

海底地盤の不安定化に及ぼす流速と水圧変動の相乗効果

Combined Effect of Flow Velocity and Water Pressure Change on Wave-induced Seabed Destabilization

三浦均也¹・森政信吾²・大塚夏彦³・山崎浩之⁴・小浪岳治⁵

Kinya MIURA, Shingo MORIMASA, Natsuhiko OTSUKA
Hiroyuki YAMAZAKI and Takeharu KONAMI

The seabed stability is usually discussed from the viewpoint of scouring in coastal engineering, while it is evaluated from the viewpoint of liquefaction in geotechnical engineering. In fact, both scouring and liquefaction must occur and lead to the seabed destabilization. Moreover their effects can complement each other. The purpose of this study is to analyze the combined effect of flow velocity, which causes scour, and water pressure change, which causes liquefaction, on the wave-induced seabed destabilization. The correlation between water flow velocity and the fluctuation of vertical effective stress in the seabed due to water pressure change is examined in both linear waves and a non-linear wave considering the effect of the nearby structures. It was found that water pressure change enhances the scouring irrespective of wave types.

1. はじめに

台風などによる荒天時において波浪が作用することによって、防波堤や護岸などの沿岸施設や港湾施設に被害が発生する。構造物に直接作用する水圧による衝撃力が主要な要因と考えることができるが、同時に海底地盤が不安定化することによって消波ブロックなどの防護施設や基礎が沈下し、施設の被害が拡大していることが知られている (Zen・Yamazaki, 1991; Okaら, 1995)。一般的に海岸工学分野では、海底面における流速とそれに関連する底質の移動による海底地盤面の変動に着目することにより、海底地盤の「洗掘現象」の枠組みで地盤や施設の不安定化が検討される。一方、地盤工学分野では、海底面に作用する水圧の変動に対する海底地盤のマスとしての応答に着目して、「鉛直有効応力の減少・液状化現象」について検討される。しかし、実際には両者ともに海底地盤の不安定化の要因であり、それらが複合することにより被害が生じていることが予想される。また両者の発生のタイミングが一致すれば、その相乗効果により海底地盤の不安定化が助長されることも考えられる。

本研究の目的は、海底地盤の不安定化に及ぼす「洗掘現象」と「鉛直有効応力の減少・液状化現象」の相乗効果を解析的に検討することである。理想化した等水深海

底の微小振幅波理論による線形数式解析、及び消波ブロックで被覆されたマウンド上に建設された防波堤前面の不整形な海底の非線形数値解析の2つの異なった方法により海底地盤の不安定化現象を定量的に検討する。本論文ではまず、海底面に作用する水圧変動による海底地盤の不安定化のメカニズムと解析法について説明する。次に、線形波として記述する進行波および重複波を取り上げ、微小振幅波理論により海底面における水圧と流速を計算し、海底地盤不安定化への両者の相乗効果を検討する。さらに、本研究で採用した非線形波浪解析の概要を説明し、その解析結果に基づいて相乗効果を検討する。

2. 海底面に作用する水圧変動による海底地盤の鉛直有効応力減少

海底地盤と波浪の相互作用は、力学的には多孔質体と流体の相互作用であり、海底地盤の多孔質体としてのモデル化および定式化が必要である。三浦ら (2004) は海底地盤と波浪の相互作用の解析における海底地盤の定式化、解析次元、動的・静的解析条件の最適化について検討している。その結果、波浪を受ける海底地盤では地震時などに比較すると加速度の影響が小さいので、対象とする海底地盤の深度が波長の10分の1より小さい場合には、u-p Formulationによる一次元擬似動的条件における解析で十分な精度の応答が計算できることを示している。この場合の支配方程式は以下のようである。

$$\begin{aligned} -(\lambda + G) \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} - G \frac{\partial^2 \Delta u_z}{\partial z^2} + \frac{\partial \Delta p}{\partial z} &= 0 \\ -B_f \frac{\partial \Delta u_z}{\partial t \partial z} + B_f \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} - \frac{\partial \Delta p}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (1)$$

- | | | |
|-------|------|-----------------------------|
| 1 正会員 | 工博 | 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 教授 |
| 2 正会員 | 工博 | 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 研究員 |
| 3 正会員 | 工博 | 北日本港湾コンサルタント(株) 技術部長 |
| 4 正会員 | 工博 | (独法) 港湾空港技術研究所地盤構造部 チームリーダー |
| 5 正会員 | 修(工) | 岡三リビック(株) 技術企画室長 |

ここに、 Δu_z は固体相（土粒子）の変位増分ベクトル、 Δp は間隙水圧変動、 G はせん断弾性係数、 λ はLameの定数、 k はDarcyの透水係数、 B_f は気体相と液体相を平均化した流体の体積圧縮係数である。海底地盤の厚さは無限大、海底面（ $z=0$ ）に作用する水圧変動が角振動数 ω で調和振動している（ $\Delta p = p_0 e^{i\omega t}$ ）という境界条件を与えて式（1）を解くと、

$$\Delta p = p_0 [B' + (1-B')e^{-\zeta z}] e^{i\omega t} \quad \dots\dots\dots (2)$$

が得られる。ここに、 B' は一次元変形におけるSkemptonの間隙水圧係数であり、 $B' = B_f / (\lambda + 2G + B_f)$ で定義される。また、 $\zeta = \sqrt{i\omega h_v}$ である。 h_v は飽和度を考慮した圧密係数 c_v の逆数 $h_v = 1 / (c_v B')$ であり、水理圧密係数と呼ぶ。海底地盤内の鉛直有効応力変動 $\Delta \sigma'_z$ 、および鉛直有効応力 σ'_z は以下の式より得られる。

$$\begin{aligned} \Delta \sigma'_z &= p_0 e^{i\omega t} - \Delta p = p_0 [(1-B')(1-e^{-\zeta z})] e^{i\omega t} \\ \sigma'_z &= (\rho_t - \rho_w)gz + \Delta \sigma'_z \end{aligned} \quad (3)$$

水圧変動による海底地盤の不安定化のメカニズムは、海底面に作用する水圧と海底地盤内の過剰間隙水圧の差により生じる上向きの浸透流により、地盤内の鉛直有効応力が減少あるいは失われることである。本研究では、鉛直有効応力が計算上負になること（ $\sigma'_z < 0$ ）を海底地盤不安定化の条件としている。

3. 線形波浪に対する海底地盤の応答

(1) 海底面の流速と水圧変動

海底面の水平流速 u 、および鉛直有効応力 σ'_z の算定に必要な海底面に作用する水圧変動 Δp は、微小振幅波理論により得られる以下の式に基づいて計算した（進行波）。

$$\begin{aligned} u &= \frac{Hg}{2c} \frac{1}{\cosh kh} \cos(kx - \omega t) \\ \Delta p &= \left[\rho_w g \frac{H}{2} \frac{1}{\cosh kh} \right] \cos(kx - \omega t) \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 H は波高、 $T = 2\pi / \omega$ は周期、 L は波長、 $k = 2\pi /$

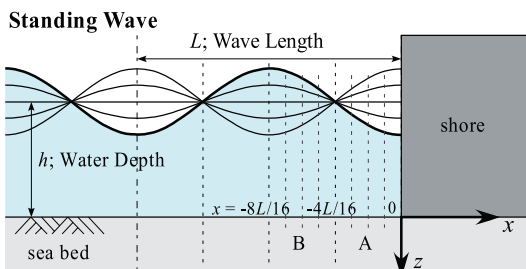
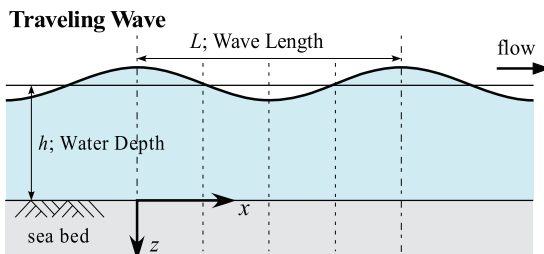


図-1 進行波と重複波

表-1 波浪条件

波高 H	周期 T	水深 h	波長 L	水密度 ρ_w
10m	13s	20m	167.6m	1000kg/m ³

表-2 地盤条件

地盤密度 ρ_t	間隙水圧係数 B'	水理圧密係数 h_v
1900kg/m ³	0.5	2.0s/m ²

L は波数、 h は水深である。 x は波の進行方向を正としている（図-1参照）。重複波の場合、 $x=0$ を反射境界（岸壁）とすると、 u および σ'_z は以下のように表わされる。

$$\begin{aligned} u &= \frac{Hg}{c} \frac{1}{\cosh kh} \cos kx \cos \omega t \\ \Delta p &= \left[\rho_w g \frac{H}{2} \frac{1}{\cosh kh} \cos kx \right] \cos \omega t \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (5)$$

海底地盤の鉛直有効応力変動は、式（4）、（5）で得られる間隙水圧変動の振幅を、式（3）の p_0 に代入するこ

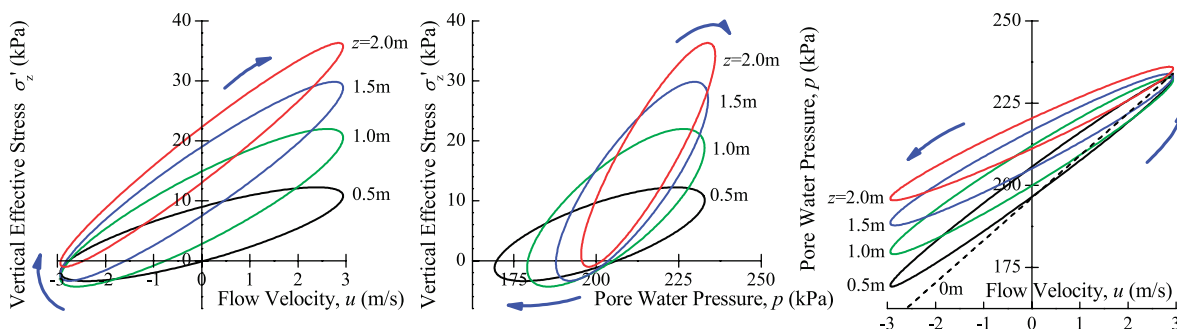


図-2 進行波に対する海底地盤の応答

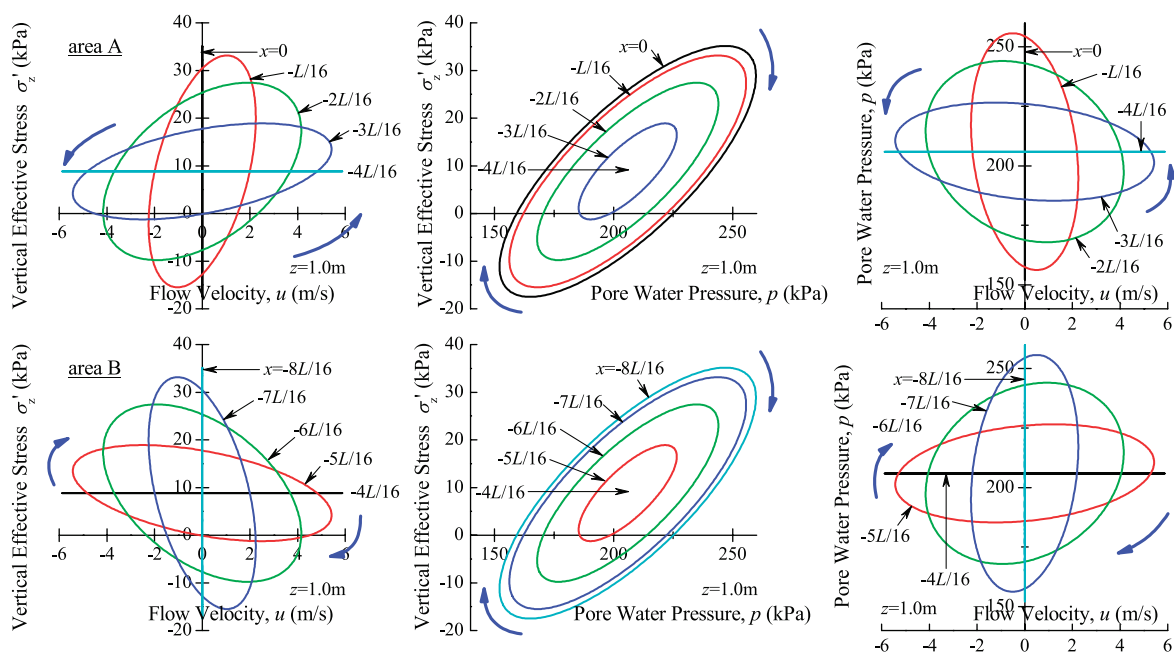


図-3 重複波に対する海底地盤の応答

とによって計算した。

(2) 解析結果

図-2は進行波に対する海底地盤の応答を解析した結果をまとめたもので、海底面の水平流速 u と海底地盤の深さ z における鉛直有効応力 σ'_z 、間隙水圧 p のそれぞれの相関関係を表わしている。解析に使用したパラメータは表-1および表-2に示すとおりである。進行波に対する応答は、位置 x によらず時間 t のみの関数となる。図-2より、流速と鉛直有効応力には正の相関があることから、海底地盤不安定化に対して流速と水圧変動に相乗効果があるといえる。すなわち、鉛直有効応力が完全に失われるタイミングで流速が x の負方向を向くことから、洗掘による土粒子移送は波の進行方向と逆向きに生じ易いことが分かる。

図-3は重複波に対する海底地盤の応答解析の結果を図-2と同様に整理したものである。重複波の場合、時間 t だけでなく、岸壁からの位置 x に応じて流速 u および水圧変動 Δp の振幅と位相が変化する。そのため、岸壁から半波長 $L/2$ の領域を8分割し、各点の深さ $z = 1.0\text{m}$ における応答値をプロットした。 $x = 0, -8L/16$ の地点（波の腹）では水圧変動が最大となるため、それに連動して鉛直有効応力の変動も最大となり、鉛直有効応力の面から見ると最も不安定な地点であるといえる。ただし、流速は $u = 0$ であるため流速の影響を受けにくい。一方、 $x = -4L/16$ の地点（波の節）では流速の振幅は最大になるが水圧が変動しないため、海底地盤の鉛直有効応力変動は小さい。しかし、それ以外の地点では、 $-4L/16 < x < 0$ （領域A）に

おいて流速と鉛直有効応力に正の相関、 $-8L/16 < x < -4L/16$ （領域B）において負の相関が見られる。したがって、重複波の場合、波の腹においては水圧変動による鉛直有効応力の減少が、波の節においては流速による洗掘が、またその間では両者が海底地盤不安定化の要因となり、場所によって不安定化メカニズムが異なることが分かる。

洗掘による土粒子移送は、鉛直有効応力の減少と流速の関係から、領域Aでは x 軸負方向（沖向き）、領域Bでは x 軸正方向（岸向き）に生じやすく、結果的に波の節にあたる地点に土粒子が移送され堆積しやすいことが分かる。台風など荒天時の波浪は波長 L が比較的大きいため、防波堤やそのマウンドの領域は図-1の領域Aに入るものと考えられる。被害の生じやすいマウンド法先部分は領域Aの中央付近にあたるため、その付近の土粒子は、実際には海底地盤の地形や消波ブロックの影響も考慮しなければならないが、水圧変動と流速の相乗効果により沖向きに移送されやすいことが示唆されている。

4. 非線形波浪に対する海底地盤の応答

(1) 数値波動水路による非線形波浪解析

図-4に解析対象とした防波堤の断面図を示す。この防波堤を図-5に示すようにモデル化し、解析ソフト数値波動水路CADMAS-SURF（Super Roller Flume for Computer Aided Design of Maritime Structure）を用いて非線形波浪解析を行った。数値波動水路は構造物周囲の複雑な流れの場を解くために開発されたもので、これまでは困難で

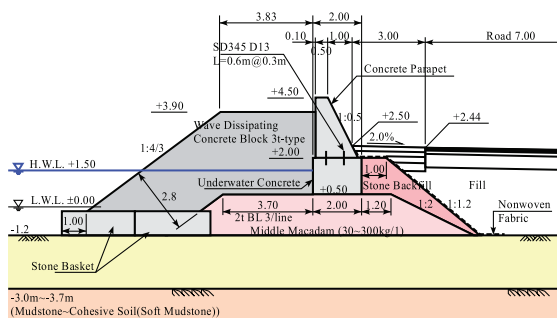


図-4 北海道厚岸漁港護岸断面図

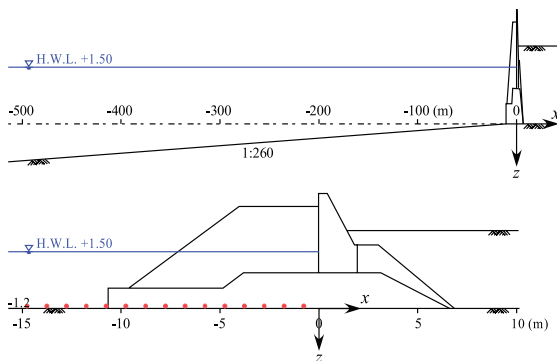


図-5 計算モデル

表-3 計算要素の諸元

要素	構造	空隙率	代表径
堤体, 埋土	不透過	—	—
マウンド, 石かご, 裏込石	透過	0.5	0.33m
消波ブロック	透過	0.5	1.14m

表-4 波浪条件

波向	有義波高	周期	潮位H.W.L.
SSE	2.3m	13.8s	+1.5m

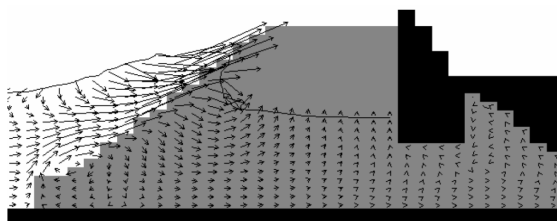


図-6 防波堤周辺における波浪の解析結果

あった消波ブロックやマウンド内の流速を計算することが可能となっている(沿岸開発技術研究センター(2002)参照)。モデル化においては各要素を表-3に示す諸元としており, x 方向0.5m, z 方向0.25mのメッシュに分割している。波浪条件は, 設計対象波である波向SSEの30年確率波として, 有義波高に相当する規則波を堤体法線直

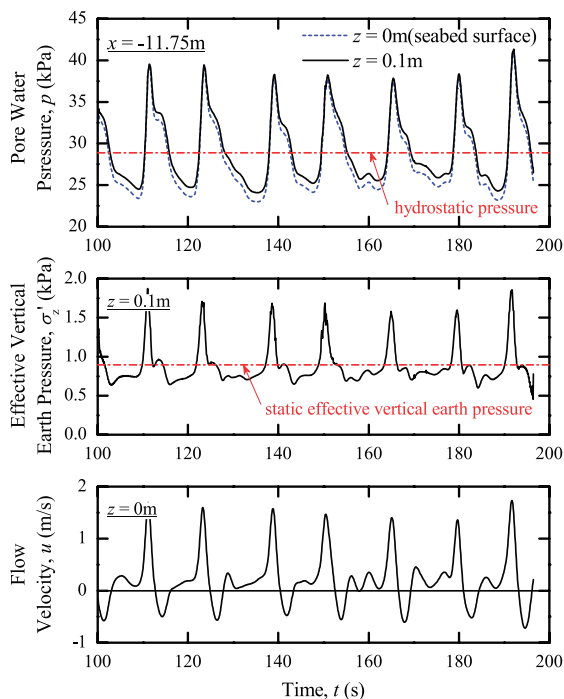


図-7 防波堤法先付近の海底地盤の応答

角方向から入射させた。堤体位置での波浪条件は表-4の通りである。非線形波浪の解析結果を図-6に示す。

海底地盤の時刻歴応答は, 数値波動水路による解析で得られた海底面における水圧の時刻歴をフーリエ変換し, 式(2)により各周波数成分に対して間隙水圧変動の厳密解を求め, それらをフーリエ逆変換することにより求めた。

(2) 解析結果

図-7に, 防波堤法先付近 ($x = -11.75\text{m}$) における深さ $z = 0.1\text{m}$ での間隙水圧 p と鉛直有効応力 σ'_v , および海底面での水平流速 u の時刻歴を示す。海底面に作用する水圧が減少して再び増加するまでの間に鉛直有効応力が減少し, 静的な鉛直有効応力を下回っていることが分かる。ただし, 鉛直有効応力が完全に失われるまでには至っていない。本研究で解析対象とした防波堤は比較的なだらかな海底面の上に造られており水深も小さいため, 波高が小さく抑えられ, その結果水圧変動および鉛直有効応力変動も小さくなったと考えられる。このケースでは, 鉛直有効応力が完全に失われなくても有効応力の変動が生じ, 鉛直有効応力の低下が比較的に長い継続時間で生じている。このタイミングでは冲向の流れが発生する傾向にあるので, 水圧変動は洗掘を助長する方向にある可能性がある。

図-8は, 図-7の時刻歴のうち最後の3波分について, 水平流速 u , 鉛直有効応力 σ'_v , 間隙水圧 p の相関関係をプロ

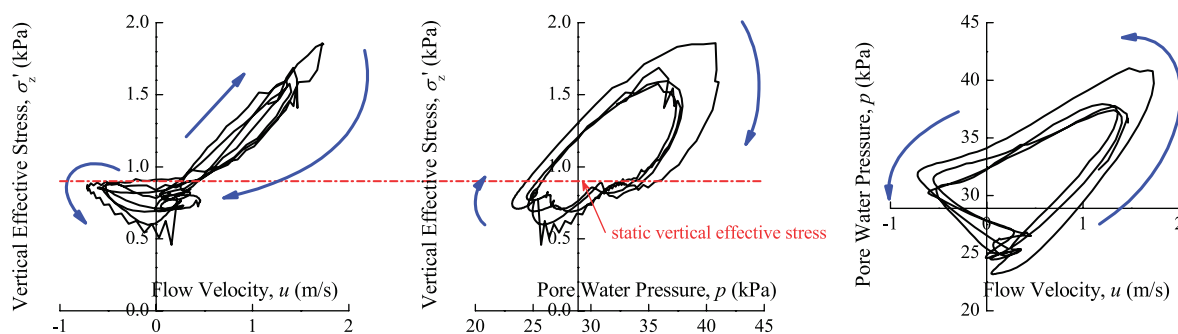


図-8 流速，鉛直有効応力，水圧の相関関係

ットしたものである．図-3の領域A ($x = -L/16$)における応答と比較すると，海底地盤の形状や消波ブロックの影響が表れ，それぞれの関係曲線の動き方や傾向が異なっている．しかし，水平流速 u と鉛直有効応力 σ'_z には正の相関が見られ，鉛直有効応力が低下しているときに x 軸負方向（冲向き）の流速が最大になっている．したがって，非線形波浪に対する海底地盤の不安定化においても水圧変動と流速の相乗効果があるといえる．水深が大きく，より波高の大きい波浪が襲来する場合には，鉛直有効応力変動および流速が共に大きくなるため，水圧変動と流速の相乗効果がより顕著になると想像できる．

5. おわりに

本研究では，海底地盤不安定化に及ぼす流速と水圧変動の相乗効果を検討した．その結果，線形波浪および非線形波浪のいずれの波浪条件においても，両者の相乗効果が認められた．以下にその要点をまとめる．

- ー 進行波の波浪場では，いずれの地点においても海底地盤の鉛直有効応力が失われるタイミングで流速が波浪の進行方向と逆向きに最大値をとる．そのため，海底地盤の土粒子が波浪の進行方向と逆向きに移送される．
- ー 防波堤付近の重複波の波浪場では，波の腹では水圧変動による鉛直有効応力の減少が，波の節では流速による洗掘が，またその間では両者が海底地盤不安定化の要因となる．また，防波堤やマウンドの法先付近の海底地盤の土粒子移送は，流速と水圧変動の相乗効果により冲向きに生じやすい．
- ー 海底面の傾斜や消波ブロックの影響を考慮した非線形波浪場では，解析対象とした防波堤のマウンド法先付近において，海底地盤の鉛直有効が減少しているタイミングで冲向きの流速がピークとなる．流速のピーク値としては岸向きの方が大きい，水圧変動による鉛

直有効応力の減少との相乗効果を考慮すれば，海底地盤の土粒子が冲向きに移送されやすいといえる．

海底地盤の不安定化と防波堤などの構造物の被災の原因は，これまでほとんど海底面の流速による洗掘という面からしか検討されてこなかった．しかし，本研究の結果からも明らかなように，海底面の水圧変動による海底地盤の鉛直有効応力減少・喪失も海底地盤の不安定化に寄与し，また流速に起因する洗掘現象を助長している．海底面の地形や消波ブロックの有無，波浪条件により，流速による洗掘が主要因となるか水圧変動による鉛直有効応力の減少が主要因となるかは変わってくるだろうが，海底地盤の不安定化，およびその対策について検討する際には両方の見地から検討し，またその相乗効果を考慮することによって妥当な定量的評価が可能になると言える．

この研究は，鉄道・運輸機構「運輸分野における基礎的研究推進制度」によるものである．

参考文献

- (財)沿岸開発技術研究センター (2002)：海域施設の耐波設計に適用できる数値波動水路 (CADMAS-SURF) の研究・開発とその将来展望，土木学会論文集II, Vol.705, No.II-59, pp. 1-17.
- 土木学会 (1994)：海岸波動，pp. 430-503.
- 三浦均也・浅原信吾・大塚夏彦・上野勝利 (2004)：波浪に対する海底地盤応答の連成解析のための地盤の定式化，第49回地盤工学シンポジウム，pp. 233-240.
- Oka, F., A. Yashima, K. Miura, S. Ohmaki and A. Kamata (1995)：Settlement of Breakwater on Submarine Soil due to Wave-Induced Liquefaction, 5th International Symposium on Offshore and Polar Engineering Conference, Vol.2, pp.237-242.
- Zen, K. and H. Yamazaki (1991)：Field Observation and Analysis of Wave-induced Liquefaction in Seabed, Soils and Foundations, Vol.31, No.4, pp.161-179.