

流動する液状化砂の抗力係数に関する考察

早稲田大学 学生会員 内田 壘 張 至鎬
 大林組技術研究所 正会員 樋口 俊一 松田 隆
 早稲田大学 フェロー会員 濱田 政則

1. はじめに

1964年新潟地震や1995年兵庫県南部地震などの既往の地震において、液状化地盤が水平方向に移動する現象、いわゆる側方流動は、杭基礎などの地下構築物に大きな被害を及ぼした。著者らの研究グループでは、重力場および遠心載荷場における地盤と杭の模型実験から、過剰間隙水圧比が1.0に達した完全な液状化状態において、杭基礎に作用する流動外力は、地盤流動速度に起因した外力（以下、粘性力という）が卓越して作用することを明らかにしている¹⁾。これらの流動外力特性に関する基本的な知見を耐震設計法に反映させるためには、粘性力の定量的な評価が必要である。本報では、液状化地盤を粘性流体とみなし、著者らの研究グループの実験データを用いて、粘性力を抗力として評価するための抗力係数の定量的な検討を行った。

2. 粘性流体から作用する抗力

図-1に示すような一様な流れの中に置かれた物体に働く抗力 f （物体軸方向単位長さあたりの力）は式-1のように表される。

$$f = \frac{1}{2} \rho V^2 C_D D \quad \text{(式-1)}$$

ここで、 ρ ：密度、 V ：流動速度、 C_D ：抗力係数、 D ：物体の外径（杭径）である。



図-1 一様な流れの中に置かれた物体

式-1中の抗力係数 C_D は、一般的に式-2で表されるレイノルズ数 Re の関数として表される。杭基礎のような円柱において、 $Re > 0.5$ の領域で適用可能なLambが示した抗力係数 C_D の関係式を式-3に示す。

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad \text{(式-2)}$$

ここで、 μ ：粘性係数である。

$$C_D = \frac{8}{Re(0.5 - 0.5772 - \log(Re/8))} \quad \text{(式-3)}$$

本研究では、式-3についての流動する液状化砂への適用性を検討するとともに、抗力係数の新たな評価方法の検討を行った。

3. 抗力係数の算定方法

著者らの研究グループでは、相対密度 $Dr=40\sim 80(\%)$ 、地表面勾配 $\approx 3.6(\%)$ の重力場の模型実験および相対密度 $Dr=30\sim 50(\%)$ 、地表面勾配 $\approx 10(\%)$ の遠心載荷場の模型実験を実施してきた。模型実験では、過剰間隙水圧、地盤の流動変位・速度、模型杭のひずみなどを計測している。これらの模型実験では、図-2に示すように、計測されたひずみから得た曲げモーメントの時刻歴より、流動外力の時刻歴を得ている。ここで、流動外力は液状化地盤の深さ方向に直線分布と仮定し、模型杭の曲げモーメントの計測点から最小2乗法を用いて算定した。

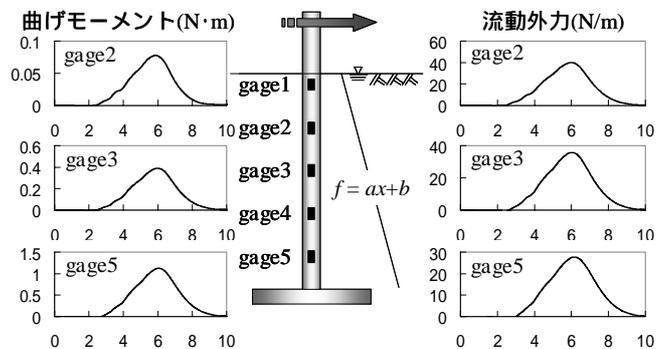


図-2 流動外力算定の一例

上記の方法で流動外力が定めれば、式-1に代入することにより抗力係数 C_D は算定できる。そこで、抗力係数 C_D は一般的にレイノルズ数 Re の関数として表されることを考慮し、杭基礎を図-3のようにモデル化した。流動地盤より杭基礎に作用する外力としては、地盤変位に起因した外力（以下、弾性力という）と粘性力が考えられ、図-3(a)に示すVoigtモデルでモデル化することができる。著者らの研究成果により、完全な液状化状態では、流動外力は地盤流動速度に起因することが示されているので、図-3(b)のようになり、流動外力は式-4で表される。

$$f = cV \quad \text{(式-4)}$$

ここで、 c ：粘性定数、 V ：地盤流動速度である。

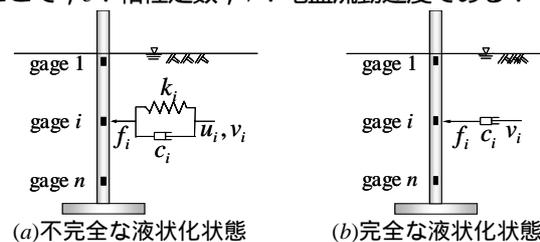


図-3 杭基礎のモデル化

キーワード 液状化、側方流動、杭基礎、流動外力、抗力係数

連絡先 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1 早稲田大学 社会環境工学科 濱田研究室 TEL03-3208-0349

式-1 と式-4 より，抗力係数 C_D は式-5 のようになる．

$$C_D = \frac{2c}{\rho V D} \quad (式-5)$$

ここで，図-2 の方法により算定された流動外力 f と模型実験で計測された地盤流動速度 V を式-4 に代入すれば 粘性定数 c は求まるので，各時刻における抗力係数 C_D を算定することができる．

一方，式-2 で表されるレイノルズ数 Re の算定には，液状化砂の粘性係数 μ の推定が必要となる．そこで，模型地盤中央の流れを図-4 に示すような 1次元粘性流体の流れと推定すれば，地表面の地盤流動速度の時刻歴 $V_s(t)$ は，式-6 のように求まる既往の研究²⁾を用いた．

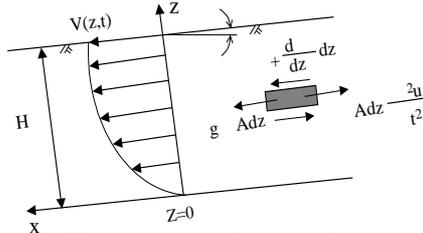


図-4 1次元粘性流体の流れ

$$V_s(t) = \sum_{i=1,3,\dots}^{\infty} 16 \frac{H^2}{(i\pi)^3} \frac{\rho g}{\mu} \theta \left[1 - \exp\left\{-\left(\frac{i\pi}{2H}\right)^2 \frac{\mu}{\rho} t\right\}\right] \sin \frac{i\pi}{2} \quad (式-6)$$

ここで，模型実験では，粘性係数 μ 以外全て既知量であるので，式-6 を用いて各時刻における粘性係数 μ を算出することが出来る．すなわち，時刻 t における地表面の地盤流動速度 $V_s(t)$ を式-6 に代入し，式-6 を満足する粘性係数 μ を刻々算定する．このようにして求められた粘性係数 μ を式-2 に代入すれば各時刻におけるレイノルズ数 Re を算定することができる．

上記の方法により算定した粘性力，レイノルズ数，抗力係数の時刻歴を図-5 に示す．ここで，杭基礎に作用する流動外力が最大となる時刻すなわち粘性力が最大となる時刻を各値の抽出時刻とした．

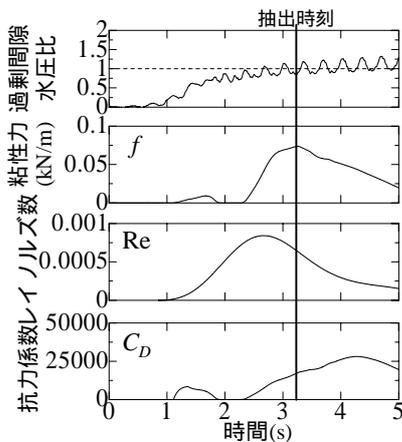


図-5 抗力係数とレイノルズ数の抽出時刻

4.抗力係数に関する考察

図-5 に示した時刻での抗力係数 C_D とレイノルズ数 Re をプロットしたものを図-6 に示す．これらを定式化するには

たつて，抗力係数 C_D をレイノルズ数 Re の関数で表すため，式-5 の右辺の分母・分子に粘性係数 μ を乗じて変形すると，式-7 で表される．

$$C_D = \frac{2c}{\mu} \cdot \frac{1}{Re} \quad (式-7)$$

ここで $2c/\mu$ は全模型実験の平均値をとると 4.4 となり，これを図-6 に実験で示す．図-6 によると，模型実験により求められた Re は 10^2 以下の領域にあり， Re の増加とともに C_D は減少している．また，本研究により定式化した式 $C_D=4.4Re^{-1}$ は， $Re > 0.001$ でLamb式と一致し， $Re < 0.001$ ではLamb式よりもやや大きいことが分かる．

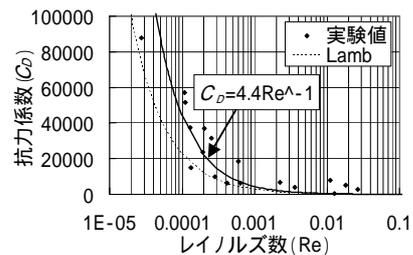


図-6 抗力係数とレイノルズ数の関係

さらに，抗力係数 C_D と地盤流動速度を無次元化した値 V/\sqrt{gH} の関係を図-7 に示す．図-7 より， C_D と V/\sqrt{gH} には相関関係があると考えられる．また，地盤流動速度の無次元化値は，フルード数を表しており，その値は 1 以下であるので，側方流動は常流の流れであると考えられる．

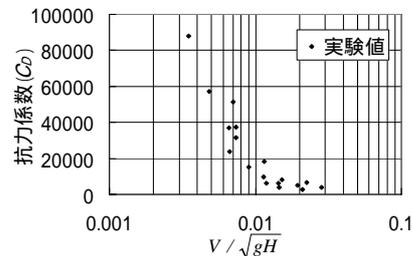


図-7 抗力係数と地盤流動速度の無次元化値の関係

5.まとめ

本研究では，側方流動により杭基礎に作用する外力を抗力として評価するため，抗力係数の検討を行った．抗力係数 C_D は，レイノルズ数 Re および地盤流動速度の無次元化値などと相関関係があり，これらの研究成果は，側方流動を考慮した耐震設計法の構築に有用な知見を与えらる．

参考文献

- 1) 張至鎬，濱田政則：液状化地盤の流動が基礎杭に及ぼす外力特性に関する研究，土木学会論文集，第 766 号/ -68, pp191-201, 2004.7
- 2) 濱田政則，佐藤貴俊：液状化砂の流動特性に関する実験的研究，第 27 回地震工学研究発表会，論文番号 304, 2003