

波の侵食作用を受ける海岸斜面の力学特性とその評価

Wave erosion mechanism of coastal soft cliff and its evaluation

川村志麻¹・栗林正樹²・三浦清一³

Shima KAWAMURA, Masaki KURIBAYASHI and Seiichi MIURA

This paper aims at clarifying the deformation-strength properties for coastal soft cliff. A series of triaxial compression tests was performed on undisturbed specimens sampled from the coastal soft cliff in Hokkaido, Japan to obtain mechanical properties such as shear strength. From the triaxial test results, it was found that the effect of fabric anisotropy on the strength-deformation behavior could not be ignored for the coastal soft cliff. In addition to these laboratory tests, a series of 1g-model test to grasp the feature of slope failure due to wave erosion was conducted on the model cliff having the corresponding strength with that of the soft cliff. The model test results showed that such failure was affected by cliff strength, wave height and the number of wave cycles.

1. はじめに

全海岸域の80%を占めると言われている海岸崖の侵食およ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(例えば, Hutchinson, 1969; Sunamura, 1983; Hodgson ら, 1996). 我が国においても, 例えば, 北海道東部の海岸崖において, 波の侵食に起因したと考えられる崩壊・滑落が報告されている. この海岸侵食問題では, 地質学, 地形学等に関する科学的な視野にもとづいた研究は行われているが, 海岸工学や地盤工学などの工学的視野に立った研究は限られている(例えば, Sunamura, 1983; Kamphuis, 1987).

本研究では, はじめに波の侵食作用を受けている北海道東部の海岸斜面(Soft cliff)の力学機構の解明を目指した. 次いで, 1g 場造波模型実験と過去の遠心力载荷実験結果にもとづき, 波の侵食作用による斜面の侵食距離の推定ならびに海岸斜面の崩壊とその安定性評価法を検討している.

2. 試料のサンプリング法と室内要素試験法

用いた試料は, 北海道東部の海食崖より採取したものである. 試料採取地点を図-1に, 試料の物理的性質(ρ_s : 土粒子の密度, $\rho_{d \text{ in situ}}$: 原位置試料の乾燥密度, D_{50} : 平均粒径, U_c : 均等係数, F_c : 細粒分含有率)を表-1に示す. 以下, この試料を標津土と称する.

不攪乱試料は, ブロックサンプリング法によって採取されている. 採取後, 断熱容器に入れ, 凍結状態(約-25℃)で実験室に運搬している. その後, 凍結されたブロック試料を直径70mm, 高さ150mmに整形し, 三軸

供試体を作製している.

本試験では, 凍結されたブロック試料から2種類の不攪乱供試体を準備している(後述する図-4挿入図参照).

- BV 供試体: 供試体の軸方向が原地盤の鉛直軸と一致したもの.
- BH 供試体: BV 供試体を90°回転させたもの.

供試体整形後, 凍結供試体をセル内に設置し, 有効拘束圧 $\sigma'_c = 19.6\text{kPa}$ のもとで2時間以上放置し融解させている. その後, 二重負圧法(地盤工学会, 2000)と196kPaのバックプレッシャーを供給することにより供試体を飽和させている. この方法により, 全ての供試体の間隙水圧係数 B 値は0.96以上を得ている. 圧密非排水(CU), 圧密排水(CD)試験では有効拘束圧 $\sigma'_c = 49, 98, 196\text{kPa}$ のもとで等方圧密している. なお, すべての試験(CU, CDと非圧密非排水(UU)試験)において, ひずみ速度は0.25

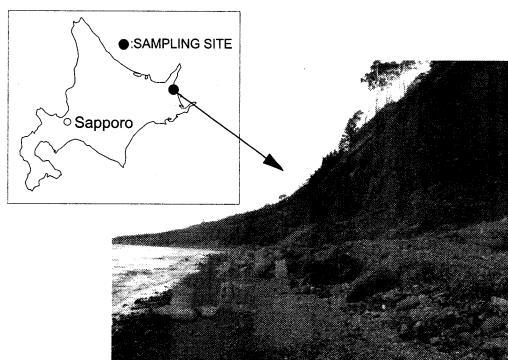


図-1 試料採取地点

表-1 試料の物理的性質

Sample name	ρ_s (g/cm^3)	$\rho_{d \text{ in situ}}$ (g/cm^3)	D_{50} (mm)	U_c	F_c (%)
Shibetsu soil	2.77	1.40	0.67	3.7	4.5
Toyoura sand	2.68	—	0.15	1.3	0

1 正 会 員 博(工) 室蘭工業大学講師 工学部建設システム工学科
2 学生会員 学(工) 室蘭工業大学 大学院工学研究科
3 フェロー 工博 北海道大学教授 大学院工学研究科

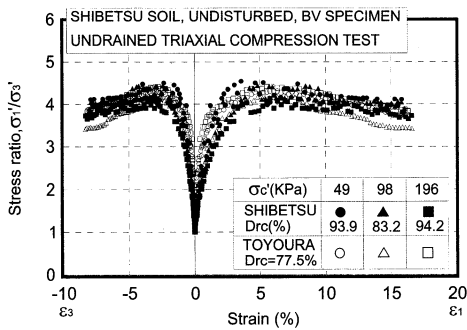


図-2 BV供試体の主応力比－主ひずみ関係（非排水条件）

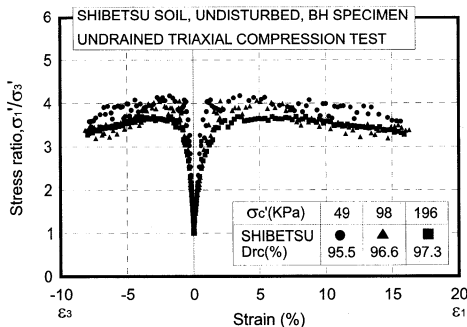
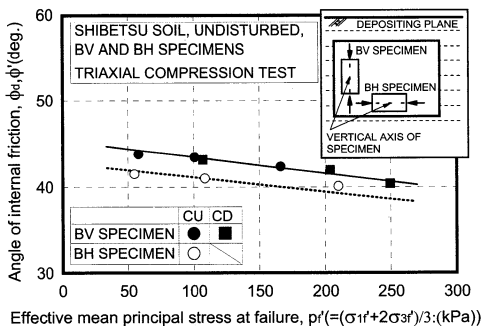


図-3 BH供試体の主応力比－主ひずみ関係（非排水条件）

図-4 ϕ , ϕ' と破壊時の平均有効主応力 p_f' との関係

%/min である。

3. 北海道東部の海岸崖の静的力学挙動

図-2は、BV 供試体の圧密非排水 (CU) 三軸試験から得られた最大、最小主応力比 ($=\sigma_1'/\sigma_3'$) と最大、最小主ひずみ (ϵ_1 , ϵ_3) の関係を示したものである。なお、豊浦砂の結果 (圧密後の相対密度: $D_{rc}=77.5\%$) も併記している。試験結果から、標津土の強度－変形特性は、密な砂が示す硬化－軟化型の挙動と類似していることがわかる。また、有効拘束圧 σ_3' の増加にともなって同じひずみレベルの主応力比が小さくなっており、拘束圧依存性を示している。

図-3は BH 供試体の非排水条件における主応力比－主

ひずみ関係を示している。BV 供試体との比較では、BV 供試体は主応力比に明瞭なピークが認められるものの、BH 供試体では明確なそれは認められず、破壊時の主ひずみにおいても BH 供試体の方が BV 供試体より大きかった。これらのことから、BV 供試体は BH 供試体より変形抵抗が大きく、高いせん断強度を有していることがわかる。なお、非圧密非排水 (UU) 試験においても、BV と BH 供試体の破壊時の軸差応力 $q (= \sigma_1' - \sigma_3')$ はそれぞれ 187.8 , 174.7 kN/m^2 であり、BV 供試体の方が大きな値となった。このように、本試料においても原地盤で確認されるような堆積構造異方性 (例えば、Miura・Toki, 1984) に起因する変形－強度特性の変化が確認されている。なお、ここで言う堆積構造異方性とは、土粒子の配列構造に起因する異方性を指す。

図-4は排水、非排水試験の内部摩擦角 ϕ , ϕ' と破壊時の平均有効主応力 p_f' との関係を示している。図より、両供試体ともに破壊時の平均有効主応力 p_f' の増加に伴い、 ϕ が減少傾向にあることがわかる。また、BH 供試体の ϕ' は BV 供試体のものより小さいことが明らかである。例えば、その差は約 3° であった。このことから、拘束圧依存性と構造異方性による ϕ の変化は、例えば後述のような安定解析の結果に影響を及ぼすことは明らかであり、斜面の安定性を評価する上では重要であると言える。

4. 造波水槽を用いた模型試験と試験結果

(1) 模型試験方法

本研究では、波の侵食に起因する斜面崩壊現象を把握するために、Wave-marker theory (Dean・Dalrymle, 1991) にもとづいて、Flap 式の造波水槽を試作した。図-5に用いた造波水槽を示す。水槽の内寸法は長さ $2,000 \text{ mm}$ 、高さ 700 mm 、奥行き 600 mm であり、造波可能な周波数の範囲は $0.01 \sim 0.9 \text{ Hz}$ である。波高はクランク・シャフトの長さを調節することにより、任意の波高 H が設定できるようになっている。

本研究では、Soft cliff と呼ばれる海岸崖 (Sunamura, 1983) を対象にしていること、および過去の実験結果 (川村ら, 2006) との比較・整合を図るために、斜面の一軸圧縮強さ q_u を Chapman ら (2002) が報告している Soft cliff の強度定数 (Soft cliff の内部摩擦角 $\phi' = 29.3^\circ \sim 31.2^\circ$, 粘着力 $c' = 2.4 \text{ kN/m}^2 \sim 28.4 \text{ kN/m}^2$) とほぼ同値になるように決定している。その結果、 q_u は $40 \text{ kN/m}^2 \sim 90 \text{ kN/m}^2$ を示したことから、実物斜面の強度を $q_u = 90 \text{ kN/m}^2$ と仮定し、その強度 q_u を $1/30$ にした模型斜面を作製している。なお、模型と実物の長さのスケール比 (模型/実物) は $1/30$ である。

模型斜面では、斜面作製時の均一性と再現性および斜

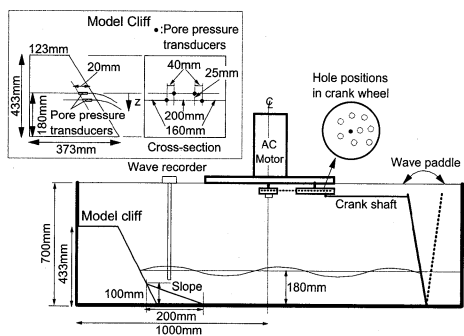


図-5 用いた造波水槽装置と模型斜面

表-2 本研究における試験条件

Test conditions (Model scale: 1/30)	
Cliff angle	60°
Cliff height	433mm
Cement content	1.0%
Wave height	52mm, 45mm, 18mm
Wave frequency	0.55Hz
Water depth	0.18m

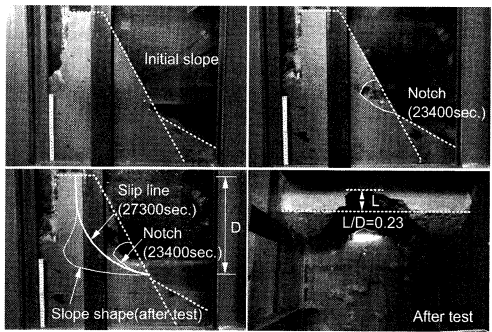


写真-1 波の侵食に起因する斜面すべり破壊の状況

面強度を考慮し、早強ポルトランドセメントと豊浦砂の混合試料（セメント質量比（セメント/砂）：1.0%）を締固めて（締固め密度：1.80g/cm³）、傾斜角60度になるように斜面を作製している。さらに、斜面高の違いが実験結果に影響を及ぼさないように、 q_u 値と Taylor の安定図表（Taylor, 1937）から算出される限界高 H_{cr} （=433mm）を斜面高としている。

波の作用による影響を定量的に評価するために、水深 $h=180\text{mm}$ 、波浪周波数を0.55Hz（フルード相似則による実換算0.1Hz）、重複波条件下で、波高を3種類変化した実験を実施している。試験条件を表-2に示す。

本研究では、すべり線が天端に達した時点すべり破壊（破壊点）と定義している。また崩壊が生じない場合は最大8時間、試験を実施している。試験中、間隙水圧挙動と斜面の変形挙動を把握するために、4個の間隙水圧計およびビデオカメラとデジタルカメラを用いて、それ

らの挙動を追跡している。計器の配置図を図-5に示す。

(2) 模型斜面における侵食・崩壊現象

写真-1は、波高 $H=52\text{mm}$ 時の斜面の変形状況を示している。写真より、ノッチの形成後、斜面崩壊が急速に進行していることがわかる。また、ノッチの形成後の侵食によって斜面はさらに急勾配になっている。このような侵食にともなう斜面勾配の変化（急勾配化）は、図-1の挿入写真においても確認されるように、実際の海食崖においても観察されている。西・Kraus（1996）は砂丘における侵食パターンとその機構を調査しており、本試験で得られた結果は彼らの報告にある比較的締固まった砂丘の侵食・崩壊パターンと類似した傾向を示している。

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。本ケースでは、その比 L/D は0.23となり、すべり線は直線と円弧すべりの複合的な形状を示している。

この L/D 値と斜面強度 q_u との関係を図-6に示す。ここでは、斜面強度 q_u の違いによるすべり形状の変化を把握するために、試験条件・力学条件が同様の遠心力载荷実験結果を併記している（川村ら, 2006）。遠心力载荷実験では力学的条件は満足されることから、遠心力载荷実験の q_u は実物斜面の q_u と同値となる。遠心力载荷実験では2種類の斜面強度 $q_u=35\text{kN/m}^2$ （●印）と 60kN/m^2 （○印）を採用している。一方、本研究における1g場模型試験ではその強度を1/30にしているので、実物換算すると q_u は 90kN/m^2 になる。図より、 q_u の増加によって L/D 値は減少し、 60kN/m^2 以上では収束傾向にあることがわかる。このように q_u-L/D のような関係を求めることができれば、海岸斜面の斜面強度からすべり線のおおよその形状は推定可能になると言えよう。

次に、すべり破壊直前における斜面内の代表的な過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_w$ の経時変化を図-7に示す。図中の z は水面からの深さを示し、 Δu は過剰間隙水圧、 σ'_w は有効土被り圧を示す。図より、波の作用によって水圧比は変動しているものの、蓄積傾向にはない。その値は最大で0.8程度であった。それゆえ、本試験の範囲内では、このような斜面崩壊は液状化現象に起因するものではなく、侵食が斜面崩壊の誘因である可能性が高いことが伺える。

以上のことを総合すると、波の侵食による斜面崩壊は液状化現象に起因するものではなく、ノッチの進行によって生じる可能性があること、またそのすべり形状は斜面強度に影響を受けることが明らかにされた。

(3) 侵食距離の推定と斜面の安定性評価

上述のように、波の侵食作用によって斜面崩壊の可能性が示唆された。ここでは、さらに侵食距離の推定ならびに斜面の安定性評価手法を検討している。

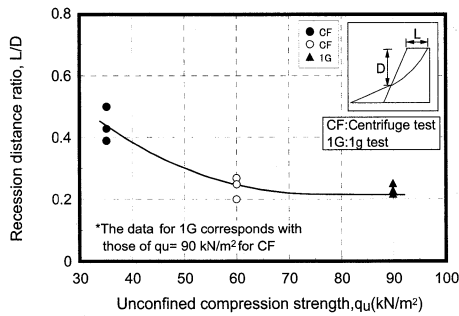


図-6 天端から崩壊点までの深さ D と後退距離 L の比 L/D と斜面強度 q_u との関係

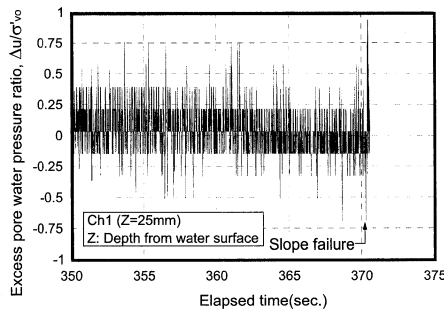


図-7 斜面内の過剰間隙水圧比の経時変化

図-8は、斜面崩壊（破壊）時点の波の载荷回数 N_c と波高を斜面の強度で正規化した値（ $H\gamma_w/q_u$ ， H ：波高， γ_w ：液体の単位体積重量， q_u ：一軸圧縮強度）との関係を過去の遠心力载荷実験結果（川村ら，2006）に加筆して示している。図中には、実験終了時に崩壊しなかったケースのデータ（ノッチの形成のみ：●と■印）も併記している。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）と一軸圧縮強度との比，すなわち，上記のようなパラメータを採用している。図より，粒子径効果に起因すると考えられる両実験法の相違は確認されるものの，両実験ともに崩壊（破壊）の有無により境界線が存在していることがわかる。すなわち，これはこの境界線より下の領域ではノッチの形成はあるものの，すべり破壊までは進行しないことを示すものである。例えば，具体的なその関係は以下のように表わされる。

$$H\gamma_w/q_u = \kappa N_c^{-\lambda} \quad (1)$$

ここで，1g 場の本試験では $\kappa = 0.51$ ， $\lambda = 0.17$ となった。このように，斜面強度および波高を考慮した強度パラメータ $H\gamma_w/q_u$ によって，波の侵食作用に起因する斜面崩壊現象を定量的に評価できることは非常に興味深い。

次に，斜面崩壊が起こった斜面法先部分からの侵食距離 x を強度パラメータによって正規化した値 $x/(H\gamma_w/q_u)$

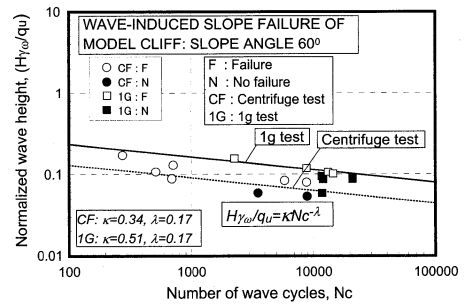


図-8 正規化した波高と波の作用回数との関係

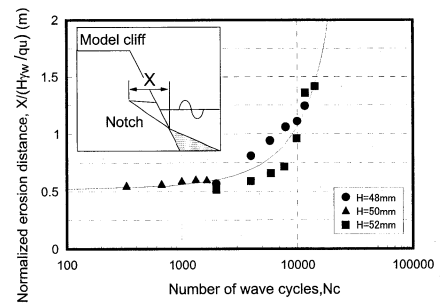


図-9 正規化した侵食距離と波の作用回数との関係

と波の作用回数 N_c との関係を図-9に示す。図より，波高の大きさにかかわらず，波の作用回数の増加にともなって侵食距離が非線形的に増加していることがわかる。これは侵食が進行するにつれて，その進行速度が増加していることを示しており，波の载荷履歴が極めて重要であることを意味している。また，前述と同様，侵食距離を強度パラメータによって正規化することにより，その侵食現象を定量的に評価可能のようである。なお，このような関係は Sunamura(1983)によっても提案されている。

さらに，波の侵食距離と斜面の安全率との関係を検討してみた。本研究では，模型実験で得られた斜面の崩壊形状が円弧と直線の複合的な形状を示したことから，はじめにそのすべり線に類似する形状を同定し，次いでその形状にもとづいた安定解析法を確立した。

図-10は，模型実験で得られたすべり線の形状と図-6に示す L/D 値にもとづいて算出した対数ら線形状を比較して示したものである。図から明らかなように，対数ら線形状は模型実験で得られたすべり線の形状を比較的良く表現している。このように，対数ら線形状のすべり線への適用は，波の侵食作用によって生じるノッチの進行にともなう斜面崩壊の推定に有用であると指摘できる。このことから，以下に示す斜面安定解析では，すべり線の形状に対数ら線の形状を採用した。

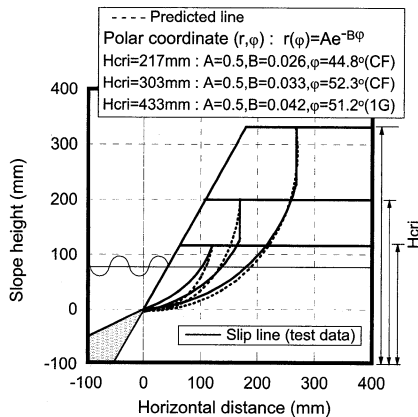


図-10 実測すべり線と推定すべり線の関係

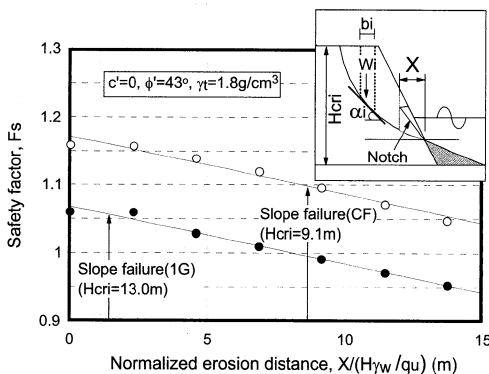


図-11 侵食距離と斜面崩壊に対する安全率の関係

本解析では、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、安全率 F_s を算出している（図-11 挿入図参照）。すなわち、 F_s は以下のように表わされる。

$$F_s = \frac{F_R}{F_D} = \frac{W_i \cos \alpha_i \tan \phi' + c' \left(\frac{b_i}{\cos \alpha_i} \right)}{W_i \sin \alpha_i} \quad (2)$$

ここで、 F_R ：すべり面上で発揮できるせん断力、 F_D ：すべり土塊の滑動を抑制するためのせん断力、 b_i ：スライスの幅、 α_i ：スライス底面と水平面との角度、 W_i ：スライスの自重、 c' ：土の粘着力、 ϕ' ：土の内部摩擦角である。また、ノッチの進行（侵食距離の増加）による安全率の変化は、ノッチが進行した領域のスライス土塊（挿入図に示す斜線領域）を取り除くことによって考慮されている。

図-11は、本模型試験で想定した実物斜面（斜面の限界高 $H_{cri}=13.0\text{m}$ ）と遠心力載荷試験で想定した実物斜面（斜面の限界高 $H_{cri}=9.1\text{m}$ ）の安定解析結果を示したものである。本研究では、 $c'=0$ 、 $\phi'=43^\circ$ 、 $\gamma_t=1.80\text{g/cm}^3$

として解析している。図より、侵食距離の増加にともなって安全率が低下していることが明らかである。また、両模型実験の崩壊点（図中の矢印）における F_s は1.05～1.1を示しており、極限平衡を考えた場合には解析値は模型実験の結果を比較的良く表現している。

以上のことから、波の侵食作用を受ける斜面では、斜面強度、波高および波の作用回数によって、その崩壊と侵食の進行度合を定量的に評価できること、さらに本解析のように侵食距離を考慮することによって、より合理的に斜面の安定性を評価できることが示唆された。

5. 結論

一連の要素試験結果および造波模型試験結果より、次のような結論が得られた。

- (1) 北海道東部の海岸斜面よりサンプリングした不攪乱試料の力学特性は、比較的密な砂の強度－変形挙動を示し、強い構造異方性を示す。
- (2) 波の侵食作用による斜面崩壊は、液状化現象ではなく、ノッチの形成後、すべりの発達によって、引き起こされる可能性がある。また、その崩壊は斜面強度、波高および波の作用回数に影響を受ける。
- (3) 波の侵食による侵食距離を考慮した斜面安定の簡易解析法は、1g場ならびに遠心力載荷場の模型実験結果を良く表現する。それゆえ、波の侵食作用にともなう斜面の安定性を評価する上では本解析のような手法は有用である。

参考文献

- 川村志麻・M. C. R. Davies, P. Dong and X. Wu (2006)：海岸侵食による Soft cliffs の斜面崩壊に関する検討，海岸工学論文集，第53巻，pp.891-895。
- 地盤工学会（2000）：土質試験の方法と解説。
- 西隆一郎・N. C. Kraus. (1996)：砂丘侵食機構とモデル化について，海岸工学論文集，第43巻，pp. 676-680。
- Chapman, J.A., T.B. Edil. and D.M. Mickelson. (2002)：Interpretation of probabilistic slope analyses for shoreline bluffs, Solutions to Coastal Disaster '02', ASCE, pp. 640-651。
- Dean, G. D. and R. A. Dalrymple. (1991)：Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific, pp. 170-186。
- Hodgson, R. L. P., P. Grainger. and P. G. Kalaugher. (1996)：Progressive weathering and degradation of mudstone in coastal landslide, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 29, pp. 57-64。
- Hutchinson, J. N. (1969)：A reconsolidation of the coastal landslides at Folkestone Warren, Kent, Geotechnique, Vol.9, No.1, pp. 6-38。
- Kamphuis, J.W. (1987)：Recession ratio of glacial till bluffs, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.113, No.1, pp. 60-73。
- Miura, S. and S. Toki. (1984)：Anisotropy in mechanical properties and its simulation of sands sampled from natural deposits, Soils and Foundations, Vol.24, No.3, pp.69-84。
- Sunamura, T. (1983)：Process of sea cliff and platform erosion, In Handbook of Coastal Processes, edited by P. D. Komar, pp. 233-265。
- Taylor, D. W. (1937)：Stability of earth slope, J. Boston Soc. Civil Engers. 24, pp.197-246。