

石材を用いた洗掘対策工を設置した基礎地盤の波浪応答に関する研究

小林 誠¹・青木 健太²・熊谷 隆宏³・片山 裕之⁴・白 可⁵・吉田 誠⁶

¹正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail:makoto.kobayashi@mail.penta-ocean.co.jp (Corresponding Author)

²正会員 五洋建設 九州支店 (〒890-0072 鹿児島県鹿児島市新栄町31-14-2F)

E-mail:kenta.aoki@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: E-mail:takahiro.kumagai@mail.penta-ocean.co.jp

⁴正会員 五洋建設 技術研究所 (〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町1534-1)

E-mail: E-mail:hiroyuki.katayama@mail.penta-ocean.co.jp

⁵正会員 五洋建設 洋上風力事業本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail: E-mail:ka.haku@mail.penta-ocean.co.jp

⁶正会員 五洋建設 洋上風力事業本部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)

E-mail: E-mail:makoto.yoshida@mail.penta-ocean.co.jp

着床式洋上風力モノパイル基礎の安定性の観点から、袋型根固材等の洗掘対策工についての研究成果は見られるが、洗掘対策工を設置した場合の液状化に代表される地盤の波浪応答特性に関する研究は少ない。

本研究では、波浪の地盤応答理論に基づく相似則を提案して、袋型根固材等の洗掘対策工を設置した場合の水理模型実験を実施し、地盤の波浪応答特性を明らかにした。また、実験で得られた地盤内の変動間隙水圧について、対策工を設置しないケースでは鉛直一次元モデルにより、対策工を設置したケースでは波浪-地盤FEM連成解析により、地盤の波浪応答特性を精度良く評価できることを確認した。

Key Words : scour control, offshore wind power foundation, wave response of foundation soil

1. はじめに

波浪作用時の海底地盤の液状化に代表される地盤の応答特性の把握は、海岸・港湾構造物の安定性の検討や設計の面から重要である。地盤の波浪応答に関する研究は、ケーソンやマウンド等の構造物の基礎を対象に、理論、模型実験、解析、現地観測の様々な観点から数多くなされている。また、地盤の吸出しに着目して、消波ブロックの沈下被災等に関する研究¹⁾もなされているが、洗掘対策工として蛇かごや袋詰石材などを設置した場合を対象とした研究例は少ない²⁾。また、着床式洋上風力発電のモノパイル基礎の安定性の観点から袋詰石材を用いた洗掘対策工の検討を行った例³⁾⁴⁾はあるが、地盤の波浪応答が基礎や洗掘対策工自身の長期安定性に与える影響を把握することも重要であると考えられる。

本研究では、模擬地盤を設置した2次元断面水槽実験により、石材を用いた洗掘対策工を設置した条件における地盤内への波浪圧力伝播を計測するとともに、数値解析により、地盤の波浪応答特性を明らかにする。

2. 洗掘対策工を設置した地盤の波浪応答実験

(1) 実験概要

断面2次元造波水路(全長50 m, 高さ1.2 m, 幅0.6 m)を用いて、着床式洋上風力発電設置海域を想定した縮尺1/35の移動床模型実験を実施した(図-1)。波浪条件は日本海側の年最大波クラスを想定した規則波2ケース(波高17.1 cm, 周期1.7 sと波高22.9 cm, 周期2.0 s)とし、模擬地盤(長さ2.5 m, 高さ0.23 m, 幅0.60 m)の底質には、粒径0.15 mm(珪砂7号)と0.40 mm(珪砂6号)の珪砂を使用した(図-2)。模擬地盤の初期相対密度は、波浪による締固めが発生しない条件とするため90%とした。

洗掘対策工には遮水シートの他、フィルター材とアーマ材を想定した砕石および袋詰めされた石材(袋型根固材)を用いて、長さ1.5 m, 幅0.6 mの範囲にわたり、海底地盤上に直接設置して実験を行った(表-1)。

実験は波浪、底質粒径、対策工条件を変えた計30ケースを実施した(表-2)。対策工の設置状況を図-3に示す。実験では、容量式波高計を用いて水位変動を計測する

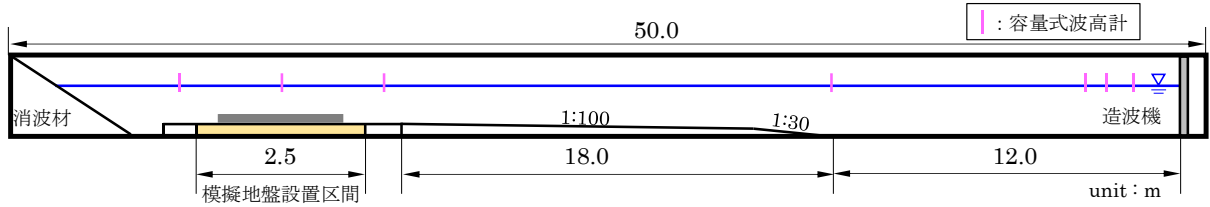


図-1 断面水路概要

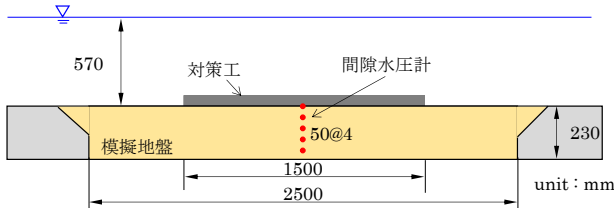


図-2 間隙水圧計設置位置

表-1 実験条件一覧

波浪	波浪条件A	波高17.1cm, 周期1.7s	
	波浪条件B	波高22.9cm, 周期2.0s	
底質	珪砂7号	$d_{50}=0.15\text{mm}$	
	珪砂6号	$d_{50}=0.40\text{mm}$	
対策工	遮水シート	ポリ塩化ビニル 厚さ0.08mm	
	碎石	7号碎石	$d_{50}=3.3\text{mm}$
		6号碎石	$d_{50}=7.3\text{mm}$
	袋詰石材	石材A	$d_{50}=2.5\sim 5\text{mm}$
石材B		$d_{50}=5\sim 13\text{mm}$	

表-2 実験ケース条件一覧

Case	底質	対策工	層厚 (cm)
Case1	珪砂7号	なし	
Case2		遮水シート	
Case3		碎石(6号1層+7号1層)	6.8
Case4		碎石(6号2層+7号2層)	12.9
Case5		袋詰材A1層+B1層	6.0
Case6		袋詰材:A1層	2.8
Case7		袋詰材:A2層	5.5
Case8		袋詰材:A3層	9.0
Case9		袋詰材:B1層	3.0
Case10		袋詰材:B2層	6.1
Case11	珪砂6号	なし	
Case12		袋詰材:A1層	2.8
Case13		袋詰材:A2層	5.5
Case14		袋詰材:B1層	3.0
Case15		袋詰材:B2層	6.1

とともに、模擬地盤内に地盤面から5 cm間隔で深度20 cmまで5カ所に間隙水圧計（サンプリング周波数：500 Hz）を設置して波浪による地盤内の間隙水圧の変化を計測した。なお各ケースとも造波時間は10分間とした。

本研究では、善³⁾が提案する地盤の波浪応答の基礎方程式である式(1)に基づき、地盤の相似則を提案する。

$$C_v \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \alpha \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial p_b}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 $C_v = k/(\gamma_w m_v)$ ：地盤の圧密係数、 k ：透水係数、 γ_w ：水の単位体積重量、 $\alpha = 1 + nm_w/m_v$ ：伝達係数、 m_v と m_w は、それぞれ土骨格と間隙水の体積圧縮率、 n ：間隙率、 p ：地盤内の変動間隙水圧、 p_b ：地盤面（底面）作用圧である。 L ：波長、 T_0 ：周期、 \hat{p}_b ：底面波圧振幅を用いて各変数を $Z = z/L$ 、 $T = t/T_0$ 、 $P_m = p_m/\hat{p}_b$ 、 $P_b = p_b/\hat{p}_b$ と無次元化すると、上式は次のように変形される。

$$\frac{C_v T_0}{L^2} \frac{\partial^2 P_m}{\partial Z^2} = \alpha \frac{\partial P_m}{\partial T} - \frac{\partial P_b}{\partial T} \quad (2)$$

現地と模型の挙動の相似性を成立させるためには、上式における各項の係数を一致させる必要がある。

$$\frac{C_v T_0}{L^2} |_{\text{field}} = \frac{C_v T_0}{L^2} |_{\text{model}} \quad (3)$$

$$\alpha |_{\text{field}} = \alpha |_{\text{model}} \quad (4)$$

間隙率が現地と模型で等しいと仮定すると、式(4)より、土骨格と間隙水の圧縮率比（または剛性比）は次のように一致させる必要があることがわかる。

$$\frac{m_w}{m_v} |_{\text{field}} = \frac{m_w}{m_v} |_{\text{model}} \quad (5)$$

また、フルード則より波長、周期は以下の相似則を満たす必要がある（相似比： S ）。

$$L |_{\text{model}} = \frac{1}{S} L |_{\text{field}}, \quad T_0 |_{\text{model}} = \frac{1}{\sqrt{S}} T_0 |_{\text{field}} \quad (6)$$

したがって、式(3)を成立させるために、透水係数に

ついて以下の条件を満たさなければいけない。

$$k |_{\text{model}} = \frac{1}{S^{3/2}} \left(\frac{m_v |_{\text{model}}}{m_v |_{\text{field}}} \right) k |_{\text{field}} \quad (7)$$

以上より、地盤の波浪応答の相似性を成立させるためには、式(5)に示されるように土骨格と間隙水の剛性比を一致させるとともに、式(7)のように、現地と模型における水の圧縮率の比を考慮して、透水係数に関する条件を満たすことが必要であることがわかる。

なお、間隙水の圧縮率は、気泡の混入による飽和度を考慮して、次式⁹⁾のように評価することができる。

$$m_w = S_r m_{w0} + \frac{1-S_r}{p_{mg}} \quad (8)$$

ここで、 m_{w0} ：水の圧縮率（ $=5 \times 10^7 \text{ m}^2/\text{kN}$ ）、 S_r ：飽和度、 p_{mg} ：気圧ゼロ条件を基準とする絶対圧力である。

地盤の透水係数は、Creager⁷⁾による20%粒径 D_{20} と透水係数の関係図に基づいて推定することができ、珪砂6号では0.022 cm/s、珪砂7号では0.0032 cm/sと設定される。また、相対密度が90%、有効拘束圧が0.5 kN/m²程度であることに基づき、既往の算定式⁹⁾を用いて M 値を2程度と評価できる。このとき、変形係数 EI は、 $E=700 \text{ N}$ の経験式

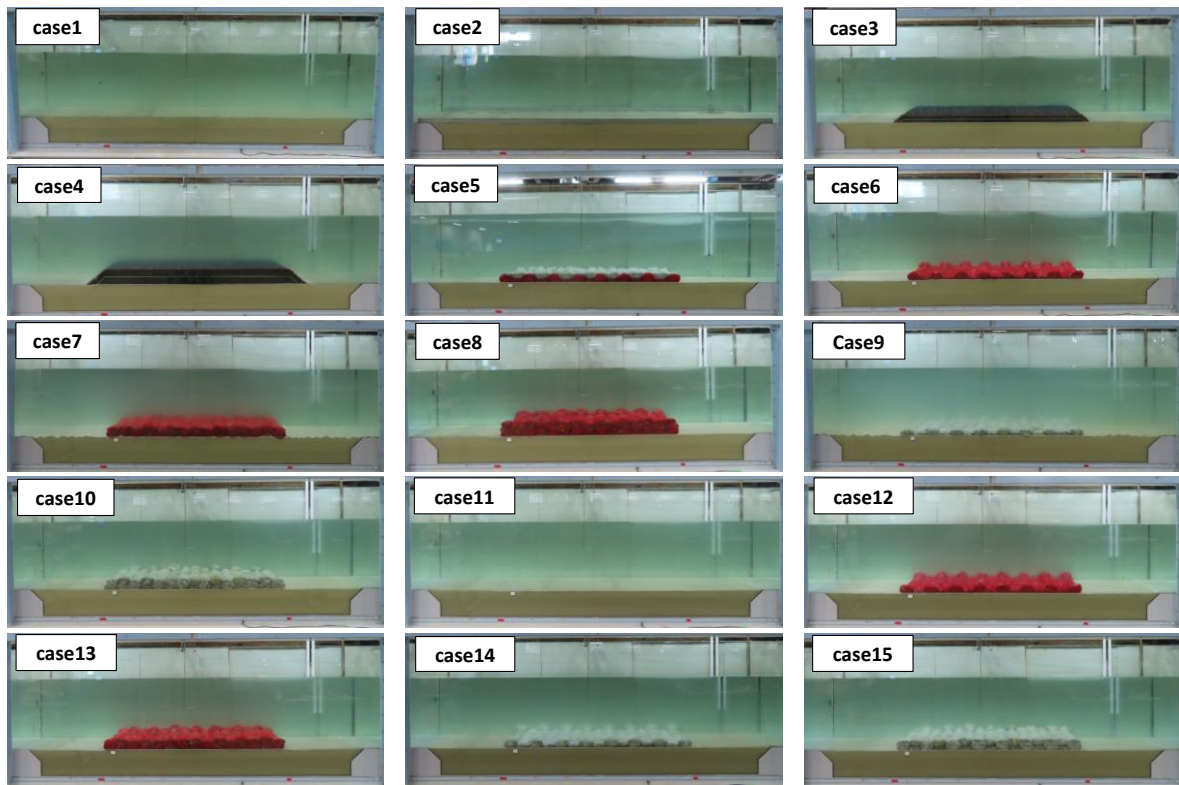


図-3 対策工の設置状況

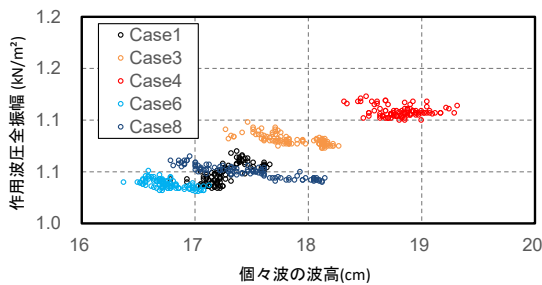


図-4 個々波の波高と地盤面作用波圧の関係 (波浪条件A)

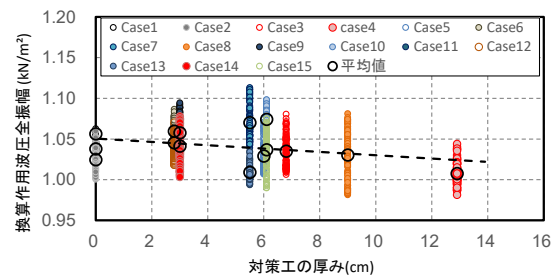


図-5 対策工厚と地盤面作用波圧の関係 (波浪条件A)

に基づいて 1400 kN/m^2 と評価され、土骨格の圧縮率 m_v は、ポアソン比 ν を 0.33 と仮定して、 E と ν より $4.8 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kN}$ と算定される。また、間隙水の飽和度 S_r を 96% と仮定すると、式(8)より圧縮率 m_w は $3.8 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kN}$ と評価される。

実験縮尺は $1/35$ であるため、現地水深 20m の条件における間隙水の圧縮率は $1.2 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kN}$ である。式(5)と(7)の相似則に基づくと、土骨格の圧縮率 $1.5 \times 10^4 \text{ m}^2/\text{kN}$ (変形係数： 4500 kN/m^2)、透水係数 0.2 cm/s の現地地盤条件 (D_{20} が 0.75 mm 程度の粗砂で、 N 値 6 程度)を模擬した模型実験であることがわかる。

(2) 実験結果

実験結果は、10分間の造波時間のうち、造波が安定した後のデータから100波分を用いて処理を行った。

実験結果のうち、Case1, Case4 (碎石：厚さ 6.8 cm)、Case6 (碎石：厚さ 12.9 cm)、Case6 (袋詰A1層：厚さ 2.8 cm)、Case8 (袋詰A3層：厚さ 9.0 cm)の100波の個々波の波高と地盤面に作用する底面作用波圧(変動水圧)の

全振幅の関係を図-4に示す。対策工の厚みが大きいCase3とCase4では、対策工位置での水深が浅くなるため、浅水変形により波高が大きくなっていることがわかり、これに伴い変動水圧も大きくなっているものと思われる。また、碎石の厚みが 6.8 cm のCase4よりも袋詰材の厚み 9.0 cm のCase8の方が波高、変動水圧とも小さい傾向が見られ、袋で拘束された石材である袋詰材の方が波高減衰に伴い、地盤面に作用する圧力も小さくなっている。

なお、本実験は規則波条件であるが、図-4に見られるように個々の波高に若干のばらつきがあるため、位相平均処理をするとともに、対策工による波高変化の影響を除去するために、個々波毎に地盤面作用波圧を波高で除して単位波高当りの値を求めた後、各ケースの設定波高を乗じた波圧値(換算作用波圧)に換算して整理した。図-5に、各ケースの対策工厚と換算作用波圧(全振幅)の関係を整理した。ばらつきはあるものの、波浪条件A(波高 17.1 cm 、周期 1.7 s)では、わずかではあるが対策工の層厚が大きくなるほど、地盤面に作用する波圧が小

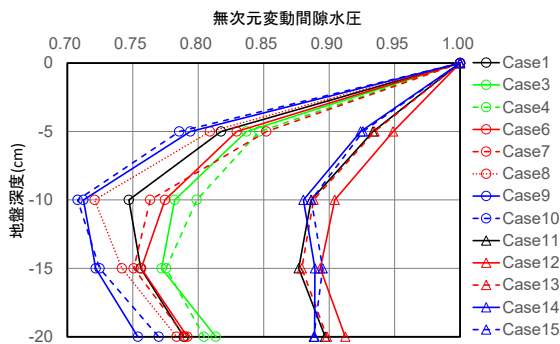


図-6 無次元間隙水圧鉛直分布 (波浪条件A)

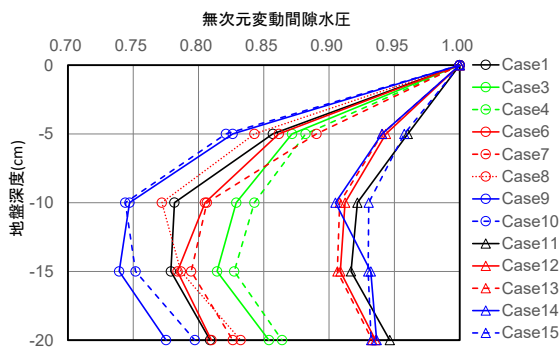


図-7 無次元間隙水圧鉛直分布 (波浪条件B)

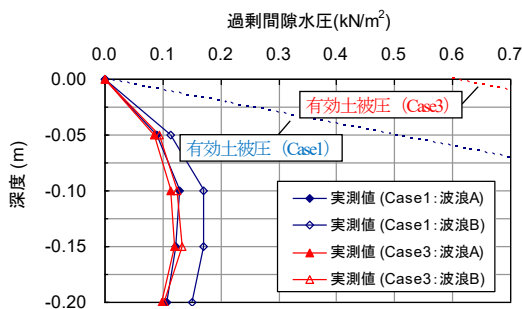


図-8 過剰間隙水圧算定結果

さくなる傾向が見られた。これは対策工として用いた碎石や袋詰石材による影響であると考えられるが、対策工の透水性が高いことに加え、十分な厚みがなかったため、波圧を減衰させる効果は小さかったと考えられる。

図-6、図-7に、各ケースの地盤面の作用波圧で無次元化した地盤内の無次元変動間隙水圧の鉛直分布を示す。両波浪条件ともに、深度15 cm以深で変動間隙水圧の増加が見られる。これは、地盤の下部では、底面からの圧力の反射の影響が現れているものと考えられる。

深度10 cm程度までの変動間隙水圧をみると、間隙水圧変動の伝播が深度方向に単調に小さくなる傾向が確認できる。また、底質粒径に着目すると、粒径が大きく透水性の高い珪砂6号では、深度10 cmにおいて地盤面作用波圧の90%程度が伝播するのに対して、粒径が小さく透水性の低い珪砂7号では、70~85%程度の伝播となっており、砂層地盤内への圧力伝播性に関する地盤の透水性の影響が確認された。また、Case3、Case4の碎石のケー

表-3 数値波動水路における主要な計算条件

時間間隔	Auto (安全率: 0.2)
格子間隔	$\Delta x = 2\text{cm}$ (模擬地盤部), 5cm (固定床部) $\Delta z = 1\text{cm}$
多孔質体の抵抗係数	$\alpha_0 = 1500, \beta_0 = 3.6$
空隙率	$\gamma = 0.43$

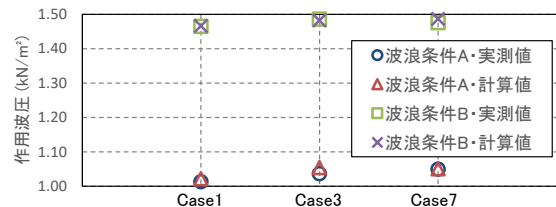


図-9 地盤面作用波圧 (全振幅) に関する実験と解析結果の比較

表-4 鉛直一次元地盤応答解析における物性パラメータ

透水係数	0.0032 cm/s ($D_{20} = 0.13\text{ mm}$)
土骨格および間隙水の体積圧縮率	$m_v = 4.8 \times 10^4\text{ m}^2/\text{kN}$
間隙率	$m_w = 3.5 \times 10^4\text{ m}^2/\text{kN}$ ($S_r = 96.5\%$)
	$n = 0.45$

スとCase6、Case7、Case9、Case10の袋詰材のケースを比較すると、波浪条件A、Bともに、碎石のケースの方が砂層内間隙水圧の応答が大きくなる傾向を確認できる。これは、碎石のケースに対して、袋詰材は碎石が袋単位で拘束されており、波浪作用時に移動や変形が相対的に生じにくいいため、対策工の振動による地盤内への圧力の伝播の影響が小さいためではないかと考えられる。

地盤面作用波圧と変動間隙水圧の差を取って評価した過剰間隙水圧と地盤内の有効土被圧の比較結果を図-8に示す。本実験では、対策工による上載荷重が無いケースにおいても、全ての深度で過剰間隙水圧は有効土被圧を超えることはなく、液状化は発生していないことが確認された。

3. 数値解析による実験結果の再現性の検討

(1) 地盤面作用波圧

実験で得られた地盤面作用波圧に関し、数値波動水路 (CADMAS-SURF/2D)⁹⁾による再現性の検討を行う。

碎石や袋詰材の多孔質体からの抵抗力は、Dupuit-Forchheimer則を用いてモデル化し、抵抗力係数 α_0 、 β_0 は、既往の検討事例¹⁰⁾を参考に設定した。表-3に主要な計算条件の一覧を示す。図-9にCase1、Case3、Case7の実験と解析結果の比較を示す。地盤面作用波圧について、洗掘対策工を設置したケースを含めて、解析により再現できることを確認した。

(2) 地盤内変動間隙水圧

前節の検討で、洗掘対策工を設置したケースを含め、地盤表面に作用する波圧を数値波動水路で評価できることがわかった。本節では、数値波動水路の解析で得られた地盤面の作用波圧を地盤応答解析モデルの境界条件として与え、地盤内の変動間隙水圧の再現解析を行う。

a) 鉛直一次元モデルの適用

Darcy則と、土骨格と間隙水の圧縮性を考慮した質量保存則に基づく式(1)の鉛直一次元モデルを用いて検討を行う。拡散方程式の形で表されるモデルは、差分法を用いて簡便に解析できることが特徴である。

解析における物性パラメータは、2章で述べた値を用いる(表-4)。数値波動水路による地盤面作用波圧の解析結果を0.05 s間隔で出力し、地盤応答解析モデルの境界条件として与えて地盤内変動間隙水圧の解析を行った。

Case1, Case3およびCase7の実験と解析結果の比較を図-10に示す。対策工なしのCase1は、解析で概ね再現できるが、対策工がある場合は実験結果との乖離があり、特に袋詰材のケース(Case7)よりも砕石のケース(Case3)の方が乖離が大きいことがわかる。本解析では、対策工はモデル化しておらず、石材の挙動の影響が解析で評価されていないことが原因と推定される。特に、対策工が袋で拘束されておらず個々の石材が移動や変形をしやすい環境では、その振動挙動が下の地盤に伝わるため、間隙水圧の応答が大きくなる可能性が考えられる。

b) 波浪—地盤FEM連成解析モデルの適用

鉛直一次元モデルは簡便に解析できる利点があるものの、対策工がある条件の評価は難しいことがわかったため、本項では、波浪解析と断面2次元の地盤応答FEMの連成モデル¹¹⁾による検討を行う。対策工のあるCase3とCase7を対象にした地盤FEMの解析領域を図-11に示す。また、実験結果において、地盤の応答は弾性的であるため、解析では、地盤を線形弾性体としてモデル化した。物性パラメータについて表-5に示す。砂地盤は表-4で設定した条件とほぼ同一である。対策工のパラメータのうち、透水係数については、透水性の高い石材に対して一般的に用いられる値に設定した。石骨格の剛性については、N値15程度を想定した定数を与えている。なお、袋詰材の効果として、せん断抑制効果が向上すると仮定して、せん断剛性を石材の1.5倍にする調整を行った。1.5倍の数値については仮定値であり、適切な値の設定について、今後検討する必要がある。

図-11の解析領域において、水と石材・地盤の境界部の作用波圧は、数値波動水路で評価される。数値波動水路で得られた波圧分布の時系列を地盤FEMの境界条件として与え、鉛直一次元モデルでは評価が難しかったCase3とCase7を対象にして、連成解析を行った。

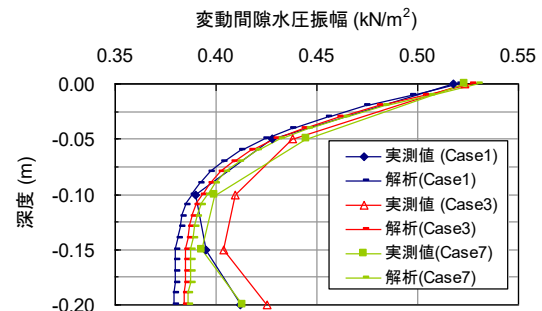


図-10 地盤内変動間隙水圧に関する実験と解析結果の比較(鉛直一次元モデル)

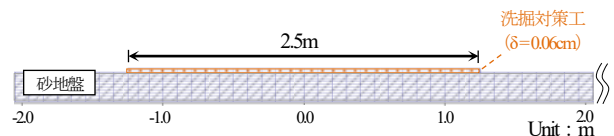


図-11 地盤FEMの解析領域

表-5 地盤FEM解析における物性パラメータ

	対策工	砂地盤
透水係数	100 cm/s	0.0032 cm/s
ラメの定数	<ul style="list-style-type: none"> 砕石ケース $\lambda = 7,480 \text{ kN/m}^2$ $\mu = 3,750 \text{ kN/m}^2$ $(E = 10,000 \text{ kN/m}^2)$ 袋詰材ケース $\lambda = 6,230 \text{ kN/m}^2$ $\mu = 5,630 \text{ kN/m}^2$ 	$\lambda = 1,050 \text{ kN/m}^2$ $\mu = 525 \text{ kN/m}^2$ $(E = 1,400 \text{ kN/m}^2,$ $\nu = 0.33)$
間隙水の体積圧縮係数	50,000 kN/m ²	
間隙率	$n = 0.45$	

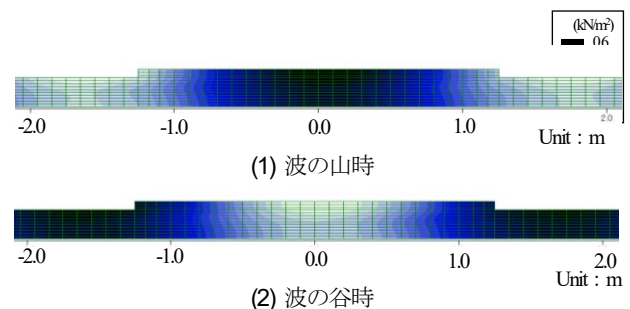


図-12 変動間隙水圧解析結果例 (Case3)

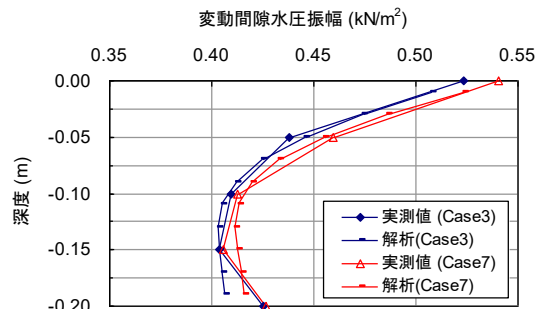


図-13 地盤内変動間隙水圧に関する実験と解析結果の比較(波浪—地盤FEM連成モデル)

波の山と谷における変動間隙水圧分布の解析例を図-12に示すとともに、実験と解析結果の比較を図-13に示す。実験と解析結果は概ね整合しており、洗掘対策工を設置したケースにおいても、波浪解析と地盤応答FEMの連成解析により、高い精度で評価できることがわかる。特に、袋詰材については、袋材により石材のせん断抑制効果が向上すると仮定して、せん断弾性係数を増加させているが、解析により実験結果を概ね再現できており、定性的には妥当な仮定ではないかと考えられる。

図-7で確認したように、袋詰材による対策では、石材を設置する対策に比べ、地盤面の作用圧を基準として評価した地盤内の間隙水圧応答は抑制される傾向にあると考えられ、波浪と地盤FEMの連成解析により、このような特性も評価できると考えられる。

4. おわりに

石材を用いた洗掘対策工を地盤上に設置した場合の地盤内間隙水圧について、模型実験と数値解析から検討を行った結果、以下の結論を得た。

- ① 波浪の地盤応答理論に基づく相似則を新たに構築し、洗掘対策工を設置した地盤に対する水理模型実験を行った。洗掘対策工を設置した条件における地盤内の間隙水圧応答特性を明らかにした。
- ② 洗掘対策工を設置しない基本ケースにおいては、簡便な鉛直一次元モデルにより地盤の応答を表現できることを確認し、また、洗掘対策工を設置したケースでは、波浪解析と地盤FEMの連成解析により、地盤の応答を精度良く評価できることがわかった。袋詰材のケースは、せん断抑制効果を高めた物性パラメータにより実験結果を再現できているが、適切な設定について、今後検討する必要がある。

参考文献

- 1) 鈴木高二朗, 高橋重雄, 高野忠志, 下迫健一郎: 砂地盤の吸い出しによる消波ブロック被覆堤のブロックの沈下被災について—現地調査と大規模実験—, 港研報告, Vol.41, No.1, 40p., 2002.
- 2) 松田達也, 三浦均也: 表層を砕石置換した際の砂地盤における波浪応答に関する造波水路実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.75, No.2, pp.1_949-I_954, 2019.
- 3) 稲垣聡, 新原雄二, 鈴木一輝, 岩前伸幸: フィルターユニットによる洋上風力発電基礎の洗掘防止工とその設置範囲の実験的検討, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.77, No.2, pp.1_361-I_366, 2021.
- 4) 有川太郎, 陳曉悦, Songgui CHEN, Hanbao CHEN, 浜地克也, 松本幸久, 徳永正吾, 渡部真史, 巖駿: モノパイル式洋上風力発電機の基部における局所洗掘に関する実験的検討, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.76, No.2, pp.1_535-I_540, 2020.
- 5) 善功企: 海底地盤の波浪による液状化に関する研究, 港湾技研資料, No.755, 129p., 1993.
- 6) Verruijt, A.: Elastic storage of aquifers, Flow Through Porous Media, Chapter8, Editor de Wiest, R.J.M., Academic press, pp.331-376, 1969.
- 7) Creager, W.P., Justin, J.D., and Hinds, J.: Engineering for Dams, Vol.III, Earth, Rock-fill, Steel and Timber dams, John Wiley & Sons, Inc., N.Y., pp.645-649, 1945.
- 8) Schultze, E. and Menzenbach, E.: Standard penetration test and compressibility of soils. Proc. 5th Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Eng. (Paris), Vol. 1, p.527., 1961.
- 9) 沿岸開発技術研究センター: 数値波動水路(CADMAS-SURF)の研究・開発, 沿岸開発技術ライブラリー, No.12, 296p., 2001.
- 10) 近藤一郎, 竹田英章: 消波構造物, 森北出版, 275p., 1983.
- 11) 熊谷隆宏: VOF-弾塑性 FEM 連成モデルによる基礎地盤および構造物の変形解析と破壊メカニズムに関する考察, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.65, No.1, pp.1_871-I_875, 2009.

(Received March 17, 2022)

(Accepted July 21, 2022)

A STUDY ON WAVE RESPONSE OF FOUNDATION GROUND WITH SCOUR COUNTERMEASURE USING ROCK BAG

Makoto KOBAYASHI, Kenta AOKI, Takahiro KUMAGAI, Hiroyuki KATAYAMA, Ke BAI and Makoto YOSHIDA

Researches have been conducted on the effects of scour protection measures such as geo-textile rock bags from the viewpoint of the stability of monopile foundations. However, studies on the wave response characteristics of the ground as representative of liquefaction are limited.

In this study, we have proposed a similitude law based on the theory of ground response to waves and conducted hydraulic model experiments to clarify the characteristics of the ground response when scour countermeasure using rock bags are placed. It is found that the ground response to waves can be evaluated accurately by using a vertical one-dimensional model for the cases without scour countermeasure and a VOF-Elasto-plastic model for the cases with scour countermeasure.