

透水性コラムを用いた波浪に対する海底地盤の 安定化工法の有限要素法による検討

FEM Analysis of Seabed Stabilization against Sea Wave Loading with Permeable Columns

浅原信吾¹・三浦均也²・大塚夏彦³・田中隼矢⁴

Shingo ASAHARA, Kinya MIURA, Natsuhiko OTSUKA and Junya TANAKA

The purpose of the study is to propose a stabilization method for seabed subjected to sea wave loading through a series of FEM analyses. The suppression of the wave load is one of the most effective measures to stabilize the seabed, and breakwaters are often applied to reduce the wave impact. Our proposal for the stabilization is the suppression not of the water pressure itself, but of seepage force in the seabed. The seepage force is a kind of body force induced by the gradient of potential water head in the seabed. Thus the unification of potential water head must be effective for the stabilization of seabed. In the method proposed in this paper, the permeable columns are installed in seabed to propagate the water pressure applied to the seabed surface into the seabed. The efficiency of the method proposed was examined by means of 3-D FEM analysis.

1. はじめに

台風などによる荒天時に沿岸・海洋域において防波堤や護岸などの種々の構造物が被害を受ける。波浪によって生じる過大な水圧が構造物に作用することが構造物に損傷を与える直接的な原因となっている。波浪による水圧の変動は防波堤の外洋側面に直接作用するため、その合力の変動外力が構造物の不安定化においては最も重要な要素であろう。同時に、変動水圧は構造物のみならず海底地盤にも作用する。これにより海底地盤が不安定化すると、構造物に対する基礎地盤の耐力が低下して構造物の機能が著しく損なわれる事例も少なくない(善ら(1986), 岡ら(1994))。海岸工学分野では海水の流速に応じて海底の地盤材料が浮遊あるいは移動することに着目した「海底地盤の洗掘現象」として防波堤の被災のメカニズムが検討されている。しかし、これまでに明らかになっている被災例においては、波浪による海底地盤の不安定化が海底面下数メートル程度にまで及んでいる例も少なくなく、地盤工学的見地から海底地盤を深さを有する三次元連続体として扱い、海底地盤表面における水圧変動への地盤の応答を評価する必要があることがYamamoto(1977)やOkusa(1985)などによって示されてきた。

このような海底地盤の不安定化現象のメカニズムは、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有効応力が減少あるいは失われることである。海底地盤を安定化す

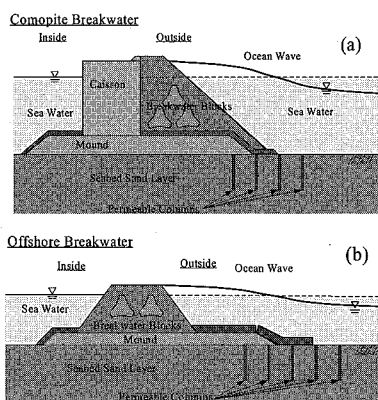


図-1 透水性コラム工法の適用例 (a)混成防波堤, (b)離岸堤

るために「消波ブロック等によって波浪外力を抑制すること」「礫材のように透水性の良い材料を海底面に上載することによって地盤を拘束すること」の2つの方策が一般には取られている。これに対して本研究では、透水性の良い複数のコラムを海底地盤中に挿入する海底地盤安定化工法を提案する(図-1)。この工法では、海底地盤表面の水圧を積極的に地盤内へ導くことにより地盤内の過剰間隙水圧を均一化して上向き動水勾配および浸透力を抑制し、結果として地盤内の有効応力の変動を減少させて海底地盤を安定化する。この研究の目的は透水性コラムを用いた波浪を受ける海底地盤の安定化工法を提案するとともに、固体相(土粒子)と流体相(間隙流体)の相互作用を考慮した海底地盤の3次元有限要素解析により透水性コラムの効果を検討することである。

2. 解析条件

(1) 支配方程式

海底地盤と波浪の相互作用は力学的には多孔質体と流

1 学生会員 修(工) 豊橋技術科学大学 機械・構造システム専攻
2 正会員 工博 豊橋技術科学大学建設工学系 准教授
3 正会員 工博 (株)北日本港湾コンサルタント技術部長
4 学生会員 学(工) 豊橋技術科学大学建設工学専攻

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た。その結果、海洋波浪のような比較的周期の長い作用に対しては地盤を u-p formulation で定式化し、固体相、流体相の加速度を無視した擬似動的な解析を行えば十分な精度で波動荷重の下での相互作用を考慮した挙動の解析が可能であることを示した。また、対象とする海底地盤の深度が波長の数分の 1 程度で小さい場合には、一次元解析で十分な精度の応答が得られることも示した。したがって、この論文では解析において u-p formulation の定式化を採用している。u-p formulation の支配方程式は以下になる。

$$\begin{aligned} \rho_t \Delta \ddot{u}_i &= (D_{ijkl} \Delta u_{k,l})_{,j} - \Delta p_{,i} + \rho_t \Delta b_i \\ (\rho_f B_{fij} S_{ij} \Delta \ddot{u}_i)_{,j} &= B_f \delta_{ij} \Delta \ddot{u}_{i,j} \\ &- (B_f S_{ij} \Delta p_{,i})_{,j} + \Delta p + (\rho_f B_{fij} S_{ij} \Delta b_i)_{,j} \dots \dots \dots (1) \end{aligned}$$

Δu は固体相の変位増分ベクトル、 Δp は間隙水圧増分で上付きのドットは時間に関する微分を表している。 B_f は気体相の体積圧縮係数と液体相の体積圧縮係数を飽和度 S_r の重みで平均化して得られる平均的な間隙流体の体積圧縮係数で、 n は間隙率、 K_f 、 K_l 、 K_g は流体相、液体相、気体相それぞれの体積圧縮係数である。

$$B_f = \frac{K_f}{n}, \quad \frac{1}{K_f} = \frac{1}{K_l} S_r + \frac{1}{K_g} (1 - S_r) \dots \dots \dots (2)$$

土全体の密度および流体相の密度はそれぞれ ρ_t 、 ρ_s である。4 階のテンソル D_{ijkl} は剛性テンソルで、Lame のパラメータ λ 、せん断剛性 G から以下のように表現で

きる。

$$\begin{aligned} D_{ijkl} &= \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + G (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) \\ &= \begin{cases} \lambda + 2G & ; i=j=k=l \\ \lambda & ; i=j \neq k=l \\ G & ; i=k \neq j=l \text{ or } i=l \neq j=k \\ 0 & ; \text{otherwise} \end{cases} \dots \dots \dots (3) \end{aligned}$$

s_{ij} は Darcy の透水性 k_{ij} から、

$$s_{ij} = \frac{k_{ij}}{\rho_w g} \dots \dots \dots (4)$$

(2) 解析メッシュおよびパラメータの設定

図-2(a)には透水性コラムを立て込んだ場合の海底地盤の形状と定義を示している。有限要素法では図-2(a)のように緩い砂地盤に格子状に透水性コラムを配置し、近接する 4 本の透水性コラムに囲まれた領域の 4 分の 1 を解析対象とし、図-2(b)のようにメッシュを作成した。波浪は図-3 のように解析領域の表面に周期的な波が均一に作用しているものとしている。対象とする地盤の物性を表-1 に示し、透水性コラムの物性は仮に代表的な礫の物性に近い値を採用した。作用する波浪は表-2 に示しており、海底面に作用する水圧 p_0 は重複波高から微小振幅波理論により推定している。波高が大きいためこの波は有限振幅性が強くなり、水圧の波形が正弦波形とは異なる可能性があるが、この論文で地盤の応答を検討するためには波形を単純な正弦波で仮定しても充分であると考えた。

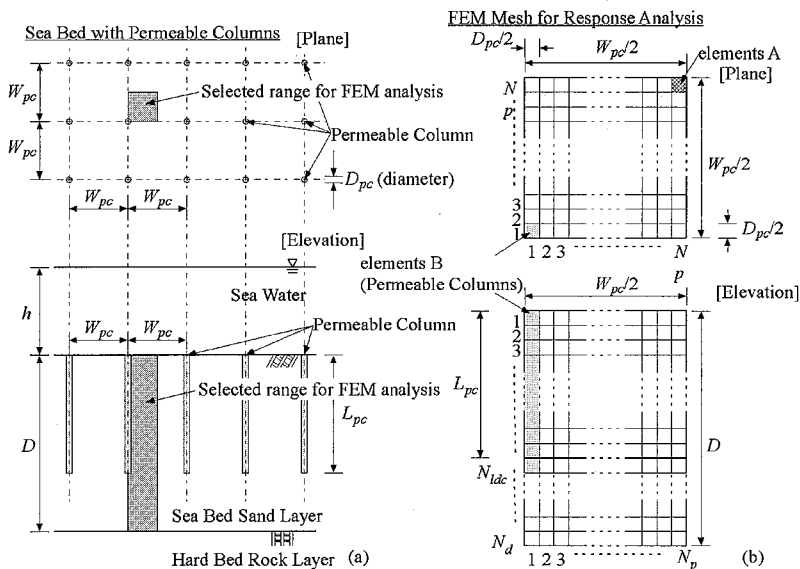


図-2 透水性コラムを設置した水平海底地盤の 3 次元解析
(a) 透水性コラムを配置した海底地盤、(b) FEM メッシュ

表-1 地盤の材料定数

材料定数	緩い砂	礫 (透水性コラム)
ρ_t : 湿潤密度 (kg/m^3)	1.90×10^3	1.75×10^3
ρ_s : 粒子の密度 (kg/m^3)	2.65×10^3	2.36×10^3
n : 間隙率	0.454	0.448
G_s : セン断剛性 (N/m^2)	0.4×10^8	1.0×10^8
ν_s : ボアソン比	0.30	0.30
S_r : 飽和度 (%)	99.30	99.88
k : 透水係数 (m/s)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-2}

表-2 作用する波浪

H : 波高 [進行波] (m)	6.0
H : 波高 [重複波] (m)	12.0
d : 水深 (m)	15.0
L : 波長 (m)	109.1
p_0 : 海底面に作用する圧力 (N/m^2)	40000
T : 波浪の周期 (s)	10.0

3. 計算と検討

(1) 海底地盤の波浪による不安定化のメカニズム

初めに、海底地盤が波浪により不安定化する際の基本的なメカニズムを説明するために、透水性コラムを挿入しない通常の場合において緩い砂、礫からなる海底地盤を設定し、波浪に対するそれらの地盤の応答を計算した。図-4 は海底地表面における水圧振幅で正規化した過剰間隙水圧の鉛直分布を、図-5 は鉛直有効応力の鉛直分布を示していて、分布を8つの変相角に対応してプロッ

トしている。海底地盤の不安定化に動水勾配が影響を及ぼしていることを説明するために、図-6には地表面 $z=0\text{m}$ に作用する水圧と深さ 1.0m における過剰間隙水圧の変相角に対応した変動と深さ 1.25m における鉛直有効応力の変相角に対応した変動を示している ((a) は緩い砂地盤, (b) は礫地盤)。図-5(a) に示す有効応力の挙動から明らかなように、緩い砂地盤では地表面近くに有効応力が負になる現象が見られる。図-4(a) が示すように、緩い砂では過剰間隙水圧の変動には深さ方向で急激な減衰挙動が見られる。図-6(a) が示すように、過剰間隙水圧の伝播には位相差も見られ、地表面での水圧が減少している $3\pi/4$ から $5\pi/4$ を中心に地表面よりも海底地盤内で過剰間隙水圧が大きくなっている。このことにより地盤内には上向き浸透流が発生して3地盤に重力とは逆向きの物体力が生じ、結果として $7\pi/8$ 付近で鉛直有効応力が負になっている。実際の地盤材料は線形弾性体とは異なり負の応力 (引張応力) に抵抗できないので、このとき海底地盤は一体性を失い不安定化する。図-4 から図-6 に示すように、このような海底地盤の波浪による不安定化がすべての海底地盤において必ず生じるわけではなく、礫地盤では見られない現象である。図-6(b) が示しているように礫地盤は透水性が良いため地表面の水圧変動がほとんど減衰せずに地盤に伝達されている。これによって、緩い砂地盤では顕著であった上向き浸透流が礫地盤では鉛直有効応力を負にするほど

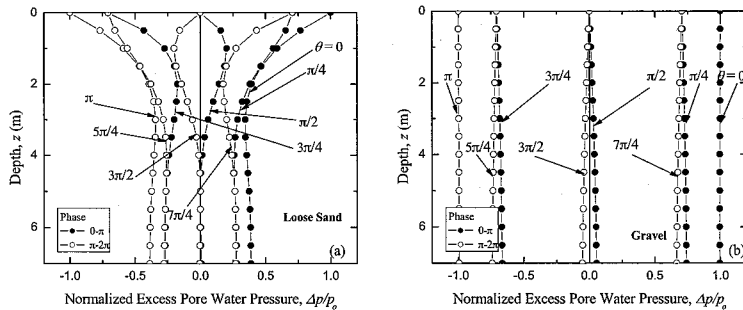


図-4 海底地盤の過剰間隙水圧変動の深さ方向分布 ((a) 緩い砂, (b) 礫)

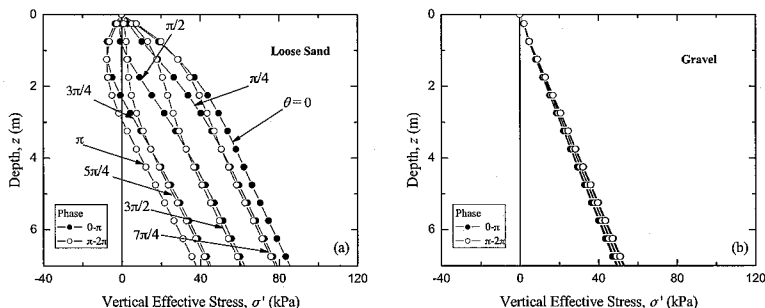


図-5 海底地盤の鉛直有効応力変動の深さ方向分布 ((a) 緩い砂, (b) 礫)

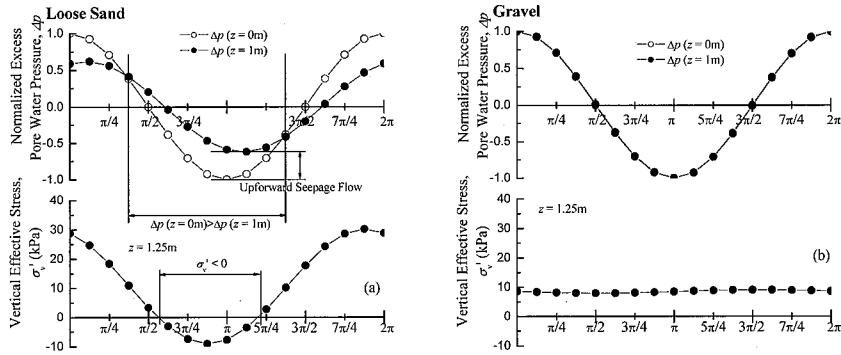


図-6 海底地盤における過剰間隙水圧と鉛直有効応力の位相角に対する変化 ((a) 緩い砂, (b) 礫)

大きくなっていない。

このように海底地盤の有効応力変動は海底地盤表面に作用する水圧変動と海底地盤内の過剰間隙水圧変動の差によって生じるので、海底地盤表面に作用した水圧を海底地盤内に積極的に導くために透水性の高いコラムを地盤内に挿入することは海底地盤の安定化に効果があると考えられる。

(2) 透水性コラムによる対波浪安定化工法の効果

地盤に透水性コラムを設置した(図-2) 緩い砂地盤の波浪に対する応答を有限要素法により解析した結果を図-7 から図-9 に示している。図には領域の中央位置(FEM メッシュ(図-2(b)) では element A) での過剰間隙水圧変動と鉛直有効応力変動をその範囲で示してい

る。透水性コラムの物性は仮に代表的な礫に近い値を採用した。また、以下の解析では、海底地盤の厚さ $D=10$ m, 透水性コラムの直径が $D_{pc}=0.2$ m, 間隔が $W_{pc}=1.5$ m を標準としている。

図-7 では透水性コラムの長さ L_{pc} をパラメータにして挙動を比較している。透水性コラムの効果は明瞭で、有効応力変動は明瞭に減少し、海底地盤が不安定化する(有効応力が負になる) 範囲(深度) も明らかに縮小している。長さ 3 m 程度で十分な効果がありそうで、不安定化する範囲は深度が 3 m から 1.8 m へ縮小している。

図-8 では透水性コラムの直径 D_{pc} をパラメータにした挙動の比較を示している。採用した解析条件では 0.2

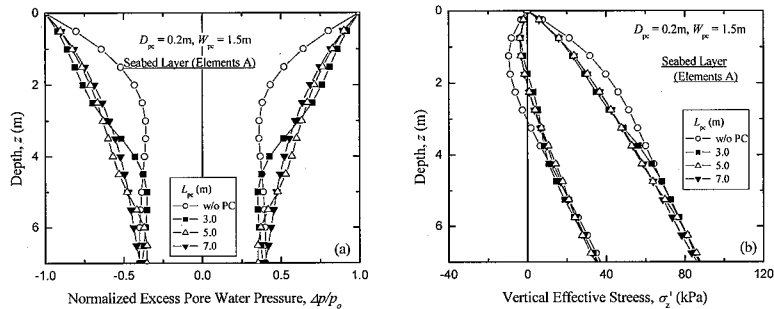


図-7 海底地盤の応答に及ぼす透水コラムの長さの影響 ((a) 過剰間隙水圧変動振幅, (b) 鉛直有効応力変動振幅)

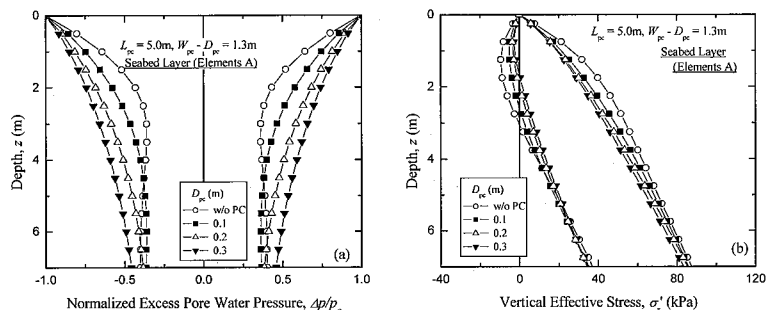


図-8 海底地盤の応答に及ぼす透水コラムの直径の影響 ((a) 過剰間隙水圧変動振幅, (b) 鉛直有効応力変動振幅)

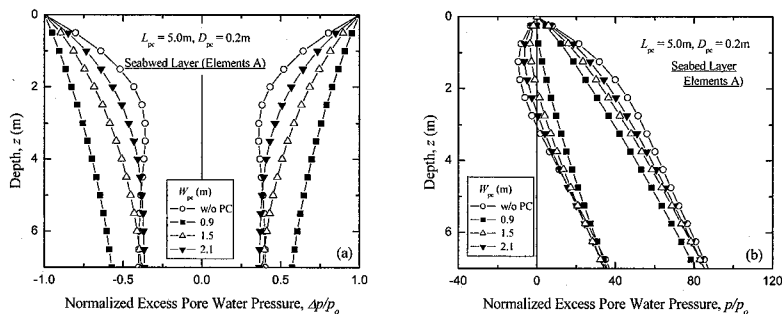


図-9 海底地盤の応答に及ぼす透水コラムの間隔の影響 ((a) 過剰間隙水圧変動振幅, (b) 鉛直有効応力変動振幅)

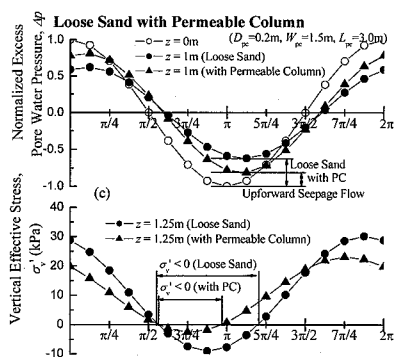


図-10 海底地盤における過剰間隙水圧と鉛直有効応力の位相角に対する変化 (透水性コラムを挿入した場合)

m で不安定化する範囲は深度が 3 m から 1.8 m へ縮小し十分な効果が得られそうである。

図-9 では透水性コラムの間隔 W_{pc} をパラメータにした挙動の比較を示している。採用した解析条件では間隔が 1.5 m で不安定化する範囲は深度が 3 m から 1.8 m へ縮小し十分な効果が得られそうである。

これらの解析結果では長さが $L_{pc} = 3.0$ m, 直径が $D_{pc} = 0.2$ m, 間隔が $W_{pc} = 1.5$ m で十分な効果がありそうである。図-10 は, 海底地盤表面 $z = 0$ m と深さ 1 m における水圧, 過剰間隙水圧の変相角に対応した変動と深さ 1.25 m における鉛直有効応力の変相角に対応した変動を示している。ここでは長さが $L_{pc} = 3.0$ m, 直径が $D_{pc} = 0.2$ m, 間隔が $W_{pc} = 1.5$ m の条件で透水性コラムを挿入した場合と透水性コラムを挿入しない場合の緩い砂の応答を併せて示している。透水性材料を海底地盤に挿入することにより海底地盤表面に作用する水圧と海底地盤内の過剰間隙水圧の差が減少し, 地盤内の有効応力変動が抑制できることを示している。

4. あとがき

現在では消波ブロックに代表される, 構造物や海底地盤表面に作用する水圧を減少させるための種々の工法が取られている。また, 礫材を用いたマウンドの設置や地盤をブロック等で被覆することによって地盤を安定化する工法も取られている。礫材を数メートルの厚さで敷設することと比べると, 材料の調達や建設コストの面で優位性があり, 環境負荷も小さいと考えられる。ここではページ数の制限で示せないが, もっと厳しい波浪下においても礫によるマウンドと併用することで海底地盤を安定に保つことが解析的に確認されている。有限要素法による解析によりその効果を定量的に検討しつつ, 護岸, 混成防波堤, 消波ブロック堤等に適用すれば, 沿岸および沖合におけるこれらの構造物の対波浪不安定性を向上させることが可能であると考えられる。

考 文 献

- 善功企・梅原靖文(1986): 波浪による防波堤基礎地盤の液状化被災, 海洋構造物の基礎に関するシンポジウム, 第2編シンポジウム論文集, pp. 225-232.
- 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.
- Miura, K. and Asahara, S.(2006): "Analytical Method for the Response of Seabed to Wave Loading regarding the liquefaction or instabilization of the seabed" GeoMechanics Group, Toyohashi University of Technology.
- Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S., and Kamata, A. (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.
- Okusa, S. (1985): Wave-induced Stresses in Unsaturated Submarine Sediments, Geotechnique, Vol. 35, No. 4, pp. 509-517.
- Yamamoto, T. (1977): Wave Induced Instability in Seabed, Proc. Coastal Sediments, ASCE, pp. 898-913.