

上部構造が非線形化する構造-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 修士 京都大学工学研究科（〒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）

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、構造物と基礎・地盤との動的相互作用問題は広く検討されてきた¹⁻⁴⁾。橋梁の耐震設計⁵⁾でも、基礎・地盤の効果は見込まれているが、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、上部構造の非線形挙動を再現しうるモデルを用いた構造物-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. 振動台実験概要

実験モデルの概要を図-1に示す。上部構造は、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ものである。上部構造物の慣性力を変化させるため、重錘質量を10.1t（Case 1）と5.9t（Case 2）の2ケースの実験を行った。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。

基礎構造は、質量0.7tの鋼製フーチングと、直径190.7mm、厚さ5.3mm、長さ3300mmの鋼管杭6本で構成しており、杭頭部は剛接合、杭底部は土

槽とピン結合している。本研究では上部構造の非線形挙動を実現するため、杭は上部構造よりも先に塑性化しないように設計した。

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。

実験は水平一方向の振動台実験であり、自由地盤上でJR鷹取記録北西成分を再現できるよう調整した波形を振動台制御波とした（図-2）。また、振動台制御波の加速度応答スペクトルを図-3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 名-最大加速度」と表す。

3. 各ケースの非線形レベル

図-4に、Case 1の各加振で得られた構造物の荷重-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-4の結果より、Case 1-100を「上部構造物、地盤共に線形のケース」、Case 1-200を「上部構造物線形、地盤弱非線形のケース」、Case 1-616、Case 1-924を「上部構造物、地盤共に非線形のケース」と解釈することができる。

図-5にCase 2の構造物の荷重-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、上部構造物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

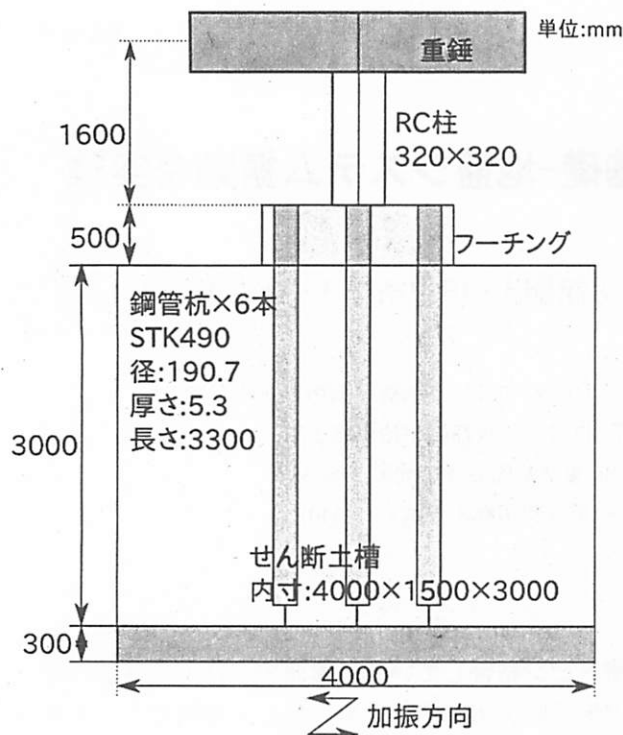


図-1 実験模型概要

きていないが、参考に示す。

これより、Case 2-100を「上部構造物、地盤共に線形のケース」、Case 2-200を「上部構造物線形、地盤弱非線形のケース」、Case 2-616、Case 2-924、Case 2-1233を「上部構造物、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)。

4. 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-6に、各ケースにおける杭頭の曲げモーメントが最大値となる時の杭の曲げモーメント分布図を示す。

「上部構造物、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⁶⁾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。

「上部構造物線形、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

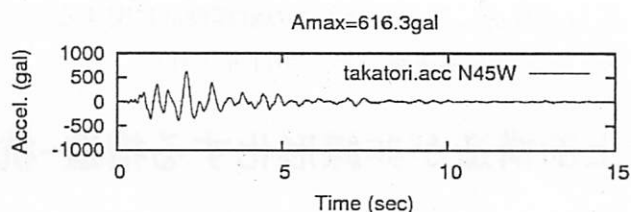


図-2 振動台制御波

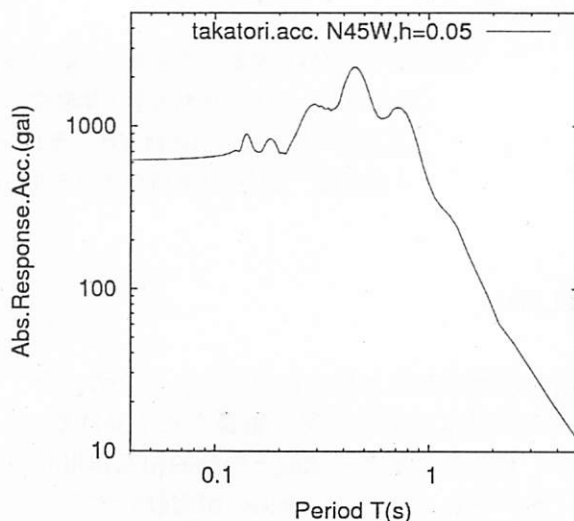


図-3 振動台制御波の加速度応答スペクトル

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。

「上部構造物、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⁶⁾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応答するケース

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-4のCase 1-616とCase 1-924の荷重-

表-1 各ケース加振後の上部構造物の固有周期

Case	1-100	1-200	1-616	1-924	2-100	2-200	2-616	2-924	2-1233
固有周期(s)	0.23	0.23	0.48	0.56	0.18	0.19	0.40	0.46	-

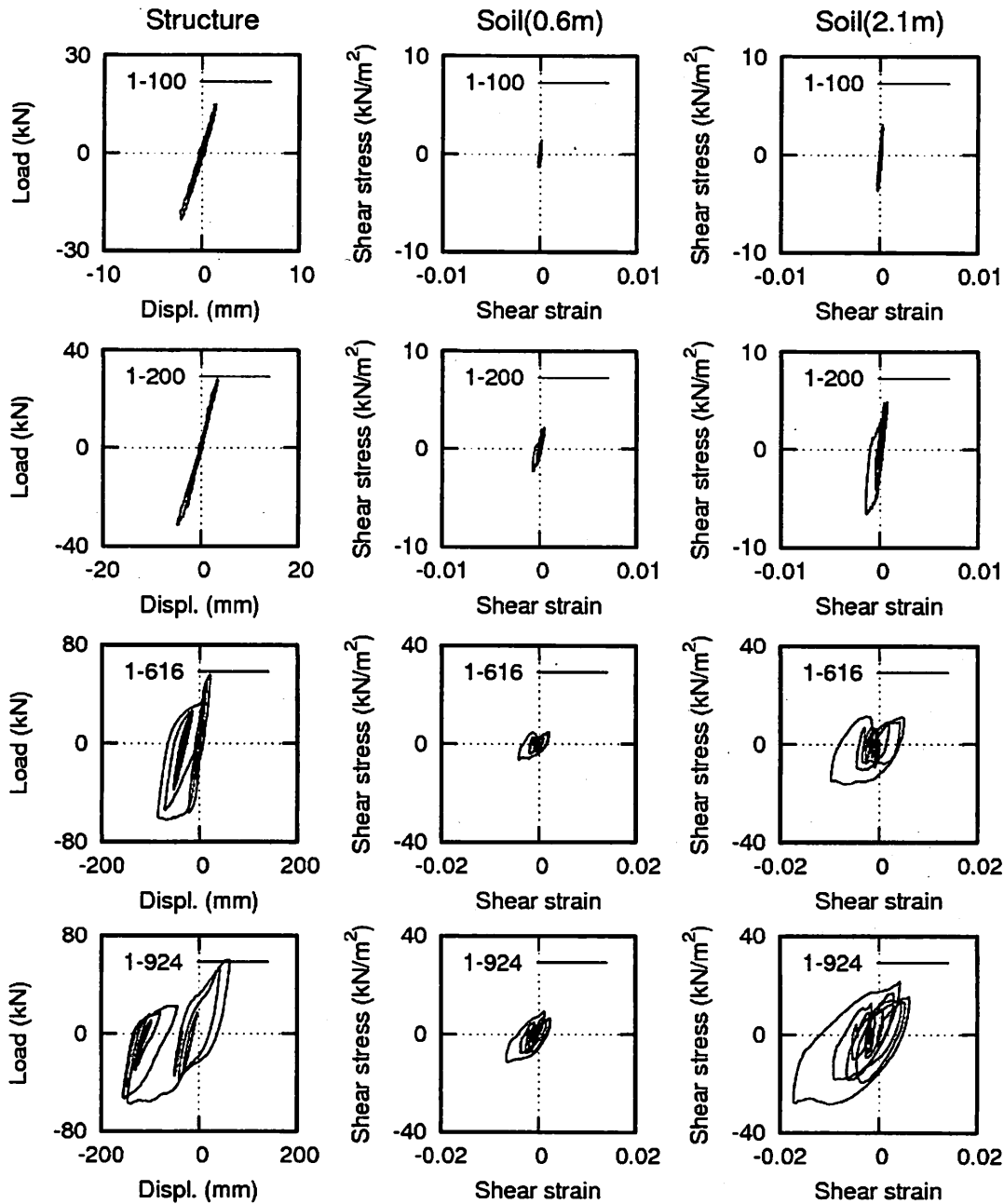


図-4 Case 1 における構造物の荷重-変位関係と地盤（深さ 0.6m と 2.1m）のせん断応力-せん断ひずみ関係

変位関係を見ると、入力最大の加速度が1.5倍になっているにもかかわらず、慣性力（図-4ではLoad）はほとんど変わらない。また、図-5のCase 2-616, Case 2-924, Case 2-1233を見ても同様である。このことから、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-7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-7(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

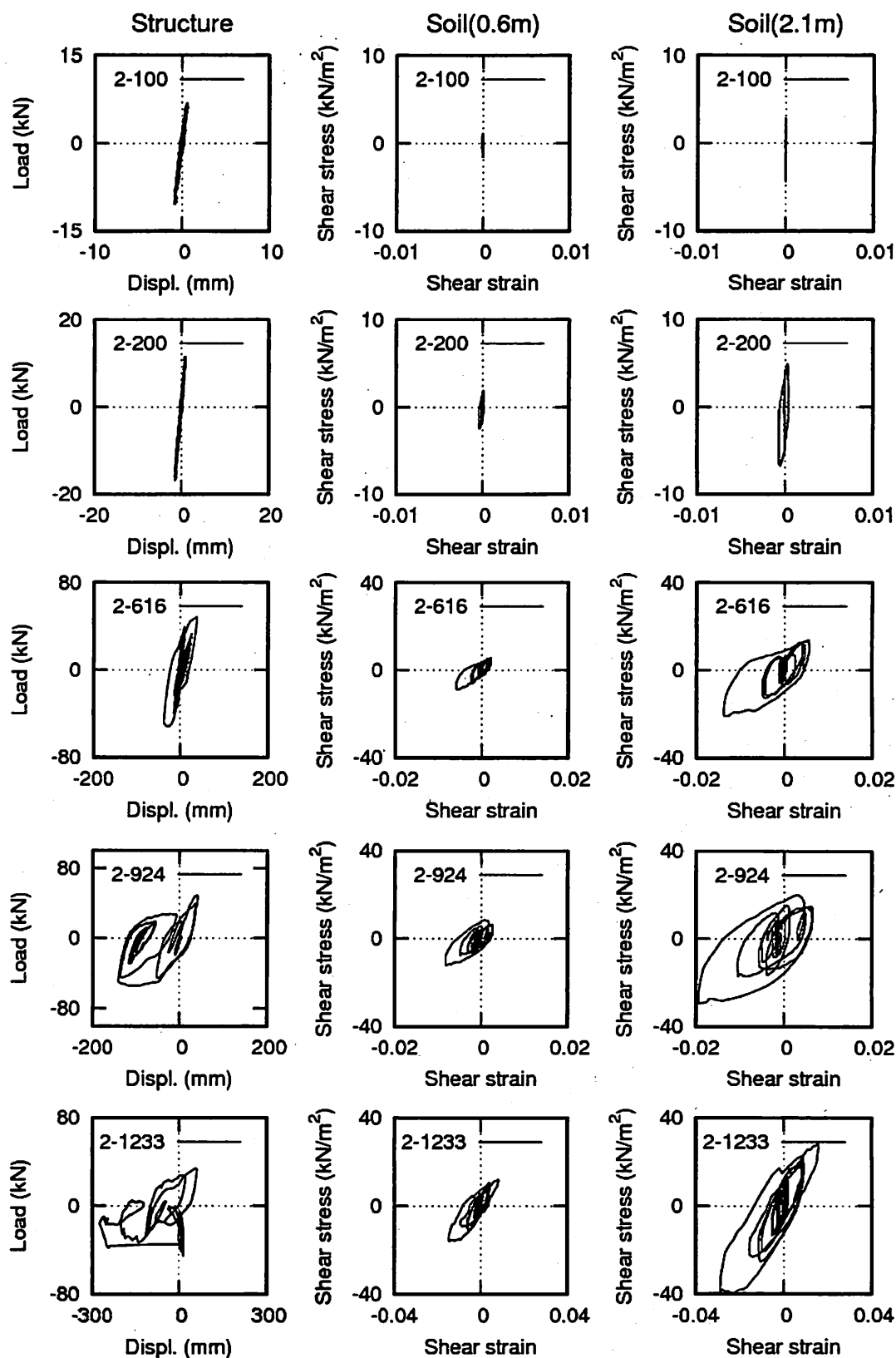


図-5 Case 2 における構造物の荷重-変位関係と地盤（深さ 0.6m と 2.1m）のせん断応力-せん断ひずみ関係

られる。

次に、Case 1-924（図-7(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

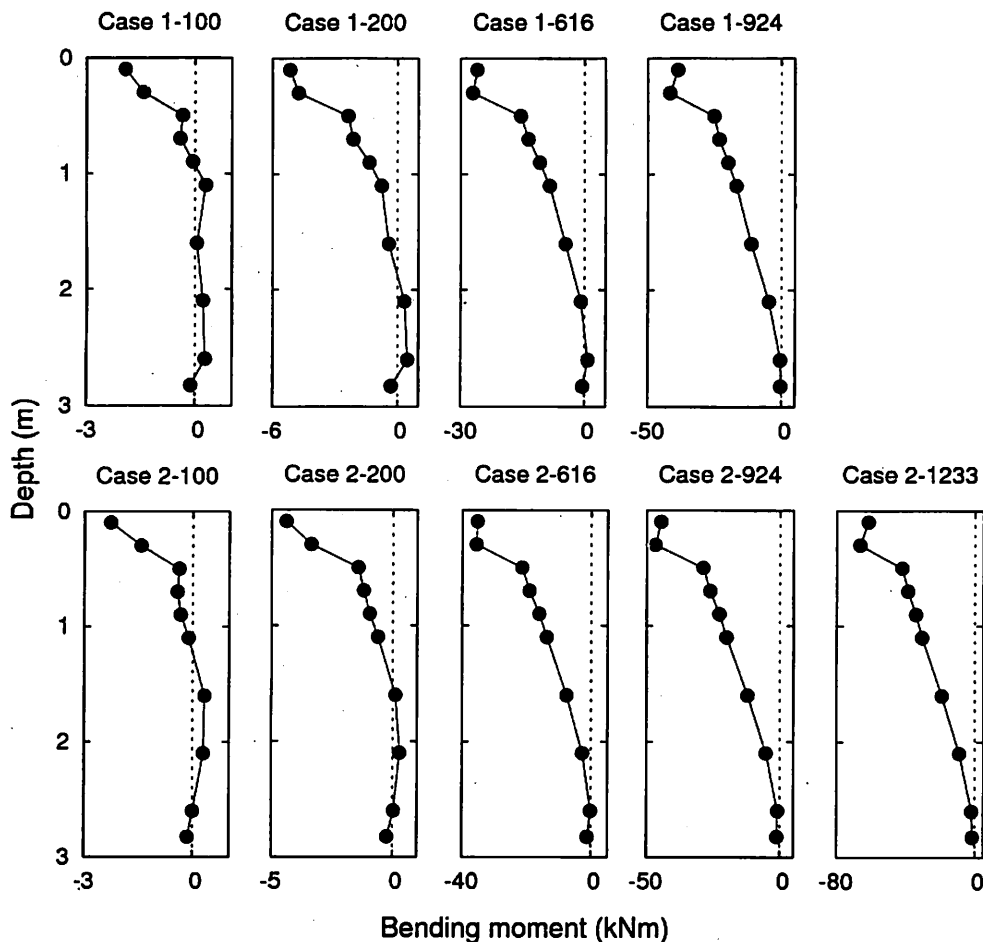


図-6 杭頭モーメント最大時の杭のモーメント分布図

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-7(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Case 1-616に比べて小さいため（図-4、図-5）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-7(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-7(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。

5. 結論

重錘質量、入力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

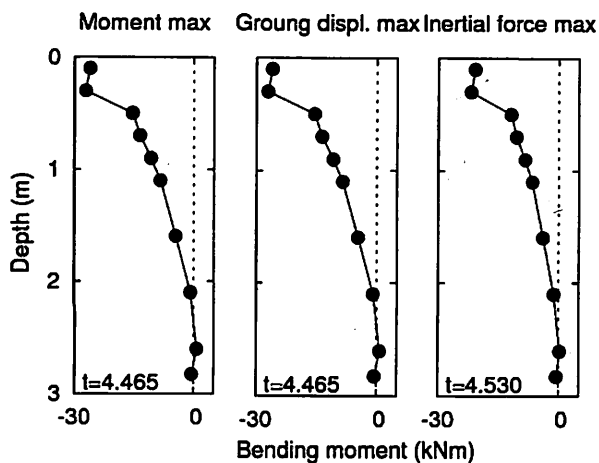


図-7 (a) Case 1-616

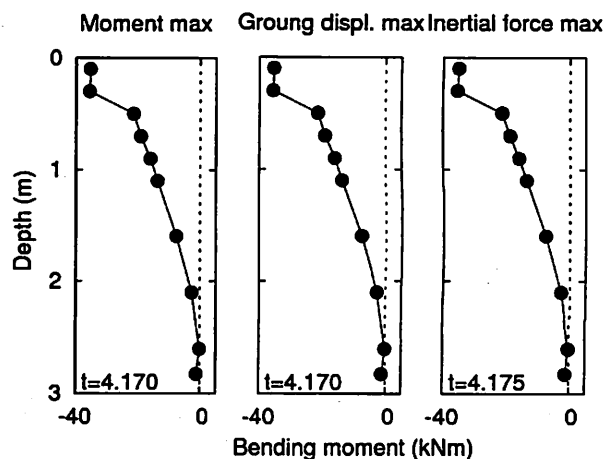


図-7(c) Case 2-616

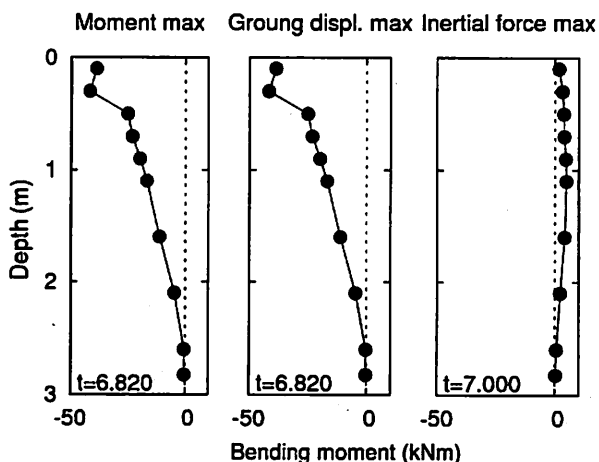


図-7 (b) Case 1-924

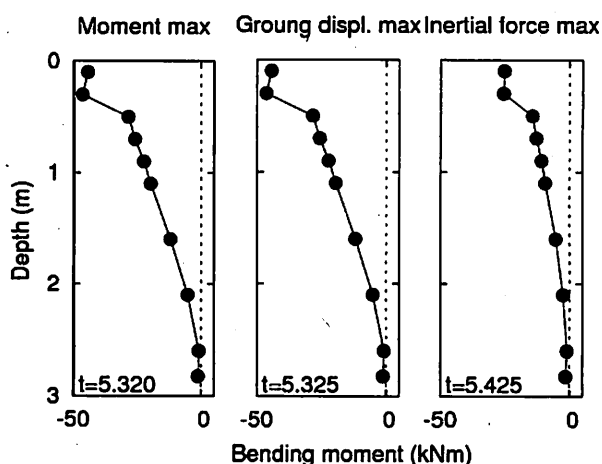


図-7(d) Case 2-924

図-7 杭頭の曲げモーメントが最大となる時 (左), 地盤変位が最大となる時 (中央), 慣性力が最大となる時 (右) の曲げモーメント分布図

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。
- 2) 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

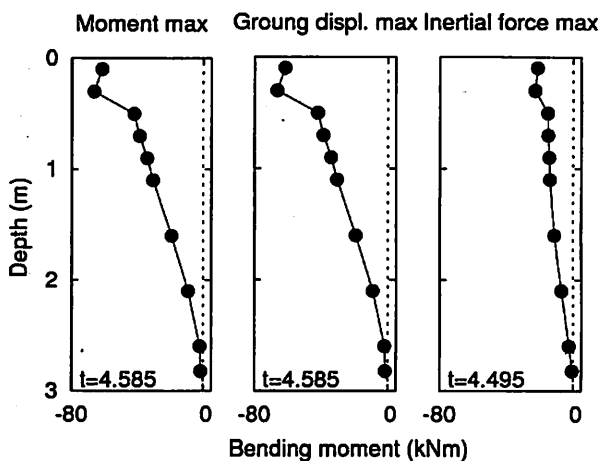


図-7(e) Case 2-1233

- (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) 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。