

粘性土地盤中の杭構造物の動的挙動に関する 遠心模型振動実験

小濱英司¹・菅野高弘²

¹独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部構造振動研究室 主任研究官
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:kohama@pari.go.jp

²独立行政法人港湾空港技術研究所 地盤・構造部 構造振動研究室長
(〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:sugano@pari.go.jp

近年、粘性土地盤において栈橋などの杭基礎構造物が建設されつつあるが、このような地盤でのレベル2規模の大地震時における杭構造物の動的挙動や地盤との相互作用については未解明の部分が多い。本研究では、粘性土地盤中における杭基礎構造物の動的挙動について遠心力载荷装置を用いた模型振動実験を行った。その結果、入力加速度の増加にともない地盤のせん断ひずみが大きくなり、せん断剛性低下と減衰増加による地盤-基礎構造物系の応答特性の変化が見られた。またこのとき、杭と地盤の剛性の相対的な関係が変化し、振動中の杭の変形が深部にまで及ぶようになることが明らかとなった。

Key Words : centrifuge model test, shake table test, pile, cohesive soil

1. はじめに

近年深い沖積軟弱粘性土地盤における港湾・空港等の開発が盛んになりつつある。しかしながらこのような粘性土地盤における、レベル2地震時の杭構造物および埋立地盤の振動・破壊挙動や動的相互作用については、基礎的研究資料は散見されるものの実務的な資料の蓄積に乏しい。また、港湾における栈橋の地震時応答を考慮した耐震設計については検討されている¹⁾が、ここでは地盤の非線形性は考慮されていない。このような背景から、本実験は、ドルフィンや栈橋のような杭構造物と粘性土地盤の地震時における振動・破壊挙動および相互作用について、大型土槽を用いた遠心载荷模型振動実験により検討するものである。

2. 実験概要

(1) 遠心载荷実験装置

用いた遠心载荷装置の最大回転半径は7.00mであり、最大搭載容量は6,860kN(700tf)である。ただし、本実験での計画地盤高における有効半径は6.65mとなる。バケット部に搭載される遠心振動台は電気油圧式アクチュエータを採用し、デジタル制御によって高振動数までの応答特性を確保している。

搭載面積は長さ2.2m、幅1.07mである。加振方向は水平一方向で、加振能力は最大加振力120tonf(1,176kN)である。本実験においては、遠心加速度を50g(1g=980Gal)とした。

(2) 実験模型

図-1に本実験で用いた模型地盤および計測器配置を示す。本実験では、四本の杭を有する基礎を作成し、そのうちの一本にひずみゲージを取り付けて曲げひずみ分布を計測した。杭の下端は固定端としている。以下に示すような三つの杭模型を用いて実験を行い、それらの挙動の違いを比較検討した。

- ・フーチングA：土圧計測用(上部工質量小、杭曲げ剛性はフーチングBと等価)
矩形杭に土圧計を設置して作用する外力(土圧)分布を計測、フーチングBとの比較が可能なように等価な曲げ剛性および杭幅
- ・フーチングB：上部慣性力小(上部工質量小)
管形の杭、このフーチングを標準として他と比較検討
- ・フーチングC：上部慣性力大(上部工質量大)
管型の杭、地震時の上部構造物慣性力の影響を検討

(3) 計測項目

図-1に示すように、本実験においては、地盤と構造物の加速度、変位、間隙水圧、土圧及び杭の変

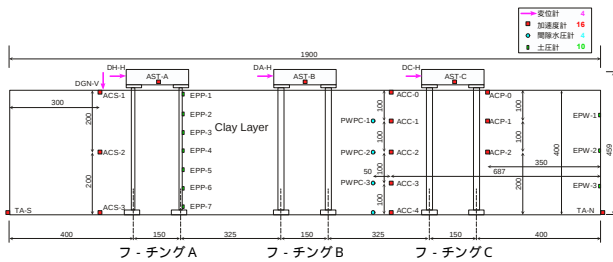


図-1 模型地盤および計測器配置

位と杭のひずみを計測する。

地盤材料には、重力場で予圧密した粘土（トクレイ）を用いた。模型地盤を作成した後に、さらに、遠心载荷装置で遠心加速度 50g 場で圧密を行い、圧密終了後に振動実験を行った。用いた入力地震波形は図-2 に示すようであり、「レベル 2 波」は「レベル 1 波」よりも継続時間が長い。加速度振幅については、最大加速度の目標値が表-1 となるように振幅を調整して、小さい加振レベルの入力から順に段階的に加振を行った。なお、実際の加振においては相似則にしたがい、時間軸は 1/50 に、最大加速度振幅は 50 倍に調整する。また、中加振以上の加振実験時には、粘性土内部に過剰間隙水圧が蓄積したので、この場合は過剰間隙水圧がある程度消散することを確認してから以降の加振試験を実施した。

3. 実験結果

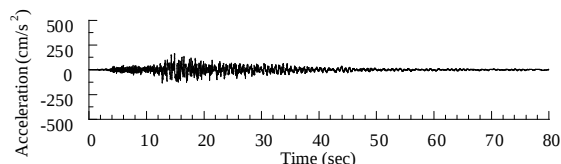
(1) 地盤の応答

図-3 に最大入力加速度と最大地表面加速度の関係を示す。地表面加速度は、入力加速度が小さい場合には加速度の増幅が大きく、入力加速度が大きくなるのにしたがって増幅が小さくなっている。大きな地震力により地盤に大きなせん断ひずみが発生するとせん断剛性が低下し、地盤の固有周期が長くなると共に減衰定数が大きくなるため、地表面最大加

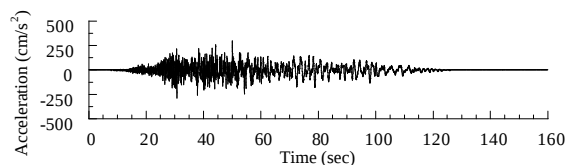
表-1 加振入力と目標加振レベル

入力波形	微小加振	小加振	中加振	大加振
レベル 1 波	20	50	100	180
レベル 2 波	20	50	100	300

単位：Gal



(a) レベル 1 波時刻歴



(b) レベル 2 波時刻歴

図-2 遠心载荷振動実験における入力地震波形

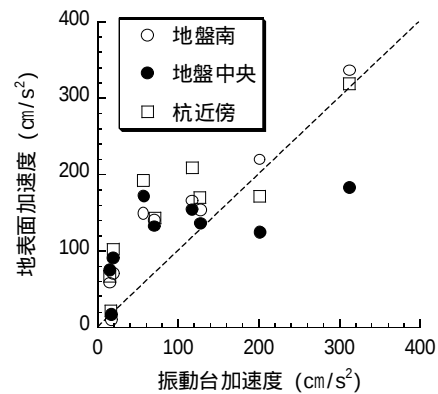


図-3 振動台最大加速度と地表面最大加速度の関係

速度が低下したと考えられる。また、地盤南側や杭近傍の最大加速度値は地盤中央と比較して大きい傾向を示し、杭基礎の振動が影響したと考えられる。

微小加振（20Gal 相当）時の模型地盤の伝達関数（地表面加速度 / 基盤加速度）では、地盤の卓越振動数が 1.2 ~ 1.3Hz（フットタイプ換算、模型では 60 ~ 65Hz）にあった。従って、地盤の卓越周期が $4H/V_s$ から求められるとすると（ H ：地盤層厚、フットタイプ換算で 20m）、粘土地盤のせん断波速度 V_s は約 100m/s となる。また、レベル 2 地震波の継続時間はレベル 1 地震波よりも長く、長周期成分も大きいため、地盤の卓越振動数はより小さくなった。

図-4 に各加振時の地盤内加速度の最大値分布を示す。粘性土層下端部の加速度については、さらに下に圧密排水用の密な砂（土槽下部にある格子状に敷設された鋼材により分割されており、杭下端はこの鋼材に設置されている）があるため、増幅等により振動台加速度値と異なる。小加振ケースでは地盤中間部で一旦応答が減少し、地表面で再び増幅していく傾向がある。一方、大加振ケースでは、地盤上部ほど応答が減少することが示されている。

(2) 杭の応答

図-5 に構造物（フーチング）の最大応答加速度と入力加速度の関係を示す。上部工質量が等しいフーチング A とフーチング B ではほぼ同等の最大応答加速度値が得られた。一方、上部工質量が大きいフーチング C ではフーチング A, B よりも最大応答加速度が小さくなった。また、構造物の応答加速度は入力加速度に比例して大きくなるのではなく、入力加速度が大きくなるとその増加割合は小さくなることが読みとれる。これは、地盤の非線形化による地盤 - 基礎構造物系の連成卓越振動数の変化と減衰定数の増加に起因するものと考えられる。図-6 にフーチング最大加速度と地表最大加速度の関係を示す。フーチングと地盤の振動を比較した場合、加速度が小さい場合には大きな差は見られなかった。ただし、加速度が大きい場合には、特にフーチング A, B において応答加速度が大きくなった。この要因も、地盤の非線形化による地盤 - 基礎構造物系の振動特性の変化によるものと考えられる。

図-7 に杭の曲げひずみの最大値分布を、断面形状を考慮して曲率に整理したものを示す。フーチング

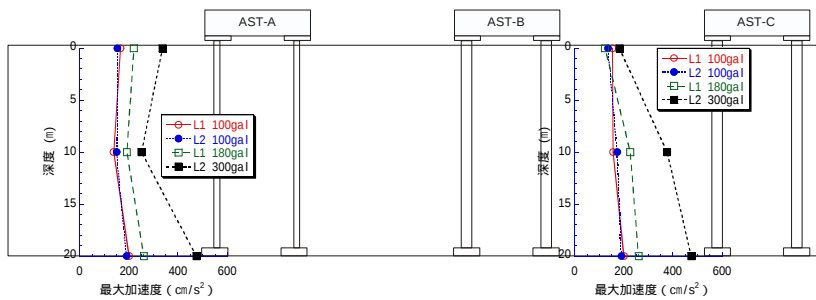


図-4(a) 地盤加速度の最大値分布（微小加振，小加振）

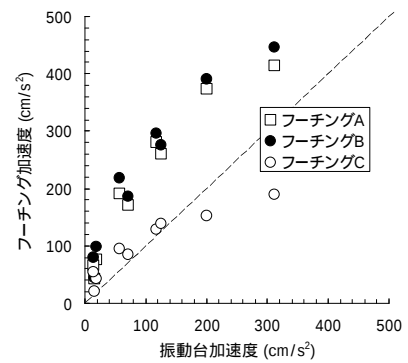


図-5 振動台最大加速度とフーチング最大加速度の関係

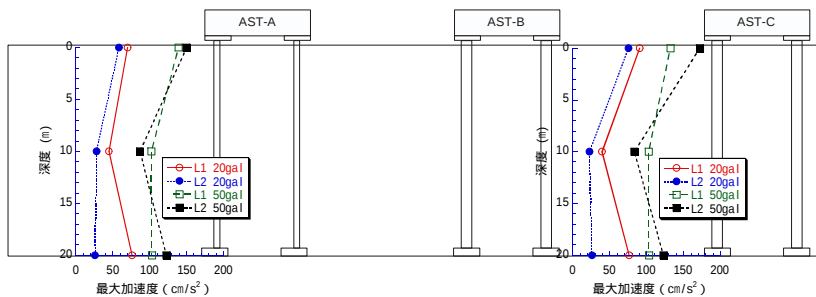


図-4(b) 地盤加速度の最大値分布（中加振，大加振）

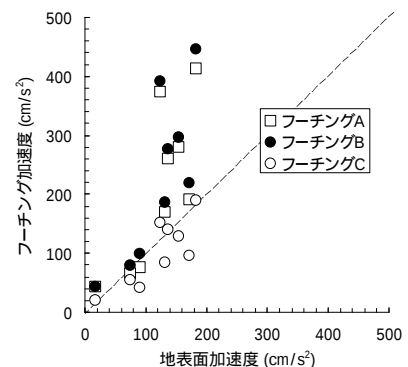


図-6 地表最大加速度とフーチング最大加速度の関係

A, B の杭は、曲げひずみの値は異なるが、曲率で整理すると同様の傾向を示し、振動特性がほぼ等しいことが確認できる。

杭の曲率は、小加振，大加振のいずれの場合でも杭頭フーチング接合部において大きい。フーチング C の杭（以降杭 C）では、曲率が最大となるときの曲げひずみは 3500 μ 近くまで達しており、杭は曲げ降伏したと考えられる。杭 C について各加振ケースで地中内部での曲率が極大となる位置を比較すると、入力加速度が大きくなるほど地中部での極大曲げひずみ発生位置は深くなる傾向を示す。これは地盤の非線形化によるせん断剛性の低下により特性値 b が変動したことによるものと考えられ、入力加速度が大きいほど上部構造物慣性力の影響が地盤深くにまで及ぶことを示している。また、地盤内部の杭固定端付近においても曲率の大きな値が確認される。これは、地震時の地盤変位による影響と考えられる。特に大加振時（L2 300Gal ケース）のフーチング B の杭（以降杭 B）では杭頭フーチング接合部の半分程度の曲げひずみが生じており、上部構造物質量が大きく杭の断面力に対する慣性力の影響が相対的に大きいフーチング A の杭（以降杭 A）と比較して、地盤変形の影響が相対的に大きくなったことを示唆している。

(3) 杭に作用する土圧分布

図-8 はフーチング A に設置した土圧計で計測した動土圧の最大値と地盤深さの関係を整理したもの

である。入力加速度 20Gal の場合は、土圧は深さ 6.5m の位置で極大となるが、入力加速度 50 ~ 300Gal のケースでは深さ 9.5m の位置で大きな動土圧が作用した。また動土圧は 10 m 以深で一旦減少するが、深さ 18.5m で最も大きな値を示した。これは、前述した杭の曲率分布で杭下端の固定端部において大きな曲げひずみが確認されたことと関連するものであり、地盤の変形によって杭の深部に大きな土圧が作用したことを示している。

4. まとめ

本報告では粘性土地盤中の杭構造物の挙動に関して、三つの杭基礎模型を用いて遠心载荷模型振動実験を行った。本実験での検討結果を以下にまとめる。

- (1) 軟弱粘性土地盤の地震時応答として、比較的小さな加振では、基盤に対し地表面加速度が大きくなる傾向を示すのに対し、大きな加振では基盤に対する地表面加速度の割合が小さくなる。
- (2) 地盤 - 基礎構造物連成系の卓越振動数は入力加速度の振幅に依存して変化する。また、構造物の応答加速度は入力加速度に比例して大きくなるのではなく、入力加速度が大きくなるとその増加割合は小さくなる。
- (3) 地盤の非線形化によるせん断剛性の低下により特性値 b が変動し、入力加速度が大きいほど上部構造物慣性力の影響が地盤深くにまで及ぶ。

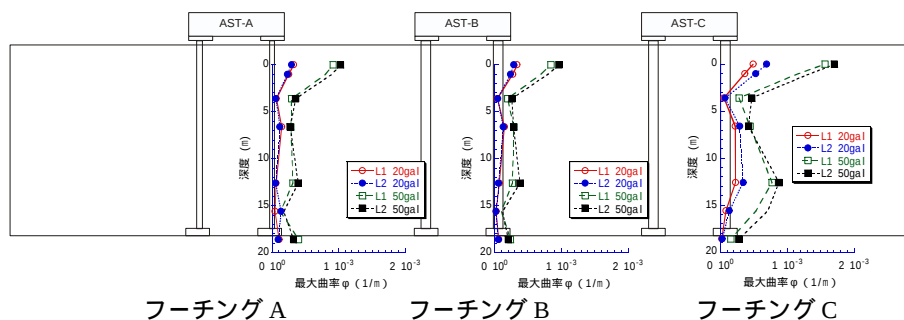


図-7(a) 杭曲率の最大値分布 (小加振)

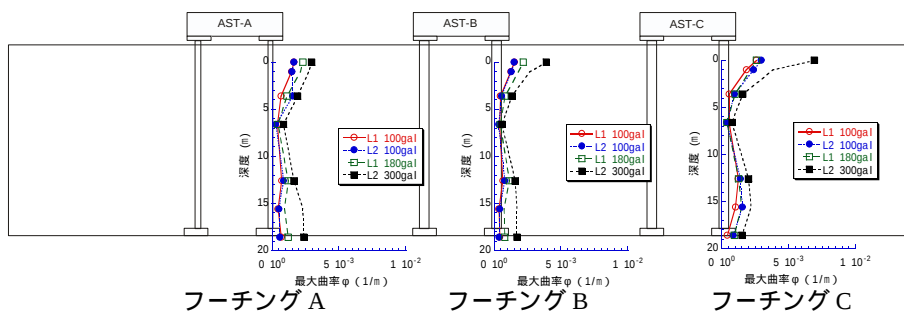


図-7(b) 杭曲率の最大値分布 (大加振)

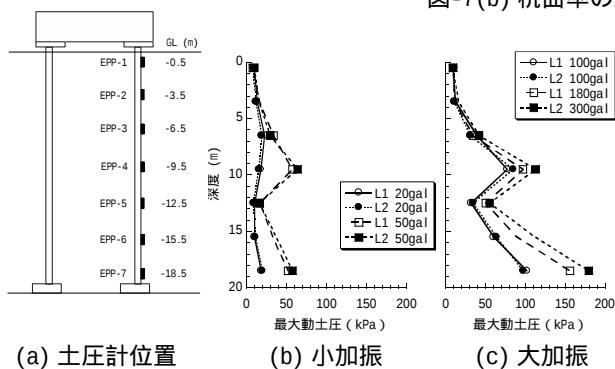


図-8 杭に作用する土圧

やひずみなどの応答に関して最大値に着目して杭基礎の動的挙動を整理した。今後は、スペクトル等も整理し、杭に作用する地盤反力や地盤との相互作用についても検討する予定である。本研究においては、松田隆博士と樋口俊一氏に粘土の動的特性等についてデータおよびアドバイスを頂いた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 横田弘, 竹鼻直人, 南兼一郎, 川端規之: 鋼管杭式横棧橋の耐震設計法に関する考察, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1613-1622, 1998 . .

(2003. 10. 10 受付)

- (4) 比較的せん断剛性の大きな粘性土層基盤付近でも杭が大きな土圧を受けるため、杭に大きな断面力が生じることがある。
本報告では、実験結果の整理においては、加速度

CENTRIFUGE MODEL TEST ON THE DYNAMIC BEHAVIOR OF PILE STRUCTURES IN COHESIVE SOIL LAYER

Eiji KOHAMA and Takahiro SUGANO

A series of centrifugal model tests was conducted in order to investigate the dynamic behavior of pile structures in cohesive soil layers. during earthquakes, with regard to the vibration characteristics of ground-pile structure system. According with the increase in acceleration amplitude of input earthquake motion, vibration properties of ground-pile structure system varied because of decrease in shear stiffness and increase in damping of clay layer; the response acceleration of pile structures varied and the deformation of piles during shaking distributed up to the deeper part.