömer AYDAN, and Naohiko TOKASHIKI

The cliff failures occur due to the action of physical and chemical deterioration due to seawaves and rainfall and so on. Such failures may have devastating consequences on adjacent structures and casualties. Therefore, understanding the cliff failure process and its dominant factors are essential to prevent or forecast such incidents beforehand. In this study, some recent cliff failures in limestone formation of Ryukyu archipelago are reported and the applications of various new investigations tools such as drones and infrared cameras are presented. The outcomes of investigations and numerical analyses are presented. Furthermore, the evaluation of porosity on rock mass characteristics based on RMQR is proposed and utilized.