

琉球大学学術リポジトリ

[論文]

琉球石灰岩の海食崖にみられるノッチの限界深さ：
八重山諸島・黒島での事例

| | |
|-------|---|
| メタデータ | 言語: 出版者: 沖縄地理学会 公開日: 2018-11-16 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 青木, 久, 松倉, 公憲, 前門, 晃, 小暮, 哲也 メールアドレス: 所属: |
| URL | http://hdl.handle.net/20.500.12000/0002017729 |

琉球石灰岩の海食崖にみられるノッチの限界深さ

— 八重山諸島・黒島での事例 —

青木 久*・小暮 哲也**・前門 晃***・松倉 公憲****

(*琉球大学大学院理工学研究科 21世紀 COE プログラム (現:筑波大学陸域環境研究センター),

筑波大学大学院生, *琉球大学法文学部, ****筑波大学大学院生命環境科学研究科)

I はじめに

わが国の海岸は、慢性的に侵食に悩まされており、海岸線の後退が著しく、国土保全の立場から大きな問題となってきた。これは海食崖の発達する地域における開発が急速に進み、海食崖近傍の公共施設や人家が崖の後退によって危険にさらされる事例がみられるようになってきたからである。このように各地で海食崖の侵食・後退が問題になっているにもかかわらず、砂浜海岸の侵食に比べ、地形変化の速度が遅いなどという理由からか、岩石海岸における海食崖の侵食・後退に関する研究事例がきわめて少ない。海食崖の後退の問題は、国土保全の立場はもちろんのこと、景勝地における観光資源の保護といった立場からも、その解決が望まれる。このような観点から、海食崖の侵食・後退の危険度の実態を、実測データに基づいて、把握・議論することは、侵食特性の究明、侵食予測の研究にも充分に役立つものと考えられる。

琉球列島には、琉球石灰岩からなる海食崖が広く分布し、しばしば波食により崖の基部に窪み(ノッチ)が刻まれている。このノッチの奥行きが深く成長すると崖が不安定になり、ついには崩落すると考えられる。実際、崩落したブロックが崖前面に点在する場所が多い。したがって、琉球石灰岩からなる海食崖の後退は、ノッチの形成と崖の崩落が交互に繰り返されるプ

ロセスによって進行していることが想定される。この崩落に関する発生頻度の予測式を確立するには時間を要するが、この種の仕事の第一歩として、著者らは、沖縄島や宮古島において、琉球石灰岩で構成される崖高が3.0 m以上の海食崖を調査し、海食崖の崩落に与えるノッチの深さの影響に関する力学的な検討を試みた(Maekado, 1991; Kogure et al., 2006)。その結果、崖の崩落には、ノッチの発達と海食崖上部のテンションクラックの両者が深く関与していることがわかった(Kogure et al., 2006)。

八重山諸島の石垣島と西表島の間に広がる海域は、最大水深27 mを有する堡礁になっており、石西礁湖と呼ばれている(河名, 1987)。この石西礁湖の南端に位置する黒島は、海拔18 m以下の平坦な島であり、その大半が琉球石灰岩で構成されている。島の周囲には高さが3~4 m以下の海食崖が発達している(加藤・松尾, 1998)。本研究では、このような高さの低い海食崖におけるノッチの限界深さに関する考察を行い、崩落危険度の評価を行うことを目的とする。

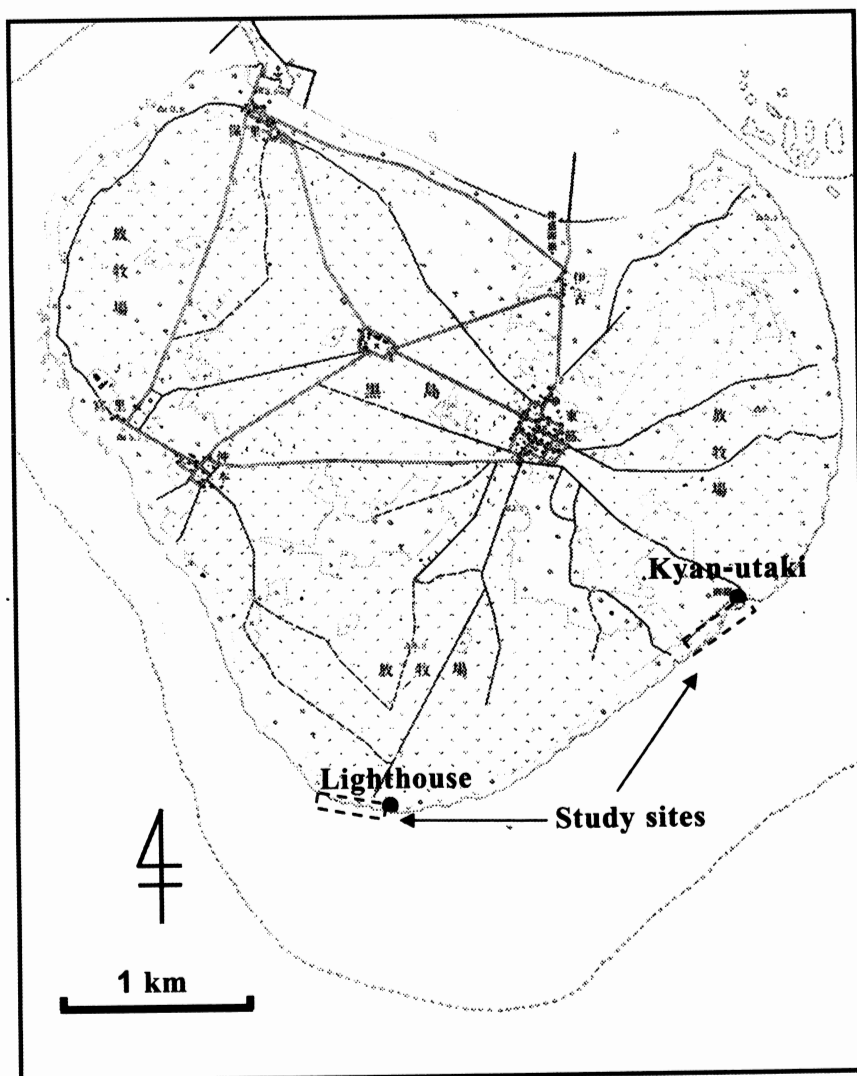
II 調査地域の概要および地形調査の方法とその結果

1. 調査地域の概観

黒島は石垣島南西約20 kmに位置する、東西4.5 km、南北4 km、周囲15 kmの楕円形の島

である（第1図）．島の南東側は、幅約1 kmのサンゴ礁に囲まれ、その沖の海底には急斜面が発達している．島の西に位置する宮里集落の

海岸では、サンゴ礁の幅が約400 mと狭く、サンゴ礁沖の海底勾配は島の南東側よりもさらに急である．陸上は起伏が小さく、海拔高度は、



第1図 研究地域と調査地点
(国土地理院発行の地形図を使用) .

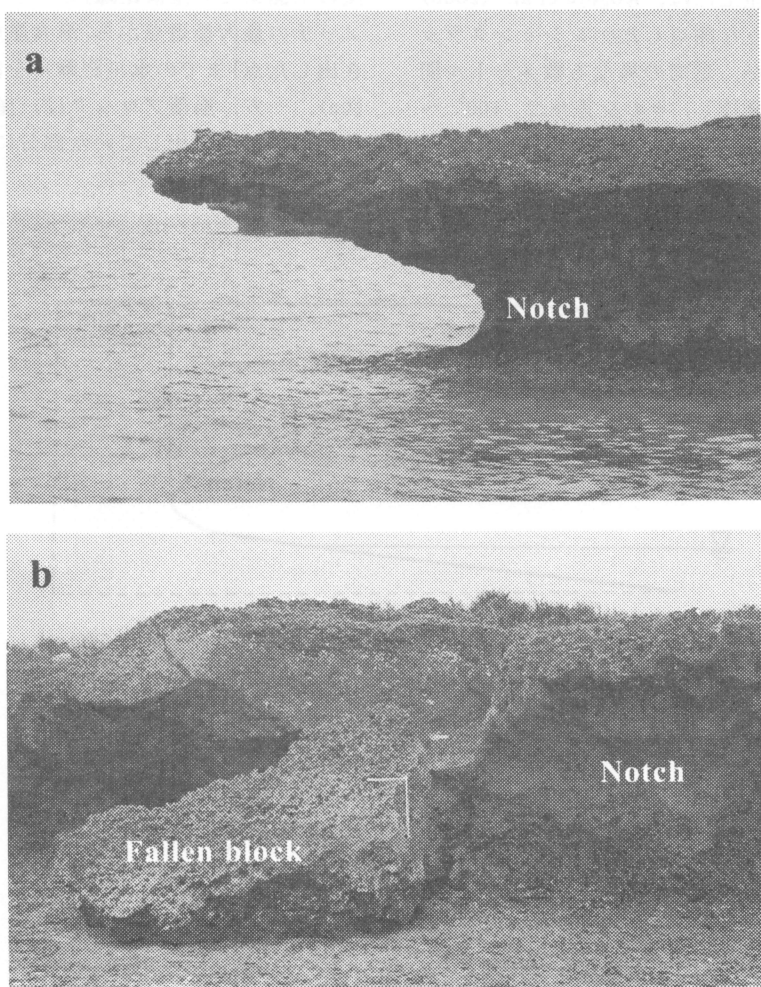
Fig. 1 Study area and study sites

(This map is topographical map published by Geographical Survey Institute of Japan) .

最高 17.2 m である。島は琉球石灰岩からなり、東部と南部の海岸には、高さが 3 m 以下の海食崖が発達する。

波食ノッチの限界深さについて調査する地点として、東部の喜屋武御嶽海岸と南部の灯台付近の海岸を選んだ(第 1 図)。これらの地域の海食崖の基部にはきわめて明瞭なノッチが形成さ

れている(第 2 図)。ノッチの最深部は、平均海面から約 80 cm~1 m の高さに位置する。ノッチ内の、最深部から基部にかけての斜面上には、ラピエ状の凹凸やカレンフェルトがほとんどみられず、全体としてきわめて滑らかである。崖前面には、崩落によると思われるブロックがしばしば点在し、その背後の崖には破断面が観



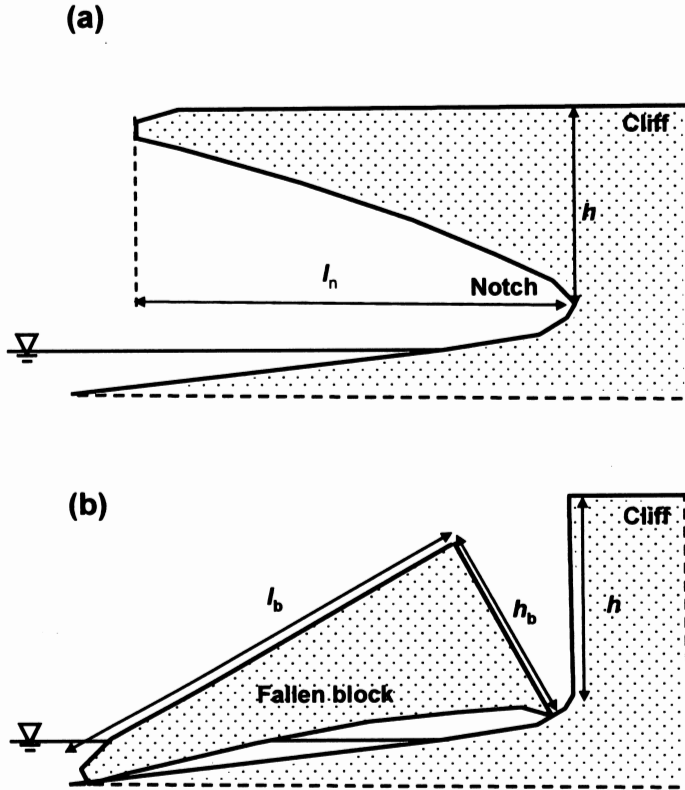
第 2 図 海食崖と崩落ブロックの写真
(a) 喜屋武御嶽付近, (b) 灯台付近。

Fig. 2. Photographs of costal cliff and fallen blocks
(a) near Kyan-utaki, (b) near a lighthouse.

察される。しかし、崩落により生じたはずのブロックが認められない場合も少なくない。このことは、過去数千年間の間に、黒島を含む八重山諸島周辺で発生した大津波の襲来により、ブロックが運び去られたことが原因の一つであると考えられている（河名・中田，1994；加藤・松尾，1998）。崖上の岩盤は、コウライシパで覆われている。崖上には、Kogure et al. (2006) で報告されたような開口したテンションクラックは存在しないが、走向の異なる数メートル間隔の共役節理が発達し、その交差角は、 $100^\circ \sim 120^\circ$ である（加藤・松尾，1998）。

2. 計測方法・結果

海食崖基部にノッチが形成されると、ノッチの発達に伴って、崖が不安定になり、岩盤崩落が起こると考えられる。そこで、調査地域において、ノッチの発達する崖の形状および崩落ブロックの形状に関する現地計測を実施した。具体的には、崖高(h ；ノッチの最大後退点から、崖の上面までの垂直距離)とノッチの深さ(l_n ；ノッチの最大後退点から、海食崖の前面(最も突き出した点)までの水平距離)を計測した(第3図a)。一方、崩落ブロックは、崖が崩落する直前に海側へ突き出していた部分に相当するので、



第3図 崖と崩落ブロックの模式図
(a) 崩落前, (b) 崩落後.
Fig. 3. Cliff and fallen block profiles
(a) before failure (b) after failure.

崩落時のノッチ深さ l に相当する長さ(l_b)と崩落時の崖の高さに相当する長さ(h_b)を測定した(第3図b). 同時に, その崩落ブロック背後の崖の高さ h についても測定した(第3図b). 特に, 崩落ブロックの選定にあたっては, 背後の海食崖との破断面が一致する, 崩落直前の海食崖の状態に復元可能なものを選んだ.

東部海岸(喜屋武御嶽と呼ぶ)では, ノッチの l_n や h の計測を5ヶ所, 崩落ブロック(l_b, h_b)と背後の崖高(h)を1ヶ所で行った. 南部海岸(灯台と略称する)では, 前者の計測を2ヶ所, 後者の計測を3ヶ所で行った. これらの結果を第1表にまとめた.

本研究の計測結果をまとめると, ノッチの発達する現在の海食崖については, l_n は2.0~4.0 m, h は1.5~2.4 mであった. また崩落ブロックの l_b は3.0~4.7 m, h_b は1.0~2.0 m, 崩落ブロック背後の h は1.3~2.6 mであった.

III 考察: ノッチの限界深さ

本研究の調査地点の海岸では, (1) 崩落ブロック背後の崖はほぼ垂直であること, (2) その崖の表面には, せん断破壊による削痕やひっかき傷(screes)が観察されないことから, 本研究で対象とした崖では, 転倒崩落が起こっていると考えられる.

そこで, 海食崖の崩落が, 片持ち梁の原理にしたがうと仮定し, ノッチの限界深さを考察する. ただし, 崖上面に発達する節理の影響は無視することにする. ノッチの発達した, 海側に突き出す崖を片持ち梁としてみなすと, 荷重による梁の断面(すなわち, 潜在破壊面)に作用する最大応力 σ_{max} は, ノッチ上の崖の高さ(h)に反比例し, ノッチの深さ(l_n)の2乗, 海食崖を構成する岩石の単位体積重量(ρg , g は重力加速度)に比例することになり, 次式で表される(Timoshenko and Gere, 1978, p. 108-110, 130-137; 竹内, 1970, pp. 143).

$$\sigma_{max} = A \rho g l_n^2 / h \quad \dots (1)$$

ここで, A は梁の断面形状に依存する無次元定数である. 通常, 岩石の引張強度は圧縮強度よりもかなり小さいため, 海食崖の崩落は, 崖に作用する最大引張応力 σ_{max} が, 岩盤の引張強度 S_t を超えたときに発生すると考えることができる.

したがって, (1)式中の σ_{max} を岩盤の引張強度 S_t と置き換えて($\sigma_{max} = S_t$), l_n について解く. こうして得られた l_n は, 崩落時のノッチの深さ, すなわちノッチの限界深さ(l_c)を意味し, 次式で表される:

$$l_c = \sqrt{\frac{h S_t}{A \rho g}} \quad \dots (2)$$

また $B = (1/A)^{1/2}$ とおくことにより, (2)式は次のように変形される:

$$l_c = B \sqrt{\frac{h S_t}{\rho g}} \quad \dots (3)$$

琉球石灰岩の岩石物性については, 平均的な乾燥密度(ρ)は2.17 g/cm³であり(小暮ほか, 2005), 引張強度は, 供試体寸法によって異なり, 次式によって表されることが知られている(Kogure et al., 2006):

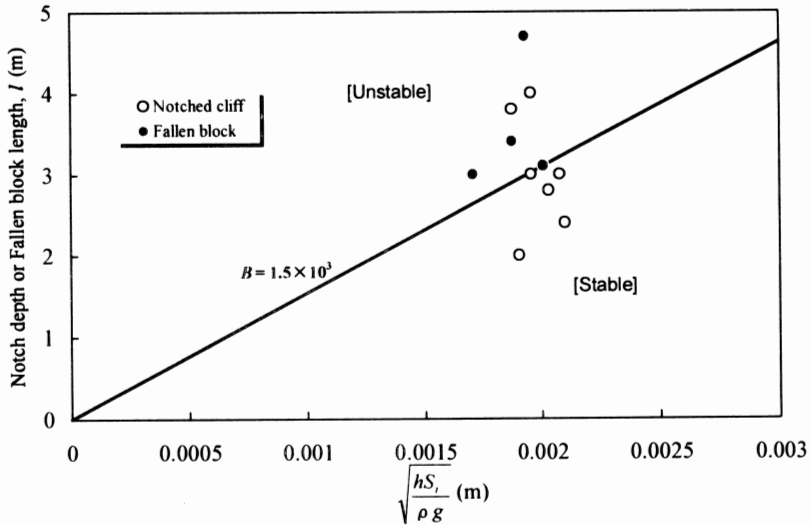
$$S_t = 5.6d^{-0.6} + 0.6 \quad \dots (4)$$

ここで対象とする供試体の寸法(d)を崖の高さ h で代表させると, 各地点の岩盤の引張強度を求めることができる.

ノッチの限界深さ(l_c)は, (3)式より $B(h S_t / \rho g)^{1/2}$ で表される. そこで, 各調査地点における $(h S_t / \rho g)^{1/2}$ を横軸に, 縦軸にノッチの深さをとり, 調査地点ごとにプロットしたのが, 第4図である. ノッチの形成されている安定な崖と崩落ブロックを分けてプロットした. 図中の白抜きプロットは現在観察されるノッチの深さ(l_n) (すなわち, 崖の安定領域), 黒塗りプロットは, 崩落時のノッチの深さを示す崩落

第1表 海食崖と崩落ブロックの地形データ
Table 1 Geometry of cliffs and fallen blocks

| Study sites | Cliff height h (m) | Notch depth l_n (m) | Block dimension | |
|----------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|-----------|
| | | | h_b (m) | l_b (m) |
| <i>Cliff</i> | | | | |
| Kyan-utaki | 1.5 | 3.8 | | |
| Kyan-utaki | 1.6 | 2.0 | - | - |
| Kyan-utaki | 2.1 | 2.8 | - | - |
| Kyan-utaki | 1.8 | 3.0 | - | - |
| Kyan-utaki | 1.8 | 4.0 | - | - |
| Lighthouse | 2.3 | 3.0 | - | - |
| Lighthouse | 2.4 | 2.4 | - | - |
| <i>Fallen blocks</i> | | | | |
| Kyan-utaki | 1.3 | - | 1.0 | 3.0 |
| Lighthouse | 2.5 | - | 2.0 | 3.1 |
| Lighthouse | 2.5 | - | 1.7 | 4.7 |
| Lighthouse | 2.6 | - | 1.5 | 3.4 |



第4図 パラメータ $\sqrt{\frac{hS_t}{\rho g}}$ とノッチの深さおよび崩落ブロック幅との関係

Fig. 4. Relationship between $\sqrt{\frac{hS_t}{\rho g}}$ and notch depth or fallen block length

ブロックの長さ (l_0) を示す。両者のプロットは、図中に示される実線（傾き B の直線）によって、ほぼ 2 つの領域に区分される。したがって、この直線の l 値は、ノッチの限界深さ (l_c) を意味する。

$$l_c = 1.5 \times 10^3 \sqrt{\frac{hS_l}{\rho g}} \quad \dots (5)$$

この線を境に、右下はノッチの存在しうる、いわば海食崖の安定領域となり、左上は崖が不安定な危険度の高い領域となる。本研究地域の黒島の海岸では、ノッチの深さが 3 m を超えると不安定になるといえる。図 4 において、不安定領域には、2 点のノッチのデータがプロットされている。これは不安定化した崖にもかかわらず、より深いノッチの進行が起こりうることを示唆する。このことから、白抜きと黒丸のプロットを完全に二分していない (5) 式では、ノッチの限界深さを十分に説明しきれていないことになる。このモデルの厳密性を高めるために、ノッチの限界深さに影響を及ぼす要素として、岩盤内の節理間隔や共役節理が挙げられる。この点については、今後の課題としたい。

IV おわりに

本研究では、琉球石灰岩で構成される黒島の海食崖を調査地域に選び、崖基部のノッチと崩落ブロックに関する現地調査により、崖基部に発達するノッチの限界深さについて、崖の崩落との関連において定量的な考察を行った。その結果、ノッチの発達限界は、崖の高さ、岩石の密度、岩盤の引張強度によって、概ね説明でき、(5) 式によって表されることがわかった。特に、本研究地域の黒島の海岸においては、ノッチの深さが 3 m を超えた海岸は、崩落する危険度が高いことがわかった。

本研究は琉球大学理学部 21 世紀 COE プログラム「サンゴ礁島嶼系の生物多様性の総合解析」の一環として行われたものである。また、2 つの科学研究費（基盤研究 A, 課題番号 16201009, 研究代表者・土屋 誠（分担研究者・前門 晃）；基盤研究 B, 課題番号 16300292, 研究代表者・松倉 公憲）の一部を使用した。

文 献

- 加藤祐三・松尾憲一（1998）：津波石の元位置特定にもとづく津波の挙動の推定——八重山諸島黒島での例——, 海洋, 号外, 15, 183-187.
- 河名俊男（1987）：沖縄県石西礁湖周辺域の完新世地殻変動, 地球, 9, 129-134.
- 河名俊男・中田 高（1994）：サンゴ質津波堆積物の年代からみた琉球列島南部周辺海域における後期完新世の津波発生時期. 地学雑誌, 103, 352-376.
- 小暮哲也・青木 久・前門 晃・松倉公憲（2005）：琉球石灰岩の一軸圧縮強度に与える寸法効果と岩石物性の影響. 応用地質, 46, 2-8.
- 竹内洋一郎（1970）：わかる材料力学. 日新出版, 307p.
- Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T. and Matsukura, Y. (2006): Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. *Geomorphology*, 80, 236-244.
- Maekado, A. (1991): Recesson of coastal cliff made of Ryukyu limestone: Arasaki coast, southern end of Okinawa Island, Japan. *Bull. Okinawa Geogr. Soc.*, 3, 63-70.
- Timoshenko, S. P. and Gere, J. M. (1978): *Mechanics of Materials*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, 552p.

Critical Depth of Notch of Coastal Cliffs Made of Ryukyu Limestone in Kuroshima, Yaeyama Islands

Hisashi AOKI^{*}, Tetsuya KOGURE^{**}, Akira MAEKADO^{***}
and Yukinori MATSUKURA^{****}

(^{*} The 21st Century COE Program, Graduate School of Engineering and Science, University of the Ryukyus,

Present address: Terrestrial Environment Research Center, University of Tsukuba,

^{**} Doctoral Program of Geoenvironment, Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba,

^{***} Faculty of Law and Letters, University of the Ryukyus, ^{****} Geoenvironmental Sciences,

Graduate School of Life and Environmental Sciences, University of Tsukuba)

A wave-cut notch is formed at the base of vertical coastal cliffs made of Ryukyu Limestone in the Ryukyus, Japan. Many rectangular blocks, which appear to have originated in cliff failures, are observed on shore platforms in front of the cliffs. This fact suggests that the development of a notch increases the cliff instability and eventually results in a cliff failure. In order to determine the critical depth of a notch, the two limestone coasts were selected in Kuroshima, Yaeyama Islands.

We measured the horizontal depth of a notch, cliff height (h) and block length through field investigations. Notch depth, cliff height and block length range from 2.0–4.0 m, 1.5–2.4 m and 3.0–4.7 m, respectively. Assuming that the occurrence of cliff failure follows the principle of a cantilever, the critical depth of notch (l_c) should be given by:

$$l_c = B \sqrt{\frac{hS_t}{\rho g}}$$

where S_t is the tensile strength in rock mass, g is the acceleration due to gravity, and B is a nondimensional constant. An analysis of the field data applying to this equation indicated that a boundary condition for delimiting the presence of notched cliffs and fallen blocks given by $B = 1.5 \times 10^3$.

Key words: *notches, coastal cliffs, cliff failure, Ryukyu Limestone*