

海岸侵食による Soft cliffs の斜面崩壊に関する検討

川村志麻¹・Michael, C.R.Davies²
Ping, Dong³・Xingzheng, Wu⁴

Cliffs 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。特に, 英国やアメリカ, カナダに分布する氷成堆積土からなる cliffs では, 波の侵食により slumping や landslip が生じており, 重要課題として取り沙汰されている。本研究では, 遠心力荷装置を駆使し, 短期安定問題における Soft cliffs の侵食に起因する斜面崩壊の可能性を検討している。得られた結果から, cliff 強度と波浪特性を考慮することによって, 波の侵食による斜面崩壊に対する安定性評価法が提案可能である, などの事実が示されている。

1. はじめに

全海岸域の 80% を占めると言われている cliffs 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 (例えば, Hutchinson, 1969; Sunamura, 1983; Hodgson ら, 1996)。特に, 英国やアメリカ, カナダに分布する氷成堆積土からなる cliffs では, 波の侵食による slumping や landslip が生じており, 重要課題として取り沙汰されている。一方, 我が国においても, 例えば, 北海道忠類地区, 国道 335 号付近の cliffs において, 海岸侵食に起因したと考えられる slumping が発生しており, その防止策が望まれている。

このような cliffs は, その強度から “Hard cliffs” と “Soft cliffs” に大別されるようであり, 主に, 上述のような cliffs は, Soft cliffs と呼ばれている (Dangaard・Dong, 2004)。

今後, 地球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 (Bray・Hooke, 1997) を考慮すれば, この問題はさらに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, 力学的相似条件を満足しうる遠心力荷装置を駆使し, 短期安定問題における Soft cliffs の海岸侵食に起因する斜面崩壊の可能性を検討した。特に, cliff 強度と波浪条件が斜面崩壊に及ぼす影響を明らかにし, 斜面崩壊に対する安定性評価のための基礎資料を収集している。

2. 侵食現象に関する相似則

Kamphuis (1996) は, 侵食現象をモデルで再現する場合, 初期の力学挙動を正確に表現することが必要であると, 次の基本物理量が重要なパラメータになると述べている。

$$A = f(\rho, \mu, g, D, v^*, \rho_s, a_B) \dots\dots\dots (1)$$

ここで, ρ : 流体の密度, μ : 動粘性係数, g : 重力加速度, D : 土粒子径, v^* : 海底部におけるせん断流速, ρ_s : 土粒子密度, a_B : 海底部での波の軌道振幅。

Dong ら (2001) は, Kamphuis (1996) の結果に基づいて, 新たに相対落下速度に基づいた相似則を導いている。その中で, 実物と同等の土粒子径を用いることの難しさを指摘する一方, 侵食領域では乱流であることが多いとの事実から土粒子の輸送・堆積現象に重点を置くという条件であれば, 制約条件はあるものの (土粒子径が 0.14 mm 以下), この問題における相似則を満たすことが可能であることを示している。

また, 遠心力場における波浪伝播の相似則は Sekiguchi ら (1998), 馬場ら (2002) により, 以下のように提案されている。

$$\omega_m^2 = Ng\kappa_m \tanh(\kappa_m h_m) \dots\dots\dots (2)$$

ここで, 縮尺は $1/N$, g は重力加速度, ω は振動数, κ は波数 ($=2\pi/L$, L は波長), h は水深, 添字 m は模型を示す。それゆえ, 実物と模型との間には以下のような関係が導かれる。

$$\omega_m = \omega_p \sqrt{N(\kappa_m/\kappa_p)} = N\omega_p \dots\dots\dots (3)$$

ここで, 添字 p は実物を示す。すなわち, この関係を満たすことにより, 遠心力場における波浪伝播を再現することになる。さらに, Sassa ら (1999) は海底地盤の液状化現象のように, 部分排水条件下における飽和砂の間隙水圧の蓄積が問題となるような場合では, 流体の粘性を考慮することにより, 波浪伝播と地盤の圧密現象に関する時間的相似則の双方を満足することができるとして, 粘性スケーリングを提案している。

本研究では, 波による侵食現象ならびに流体中の土粒子の輸送・堆積現象を把握することに重点を置いていることから, Dong ら (2001) が提案した相似則を適用した。また, 後述する cliff 強度が, 液状化現象を起こさないと

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 Ph.D University of Dundee Professor
3 Ph.D University of Dundee Lecturer
4 Ph.D University of Dundee Research fellow

表-1 本研究における相似則

Acceleration	N
Length	1/N
Normalized relative density	1
Flow velocity	1
Fall velocity	1
Viscosity	1
Particle size	1
Time	1/N

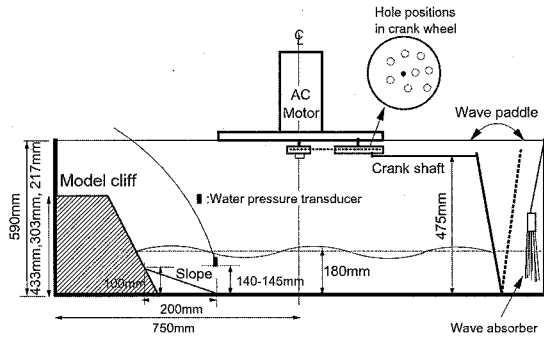


図-1 用いた造波水槽装置

される強度(一軸圧縮強度 q_u が 50~100 kN/m²以上; 沿岸開発技術研究センター, 1993)をほぼ満足していること, 予備実験においても液状化現象の兆候が全く認められなかったことから, 本研究では流体の粘性の影響を考慮せずに模型実験を行っている. 用いた相似則を表-1に示す.

3. 試験装置及び試験方法

(1) 試験装置

用いた装置は, 英国 Dundee 大学が所有するビーム型遠心力載荷装置である. 有効回転半径 3.5 m, 150 g まで載荷可能となっている.

本研究では, 波を再現するために, Flap 型正弦波造波装置を用いている. 造波水槽の内寸法は長さ 1,500 mm, 高さ 590 mm, 奥行き 300 mm であり, Sekiguchi ら (1998) が開発した造波装置と同様の造波機構を有している. 波浪周波数は 0.05 から 12.5 Hz まで段階的に可変可能であり, クランク・シャフトの長さを調節することにより, 任意の波高が設定できるようになっている (図-1 参照).

図-2 は, 一例として, 遠心力載荷 30g の下, 水深 $h=0.18$ m の条件で行った造波試験結果と Wave-marker theory (Dean・Dalrymle, 1991) から算出した結果を比較して示したものである. 図より, 多少のバラつきは存在するものの, 実験値は理論値と対応するようである. この値を基準として, 一連の模型実験を行っている.

(2) 模型斜面の作製法と試験方法

Kamphuis (1987) と Chapman ら (2002) は氷成堆積物

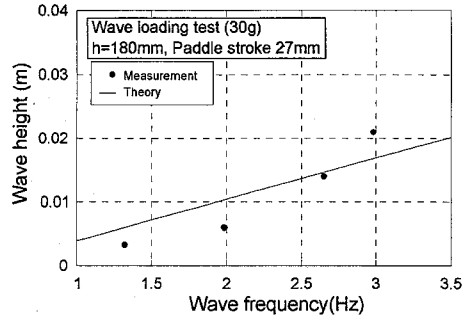


図-2 実験と理論における波高と波の周波数との関係

から主に構成される cliffs のせん断強度を調べており, それらの研究結果に基づくと, 五大湖の Erie 湖周辺ではベーンせん断強度は約 60 kPa (Kamphuis, 1987), Michigan 湖周辺では平均で内部摩擦角 $\phi'=29.3\sim31.2^\circ$, 粘着力 $c'=2.4\sim28.4$ kN/m² である (Chapman ら, 2002) ことを示している. また, その斜面勾配は 30° から 50° であり, ある場所では 70° 以上にもなるところが存在することを報告している (Chapman ら, 2002).

本研究では, 崩壊の支配的要因である強度の一致を優先し, 斜面を作製している. Sunamura (1983) と Kamphuis (1987) は, 侵食現象では流体中の粒状体の存在が重要であることを指摘していることから, ここではシリカ砂 (平均粒径 $D_{50}=0.13$ mm, 土粒子密度 $\rho_s=2.65$ g/cm³, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.78$ g/cm³, 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.39$ g/cm³) と早強ポルトランドセメントの混合試料を用いている.

模型斜面は, セメントと砂の質量比(セメント/砂)が 0.5%, 1.0%, 2.0% にした混合試料を単位体積質量 1.75 g/cm³ \pm 2.5% になるように均一に締固め, 傾斜角が 60° になるように作製している. なお, この場合の砂の相対密度は 85% 以上になる. 図-3 は, 3 種類の試料 (0.5%, 1.0%, 2.0%) の一軸圧縮試験結果を養生時間と一軸圧縮強度 q_u との関係で示している. 図より, 48 時間経過後の q_u はほぼ一定になり, 40 kN/m² ~ 83 kN/m² の範囲にあることがわかる. 図示は省略するが, 圧密排水三軸圧縮試験結果より, 粘着力 $c'=5\sim24$ kN/m², 内部摩擦角 $\phi'=31.5^\circ\sim33^\circ$ が得られている. このことから, 前述の cliff 強度とほぼ同等の値を示していることがわかる. それゆえ, 本試験ではこれらの配合比を採用している. 以下, それぞれの試料を Case1 (0.5%, $q_u=40$ kN/m²), Case2 (1.0%, $q_u=60$ kN/m²), Case3 (2.0%, $q_u=83$ kN/m²) と称する.

さらに, 斜面高が崩壊に及ぼす影響を取り除くために, 限界高さ H_c を採用している. 図-4 は Taylor の安定図表に基づいて算出した限界高さ H_c と配合比との関係を示したものである. 図中の N_s は安定係数, γ_t は土の単位体

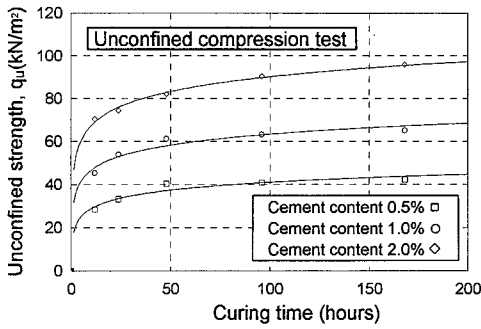


図-3 用いた試料の一軸圧縮強度と養生時間との関係

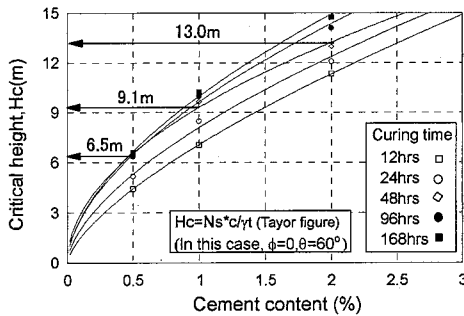


図-4 一軸圧縮試験結果から算出した斜面の限界高さ

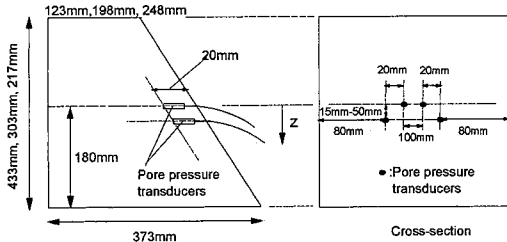


図-5 斜面形状と間隙水圧計の設置位置

表-2 本研究における試験条件

Centrifuge test condition (under 30g) (Model scale)	
Cliff angle	60°
Cliff height	433 mm, 303 mm, 217 mm
Cement content	0.5%, 1.0%, 2.0%
Wave height*(at peak)	19 mm, 17 mm, 15 mm
Wave length (Wave frequency) *	2.11 m (3.3 Hz), 2.25 m (3.1 Hz), 2.52 m (2.8 Hz)
Water depth	0.18 m

*stand for the desired value based on Wave maker theory

積重量, c は土の粘着力であり, ここでは非排水せん断強さ ($=q_u/2$) とした. 48 時間後の q_u 値に基づく, 斜面高は 6.5 m (217 mm), 9.1 m (303 mm), 13.0 m (433 mm) となる. なお, 括弧の値は縮尺 1/30 の時の値である.

本実験では, 縮尺を 1/30, 水深を $h=180$ mm (実スケール値: $h=5.4$ m), 波浪周期を 0.1 Hz (30 g 下では 3 Hz) として考え, その値を基準にしている. また, 斜面

前面には前浜をシミュレートするために, スロープを設置している (図-1 参照). 斜面崩壊は天端まですべり線が発達したものをすべり破壊と定義し, すべり崩壊が生じるまで, または 5 時間, 載荷実験を実施している. 本試験で用いた試験条件を表-2 に示す. ここで, 波高と周期は本試験の目的が規則的な波による斜面の崩壊現象の追跡にあることから, 本装置において, より規則的な波が造波できる範囲内で任意に決定されている. また, 図-1 に示す位置に設置した水圧計の値から斜面前面での波高に換算し, 表記している. 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 個の間隙水圧計及びデジタルカメラと CCD カメラを用いて, それらの挙動を追跡している. 図-5 に間隙水圧計の設置位置を示す.

4. 試験結果と考察

(1) 模型斜面における侵食・崩壊現象

写真-1 は, 波高 $H=16$ mm (実スケール値: $H=48$ cm) 時の Case2 ($q_u=60$ kN/m²) の斜面の変形状況を示している. これより, ノッチの形成後, 斜面崩壊が生じていることが明らかである. さらに, その後の侵食によって斜面はさらに急勾配になるものの, 顕著な変形挙動は認められず, その挙動は定常状態に移行するようである. 西ら (1996) は, 砂丘侵食について侵食パターンとその機構を調査している. 本試験で得られた結果は, 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. 図示は省略しているが, Case1 ($q_u=40$ kN/m²) においても破壊形態は同様であった. このことより, このような cliffs では, 外力及び斜面の強度条件によって, 急激に侵食・崩壊の起こる可能性があることが示唆される.

図-6 は, すべり破壊直前における斜面内の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_{vo}$ の経時変化を示したものである. 図中の z は水面からの深さを示し, Δu は過剰間隙水圧, σ'_{vo} 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ことがわかる. しかしながら, その値は最大で 0.05 (Case2) ~0.2 (Case1) 程度であった. このことから, cliff 強度の違いによって過剰間隙水圧の上昇量は変化するものの, 本質的に液状化のような過剰間隙水圧の蓄積はなく, 侵食量の増加が主たる斜面崩壊の誘因である可能性が高いことが伺える.

一方, 図示は省略するが, Case3 ($q_u=83$ kN/m²) では, ノッチの形成は確認されたものの, すべり崩壊までには至らなかった. このことは, 波浪条件 (波力と載荷時間) と cliff 強度の違いによって, すべり崩壊を誘発する場合と崩壊しない場合との境界が存在することを示すものである. 以下では, この点と侵食崩壊の特徴について, さらに考察を行った.

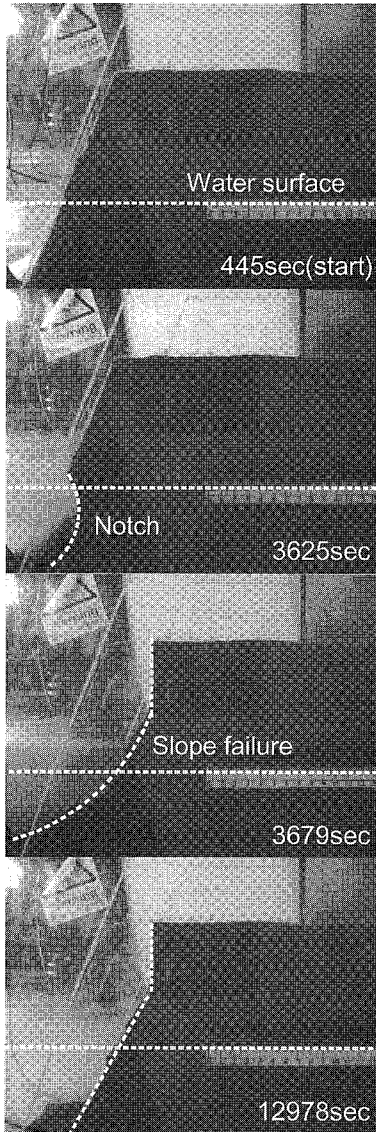


写真-1 波の浸食に起因する斜面すべり破壊の状況

(2) 侵食・崩壊現象の特徴と安定性評価

はじめに、試験後の侵食・崩壊現象の特徴を述べる。

写真-2は Case2 の試験終了後の代表的な斜面形状である。写真には、試験後に計測された斜面土塊の崩落角 α と堆積角 β を示している。写真より、崩壊後では斜面勾配がさらに急勾配になっていることがわかる。

図-7は、Case2における土塊の崩落角 α 、堆積角 β 及び斜面先からの水平距離と波高との関係(実物スケール)を示している。図中には、斜面を半無限斜面と仮定した場合の安定解析に基づいて算出した斜面傾斜(堆積)角もプロットしている。用いた式は以下の通りである。

$$F_s = \frac{\tan \phi'}{\tan \beta} \left[1 - \frac{h\gamma_w}{\gamma_{t2} \cos^2 \beta} \right] \dots\dots\dots (4)$$

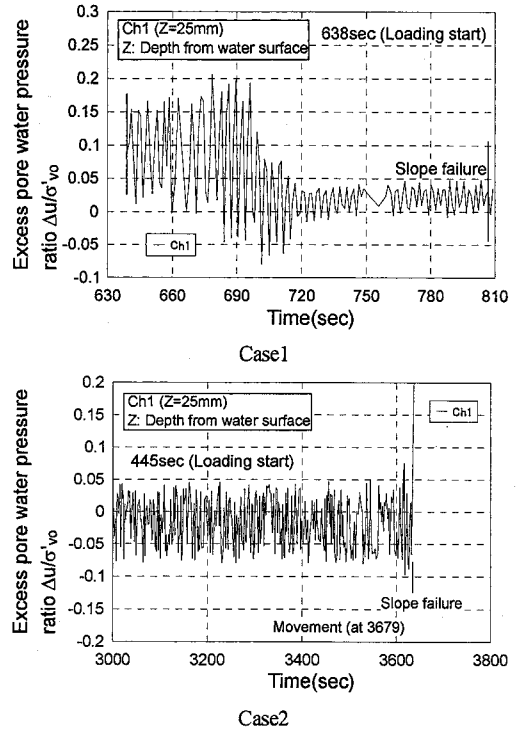


図-6 斜面内の過剰間隙水圧比の経時変化

ここで、 β は斜面の傾斜(堆積)角、 ϕ' は内部摩擦角 ($\phi'=31.5^\circ$)、安全率 F_s は飽和試料の流動時を考へ $F_s=1$ とし、 γ_t は土の水中単位堆積重量、 h は水深、 z は土層厚で、ここでは $h=z$ とした。

図より、cliff強度および波高の違いに関わらず、斜面土塊の崩落角 α と堆積角 β は、ほぼ一定値を示していることがわかる。例えば、平均で α は 32.5° 、 β は 16.3° であった。同様に、水平距離も波高に依存していないことがわかる。解析値との比較では、実験値は解析値と比較的良好に対応していることがわかる。このことは、試験結果は土粒子の輸送・堆積現象を良く表現していることを示すものである。なお、このことは Case1 においても同様であった。

図-8は、斜面崩壊に至るまでの波の載荷回数 N_c と波高を cliff強度で正規化した値 ($H\gamma_w/q_w$ 、 H : 波高、 γ_w : 液体の単位体積重量、 q_w : 一軸圧縮強さ) との関係によって整理したものである。図中には、Case3のノッチ形成時のデータも併せてプロットしている。図より、多少のバラつきはあるものの、cliff強度の違いに関わらず、一義的な関係が得られていることがわかる。また、Case3の場合は、その線より下方に位置していることがわかる。これは、このラインより下の領域ではノッチの形成はあるものの、すべり破壊まで進行しないことを示すものである。その関係を表すと以下ようになる。

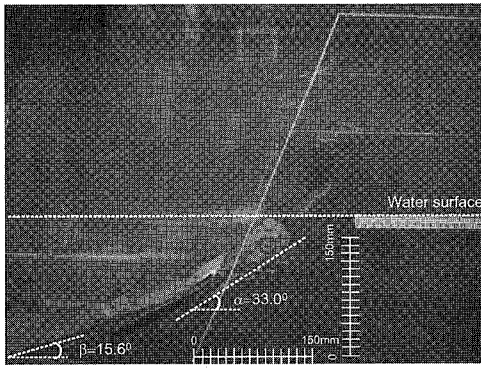


写真-2 実験終了後の斜面形状

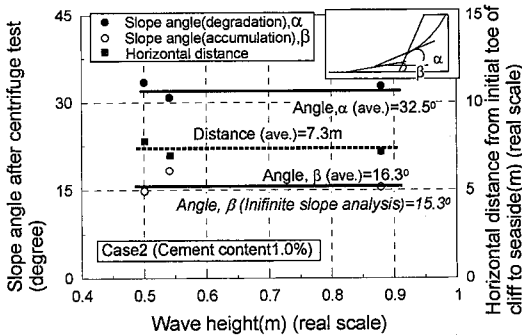


図-7 斜面土塊の崩落角 α , 堆積角 β 及び斜面先からの水平距離と波高との関係

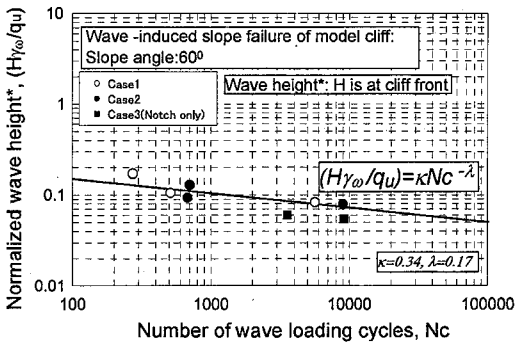


図-8 正規化した波高と波の载荷回数との関係

$$(H\gamma_w/qu) = \kappa \cdot N_c^{-\lambda} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、本試験では $\kappa = 0.34$, $\lambda = 0.17$ となった。

このことから、式 (5) に示すように、cliff 強度と波浪特性を考慮することによって、波の侵食による斜面すべり破壊の安定性評価が可能になると言える。

5. 結 論

海岸侵食及び斜面崩壊現象を明らかにするために、造

波水槽を用いた一連の遠心力载荷実験を実施した。その結果、この種の波浪伝播問題に関する遠心力载荷実験の適用可能性が示唆された。結果を要約すると、次のようになる。

- (1) 遠心力载荷実験は、Soft cliffs 侵食・崩壊現象を比較的良く説明した。
- (2) 本試験の cliff 強度の範囲では、斜面すべり崩壊は液状化現象で引き起こされているのではなく、ノッチの形成後、すべりの発達によって引き起こされた。
- (3) Soft cliffs の斜面安定を評価する上では、波力、载荷回数はそれぞれ1つの重要なパラメータとなる。それらを考慮することにより、侵食による斜面すべり破壊に対する安定性評価が可能になる。

参 考 文 献

(財)沿岸開発技術研究センター(1993)：埋立地の液状化対策ハンドブック, pp. 173-174.

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.

馬場慎太郎・三宅達夫・金夏永・鶴ヶ崎和博(2002)：波・地盤・構造物の新しい実験手法, 海岸工学論文集, 第49巻, pp. 1536-1540.

Bray, M. J. and J.M. Hooke.(1997)：Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise, Journal of Coastal Research, Vol.13, No.2, pp. 453-467.

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.

Damgaard, J.S. and P. Dong.(2004)：Soft cliff recession under oblique waves: Physical model tests, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.130, No.5, pp. 234-242.

Dean, G. D. and R. A. Dalrymple.(1991)：Water wave mechanics for engineers and scientists, World Scientific, pp. 170-186.

Dong, P., T. A. Newson, M. C. R. Davies, and P. A. Davies.(2001)：Scaling laws for centrifuge modelling of soil transport by turbulent fluid flows, International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, Vol.1, pp. 41-45.

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.

Kamphuis, J.W.(1996)：Physical modeling of coastal processes, Advances in coastal and ocean engineering, Vol.2, World Scientific, pp. 79-114.

Sassa, S. and H. Sekiguchi.(1999)：Wave-induced liquefaction of beds of sand in a centrifuge, Geotechnique, Vol.49, No.5, pp. 621-638.

Sekiguchi, H., K. Kita, S. Sassa. and T. Shimamura. (1998)：Generation of Progressive fluid waves in a geo-centrifuge, Geotechnical Testing Journal, ASTM, Vol.21, No.2, pp. 95-101.

Sunamura, T.(1983)：Process of sea cliff and platform erosion. In Handbook of coastal Processes, edited by P. D. Komar, pp. 233-265.