

大口径モノパイル基礎の地震時挙動に対する FLIP3D プログラムの適用性検証

上田恭平*

1. 研究の目的

洋上風力発電のモノパイル基礎において、将来的な風車の大型化に伴い、杭の大口径化が今後益々顕著になっていくと考えられる。遠心力場においてモノパイル基礎の頂部に繰返し水平変位を作用させ、基礎-地盤系の繰返し挙動に及ぼす基礎の口径比（=埋設杭長 L / 杭径 D ）の影響を調べた事例はあるものの、口径比や底面摩擦が大口径モノパイル基礎の地震時挙動に及ぼす影響について研究した事例は限られている。そこで本研究では、まず遠心力場での模型振動実験を実施することでこれらの影響を明らかにするとともに、3次元有効応力解析の適用性について検証することを目的とする。

2. 研究の方法

(1) 遠心模型実験

遠心模型実験には、京都大学防災研究所所有の遠心力载荷装置を使用した。幅 450 mm、奥行き 150 mm の剛土槽内に、豊浦砂を用いて相対密度 80% の均一な地盤を作製した。地盤は突き固め法により作製し、杭の貫入による相対密度の変化を避けるため、モノパイル基礎は地盤作製の途中に設置した。口径比の異なる 3 つのモデル ($L/D = 3, 6, 10$) を対象とし、それぞれの口径比に対して底面摩擦の有無（図-1 において右側が摩擦あり、左側が摩擦なし）をパラメータとした。摩擦ありの条件では、模型杭の底面に耐水紙やすりを接着剤で取り付けた。地盤の飽和後に所定の遠心力を付与し、テーパ付き正弦波（実換算で周波数 1 Hz、最大加速度 300 gal、繰返し回数 30 回）による加振を実施した。

(2) 3次元有効応力解析

3次元有効応力解析³⁾では、遠心模型実験で使用した模型のプロトタイプを対象とし、3次元有限要素メッシュを作製した（図-2）。初期自重解析を行った後、模型実験で得られた入力波（実換算）を解析モデル底面に作用させ、口径比や底面摩擦の有無が地震時挙動に及ぼす影響について検討した。地盤はひずみ空間多重せん断モデル（カクテルグラスモデル）によりモデル化し、底面摩擦なしの場合には杭底面・地盤間のジョイント要素においてせん断力を無視することとした。

3. 得られた成果

まず、遠心模型実験において観測された加振中のモノパイル基礎の最大傾斜角について考察する。口径比 $L/D = 3$ では 2.76 度 / 1.98 度、 $L/D = 6$ では 1.47 度 / 1.56 度、 $L/D = 10$ では 2.70 度 / 3.20 度（いずれも摩擦あり / 摩擦なしの順）であった。 $L/D = 3$ のモデルでは摩擦の有無による影響が他の 2 つのモデルよりも大きく、このモデルのみ底面摩擦を考慮した方が最大傾斜角が大きくなった。限られ

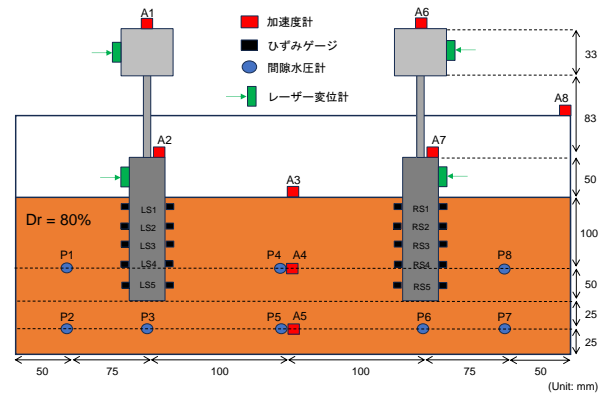


図-1 遠心模型実験の断面図

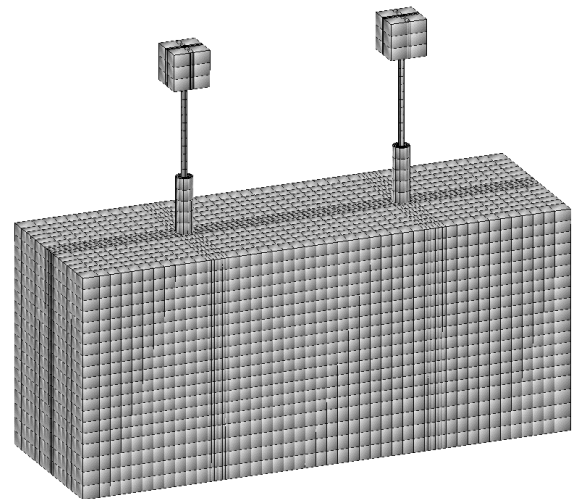


図-2 3次元有限要素モデル

*京都大学防災研究所・准教授

た実験ケースからの類推ではあるが、モノパイル基礎の大口径化が進むにつれて底面摩擦の有無が地震時挙動に無視できない影響を及ぼすことが示唆される。次に口径比の影響について比較すると、底面摩擦の有無にかかわらず、 $L/D = 6$ のモデルで最大傾斜角が最も小さくなる結果であった。このことはさらなる大口径化が傾斜角などの地震時応答に悪影響を及ぼす可能性を示しており、口径比の影響については今後より詳細な検討が必要であると考えられる。

次に、口径比 $L/D = 10$ の底面摩擦ありのモデルをピックアップし、遠心模型実験と 3 次元有効応力解析の結果を比較する。まず、図-3 における A4, A5, A7 に着目すると、実験で計測された加速度応答が解析で良好に表現されている。一方、地表面 A3 では実験の方がスパイク状の加速度振幅が大きい。また、風車部 A6 では解析における振幅がほぼ一定なのに対して、実験では 13 秒付近で一度減衰する様子が確認できる。次に図-4 より、5 秒から 30 秒付近にかけて過剰間隙水圧の上昇が見られる点は実験と解析で共通しているが、解析の方が正のダイレイタンスに伴う動的振幅が大きい傾向にある。最後に図-5 に示す杭の傾斜角の時刻歴より、実験では A6 の加速度応答と同様に 13 秒付近で傾斜角の低減が見られる。一方、解析では振動中の傾斜角振幅はほぼ一定である。これらの差異については今後さらなる検討が必要であるが、最大傾斜角や残留傾斜角については解析により実験結果を概ね表現できることが確認された。なお、数値解析においては底面摩擦の有無による影響は実験ほど顕著には見られなかった。

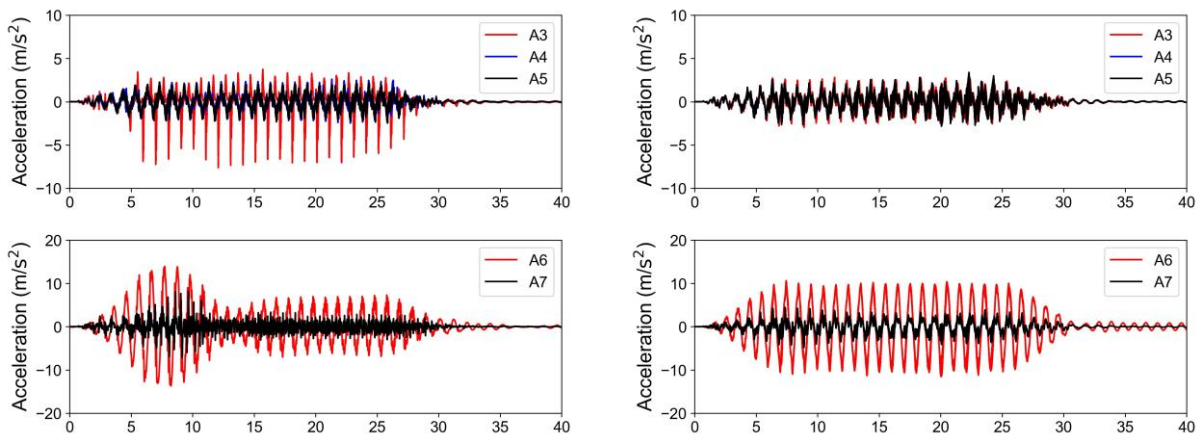


図-3 応答加速度の時刻歴 ($L/D = 10$: 摩擦あり) : (左) 実験, (右) 解析

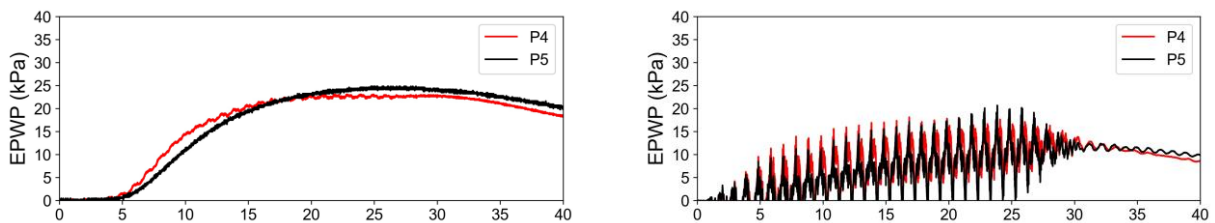


図-4 過剰間隙水圧の時刻歴 ($L/D = 10$: 摩擦あり) : (左) 実験, (右) 解析

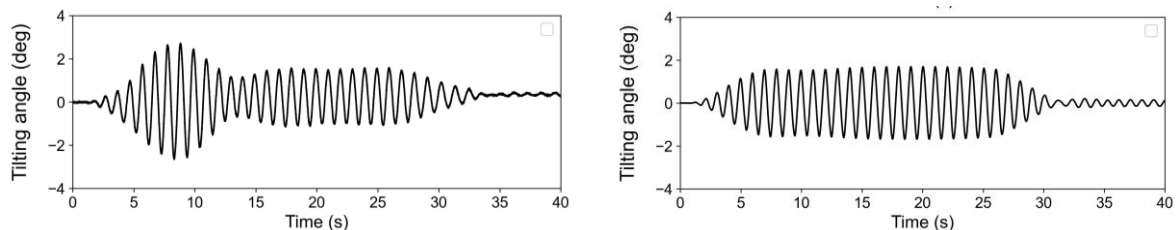


図-5 杭傾斜角の時刻歴 ($L/D = 10$: 摩擦あり) : (左) 実験, (右) 解析

参考文献

- 1) Takahashi, A., Omura, N., Kobayashi, T., Kamata, Y., Inagaki, S.: Centrifuge model tests on large-diameter monopiles in dense sand subjected to two-way lateral cyclic loading in short-term, *Soils and Foundations*, 62(3), 1011-148, 2022.
- 2) Iai, S., Ozutsumi, O.: Yield and cyclic behaviour of a strain space multiple mechanism model for granular materials, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 29(4), 417-442, 2005.