

透水性コラム工法による海底地盤安定化効果

豊橋技術科学大学
 (株)竹中工務店
 豊橋技術科学大学
 北日本港湾コンサルタント(株)
 岡三リビング(株)

三浦 均也
 浅原 信吾
 森政 信吾
 大塚 夏彦
 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あるいは地震発生時における津波により、種々の港湾・沿岸施設に甚大な被害が発生する。防波堤などの施設が転倒するなどの被害の原因は、主に波浪や津波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、波浪や津波により海底地盤にも過大な水圧変動が作用して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り分かっている¹⁾²⁾。このような海底地盤の不安定化メカニズムは、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。そのため、海底地盤を安定化するために「消波ブロックなどにより波浪外力を抑制する」あるいは「礫材のように透水性のよい材料を海底面に上載することにより地盤を拘束し有効応力を増加させる」という2つの方策が一般にとられる。これに対し著者らは、海底面の水圧を抑制するのではなくむしろ積極的に海底地盤内へ導くことにより、海底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考案した。この考えに基づき、特殊な繊維を用いた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」を提案した(図-1)。また、その効果を有限要素法による数値解析で検討し、十分な効果が期待できることを示した(浅原ら³⁾)。さらに、実海域において透水性コラム工法の試験施工を行い、その効果を検証した。

本報告では、まず海底地盤の対波浪応答の数式解を誘導し、海底地盤の不安定化メカニズムと透水性コラム工法の有効性について説明する。次に、2007年9月18日~10月31日の期間に北海道石狩湾新港東埠頭東防砂堤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実施状況を詳しく説明するとともに、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。

2. 数式解の誘導

(1) 調和振動数式解の誘導と波浪応答パラメータ

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

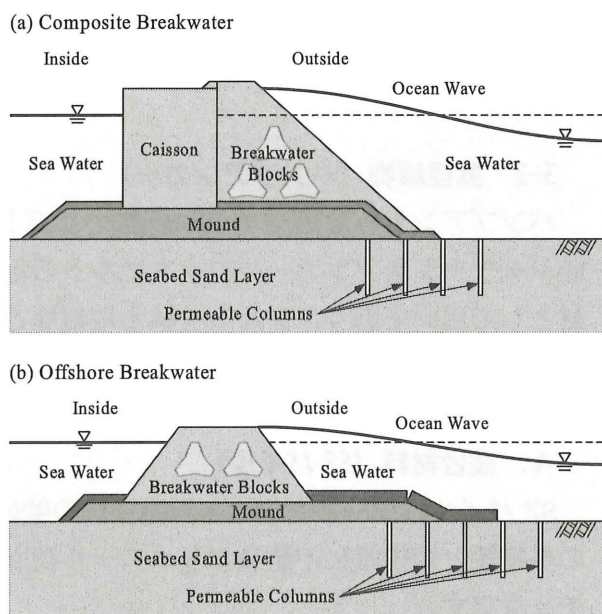


図-1 透水性コラム工法の適用例
 (a) 混成防波堤、(b) 離岸堤

は Biot⁴⁾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。著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(三浦ら⁵⁾)。また、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 16 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下における解析で十分な精度の応答が得られることも示した。この場合の支配方程式は次のようである。

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

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

ここに、 Δu_z は固体相の変位増分ベクトル、 Δp は間隙水圧増分、 G と λ はLameの定数、 k はDarcyの透水係数、 ρ_w は水の密度、 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。不透水性岩盤上の一様な厚さ D を有する単一海底地盤層を想定すると、境界条件は層の上面(海底面)には波浪による周期的な水圧変動が作用するが有効応力はゼロ、下面では変位が固定され鉛直方向の浸透流がゼロ(図-2)となる。

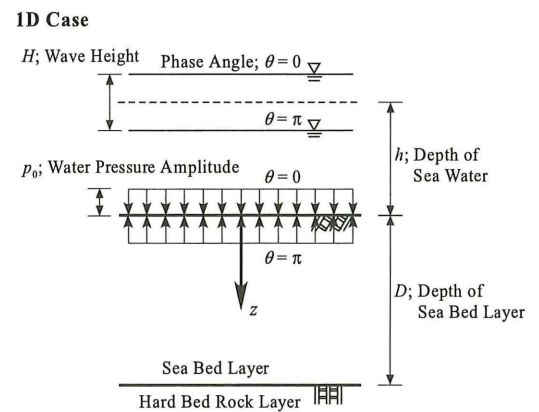


図-2 境界条件(有限深さの基礎地盤)

$$\begin{cases} \Delta \sigma_z = 0 \\ \Delta p = p_0 e^{i\theta}, \theta = \omega t \quad ; z = 0 \end{cases} \quad \begin{cases} \Delta u_z = 0 \\ \frac{k}{\rho_w g} \frac{\partial \Delta p}{\partial z} = 0 \quad ; z = D \end{cases} \quad (3)$$

したがって、数式解は以下のように得られる。

$$\Delta p = p_0 \left(\frac{B_f}{E_{us} + B_f} + \frac{E_{us}}{E_{us} + B_f} \frac{e^{-\zeta z} + e^{\zeta(z-2D)}}{1 + e^{-2\zeta D}} \right) e^{i\omega t} \quad (4)$$

ここに、 E_{us} は土骨格の鉛直一次元ヤング率である。また、

$$\zeta = \sqrt{i\omega h_v} = \sqrt{\frac{\omega h_v}{2}} + i \sqrt{\frac{\omega h_v}{2}}, \quad h_v = \frac{\rho_w g}{k E_{us} B_f / (E_{us} + B_f)} = \frac{1}{c_v B'}, \quad B' = \frac{B_f}{E_{us} + B_f} \quad (5)$$

ここに表れるパラメータ h_v を「水理圧密定数(圧密係数 c_v を間隙水の圧縮性を考慮して修正した値の逆数)」と呼んでいる⁵⁾。式(4)における項 $e^{2\zeta D}$ は小さいので無視すると、層の厚さ D が無限大の場合に相当する以下の近似式が得られる(海底地盤の不安定化が問題になる代表的な砂の場合 h_v は通常 1s/m^2 から 5s/m^2 程度で、この近似は層厚 D が 2m 以上であれば誤差は数パーセント以下と考えられる⁵⁾)。

$$\Delta p = p_0 (B' + (1 - B') e^{-\zeta z}) e^{i\omega t} \quad (6)$$

上式のように、波浪応答パラメータ h_v と B' が間隙水圧の減衰を伴う深さ方向分布を支配している。一次元条件では、波浪を受ける海底地盤内の有効応力変動は、

$$\Delta\sigma_z' = p_0 e^{i\alpha t} - \Delta p = p_0 e^{i\alpha t} (1 - B')(1 - e^{-5z}) \quad (7)$$

と表わされる。

(2) 調和振動数式解による海底地盤の不安定化メカニズムの説明

海底地盤が波浪により不安定化するメカニズムを説明するために、表-1に示す2種類の地盤材料(緩い砂、礫)からなる海底地盤を設定し、周期13s、海底面での水圧変動振幅 $p_0=37.9\text{kN/m}^2$ の進行波に対する海底地盤の応答を式(6)と(7)に示した数式解によって計算した。図-3には海底面 $z=0\text{m}$ 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-3(a)が示すように、緩い砂では過剰間隙水圧の変動に深さ1mで減衰挙動が見られ、海底面での水圧が減少している $5/8\pi$ から $9/8\pi$ を中心に海底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。このことにより海底地盤内には上向き浸透力が発生して地盤に重力とは逆向きの物体力が生じ、結果として $7/8\pi$ 付近で鉛直有効応力が負になっている。一方で礫地盤は透水性が良いために、海底面の水圧変動がほとんど減衰せずに海底地盤内に伝達されている。これにより、緩い砂地盤では顕著であった上向き浸透力が礫地盤では鉛直有効応力を負にするほど大きくない。したがって、透水性の高い材料を海底地盤に挿入して透水性を改善することにより、波浪を受ける海底地盤内の動水勾配および浸透力の発生を抑え、地盤内の有効応力変動を抑制できると考えられる。

表-1 材料定数⁶⁾

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 : せん断剛性 (N/m^2)	0.4×10^8	1.0×10^8
ν_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)	1.0×10^{-4}	1.0×10^{-2}

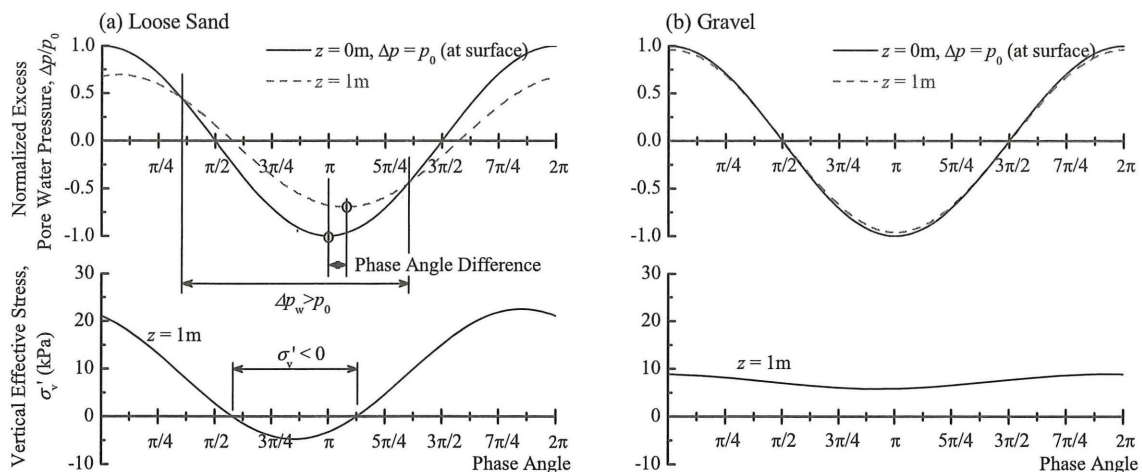


図-3 水平海底地盤の過剰間隙水圧と鉛直有効応力の変相角に対する変化; (a) 緩い砂、(b) 礫

3. 動態観測

(1) 観測地点

透水性コラム工法の効果を検証するための原位置観測は、北海道石狩湾新港東埠頭東防砂堤先端部の内湾で行った。図-4は観測地点を含む防砂堤の横断面構造を、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10.1m、高さ5.0m

のケーソンと厚さ約 2.6m の礫材マウンドからなる典型的な重力式である。マウンドの陸側は根固めブロックと被覆ブロックで防護されていて、ケーソンの外洋側にはカゴを敷いた後にパラペットの天端まで消波ブロックが積まれている。東防砂堤建設時の調査によると、海底地盤は海底面から深さおよそ 5m 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、防砂堤建設後は層厚 1m 程度に漂砂が堆積している。

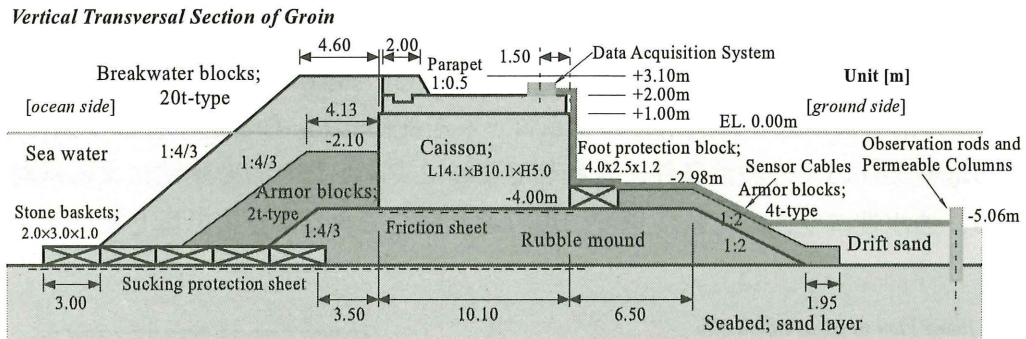


図-4 防砂堤の断面構造

(2) 観測機器の仕様

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；図-5）を作成した。観測ロッドには 5 個の間隙水圧計と 4 個の土圧計が取り付けられており、最上部の間隙水圧計は海底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 μ 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)。観測ロッドは、先端からジェット水流を噴射することにより海底地盤内の所定の深さまで貫入した。

透水性コラムは海底面の水圧変動を海底地盤内に引き込むことを目的として用いるもので、本実験では、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。これは濾過フィルターとして作成されているものである (濾過精度 150 μ m)。透水性コラムは長さ 2.25m、直径 65mm であり、2 本を 1 セットにして中空鋼管のロッドに結束バンドで固定している (透水性コラムロッド；図-6)。また、透水性コラムの先端にはコーンを取り付け、上端部は薄い不織布でカバーして砂の進入を防いでいる。透水性コラムロッドも観測ロッドと同様に中空鋼管のロッドの先端からジェット水流を噴射することによって所定の深さまで貫入した。

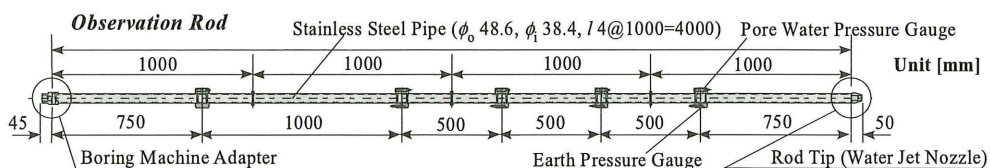


図-5 観測ロッド

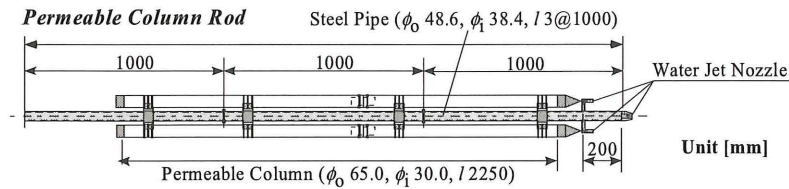


図-6 透水性コラムロッド

(3) 観測機器の配置

観測ロッドと透水性コラムの配置を図-7に示す。防砂堤に沿った2地点を選定し、観測ロッドを海底地盤に貫入した。防砂堤の先端に近い地点では、観測ロッドを中心としてその周辺に一边1.5mの正方形を成すように透水性コラムロッドを配置した。なお透水性コラムの配置間隔は、観測地点の地盤条件および波浪条件に合わせて事前に実施した有限要素法による検討結果に基づいて決定し、透水性コラムの影響が適度に現れると期待できるように計画した。

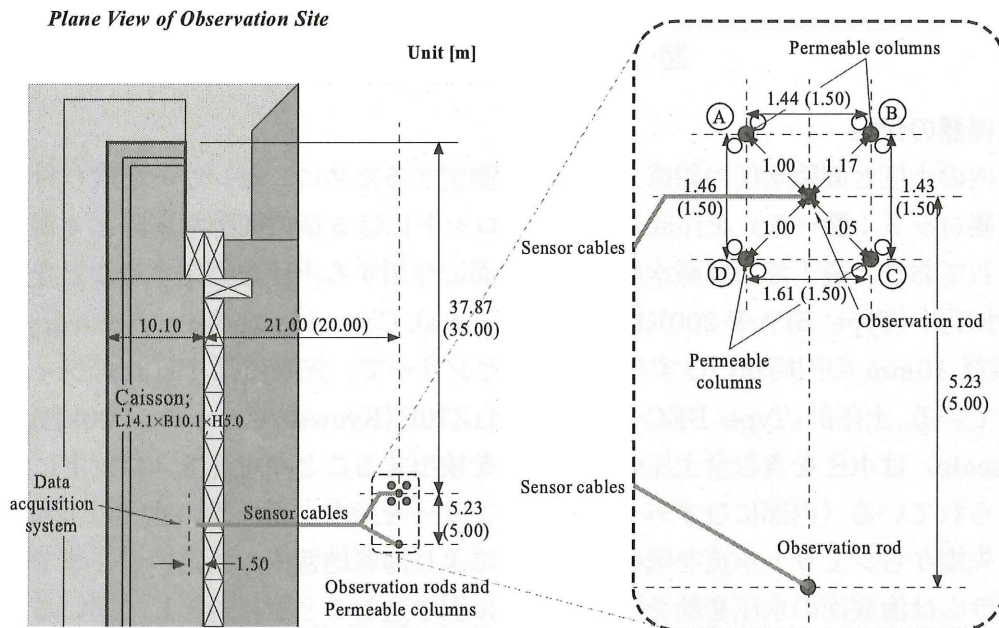


図-7 計測機器と透水性コラムの配置

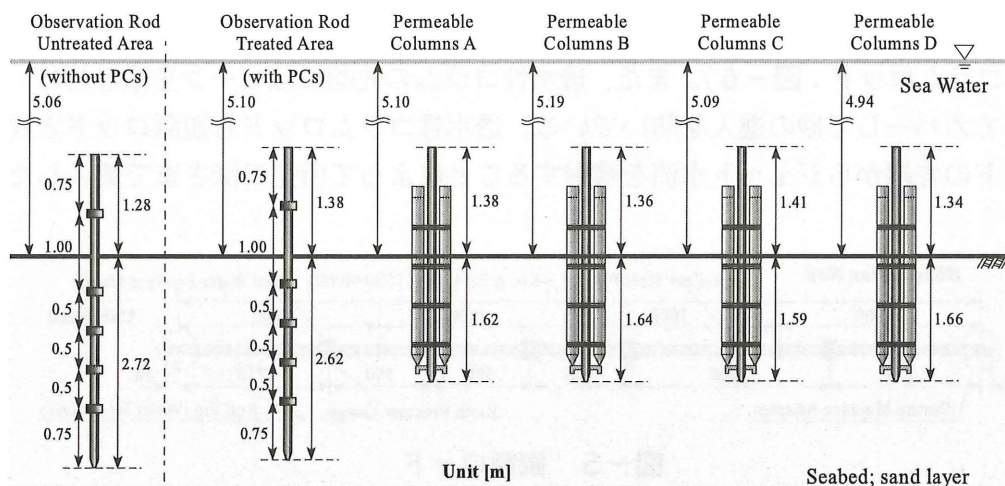


図-8 観測ロッド・透水性コラムロッドの貫入量

観測ロッドと透水性コラムロッドの貫入作業は、作業台船を設置位置まで曳航し、台船上のボーリング機械と、ダイバー2名の補助により行った。ロッドの設置後、GPS 測量、水準測量、トータルステーションを用いた詳細測量によって正確な設置位置と貫入量を計測した。測量結果は、**図-7**および**図-8**に示すとおりである。センサーのケーブルは、防護管に通し海底を這わせて防砂堤まで連絡し、堤体上に設置したデータ収録装置へ接続した(**図-4**)。電源として大型車用バッテリーを4個並列で利用したため、最大33時間連続計測可能であった。

4. 観測結果と考察

(1) 観測データの取得と処理

今回の動態観測では動ひずみ計測器を採用したため、間隙水圧や水平土圧の変動成分(相対値)は精度よく計測できるが、静的な成分を加えた絶対値の測定は事実上不可能である。そのため、海底面の標高と海底面からセンサーまでの深度、および小樽海洋気象台が公開している海水面の潮位変動の情報に基づいて静的な成分を計算し、それに計測した変動成分を加えることにより絶対値を算定した。間隙水圧の静的な成分(静水圧)は、潮位変動を考慮した間隙水圧計の設置水深をもとに計算した。また、水平土圧(全応力)の静的な成分は、海底面から土圧計までの深度と海底地盤の水中単位体積重量より推定した有効水平土圧に静水圧を加えて算定した。海底面および各センサーの標高は、施工完了時に測量している(**表-2**)。

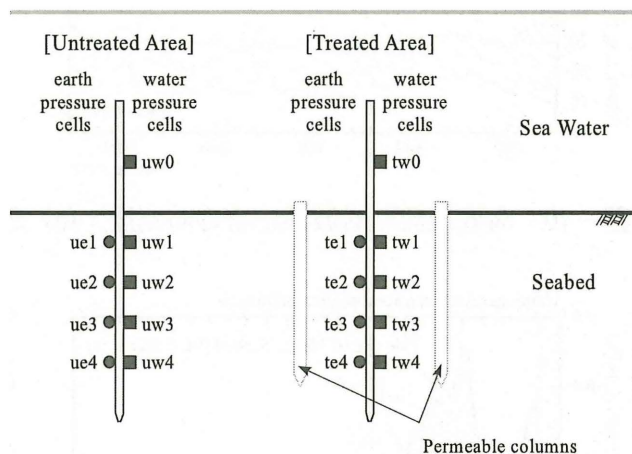


図-9 観測ロッドの計測器の配置

表-2 各センサーの標高

透水性コラムなしの地点		透水性コラムありの地点	
計測器	標高 (m)	計測器	標高 (m)
Seabed	-5.06	Seabed	-5.10
uw0	-4.53	tw0	-4.47
uw1,ue1	-5.53	tw1,te1	-5.47
uw2,ue2	-6.03	tw2,te2	-5.97
uw3,ue3	-6.53	tw3,te3	-6.47
uw4,ue4	-7.03	tw4,te4	-6.97

図-9は観測ロッドのセンサーの海底地盤内での配置を模式的に表したものである。サンプリング周波数100Hzで収録された間隙水圧および水平土圧の時刻歴データは、まずフーリエ変換により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・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。その後フーリエ逆変換により時刻歴データに変換した。なお、波高および海底面に作用する水圧変動は直接計測していないため、微小振幅波理論によりuw0およびtw0の水圧データから逆解析により求めた。

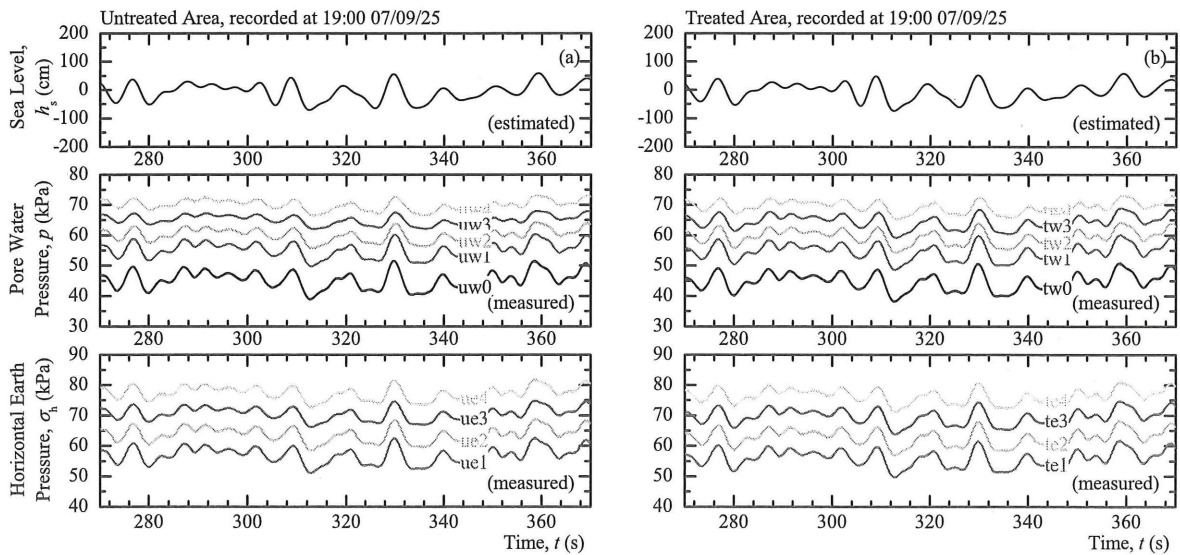


図-10 海底地盤の対波浪応答の時刻歴；(a) 透水性コラムなし、(b) 透水性コラムあり

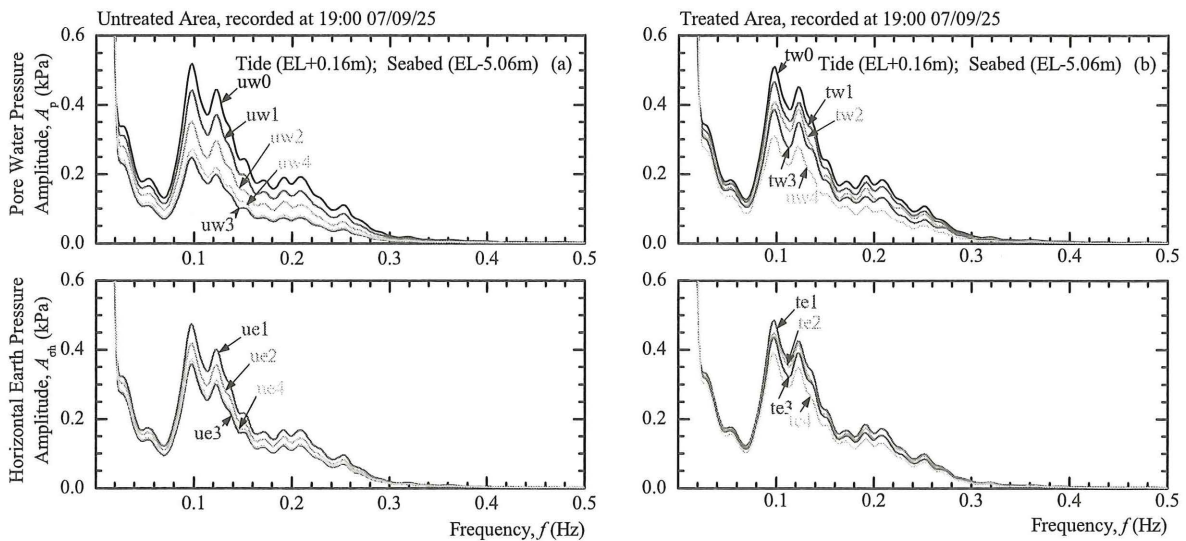


図-11 海底地盤の対波浪応答の周波数特性；(a) 透水性コラムなし、(b) 透水性コラムあり

(2) 海底地盤の対波浪応答特性

2007年9月25日19:00に記録した海底地盤応答の典型的な時刻歴を図-10に示す。一番上の図は微小振幅波理論により算出した海面変動、中間の図は海底面および海底地盤内の（間隙）水圧、一番下の図は水平土圧を表わしている。図より、間隙水圧の変動が深さとともに小さくなっており、水平土圧の変動にも同様の傾向が見られる。図-11には図-10に示した時刻歴の周波数特性の代表例を示している。観測した応答は、周波数0.09Hzから0.14Hzで卓越している。また、どの周波数においても海底面に作用した水圧は深さとともに小さくなっているが、透水性コラムありの地点では深さによる間隙水圧変動の振幅の差が小さくなっていることが分かる。

図-12に、周期10.1s、6.01s、3.01sにおける間隙水圧変動振幅の深さ方向分布を示す。間隙水圧変動の振幅は海底面の水圧変動の振幅で正規化している。計測日時の異なる4回分をプロットしているが、計測日時によるばらつきは小さい。同図には、海底地盤の波浪応答パラメータを推定するために、観測結果を式(6)の数式解を用いてフィッティングした結果も実線で示している。

フィッティングは以下の手順で行った。

- 1) 透水性コラムなしの地点：波浪応答パラメータのうち B 値の最適値を定め、 h_v 値を所定の範囲で徐々に変化させながら最良の近似状態となる値を見つける。
- 2) 透水性コラムありの地点：透水性コラムは海底地盤の透水性 (h_v 値) を改善し B 値は本質的には変化しないと考えられるので、透水性コラムなしの地点の B 値を採用し、 h_v 値を所定の範囲で徐々に変化させながら最良の近似状態となる値を見つける。

ただし、透水性コラムなしの地点での uw3 のデータは、種々の観点（フィルターの不調など）から信頼性が低いと判断してフィッティングには考慮していない。また、透水性コラムなしの地点での tw4 のデータは、透水性コラムを貫入した約 1.4m までの範囲よりも深い位置にセンサーがあるために、このデータを排除してフィッティングしている。表-3にはこのようにして得た海底地盤の応答パラメータを示しているが、透水性コラムの効果により地盤の全体的な透水性が改善し、 h_v 値が透水性コラムなしの地点の 4 分の 1 まで減少している。これは透水性が 4 倍に改善されたことを意味する。

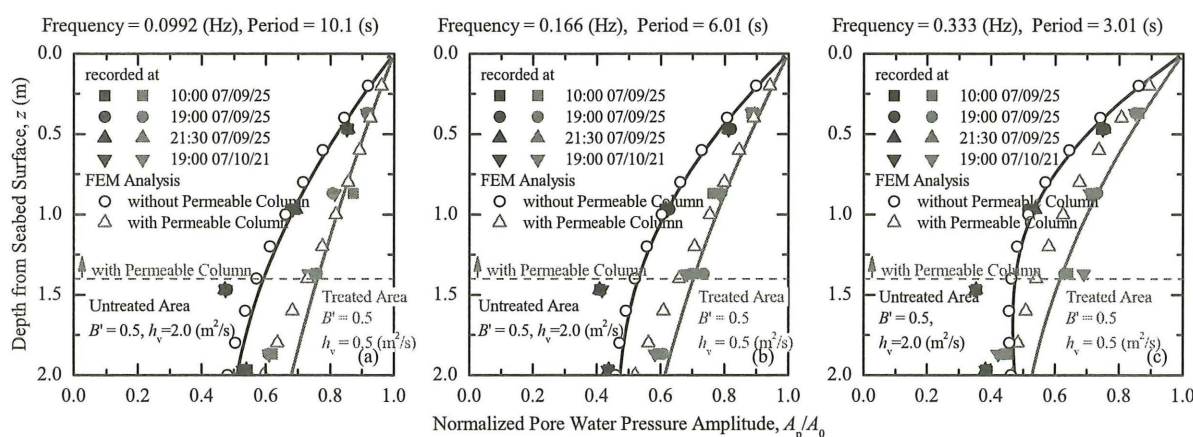


図-12 深さ方向の過剰間隙水圧変動振幅の分布
(a) 周期 10.1s、(b) 周期 6.01s、(c) 周期 3.01s

表-3 フィッティングによる海底地盤の応答パラメータの推定結果

	未対策領域 (透水性コラムなし)	対策領域 (透水性コラムあり)
B	0.50	0.50
h_v (s/m ²)	2.0	0.50

(3) 透水性コラムの効果

図-12 に、有限要素法による透水性コラムを考慮した数値解析の結果も併せて示している（白抜きの記号）。図-13 (a)には透水性コラムを挿入した場合の海底地盤の形状と定義を示している。有限要素法では図示のよう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 を解析対象としてメッシュを作成した。解析では、透水性コラムの長さ $L_{pc} = 1.4\text{m}$ 、直径 $D_{pc} = 0.2042\text{m}$ 、間隔 $W_{pc} = 1.5\text{m}$ としている。 L_{pc} と W_{pc} は観測条件に合わせて、 D_{pc} は解析メッシュにおける正方形コラムの一辺の長さがコラム 1 本の周長の半分になるよう設定している。海底地盤の透水性と間隙流体の圧縮性は波浪応答パラメータの推定結果（表-3）に準拠し、それ以外に必要な材料物性は表-4 に示すとおりである。図では作用させる浪荷

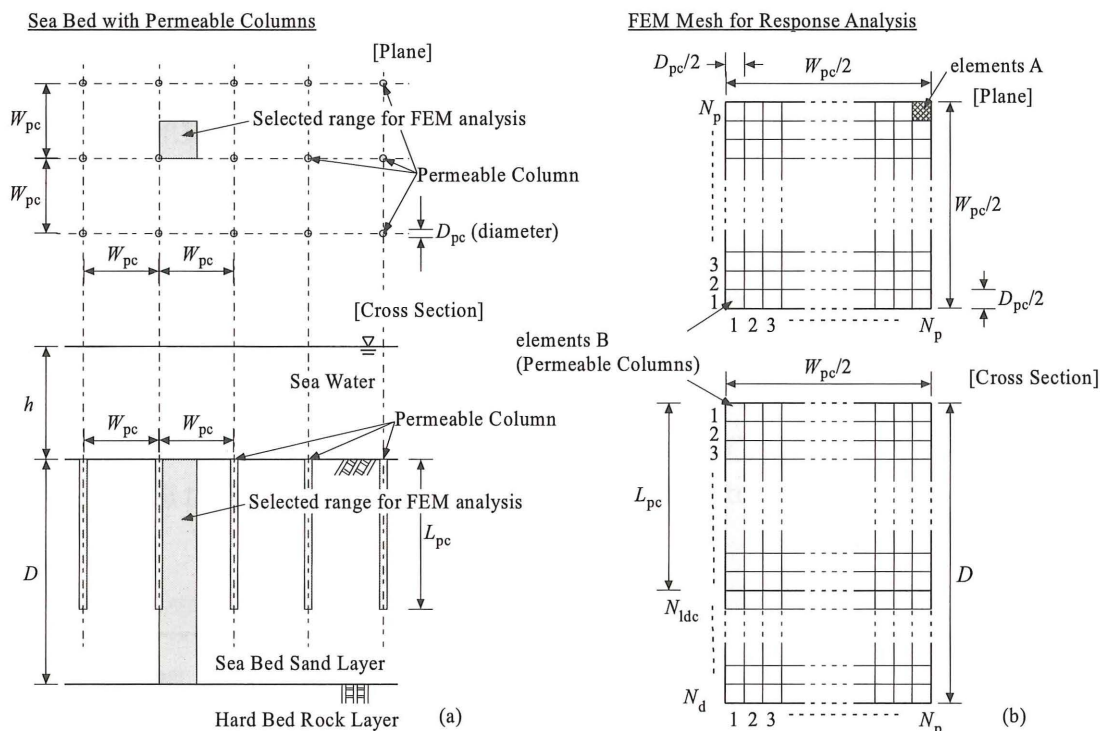


図-13 透水コラムを設置した水平海底地盤の三次元解析
 (a) 透水性コラムを配置した海底地盤、(b) FEM メッシュ

重の周期をそれぞれ 10.1s、6.01s と 3.01s とした場合の、領域の中央 (FEM メッシュでは element A) での間隙水圧変動の振幅を浪荷重の振幅で正規化して示している。卓越周期に近い 10.1s や 6.0s では観測値と計算結果はよく一致しているが、周期が短い 3.0s の場合には解析よりもやや大きな効果が計測で得られている。

「海底地盤内の鉛直有効応力が負になること ($|\Delta\sigma_z| > (\rho_s - \rho_w)gz$)」を条件として、海底地盤が不安定化する深さ (液化化深さ) を、波高 H をパラメータとして計算した結果を図-14 に示している。図示のように、透水性コラムにより海底地盤が安定化する傾向が明らかに見られる。すなわち、透水性コラムがなければ波高 10m で約 2.5m 程度の深さまで不安定化すると考えられるが、本研究のような仕様の透水性コラムを設置すれば不安定化をほぼ防ぐことが可能であるといえる。

表-4 作用する波浪条件

波浪パラメータ	
H : 波高 [進行波] (m)	6.0
d : 水深 (m)	15.0
L : 波長 (m)	109.1
p_0 : 海底面に作用する圧力 (kN/m ²)	40.0
T : 波浪の周期 (s)	10.0

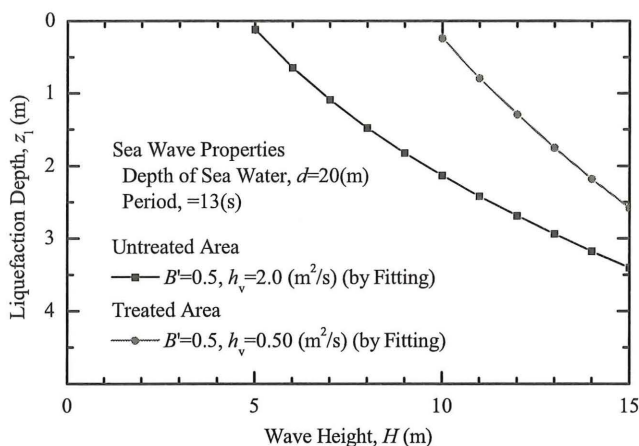


図-14 透水性コラムの有無と海底地盤の不安定化深さ

5. おわりに

間隙水圧計と土圧計を装着した観測用ロッドを開発し、北海道石狩湾新港で海底地盤の対波浪応答挙動の観測により特殊な繊維を用いたジオシンセティックスに分類される透水性コラムの効果を検証した。データの分析と解析により、以下のようなことを明らかにすることができた。

- 観測により得られた間隙水圧変動データを周波数分析し、各周波数における間隙水圧変動の振幅の深さ方向分布を、単純化した解析解でフィッティングすることにより、海底地盤の対波浪応答を決定する波浪応答パラメータを推定することができた。波浪応答パラメータで透水性コラムの効果の評価すると、観測を行った海底地盤の条件では、海底地盤の透水性を4倍に改善したことになることが分かった。
- 観測した海底地盤の対波浪応答挙動の比較検討より、透水性コラムによって海底面と海底地盤内の間隙水圧変動の差が顕著に小さくなることが確認された。すなわち、透水性コラムを通じて間隙水圧変動が地盤中により良く伝播されるために、所定深さでの間隙水圧変動そのものは大きくなるが、動水勾配および浸透力は小さくなるため、海底地盤を波浪に対して安定化させることができるといえる。
- 透水性コラムによる海底地盤安定化効果は、有限要素法による3次元条件での解析によって定量的に評価することが可能であることを示した。観測を行った海底地盤の条件では、想定した波高10mの波浪の下では海底地盤が2.5m程度液状化して不安定化すると考えられるが、透水性コラムの挿入によりこの不安定化をほぼ防止できることが分かった。

参考文献

- 1) Oka, F., Yashima, A., Miura, K., Ohmaki, S., and Kamata, A.: 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, 1995.
- 2) Zen, K., Yamazaki, H.: Field Observation and Analysis of Wave-induced Liquefaction in Seabed, *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.161-179, 1991.
- 3) 浅原信吾, 三浦均也, 大塚夏彦, 田中隼矢: 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*, Vol.54, 土木学会, pp.966-970, 2007.
- 4) Biot, M. A.: General Theory of Three-Dimensional Consolidation, *Journal of Applied Physics*, Vol.12, pp.155-164, 1941.
- 5) 三浦均也, 浅原信吾, 大塚夏彦, 上野勝利: 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, 2004.
- 6) 土木学会: 海岸波動, pp.430-503, 1994.