

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 17 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 豊橋技術科学大学

氏 名 : 松田 達也

研究課題名 : 波浪による大口径構造物周りの地盤特性を考慮した土砂動態把握
に関する実験的研究

助成金額 : 100 万円

研究実施期間 : 自 令和 6 年 4 月 1 日 ~ 至 令和 7 年 3 月 31 日

波浪による大口径構造物周りの地盤特性を考慮した土砂動態把握に関する実験的研究

Experimental Study on Sediment Transport Considering Soil Properties around Large-Diameter Structures Subject to Ocean Waves

豊橋技術科学大学 大学院工学研究科 准教授 松田 達也

（研究計画ないし研究手法の概略）

【研究計画】

本研究の最終目的は、地盤特性を踏まえた土砂動態メカニズムが明らかとし、構造物周りの洗掘深推定式を提案することである。

波浪による海底地盤の土砂移動は流体－地盤（土粒子）境界域で起こる非常に複雑な現象であり、例えば地盤に着目すると、土粒子：ミクロ～土塊（土要素）：メゾ～土構造物：マクロに及ぶマルチフィジクスな現象である。既往研究では、流体－土粒子境界域における「土粒子の駆動力となる水流による底面せん断力」に主眼が置かれていたが、申請者の研究ではミクロ～メゾスケールの連続性を踏まえた「地盤内の浸透力によるせん断強度変化」を同時に考慮した土砂動態現象の解明を試みている。特に、両者は地盤材料の特性に依存することから、本研究を通じて地盤特性を踏まえた土砂動態メカニズムが明らかとなれば、水理－地盤の複合現象解明に向けた学術的なブレイクスルーとなる。研究対象とする大口径構造物として、洋上風力発電のモノパイル基礎が挙げられ、我が国の自然外力に対する安定性検証と設計法の確立が急務となっている。波外力による土砂動態は構造物の安定性を喪失させる要因となりうるため、本研究により地盤材料に応じた構造物周りの土砂動態特性が明らかとなれば高精度な設計手法の提案に繋がる。

当該研究では重力場造波水路実験を行い、地盤の材料特性を考慮して地形変化の特性を明らかとする。さらに、構造物周りの土砂動態把握にむけて、超音波式砂面計を用いた面的な地形変化の計測に加え、新たに光ファイバセンサを用いた計測手法を導入し、計測方法の特性を明らかとしたうえで、時々刻々と変化する鉛直方向の洗掘深の計測を試みる。

【研究手法の概略】

1. 地盤材料の特性を考慮した土砂動態把握に関する造波水路実験

本実験ではフルード相似則を適用し、縮尺 $\lambda = 1/25$ の実験を行った。全長 25 m の 2 次元造波水路内に長さ 2.70 m、幅 0.60 m、高さ 0.20 m の移動床区間を設けた（図-1）。移動床区間の前後には長さ 0.50 m、高さ 0.20 m の不透水フラット部を設置し、沖側フラット部の先には長さ 2.0 m、高さ 0.20 m、勾配 1/10 の不透水斜面を設置した。洋上風力発電のモノパイル基礎を想定した半円柱模型を用い、模型中心部分が移動床沖側から 1.8 m の位置に水路壁面に固定した。模型の直径 D は 0.2 m である。ここで、半円柱模型を用いる理由として、実物条件に波向に対して直交方向に等間隔で設置された円柱構造物を対象としており、造波装置内で想定領域の一部を移動床区間としてモデル化したためである。地盤材料に関しては Dean Number^{1), 2)}を適用した地盤材料（珪砂 8 号：平均粒径 $D_{50} = 0.109$ mm）と実地盤相当の地盤材料（豊浦砂：平均粒径 $D_{50} = 0.170$ mm）を選定し、水中落下法にて相対密度 $D_r = 80\%$ になるように移動床を作製した。

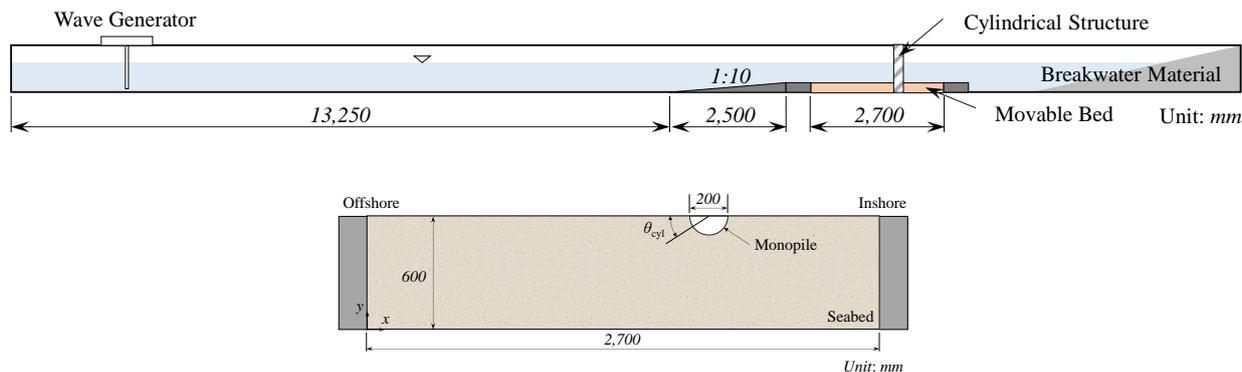


図-1 造波水路概略図（上）と移動床区間の平面図（下）

波浪外力の条件は、Sumer ら³⁾と同様に波浪外力と構造物径の比で表される KC 数を踏まえて決定した。 KC 数を以下に示す。

$$KC = \frac{U_{max} T}{D} \quad (1)$$

ここで、 U_{max} は水平方向最大流速、 T は波の周期、 D は円柱構造物の直径である。

本実験では $KC = 1.2$ となる条件に対応した波高 $H = 0.109$ m、波の周期 $T = 1.6$ s の規則波を作用させた際の土砂動態について分析した。

2. 光ファイバセンサの応答特性に関する基礎的実験

光ファイバセンサとは、光ファイバの特性を利用して、LED 光源を送信側のファイバを介して光を照射し、受信側のファイバ端部に設置した光センサモジュールで光の強さを計測して、その応答値の変化で洗掘の発生を判断する方法である⁴⁾。計測方法として透過方式と反射方式がある（図-2）。透過方式とは発光部と受信部のファイバ線を直線上に配置する方法である。一方で、反射方式とは発光部と受信部のファイバ線を並行に設置する方法である。

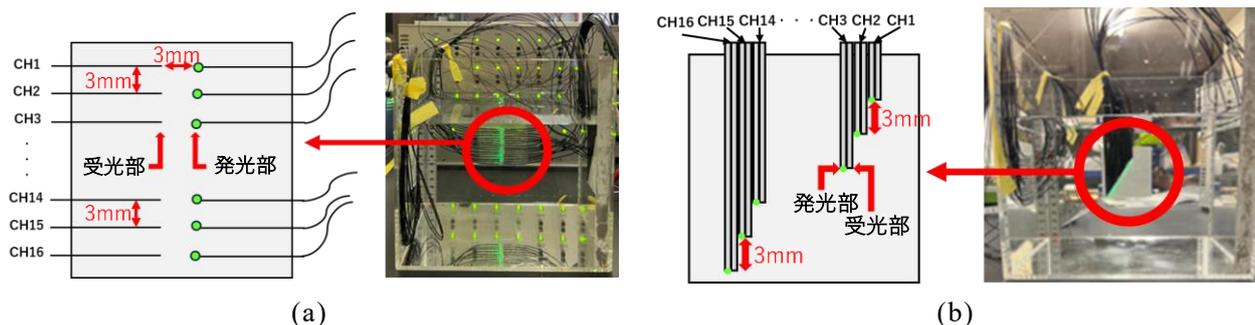


図-2 光ファイバセンサの計測方法：透過方式（a）；反射方式（b）

本実験ではファイバ線を通じて LED 光源を照射する方法に加え、光束が 10000 lm の外部照射する方法を追加し、光の強さによる光ファイバセンサの受信側での応答特性の違いを分析した。照射条件は、光ファイバセンサ発光部を介した LED 照射をパターン①、光束 10000 lm の LED 照明で外部から照射を行うパターン②とした。事前に水中での応答特性を把握するための実験を実施した。その後、飽和地盤中において洗掘に伴う砂面変化を模擬し、地盤中からセンサが露出した際の応答特性を把握する実験を行った。

3. 光ファイバセンサを用いた円柱構造物周りの洗掘深測定に関する造波水路実験

2.の基礎的実験を踏まえて光ファイバセンサを用いた計測方法に透過方式を採用し、円柱構造物周りに光ファイバセンサを設置することで波浪による洗掘深の経時変化の測定を試みた。1.の造波水路実験の方法を援用し、波浪外力は $KC = 1.5$ の条件とした。

(実験調査によって得られた新しい知見)

1. 地盤材料の特性を考慮した土砂動態把握に関する造波水路実験

円柱構造物周りの土砂動態：移動床区間における超音波式差面計で計測した 2,400 波載荷後の砂面高コンターを 図-3 と 図-4 に示す。波の進行は図の左から右に向かう方向である。珪砂 8 号では全体に土砂移動に伴う地形変化が大きく、特に構造物周りでは $\theta_{cyl} = 45^\circ \sim 135^\circ$ (θ_{cyl} は 図-1 に記載) 付近で洗掘が発生した。一方で、豊浦砂では砂漣が規則的に形成され、構造物周りでは $\theta_{cyl} = 90^\circ$ および 180° 付近で局所的に洗掘が発生した。珪砂 8 号と豊浦砂を比較すると、豊浦砂の方が移動床区間での土砂移動は小さく、洗掘孔は発生しなかった。

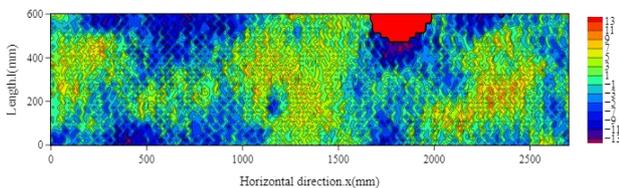


図-3 珪砂 8 号における波載荷後の地形

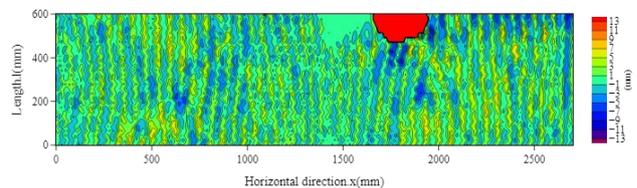


図-4 豊浦砂における波載荷後の地形

最大洗掘深の経時変化： 図-5 に珪砂 8 号および豊浦砂における最大洗掘深の経時変化を示す。最大洗掘深は初期の段階では地盤材料に依存しないが、継続時間の増加に従って地盤材料による違いが生じ、2,400 波に相当する時刻では珪砂 8 号が豊浦砂よりも約 2.1 倍程度、洗掘深が大きくなった。

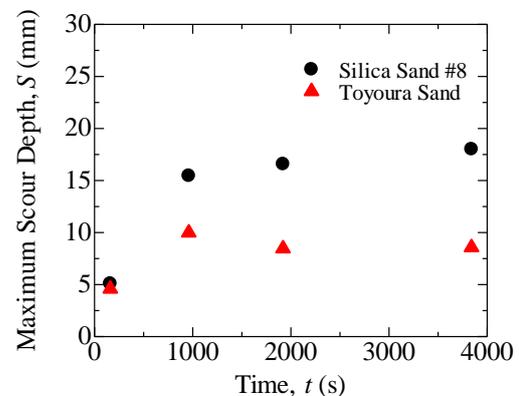


図-5 最大洗掘深の揭示変化

2. 光ファイバセンサの応答特性に関する基礎的実験

洗掘に伴う砂面の変化を模擬するため、基盤層厚 50 mm とし、基準面～深度 50 mm までの間で 10 mm ずつ地盤層を増設した際の応答特性を調べた (図-6). 地盤材料には豊浦砂を用い、相対密度 $D_r = 80\%$ で堆積させた。

図-7 に洗掘に伴う砂面の変化におけるセンサの応答値を示す。縦軸は洗掘深を示しており、例えば、縦軸が示す 10 mm は、10 mm に設置したセンサが露出した地点を示している。本図をもとに縦軸の洗掘深に設置深度に対応するセンサの応答値がどの程度であ

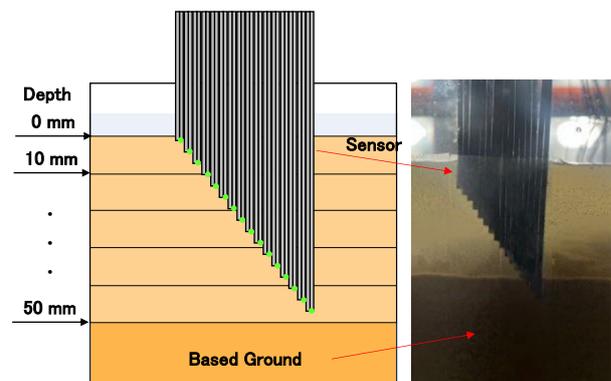


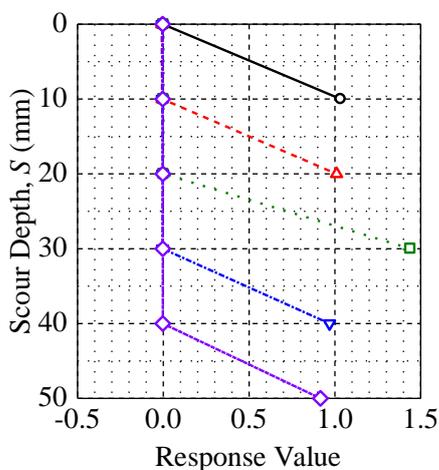
図-6 最大洗掘深の揭示変化

ったかを読み取る．応答値については，地盤が存在しない水中での応答値で除して正規化している．この応答値が 1.0 となると，地盤中からセンサが完全に露出したと考える．

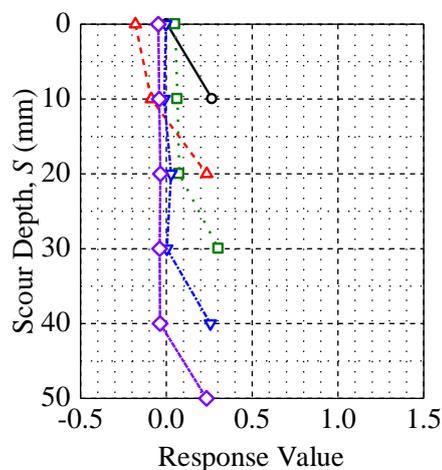
透過方式では，照射方法のパターン①（図-7(a)）およびパターン②（図-7(b)）ともに，洗掘に伴ってセンサが露出すると応答した．特に，パターン①では露出することで水中時に計測された応答値と同等の値となったが，パターン②では低い値となった．

反射方式では，パターン①（図-7(c)）では地盤外への露出に伴った値の変化を確認することはできなかった．パターン②（図-7(d)）では透過方式と同様にセンサの露出に伴った応答が見られたが，透過方式よりもかなり低い値となった．

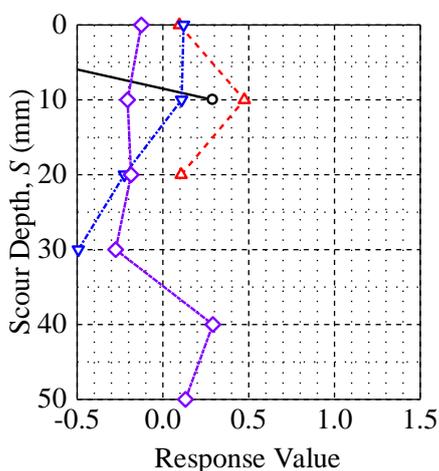
以上の結果から，透過方式におけるパターン①の照射方法がより明確に洗掘に伴うセンサ応答を示すことが明らかとなった．



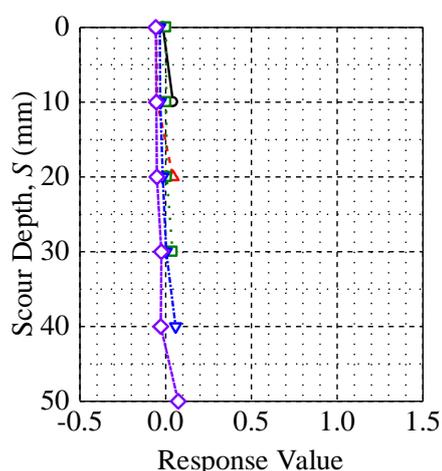
(a) 透過方式（パターン①）



(b) 透過方式（パターン②）



(c) 反射方式（パターン①）



(d) 反射方式（パターン②）

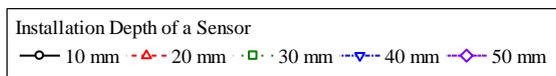


図-7 最大洗掘深の揭示変化

3. 光ファイバセンサを用いた円柱構造物周りの洗掘深測定に関する造波水路実験

円柱構造物周りに光ファイバセンサを透過方式で設置し，波浪に伴う洗掘深の経時変化を

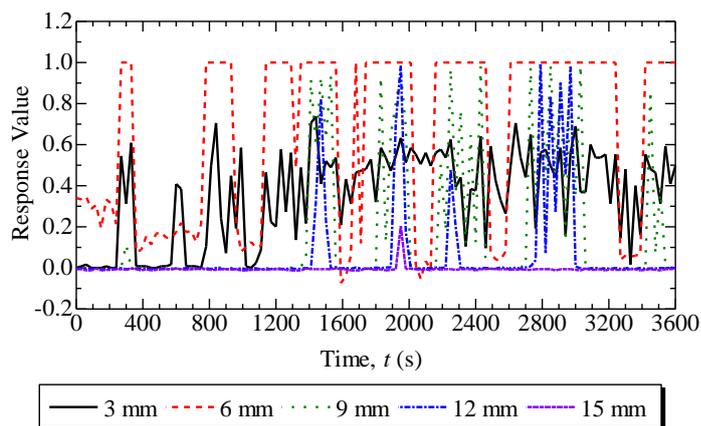


図-8 $\theta_{cyl} = 90^\circ$ に設置したセンサ応答の経時変化

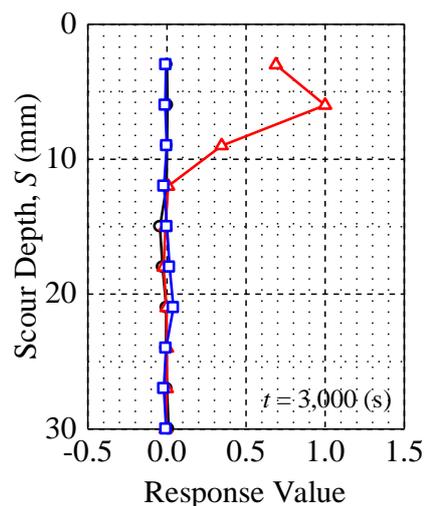


図-9 洗掘深の推定

観察した。センサの設置位置は、 $\theta_{cyl} = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ で、地表面 0 mm から地盤深度 30 mm までを 3 mm 間隔で計測した。センサの設置方法は、3D プリンタで治具を作製し、等間隔に設置できるように工夫している。

図-8 に $\theta_{cyl} = 90^\circ$ に設置したセンサ応答の経時変化を示す。構造物近傍では地盤深度 12mm に設置したセンサが反応しており、波外力により土砂移動が生じたと考える。各センサの応答値は時間の変化とともに 0.0~1.0 (深度 6mm のセンサにおいては 1.0 以上の応答が生じたため、上限を 1.0 に修正している) を変動しており、洗掘と堆積を繰り返しながら、複雑に地形が変化していることを捉えた。図-9 に $t = 3,000$ s における $\theta_{cyl} = 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ の深度方向の応答値を示している。90° において 12 mm 程度の洗掘深が生じていることがわかり、別途、撮影した画像から同程度の洗掘深が生じていることを確認しており、計測結果の妥当性と計測手法としての有用性を示すことができた。

参考文献

- 1) Dean, R. G.: Heuristic models of sand transport in the surf zone, Proc. Conf. Eng. Dyn. in Surf zone, pp. 208-214, 1973.
- 2) 松田達也, 三浦均也, 佐藤隼可, 諫山恭平, 澤田弥生: Dean Number を適用した移動床造波水路実験における地盤内水圧応答, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.73, No.2, pp.I_1117-I_1122, 2017.
- 3) B. M. Sumer, J. Fredsoe, N. Christiansen: Scour around vertical pile in waves, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol.118, No.1, pp.15-31, 1992.
- 4) 山野貴司, 酒井大樹, 重松孝昌, 藤原隆一: スリット諸元が有脚式離岸堤の局所洗掘特性に及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集 B2(海岸工学), Vol.74, No.2, pp.I_835-I_840, 2018.

(発表論文)

本研究内容は未発表であり、現在、論文投稿に向けた準備・検討を行っている。