

崩落パターンの違う海岸崖浸食と その危険度評価手法

薄井 隆義^{1*}・安原 一哉²・村上 哲²・小峯 秀雄²

¹パシフィックコンサルタンツ株式会社 地盤技術部（〒163-0730 東京都新宿区西新宿2丁目7番1号
第一生命ビル6階）

²茨城大学 工学部都市システム工学科（〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4丁目12番1号）

*E-mail: takayoshi.usui@tk.pacific.co.jp

伊師海岸崖は海岸崖侵食問題が深刻な地域の一つである。伊師海岸崖の海岸崖侵食に伴う崖崩落の特徴として、国民宿舎「鵜の岬」を境にして北側と南側では崩落のメカニズムが違ってくる。本研究では、この二つの崩落メカニズムの違いを明確にし、北側を波の影響による崩落、南側を風化による崩落として、どちらの崩落メカニズムに対して優先的に対策を取るべきかを調査した。北側の崩落に関しては現地調査や室内試験から得られた結果を基に、亀裂進展解析を用いて危険度評価を行った。南側に関しては含水比低下試験やX線回折、X線CTスキャンから得られた知見を基に、北側の崩落との崩落量の比較を行った。以上の結果から、伊師海岸崖に対する最も適切と思われる対策を提案することに成功した。

Key Words : Coast cliff erosion, Risu analysis, Weathering, X-ray CT scan

1. はじめに

近年、海岸侵食を受ける海岸崖崩壊によって景勝地における観光資源の損失や、人家や公共施設が危険にさらされるという事例が増えてきている。日本で唯一の海鵜の捕獲地でもある国民宿舎「鵜の岬」（図-1）のある伊師海岸崖侵食もそのひとつに数えられる。

この伊師海岸崖の侵食を防止する対策として、従来用いられてきたコンクリート護岸や景観維持という立場から擬岩など新しい工法で対応する方策が考えられるが、経済的・時間的側面から見ても延長2kmの海岸にこのような対策を緊急に施すことは困難である。そのため、様々な制約の下、生態系・観光資源の保全とともに、安全性を維持するために優先的に対策を講じるべき地点を早期に評価できる技術が必要とされている。



図-1 国民宿舎「鵜の岬」全景

2. 研究の目的

伊師海岸崖の特徴として、二つの崩落メカニズムを有していることが挙げられる。そのメカニズムの違いは、宿舎を境にして北側と南側で区分することが可能である。

北側は現在も波の侵食を受けており、下部が洗掘された後、上部がオーバーハングの形となって崩落している。一方南側は侵食が著しかったため、平成7年に護岸対策が行われており、波は崖に完全に当たらないようになっている。しかし、崩落の規模は縮小されたものの、高い頻度で今なお崩落が継続している。護岸対策を行ったことで崖が乾燥するようになり風化するようになったことが崩落の誘因となっていると考えられ、対策の有無に関して崖の後退距離を検討する必要がある。そこで、本研究では伊師海岸崖の北側と南側の危険度評価を行うことで、どちらの崩落に優先的に対策を取るべきかを検討することを目的としている。（以後北側の崩落を波による崩落、南側の崩落を風化による崩落と定義する）

3. 波による崩落の危険度評価

菅野(2002)は、伊師海岸崖を含む茨城県北部の海岸崖崩落は波の侵食作用によってノッチ（海食洞）が形成され、ノッチが発達することによって崩落している事に着目し、危険度評価式を作成した¹⁾。そこで、波による崩落は菅野の作成した評価式を使用して危険度表評価を行っていく。菅野の危険度評価式を式-1に示し、必要なパラメータは、図-2に示す通りである。

パラメータc, $a_1 \sim a_4$ に関しては、亀裂進展解析から求めた係数で、値を表-1に示す。

表-2 各パラメータの値

a_1	-0.465	a_3	0.971
a_2	-2.139	a_4	-2.049
c	4.11×10^7		

$$L_f = f_c^{a_3} \cdot B_t^{a_1} \cdot H^{a_2} \cdot \alpha^{a_4} \cdot c \quad \text{式(1)}$$

この式からは崩落限界ノッチ深さ L_f が求められる。この L_f と現状のノッチ深さ L の比、つまり L/L_f を危険度 D と定義すると、 $D=1$ に近づくにつれて危険度が増加していると考えることができる。

以下に、必要なパラメータの取得方法を述べる。

(1) 力学的特性の調査

一軸圧縮強さは、現地でシュミットハンマー試験（SH）試験を行うことによって求めた。SH試験とは、振り子の力を利用したハンマーで、ある物体を打撃し、振り子の反発値 R から圧縮強度を求める試験である。本研究では、1つの地点につき30回試験を行い、その平均値をその地点の圧縮強さとした。試験は北側の崖を主に構成する砂岩層で3地点で行った。結果を図-3に示す。試験の結果から、表面の含水状況や風化によって強度が低下している事を考慮するため、強度は幅を持たせることにし、北側の圧縮強度は0.4~1.5[MPa]の範囲と設定した。また、強度比 B_t は砂村(1992)²⁾の研究と菅野の室内試験の結果から8と設定した。

(2) 形状特性の調査

危険度評価式に必要な形状パラメータは、崩落の危険性が高い海岸崖から離れて計測が出来るという利点から、高解像度デジタルカメラを用いた写真測量によって求めた。しかし、写真測量では写真に写っていない点は測定することができないため、一部の地域が測定されていない。形状の変化が確認出来る地点を断面抽出し、測定を行った結果、高さは7m~12m程度、勾配は50~85°、ノッチ深さが最大で5mを超す地点があり、変化に富んだ結果となった。

(3) 波による崩落の危険度評価

以上の概念から、写真測量で形状を求めた20断面で危険度評価を行った。

危険度評価の結果、 $D \geq 1$ となる断面は無かったが、最も強度の低い場合を想定した一軸圧縮強さ0.4MPaの場合に、危険度が0.929となる地点が存在した。この地点は高さは11.47m 勾配は87.109°となっており、これによって求められる限界ノッチ深さが3.689mとなり、現状ノッチ深さは3.42mである。また、危険度が0.9以上の3地点は隣接しており、それは一つのノッチを共有していることから、北側で最も危険な地域は図-4に示した地点だと推測される。

ここで、茨城県北部海岸侵食速度は過去の研究により0.29m/yearとされているため、この地点の崩落までの年数を算出すると、0.93年で崩落する結果となり、その後退距離は限界ノッチ深さの3.689mである³⁾。また、現況のノッチ深さが5mを超えていた地点は、高さが7.72m、勾配51.45°と両者ともに小さな値であり、危険度は0.208と低い値であった。そのため、ノッチが深くとも、崩落の危険性は低いと考えることが可能である。

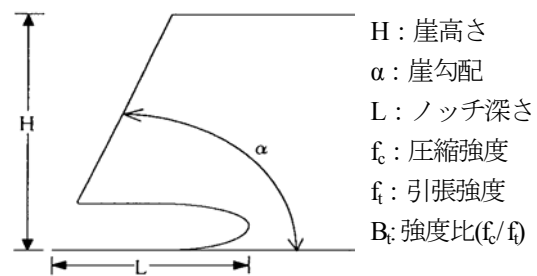


図-2 危険度評価式に必要なパラメータ

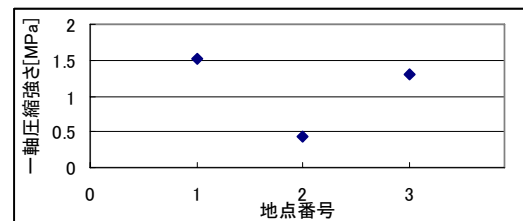


図-3 SH試験から求めた一軸圧縮強さ



図-4 波による崩落で最も危険な地点

4. 風化による崩落の危険度評価

風化による崩落の特徴としては、厚さ 10cm~30cm 程度の板状ブロックで崩落していることである。小宮らの研究から、乾湿繰返しが強度特性や岩石の膨潤特性に大きな影響を与えることも判明していることから、護岸対策を行ったことにより、波が当たらなくなったことで現地海岸崖が乾燥しやすい環境になったことが崩落に関係があるのではないかとと思われる⁴⁾。そこで、南側の危険度評価を行うに当たり、現地海岸崖の乾燥特性を把握することが必要であり、2種類の含水比低下試験を行うことで海岸崖の乾燥が奥行き方向にどの程度広がっているのかを調査した。また、乾湿繰返しを与えた供試体による X線 CT スキャン結果と、粉末 X線回折分析結果を行い、風化による亀裂の発生状況を確認した。

その結果から風化による崩落のメカニズムの推測を行い、最も危険な地点の推定を行った。

以下にそれぞれの試験・分析結果を述べる。

(1) 含水比低下試験

まず、奥行き方向を考慮した含水比低下試験を行うことで、一定環境下では崖表面から時間経過とともに水分逸散量がどのように変化するか、また、一定環境下に任意の期間静置後の奥行き方向の含水比分布特性を調査した。手順を図-5に示す。

まず、現地海岸崖を模擬して1端面のみ暴露し、所定の環境下で7日間・14日間・21日間静置する。試験終了後に数cm単位で供試体を切り取り、それぞれの含水比を求めることで、深さ方向の含水比分布を調査した。同時に、一日当たりどれほど水分が逸散するかを毎日同時刻に供試体の質量を計ることで調べた。供試体は、長さ15cm以上の南側を主に構成する砂質泥岩のボーリングコア試料を用い、試験環境は19℃40%の恒温室内と強乾燥環境を模擬した40℃17%程度の炉乾燥、低乾燥環境を模擬した3~6℃30%程度の冷蔵庫で行ったが、恒温室内と炉乾燥では大きな差は見られなかった。

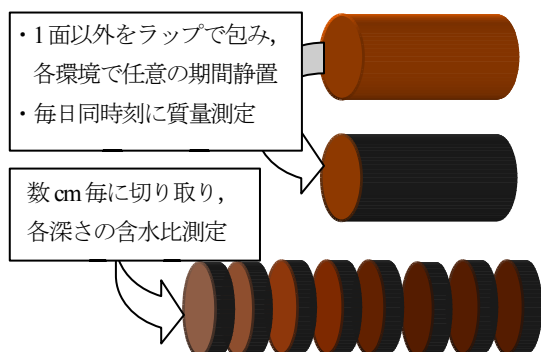


図-5 奥行き方向への含水比低下試験

経過時間ごとの単位面積当たりの水分逸散量の変化を図-6に示す。恒温室内と冷蔵庫内では逸散量に大きな違いが見られ、それぞれの水分逸散量は経過時間とともに徐々に低下していくことが分かった。これは、土中水が水蒸気となる乾燥面が供試体内部に後退することが原因だと考えられる。炉乾燥と恒温室内に違いが見られなかったのも、この乾燥面の後退によるものだと考えられる。また、経過時間ごとの水分逸散量は、図-6に示した自然対数の近似曲線で近似出来ることが判明した。これにより、一定環境下であればある期間後の暴露面から逸散する水分量の合計を求めることが出来る。

この結果を用いて、任意の期間静置後の含水比分布曲線を算出する。まず、供試体を3日間蒸留水に浸漬させた後の含水比 w_0 は50%程度であり、このときの飽和度は100%付近であることから、まとまった降雨の後の海岸崖の含水比は一律に50%になっていると仮定できる。また、深さ方向を考慮した含水比低下試験の結果から、含水比の低下が見られるのは強乾燥環境でも暴露面から20cm~30cm付近までであり、暴露面から50cm以深では含水比の低下はほとんど無いと推定できる。含水比低下曲線を求めるための概念図を図-7に示す。

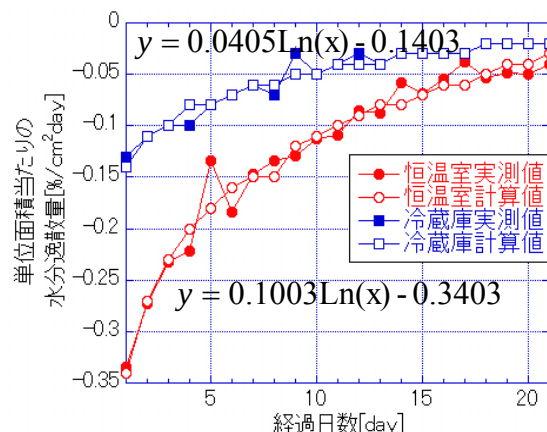


図-6 経過日数ごとの水分逸散量の変化

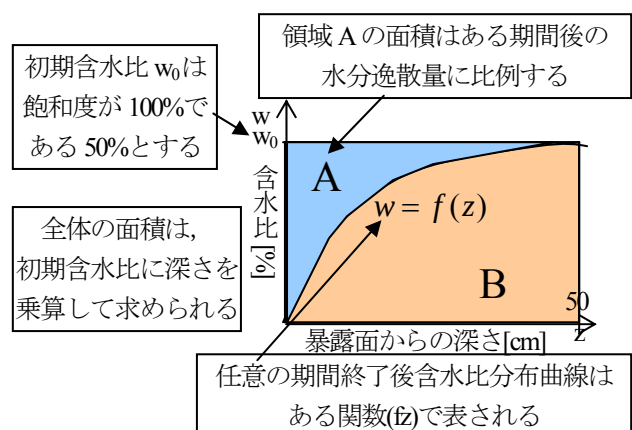


図-7 含水比分布曲線を求めるための概念図

概念図より、全体の面積をMとすれば、 $B=M-A$ である。MとAは既知であり、Bは含水比分布曲線のある関数 $f(z)$ を0から50までで積分した値と等しい。また、奥行き方向に50cm程度でwは初期含水比に収束するため、 $f(z)$ の関数は双曲線関数が望ましく、 $f(z)=az/(b+z)$ の双曲線関数と非常に相関が高いことが判明した。ここで、aは漸近値であるから初期含水比の50となり、未知数bを求めればよい。領域Aは以下の式で求めることが出来る。

$$A = \frac{(\rho_t \cdot z \cdot a - W) - \rho_d \cdot z \cdot a}{\rho_d} \quad \text{式(2)}$$

ρ_t ：飽和時湿潤密度=1.695g/cm³, ρ_d ：乾燥密度=1.130g/cm³,
 z ：暴露面からの深さ=50cm, a ：暴露面の面積[cm²]
 W ：累計水分逸散量[g]

以上の手順で、恒温室と冷蔵庫静置の14日後の含水比分布曲線を求め、実験値との比較を行った。結果を図-8に示す。冷蔵庫内静置の供試体は初期含水比が42%と低かったため、計算値の漸近値も42%としている。この結果から、実験値と計算値はほぼ同様の含水比分布を描いていることが分かる。恒温室内静置7日、21日の結果も比較的良好に近似出来ていることから、含水比分布曲線は上記の手順で算出出来ることが判明した。これにより、必要なパラメータを試験によって求めるだけで、海岸崖の奥行き方向の含水比分布を推定することが可能となった。

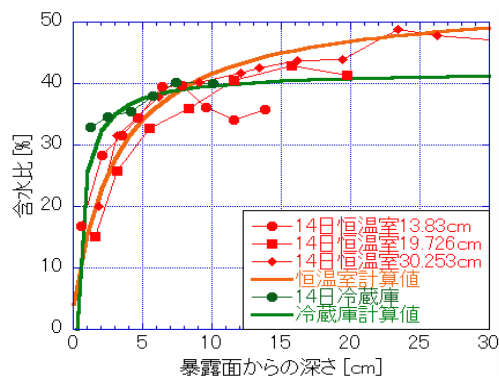


図-8 実験値と予測式による含水比分布

一方、現地海岸崖は今なお乾湿繰返し作用を受けており、乾湿繰返しを受けることで乾燥特性に変化が起きている可能性がある。そこで、繰返し含水比低下試験を行うことで、乾湿繰返し作用が含水比低下特性や供試体にどのような影響を及ぼすのかを調査した。試験の概要を図-9に示す。試験期間を14日としたのは、崖が最も乾燥すると思われる夏季に約14日間程度降雨が降らない期間があるためである。供試体は奥行き方向を考慮した含水比低下試験と同様の地点のものを選定し、未成形で行った。試験条件としては、一定環境下として恒温室内、冷蔵庫内、19°C95%のデシケータ②に静置し、環境に変化のある環境として直射日光の当たらない実験室内、温度19°C一定湿度変化のデシケータ①の5パターンで、9サイクルまで行った。恒温室と冷蔵庫は深さ方向を考慮した含水比低下試験と同様である。

一定環境下での結果として、恒温室内の結果を図-10に示す。同図から、繰返し回数が5回目までは含水比低下量は減少し、それ以降は逆に含水比低下量が若干増加する傾向にあることが判明した。この傾向は他の一定環境下の試験条件でも同様に見られている。供試体内部の細粒化と、図-11に示すように、亀裂の発生が含水比低下量の変化に影響を及ぼしたと考えられる。

環境に変化がある試験からは、低湿環境では供試体表面は急激に乾燥するが、その逸散量は時間経過と共に急激に低下することが判明し、高湿環境でも温度が高ければ含水比低下量は増加することが判明した。

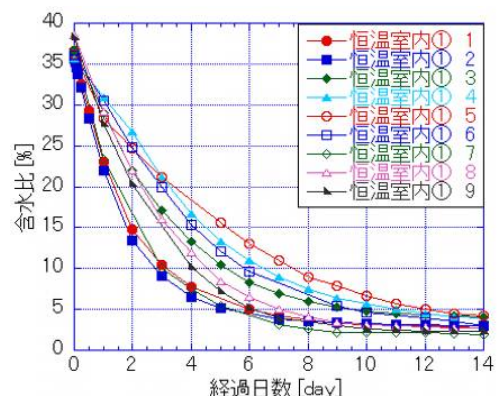


図-10 繰返し含水比低下試験結果（恒温室内）

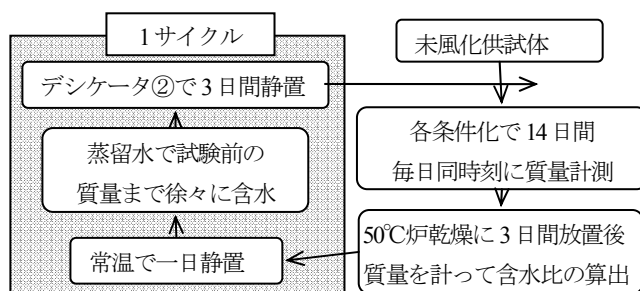


図-9 繰返し含水比低下試験の手順



図-11 繰返し回数増加に伴う亀裂の変化（恒温室）

(2) X線CTスキャンによる内部亀裂観察

X線CTスキャンを行うことで供試体内部の亀裂観察を行った。使用した供試体は含水比低下試験と同様の特性を持ち、未風化供試体と含水比を5%まで低下させる乾湿繰返し履歴を3回受けたものを用いた。5%まで下げた理由は恒温室内において含水比が5%付近まで低下することから5%とし、3回目以降から表面に亀裂の影響が見られたためである。

結果を図-12に示す。黒い部分は空隙、つまり亀裂であり、白くなるほど密度が高いことを示している。まず、未風化供試体の水平方向に多くの亀裂が生じているのが分かり、伊師海岸崖南側は未風化でも既に亀裂が存在していることが判明した。さらに、その亀裂内部には必ず高密度粒状体が存在していることが判明した。X線回折結果により、これは硫酸バリウムであることが分かった。バリウムが亀裂の発生に影響を与えているとは考えにくく、元々亀裂が存在している所にバリウムが溜まったと考えられる。また、風化供試体では未風化供試体では見られなかった鉛直方向への亀裂が確認出来ることが挙げられる。この鉛直方向の亀裂内部には硫酸バリウムは確認できないため、鉛直方向への亀裂は乾湿繰返し後に発生したと考えられる。さらに、亀裂の幅も大きくなっていることから、乾湿繰返しによって亀裂の発生、発達が起こっていることが判明した。

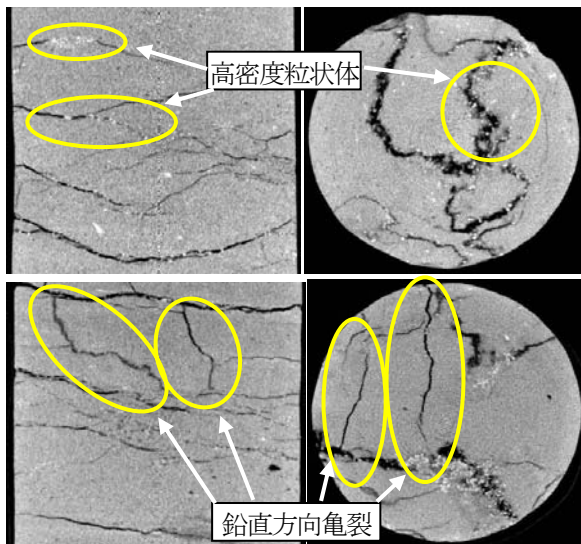


図-12 未風化供試体(上)と風化供試体(下)のCT結果

(3) 風化による崩落メカニズムの推察

これまでの成果から、風化による崩落メカニズムの推察を行った。まず、波が完全に当たらないようにする護岸対策工事により、表面付近は強く乾燥するようになる(①→②)。その後、乾湿繰返しによって元々存在していた堆積方向への微細な亀裂が発達し、それぞれが繋がっていく(②→③)。亀裂の発達により、亀裂内部に外気が侵入し、亀裂隣接する部分が乾燥するようになる(③→④)。亀裂より土中水が供給されにくい環境になるため、乾湿繰返しの影響を強く受けることになり、細粒化と強度の低下、粘土化による膨潤率の増加により、堆積方向だけでなく鉛直方向の亀裂が発生する(④→⑤)。さらに鉛直方向の亀裂が発達し、個々の亀裂が繋がることでブロック状となる(⑤→⑥)。この状態で地震等の外部からの力が作用することにより崩落に至る(⑥→⑦)。崩落した部分の上下左右は乾燥面積が増え、崩落した部分に隣接する部分が崩落する可能性が非常に高くなり、ある一つの岩塊が崩落すると、その岩塊の隣接していた地点から崩落していくことが予想される(⑦→⑧)。南側で崩落している岩塊が厚さ10cm~30cm程度の板状だった原因は、含水比の影響が及ぶ範囲と関係があったことが判明した(図-13参照)。また、炉乾燥と恒温室内の逸散量に変化が無かったことから、最も乾燥が予想される夏場においても含水比の低下が見られるのは10cm程度までと考えられ、海岸崖に様々な影響を及ぼすとされる含水比10%を下回るのは暴露面から数cm程度である。乾湿繰返しによる亀裂の発達によって水分逸散量は増えるが、亀裂の発達速度は非常に緩やかだと考えられ、南側は崩落頻度は高いが、後退距離は非常に小さいと推測される。以上の結果から、南側で崩落危険度の高い地点は、1日中直射日光の当たることで乾湿繰返しの影響を強く受ける暴露面が南向きの地点、湧水の存在により内部亀裂の発達速度が速い地点と推察でき、この二つを満足する図-14の地点が南側で最も崩落危険度が高いと推測した。

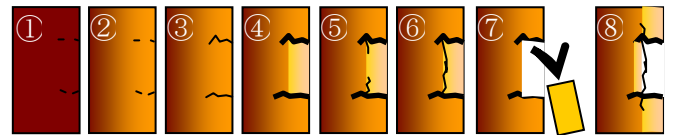


図-13 風化による崩落メカニズムの模式図



図-14 南側で最も崩落危険度の高い地点

5. 伊師海岸崖の海岸崖侵食に最も有効な対応策の提言

これまでの結果から、伊師海岸崖は波による侵食の方が後退距離が大きいことが判明した。また、伊師海岸崖の前浜砂は砂鉄を多く含み、侵食速度を増加させている可能性もあることから、護岸対策によって波の侵食を防ぐことが先決であると考えられる。

波を防ぐ対策として、景観を配慮して人工リーフ等で波の威力を弱め、継続して波が崖に当たるようにする場合は、既存のノッチの充填と波が一点に集中しないように調整することで、崖の後退をかなり抑えることが可能である。また、現在南側に取られている対策のように、崖に波が完全に当たらないにする場合は、図-15のようにノッチの充填を行わずにそのままの状態にしておくと、乾湿繰返しによってノッチの上部に強度低下・亀裂の発生といった現象が発生し、いずれノッチ上部が大規模に崩落してしまう危険性がある。そのため、護岸対策を行った際はノッチの充填を行うべきである。また、護岸対策後の乾燥に伴う崩落を防止する場合は、透明な樹脂等で表面を覆うことで、海岸崖の乾燥を抑えることが出来る。これで崖の後退はほぼ完全に抑えることが出来る。本研究の結果は、様々な海岸崖で適応可能であり、今後の海岸崖侵食問題に対して対応策を行う際の参考になると考える。



図-15 ノッチの充填を行わないと崩落の危険性がある

6. 結論

- 1) SH 試験、写真測量を援用して波による崩落の危険度評価を行い、最も強度が低い場合を想定すると 1 年以内に崩落する可能性を示唆した。
- 2) 2 種類の含水比低下試験を行うことで、現地海岸崖の乾燥特性を把握する事ができた。
- 2) 風化・未風化供試体内部の亀裂を CT スキャンで観察し、高密度粒状体の存在と、乾湿繰返しに伴う亀裂の発達を確認した。
- 3) 護岸対策後の風化に伴う海岸崖崩落のメカニズムの解明を行い、その崩落量は小さいことが判明した。
- 4) 海岸崖崩落の様々なケースごとの対応策を提言することで、今後の国土保全に大きく貢献することができると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するに当たり、茨城県高萩土木事務所、国民宿舎「鵜の岬」の関係者の方々には多大な協力をして頂き深甚な謝意を表したい。

参考文献

- 1) Kazuya Y, Satoshi M, Yashunori K, Zishien W : *FE Analysis of Coastal Cliff Erosion due to Ocean Wave Assailing. Scour of Foundations* pp307-319, 2002
- 2) Sunamura, T. : *Geomorphology of Rocky Coasts*. John Wiley & Sons Ltd, pp.52-56, 1992.
- 3) 佐々木康子：現地調査による茨城県の海岸侵食特性、平成6年度茨城大学工学部卒業論文、pp.46-58、1995.
- 4) 小宮康明、新城俊也：乾湿風化に伴う泥岩の力学特性の変化、切土のり面および斜面の風化と安定に関するシンポジウム発表論文集、pp31-36、1985.

RISK ANALYSIS FOR COASTAL EROSION CORRESPONDING TO DIFFERENT COLLAPSE MODES

Takayoshi USUI, Kazuya YASUHARA, Satoshi MURAKAMI and Hideo KOMINE

In the last decade, authors have been investigating the mechanisms, developing predictions and exploring countermeasures against failure of rocky coasts. Following previous studies, the investigation of coastal cliffs at Unomisaki Coast, in the Northern part of Ibaraki Japan has shown that the manner of collapse due to coastal cliff erosion can be classified into two types: progression of weathering of cliff surface and progress of notches at the toe of cliffs. This paper aims to propose respectively, analytical procedures for evaluating the collapse risk and countermeasures for the above-mentioned two types of rocky coast failure when subject to ocean waves.