上部構造が非線形化する 構造物-杭基礎-地盤システム振動台実験

高橋良和¹•西村俊亮²•室野剛隆³•江尻譲嗣⁴•田中浩一⁴•樋口俊一⁴

1正会員 工(博)京都大学准教授 防災研究所(〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

2学生会員 京都大学大学院工学研究科 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

3 正会員 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

4 正会員 大林組技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640)

本研究では、構造物-杭基礎-地盤系の一体大型模型を用いた振動台実験を用いた振動台実験を行い、 地震時における非線形動的応答特性を評価することを目的としている.特に上部構造が非線形挙動する ことに着目し、上部構造、地盤の異なる非線形レベルにおける構造物-杭基礎-地盤系の地震応答性状に 関する基礎的データを得ることができた.また、上部構造の非線形レベルが大きくなると、上部構造と 地盤は独立に挙動する傾向となり、地盤変位が杭の挙動を支配することが結果として得られた.

Key Words : soil structure interaction, nonlinear, shake table test, bending moment, pile

1. はじめに

橋梁や建築構造物は地盤上に建設されるため、そ の動的応答特性は地盤や基礎の影響を強く受ける. このため、従来より構造物と基礎・地盤間の動的相 互作用問題は広く検討されてきた¹⁴⁾.橋梁の耐震設 計⁵⁾でも、基礎・地盤の効果は見込まれており、大き な地震に対して部材が塑性化することは許容するも のの、地震後の修復性等を考え、主たる塑性化は地 上構造物に発生させ、基礎部は副次的な塑性化に止 めることを基本にしている.しかしながら、従来実 施されてきた実験では、上部構造物を線形構造など の単純なモデルを用い、基礎の非線形挙動に着目し ているものがほとんどであり、耐震設計で想定して いる状況を再現する実験は実施されていないのが現 状である.

本研究は、上部構造物の非線形動的挙動を再現し うる模型を用いた構造物-杭基礎-地盤システムの振 動台実験を実施するものである.

2. 実験供試体

実験模型の概要を図-1 に示す.上部構造は,RC 柱の振動台実験である参考文献 6)と同等の性能を示 すよう,一辺 320mmの正方形断面の RC 柱に,その 基部から高さ 1600mmの位置に鋼製の重錘を設置し た.RC柱の断面図を図-2 に示す.RC柱の主鉄筋(軸 方向鉄筋)には D10 を 16本,帯鉄筋(横拘束筋) には D4 を 40mm間隔で,断面の中央部位置には D4 の中間帯鉄筋を配筋した.この結果,主鉄筋比は 1.11%,帯鉄筋体積比は 0.86%となった.また,上部 構造の慣性力を変化させるため,重錘質量は 10.1t (Case 1) と 5.9t (Case 2)の 2 ケースに分けて実験 を行った.線形応答時の上部構造の固有周期は Case 1 で 0.23 秒, Case 2 で 0.18 秒である.

本研究では上部構造の非線形挙動を実現するため、 杭模型の設計にあたっては、杭基礎部材の損傷は橋 脚体の損傷よりも先に発生しないようにした.その 上で、βL=2.5以上を確保できるように、杭部材の本 数、杭径、長さを設計した.ここでLは杭長、βは 杭の特性値で、式(1)で定義される.



$$\beta = \sqrt{\frac{k_h D}{4EI}} \tag{1}$$

ここに, k_h は水平地盤反力係数(kN/m^3),Dは杭径(m), *EI*は杭の曲げ剛性(kNm^2)である.一般的な橋や鉄道橋の杭基礎では、 β Lは3程度のものが多いこと、また、 β L<2.5では短杭と見なされてしまい、上部構造物の挙動が杭先端の条件を大きく受けてしまうことから、このように設定した.上記の条件を満足するように模型杭を設計したところ、模型杭を直径190.7mm、厚さ5.3mm、長さ3300mmの鋼管杭6本(加振方向に3本、直角方向に2本)で構成することとした.また、杭頭部は0.7tのフーチングと剛接合、杭底部は土槽とピン結合した.この条件で、模型杭の静的非線形解析を行った.今回の模型諸元と同一の実験結果⁶⁾を参考に、上部構造物の降伏加速度は700gal相当と仮定し、また、地盤変位に関して



は、模型地盤の相対密度 Dr を 60%と仮定した 1次 元の動的解析により算出した(紙面の都合で詳細は 省略する).これらの2つの作用を載荷させたところ, 杭の降伏応力に対して2倍以上の安全率を有してい ることを確認した.

地盤は, 硅砂 6 号の乾燥砂をせん断土槽に, 相対 密度を 80%となるよう作成した. 地盤の固有周期は 約 0.1秒である.

3. 実験条件

本実験の入力波には、参考文献 6)を参考に、本実 験が水平一方向加振であることを考慮して、JR 鷹取 記録の最大応答方向である NW 成分を用いた.また、 将来参考文献 6)の結果と比較できるように、地表面 で参考文献 6)の入力地震動相当になるよう SHAKE で振動台制御波を設定した(図-3).振動台制御波の 加速度応答スペクトルを図-4に示す.

Case 1 では、この鷹取波の最大加速度を 100gal, 200gal, 616gal, 924gal に調整して入力し、Case 2 で は、Case 1 の 4 種類の入力波に加えさらに最大加速 度 1233gal の波も入力した.なお以降では、各実験 ケースを Case 1-100 のように、「Case -最大加速度」



表-1 各ケース加振後の上部構造物の固有周期

と表す.

4. 各ケースの非線形レベル

図-5に、Case 1の各加振で得られた上部構造の荷 重-変位関係と深さ0.6mと2.1mの地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係を示す.

図-5の結果より, Case 1-100を「上部構造, 地盤共

に線形のケース」, Case 1-200を「上部構造線形,地 盤弱非線形のケース」, Case 1-616, Case 1-924を「上 部構造,地盤共に非線形のケース」と解釈すること ができる.

図-6に、Case 2の加振で得られた上部構造の荷重-変位関係と地盤のせん断応力-せん断ひずみ関係を 示す.なお、Case 2-1233では、上部構造に取り付け た変位計を振り切ってしまったため、途中から変位 が正しく計測できていないが、参考に示す.



図-6 Case 2 における構造物の荷重-変位関係と地盤(深さ 0.6m と 2.1m)のせん断応力-せん断ひずみ関係

これより, Case 2-100を「上部構造,地盤共に線形 のケース」, Case 2-200を「上部構造線形,地盤弱非 線形のケース」, Case 2-616, Case 2-924, Case 2-1233 を「上部構造,地盤共に非線形のケース」と解釈で きる.

なお, 表-1に各ケースの加振終了後の上部構造物 の固有周期を示す(Case 2-1233は計測なし).



5. 杭の曲げモーメント分布図による動的相互 作用の評価

(1) 各ケースの比較

本節では、動的相互作用の影響を、杭の曲げモー メント分布に着目して考察する.図-7に、各ケース における杭頭の曲げモーメントが最大となる時の杭 の曲げモーメント分布図を示す.

「上部構造,地盤共に線形のケース」であるCase 1-100とCase 2-100を見ると,曲げモーメントは杭下 端から正側に発生し,深さ約1mあたりから逆に負側 に大きくなっていくことが分かる.この分布は,杭 頭部分に慣性力のみが作用するときの分布⁷⁾に近い. よって,100gal加振のときは慣性力相互作用の影響 が強いと考えられる.

「上部構造線形,地盤弱非線形のケース」である Case 1-200と Case 2-200を見ると,曲げモーメントは 100galの加振のときよりも深い位置である,深さ1.5 ~2.0mあたりで負側に大きくなっていくことが分か る.これは,地盤が非線形化し始めているもののそ の程度は小さいことから,100gal加振に比べ慣性力 が大きくなった影響が強いと考える. 「上部構造,地盤共に非線形のケース」であるCase 1-616, Case 1-924, Case 2-616, Case 2-924, Case 2-1233 を見ると,曲げモーメントはほぼ下端から負側に発 生し,そのまま負側に大きくなっていくことが分か る.この分布は,杭に地盤変位のみが作用するとき の分布⁷⁾に近く,地盤変位の影響が慣性力の影響より も強く出ている.これはキネマティック相互作用の 影響が強いと思われるが,上部構造物が非線形応答 をするケースであるので,次節で詳しく考察をして いく.

また,同じ入力のときのCase 1とCase 2を比べてみ ると,慣性力が小さくなったからといって,杭の応 答が大きくなっているわけではないことが分かる. 特に616gal加振のケースでは,慣性力の小さいCase 2-616のほうがCase 1-616よりも杭の応答が大きい. このことについても考察する.

(2)上部構造物が非線形化するケース

上部構造物が非線形応答をするケースについて考察する.図-5のCase 1-616とCase 1-924の荷重-変位関係を見ると、入力の最大加速度が1.5倍になっているにも関わらず、慣性力(図-5ではLoad)はほとんど





変わらない.また、図-6のCase 2-616, Case 2-924, Case 2-1233を見ても同様である.このことより、構 造物が非線形化すると慣性力が頭打ちになり、杭の 応答に対する慣性力の影響は相対的に弱くなり、地 盤変位の影響が強くなると考えられる.これをより 考察するため、図-8に、杭頭曲げモーメント最大値 となる時に加え、地盤変位が最大となる時、上部構 造物の慣性力が最大となる時の杭の曲げモーメント 分布図を示す.

まず, Case 1-616 (図-8(a)) について見ると, 杭 頭曲げモーメント最大の時刻と地盤変位最大の時刻 が完全に一致していることが分かる.一方, 慣性力 最大の時刻は杭頭曲げモーメント最大の時刻とわず かにずれている程度であり, 応答も大きい.これよ り, 杭は地盤変位の影響を強く受けていることに加 え, 慣性力の影響も大きく受けていると考え られる.

次に、Case 1-924 (図-8(b)) について見ると、Case



1-616と同様に,杭頭曲げモーメント最大の時刻と地 盤変位最大の時刻が完全に一致していることが分か る.一方,慣性力最大の時刻と杭頭曲げモーメント 最大の時刻は完全にずれており,また,慣性力最大 時の分布図を見ると,慣性力が最大値をとるにも関 わらず,モーメントはあまり発生していない.これ より, Case 1-924のときは,構造物が非線形化するこ とで,慣性力と地盤変形が逆位相に作用し,結果杭 にほとんど影響を与えず,杭の挙動は地盤変位が支 配していると考えられる.

次に,重錘の質量が小さいCase 2-616(図-8(c)) では,3つの最大がほぼ同時に起こっていることが分 かる.このことより,Case 2-616では,慣性力と地盤 変位の両方が杭に影響を与えている.またCase 2-616 の非線形レベルがCase1-616に比べて小さいため(図 -5,図-6)慣性力と地盤がほぼ同位相に作用し,質 量が小さいにも関わらずCase 1-616よりも杭の応答 が大きくなったと考えられる.

Case 2-924 (図-8(d)) では、Case 2-616のように慣 性力最大時の時刻が他と少しずれ、杭の応答も最大 時の半分程度しか出ていない.これより、Case 2-924 はCase 2-616から非線形レベルが大きくなり、構造物 と地盤の位相がずれることで、慣性力の影響が弱く なったと考えられる.

Case 2-1233は、すべてのケースで最も非線形レベルが大きいケースである.図-8(e)を見るとCase 1-924と同様、慣性力が最大となるにも関わらず杭の応答が小さく、杭の挙動は地盤変位の影響が支配的となる.

以上より、上部構造物が非線形応答するケースで は、上部構造物の非線形レベルが大きくなるにつれ て、慣性力は杭の応答に与える影響が小さくなるこ とが分かった.すなわち、上部構造物は地盤の挙動 と独立に挙動する傾向が大きくなり、動的相互作用 効果が小さくなっていると考えられる.

6. 結論

重錘質量,入力の最大加速度を変化させて行った 構造物-杭基礎-地盤システム振動台実験に基づき, 杭の曲げモーメント分布図の視点から動的相互作用 を評価した.これより以下の結論を得た. (1)加振レベルが小さいと杭の曲げモーメントは慣 性力の影響が支配的であるが,加振レベルが大きく

なるにつれて地盤変位の影響が強くなる.

(2)上部構造物が非線形化すると、上部構造物は地盤 と位相がずれて振動するようになり、さらに慣性力 の相互作用が大きくなると思われるが、上部構造物 の非線形レベルが大きくなると、構造物と地盤は独 立に挙動する傾向となり、地盤変位が杭の挙動を支 配する.

謝辞:本研究は文部科学省科学研究費補助金(若手研究(S)19676004番,代表:高橋良和)の助成を受けて実施したものである.記して謝意を表します.

参考文献

- 1) 建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震 設計,日本建築学会,2006年.
- 小長井一男:地盤と構造物の地震工学,東京大学出版 会,2002年.
- 3)時松孝次,鈴木比呂子,佐藤正義:地盤-杭-構造物系 動的相互作用が杭応力に与える影響,日本建築学会大 会構造系論文集,第587 号,125-132,2005年1月.
- 4) 鈴木比呂子,時松孝次:大型振動台実験に基づく強震時の地盤挙動が杭応力に与える影響の検討(動的問題
 (1),構造I),日本建築学会大会学術講演梗概集,2006年9月.
- 5)道路橋示方書·同解説V耐震設計編,社団法人日本道路 協会,平成14年3月.
- 6)高橋良和,小林望:縮小RC模型16体一斉加振実験による地震応答の不確定性評価,第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 269-276,2011年7月.
- 新編土と基礎の設計計算演習,社団法人地盤工学会, 2009年7月.

SHAKE TABLE TEST OF NONLINEAR STRUCTURE - PILE FOUNDATION - SOIL SYSTEM

Yoshikazu TAKAHASHI, Shunsuke NISHIMURA, Yoshitaka MURONO, Joji EJIRI, Kouichi TANAKA, and Shunichi HIGUCHI

In our research, we conducted shake table test for nonlinear structure - pile foundation - soil system along the seismic design to investigate nonlinear dynamic behavior of the structure, considering influence of soil and foundation. As a result, we got basic data about nonlinear seismic response of structure - pile foundation - soil system. Moreover, when the superstructure indicates nonlinear response strongly, the superstructure and the soil behave independently and the displacement of the soil influences the stress of the piles strongly.