

# 透水性コラムを配置した海底地盤の波浪に対する応答の現地観測と 解析によるコラムの効果の評価法

豊橋技術科学大学	国際会員	三浦均也
豊橋技術科学大学	正会員	森政信吾
豊橋技術科学大学	正会員	浅原信吾
豊橋技術科学大学	学生会員	○内倉勇介
(独法) 港湾・空港技術研究所	正会員	山崎浩之
北日本港湾コンサルタント (株)	正会員	大塚夏彦
岡三リビック (株)	正会員	小浪岳治

## 1. はじめに

台風や低気圧の接近に伴う荒天時の波浪により、防波堤や護岸などの港湾・沿岸施設に甚大な被害が発生する。これらの施設が転倒するなどの被害の原因は、波浪による衝撃力が構造物に直接作用することである。しかし、同時に、波浪により海底面に過大な水圧変動が作用することによって海底地盤が不安定化するために、被害が甚大なものになっていることがこれまでの調査や研究によって分かっている<sup>1)</sup>。このような海底地盤の不安定化するメカニズムは、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力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、海底地盤を多孔質体としてモデル化・定式化する必要がある。多孔質体のモデル化と定式化に関わる力学的な研究は Biot<sup>2)</sup>によって始められ、その後、海底地盤を連続体として固体と流体の二相系材料としてモデル化して波浪との相互作用に適用することで、海底地盤の挙動をある程度計算できることが明らかになってきている。Zen ら<sup>3)</sup>は実海域で海底地盤内の間隙水圧変動と有効応力変動を観測した。筆者ら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、波浪のような比較的周期の低い作用に対しては地盤を **u-p formulation** で定式化し、擬似動的な解析を行えば十分な精度で相互作用を考慮した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範囲が波長に比べて十分に浅い場合には、一次元解析で十分な精度の計算結果が得られることも示した。(三浦ら<sup>4,5)</sup> 参照)

このような波浪による海底地盤の不安定化現象に対して、著者ら<sup>6)</sup>は海底地盤表面の水圧を抑制するのではなくむしろ海底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することを示し、透水性の高いコラム状の材料を海底地盤内に設置することによる「透水性コラムによる海底地盤の安定化工法」を提案し、その効果を有限要素法による数値解析で検討した。このような安定化工法（以下では「透水性コラム工法」）の有効性を示すために、筆者ら<sup>7)</sup>は2007年9-10月に、北海道石狩湾新港で海底地盤の波浪に対する応答の観測を実施し、実海域における透水性コラム工法の効果

---

Field observation of response behavior of seabed treated with permeable columns and the analytical evaluation method for their effects

Kinya MIURA (k-miura@bd5.so-net.ne.jp), Shingo MORIMASA, Shingo ASAHARA, and Yusuke

UCHIKURA: Toyohashi University of Technology

Hitoyuki YAMAZAKI: Port and Airport Technical Research Institute

Natsuhiko OTSUKA: Northern Japan Port and harbor Consultants Co. and Ltd.

Takeharu KONAMI: Okasan LIVIC Co. Ltd.

を初めて示すことができた。本報告では 2009 年 2 月に北海道白老港で実施した波浪に対する海底地盤応答観測に関して、観測方法と観測結果報告するとともに、観測結果を分析することによって海底地盤の対波浪応答特性と透水性コラムの効果を検討する。

透水性コラム工法の設計および適正配置の決定に際しては、透水性コラムの効果を数式によって客観的に評価する必要がある。これまでは、透水性コラムを組み込んだ海底地盤を有限要素法でモデル化し、数式解としてのみ解を得て検討していた。本報告では、Bessel 関数を導入することによって、軸対象条件を考慮し得る数式解の誘導仮定を示し、透水性コラムの影響をパラメトリックな条件で検討した。

## 2. 北海道白老港における海底地盤の応答観測

**2.1. 観測地点** 原位置観測は、北海道白老港西側防波堤で行った。図-1, 2 は白老港全体の外側で観測を予定している防波堤の平面図を示している。さらに、図-3 は防波堤の断面図で、その横断面構造を、防砂堤上に設置した観測機器の位置とともに示している。観測地点における水深は約 5m、堤体は断面幅 10.7m、高さ 7.85.0m の複合構造から成る本体と厚さ約 3.8m の礫材マウンドからなる重力式である。マウンドの外側は根固めブロックと被覆ブロックで防護されている。防波堤建設時の調査によると、海底地盤は海底表面から深さおよそ 3m までは細粒分が 5%以下で N 値 5 程度のほぼ均質な緩い砂層であると予想されている。

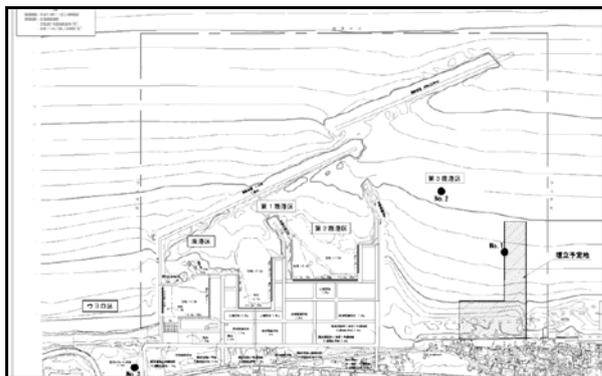


図-1 白老港平面図



図-2 西側防波堤平面図

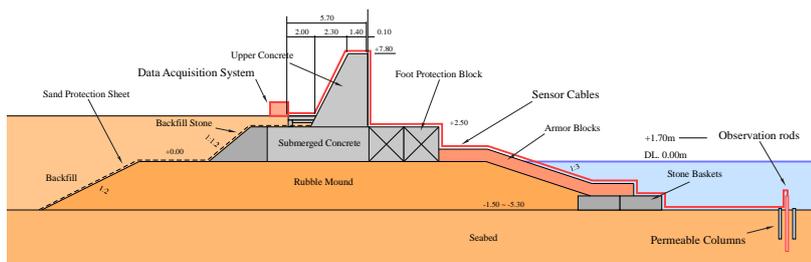


図-3 防波堤の断面構造とその俯瞰（建設途中の写真）

**2.2. 観測機器とその配置** 海底地盤内の土圧と間隙水圧の鉛直方向分布を測定するために、センサーを取り付けた2本のロッド（観測ロッド）を作成した。先端からジェット水流を噴水することにより、地盤内に所定の深さまで貫入した。観測ロッドには5個の間隙水圧計と3個の土圧計を取り付けられており（図-4参照）、最上部の間隙水圧計は海底表面に作用する水圧を測定することを目的としている。間隙水圧計（Type: BPA-F-200KPS72701(Kyowa), Capacity: 200kPa, Accuracy: 1% of full scale) は直径10mmの円筒状のひずみゲージ式センサーで、先端には10 $\mu$ mのフィルターが取り付けられている。土圧計（Type: BEC-A-200KPM1Z70P(Kyowa), Capacity: 200kPa, Accuracy: 2% of full scale)は水圧を含む全土圧の水平成分を検出することが可能で、ロッドに対して垂直に取り付けられている（内部にひずみゲージ式センサーを持ち、受圧面の直径は23mm）。

透水性コラムは海底地盤面の水圧変動を地盤内に引き込むことを目的として用いるもので、本観測では、ポリプロピレンを主材料とする微細繊維を円筒棒状に整形した材料を使用した。この長さ2.25m、直径65mmの透水性コラムを（図-5；透水性コラムロッド）。本透水性コラムは、濾過フィルターとして作成しているものを転用して使用している（濾過精度150 $\mu$ m）。透水性コラムの先端には鋼管のガイド（1.5m）を取り付け、コラムの固定を容易にした。

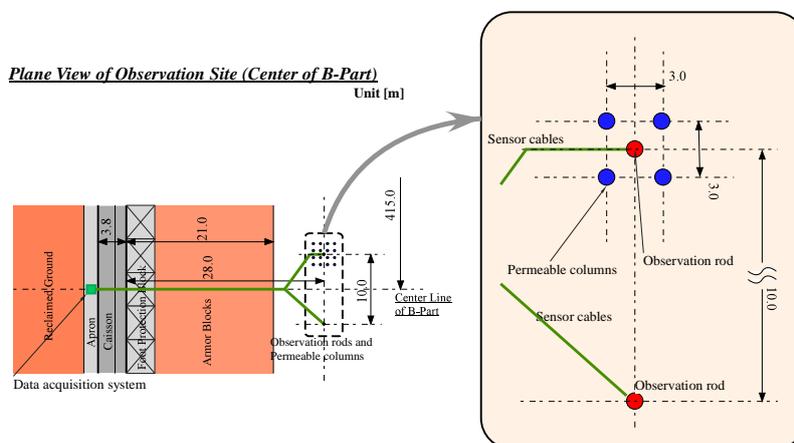


図-4 計測機器と透水性コラムの配置

**Installation of Observation Rods and Permeability Columns**

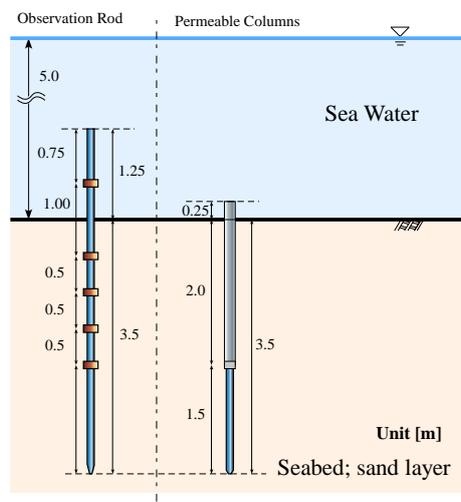


図-5 観測ロッド・透水性コラムの配置

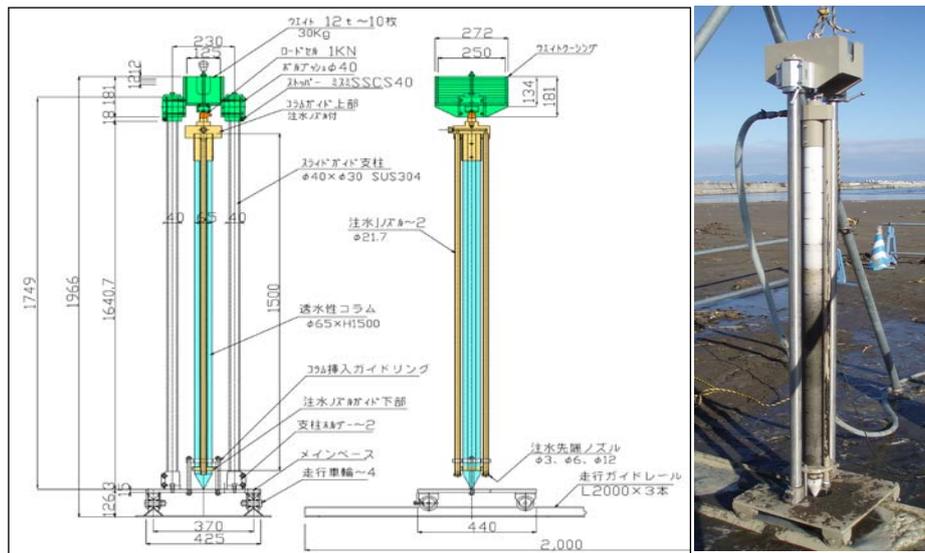


図-6 透水性コラム貫入装置

**2.3 透水性コラムの貫入** 透水性コラムをウォータージェットで貫入するために開発した貫入装置の概略と写真を図-6 に示す（陸上での貫入試験時のもの）。透水性コラムに沿うようにして、注水ノズルを2本をコラム先端付近まで伸ばして、その先端からの噴射によって海底地盤を攪乱し、透水性コラムを圧入した。貫入に必要な水圧とノズル形状を把握するために、予備実験を数回実施している。

**2.1.観測データの取得と処理** 間隙水圧計と水平土圧計の出力値をデータロガーにより 100Hz の周波数でサンプリングした。動ひずみ計測器を採用した今回の計測システムでは、計測値は変動成分（相対値）であるので、静的な値を加えた絶対値の測定は事実上測定不可能である（データ処理の詳細は参考文献に詳しい：三浦ら<sup>7)</sup>）。観測ロッドによって計測した時刻歴データは先ずフーリエ変換で時間領域から周波数領域へ変換し、1Hz のローパスフィルターによって高周波成分を除去した後、パワースペクトルレベルで Hanning フィルター50 サイクルを適用して平滑化処理した。なお、波高および海底表面に作用する水圧変動は、微小振幅波理論により、 $uw_0$  および  $tw_0$  のデータから逆解析で求めた。

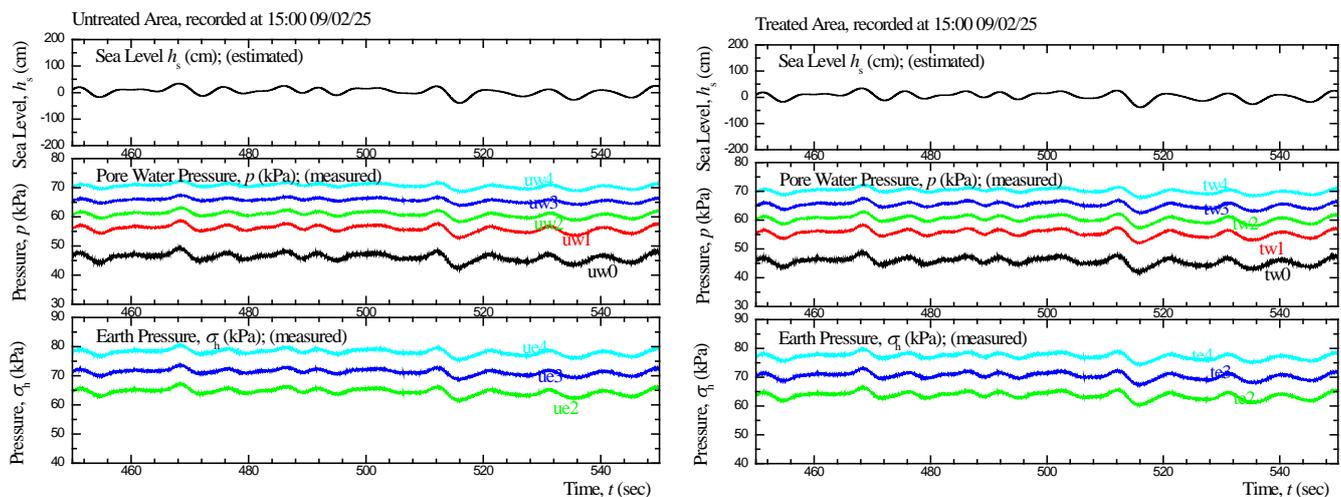


図-9 間隙水圧と土圧の時刻歴；(a) 透水性コラム無し (b) 透水性コラム有り

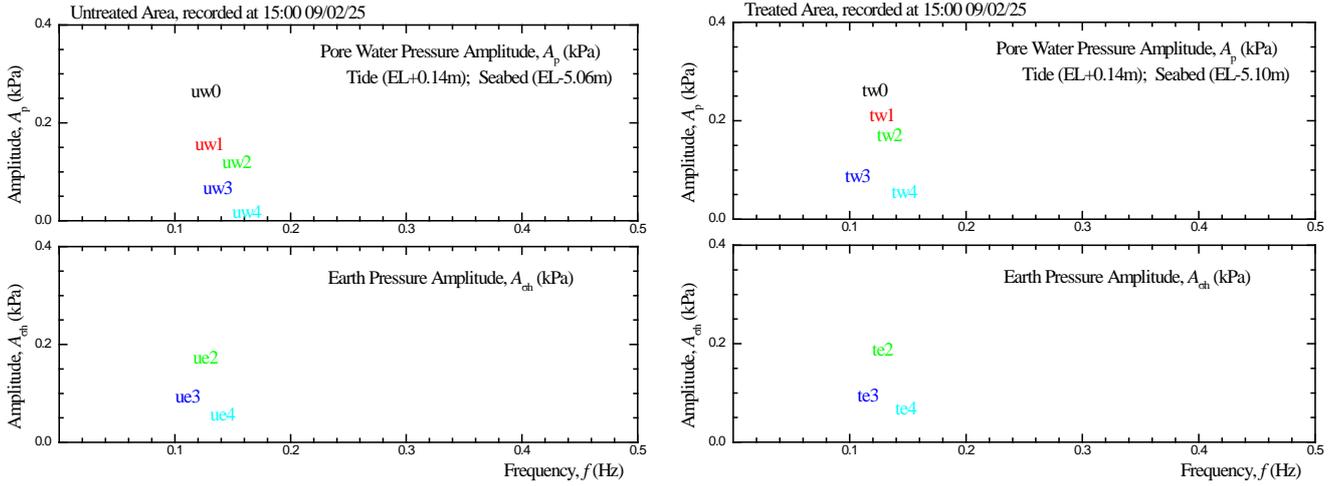


図-10 間隙水圧と土圧の周波数成分の分布 ; (a) 透水性コラム無し (b) 透水性コラム有り

図示のように、透水性コラムを配置した地点では、海底面上での水圧変動にはほとんど差がないが、深いところでの水圧変動の振幅は、透水性コラムを配置していない地点に比べると比較的大きく、透水性コラムの効果によって、間隙水圧の伝播における減衰が抑制されており、海底地盤が安定化する方向にあることがわかる。

### 3. 透水性コラムの効果を評価するための数式解

**3.1. 調和振動数式解の誘導** 三浦ら<sup>3)</sup>は、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た。この場合の支配方程式は以下のようなものである。

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

ここで、 $u_z$ は固体相(土粒子)の変位ベクトル、 $p$ は間隙水圧増分、 $G$ はせん断定数、 $\lambda$ 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。ここで、鉛直方向の全応力と有効応力とを用いて上式を書き直す。

$$\Delta \sigma_z' = -(\lambda+2G)\frac{\partial \Delta u_z}{\partial z} = -E_{us} \frac{\partial \Delta u_z}{\partial z} \quad \Delta \sigma_z = \Delta \sigma_z' + \Delta p = -E_{us} \frac{\partial \Delta u_z}{\partial z} + \Delta p \quad (3)$$

この関係を用いると、(1)、(2)は、

$$\frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (4) \quad \frac{\partial \Delta p}{\partial t} = \frac{1}{h_v} \frac{\partial^2 \Delta p}{\partial z^2} + B' \frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial t} \quad (5)$$

ここで、一次元変形におけるSkemptonの間隙水圧係数 $B'$ は以下のように定義でき、また、下記のパラメータを水圧圧縮係数としてあらたに定義した。

$$B' = \frac{B_f}{E_{us} + B_f} \quad (6) \quad h_v = \frac{\rho_w g}{k E_{us} B_f / (E_{us} + B_f)} = \frac{1}{c_v B'} \quad (7)$$

ここで、支配方程式における間隙水圧を2つの成分に分けて考える。

$$\Delta p = \Delta p_n + \Delta p_f \quad (8)$$

ここで、 $\Delta p_n$ 、 $\Delta p_f$ は、それぞれ間隙水の流動に依らない全応力に対応した深さ方向に一様な成分と、間隙水圧の流動によって生じる深さ方向で変動する成分である。支配方程式は、

$$\frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (9) \quad \frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = B' \frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial t} \quad (10) \quad h_v \frac{\partial \Delta p_f}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta p_f}{\partial z^2} \quad (11)$$

次に、上記の支配方程式を軸対象条件に拡張すると、以下ようになる。

$$\frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \Delta p_n}{\partial t} = B' \frac{\partial \Delta \sigma_z}{\partial t} \quad (13)$$

$$h_v \frac{\partial \Delta p_f}{\partial t} = \frac{\partial^2 \Delta p_f}{\partial z^2} + \left( \frac{\partial^2 \Delta p_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta p_f}{\partial r} \right) \quad (14)$$

ここで、軸対称条件を仮定するとともに、固体相の軸方向の変位 ( $\Delta u_r$ ) は小さいとして無視している (バーチカルドレーンに対する圧密方程式と同様な仮定)。さらに、flow に対する解を以下のように深さ方向の成分 ( $\Delta p_{fz}$ ) と軸方向の成分 ( $\Delta p_{fr}$ ) の2つに分離する。

$$\Delta p_f = \Delta p_{fz} + \Delta p_{fr} = Z(z)p_0 e^{i\omega t} + R(r)p_0 e^{i\omega t} \quad (16)$$

深さ方向の境界条件は下のように、十分に厚い海底地盤を想定する。

$$\text{地盤表面}(z=0); \quad \Delta \sigma_z = p_0 e^{i\omega t}, \quad \Delta p_n + \Delta p_{fz} = p_0 e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$\text{地盤基部}(z=\infty); \quad \partial \Delta \sigma_z / \partial z = 0, \quad \Delta p_{fz} = 0 \quad (18)$$

また、半径方向の間隙水圧の境界条件は、透水コラム内の水圧を均一とみなして、

$$\text{透水性コラム側面}(r=r_0); \quad \Delta p_{fr} = p_0 e^{i\omega t} - \Delta p_n - \Delta p_{fz} \quad (19)$$

$$\text{中間点}(r=r_b); \quad \partial \Delta p_{fr} / \partial r = 0 \quad (20)$$

非流動成分 ( $\Delta p_n$ ) は式(13)と(17)より、

$$\Delta p_n = p_0 B' e^{i\omega t} \quad (21)$$

深さ方向の流動成分 ( $\Delta p_{fz}$ ) は式(14)、(16)と(17)、(18)より、

$$i\omega h_v Z(z) = Z''(z) \quad Z(z) = (1-B')e^{-\zeta z} \quad (22)$$

したがって、

$$\Delta p_{fz} = p_0 (1-B')e^{-\zeta z} e^{i\omega t} \quad (23) \quad \text{ここで、} \zeta = \sqrt{i\omega h_v} \quad (23)$$

軸方向の流動成分 ( $\Delta p_{fr}$ ) は式(14)、(16)と(19)、(20)より

$$i\omega h_v R(r) = R''(r) + \frac{1}{r} R'(r) \quad (24) \quad R(r) = \left\{ 1 - B' - (1-B')e^{-\zeta z} \right\} \frac{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r) + I_0(\zeta r)K_1(\zeta r_b)}{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r_0) + I_0(\zeta r_0)K_1(\zeta r_b)} \quad (25)$$

$$\text{したがって、} \Delta p_{fr} = p_0 \left\{ 1 - B' - (1-B')e^{-\zeta z} \right\} \frac{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r) + I_0(\zeta r)K_1(\zeta r_b)}{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r_0) + I_0(\zeta r_0)K_1(\zeta r_b)} e^{i\omega t} \quad (26)$$

最終的に、以下の解が得られる。

$$\Delta p = \Delta p_n + \Delta p_{fz} + \Delta p_{fr} = p_0 \left( \begin{array}{l} B' + (1-B')e^{-\zeta z} + \left\{ 1 - B' - (1-B')e^{-\zeta z} \right\} \\ \frac{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r) + I_0(\zeta r)K_1(\zeta r_b)}{I_1(\zeta r_b)K_0(\zeta r_0) + I_0(\zeta r_0)K_1(\zeta r_b)} \end{array} \right) e^{i\omega t} \quad (27)$$

### 3.2. 数式解による間隙水圧変動特性

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図12に示す。図のように格子状に透水性コラムを配置し、透水性コラムの直径を  $D_{pc}$ 、間隔を  $W_{pc}$  とした。また、透水性コラムが影響する範囲を円で示した範囲とし、透水性コラムの影響半径を  $r_b$  とした。 $r_b$  は、格子状に立て込んだコラムの影響する範囲 (一辺が  $W_{pc}$  の正方形) と同じ面積となるよう以下の式より決定した。

$$r_b = \frac{W_{pc}}{\sqrt{\pi}} - D_{pc} \quad (1)$$

計算で用いた波と地盤物性は表1・2に示したとおりである。前節で誘導した数式解は以下の仮定に基づいている。

- 透水性コラム；透水係数を無限大、長さを無限大
- 変形；鉛直一次元 ・ 流れ；鉛直一次元鉛直方向+水平軸対称放射方向

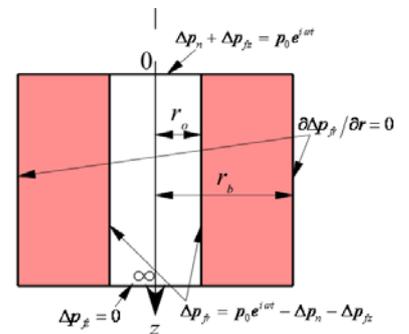
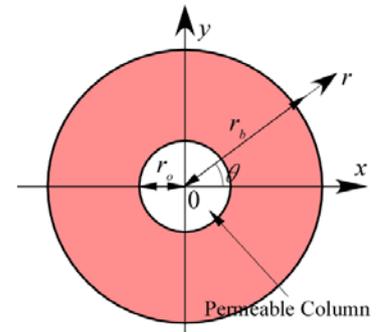


図-11 軸対象条件の模式図

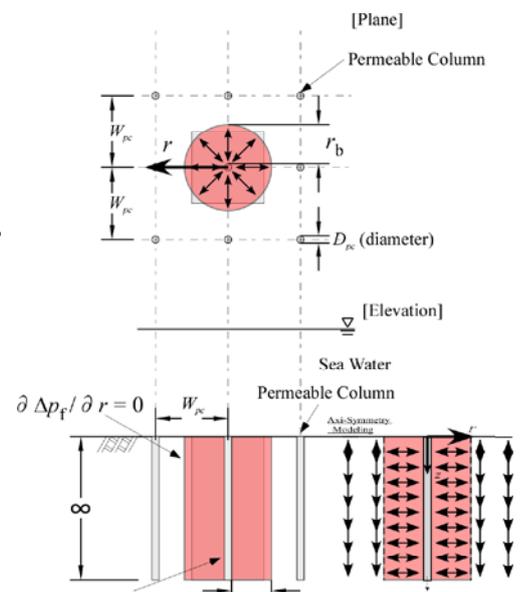


図12 透水性コラムの格子状配置

表1 波浪のパラメータ

波高	周期	水深	波長	海底面の水圧振幅
$H(m)$	$T(s)$	$d(m)$	$L(m)$	$p_0(kN/m^2)$
10.0	13.0	20.0	167.6	37.90

表2 地盤の材料定数<sup>8)</sup>

材料定数	緩い砂	透水性コア (FEM)
$\rho$ : 湿潤密度( $kg/m^3$ )	$1.90 \times 10^3$	$1.75 \times 10^3$
$\rho_s$ : 粒子の密度( $kg/m^3$ )	$2.65 \times 10^3$	$2.36 \times 10^3$
$n$ : 間隙率	0.454	0.448
$G_s$ : せん断剛性( $N/m^2$ )	$0.4 \times 10^8$	$1.0 \times 10^8$
$\nu_s$ : ポアソン比	0.30	0.30
$S_r$ : 飽和度(%)	99.30	99.88
$k$ : 透水係数( $m/s$ )	$1.0 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-2}$

数式解により、透水性コアの有効性を検討する。以下では4本のコアで囲まれた中央、コアから最も離れた場所での応答を対象としている。地盤内の過剰間隙水圧の変動  $\Delta p$  は海底地盤面の水圧変動  $p_0$  で正規化している。図13には海底地盤表面  $z=0m$  と深さ  $1m$  における過剰間隙水圧の変相角に対する変動と深さ  $1m$  における鉛直有効応力の変相角に対する変動を示している。図ではコアの間隔を  $2m$  とし、異なったコアの直径  $D_{pc}$  に対して計算結果を示している。図13(a)が示すようにコアを挿入していないゆるい砂地盤では過剰間隙水圧の変動には深さ  $1m$  で減衰挙動が見られ、地表面での水圧が最も低い位相角  $3\pi/2$  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り、地盤内の有効応力も大きく減少している。一方で、コアを配置した場合には地盤の透水性が良くなるために地表面の水圧変動がほとんど減衰せず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抑制され、鉛直有効応力の変動も小さくなっている。

図14, 図15に海底地盤内での正規化した過剰間隙水圧, 有効応力の分布を最も地盤内の有効応力が減少するタイミングで示す。図14にはコアの間隔を  $2m$  とした場合の正規化した過剰間隙水圧の分布を示している。この図より、コア無しの場合と比べコア有りの場合、地盤内の水圧変動の分布が均一化されていることがわかる。コア周辺地盤の透水性が改善され、海底面の水圧変動が地盤内によく伝わっているといえる。図15では同様に有効応力の分布を示している。透水性コアの有無で比べた場合、コア有りの場合の方では、コアによって地盤内の水

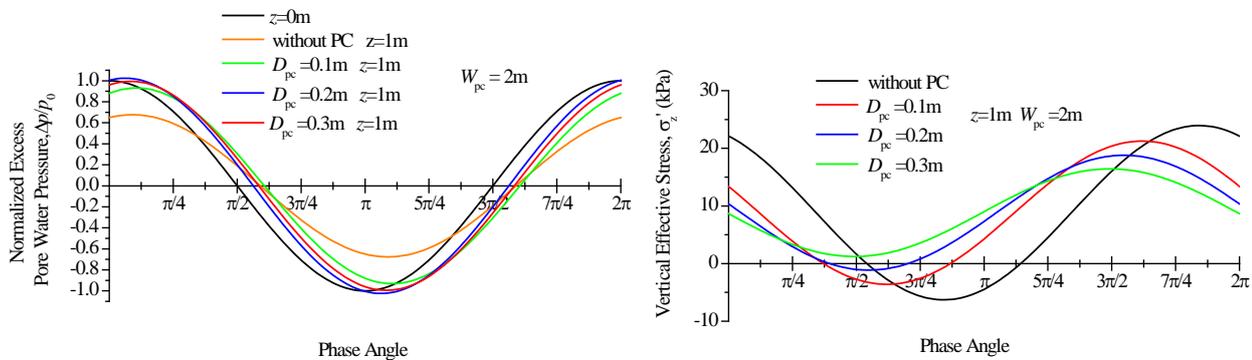


図13 正規化過剰間隙水圧と有効応力の変動特性

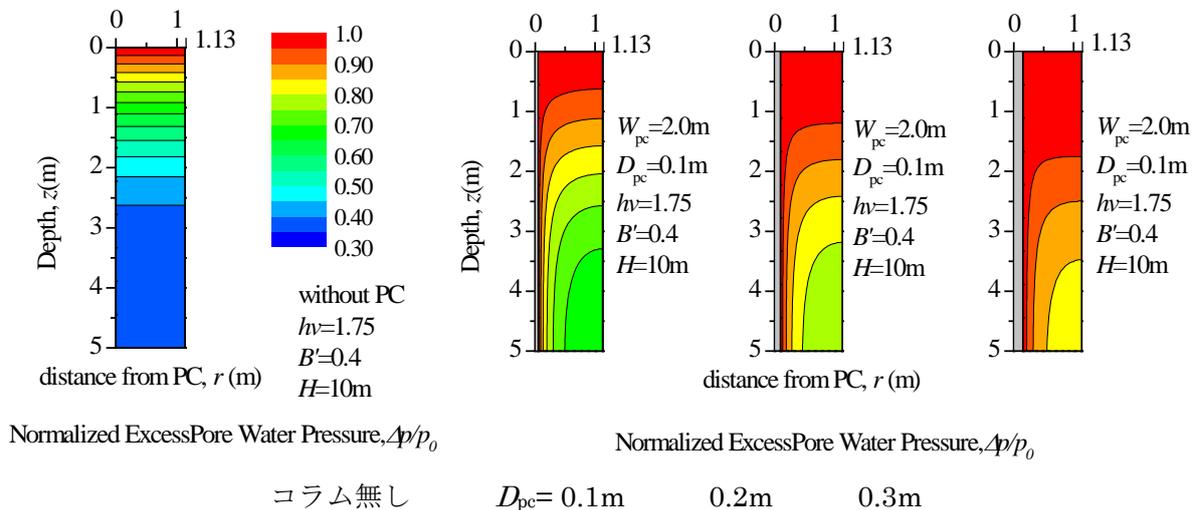


図 14 正規化した過剰間隙水圧の円直断面分布 ( $W_{pc}=2m$ )

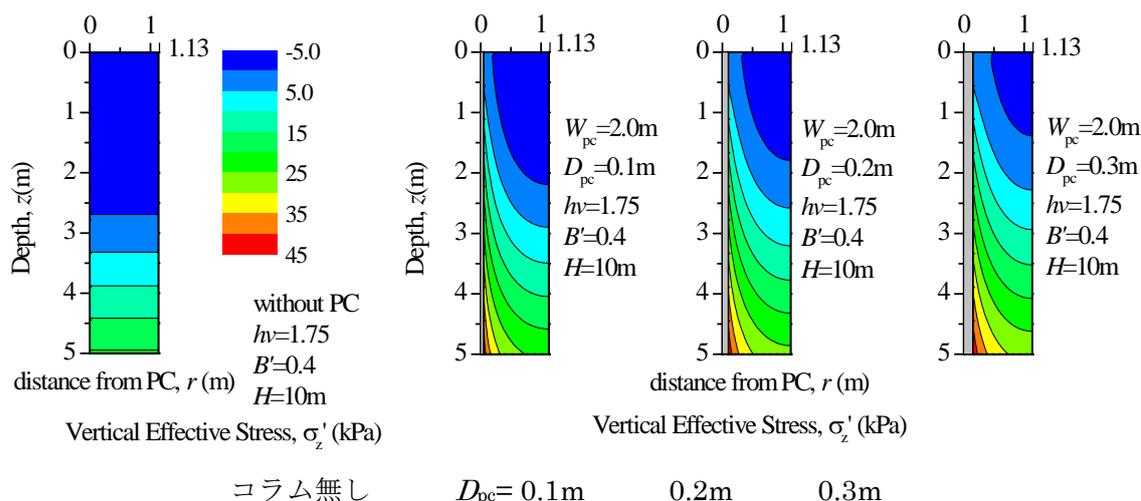


図 15 鉛直有効応力の分布 ( $W_{pc}=2m$ )

圧変動が均一化されたため有効応力が負となる範囲が減少している。またこれらの図において、透水性コラムの直径を大きくすると透水性コラムの効果が顕著になっている。

#### 4. あとがき

透水性のコラム状の材料を海底地盤に立て込むことによって、海底地盤の安定化を図り、防波堤や岸壁等の対波浪安定性を高ようとする工法「透水性コラム工法」の有効性を確かめるために実施した、北海道白老港における海底地盤の応答観測、および工法の効果を評価し設計法に生かすために必要な数式解の誘導について報告した。

観測データを処理し、周波数分析することによって透水性コラムの効果によって地盤中の間隙水圧の伝搬における減衰が抑えられ、海底地盤が安定化する方向へ変化していることが確かめられた。今後は、データを詳細に分割することによって、海底地盤の特性と効果を定量的に検討する予定である。

軸対象条件において、調和振動解として得られた数式解を所定の条件で検討し、透水性コラムの影響が定量的に計算できることがわかった。報告では、透水性コラムの直径の影響しか示していないが、打設間隔の影響についても同様に評価できることが分かっている。今後は、透水性コラム内の浸透特性もより現実的なものとして考慮し、実測値との検証も進める予定である。

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」の支援を受けて実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 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.
- 2) Biot, M. A. (1941): "General Theory of Three-Dimensional Consolidation," Journal of Applied Physics, Vol.12, pp.155-164.
- 3) Zen, K., Yamazaki, H. (1991): "Field Observation and Analysis of Wave-induced Liquefaction in Seabed," Soils and Foundations, Vol.31, No.4, pp.161-179.
- 4) 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.
- 5) 浅原信吾・三浦均也・野田太門・田中隼矢(2008) "厳密解および数値解における波浪を受ける海底地盤の連成解析における定式化と解析条件の妥当性の検討", 地盤工学シンポジウム, 地盤工学会中部支部
- 6) 浅原信吾・三浦均也・大塚夏彦・田中隼矢(2007): "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", 海岸工学論文集第54巻, 土木学会, pp.966-970.
- 7) 三浦均也・浅原信吾・田中隼矢・大塚夏彦・小浪岳治(2008) "海底地盤における間隙水圧変動挙動の観測と透水性コラム工法の効果", 調査・設計・施工技術報告会, 地盤工学会中部支部
- 8) 土木学会(1994): "海岸波動", pp.430-503.