

# (26)液状化に伴う流動地盤中の杭に作用する流動力特性

鹿島建設株式会社 正会員 浜田 友康  
 建設省 土木研究所 正会員 大塚 久哲  
 建設省 土木研究所 正会員 二宮 嘉朗

## 1. はじめに

地表が傾斜した地盤や橋台前面のように常時から偏荷重が作用している地盤では、地震時の液状化により地盤に流動的な変位を生じ構造物に被害を生ずるが、その流動力の評価方法は明確になっていない。このため、本研究では図-1<sup>1)</sup>に示すような構造物基礎杭の被害に着目し、液状化により流動する地盤が杭に及ぼす流動力について検討を進めている<sup>2)3)</sup>。本文では、杭に作用する流動力と地盤の液状化の程度、地盤流動速度、杭径及び地盤の相対密度の關係に着目して実施した杭模型の牽引実験結果を報告する。

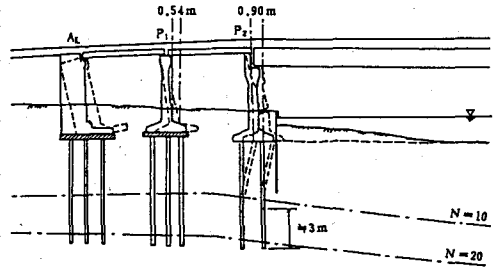


図-1 新潟地震における八千代大橋  
橋脚基礎杭の変形

## 2. 実験方法

実験には図-2に示す装置を用い、液状化地盤中で鋼棒に支持された杭模型を牽引する方法により、杭に作用する流動力(牽引抵抗力)の計測を行った。杭模型はいずれも長さ184mmの剛な鋼管で、杭径は表-1に示す3種類を設定した。

また、杭模型は長さ方向の地盤条件(液状化の程度)を同一とするため水平に設置し、両端には砂の回り込みを防止するよう整流板を取り付けた。杭模型はこの整流板を介して牽引鋼棒に固定されており、固定部付近に貼付した歪ゲージにより牽引抵抗力を計測した。なお、この計測値には杭模型の他整流板の牽引抵抗も含ま

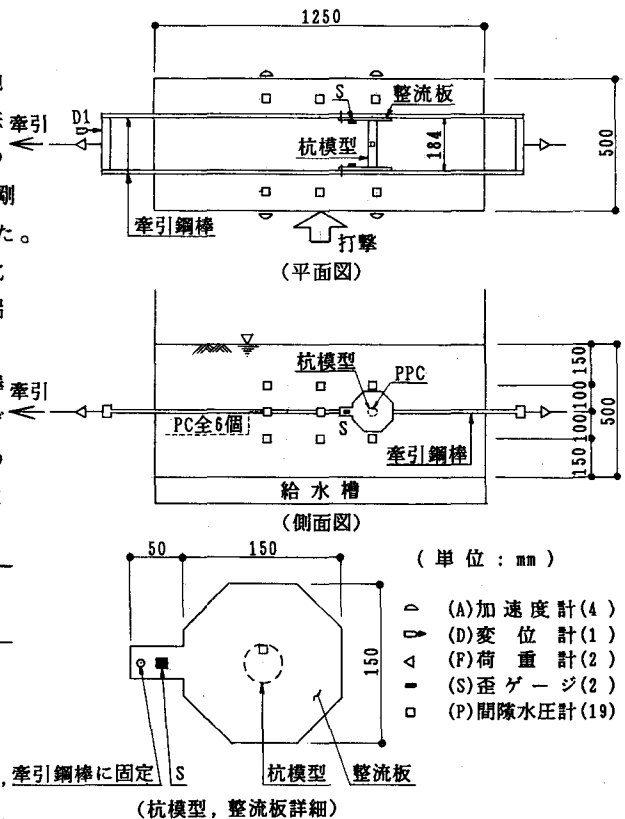


図-2 実験装置概要

表-1 実験ケース

ケース	杭径 $\phi$ (mm)	地盤の初期 相対密度 $D_r$ (%)	牽引速度 $v$ (mm/sec)
1	48.6	40	各ケース
2	34.0	40	とも下記
3	21.7	40	5段階
4	なし	40	14.7, 9.78, 牽引鋼棒に固定
5	34.0	70	4.75, 2.71,
6	なし	70	0.567

れるため、杭のない整流板のみの牽引実験を別途実施し、最終的にはこの抵抗を減じて各杭模型の牽引抵抗

力を評価した。地盤材料には標準砂を用い、ボーリングを生じさせて表-1に示す2種類の初期相対密度の飽和砂層を製作した。地盤の液状化は杭の牽引方向と平行な土槽側面の打撃により生じさせ、杭の牽引に地盤の振動が影響を与えないよう配慮した。杭の牽引は一定速度で土槽の打撃直後より開始し、前出の牽引抵抗力の他、周辺地盤及び杭模型周囲の過剰間隙水圧、牽引変位置、及び土槽加速度等を計測した。牽引速度（杭と地盤との相対速度、換言すれば地盤の流動速度）は、表-1に示す5段階に変化させた。

### 3. 実験結果

#### (1) 土槽加速度、牽引変位置、牽引抵抗力及び地盤の過剰間隙水圧の経時変化

実験結果の例として、図-3にケース2の $v=4.75\text{mm/sec}$ の場合の土槽加速度、牽引変位置、牽引抵抗力、及び地盤の過剰間隙水圧の経時変化を示す。土槽の加速度は打撃後早期に減衰しており、以降等速度での杭の牽引が行われている。牽引抵抗力は、杭両端の整流板に貼付したひずみゲージの計測値を荷重に換算し、その合計値で示した。また過剰間隙水圧は、地盤中の杭の設置深度に固定した平面6カ所の水圧計(PC)の内、計測値が安定している5カ所の計測値の平均を示した。牽引抵抗力は地盤が完全液状化している初期の段階では小さく、過剰間隙水圧の消散と共に増加しており、過剰間隙水圧が最小値に達し一定となった状態では、牽引抵抗力もわずかに増加する傾向はあるもののほぼ一定となった。

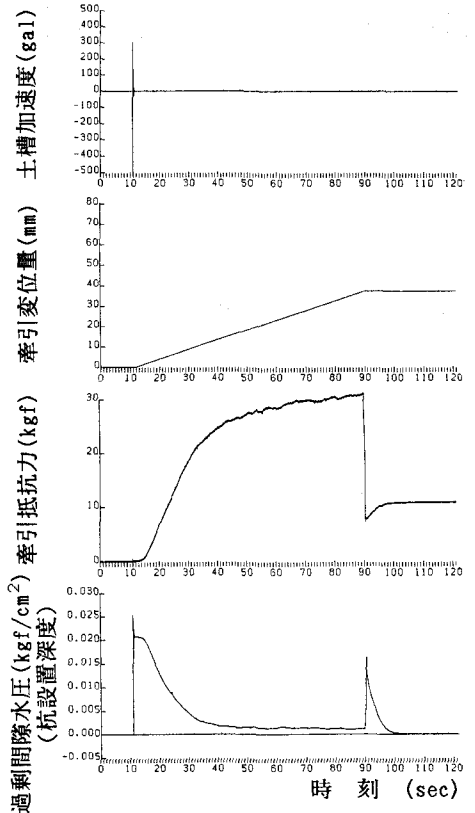


図-3 土槽加速度、牽引変位置、牽引抵抗力、過剰間隙水圧の経時変化の例 (ケース2:  $\phi=34.0\text{mm}$ ,  $Dr=40\%$   $v=4.75\text{mm/sec}$ )

#### (2) 地盤の過剰間隙水圧、牽引速度、杭径及び地盤の相対密度と牽引抵抗力の関係

牽引抵抗力の経時変化と、過剰間隙水圧 ( $\Delta u$ ) を水圧比 ( $Ru = \Delta u / \sigma'_{v0}$ ,  $\sigma'_{v0}$  は有効上載圧) に換算した値の経時変化との対応から、各牽引速度ごとに牽引抵抗力～過剰間隙水圧比関係の整理を行った

(図-4)。なお、再現性確認のため実験は同一条件で4回ずつ実施しており、図-4にはその平均を示したが、牽引抵抗力の変動係数は平均で6%程度となった。

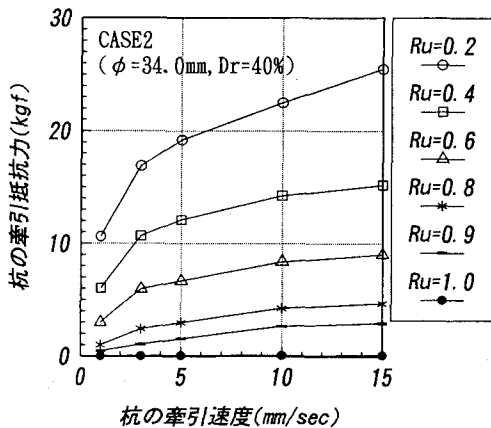


図-5 牽引速度と牽引抵抗力の関係

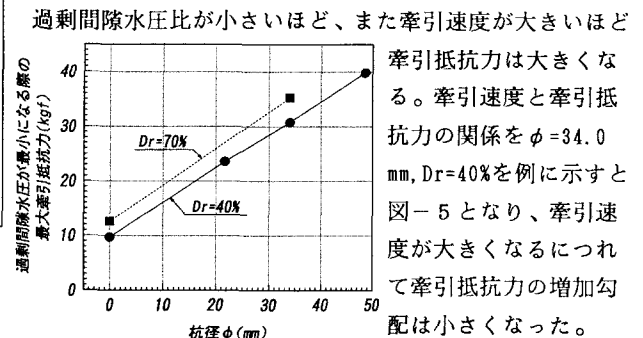


図-6 杭径と過剰間隙水圧が最小となる際の最大牽引抵抗力の関係 (次に、図-4の $Dr=40\%$ のケースで杭径の差

の影響について比較すると以下の傾向が読み取れる。①  $v \geq 1$ mm/secの場合  $Ru < 0.2$ ではほぼ杭径に比例して牽引抵抗力が大きくなっており、特に過剰間隙水圧比が最小となる際の最大牽引抵抗力はいずれの牽引速度でも各杭径ごとにほぼ同一で、その値は杭径に比例している(図-6)。②しかし、同じく  $v \geq 1$ mm/secの場合でも  $Ru \geq 0.2$ では、 $\phi 48.6$ mmと $\phi 34.0$ mmの牽引抵抗力にはほぼ杭径に比例した差があるが、 $\phi 34.0$ mmと $\phi 21.7$ mmの牽引抵抗力にはほとんど差がない。③また  $v < 1$ mm/secの場合  $Ru \geq 0.2$ の範囲で牽引抵抗力は杭径に関係なくほぼ同一となっている。

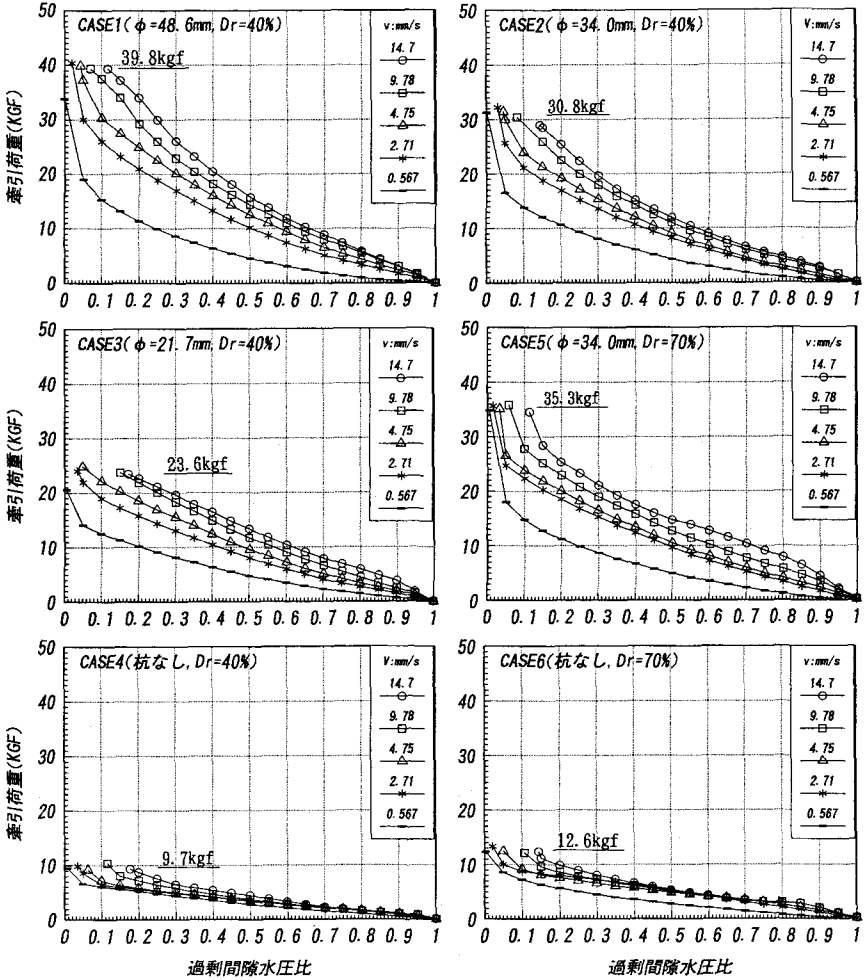


図-4 過剰間隙水圧比と牽引抵抗力の関係

最後に図-4の $\phi=34.0$ mmのケースで地盤の初期相対密度の影響について比較すると、 $Dr=40\%$ に比較して $Dr=70\%$ の地盤での牽引抵抗力が大きい、整流板のみの牽引抵抗にもほぼ同程度の差があり、整流板の抵抗を除去した杭自体の牽引抵抗力ではほとんど差がない結果となる。

(3) 液状化地盤を粘性流体として仮定する場合の杭に作用する牽引抵抗力の評価

牽引抵抗力は牽引速度の増加とともに大きくなる傾向があり、本節では液状化地盤を粘性流体として仮定し、下式で示される一様流れの中に置かれた円柱(杭)に作用する抗力の考え方を適用して牽引抵抗力を評価する方法について検討を行う。

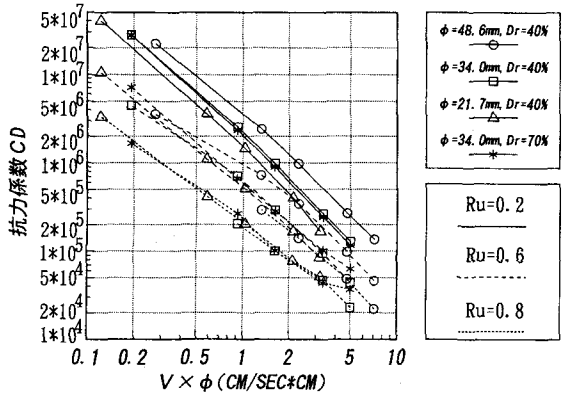


図-7  $v \cdot \phi$ と液状化地盤中の杭の抗力係数の関係

$$D = C_D \cdot A \cdot \rho \cdot v^2 / 2 \quad \text{①}$$

ここに、

D : 牽引抵抗力 (kgf)

$C_D$  : 抗力係数

A : 杭の牽引方向への投影面積 ( $18.4 \cdot \phi$  cm<sup>2</sup>)

$\phi$  : 杭径 (cm)

$\rho$  : 液状化地盤密度

$$(Dr=40\% : \rho = 1.934 \cdot 10^{-6} \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{cm}^4)$$

$$(Dr=70\% : \rho = 1.976 \cdot 10^{-6} \text{ kgf} \cdot \text{sec}^2 / \text{cm}^4)$$

v : 牽引速度 (cm/sec)

一般的な流体中の円柱の場合であれば、抗力係数は図-8<sup>4)</sup>に

示すように②式のレイノルズ数 (Re) に対応して一義的に定まることとなる。

$$Re = v \cdot \phi / \nu = v \cdot \phi / (\mu / \rho) \quad \text{②}$$

ここに、 $\nu$  : 動粘性係数

$\mu$  : 粘性係数

ここで $\nu$ もしくは $\mu$ で示される液状化地盤の粘性については、地盤の有効拘束圧、過剰間隙水圧比あるいは相対密度等に対応して定まる定数と考えられるが、あらかじめ想定することはできない。そこで、図-4の杭の牽引抵抗力から整流板の抵抗を除去した杭自体の牽引抵抗力を基に、①式により各過剰間隙水圧比ごとの $C_D$ を算出し、 $v \cdot \phi$ との相関を図-7に示した。

抗力係数は $v \cdot \phi$ が大きくなるとともに値が小さくなる傾向があり、図に示した $Ru=0.2 \sim 0.8$ の他 $Ru=0.0 \sim 1.0$ の範囲を含めるとその大きさは $10^2 \sim 10^6$ で変化する。図-8の一般的な流体の場合でも、 $C_D \geq 10^2$ となる $Re < 0.1$ の範囲では、レイノルズ数の増加とともに抗力係数が減少する傾向があり図-7と似ている。しかし、図-7では杭径を変化させた各実験ケースごとに抗力係数に差を生ずる部分もあり、 $C_D$ と $v \cdot \phi$ との一義的な相関の有無については必ずしも明確ではない。

#### 4. おわりに

杭に作用する流動力は、地盤の過剰間隙水圧比が小さいほど、また流動速度が大きいほど大きくなることがわかったが、流動力と杭径の相関については一様な傾向は得られていない。同一条件の実験結果の再現性は確認できたと思われるが、各杭模型ごとに整流板を変更しており、牽引抵抗力算出用の較正係数等は再度確認を行っておきたいと考えている。今後は流動力と本実験で取り上げた各種の要因との相関に関して検討を継続し、定式化について考えて行きたい。

なお、本研究は建設省土木研究所にて行われたもので、筆者の一人浜田は部外研究員として本研究を実施した。最後に、建設省北陸地方建設局金沢工事事務所常田所長、中国地方建設局松本建設監督官並びに土木研究所企画部近藤係長には終始貴重な助言をいただいた。末筆ながら記して感謝する次第である。

#### 【参考文献】

- 1)川島, 清水, 森, 高木, 鈴木, 中村: Analytical Studies on Damage to Bridges and Foundation Piles Caused by Liquefaction-Induced Permanent Ground Displacement, 1st Japan-United States Workshop on Liquefaction, Large Ground Deformation and Their Effects on Lifeline Facilities(1988)
- 2)松本, 常田, 東: 杭基礎に作用する流動土圧の発生特性, 土木学会第47回年次学術講演会(1992)
- 3)浜田, 常田, 二宮, 東: 流動地盤中の杭に作用する流動力特性, 第28回土質工学研究発表会(1993)
- 4)吉川: 水理学, 技報堂(1978)

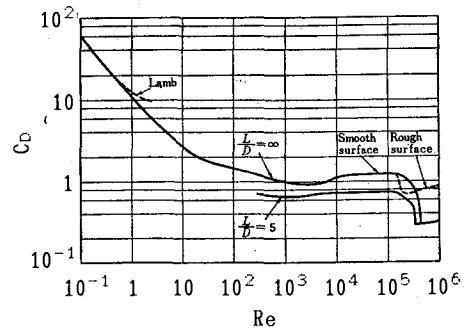


図-8 流体中の円柱の抗力係数 (L, Dは円柱の長さ及び径を表わす)