

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月7日現在

機関番号：10103  
 研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2009年度～2011年度  
 課題番号：21560515  
 研究課題名（和文） 波浪による斜面内ノッチの形成・進行モデルとそれに基づく斜面崩壊予測法の開発  
 研究課題名（英文） Failure mechanism of soft cliff due to wave erosion and its evaluation

研究代表者  
 川村 志麻（KAWAMURA SHIMA）  
 室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授  
 研究者番号：90258707

研究成果の概要（和文）：全海岸域の80%を占めると言われている海岸崖の侵食及びそれに起因する被害が世界的にも数多く報告されている。今後、温暖化によって生じるとされる海面上昇や地下水水位の上昇を考慮すれば、この問題は深刻化する可能性があり、早急に検討する必要がある。本研究では、遠心力載荷実験ならびに実海岸崖の現地調査を行い、波の侵食に起因する海岸崖の崩壊機構と侵食現象の特徴を調べ、それに基づく崩壊予知法を検討した。

研究成果の概要（英文）：This study aims of clarifying mechanisms of cliff erosion and failure using a geo-centrifuge technique. Physical modelling of these problems at elevated gravities in a centrifuge can increase our understanding, especially for such complex phenomenon. In this study, the effects of cliff geometrical condition and wave condition on mechanisms of erosion and slope failures of the cliff for a short-term problem (likely to storm wave events) was revealed experimentally. Based on the test results, a prediction method for the progress of erosion recession was proposed, and its validity was investigated using the slope stability analysis based on field data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,200,000	660,000	2,860,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：波，侵食，斜面崩壊，模型試験

1. 研究開始当初の背景

地球上にある海岸崖からなる海岸は、全

海岸の80%を占めると言われている。このよ  
うな海岸崖の侵食ならびに崩壊現象は、国土

保全または地球規模の問題として取り扱われ、多くの研究者がその現象を明らかにしてきている。これらの海岸崖は“Hard cliff”と“Soft cliff”に大別され、また侵食期間や波浪条件の違いによって短期問題と長期問題に分類される。特に Soft cliff では急速な侵食やそれに起因する斜面崩壊が生じていることが報告されている。今後、予想される地球温暖化により、現在の海岸域や地下水位が変化する可能性もあり、このような海岸崖の侵食・斜面崩壊に関する現象の解明と対策は急務になると言える。

## 2. 研究の目的

本研究は、暴風時などの突発的な問題における Soft cliff の侵食現象とそれに起因する斜面崩壊に着目し、精確な予知・予測法の確立とその安定性評価手法の確立するため、地盤工学・海岸工学の視点からそれを解明・提案するものである。本研究では、遠心力載荷実験を実施し、過去に行われた 1G 場模型実験と現地被災事例にもとづいて、侵食特性に基づいた斜面崩壊の安定性評価法を提案することを目的にしている。

## 3. 研究の方法

具体的には以下の項目に検討を加えた。

- (1) 新たに遠心力載荷実験用 Flap 式の造波装置を設置し、波浪特性を把握する。その特性に基づいて、波浪再現実験に必要な項目を整理する。
- (2) Cliff の形状を変化させた模型実験を実施し、ノッチの発達の方やそれに起因する斜面崩壊のメカニズムを観察する。また斜面勾配を変化させて崩壊の違いを明らかにする。
- (3) 得られた遠心力模型実験結果と過去に行われた同条件の 1G 場模型実験結果において、力学挙動の違いを明らかにし、模型実験の正

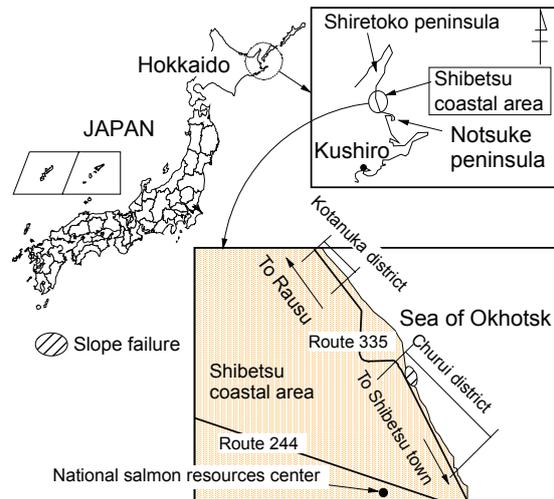


図-1 本研究で対象とした海岸崖



写真-1 北海道東部の海岸崖の様子

当性や工学的意義を明らかにする。

- (4) 波の繰返し力およびノッチの進行距離を考慮した斜面安定性評価法を提案する。
- (5) 北海道東部の海岸斜面の被災事例を調査し、提案している安定性評価法の妥当性を検討する。

## 4. 研究成果

一連の研究において得られた結論を総括すると次の通りである。

- (1) 研究の対象とした地域は、北海道知床半島端部の南側に広がる海岸域である（図-1、写真-1 参照）。この海岸域は北東からの波浪の影響を強く受け、現在も侵食が進んでいる。地形的要因および侵食現象による漂砂の影

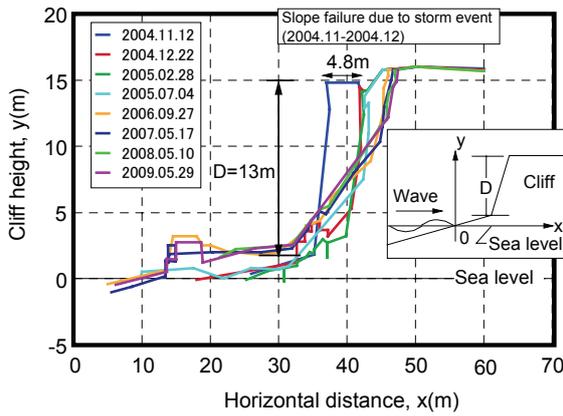


図-2 海岸崖断面の変化

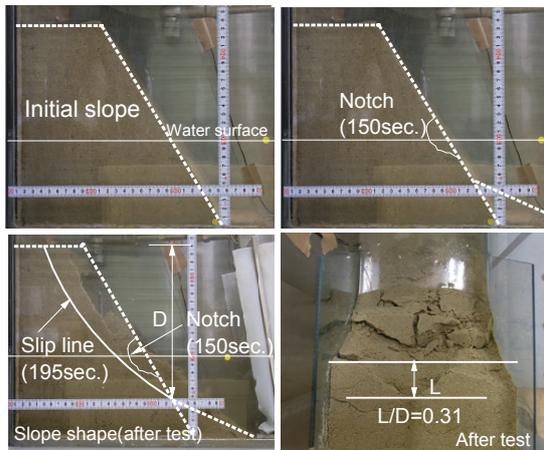


写真-2 遠心力載荷実験における斜面の変形状況

響によって、野付半島が形成されたと言われている。一方、地質学的にみれば、第4紀の火山性堆積物が広く分布しており、この未固結な地盤が主に侵食作用を受けていると推測される。

この付近では、低気圧の高波によると考えられる影響により、海岸斜面の滑落・崩壊が発生し、2004年11月28日にはその上部に位置する国道335号が通行止めになっている。

図-2は、2004年以降に調査された崩壊した上述の海岸斜面の断面変化を示したものである。図から明らかなように、斜面は4.8m後退し(2004.11.12(青線)から2004.12.22(赤線))、その後も徐々に侵食が進行してい

ることがわかる。

このような波浪侵食による被害は、北海道の他地域にある道路・鉄道施設においても報告されており、その対策が急務となっている。(2) 写真-2は、Soft cliffの情報をもとに、早強ポルトランドセメントと豊浦砂の混合試料を用いて作製した模型斜面の遠心力載荷実験結果の一例を示している。なお、実験等の詳細は後述する主要論文に記載されている。模型実験の条件は、波高  $H=13\text{mm}$ 、波浪周波数  $1.0\text{Hz}$ 、斜面角  $65^\circ$  である。過去に行われた1G場模型実験と同様に、ノッチの形成後、すべり線を形成し、斜面崩壊が進行している。また、同写真には、天端から崩壊点までの深さ  $D$  と後退距離  $L$  を併記している。その比  $L/D$  は、 $0.31$  となり、すべり線は基本的に対数らせんに近い形状を示していた。

この  $L/D$  値と斜面強度  $q_u$  との関係を斜面角の違いで比較したものを図-3に示す。なお、各データは豊浦砂と同等のシリカ砂を用いて行われた同条件下の遠心力載荷実験結果に加筆して示しており、1G場模型実験の結果については実物の地盤強度に換算してプロットしている。図より、 $q_u$  の増加によって  $L/D$  値は減少し、 $90\text{ kN/m}^2$  以上では収束傾向にあるようである。また、斜面角  $65^\circ$  以上の  $L/D$  値は斜面角の増加に伴い、減少するようである。

以上のことから、このような侵食に起因する斜面崩壊は、波による侵食が斜面崩壊の誘因である可能性があることが明らかにされた。

(3) 図-4は、模型実験の斜面崩壊時の波の作用回数  $N_c$  と波高を斜面の土質強度で正規化した値 ( $H\gamma_w/q_u$ ,  $H$ : 波高,  $\gamma_w$ : 流体の単位体積重量,  $q_u$ : 一軸圧縮強さ) との関係を示している。一般に、地盤の強度は応力比として評価されることから、ここでは波高(波力)と一軸圧縮強さとの比、すなわち、上記のようなパ

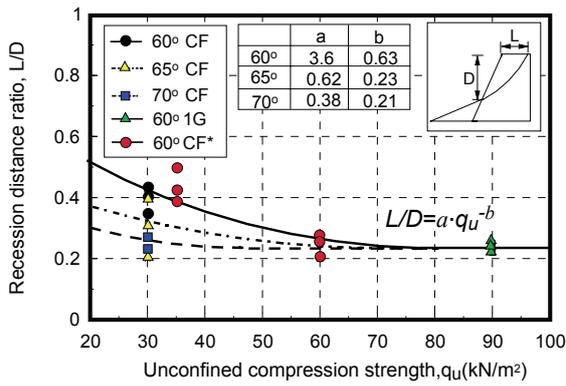


図-3 L/D値と斜面の一軸圧縮強さ  $q_u$  との関係

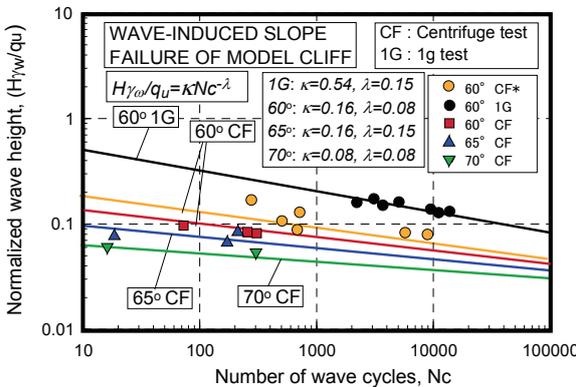


図-4 波高を斜面強度で正規化した値と波の作用回数の関係

ラメータを採用している。図中には、過去に行われた 1G 場模型実験 (1G) と遠心力载荷実験 (CF\*) の結果を併せて示している。図より、拘束圧効果、粒子径効果に起因すると考えられる 1G 場と遠心力载荷場の両実験法の相違は確認されるものの、両実験ともに同傾向の一義的な関係 (破壊線) が存在していることがわかる。また、同一の正規化波高の比較では、例えば、斜面角 65° のケースでは斜面角 60° のケースよりも崩壊時の波の作用回数は少なくなるようである。このことから、崩壊時の力学特性は、斜面強度、波高、波の作用回数に影響を受けていることが明らかである。

図-5 は、崩壊が起こった斜面法先部分からの侵食距離  $X$  を強度パラメータ ( $H_w/q_u$ ) によって正規化した値  $X/(H_w/q_u)$  と波の作用回数  $N_c$  との

関係を示している。なお、遠心力载荷実験では、侵食距離を正確に読み取ることが困難であったため、正確に把握できた値 (斜面角 65°) の一例をプロットしている。

図より、模型実験方法の違いにかかわらず、波の作用回数の増加にともなって侵食距離が増加していることが明らかである。これは侵食が進行するにつれて、その侵食の進行速度 (ここでは、作用回数 1 回あたりの侵食距離) が上昇していることを示している。また、地盤の堆積条件 (堆積角  $\beta$ : 水平面と堆積面とのなす角) の違いによって進行速度に変化が現れていることも興味深い。このように侵食距離を推定することができれば、このような斜面に対する安定性評価が可能になる。

(4) 図-2 に示す実斜面を想定した安定解析を実施した。斜面高さ  $D=13\text{m}$ , 斜面角 60°, 斜面の地盤強度を  $q_u=187.8\text{kN/m}^2$  とする。近隣の漁港では、ある年の年最大有義波高 (沖波) が 3.7m, 周期 7.5sec. との報告があることから、ここでは波浪周期 10 秒, 波高 1.5m の波が直接斜面に作用すると仮定した場合 (図-6 挿入図のような波の作用ケース) の侵食後退距離と波浪回数  $N_c$  を求めてみる。上述の値を用いて、 $H_w/q_u$  を算出すると 0.078 になる。今、図-4 に記載されている式の係数を本研究で得られた値  $\kappa=0.16$ ,  $\lambda=0.08$  を与えると、崩壊に至るまでの波浪の作用回数  $N_c=8,000$  回程度になる。次に、後退距離  $L$  は一軸圧縮強さが  $90\text{kN/m}^2$  以上なので、図-3 から  $L/D=0.23$  より 3.0m と算出される。このように、上述の図中に示す関係式を用いれば、簡易に後退距離と崩壊に至るまでの作用回数を求めることができる。また、暴風時の波浪周期を 10 秒程度として作用時間を算出すると、22 時間程度の上記の波浪が作用することになる。これらの値の妥当性については、特に係数  $\kappa=0.16$ ,  $\lambda=0.08$  や波浪条件、

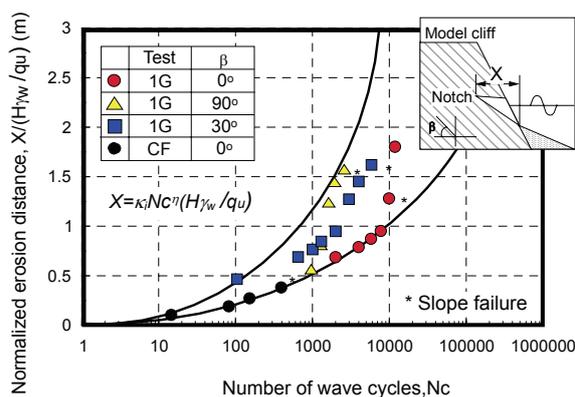


図-5 正規化侵食距離と波の作用回数との関係

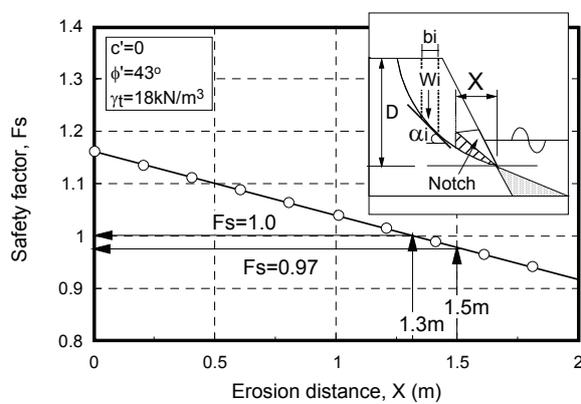


図-6 侵食距離と斜面崩壊に対する安全率の関係

斜面の地盤条件と幾何学的条件に強く依存することから、被災事例にもとづいた逆解析によって検討することが必要であると言える。

次に、図-5に基づいて算出された侵食距離  $X$  から斜面の安定性を議論した。上述のように、 $H_w/q_u=0.078$ 、 $N_c=8,000$  回、斜面角を  $60^\circ$  として、また遠心力載荷実験で得られた値、 $\kappa_f=0.05$ 、 $\eta=0.33$  を用いて侵食距離  $X$  を算出し、その値を実フィールド値（スケール比：模型/実物：1/N、本研究では  $1/N=1/20$  として実施）に換算すると、 $X=1.5\text{m}$  になる。

波の侵食作用による斜面安定を極限平衡問題として取り扱い、この  $X$  を用いて安全率  $F_s$  を算出する。本安定解析では、すべり面の

形状は対数らせん形状が比較的良く表現できるとの上述の事実より、対数らせん形状を用いた。図-6は、斜面の安定解析結果を示したものである。図より、波の侵食による侵食距離ならびに堆積構造異方性の影響を考慮した斜面安定の簡易解析法は、実験結果を良く表現していることがわかる。

以上のことから、限られた条件ではあるが、提案した破壊基準式ならびに侵食距離を考慮した本解析手法は、簡便に合理的に斜面の安定性を評価できることが示された。

### 5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計2件）

① S. Kawamura and S. Miura: Stability evaluation of slope with soft cliff, International Journal of Geotechnical Engineering, J. Ross Publishing, Inc., 査読有, Vol. 6, No. 2, 185-191, 2012, DOI : 10.3328/IJGE.2012.06.02.185-191

② S. Kawamura and S. Miura: Wave-induced failure of soft cliff and its evaluation, Geotechnical Special Publications, ASCE, 査読有, No. 199, 3120-3129, 2010, DOI : 10.1061/41095(365)318

〔学会発表〕（計3件）

① S. Kawamura and S. Miura: Stability evaluation of soft cliff subjected to wave erosion, 2nd International Conference on Transportation Geotechnics, ISHokkaido, Sapporo, Japan, 2012. 9.

② S. Kawamura and S. Miura: Stability evaluation of slope with soft cliff, International Conference on Advances in Geotechnical Engineering (ICAGE), Perth, Australia, 2011. 11.

③宮越晃大, 川村志麻, 三浦清一 : 波の侵食による斜面崩壊とその評価に関する遠心力載荷実験, 地盤工学会北海道支部年次技術報告会, 苫小牧道新ホール, 2011年2月.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

川村志麻 (KAWAMURA SHIMA)  
室蘭工業大学・大学院工学研究科・准教授  
研究者番号 : 90258707

### (2) 研究分担者

三浦清一 (MIURA SEIICHI)  
北海道大学・大学院工学研究院・教授  
研究者番号 : 0009150