

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

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

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

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 (Δu_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 (Δp_{fz}) と軸方向の成分 (Δp_{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 (Δp_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 (Δp_{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 (Δp_{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。

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

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

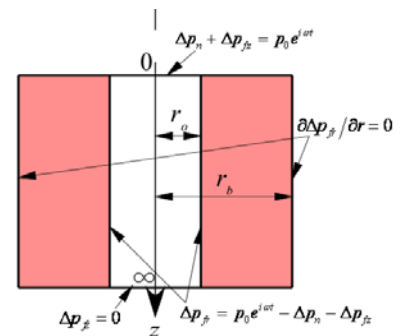
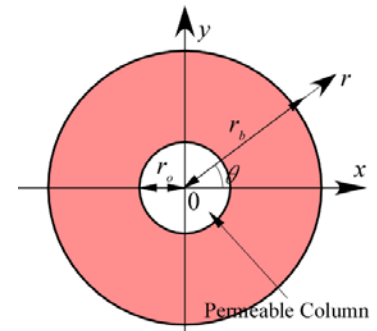


図-11 軸対象条件の模式図

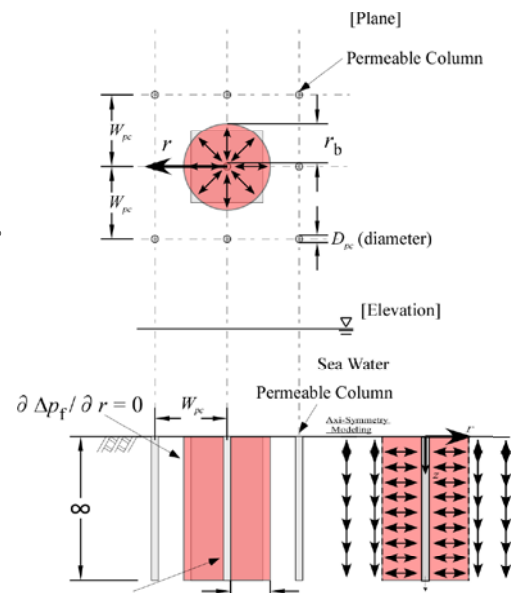


図12 透水性コラムの格子状配置

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⁸⁾

材料定数	緩い砂	透水性コア (FEM)
ρ : 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}

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 Δp 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

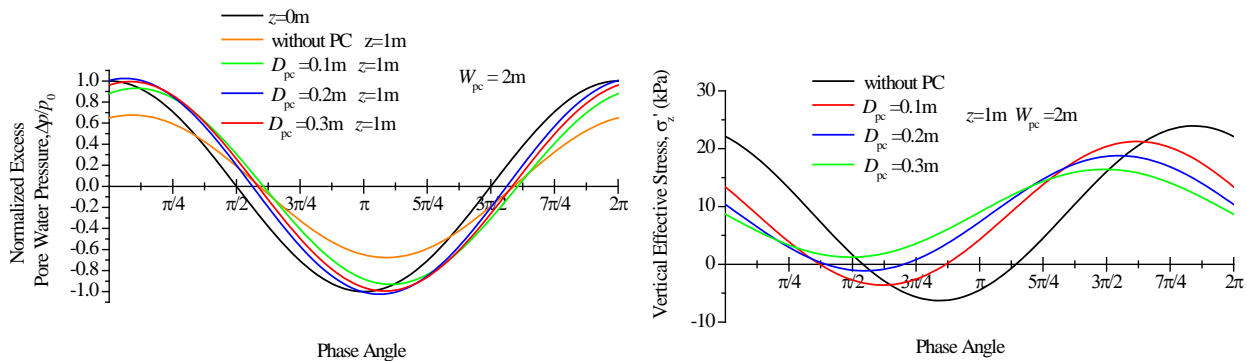


図13 正規化過剰間隙水圧と有効応力の変動特性

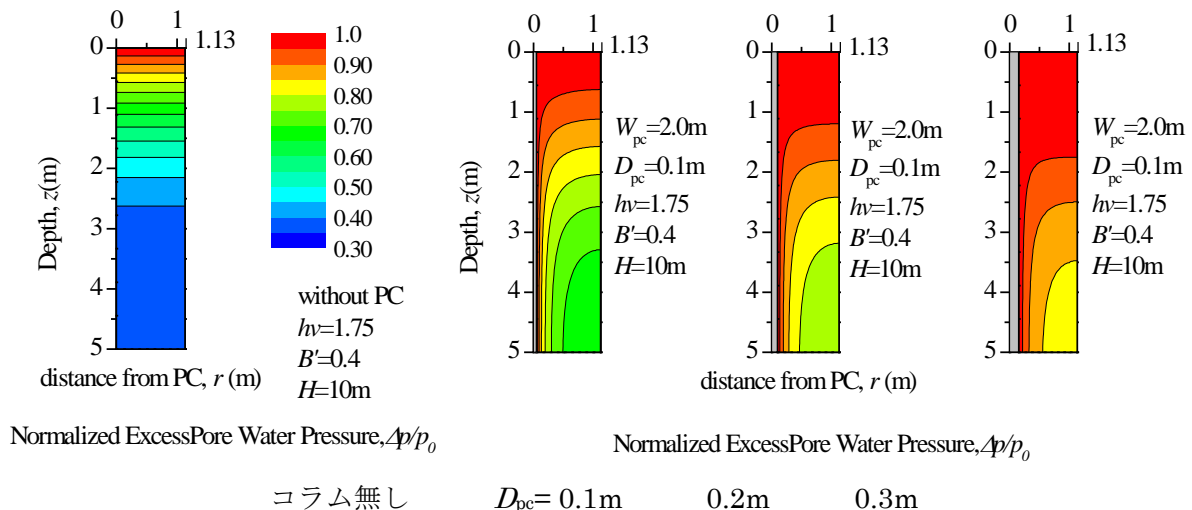


図 14 正規化した過剰間隙水圧の円直断面分布 ($W_{pc}=2m$)

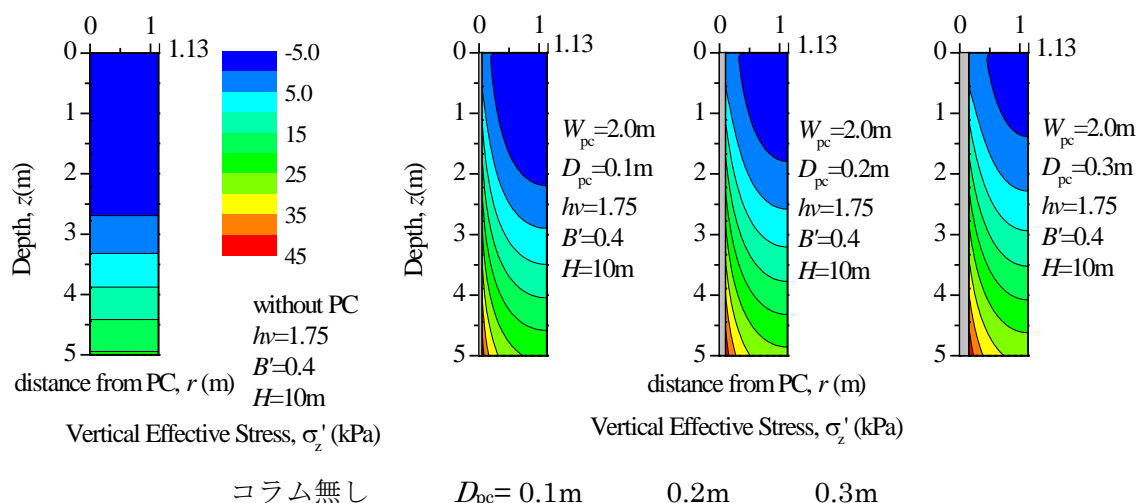


図 15 鉛直有効応力の分布 ($W_{pc}=2m$)

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.