

琉球石灰岩層の海食崖・侵食崖の 崩壊危険度評価

渡嘉敷直彦¹・藍壇オメル²

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）

琉球石灰岩層が分布する海岸周辺や内陸部には、海食崖や侵食崖が多数存在し、都市化にともなう開発、文化財保護や今後の防災・減災の面から、これらの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、種々の海食崖・侵食崖の崩壊の危険度を予測するシステムを提示して、解析モデルが評価する崖の崩壊危険度の妥当性について、琉球諸島の海食崖の実測調査結果との比較検討を行った。今後、沖縄県下の国道・県道沿いにあるオーバーハング崖の実測調査を実施し、この崩壊危険度評価手法を適用して、個々の崖の崩壊危険度を予測することを計画している。

キーワード 海食崖、安定性評価、オーバーハング崖モデル解析、岩盤分類、岩盤引張強度

1. はじめに

琉球諸島に広がる琉球石灰岩層内には、多数の海食崖や侵食崖が点在し、崩壊した崖も多数見られる。崖崩壊の代表的な事例を図-1に示す。図-1(a)は、沖縄本島南端に位置する具志川城址基礎岩盤の海食崖の崩壊の状況である。この岩盤の地表部には、史跡の一つである具志川城址があり、文化財保護の面から対応が求められている。また、海岸から離れた内陸部においても、崖の崩壊が見られる。図-1(b)は、最近、南城市の国道331号線沿いで発生した崖の崩壊状況である。これらの崩壊事例に見られるように、崖の崩壊が、人身事故や史跡、構造物の被害に繋がる恐れがあり、防災・避災の観点から、オーバーハングした崖の崩壊に対する安全性の評価が求められている。

本研究は、防災・避災の観点から海食崖・侵食崖の崩壊危険度を予測することを目的として、オーバーハング崖の崩壊危険度予測手法を示し、琉球諸島の海食崖の実測調査結果と比較検討を行い、解析モデルが予測する崖崩壊危険度の妥当性を検証する。

沖縄県下の国道、県道沿いには、オーバーハング崖が点在しており、道路の安全管理の面から崩壊危険度を把握することが課題となっている。この問題に対応するため、これらのオーバーハング崖の実測調査を実施し、



(a) 具志川城址先端の崩壊（糸満市）



(b) 国道331号線沿いの崩壊（南城市）

図-1 オーバーハング崖の崩壊事例

提案する崖崩壊危険度評価システムによる崩壊危険度の予測を行うことを計画している。

2. オーバーハング崖の崩壊危険度予測手法

(1) 崖崩壊危険度予測システム

最初に、オーバーハング崖の崩壊危険度を予測するシステムの概要を述べる。図-2に、オーバーハング崖の崩壊の危険度を予測するために必要な項目を示す。一つは、崖の幾何学的形状寸法であり、侵食部からの高さ、侵食深さである。もう一つは、崖を形成している岩盤の物性値であり、特に、後節に示す崖の破壊条件との比較に必要な岩盤の引張強度を把握することが必要となる。

図-3は、本研究で提案する崖の崩壊危険度を予測するシステムを示している。崖の崩壊予測システムは、3項目で構成されている。図-2に示したように、まず、崖の幾何学的形状寸法を把握することが必要となる。崖の形状寸法の測定は、市販されているレーザー距離計を用いて測定する。つぎに、崖を形成している岩盤の物性値を把握することが必要となる。筆者らは、岩盤分類に基づいて琉球石灰岩の物性値を推定する手法を提案¹⁾しており、後節に簡単に示す。これらの項目を把握したあと、崖の崩壊を予測する力学モデルに基づいて、崩壊の限界領域によるチェックを行い、崖の崩壊危険度を推定する。

(2) 崖のモデル化²⁾

前章に述べたように、琉球石灰岩層の崖は、海食や侵食作用によってオーバーハング状態になる(図-4)。図-5に示すように、この崖のオーバーハング部分が控えの岩盤に連続的に繋がっていれば、このオーバーハング部分を力学的に片持ちばりとしてモデル化する。しかしながら、海食や侵食の状況に応じて、オーバーハング部分の形状が長方形から三角形状に変化するので、図-3(b)のように、オーバーハング部分を一般的に台形としてモデル化する。この場合の力学モデルを図-3(c)に示す。この力学モデルで考慮される荷重は、岩盤の自重および地震力である。これらの荷重が片持ちばりに作用すると仮定すると、曲げ理論により以下の式が導かれる。

片持ちばりの任意の位置 x における厚さは、つぎのように与えられる。

$$h = h_b \left(1 - (1 - \alpha) \frac{x}{L} \right) \quad (1)$$

位置 h_b, h_s, γ におけるせん断力は、次式で与えられる。

$$Q = V_o - (1 + k_v) \gamma h_b x \left(1 - (1 - \alpha) \frac{x}{2L} \right) \quad (2)$$

海食崖・侵食崖

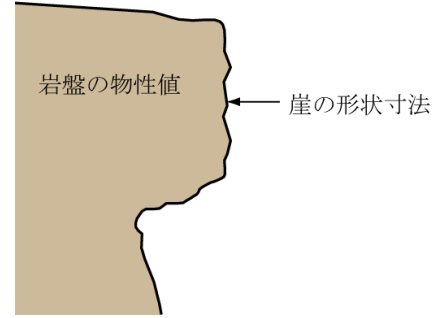


図-2 オーバーハング崖の把握項目

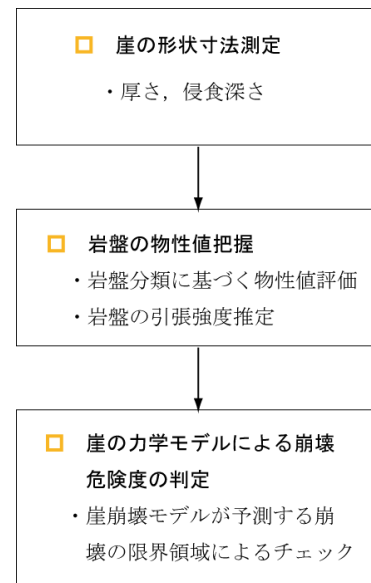


図-3 崖の崩壊危険度判定システム



図-4 オーバーハング崖の例

位置 x における曲げモーメントは、つぎのように与えられる。

$$M = M_o + V_o x - (1 + k_v) \gamma h_b x^2 \left(\frac{1}{2} - (1 - \alpha) \frac{x}{6L} \right) \quad (3)$$

式(3)のモーメントに対するはりの上縁における曲げ応力は、次式で与えられる。

$$\sigma = k_h \gamma h_b L \left(\frac{1 + \alpha}{2} \right) + 6 \frac{M}{h^2} \quad (4)$$

ここで、

$$\alpha = \frac{h_s}{h_b} \quad ; \quad V_o = (1 + k_v) \gamma h_b L \left(1 - \frac{(1 - \alpha)}{2} \right) \quad (5)$$

$$M_o = -(1 + k_v) \gamma h_b L^2 \left(\frac{1}{2} - \frac{(1 - \alpha)}{3} \right) \quad (6)$$

h_b, h_s, γ および L は、それぞれ、片持ちばりの固定端および自由端における厚さ、はりの自重およびスパン（侵食深さ）を表す。また、 k_h, k_v は、それぞれ、地震時の水平震度係数および鉛直震度係数を表す。

図-6に、モデル化された片持ちばりの形状変化に関するはり上縁における曲げ応力の変化について、比較した結果を示す。曲げ応力が最も大きくなるケースは、はりの形状が矩形の場合であり、曲げ応力が最も小さいケースは、はりの形状が三角形の場合である。形状の異なるいずれの片持ちばりにおいても、はりに作用する引張り応力が最も大きくなる位置は、はりの固定端である。つぎに、オーバーハング崖に地震力が作用した際の考慮として、片持ちばりに作用する地震力によるはり上縁の曲げ応力分布を図-7に示す。地震力の作用により、自重のみのはりの曲げ応力よりも、やや大きい曲げ応力が生じる。また、曲げ応力の増加に与える地震力は、水平成分よりも垂直成分がより大きく関与することがわかる。

(3) 崖の崩壊形態と崩壊条件

崖崩壊の崩壊条件を考慮するため、崖の崩壊形態を図-8に示す。崖の崩壊は、海食・浸食によるオーバーハングの形状比とともに、岩盤の不連続面の状態に依存した形態、すなわち、せん断破壊、曲げ破壊、転倒破壊の状態で崩壊が発生する。

せん断破壊が発生する条件は、崖のオーバーハング部を矩形形状 $\alpha = (h_s/h_b) = 1.0$ と仮定すると、崩壊が発生する限界深さ L (m) は、つぎの様に与えられる。

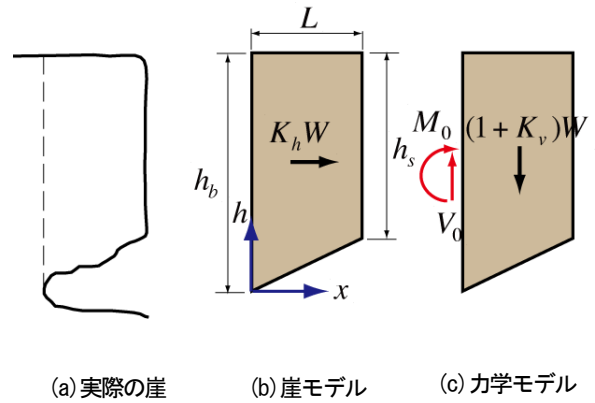


図-5 オーバーハング崖のモデル化

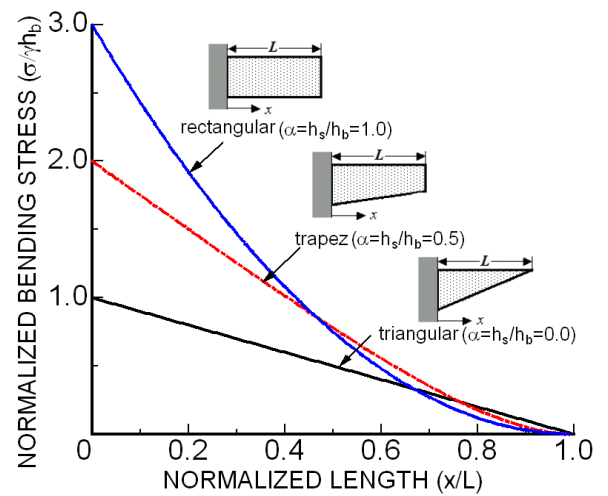


図-6 片持ちばりの形状変化に対するはり上縁の曲げ応力分布の比較

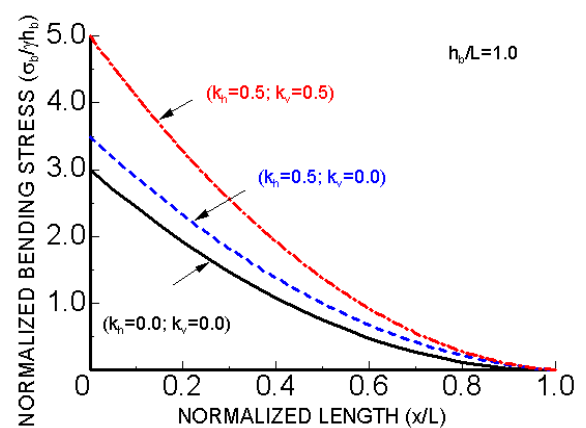


図-7 片持ちばりの地震力作用に対するはり上縁の曲げ応力分布の比較



図-8 底面摩擦模型実験によるオーバーハング崖の崩壊形態

$$L > \frac{c}{\gamma} \quad (7)$$

ここで、 c 、 γ および L は、それぞれ、岩盤の粘着力、単位体積重量および侵食深さである。

同様に、オーバーハング部を矩形と仮定すると、曲げ破壊が生じる限界深さは、式(4)よりつぎのように与えられる。

$$L > H \sqrt{\frac{\sigma_t}{3\gamma H}} \quad (8)$$

ここで、 σ_t および H は、岩盤の引張強度およびオーバーハング部の高さである。

図-9に、式(7)および式(8)に示す矩形形状を仮定した片持ちばりのせん断破壊および曲げ破壊条件を示す。琉球石灰岩層の引張強度に対する粘着力の比 c/σ_t が、一般に1.27から2.0の範囲にあるとしてせん断破壊の条件を設定している。また、この場合曲げ破壊条件は、岩盤の引張強度が $\sigma_t = 0.25 \text{ MPa}$ について求めている。

図-10は、曲げ破壊の条件、式(8)による岩盤の引張強度が異なる場合の曲げ破壊条件を示している。図-9および図-10に示す曲げ破壊条件は、片持ちばりの曲げ理論が予測する破壊の限界線を示しており、対象の崖の幾何学形状がそれぞれの限界線より下の領域にある場合には、安定状態を示し、限界線より上の領域にある場合には、崩落の危険があることを示している。

提案する崖崩壊条件の妥当性は、次章に示す海食崖の実測調査結果との比較検討によって検証する。

(4) 琉球石灰岩岩盤の引張強度の評価

前節に示した崖の崩壊条件は、崖を形成する岩盤の

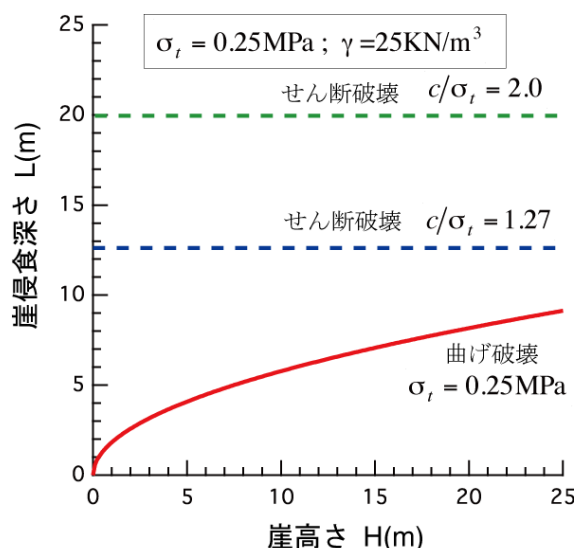


図-9 崖のせん断破壊および曲げ破壊に関する崩壊条件

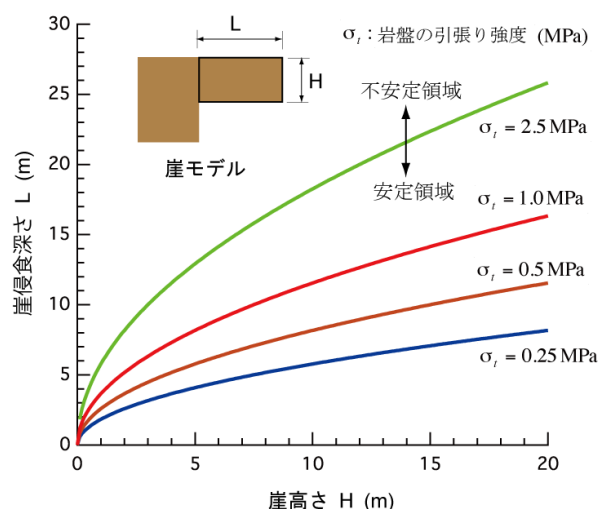


図-10 片持ちばりの曲げ理論が予測する崖崩壊条件

引張強度が深く関わっており、琉球石灰岩層における岩盤としての引張強度を評価することが重要となる。Aydanら³⁾は、RMR岩盤分類による評価値と岩盤物性値の関係を総合的に評価できる経験式をつぎのように提案した。

$$\frac{\varphi_m}{\varphi_i} = \alpha_0 - (\alpha_0 - \alpha_{100}) \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \quad (9)$$

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。式(9)に示す経験式を琉球石灰岩岩盤に適用すると、図-11に示すように、 β の最良値は、 $\beta=6$ となる¹⁾。また、式(9)の経験式は、琉球石灰岩盤のその他の物性値算定にも適用され、各物性値算定に用いられる定数 α_0 、 α_{100} および β の値を表-1に示す。式(9)の経験式を利用することによって、崖を形成している琉球石灰岩層の岩盤分類RMR値を評価し、岩石としての引張強度を求めれば、岩盤全体としての引張強度を評価できる。

3. 海食崖の実測調査と崖崩壊危険度予測の妥当性の検証

海食崖・侵食崖の解析モデルが予測する崖崩壊危険度の妥当性を検証するため、沖縄本島、宮古島、石垣島および西表島の琉球石灰岩層が露頭している海岸に沿って崖の実測調査を行った。崖の実測調査は、レーザー距離計を用いて崖のオーバーハング部の高ささと長さを測定し、同時に崩壊の有無を調べた。調査を行った崖の総数は152であり、崖の高さは、4m～40mである。なお、本調査では、実測した個々の崖に関する岩盤物性値を評価する資料が得られていないため、崖の崩壊を判定する崩壊条件に関わる岩盤の引張強度をパラメータとして崩壊条件を算定している。

琉球諸島の海食崖の実測調査結果と崖崩壊モデルが予測する崩壊条件を図-12および図-13に示す。図-12および図-13は、前章の図-9および図-10に示した崖崩壊条件に、これらの実測調査結果を重ね合わせたものを示している。図中の実線および波線は、崖崩壊モデルが予測する崩壊条件を表し、マーカー表示によるプロット点は、個々の崖の形状寸法と崖の崩壊の有無を示している。マーカーの中塗りの有無により崖の崩壊の有無を表し、中塗りのないプロットは、崖がまだ崩落していない安定な状態を表し、中塗りされたプロットは、崖がすでに崩

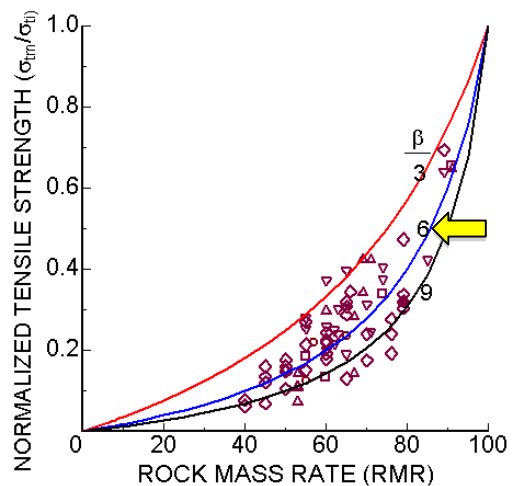


図-11 琉球石灰岩の岩盤分類RMR値と正規化されたインタクト岩の引張強度に対する岩盤の引張強度の関係

表-1 式(9)に適用される琉球石灰岩岩盤の各物性値算定に対する定数

物 性	α_0	α_{100}	β
ヤング率	0.0	1.0	6
Poisson比	2.5	1.0	0.3
圧縮強度	0.0	1.0	6
引張強さ	0.0	1.0	6
摩擦係数	0.3	1.0	1.0

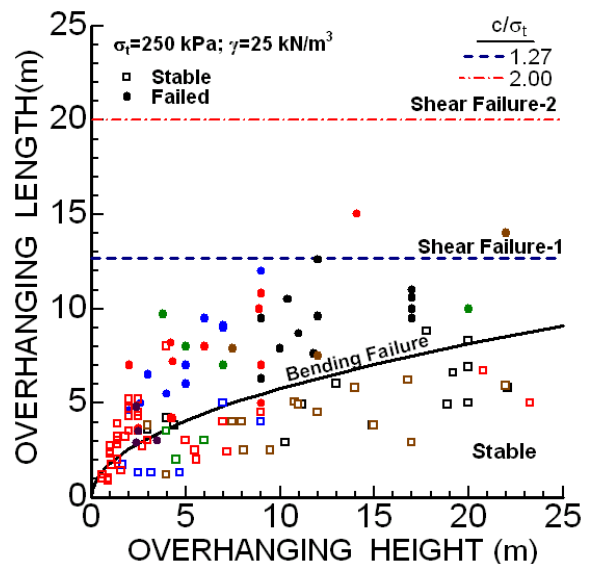


図-12 崖崩壊モデルが予測する崩壊条件と琉球諸島の海食崖実測調査による崖の形状寸法・崩壊の有無の比較

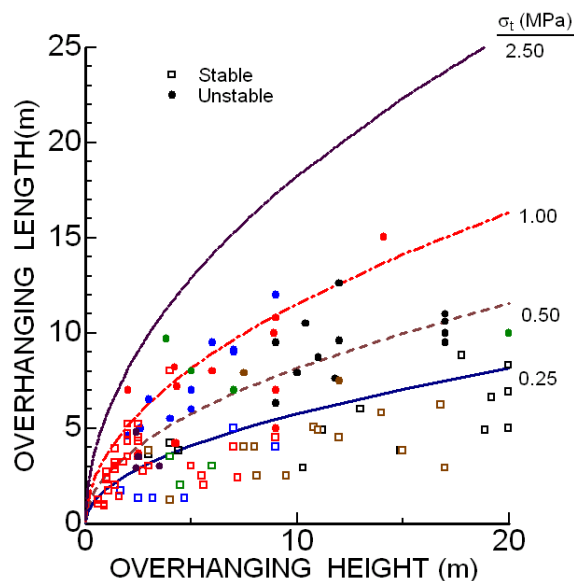


図-13 岩盤の引張強度をパラメータとした片持ちばりの曲げ理論が予測する崖崩壊条件と琉球諸島の海食崖実測調査による崖の形状寸法・崩壊の有無の比較

壊していることを表している。

図-12の崖の崩壊形態による崩壊条件と実測結果を比較すると、崩壊した崖のほとんどが、曲げ破壊によって崩壊していることがわかる。また、岩盤の引張強度が $\sigma_t = 0.25 \text{ MPa}$ における曲げ理論が予測する崖崩壊条件において、崖の形状寸法が崩壊条件の下側にある場合には、実測した崖の多くが崩壊せず安定を保っている傾向を示しており、曲げ理論の予測と実測結果が対応していることがわかる。

図-13に示す岩盤の引張強度をパラメータとした片持ちばりの曲げ理論が予測する崖の崩壊条件と実測結果を比較すると、調査による崩壊した崖の形状プロット値が、岩盤の引張強度が $\sigma_t = 0.25 \sim 1.0 \text{ MPa}$ における曲げ理論が予測する崖崩壊条件の範囲にあることから、琉球石灰岩の岩盤としての引張強度は、この範囲にあるものと推察される。この知見は、琉球石灰岩の岩盤としての引張強度が、一般に知られるインタクト岩の引張強度よりもはるかに小さいことを示しており、設計時に見積もられる琉球石灰岩層の引張強度を、従来よりも低く評価しなければならないことを示唆している。

図-12および図-13の崖モデルが示す崩壊条件と実測調査結果がほぼ対応していることから、琉球石灰岩層のオーバーハング崖の崩壊危険度を評価する図として有用であることが明らかになった。今後、崩壊危険度の判定が必要な崖の安定性の検討を行う場合には、崖の崩壊危険度判定システムに示したように、崖を構成する岩盤

の物性値を推定するための岩盤分類を行い、岩盤分類から推定した岩盤の引張強度に基づいて、実測した崖の形状値とともに、図-9および図-10に示す崖崩壊予測図より、対象とする崖の崩壊危険度を判定する。

4. 結論

本研究は、防災・減災の観点から琉球石灰岩層の海食崖・浸食崖の崩壊の危険度を予測するシステムを提示し、既存の海食崖・浸食崖の崩壊危険度を評価することを目的として検討を行った。本研究を通して得られた主な結果を示す。

- 1) 琉球石灰岩層の海食崖・浸食崖の崩壊危険度を予測するシステムを構築するため、オーバーハング崖のモデル化を行い、崖の崩壊形態と崩壊条件を提示した。
- 2) 崖の曲げ崩壊に対する崩壊条件を定めるために必要な岩盤の物性値を岩盤のRMR岩盤分類から推定する経験式を提示し、琉球石灰岩の岩盤物性値を推定する経験式の定数を定めた。
- 3) 提案した崖モデルが予測する崖の崩壊条件と、実測調査を行った崖の崩壊の有無について比較を行った結果、両方の間に良好な対応が認められ、解析モデルが予測する崖の危険度評価の妥当性が確認された。
- 4) 実測調査による崩壊した崖の形状のプロット値の多くが、崖モデルが予測する崩壊条件である岩盤の引張強度 $\sigma_t = 0.25 \sim 1.0 \text{ MPa}$ の領域内にあることから、琉球石灰岩層の岩盤としての引張強度は、この範囲にあると推察される。したがって、設計時に一般的に見積もられている琉球石灰岩層の引張強度を、従来よりも低く評価しなければならないことが明らかになった。
- 5) 沖縄県下の道路沿いにも、多くのオーバーハング崖が点在しており、道路の安全管理の面から崩壊危険度を把握することが求められている。本崖崩壊危険度評価システムの利用により、これらの崖の安全性の確認を行うことを計画している。

参考文献

- 1) 渡嘉敷直彦, 藍壇オメル: 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, pp.387-392, 2011.
- 2) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: A comparative study on the analytical and numerical stability assessment methods for rock cliffs in Ryukyu Islands, 13th International Conference of the International Association for computer Methods and Advances in Geomechanics, Melbourne, Australia, on CD, 2011.
- 3) Aydan, Ö. and Kawamoto, T.: Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method. Geoen. 2000 Symposium, Sydney, on CD, OA0926, 2000.

