

(25) 杭基礎に作用する側方流動の荷重特性

(財)電力中央研究所 ○大友敬三、岩楯敏広

(財)電力中央研究所 清水幹夫、朱牟田善治

東海大学

浜田政則

1. はじめに

側方流動に起因した杭基礎の被害事例に対して、杭基礎の破壊機構を解明するための数値解析的な検討がこれまでも行われてきている^{1)~4)}。これらの検討はどちらかといえば、杭基礎の破壊パターンを最も良く説明する地盤変位分布を推定することを主眼としたものであり、杭基礎に作用する側方流動の荷重特性に関する検討は行われていない。また、これらの数値解析では基本的に応答変位法が採用されているが、側方流動のように地盤が大変形するときには、構造物が周辺地盤に弾性支持されているという応答変位法の適用条件が成り立つとは考えにくい。一方、粘性流体中に置かれた物体に作用する抗力を液状化時の埋設パイプラインの浮上量⁵⁾や杭基礎に作用する側方流動の荷重⁴⁾の評価に応用した研究例がある。これらの研究は完全に液状化した地盤を粘性流体として取り扱っているが、液状化した地盤の粘性的性質は詳細に調べられていない。このため、本検討では、まず、振動台実験により杭基礎に作用する側方流動の荷重特性を把握した。さらに、液状化した地盤の粘性的性質を測定することにより抗力の推定に必要な諸量を求め、抗力を杭基礎模型に作用する側方流動の荷重特性評価⁶⁾に適用することを試みた。

2. 振動台実験

表-1 杭模型の諸元

Indication	Material	Length (m)	Diameter (m)	Flexural Stiffness(N·m ²)
PC25	polycarbonate	6.6×10^{-1}	2.57×10^{-2}	62
PE25	polyethylene	6.6×10^{-1}	2.54×10^{-2}	34
PC175	polycarbonate	6.2×10^{-1}	1.75×10^{-2}	14
PE175	polyethylene	6.2×10^{-1}	1.75×10^{-2}	10

(1) 実験方法

振動台実験では、なるべく容易に側方流動を起こして杭模型（以下、杭と呼ぶ）の挙動や作用荷重を把握することを主眼とするため、地表面勾配が2%の飽和砂地盤を作成した。本実験では、極力、単純に荷重特性を抽出するため上部構造が存在しない杭を採用した。振動台（台寸法 6.5m×6.0m）に鋼製土槽（高さ100cm長さ600cm奥行き100cm）を設置して飽和砂地盤を作成した。杭にはプラスチック製の中実棒を4本採用し、土槽底部に完全固定した。杭の諸元は表-1に示す通りである。計測項目は地盤の応答加速度、過剰間隙水圧ならびに側方流動、杭の曲げひずみなどである。これらの諸量を図-1に示すような配置で計測した。

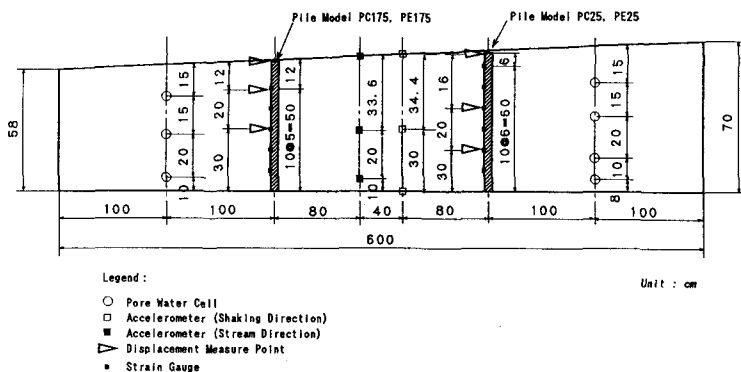


図-1 計測点の配置

本実験では、側方流動と杭の挙動を時刻歴で、しかも同時計測することを試みた。このため、図-2に示すような仕組みで地盤中にターゲットを埋設しておき、流動した砂がターゲットに作用した時の張力をワイヤーを介して巻き込み型の変位計に接続することにより地盤中の側方流動を時刻歴で計測した。

(2) 杭の挙動

振動数10Hz、加速度振幅約680Galの正弦波20波で飽和砂地盤を加振した。振動台による加振は土槽の短辺方向、すなわち側方流動の発生方向に直交する方向である。なお、砂地盤の相対密度は約50%であった。この加振により土槽内はほぼ全領域にわたって液状化し、これと同時に側方流動が発生した。図-3は、側方流動の影響を受けた杭の挙動の一例として、深さ16cmにおける側方流動とPC25杭に発生した曲げひずみの時刻歴を比較したものである。杭の変形は側方流動が始まると同時に認められ、側方流動が継続している間に最大曲げひずみが発生している。このことから、泥水状となった液状化地盤が杭の周囲をすり抜けるときに最も大きな影響を及ぼすことがわかる。

(3) 杭に作用した荷重

杭に作用した荷重は、はりの理論に従い曲げモーメントを杭軸方向に2回微分することにより求めた。この場合、杭は一端固定のはりにモデル化した。杭の曲げモーメントは表-1に示した杭の曲げ剛性を用いて曲げひずみから換算した。さらに、曲げひずみ計測点における曲げモーメントに対して回帰分析を行うことにより、曲げモーメント分布を定めた。

図-4に振動台加振後2.0秒の杭の荷重分布を示す。杭の種類によって分布形が異なるが、トータルの荷重強度は表-1で示した杭の曲げ剛性の相違にかかわらず、同程度であるとみなすことができる。加振後2.0秒では、図-3に示したように側方流動はまだ泥水状となって継続中である。したがって、杭の周辺地盤の地盤剛性は非常に小さく、得られた荷重分布は杭周辺地盤の地盤反力の影響はほとんど受けていないと考えられる。このことは、側方流動による荷重が流体力として近似できることを示唆している。

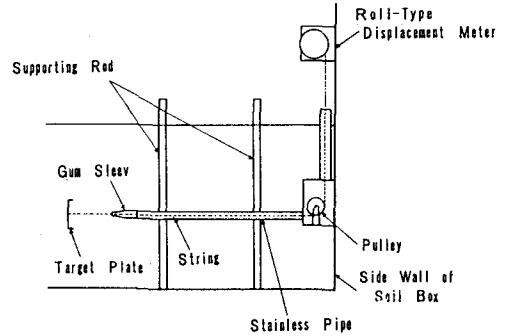


図-2 側方流動の計測方法

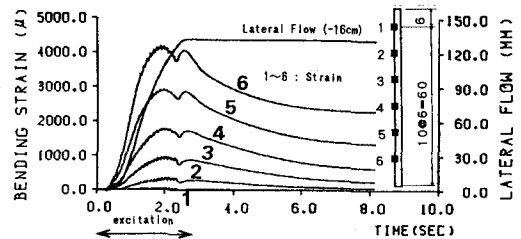


図-3 側方流動とPC25杭の曲げひずみ

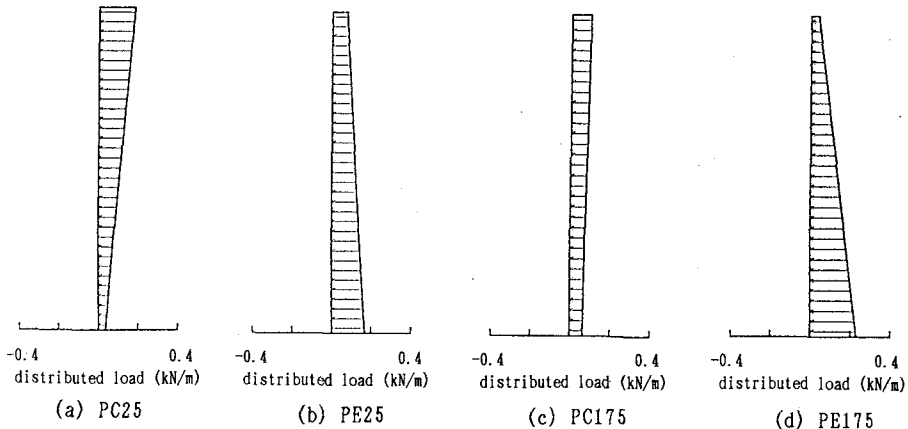


図-4 杭に作用した側方流動の荷重 (加振後2.0秒)

3. 液状化した地盤の粘性の性質

(1) 実験方法

飽和砂地盤は鋼製砂箱（高さ56cm、長さ51cm、奥行き70cm）の中に作成した。実験に用いた砂は岐阜砂（均等係数 1.59、最大粒径 0.84mm）であり、それを相対密度約 50% となるように砂箱に詰めた。図-5 に示すように所定の水頭差を与えて上向き浸透流により飽和砂地盤を完全液状化させた。完全液状化は土槽側壁に取り付けた間隙水圧計で読み取った動水勾配により判定した。

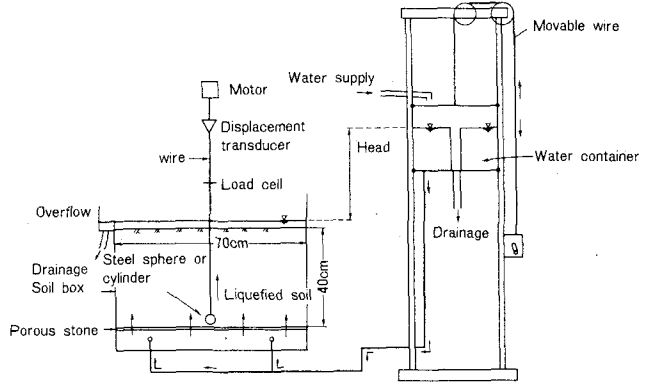


図-5 液状化した地盤の粘性の性質測定装置

液状化を継続させた状態で地盤中に設置した供試体を引き上げ、引き上げ速度 v と引き上げ時の抵抗力 F などを測定した。このような測定データに基づいて、液状化した地盤の粘性係数 η ・動粘性係数 ν ならびに抗力係数 C_d とレイノズル数 R の関係を求めた。前者の測定には直径 3cm の鋼球、後者に対しては直径 2.4cm、長さ 20cm の鋼棒を用いた。供試体の引き上げ速度は無段変速モーターにより制御したが、引き上げ速度の範囲は、鋼球と鋼棒それぞれに対して、0.02~0.2cm/s、0.5~2.0cm/s とした。

(2) 液状化した地盤の粘性係数

今回の検討では、液状化した地盤をニュートン流体と仮定した。この場合、せん断応力 τ とせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の間には η を介して(1)式のような構成式が成り立つ。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

一方、鋼球の引き上げ時の F はストークスの法則により(2)式で求められる。

$$F = 6\pi r v \eta \quad (2)$$

ここで、 r は鋼球の半径である。また、引き上げ時の鋼球まわりに作用する τ は(3)式で定義できる。

$$\tau = F / 4\pi r^2 \quad (3)$$

(1)~(3)式から(4)式の関係が導かれる。

$$\dot{\gamma} = 3v / 2r \quad (4)$$

したがって、(3)式と(4)式から τ と $\dot{\gamma}$ を決め、横軸に τ 、縦軸に $\dot{\gamma}$ をプロットする。それらの直線回帰式の傾きの逆数から η が求められる。

図-6 に示すように、今回の検討では η は 970Pa・s という結果となった。また、液状化した地盤の密度は 1.8~1.9kN/m³ であるから、 ν は $5 \times 10^{-1} \text{m}^2/\text{s}$ となる。一方、水温 20度における動粘性係数は $1 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ であるから、今回の実験で得られた動粘性係数は水と比べておおよそ 10^5 倍のオーダーとなる。

(3) 抗力係数とレイノズル数の関係

単位長さ当たりの鋼棒の引き上げ時の F が(5)式に示すような抗力 f と考えられる。

$$f = \rho C_d v^2 D / 2 \quad (5)$$

ここで、 ρ は液状化した地盤の質量密度、 D は鋼棒の直径である。(5)式に引き上げ速度と抵抗力を適用し

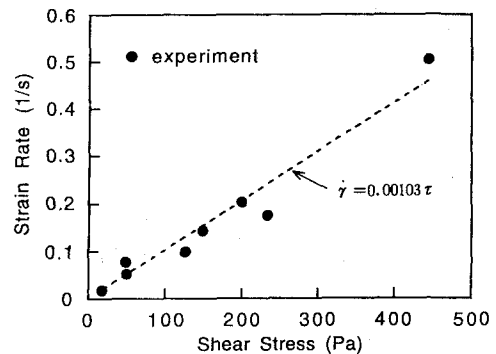


図-6 液状化した地盤の粘性係数測定結果

て C_d を求めた。また、引き上げ速度はすでに得られている液状化した地盤の ν を利用して(6)式によって R_e に換算できる。

$$R_e = \nu / \nu D \quad (6)$$

図-7に示すように、 C_d は R_e が非常に小さい範囲にあり、 R_e と反比例的な関係にあることがわかる。実験データに対して、回帰分析を行った結果、 C_d と R_e の関係に関して、(7)式のような実験式が得られた。

$$C_d = 1/R_e^{1.3} \quad (7)$$

図-7中には、比較のため、レイノズル数が非常に小さい範囲における円柱に対する理論的な C_d と R_e の関係式を示すが、実験データを過小に評価する傾向にあり、液状化した地盤のように粘性が非常に高いと考えられる流体に対しては適用できないと思われる。

4. 抗力による荷重の推定

実測 ν と(5)式、(7)式を利用して振動台加振後2.5秒までの範囲の杭に作用した抗力を推定した。ただし、 ν には、側方流動と杭の相対速度を用いた。側方流動の速度は時刻歴で得られている側方流動を微分して求めた後、深さ方向に線形補間した。一方、杭の速度については、図-4で示したような分布荷重を一端固定のはりに載荷することにより、杭のたわみを求めておき、流動速度と同様に時間微分した。一例として、深さ16cmにおけるPC25杭の推定抗力を実測荷重と比較して図-8に示す。加振後1.5～2.5秒の範囲では抗力と実測荷重は概略、一致する。しかしながら、加振後1.5秒までは、抗力と実測荷重の時刻歴変化は異なる傾向を示している。この段階では、杭の挙動に関して粘性抵抗に起因する抗力の効果が現れていないものと考えられる。

5. まとめ

振動台実験から杭に作用する側方流動の荷重は流体力で近似できることを示した。さらに、液状化した地盤の粘性的性質を測定結果、動粘性係数は水の 10^5 倍程度となり、抗力係数とレイノズル数の関係を示す実験式が得られた。これらの測定結果を利用すれば、杭に作用する側方流動の荷重は抗力により概略、推定できる見通しを得た。

参考文献

- 1) 小林他、第20回地震工学研究発表会講演概要、pp. 21-24, 1989.
- 2) 吉田他、第8回日本地震工学シンポジウム論文集、pp. 55-60, 1990.
- 3) 森他、第20回地震工学研究発表会講演概要、pp. 25-28, 1989.
- 4) Stewart, et. al., Proc. of 1st Japan-US Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities, pp. 173-182, 1988.
- 5) Kennedy, et. al., Proc. of Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering Speciality Conference, pp. 2-17, 1977.
- 6) 大友他、電力中央研究所研究報告、U92031、1992.

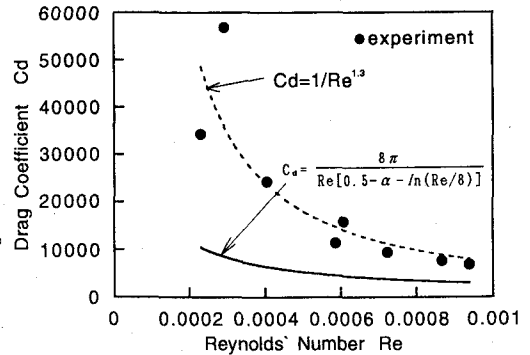


図-7 抗力係数とレイノズル数の関係

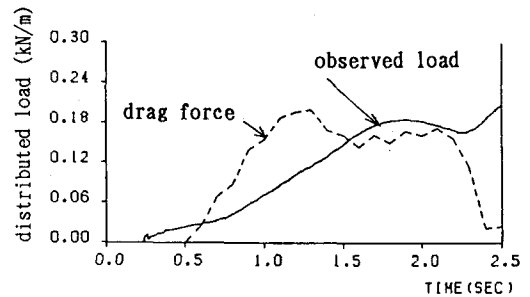


図-8 PC25杭に作用した荷重と推定した抗力