

粘性土地盤の洋上風力 TLP 基礎杭の繰返し载荷に対する安定性実験

東洋建設 正会員○宮本順司 東洋建設 正会員 牧野 凌弥
東洋建設 正会員 伊藤 輝 東洋建設 正会員 白庄司 健之
東洋建設 正会員 傳 亮司 東洋建設 正会員 日請 真宏
港湾空港技術研究所 水谷 崇亮

1. はじめに

再生可能エネルギーの主電源化実現に向け、洋上風力発電施設の普及が重要視されており、着床式だけでなく浮体式施設の技術開発も期待されている。浮体形式の1つにTLP（Tension Leg Platform）形式（図-1）があるが、国内において実証例はなく、課題の一つとして変動が大きい引張荷重が作用する係留基礎の安定性が挙げられる。筆者らは、これまで密砂地盤に設置した杭の鉛直繰返し载荷に対する安定性を模型実験で調べたり、本研究では、粘性土地盤が多い地層に設置された杭の鉛直繰返し载荷に対する安定性を調べるとともに、浮体の並進に伴う水平方向荷重が杭の鉛直方向の安定性に与える影響を調べる。

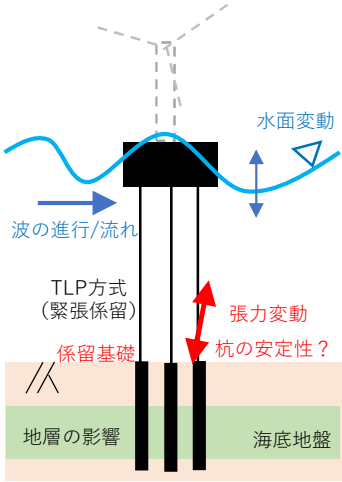


図-1 TLP基礎概要図

2. 実験内容と模型地盤

実験シリーズを表-1に示す。遠心力60g場で3種類の実験を行った。いずれも杭の鉛直方向引抜きに対する安定性を評価している。鉛直繰返し荷重のレベルは、既往研究¹⁾²⁾と同様に平均荷重 Q_{vmean} と片振幅 Q_{vcyc} を用いて表す。水平繰返し荷重のレベルは、本研究では鉛直荷重の2割とした。これは、浮体の並進による水平移動量と係留索長さから想定したものであり、水深が大きいほど鉛直荷重に比べて小さくなる。詳細は浮体動揺解析などで求められる。鉛直も水平も繰返し载荷は1200波周期2秒である。

表-1 実験シリーズと目的

種類	目的	ケース数
1 鉛直引抜単調载荷	地盤の引抜耐力	4
2 鉛直繰返し载荷	鉛直繰返し荷重が杭の鉛直引抜きに及ぼす影響	14
3 鉛直一定引抜荷重下水平繰返し载荷	水平繰返し荷重が杭の鉛直引抜きに及ぼす影響	4

実験模型を図-2に示す。地盤は下から粘土層、緩砂層で構成される。地盤中央に直径20mm、長さ500mmの杭模型（アルミ製）を設置している。実物換算で径1.2m、長さ30mの杭である。粘性土地盤はNFSカオリン（ $G_s=2.71$, $w_L=49.3\%$, $w_P=29.0\%$ ）であり、スラリーの状態（ $w=78\%$ ）から60g場で圧密させることで作製した（ $e=1.07$, $w=39.4\%$ ）。砂地盤は東北珪砂7号（ $G_s=2.64$, $D_{50}=0.16mm$, $Dr=60\%$ ）であり、圧密後の粘性土地盤の上に1g場にて砂を水中落下で作製した。間隙水は水である。杭は粘性土地盤圧密後に1g場にて、設置箇所の粘性土のサンプリングを行ったのち打込みにより設置した。作製した模型地盤は2種類でありそれぞれの地盤でシリーズ2、シリーズ3の試験を繰返し行った。単調载荷試験（シリーズ1）はそれぞれの地盤で行った。

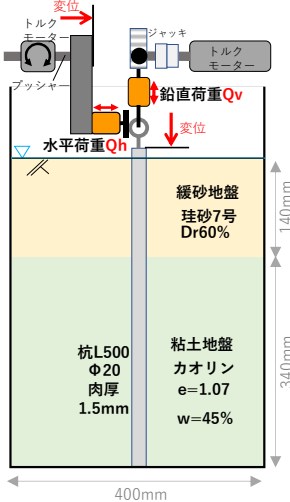


図-2 実験模型図 (60g場)

3. 実験結果

(1) 引抜耐力 引抜荷重-鉛直変位の関係を図-3に示す。図には、既往研究で得られた密砂地盤に設置された杭の引抜き試験結果³⁾も重ねて示している。本研究では2種類の地盤で引抜き試験を行っているが、No.2の引抜耐力は平均762N（図中の赤線）、No.3は842N（緑線）である。一方、既往研究の密砂地盤の引抜耐力は

キーワード 浮体式洋上風力、遠心模型実験、杭、繰返し载荷、粘性土地盤
連絡先 〒663-8142 兵庫県西宮市鳴尾浜 1-25-1 TEL:0798-43-5903

3100N であり、実験条件の違い（再現する杭の大きさの違い）はあるが、地層が密地盤から粘土地盤-緩砂地盤系になることで引抜き耐力は著しく小さくなる。

(2) 鉛直繰返し载荷に対する安定性 軸方向引抜き繰返し载荷に対する杭の応答は、既往研究¹⁾²⁾に従い、安定・半安定・不安定に分類する。本報では、代表的な安定ケースを示す（図-4）。安定とは繰返し荷重作用下で杭の変位が安定している、1000 波までで極限に至らない状態である。このケースでは、 $Q_{v\text{mean}}/Q_t=0.49$ ， $Q_{v\text{cyc}}/Q_t=0.3$ の繰返し荷重（繰返し荷重の平均と片振幅がそれぞれ引抜き耐力 Q_t の 49%,30%）を作用させており、最大 620N の荷重（引抜き耐力 Q_t の 80%）が繰返し作用している。このような厳しい荷重状態であるものの、鉛直変位は僅かで発達はやがて収束している。その他ケースの安定性結果は後述する（図-6）。

(3) 水平繰返し载荷に対する安定性 代表ケースとして一定引張荷重（ $Q_{v\text{mean}}/Q_t=0.6$ ）下の水平繰返し载荷（ $Q_{h\text{mean}}/Q_t=0.58 \times 0.2$ ， $Q_{h\text{cyc}}/Q_t=0.26 \times 0.2$ ，注： $Q_h=Q_v$ の 2 割）の結果を示す（図-5）。鉛直方向の変位は発達しておらず安定である。また水平変位は振動するものの残留変位は発達しない。他の 3 ケースの水平繰返し荷重についても杭は安定であった（荷重条件は図-6 参照）。

(4) 安定性評価 様々な繰返し载荷時の杭の安定性を既往研究¹⁾²⁾と同様の方法でダイアグラムに示した（図-6）。同図でプロット点の位置は繰返し载荷の荷重条件を表し、プロット点の色が安定～半安定～不安定の結果を示している。水平繰返し試験はプロット点の荷重の 2 割が载荷荷重である。図中の点線は、既往の砂地盤の実験で得られている安定/半安定/不安定境界線である。図より、 $Q_{v\text{mean}}/Q_t$ が 0.5 以下の場合、本研究（主に粘土地盤）の安定領域が砂地盤の場合よりも広がっていることがわかる。また、砂地盤の不安定領域には安定と不安定の結果が混じっている。僅かな条件の違いで安定/不安定が分かれる可能性がある。

4. まとめ

緩砂地盤—粘性土地盤系に設置された TLP 基礎杭の、鉛直繰返し载荷、鉛直一定荷重下の水平繰返し载荷に対する安定性を 60g 場の遠心模型実験により調べた。密砂地盤に比べて主に粘性土の地盤では大きく引抜き耐力が減少し、鉛直繰返し载荷に対する安定領域が砂地盤の場合より広がった。また、鉛直変動に付随する水平変動（鉛直の 2 割の荷重）に対して、今回の実験条件では杭は引抜きに安定であった。今後は、TLP 杭の設計に活かせるよう検討を深めていく予定である。

謝辞：本研究の成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）の助成事業（JPNP 21014）により得られたものです。ここに感謝の意を表します。参考文献：1) 宮本ら（2022）. 土木学会論文集 B3, 78-2, I_613-I_618. 2) Jardine, R.J. & Standing J. R. (2012). Soils and Foundations, 52(4), 723-736.

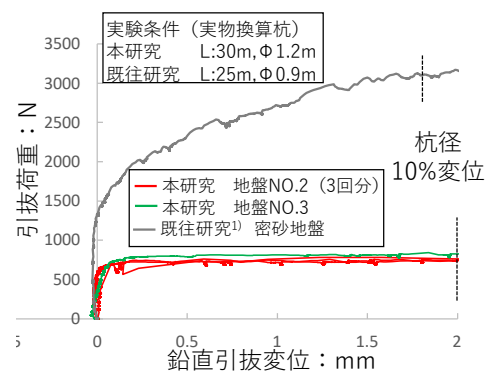


図-3 単調引抜き試験結果

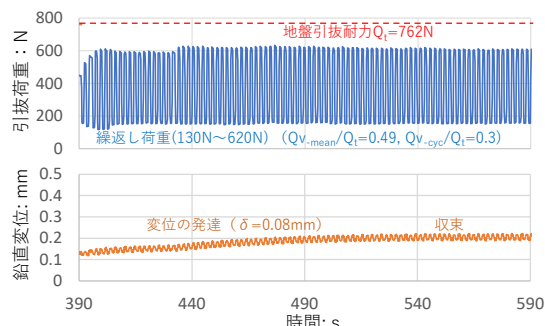


図-4 鉛直繰返し载荷に対する杭の応答（安定ケース）

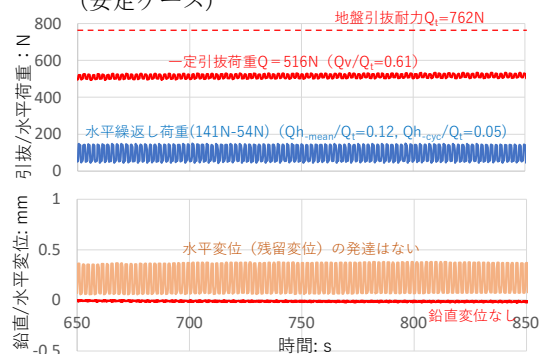


図-5 鉛直一定荷重作用下の水平繰返し载荷に対する杭の応答

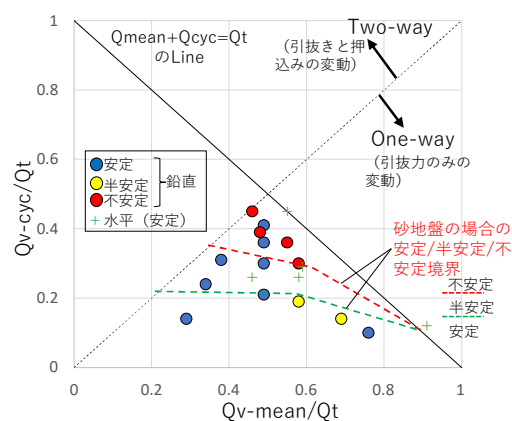


図-6 繰返し载荷時の杭の安定性評価図