

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1258 September 2012

透水性コラムを用いた海底地盤の安定化工法に関する検討

山崎 浩之
後藤 佑介
三浦 均也
大塚 夏彦
小浪 岳治

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

| | |
|----------------------------|----|
| 要 旨 | 3 |
| 1. まえがき | 4 |
| 2. 透水性コラムと対策原理 | 4 |
| 2.1 対策原理 | 4 |
| 2.2 透水性コラムおよび施工性 | 5 |
| 3. 現地観測での効果確認 | 5 |
| 3.1 観測概要 | 5 |
| 3.2 観測結果 | 6 |
| 3.3 観測結果の数式解による解析 | 8 |
| 4. 透水性コラムの効果に関する感度分析 | 12 |
| 5. 結論 | 16 |
| 6. あとがき | 16 |
| 参考文献 | 16 |
| 付録A | 16 |
| 付録B | 17 |
| 付録C | 18 |

Study on Improvement Method using Permeable Column for Seabed Stability

Hiroyuki YAMAZAKI*
Yusuke GOTOH**
Kinya MIURA***
Natsuhiko OTSUKA****
Takeharu KONAMI*****

Synopsis

It is well known that seabed exhibits instable behaviors such as liquefaction by losing its effective stress due to wave actions. This paper describes a study on the countermeasure using permeable column for seabed stability against ocean wave actions.

The effectiveness of the permeable column is investigated by field test where the permeable columns are installed and the pore pressure responses against wave actions are observed. The accuracy of analytical solution for pore pressure response of seabed with permeable columns is examined by using the field test data. Parameter studies for the permeable column are conducted using the analytical solution.

It is revealed by the field test that the stability of seabed is enhanced by using the permeable column and that the numerical solution has a sufficient accuracy. Parameter studies have shown some conditions for effective use of the permeable column.

Key Words: permeable column, liquefaction, ocean wave, seabed, analytical solution, field test.

* Director for Special Research
** Researcher, Soil Dynamics Group, Geotechnical Engineering Field
*** Toyohashi University of Technology
**** North Japan Port and Harbor Consultant Co. Ltd
***** Okasan Livic Co. Ltd

透水性コラムを用いた海底地盤の安定化工法に関する検討

山崎 浩之*
後藤 佑介**
三浦 均也***
大塚 夏彦****
小浪 岳治*****

要 旨

海底地盤は、波浪作用時に有効応力が減少し、液状化が発生するなど、地盤の安定性が低下することが知られている。本研究は、波浪作用時の海底地盤の安定性を確保するために、透水性コラムを地盤内に敷設して対策する工法について検討したものである。

検討は、現地海底地盤に透水性コラムを敷設し、地盤内の間隙水圧を調べ、透水性コラムの効果を調べている。また、透水性コラムを敷設した場合の間隙水圧応答を算定するための数式解の精度を、現地観測結果を用いて確認した。さらに、数式解を用いて、透水性コラムの効果のパラメータ解析を行った。

以上の検討から、透水性コラムを用いることにより波浪に対して海底地盤の安定性が向上すること、数式解より得られる結果が適切な精度を有していること、透水性コラムの効果が高くなる透水性コラムに適した条件があることを確認した。

キーワード：透水性コラム，液状化，波浪，海底地盤，数式解，現地試験

* 特別研究官

**地盤研究領域 動土質研究チーム研究員

***豊橋技術科学大学

****北日本港湾コンサルタント

*****岡三リビック

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5054 Fax：046-844-0618 e-mail:yamazaki@pari.go.jp

1. まえがき

波浪により海底地盤が液状化、あるいは液状化にまでは至らないが地盤の有効応力が低下することは広く知られている¹⁾。波浪による液状化のメカニズムは2種類あり、1つは地震時の液状化現象と同じで、繰返しせん断により発生する負のダイレイタンスに起因したものである。もう一つは、海底面に作用する水圧変動と海底地盤内で応答する間隙水圧の差によって生じる上向き浸透圧（過剰間隙水圧）に起因するものである。前者の液状化は締まった地盤では生じないが、後者の液状化は地盤密度にはあまり依存せずに発生する。透水性コラムを用いた液状化対策は、主に後者のメカニズムに対して開発されたもので、地盤内の透水性を向上させ、海底面の水圧変動と地盤内の応答間隙水圧の差を小さくするものである。

本論文は、透水性コラムを波浪による海底地盤の液状化対策として用いた場合の効果について検討したもので、北海道白老港での現地試験と波浪応答解析のための数式解により、その対策効果を検証している。

2. 透水性コラムと対策原理

ここでは、透水性コラムの特性、適用および波浪作用時の地盤内の有効応力の変化についての数値計算例について概説する。

2.1 対策原理

著者らは、波浪作用下の海底地盤の安定性向上のために、透水性コラムを利用することを既に提案している²⁾。透水性コラムによる対策原理は、海底地盤の波浪による液状化、あるいは有効応力の低下のメカニズムを以下のように考えたものである。

図-1に示されるように、海底面上には波浪による水圧変動が作用する。この水圧変動は、海底地盤が完全に飽和していればそのままの水圧変動で伝わる。しかし、微小な気泡が含まれている場合には、気泡が収縮あるいは膨張することにより、水圧変動は深度方向に減少しながら、かつ位相遅れを持って伝搬する。そのため、海底面の水圧変動と海底地盤中の間隙水圧変動に差が生じ、鉛直方向に浸透圧の変動が発生する。海底面の水圧変動が谷の時には、海底地盤の間隙水圧は海底面の水圧よりも大きくなり、上向きの浸透圧となり、地盤の有効応力は低下する。水圧変動が大きい場合には、上向き浸透圧が有効上載圧よりも大きくなり液状化の発生となる。

上記の液状化発生、あるいは有効応力低下は、地盤中

への水圧伝搬特性が悪いために起こるのであり、伝播特性を改良すれば、浸透圧を押さえることができる。その方法の一つとして、地盤内にドレーンを打設して、伝播特性を高めることが考えられる。

図-2は、ドレーンによる対策原理を示したものである。ドレーンを打設しない場合には、図-2の左に示すように、海底面に作用する水圧変動の伝播距離は、海底面までの距離となり、深くなるほど水圧変動は小さくなり、また位相差も大きくなり、浸透圧が大きくなる。図-2の右に示したのが、ドレーンを打設した場合のもので、ドレーンの透水性が高い場合には、ドレーン深度方向に海底面の水圧変動は減衰、位相差がほとんどなく伝搬する。地盤の深い位置の土要素への伝搬距離はドレーンまでの距離となり、ドレーンの無い場合と比較して大幅に伝播特性が改善される。したがって、海底面と海底地盤中の水圧変動の差は小さくなり、浸透圧の発生が抑制されることになる。以上が、ドレーンによる対策原理である。

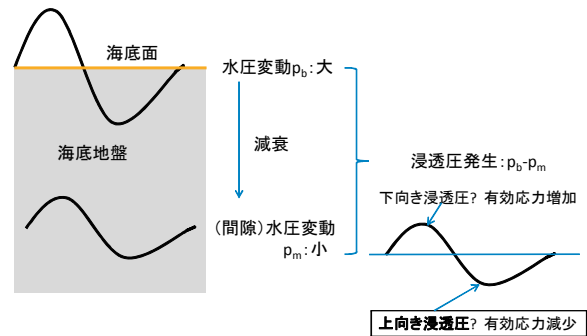


図-1 液状化の発生メカニズム

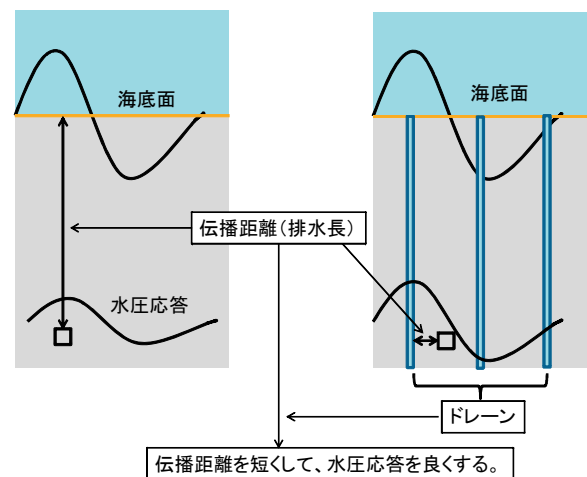


図-2 ドレーンによる対策原理

2.2 透水性コラムおよび施工性

透水性コラムは、写真-1に示すポリプロピレンとポリエチレンできた中空円筒（外形65mm，内径30mm）のもので、図-3がマウンド下部に適用した場合のイメージである。表-1に後述の計算例で用いた透水性コラムのパラメータを示す^{3), 4)}。表-1の透水係数は透水性コラムの中空部分を除いた実部の透水係数で，中空部分を含めたコラム全体の透水係数はさらに大きな値となるが，安全側を考慮して表-1の値を用いるのが適当である。

透水性コラムの海底地盤への貫入は，写真-2に示すようにウォータージェットを補助として用いることにより行われる。後述の現地試験では，ボーリングマシンをベースマシンとして，静的な载荷により貫入を行っている。ボーリングロッドの取り回しに時間を要したため，コラム材1本貫入させるための合計作業時間は，おおよそ11分程度となった。なお，陸上での予備実験および現地試験から，自重程度の押し込み力で貫入可能であることが確認できたため，押し込み力を与えられるロッドによる固定支持ではなく，ワイヤーによる吊り下げ支持でも施工可能であることがわかった。白老港における現地試験の後に実施した試験では，ワイヤーによる吊り下げ支持によって，施工時間の短縮が可能になることを確認した。



写真-1 透水性コラム

表-1 透水性コラムの物性値

| 湿潤密度 | ヤング率 | 透水係数 |
|------------------|-------------------|----------------------|
| t/m ³ | kN/m ² | m/s |
| 1.75 | 81000 | 2 × 10 ⁻³ |

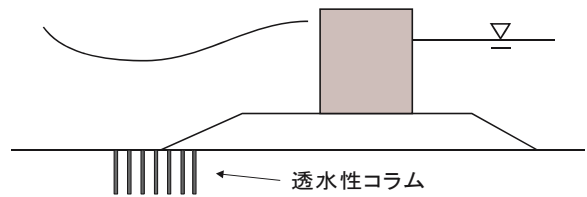


図-3 透水性コラムの適用例

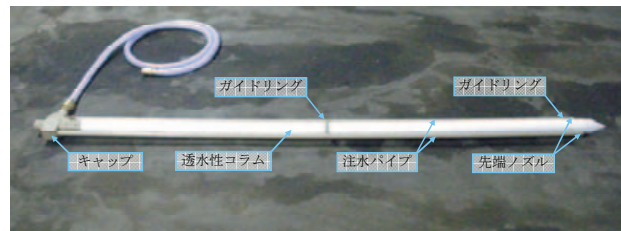


写真-2 ウォータージェットと透水性コラム

3. 現地観測での効果確認

著者らは，透水性コラムを用いた工法の，海底地盤の波浪に対する安定化効果を現地観測で確認している。ここでは，この現地観測結果について説明する。

3.1 観測概要

現地観測は，北海道の白老港（付録A参照）で実施された^{3), 5)}。図-4は，試験施工箇所の配置図，断面図である。透水性コラムは直径6.5cm，長さ2.25m，護岸マウンド法先から8mの沖合に設置された。透水性コラムの配置は3本×2列で約1mの間隔である。コラム設置位置および未対策域に観測ロッドを設置し，海底地盤中の間隙水圧を計測した。

観測地点の計測時の水深は，コラム設置地点は5.1m(潮位+1.35m)，非設置地点は5.8m(潮位+1.35m)であった。間隙水圧計は，コラム設置地点，非設置地点に深さ方向に5つ設置した。海底面からの設置深さは，コラム設置地点で，GL.+0.37，-0.63，-1.13，-1.63，-2.13mで，最も上のセンサーは海底面より約40cm上の海中である。非設置地点では，GL.-0.02，-1.02，-1.52，-2.02，-2.52mで最も上のセンサーが海底面位置である。以降では，最も上に設置されたセンサーでの計測値を海底面での水圧とする。

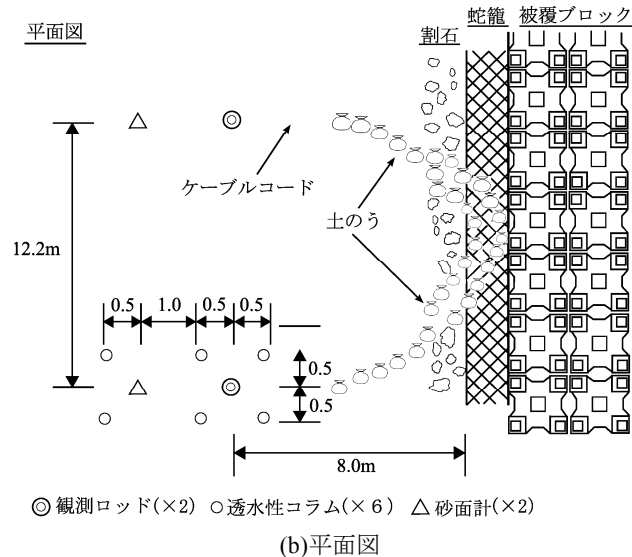
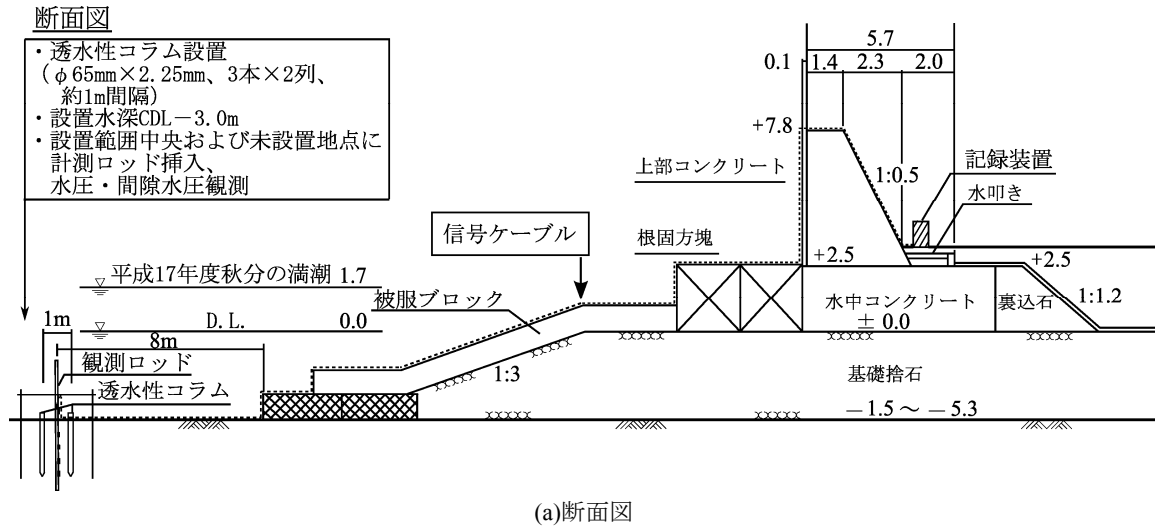


図-4 現地観測状況

3.2 観測結果

(1) 変動水圧

図-5は、透水性コラム設置地点、非設置地点の変動水圧の時刻歴で、変動水圧が最も大きな時間のものである。変動水圧とは間隙水圧の応答値から静水圧分を差し引いたものである。振幅の大きな、図-5(a)のGL.+0.37mの変動水圧(海底面の変動水圧)の応答振幅は約±3kN/m²で、周期は約6秒である。

なお、観測地点の水深は約5mであるので、次式の水圧力の算定式⁶⁾を用いて、海底面の変動水圧±3kN/m²から波高を推定すると約80cmが得られる。

$$p = K_p \cdot \gamma_w \cdot \eta \quad (1)$$

$$K_p = \frac{\cosh(k_w(h+z_s))}{\cosh(k_w \cdot h)} \quad (2)$$

ここに、 p は水圧、 K_p は圧力係数、 γ_w は海水の単位体積重量、 η は波による平均水面からの水位上昇、 k_w は波数($2\pi/L$: L は波長)、 h は水深、 z_s は平均水面から上を正にとった鉛直座標である。

図-5から、変動水圧は深度ごとに異なり、位相差があることがわかる。

図-6は、海底面の水圧 p_b が最大、および最小になった時の変動水圧 p_m の深度分布を示したものである。図-6から水圧の応答(変動水圧)はコラムの有無にかかわらず、

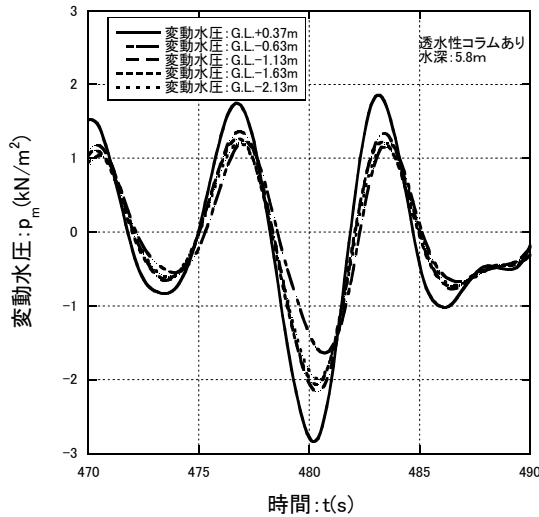


図-5(a) 変動水圧の時刻歴 (コラムあり)

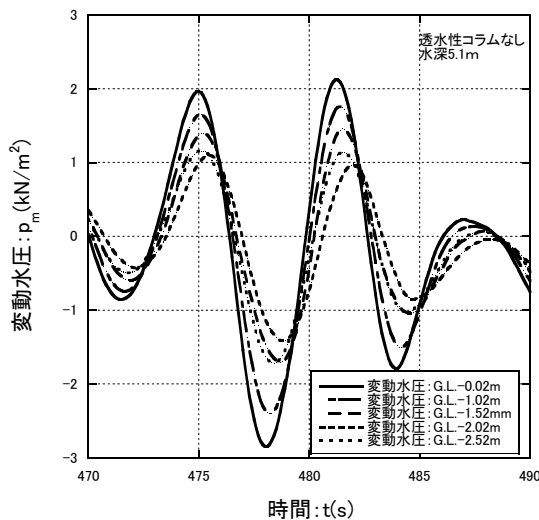


図-5(b) 変動水圧の時刻歴 (コラムなし)

深度が大きくなると小さくなる傾向にある。

(2) 有効応力の変動

図-7は、海底面の水圧 p_b と各深度の変動水圧の差(p_b-p_m)の時刻歴を調べたもので、これが浸透圧となり有効応力の変動の時刻歴に対応する。図-7には海底面の水圧変動 p_b も示してある。図-7から、(p_b-p_m)は $\pm 1\text{kN/m}^2$ 程度の振幅で変動しており、波浪の作用により海底地盤の有効応力が変動することがわかる。 (p_b-p_m) が負の領域が海底地盤中の有効応力が初期(静穏時)の有効応力よりも低下している状態で、海底面の水圧変動 p_b が負、すなわち波浪が谷の時に有効応力が低下することがわかる。図-7(a)、(b)を比較すると、「コラムなし」の方が(p_b-p_m)の深度ごとの違いが大きいことがわかる。

図-8は(p_b-p_m)の最小値の絶対値(上向浸透圧の最大値)を、深度方向に調べたもので、図中には有効単位体積重

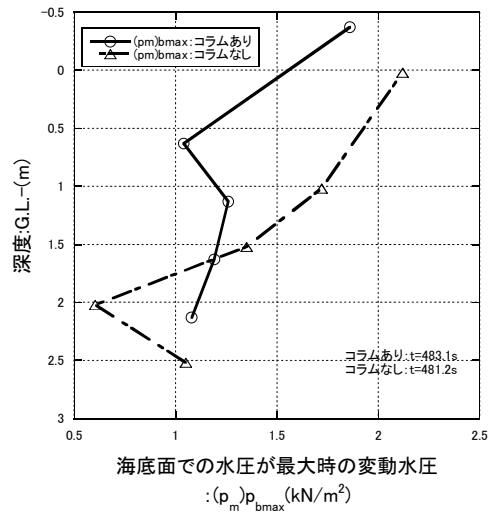


図-6(a) 変動水圧の深度分布 (海底面の水圧が最大時)

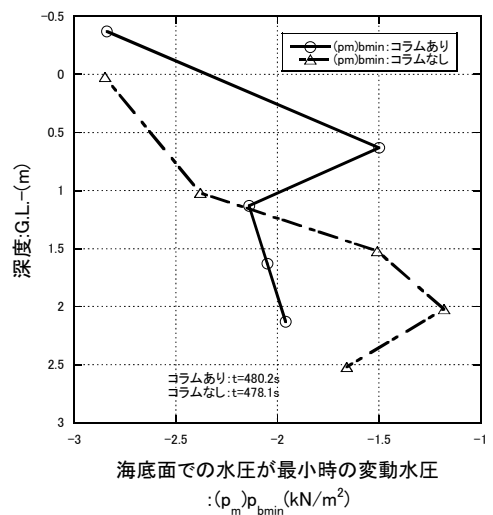


図-6(b) 変動水圧の深度分布 (海底面の水圧が最小時)

量を $\gamma=10\text{kN/m}^3$ と仮定して求めた初期有効上載圧を直線で示している。上向き浸透圧が初期有効上載圧を超えた場合が液状化となり、液状化の条件は下式で表される¹⁾。

$$\sigma_{z0}' + (p_b - p_m) \leq 0 \quad (3)$$

ここに、 σ_{z0}' は初期有効上載圧(静穏時の有効上載圧)である。

図-8において、各プロットが初期有効上載圧を超えたところが式(3)で示した液状化の状態になっているところである。図-8から、「透水性コラムなし」と「透水性コラムあり」のいずれも水圧差は初期有効上載圧を超えておらず、液状化に至っていないことが分かる。これは、観測時の海底面での水圧変動が液状化を引き起こすほどの大きさでなかったからであると考えられる。また、図-8

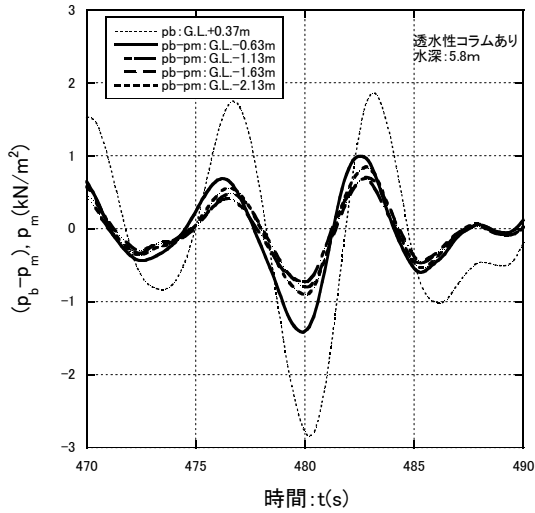


図-7(a) 水圧差(p_b-p_m)の時刻歴 (コラムあり)

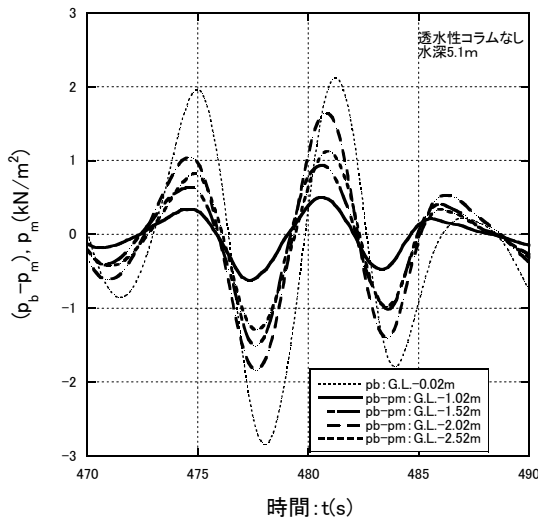


図-7(b) 水圧差(p_b-p_m)の時刻歴 (コラムなし)

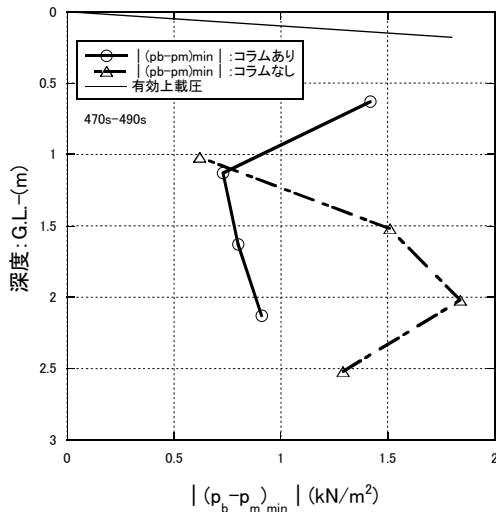


図-8 上向き浸透圧の最大値 $|p_b-p_m|_{\min}$ の深度分布

の「コラムあり」のプロットにおいて、GL.-0.63mのプロットが他の3つのプロットと比べて突出して大きな上向き浸透圧になっている。これは異常値と考えられ、原因としては、GL.-0.63mの間隙水圧計に気泡が付いており、これにより水圧応答が悪くなったことが考えられる。

「コラムあり」と「コラムなし」を比較すると、「コラムあり」の方が有効応力の低下が小さいことが分かる。したがって、コラムを設置したことにより有効応力の低下を低減できたといえる。

3.3 観測結果の数式解による解析

著者らは、海底地盤面に正弦波の水圧変動が作用した場合の、海底地盤中の間隙水圧応答の数式解を既に示している^{8), 9)}。ここでは、数式解の精度を前述の実測値を用いて検証する。数式解は、海底地盤と透水性コラムの透水性コントラスト α 、水理圧密定数 h_v 、一次元状態でのSkemptonの間隙水圧係数 B' の3つのパラメータが必要で、このうち h_v と B' の2つを海底地盤のみの場合について実測値から同定する。その後、透水性コラムの物性値から α を算定し、透水性コラムを用いた場合の海底地盤の応答を計算することができ、これを実測値と比較することにより数式解の検証を行う。

(1) 数式解

数式解は、解析対象となる海底地盤の層厚が波浪の波長と比較して十分に短いと考え、円筒座標を用いた一次元応答で導かれている。数式解については、その詳細は付録Bに示し、ここでは必要となるパラメータについて説明する。

地盤パラメータは、海底地盤と透水性コラムの透水性コントラスト α 、水理圧密定数 h_v 、一次元状態でのSkemptonの間隙水圧係数 B' で、これらは以下の式で表される。

$$\alpha = \frac{k_s}{k_{pc}} \quad (4)$$

$$(h_v)_{pc} = \frac{\rho_w \cdot g}{k_{pc} \cdot (E_v)_{pc} \cdot (E_f)_{pc} / ((E_v)_{pc} + (E_f)_{pc})} \quad (5)$$

$$= \frac{1}{(c_v)_{pc} \cdot B'_{pc}}$$

$$(h_v)_s = \frac{\rho_w \cdot g}{k_s \cdot (E_v)_s \cdot (E_f)_s / ((E_v)_s + (E_f)_s)} \quad (6)$$

$$= \frac{1}{(c_v)_s \cdot B'_s}$$

$$B'_{pc} = \frac{(E_f)_{pc}}{(E_v)_{pc} + (E_f)_{pc}} \quad (7)$$

$$B'_s = \frac{(E_f)_s}{(E_v)_s + (E_f)_s} \quad (8)$$

$$(E_v)_{pc} = \lambda_{pc} + 2 \cdot G_{pc} \quad (9)$$

$$= \frac{E_{pc}}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_{pc})}$$

$$(E_v)_s = \lambda_s + 2 \cdot G_s \quad (10)$$

$$= \frac{E_s}{3 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_s)}$$

ここに、下添字pcは透水性コラム、下添え字sは海底地盤を表し、 k は透水係数、 E_v は透水性コラムあるいは地盤の体積弾性係数(側方拘束一次元状態での)、 E_f は間隙水(気泡を含む)の体積弾性係数、 ρ_w は水の密度、 g は重力加速度、 c_v は圧密係数、 λ はラーメの定数、 G はせん断弾性係数、 E はヤング率、 ν はポアソン比である。

(2) パラメータの同定

海底地盤部のパラメータ(h_v)_s、 B'_s は観測データから逆解析で求めることができる。ここでは、付録Cに示した方法⁴⁾、⁹⁾で2つのパラメータを同定した。その結果、表-2に示すように、(h_v)_s=0.34、 B'_s =0.27が得られた。

透水性コラムのパラメータ(h_v)_{pc}、 B'_{pc} については以下のように設定した。

まず、 B'_{pc} は式(11)から求めることとし、そのためには間隙水の体積弾性係数(E_f)_{pc}と透水性コラムの体積弾性係数(E_v)_{pc}を設定する必要がある。 $(E_v)_{pc}$ については、別途実施された透水性コラムの一軸圧縮試験により E_{pc} =82000kN/m²が得られており、ポアソン比を ν_{pc} =0.35と仮定して、式(9)から $(E_v)_{pc}$ =90000kN/m²が得られる。 $(E_f)_{pc}$ については、周囲の海底地盤の間隙水の体積弾性係数(E_f)_sと等しいと考え(E_f)_sの値とする。 (E_f) _sは、 B'_s から式(8)を用いて逆算して求めることができるが、海底地盤の体積弾性係数(E_v)_sが必要である。体積弾性係数(E_v)_sは体積圧縮係数mvの逆数である。体積圧縮係数は、地盤のN値が20程度と密な地盤であったこと、および善らのデータから、 m_v =1×10⁻⁵m²/kNと小さな値であると考え、(E_v)_s=1×10⁵kN/m²となる。 B'_s =0.27と(E_v)_s=1×10⁵kN/m²を式(8)に代入して、(E_f)_s=3.5×10⁴kN/m²が得られ、(E_f)_{pc}=3.5×10⁴kN/m²となる。式(7)に(E_f)_{pc}=3.5×10⁴kN/m²、(E_v)_{pc}=94000kN/m²を代入し、 B'_{pc} =0.27が得られる。なお、 B'_s と B'_{pc} が等しくなったが、これは海底地盤と透水性コラムの体積弾性係数がほぼ同じ値になったからである。

次に、(h_v)_{pc}は式(9)から求めるので、前述に加えて $\rho_w \cdot g$ 、 k_{pc} が必要になる。 $\rho_w \cdot g$ は海水なので $\rho_w \cdot g$ =10.3kN/m³とし、

透水係数については別途透水試験が行われており、 k_{pc} =2×10⁻³m/sが得られている。これらを式(5)に代入して、(h_v)_{pc}=0.20が得られる。

最後に、透水性コントラスト α は、海底地盤と透水性コラムの透水係数の比であるので、海底地盤の透水係数 k_s が必要になる。 k_s は、(h_v)_s、 $\rho_w \cdot g$ 、(E_v)_s、(E_f)_sが既に定まっているので、式(6)を用いて求めることができ k_s =1.1×10⁻³m/sが得られる。したがって、透水性コントラストは α =0.54となる。

図-9に上記のパラメータ同定の概略と表-2に各パラメータ、定数の一覧を示す。

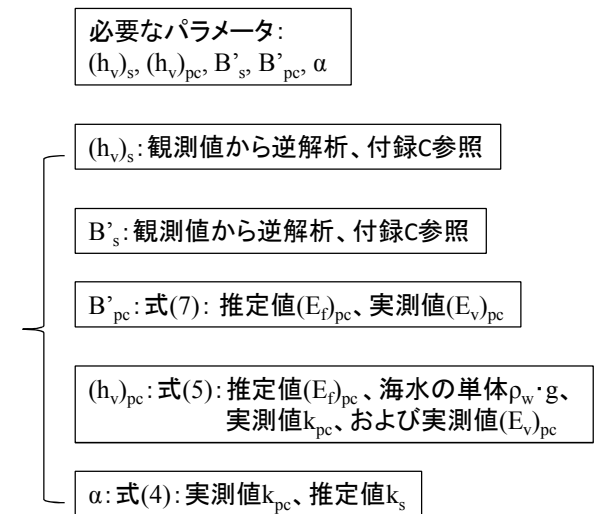


図-9 各パラメータ同定の概略

表-2 各パラメータ、定数の一覧

| 海底地盤 | (h_v) _s | B'_s | (E_f) _s kN/m ² | (E_v) _s kN/m ² | k_s m/s | α |
|--------|-------------------------|-----------|--|--|----------------------|----------|
| | 0.34 | 0.27 | 3.5×10 ⁴ | 1×10 ⁵ | 1.1×10 ⁻³ | 0.54 |
| 透水性コラム | (h_v) _{pc} | B'_{pc} | (E_f) _{pc} kN/m ² | (E_v) _{pc} kN/m ² | k_{pc} m/s | |
| | 0.2 | 0.27 | 3.5×10 ⁴ | 0.9×10 ⁵ | 2×10 ⁻³ | |

(3) 計算結果

数式解は、海底面に水圧変動が作用した場合の海底地盤の間隙水圧応答を計算できるものであるが、海底面の水圧変動が正弦波のものに対して適用できるものである。そこで、コラムで対策したものについては、図-5(a)の t =477~483sの時間の海底面の水圧変動を周期 T =6s、振幅 p_0 =2.5kN/m²の正弦波として計算した。コラムなしのものについては、図-5(b)の t =475~481sの海底面の水圧変動を周期 T =6s、振幅 p_0 =2.75kN/m²の正弦波として計算した。

図-10に数式解による計算結果を示す。図-10(a)は、コラムあり、図-10(b)はコラムなしの間隙水圧応答を計算

したものである。コラム設置ありの結果は、正方形配置の図心点のものである（以後、計算結果は正方形配置の図心点のもの）。図-10から、コラムあり、コラムなしのいずれも海底地盤の深度が深くなると応答値は小さくなり、また応答が遅れており、実測の図-5の傾向と同様である。

図-11は、図-10において海底面の水圧が最小になる時刻の間隙水圧の深度分布を、図-6の実測値と併せて示したもので、実線と○プロットがコラムありの計算値と実測値、破線と△プロットがコラムなしのものである。図-11で計算値どうしを比較するとコラムありの方が、深度方向の変動水圧の減衰が少なく、水圧応答が良く上がっていることがわかる。実測値との対応は、コラムあり、コラムなしのどちらも実測よりも計算値の方が水圧の応答は負の方へ大きくなっている。実測値にばらつきがあるが、計算結果の精度は必ずしも高いとはいえない。この原因の一つはパラメータの同定にある。パラメータの同定は、観測値のある時間帯（10分間）の水圧応答記録から得られたものの平均値的なものであり、このことが影響したと考えられる。

図-12は、図-11から浸透圧 ($p_b - p_m$) (海底面の水圧変動と間隙水圧の差) を求めたもので、なお細点線は海底面の水圧変動である。図-12から ($p_b - p_m$) は海底面の水圧変動 p_b が最小となる時間付近で極小値をとり、負の値になっており、実測データの図-7と同じである。

図-13は、図-12の時刻歴において、($p_b - p_m$) の極小値の絶対値（上向き浸透圧の最大値）を深度方向に調べたもので、コラムありが実線、コラムなしが破線である。実測値も合わせてプロットしてあり、コラムありの実測値が○プロット、コラムなしの実測値が△である。また、初期有効上載圧を細実線で示してあり、($p_b - p_m$) がこれを超えた場合が液状化である。図-13から、コラムありとコラムなしの計算値を比較すると、コラムありは上向き浸透圧が小さくなっており、コラムを設置した効果を表現できている。また、液状化はいずれの場合にも発生していない。実測値との対応は、「コラムあり」については、図-8の説明でも述べたように、G.L.-0.63mの実測値のプロットは異常値と考えられるもので、他の3つのプロットと計算値の対応は非常に良いといえる。「コラムなし」については、計算値は実測プロットのばらつきのほぼ中間にあり、計算値と実測値にほぼ対応している。「コラムなし」の実測値に対する計算値の誤差は0.5kN/m²程度で、この誤差は例えばG.L.-1mでの初期有効上載圧10kN/m²と比べると非常に小さい値であり、地盤の安定を議論する場合に問題となる誤差ではない。したがって、数式解は、波浪

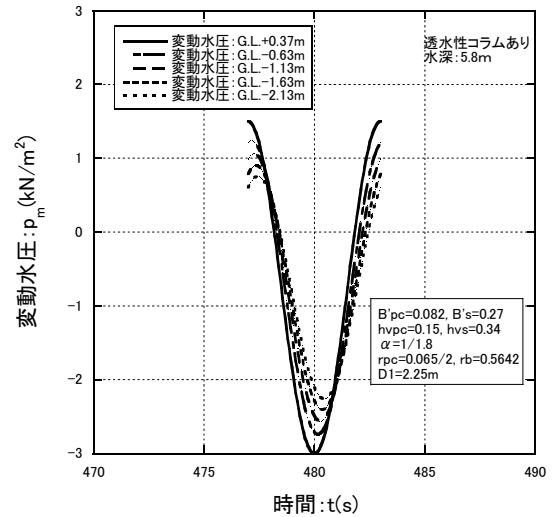


図-10(a) 変動水圧の時刻歴の計算値（コラムあり）

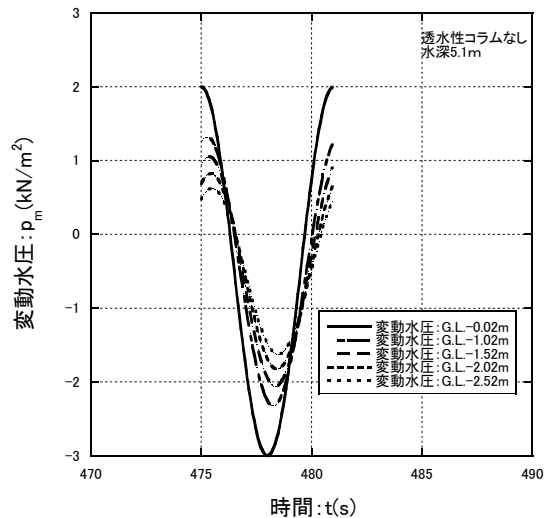


図-10(b) 変動水圧の時刻歴の計算値（コラムなし）

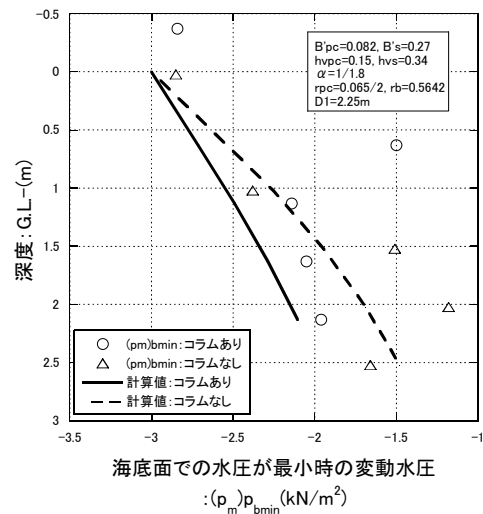


図-11 変動水圧の深度分布（計算と実測）

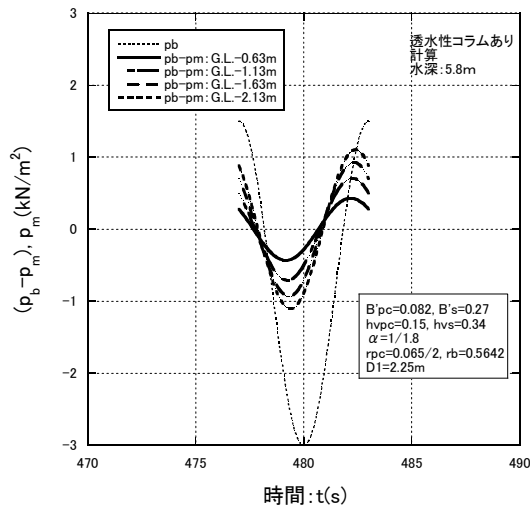


図-12(a) $(p_b - p_m)$ の時刻歴 (数式解: コラムあり)

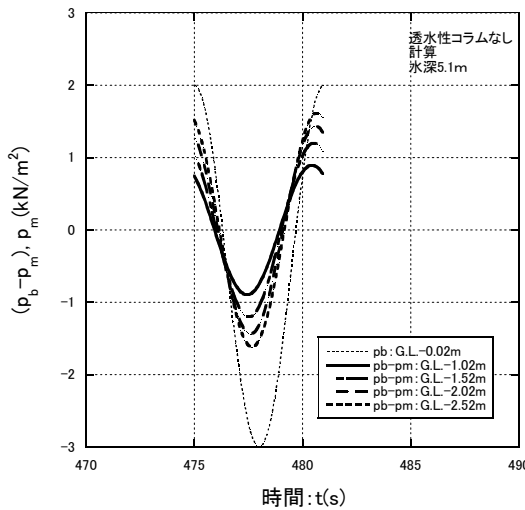


図-12(b) $(p_b - p_m)$ の時刻歴 (数式解: コラムなし)

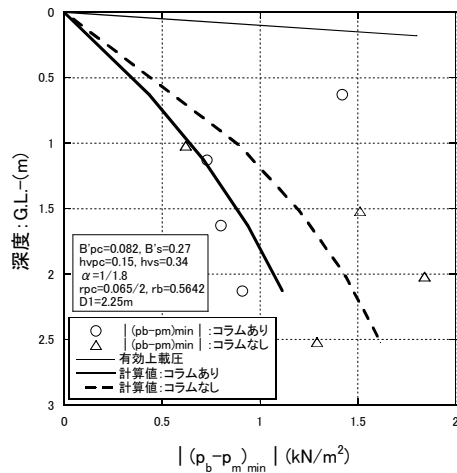


図-13 $(p_b - p_m)_{\min}$ の絶対値深度分布 (数式解と実測値)

作用時に発生する海底地盤の上向き浸透圧を適切な精度で予測できると判断できる。

(4) 砕波限界波高および高波浪条件での計算

前述の計算, および観測結果からは, コラムを設置していない箇所でも液状化の発生は確認できなかった. そこで, 観測よりも大きな波高条件で波浪による液状化解析を行う.

波浪条件は, 現地の水深とほぼ同じ $h=5\text{m}$ での, 周期が $T=6\text{s}$ における砕波限界波高とする. 砕波限界波高は, 次式⁷⁾を用いて求めた.

$$\frac{H_b}{L_0} = A \left\{ 1 - \exp \left[-1.5 \frac{\pi h}{L_0} (1 + 15 \tan^4 \theta) \right] \right\} \quad (11)$$

ここに, H_b は砕波限界波高, L_0 は波長 ($L_0=1.56T^2$), $\tan \theta$ は海底勾配, 定数 A は砕波の上限值に対しては $A=0.18$, 下限値に対しては $A=0.12$ で, ここでは $A=0.18$ とした.

この条件では, 波長が $L_0=56\text{m}$ となり, 砕波限界波高は $H_b=3.7\text{m}$ が得られた. 式(1)において $\eta=H_b/2$, $z=-h$ として海底面での水圧変動 p を求めると $p=13.5\text{kN/m}^2$ が得られる.

図-14(a)が砕波限界波高での $(p_b - p_m)$ の極小値の絶対値 (上向き浸透圧の最大値) の深度分布の数式解による推定値で, 図-14(b)は図-14(a)から求めた有効鉛直応力の深度分布である. 図-14から, 砕波限界の波高が作用しても, 現地では「コラムなし」でも液状化に到らないことがわかる.

「コラムなし」の地盤でも液状化が生じない原因の一つは, 海底地盤の透水性にあると考えられる. すなわち, 表-2で示したように, 海底地盤は, 透水係数が $k_s=1.1 \times 10^{-3}\text{m/s}$ という大きい値で, 透水性コラムの $k_{pc}=2.0 \times 10^{-3}\text{m/s}$ と大きな違いのない, 透水性の高い地盤であったからである.

そこで, 海底地盤の透水係数を1オーダー小さくして計算を行ってみた. 図-15が計算結果で, ○がコラムを設置したもの, △が設置していないものである. 図-15から, コラムを設置していない場合には深さ0.5m付近で初期有効上載圧よりも上向き浸透圧が大きくなり液状化に到っているが, コラムを設置したものでも液状化に到っているのはコラムの設置間隔が十分でないからである. そこで, 設置間隔を $1\text{m} \times 1\text{m}$ の正方形配置ではなく, $0.75\text{m} \times 0.75\text{m}$ と狭くして計算を行った. ●プロットが $0.75\text{m} \times 0.75\text{m}$ で計算を行った結果で, この場合には液状化は発生してい

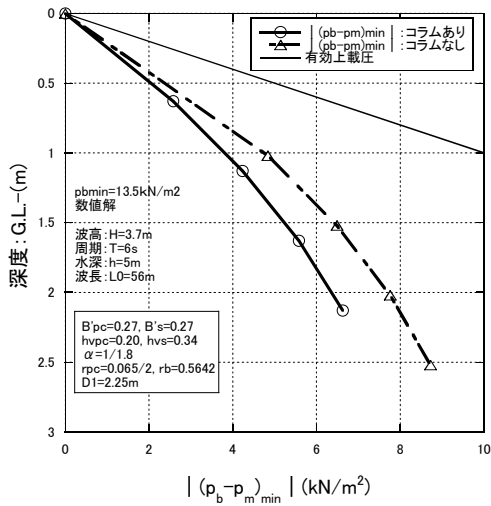


図-14(a) $(p_b-p_m)_{\min}$ の絶対値深度分布 ($p_{b\min}=13.5\text{kN/m}^2$)

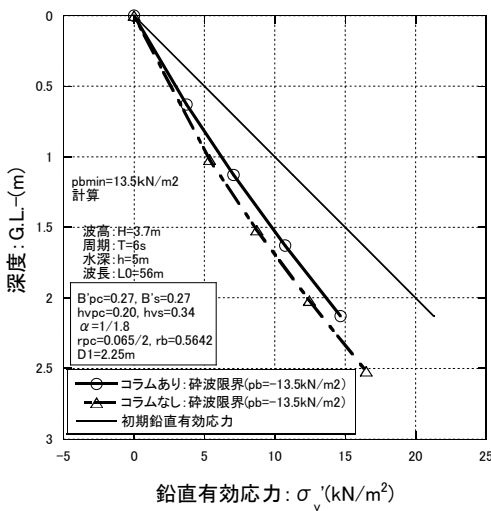


図-14(b) 鉛直有効応力の深度分布 ($p_{b\min}=13.5\text{kN/m}^2$)

ない。

以上から、現地は地盤の排水性が良く、液状化しにくい地盤条件であったといえる。数式解を用いて、仮想的に、排水性を悪く（透水係数を0.1倍に）した場合には、コラムなしの条件で液状化が発生したが、コラムありでも1m×1mの配置ではコラムなしとほとんど違いはなく液状化が発生するという結果であった。コラム配置が0.75m×0.75mでは違いが表れ、液状化しないという結果になった。透水性コラムを用いた対策工法は、排水性に期待することから、コラム間隔、地盤の透水性、波浪周期に効果が大きく影響されると思われる。そこで、次章では、数式解を用いたパラメータ解析を行う。

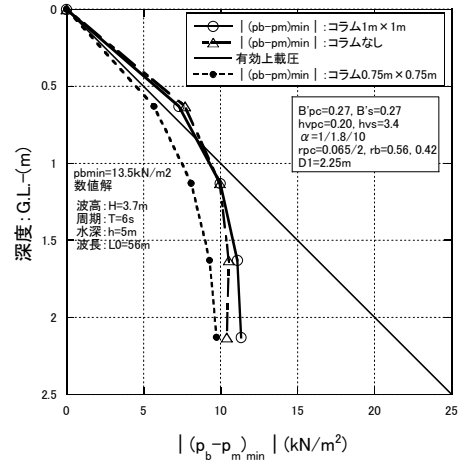


図-15(a) $(p_b-p_m)_{\min}$ の絶対値深度分布 (透水係数を0.1倍)

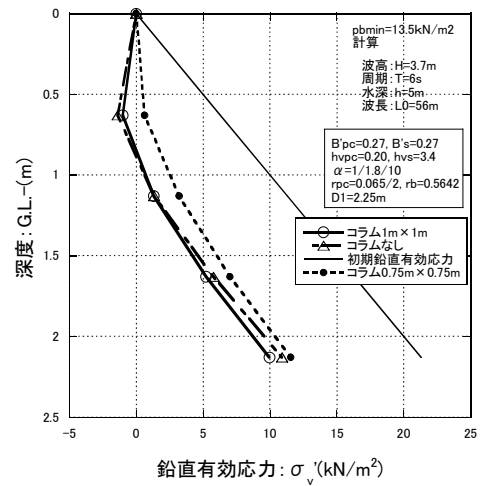


図-15(b) 鉛直有効応力の深度分布 (透水係数を0.1倍)

4. 透水性コラムの効果に関する感度分析

透水性コラムの対策効果は、コラム間隔、波浪周期、透水係数、間隙水圧係数などの、種々要素のパラメータの影響を受ける。ここでは、それらについて対策効果の感度分析を行う。

計算では、地盤の水理圧密係数を10倍の値とした以外は、現地の観測で得られた値をパラメータ解析の基本とした。地盤の水理圧密係数を10倍としたのは、現地の透水係数が通常想定される砂よりも1オーダー大きく算定されたので、透水係数を現地のものより1オーダー小さく評価し、水理圧密係数を10倍としたものを基本とした。また、海底面の水圧の振幅は、前述の碎波限界での値である $p_0=13.5\text{kN/m}^2$ を用い、周期は $T=12\text{s}$ 、あるいは $T=6\text{s}$ の2

種類で計算している。

(1) コラム間隔の影響

図-16は、コラム間隔が対策効果にどの程度影響するかを調べたもので、上向き浸透圧の最大値の深度分布を、コラム間隔をパラメータとして示したものである。上向き浸透圧はコラム間の中心で最もコラムの効果が少ないところでの値で、安全側の評価である。図-16(a)が周期 $T=6s$ 、図-16(b)が周期 $T=12s$ の結果である。

図-16から、コラム間隔が小さいものほど上向き浸透圧は小さくなり対策効果が顕著となる。また、図-16(a)と図-16(b)を比較すると、図-16(a)ではコラム間隔が $1.0m \times 1.0m$ のものは、未改良のものともあまり違いがなく、すなわち対策効果が見られないが、図-16(b)波では未改良のものより上向き浸透圧はかなり小さくなっており、対策効果がみられる。したがって、波浪周期が長くなった方が、対策効果が表れやすいことがわかる。波浪周期の影響については次項で調べる。

図-17は、波浪周期を $T=12s$ の場合について、コラム間隔と上向き浸透圧の最大値の関係を、深さ $GL-0.5m$ について調べたものである。また、図-17中には、深さ $GL-0.5m$ での初期有効上載圧を土の有効単位体積重量が $\gamma' = 10kN/m^2$ の場合について示してある。

図-17から、コラム間隔が大きくなるにしたがい上向き浸透圧は大きくなり、効果が低下し、コラム間隔が $2m$ 以上になると上向き浸透圧の増加は頭打ちとなり全く効果がないことがわかる。図-17の場合には、コラム間隔が $1.5m$ 以上になると地盤は液状化している。また、コラム間隔が約 $1.7m$ あたりで、コラムなしよりも上向き浸透圧は大きくなっている。これは、コラムの設置が悪影響を及ぼしたことを意味することになるが、この点については数式解のモデル化の誤差の可能性もあり、本質的な現象であるかは不明である。仮に数式解の誤差であれば、数式解は安全側の評価をしていることになる。

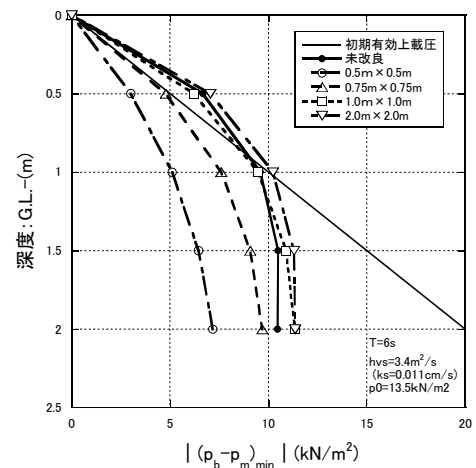


図-16(a) コラム間隔の上向き浸透圧の深度分布に及ぼす影響 (周期 6s)

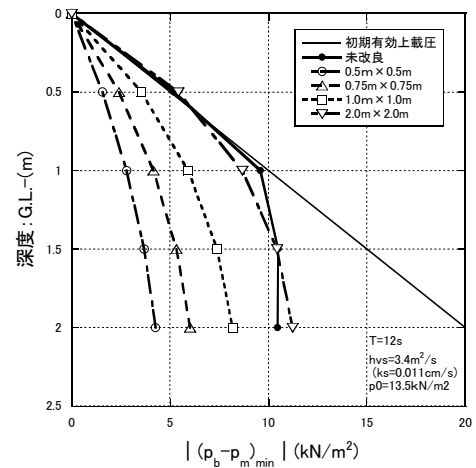


図-16(b) コラム間隔の上向き浸透圧の深度分布に及ぼす影響 (周期 12s)

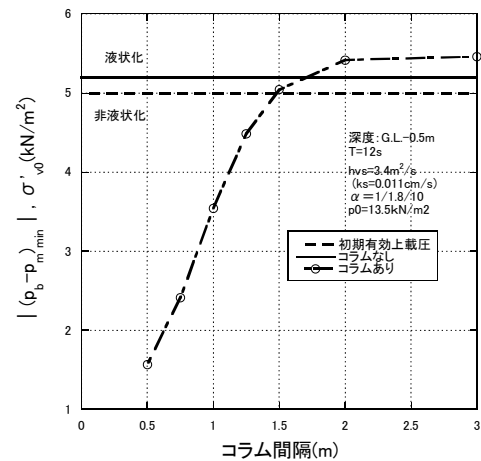


図-17 コラム間隔の上向き浸透圧に及ぼす影響 (周期 12s)

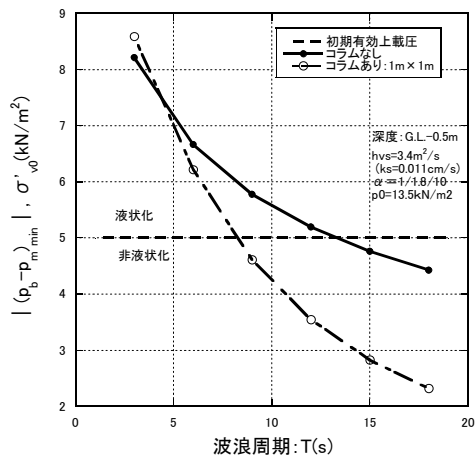


図-18 波浪周期の上向き浸透水圧に及ぼす影響 (深度 G.L.-0.5m)

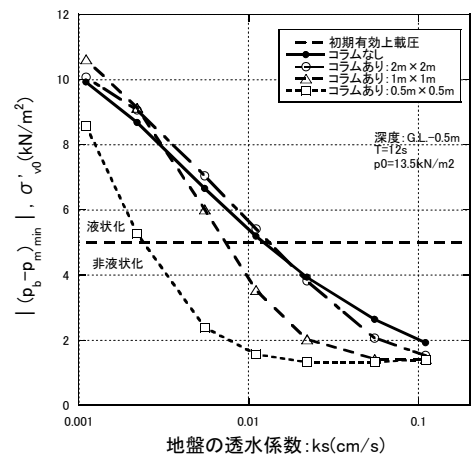


図-19 地盤の透水係数の上向き浸透水圧に及ぼす影響とコラム間隔 (周期 12s)

(2) 波浪周期の影響

周期の影響を調べたのが図-18である。図-18は、波浪周期と上向き浸透圧の最大値と波浪周期の関係を、深さ G.L.-0.5mの地点について調べたものである。図-18では、コラム間隔が1.0m×1.0mのものとコラムなしについて計算した。また、図-18中には、深さG.L.-0.5mでの初期有効上載圧を土の有効単位体積重量が $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^2$ の場合について示してある。

図-18から、コラムの有無にかかわらず、波浪周期が長くなるほど上向き浸透圧は小さくなる。コラムで対策を行ったものと、コラムなしを比較すると、上向き浸透圧の値の差は、周期が長くなるほど大きくなるのが分かる。したがって、波浪周期が長いほど透水性コラムの対策効果は顕著になるといえる。

(3) 透水係数の影響

図-19は地盤の透水係数の上向き浸透圧に及ぼす影響を調べたもので、上向き浸透圧の最大値と地盤の透水係数 k_s の関係を、コラム間隔をパラメータとして示している。

図-19から、地盤の透水係数が大きくなるとコラムの有無にかかわらず、上向き浸透圧は小さくなっていくことが分かる。コラム間隔が大きい場合には透水係数の小さいところでは、コラムなしの無対策と大きな違いはないが、コラム間隔を小さくすると、対策効果が顕著となる。透水係数が非常に大きくなると、コラム間隔が小さいものは、コラム間隔が大きいもの、あるいはコラムなしと大きな違いはなくなっている。これは、コラムの透水係数と地盤の透水係数の差がなくなったためである。

図-20は、コラムの透水係数の影響を調べたもので、上向き浸透圧の最大値とコラムの透水係数 k_{pc} の関係を、地盤の透水係数が $k_s = 0.011 \text{ cm/s}$ とその半分の $k_s = 0.0055 \text{ cm/s}$ の

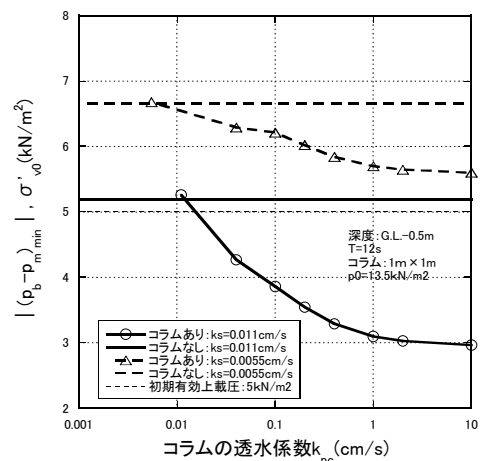


図-20 コラムの透水係数の上向き浸透水圧に及ぼす影響 (周期 12s)

場合について示している。また、コラム間隔は1.0m×1.0mである。

図-20から、コラムの透水係数が大きくなると上向き浸透圧は小さくなり対策効果が大きくなるのが分かるが、上向き浸透圧の減少は頭打ちとなり、効果には限界があることがわかる。また地盤の透水係数の違いも、大きく影響していることが分かる。

(4) コラム長、コラムの透水係数、コラムの間隙圧係数の影響

図-21、図-22はコラムなし (未改良) とコラム配置が1.0m×1.0mの鉛直有効応力の最小値 (初期鉛直有効応力から上向き浸透圧の最大値を減じたもの) の深度分布を示しており、図-21はコラム長が2.25mで図-22は9.0mの場

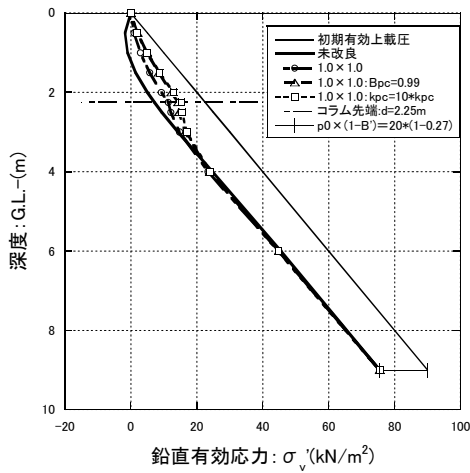


図-21(a) コラムの透水係数，間隙水圧係数の鉛直有効応力の深度分布に及ぼす影響（コラム長 2.25m）

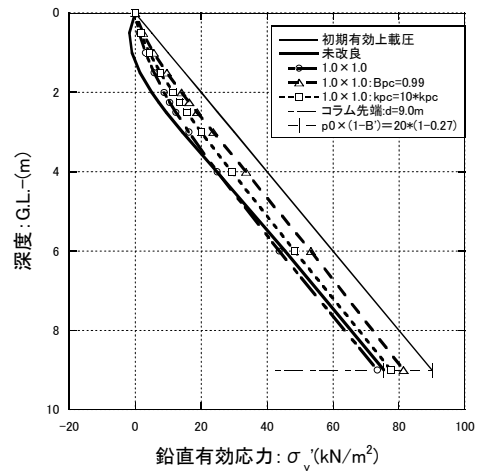


図-22(a) 透水係数，間隙水圧係数の鉛直有効応力の深度分布に及ぼす影響（コラム長 9.0m）

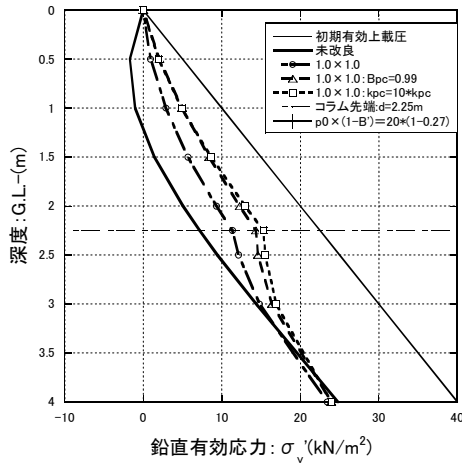


図-21(b) コラムの透水係数，間隙水圧係数の鉛直有効応力の深度分布に及ぼす影響（コラム長 2.25m）拡大図

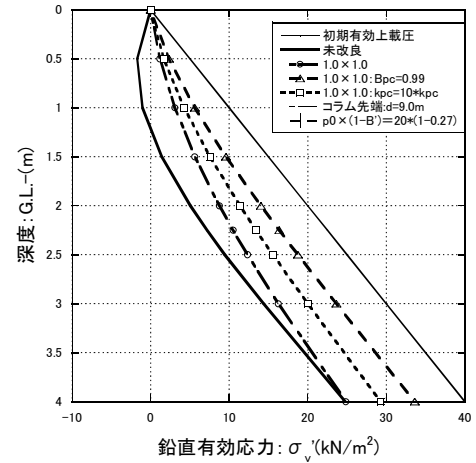


図-22(b) 透水係数，間隙水圧係数の鉛直有効応力の深度分布に及ぼす影響（コラム長 9.0m）拡大図

合である。また，コラム長だけでなく，コラムの透水係数，コラムの間隙水圧係数の上向き浸透圧に及ぼす影響も調べるために，コラムの間隙水圧係数を $B_{pc}=0.99$ とした場合，コラムの透水係数を10倍とした場合について計算したものを比較している。図中，特に表記の無いものは，前述までと同様に，現地観測でのパラメータと同じで，例えばコラムの間隙水圧係数は $B_{pc}=0.27$ ，地盤の間隙水圧係数は $B'=0.27$ である。ただし，波浪条件は周期 $T=10s$ で海底面の変動水圧の振幅を $p_0=20kN/m^2$ として計算している。

図-21から，鉛直有効応力の分布は，コラム下端となる深度GL.-2.25mで分布形が変化しており，コラムの効果が低下していることがわかる。そして，深度が深くなるにしたがい，コラムの透水係数あるいは間隙水圧係数に関係なく，コラムなしの分布に漸近していくことがわかる。漸近する値は，次式で示す値である。

$$\sigma'_{zs} = p_0 \cdot (1 - B') \quad (12)$$

ここに， σ'_{zs} は鉛直有効応力の漸近値である。

式(12)の意味するところは以下のとおりである。一次元状態では，水圧変動が全応力の変化としてそのまま地盤内に伝播し，非排水状態を仮定した場合には間隙水圧の応答は地盤の間隙水圧係数 B' を乗じたものとなる。透水性コラムを設置した地盤でコラムの影響が小さくなり，かつ深度が深くなると排水長が長くなる。したがって，地盤は非排水状態に近くなり，間隙水圧の応答は水圧変動に B' を乗じたものとなり，鉛直有効応力は式(12)で示した値に漸近することになる。

図-21で，パラメータの影響を調べると，透水性コラムの透水係数が10倍になると，鉛直有効応力の低下は小さ

くなり、すなわち上向き浸透圧は小さくなるのがわかる。また、間隙水圧係数が $B_{pc}=0.99$ の場合にも同様に、鉛直有効応力の低下は小さくなっている。これは、コラム内の水圧の伝播特性が良くなり、地盤内の間隙水圧分布が深度方向に均等になり、上向き浸透圧が抑制されるからである。

5. 結論

波浪作用時の海底地盤の不安定化に対する透水性コラムを用いた対策効果を現地試験と数式解析で検討し、以下のような結果を得た。

白老港で現地試験から：

- ① 波浪により海底地盤内に浸透圧が発生し、有効応力が変動することを確認した。
- ② 透水性コラムを設置することにより、地盤内の有効応力の変動を低減させ、有効応力の低下を低減させることができることを確認した。
- ③ 白老港での観測では波浪時の液状化現象は確認できなかった。これは、波高が小さかったこと、現地盤の透水係数が大きかったこと、が原因であると考察された。
- ④ 透水性コラム設置地盤の波浪応答解析用の数式解が適切な精度を持っていることを確認した。

数式解によるパラメータ解析から：

- ⑤ コラムの配置間隔が短い、波浪周期が長い、コラムの透水係数が大きい、ほど対策効果が大きくなる。
- ⑥ コラムの設置が深では、対策効果が急激に小さくなり、コラムなしの場合の間隙水圧の応答値に漸近する。

6. あとがき

透水性コラムをマウンド下部に敷設することにより波浪による液状化を防止し、これにより、円弧滑り解析からは安全率を上げることができ、FEM解析からは変位の発生を抑制できることがわかった。また、改良効果を得るための適切な改良範囲があることが示された。

本研究は、鉄道建設・運輸施設整備支援機構の運輸分野における基礎的研究推進制度平成20年度採択課題「透水性コラムを用いた港湾施設の波浪に対する安定化工法の開発」において実施された研究成果の一部である。関係各位に謝意を表します。

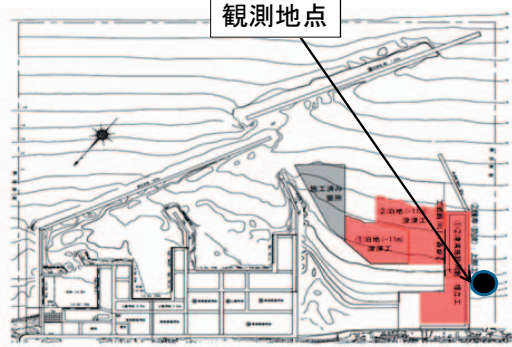
参考文献

- 1) 善功企, 山崎浩之, 佐藤泰: 海底地盤の波浪による液状化—現地観測および解析—, 港湾技術研究所報告, Vol.28, No.3, pp.29-57, 1989.
- 2) 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: 土木学会海岸工学論文集, Vol.54, pp.966-970, 2007.
- 3) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構: 一運輸分野における基礎的研究推進制度—平成22年度研究終了課題 研究成果報告書, 透水性コラムを用いた港湾施設の波浪に対する安定化工法の開発, 2011
- 4) Kobayashi S., Miura K., Konami T., Otsuka N. and Yamazaki H.: Evaluation of permeability and mechanical property of permeable column material, 9th Inc on Geosynthetics, Brazil, pp.1255-1260, 2010.
- 5) 内甌彰人, 三浦均也, 森政信吾, 山崎浩之, 大塚夏彦, 小浪岳治: 白老港での現地観測による透水性コラム工法の海底地盤対波浪安定化効果の検証, 地盤工学会, 第46回地盤工学研究発表会, pp.913-914, 2011.
- 6) 合田良實: 海岸・港湾 (二訂版), 彰国社, pp.38-39, 1998.
- 7) 合田良實: 港湾構造物の耐破設計, 鹿島出版会, pp.55-59, 1990.
- 8) 三浦均也, 浅原信吾, 野田太門, 山崎浩之, 大塚夏彦, 小浪岳治: 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ベッセル関数を用いた数式解の誘導, 地盤工学会, 第44回地盤工学研究発表会, pp.825-826, 2009.
- 9) 槇山千尋, 三浦均也, 森政信吾, 山崎浩之, 大塚夏彦, 小浪岳治: 透水性コラムの埋設により海底地盤対波浪安定化効果に及ぼす影響の検討, 地盤工学会, 第46回地盤工学研究発表会, pp.917-918, 2011.

付録A

観測地点は図A-1に示すように、西外防波堤基部に続く護岸(防波)の海側である。当該域は、白老港の第3商港区として整備が進められており、観測時は西外防波堤および埋立護岸の工事がほぼ完了したところであった。

本文中の図-4は、海側から見た断面図と平面図で、図-4の左側が図A-1の右側(西側)になる。

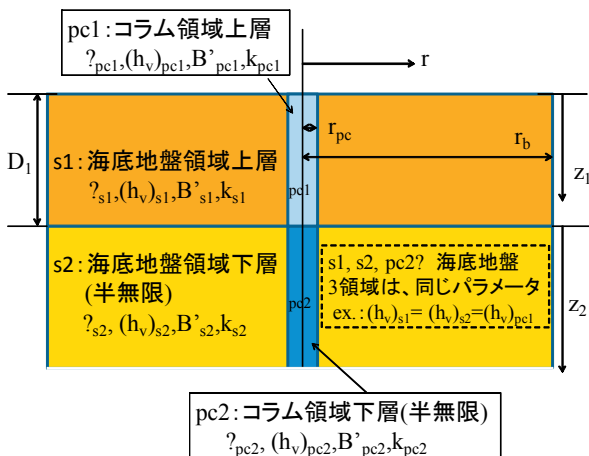


苫小牧港湾事務所のホームページ
(http://www.mr.hkd.mlit.go.jp/tomakomai_kouwan/index.html)
の写真と平面図を加筆修正

図A-1 白老港での観測位置

付録B

海底地盤に正弦波の水圧変動が作用した場合の、地盤内の間隙水圧応答を求める数式解が大部らにより示されている。数式解は図B-1で示すような円筒座標系の2層地盤に対して、内側のコラム領域 (pc1, pc2) と外側の海底地盤領域 (s1, s2) の2領域に分けて導かれたものである。現地の解析は海底地盤の上層と下層は同一の材料、コラム領域の下部層は海底地盤と同一として、パラメータを設定して行っている。以下に、数式解を示す。



図B-1 座標、記号の参考図

$$\Delta p_1 = \left[\begin{array}{l} P_{s1}(z_1) \\ + \frac{I_0(\zeta_{s1} \cdot r) K_1(\zeta_{s1} \cdot r_b) + I_1(\zeta_{s1} \cdot r_b) K_0(\zeta_{s1} \cdot r)}{I_0(\zeta_{s1} \cdot r_{pc}) K_1(\zeta_{s1} \cdot r_b) + I_1(\zeta_{s1} \cdot r_b) K_0(\zeta_{s1} \cdot r_{pc})} \\ \cdot \{P_{pc1}(z_1) - P_{s1}(z_1)\} \end{array} \right] \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (B.1(a))$$

$$\Delta p_2 = \left[\begin{array}{l} P_{s2}(z_2) \\ + \frac{I_0(\zeta_{s2} \cdot r) K_1(\zeta_{s2} \cdot r_b) + I_1(\zeta_{s2} \cdot r_b) K_0(\zeta_{s2} \cdot r)}{I_0(\zeta_{s2} \cdot r_{pc}) K_1(\zeta_{s2} \cdot r_b) + I_1(\zeta_{s2} \cdot r_b) K_0(\zeta_{s2} \cdot r_{pc})} \\ \cdot \{P_{pc2}(z_2) - P_{s2}(z_2)\} \end{array} \right] \cdot e^{i \cdot \omega \cdot t} \quad (B.1(b))$$

ここに、

$$P_{s1} = p_0 \cdot [B_{s1}' + (1 - B_{s1}') \cdot e^{-\zeta_{s1} \cdot z_1}] \quad (B.2(a))$$

$$P_{s2} = p_0 \cdot [B_{s2}' + (1 - B_{s2}') \cdot e^{-\zeta_{s2} \cdot (D_1 + z_2)}] \quad (B.2(b))$$

$$P_{pc1} = p_0 \times \left[\begin{array}{l} B_{pc1}' + \frac{(1 - B_{pc1}') \cdot (\zeta_{pc1} + \alpha_{pc} \cdot \zeta_{pc2}) + n_{npc} \cdot e^{-\zeta_{pc1} \cdot z_1}}{n_{dpc}} \\ + \frac{(1 - B_{pc1}') \cdot (\zeta_{pc1} - \alpha_{pc} \cdot \zeta_{pc2}) \cdot e^{-2 \cdot D_1 \cdot \zeta_{pc1}} - n_{npc} \cdot e^{\zeta_{pc1} \cdot z_1}}{n_{dpc}} \end{array} \right] \quad (B.2(c))$$

$$P_{pc2} = p_0 \times \left[\begin{array}{l} B_{pc2}' + \\ \frac{(B_{pc1}' - B_{pc2}') \cdot (1 + e^{-2 \cdot D_1 \cdot \zeta_{pc1}}) + 2 \cdot (1 - B_{pc1}')}{n_{dpc}} \cdot \zeta_{pc1} \cdot e^{-\zeta_{pc2} \cdot z_2} \end{array} \right] \quad (B.2(d))$$

$$n_{npc} = (B'_{pc1} - B'_{pc2}) \cdot \alpha_{pc} \cdot \zeta_{pc2} \cdot e^{-D_1 \cdot \zeta_{pc1}} \quad (B.2(e))$$

$$n_{dpc} = (\zeta_{pc1} - \alpha_{pc} \cdot \zeta_{pc2}) \cdot e^{-2 \cdot D_1 \cdot \zeta_{pc1}} + (\zeta_{pc1} + \alpha_{pc} \cdot \zeta_{pc2}) \quad (B.2(f))$$

$$\alpha_{pc} = \frac{k_{pc2}}{k_{pc1}} \quad (B.2(g))$$

$$\zeta_{pc1} = \sqrt{i \cdot \omega \cdot (h_v)_{pc1}} \quad (B.2(h))$$

$$(h_v)_{pc1} = \frac{\rho_w \cdot g}{k_{pc1} \cdot (E_v)_{pc1} \cdot (E_f)_{pc1} / ((E_v)_{pc1} + (E_f)_{pc1})}$$

$$= \frac{1}{(c_v)_{pc1} \cdot B'_{pc1}}$$

(B.2(i))

$$(E_v)_{pc1} = \lambda_{pc1} + 2 \cdot G_{pc1}$$

(B.2(j))

$$B'_{pc1} = \frac{(E_f)_{pc1}}{(E_v)_{pc1} + (E_f)_{pc1}}$$

(B.2(k))

ここに、下添え字 $pc1$, $pc2$, $s1$, $s2$ は、それぞれコラム領域の上層部、コラム領域下層部、海底地盤領域上層部、海底地盤下層部を意味する。式(B.2(h))~(B.2(k))においては、簡略のためにコラム領域の上層部($pc1$)についてのみ示した。

Δp_1 : 海底地盤上層部の変動水圧

Δp_2 : 海底地盤下層部の変動水圧

$I_0(x)$, $I_1(x)$: 0次, 1次の第1種変形Bessel関数

$K_0(x)$, $K_1(x)$: 0次, 1次の第2種変形Bessel関数

p_0 : 海底面における変動水圧の振幅

ω : 海底面における変動水圧の角振動数

k : 透水係数

λ : ラーメの定数

G : せん断弾性係数

E_v : 土の体積弾性係数

E_f : 間隙水の体積弾性係数 (気泡を含む)

B' : 各領域の一次元変形におけるSkemptonの間隙水圧係数

h_v : 各領域の水理圧密係数

D_1 : 透水性コラムの設置長さ

付録C

海底面に、図C-1のように、振幅 p_0 、各振動数 ω の水圧が作用しているとき、海底地盤中の深さ z における間隙水圧変動 Δp は次式で与えられる。

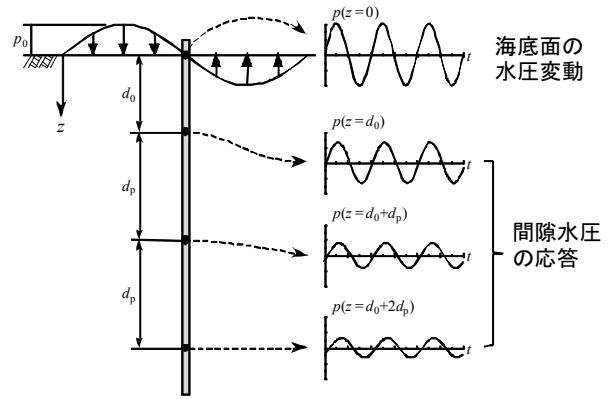


図 C-1 海底面の水圧変動と間隙水圧の応答

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

(C.1)

$$\zeta = \sqrt{i \cdot \omega \cdot h_v}$$

(C.2)

$$h_v = \frac{1}{c_v \cdot B'}$$

(C.3)

$$c_v = \frac{k}{\gamma_w \cdot m_v}$$

(C.4)

ここに、 B' は一次元変形でのBishopの間隙水圧係数、 h_v は水理圧密係数、 c_v は圧密係数、 k は透水係数、 m_v は体積圧縮係数である。

上式より、対波浪応答パラメータ B' 、 h_v が決まれば、海底地盤の間隙水圧応答が計算できる。逆に、海底面の水圧変動と、海底地盤中の3つ以上の間隙水圧応答が得られていれば、 B' と h_v を推定することができる。図C-1に示すように、等間隔の深度でデータが得られている場合には以下に示す方法で対波浪応答パラメータを求めることができる。

$$h_v = -\frac{i}{\omega} \cdot \left[\frac{1}{d_p} \cdot \ln \left(\frac{\Delta p(z=d_0) - \Delta p(z=d_0+d_p)}{\Delta p(z=d_0+d_p) - \Delta p(z=d_0+2d_p)} \right) \right]^2$$

(C.5)

$$B'_0 = \frac{\Delta p(z=d_0) / p_0 - e^{-\zeta(d_0)}}{1 - e^{-\zeta(d_0)}}$$

(C.6)

$$B'_1 = \frac{\Delta p(z=d_0+d_p) / p_0 - e^{-\zeta(d_0+d_p)}}{1 - e^{-\zeta(d_0+d_p)}}$$

(C.7)

$$B'_2 = \frac{\Delta p(z=d_0+2d_p) / p_0 - e^{-\zeta(d_0+2d_p)}}{1 - e^{-\zeta(d_0+2d_p)}}$$

(C.8)

$$B' = \frac{B'_0 + B'_1 + B'_3}{3} \quad (\text{C.9})$$

ここに、 $\Delta p(z=d)$ は深さ $z=d$ における間隙水圧変動の複素振幅、 d_0 は海底地盤最上部の間隙水圧計の深さ、 d_p は海底地盤内の間隙水圧計の間隔である。

そして、次式の誤差関数： E が最小となる B' と h_v を総当たり法により求める。得られた B' 、 h_v が海底地盤の波浪応答パラメータである。

$$E = \sum_{i=1}^n \left| p_0 \cdot \left[B' + (1 - B') \cdot e^{-\zeta \cdot z_i} - \Delta p(z = z_i) \right] \right|^2 \quad (\text{C.10})$$

港湾空港技術研究所資料 No.1258

2012.9

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています