

## 琉球石灰岩からなる海食崖の崩落に関する 斜面安定解析の再検討

Rockfalls in Coastal Cliff Made of Ryukyu Limestone:  
Stability Analysis Considering the Scale Effects of the Strength of Rock Masses

小暮 哲也\*・青木 久\*\*・前門 晃\*\*\*・松倉 公憲\*\*\*\*

Tetsuya KOGURE \*, Hisashi AOKI \*\*, Akira MAEKADO \*\*\* and Yukinori MATSUKURA \*\*\*\*

### はじめに

沖縄島南部にある琉球石灰岩からなる海食崖の基部にはノッチが形成されているが、このノッチの成長とともにノッチ上の海食崖が不安定になり、崖の崩落が起こることが知られている (Maekado, 1991)。Maekado (1991) は崖を構成する琉球石灰岩のサンプルから直径・高さがそれぞれ 3.4 cm, 7 cm の円柱供試体を作成し、強度試験を行った。その試験結果の強度を用いて、彼は海食崖の崩落に片持りのモデルを適用することにより海食崖の限界突出長さを求めた。その結果、17 m の高さの海食崖では、限界突出長さが 30 m になると計算された。この値は現地調査で得られた崖からの崩落ブロックの奥行き方向の長さ (7~11 m) とは大きく異なっていた。

喜屋武岬から荒崎海岸にかけて海食崖には極めて多くの層理・節理が観察される。そのため岩盤全体の強度は供試体の強度よりも小さいことが予想される。したがって、このような岩盤強度を考慮に入れて Maekado (1991) の行った安定解析に

ついて再検討する必要がある。そこで本研究では、琉球石灰岩からなる海食崖の崩落について、崖を構成する物質の力学的強度に層理・節理などの岩石構造 (割れ目) の影響を考慮して、海食崖の安定性を評価することを目的とする。

### 地形概観および崖・崩落ブロックの形態

沖縄島南部一帯には、標高 100~200 m の平坦面をなす新生代第四紀層が広く分布し、琉球層群と呼ばれている (木崎, 1985, pp. 93-114, pp. 246-249)。糸満市一帯では特に琉球層群琉球石灰岩が広い地形面を作っている。沖縄島最南端の荒崎海岸には、琉球石灰岩からなる海食崖が発達している (第 1 図)。海食崖の比高は喜屋武岬では最大約 30 m であり、荒崎に近づくにつれて徐々に小さくなり、荒崎にある比高約 10 m の海成段丘へと続く。

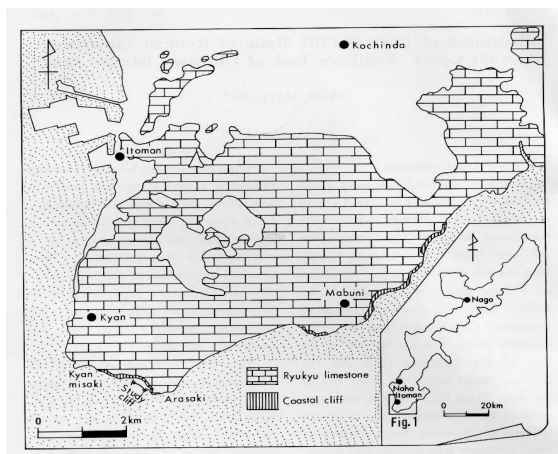
本研究では、荒崎海岸の、第 2 図に示した 4 地点において、干潮時に崖のプロファイルを測定した。プロファイルの測定には筑波大学陸域環境研究センター所有、レーザーテクノロジー社製のイ

\* 筑波大学生命環境科学研究科

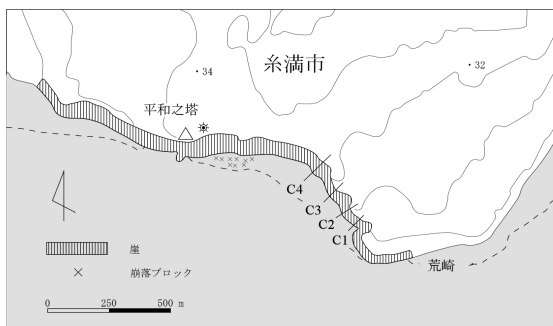
\*\* 筑波大学地球科学研究科

\*\*\* 琉球大学法文学部人間科学科

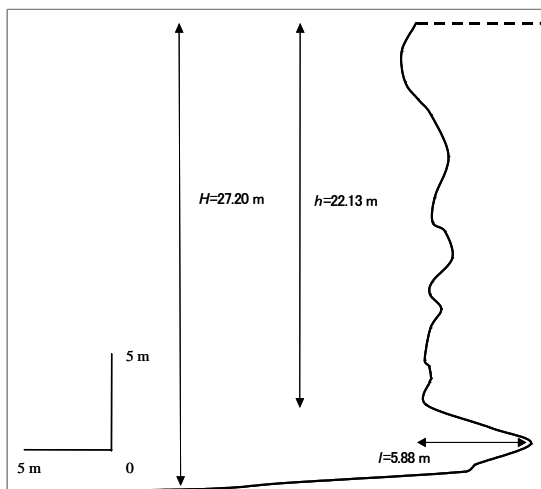
\*\*\*\* 筑波大学地球科学系



第 1 図 喜屋武岬・荒崎の位置 (Maekado, 1991)



第 2 図 プロファイルを測定した崖，崩落ブロックの位置



第 3 図 C4 の位置で見られる崖のプロファイル

ンパルス LR を用いた . 1 つの例として第 3 図に , 第 2 図中の C4 における崖のプロファイルを示した .

得られたプロファイルから海食崖の高さやノッチの奥行きについてのデータを , Maekado ( 1991 ) で調査された崖やブロックのデータとともに第 1 表にまとめた . ノッチの上部から崖の上部までの高さ (  $h$  ) は最大約 20 m , ノッチの奥行き (  $l$  ) は最大で約 8 m であった . 崖前面はほぼ垂直であり , その崖には水平方向と垂直方向の両方向にジョイントが発達していた . また , ほぼ水平方向の層理面が見られた . 崖の基部にはビーチは発達していなかった . この地域ではさんご礁があまり発達しておらず , 波は満潮時や暴浪時に崖の基部へ到達する .

一方 , プロファイルの計測をした崖から 300 m ほど西にある海食崖の基部には , 高さがほぼ 17 m , 奥行き方向の大きさが 7 ~ 11 m である大小のブロックが点在していた ( 第 2 図 ) . これらのブロックの上面は多くの場合 , 植生に覆われており , 海側へ傾いている . 崖の基部に存在するブロックは , ノッチの拡大によって不安定になった崖が , ノッチの最奥部で崩落したものだと考えられる ( Maekado, 1991 ) . すなわちブロックの奥行き方向の大きさが , 崩落当時の崖に存在した , ノッチの奥行きの最大値を表している .

第 1 表 崖・崩落ブロックのプロファイル

場所	崖の高さ(m)	ノッチの奥行き(m)	崩落ブロックの奥行き(m)	データの出典
	3	3.0	-	Maekado(1991)
	3	3.6	-	"
	4	4.2	-	"
	4.4	3.8	-	"
	20	5.0	-	"
	20	6.9	-	"
	20	8.3	-	"
	17	-	7.0	"
	17	-	9.5	"
	17	-	10.0	"
	17	-	10.6	"
	17	-	11.0	"
C1	1.65	4.47	-	本研究
C2	14.85	3.51	-	"
C3	18.85	4.92	-	"
C4	22.13	5.88	-	"

## Maekado (1991) の解析と問題点

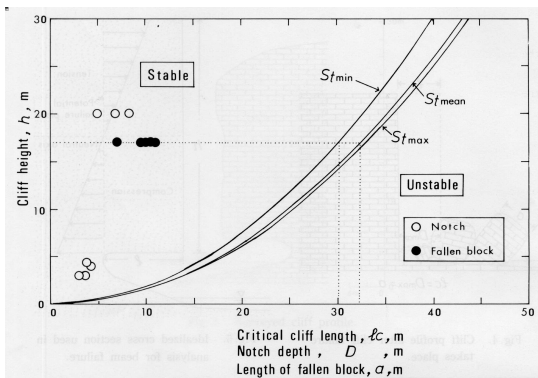
Maekado (1991) では、崖を構成する琉球石灰岩の一軸圧縮強度試験と引張強度試験を行った。圧縮強度試験では直径 3.4 cm 高さ 7 cm の円柱供試体を 3 個用いているが、その圧縮強度の最大値 ( $S_{cmax}$ ) は 197.9 kgf/cm<sup>2</sup>、最小値 ( $S_{cmin}$ ) は 193.9 kgf/cm<sup>2</sup>、平均値 ( $S_{cmean}$ ) は 195.3 kgf/cm<sup>2</sup> であった。また、圧裂引張強度試験では直径 3.4 cm 高さ 3 cm の円柱供試体を 3 個用いて計測し、引張強度の最大値 ( $S_{tmax}$ ) は 40.5 kgf/cm<sup>2</sup>、最小値 ( $S_{tmin}$ ) は 37.6 kgf/cm<sup>2</sup>、平均値 ( $S_{tmean}$ ) は 39.5 kgf/cm<sup>2</sup> を得ている。それぞれの平均値の値から、脆性度  $B_r$  の値は 4.95 となる。

Maekado (1991) は、片持はりの解析による次式を用いて海食崖の安定解析を行った。

$$l_c = \sqrt{\frac{hS_t}{3\gamma}} \quad (1)$$

ここに、 $l_c$  は崖の限界突出長さ (ノッチの奥行き)、 $h$  はノッチ上の崖の高さ、 $S_t$  と  $\gamma$  はそれぞれ崖を構成する岩石の引張強度と単位体積重量である。

第 4 図中の 3 本のラインは上述の試験から得られた引張強度を用いて、ノッチ上の崖の高さ ( $h$ ) による、ノッチの限界深を示したものである。図中の白抜き丸が、現実存在する崖の高さとノッチの深



第 4 図 崖の高さとノッチの奥行きの関係 (Maekado, 1991)

さ (安定な崖) を示し、黒丸が崩落したブロックの高さと奥行きを表している。圧裂引張強度試験から得られた結果 ( $S_{tmax} = 40.5$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $S_{tmin} = 37.6$  kgf/cm<sup>2</sup>,  $S_{tmean} = 39.5$  kgf/cm<sup>2</sup>) を他のパラメータ ( $h = 17$  m,  $\gamma = 2.1$  gf/cm<sup>3</sup>) とともに (1) 式に代入したところ、崖の限界突出長さは少なくとも 30 m 以上と計算された。この図からは、試験から得られた安定・不安定領域を分けるラインが、実際に起きている現象に合わない (白丸と黒丸の間を通らない) ことがわかる。つまり、直径・高さがそれぞれ 3.4 cm, 7 cm の円柱供試体の強度を用いて現地の崖の安定解析を行ってもうまく説明できない。

Maekado (1991) の用いた円柱供試体の強度は、目に見えるような大きな亀裂や割れ目が少ない強度の大きい部分の値である。前述したように、現地の海岸には層理、節理などが存在する。このため、岩盤全体の強度はこのような割れ目の入っていない供試体に比べて小さいと考えられる。一般に、岩盤内に割れ目があると、岩盤を伝わる弾性波速度は割れ目のない供試体で測定した弾性波速度よりも減少する (山口・西松, 1991 p.241)。そこで、岩盤内の割れ目の程度を知るために、実験室の供試体と現地岩盤でそれぞれ弾性波速度を測定した。

供試体の弾性波速度  $V_s$  の測定には、独立行政法人産業技術総合研究所所有の (有) 開発電子測器研究所製の周波数 400 kHz の振動子を用いた。沖縄県西原町で採取した岩石をもとに、一辺の長さが 5.0 cm、高さが 10 cm の角柱に整形した 8 つの供試体について P 波速度を計測した。その結果、P 波速度の最大値・最小値はそれぞれ 4.99 km/s, 3.66 km/s となり、平均値は 4.30 km/s であった。

現地の崖の弾性波速度 (P 波速度)  $v_f$  の測定には、応用地質株式会社製の McSEIS-3 を用いた。現地において長さ 25 m につき割れ目が 5 本見られる場所と、25 m につき 10 本割れ目が見られる場所の、計 2 測線を選んだ。これらの割れ目と直交する方向の測線上で、弾性波が伝播するのに要する

時間を測定し、走時曲線から弾性波速度を求めた。割れ目が5本見られる場所に設定した測線では、2 m ごとに弾性波速度を測定した。震源（ハンマーを叩いた地点）から2 m 離れた場所では6.11 km/s となり、14 m 離れた場所で1.87 km/s を記録した後、それ以上長い距離で弾性波を捉えることはできなかった。割れ目が10本見られる場所に設定した測線では、震源から1.8 m の地点に最大幅45 cm 最大深さ45 cm の大きな割れ目があった。弾性波速度は震源から1.5 m の距離では4.05 km/s だったが、3 m、4 m の距離ではそれぞれ1.09 km/s、0.82 km/s となり、5 m の距離では測定できなかった。0.82 km/s をこの測線の弾性波速度とした。2本の測線の平均弾性波速度は1.35 km/s となった。現地岩盤の弾性波速度は供試体で測定した値よりも小さく、この結果は現地岩盤内に割れ目が存在することを示しており、観察結果と一致する。

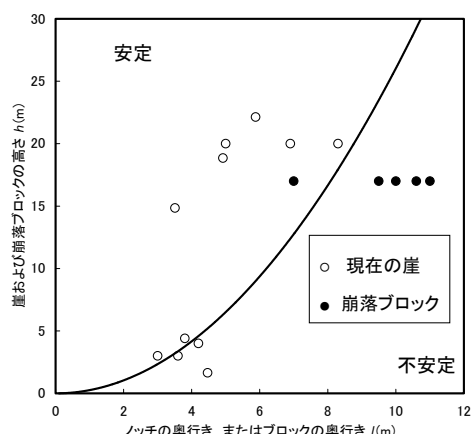
#### 岩盤強度の推定と安定解析の再検討

割れ目のある岩石の強度を見積もる方法の一つとして、池田(1979)の方法がある。池田(1979)は岩盤中の割れ目の影響を表すため、割れ目指数  $k$  と呼ばれる無次元量を導入した。これは現地の岩盤の弾性波速度（現地で得られた値） $v_f$  と割れ目のない岩石供試体の弾性波速度（実験室で得られた値） $V_s$  の比、 $k = v_f / V_s$  で表される。そして、岩盤強度  $S_f$  は割れ目指数を用いて次式のように表される。

$$S_f = S_s \cdot k^2 \quad \text{すなわち} \quad S_f = S_s \cdot \left( \frac{v_f}{V_s} \right)^2 \quad (2)$$

ここに  $S_s$  は供試体の強度である。そこで今回はこの式を採用し、現地の岩盤の引張強度  $S_{ff}$  を推定する。

まず、供試体の一軸圧縮強度  $S_{cs}$  を求めた。一軸圧縮試験には弾性波速度を測定したものと同一の



第5図 強度の寸法効果を考慮した場合の安定・不安定境界

8つの角柱供試体を用いた。供試体数は8つで、一軸圧縮強度の最大値・最小値はそれぞれ306.2 kgf/cm<sup>2</sup>、35.6 kgf/cm<sup>2</sup> となり平均値  $S_{cs}$  は121.7 kgf/cm<sup>2</sup> であった。 $v_f = 1.35$  km/s,  $V_s = 4.30$  km/s であるので、 $S_{cs}$ 、 $V_s$ 、そして  $v_f$  の値を(2)式に代入すると、現地岩盤の圧縮強度  $S_{cf}$  は12.0 kgf/cm<sup>2</sup> と計算された。したがって、岩盤の引張強度  $S_{ff}$  は圧縮強度の値 ( $S_{cf} = 12.0$  kgf/cm<sup>2</sup>) を脆性度 ( $B_r = 4.95$ ) で割ることにより、2.42 kgf/cm<sup>2</sup> と見積もられた。

この引張強度  $S_{ff}$  を(1)式に代入し、本研究で調査した崖とMaekado(1991)中の崖やブロックについて安定・不安定領域を区切る境界線を引いた(第5図)。その結果、この境界線が現地で実際に崩落しているブロックと崩落していない安定な崖とを比較的よく分けることができることが示された。

#### おわりに

Maekado(1991)は、その論文の最後で割れ目を考慮した石灰岩の強度を用いれば、片持ちはりのモデルで海食崖の限界突出長さをうまく説明できると予想していた。本研究の目的は、その割れ目を考慮した石灰岩の強度を用いて、片持ちはりのモデルで海食崖の限界突出長さを説明することで

あった．割れ目を評価するために池田（1979）の式を用いて現地の海食崖の強度を見積もった結果，崩落したブロックと安定な崖とを分ける境界線を比較的うまく引くことができた．今回の崖のように大きな岩塊になると，割れ目の影響が強度の低下として顕著に表れる．そして，割れ目を考慮した強度を用いれば実際に現地の海食崖の安定性を評価することができることがわかった．

#### 文献

池田和彦（1979）：割れ目岩盤の性状および強度．

応用地質，**20**(4)，20-32．

木崎甲子郎（1985）：琉球弧の地質誌．沖縄タイムス社，278p．

山口梅太郎・西松裕一（1991）：岩石力学入門．東京大学出版会，331p．

Maekado, A. (1991): Recesson of coastal cliff made of Ryukyu limestone: Arasaki coast, southern end of Okinawa island, Japan, *Bulletin of the Okinawa Geographical. Society*, **3**, 63-70.

（2003年6月3日受付，2003年7月7日受理）