

杭の地震時挙動に与える地盤震動と慣性力の影響に関する実験的考察

室野剛隆¹⁾, 王海波²⁾, 西村昭彦²⁾, 長谷川淳史³⁾

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

²正会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540 東京都国分寺光町 2-8-38)

³正会員 (株)テス (〒185-0034 東京都国分寺光町 2-8-38)

杭基礎の地震時挙動は慣性力作用のみならず、地盤震動の作用を受ける。本論文では、非線形領域での杭基礎の動的相互作用を把握するため、大型せん断土槽を用いた地盤-基礎系の振動実験を実施した。実験ではフーチング重量が重いタイプと軽いタイプを考えた。入力加速度と各応答値の関係や、地盤や杭の加速度波形および杭の曲げひずみ波形の記録の相関解析から入力に対する時間遅れ構造を調べることで、慣性力と地盤変位の作用についてそれぞれ検討した。また離散系多質点系モデルを用いたシミュレーションにより上記の点について解析的に検討した。

Key Words: *Shaking table test, Pile foundation, Soil deformation, Inertial force, Seismic deformation method*

1. はじめに

杭基礎は慣性力と地盤変位の2つの相互作用の影響を受ける。これまで、慣性力と地盤変位による影響について解析的¹⁾・実験的(線形材料)²⁾に検討するとともに、耐震設計における扱いについて検討してきた。本論文では、これらの2つの作用が杭基礎の地震時挙動に与える影響について、科学技術庁所有の大型せん断土槽を用いた杭基礎模型の振動実験結果を基に検討する。

2. 実験概要

用いた砂は霞ヶ浦産の砂を自然乾燥状態で用いた。杭は杭径約 $D=0.32\text{m}$ の鋼管杭である。杭本数は4本の群杭で杭間隔は約 $6D$ である。フーチングは鋼板を積み重ねたものであり、約 15tf と 44tf の2種類を用意した。杭先端はピン結合で、杭頭はフーチングと結合(鋼板に穴をあけ、杭を

差し込みモルタルで固定)している。実験の詳細は文献 3) を参照していただきたい。入力は 100, 200, 400(cm/s^2)のホワイトノイズである。なお 44tf タイプの模型では G0C 波 ($1200(\text{cm/s}^2)$)の大加振も行っている。また、データのサインブリリングは 1000Hz である。

3. 実験結果

(1) 入力加速度と各応答値の関係

入力加速度とともに、構造物の加速度、地盤の加速度、地盤変位、杭の曲げひずみがどのように変化するか示したのが図2である。15tf タイプでは、入力加速度とともに構造物の加速度もほぼ線形的に大きくなっている。地盤については、入力加速度の増加に対して応答加速度の増加率は小さくなり、応答変位の増加率は大きくなる傾向にある。地盤の非線形化が進んでいるためである。これに対して、杭の曲げひずみと入力加速度との関係は、杭の位置(深さ)によらず地盤変位のそれとよく似ており、15tf タイプでは全長にわたって慣性力よりも地盤変位の影響を大きく受けていると考えられる。図からも分かるように、このような地盤変位により発生する応力は、地盤の非線形化により増加する傾向にあり、レベル2地震動に対する耐震設計を考えた場合には、より重要となってくると言える。

44tf タイプでは、構造物の加速度は明らかに頭打ちの傾向が現れている。地盤については、深さ-0.23(m)と-2.63(m)では、加速度は頭打ち、変位は徐々に増加する傾向にあり、明らかに土の非線形化が進んでいることが分かる。ただし、深さ-5.03(m)では加速度、変位ともほぼ線形的に増加しており、拘束圧が大きいために非線形化

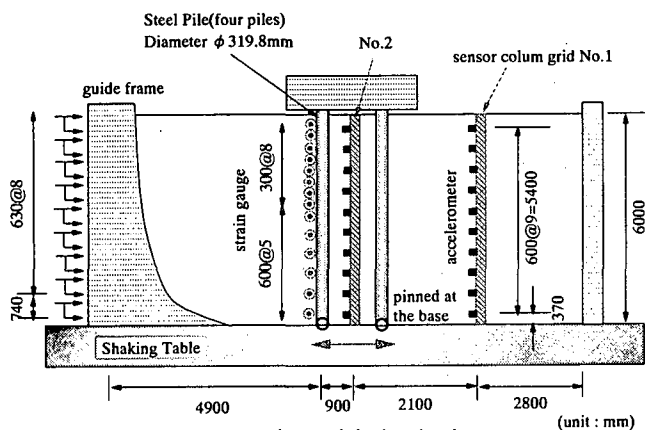


図1 実験概要

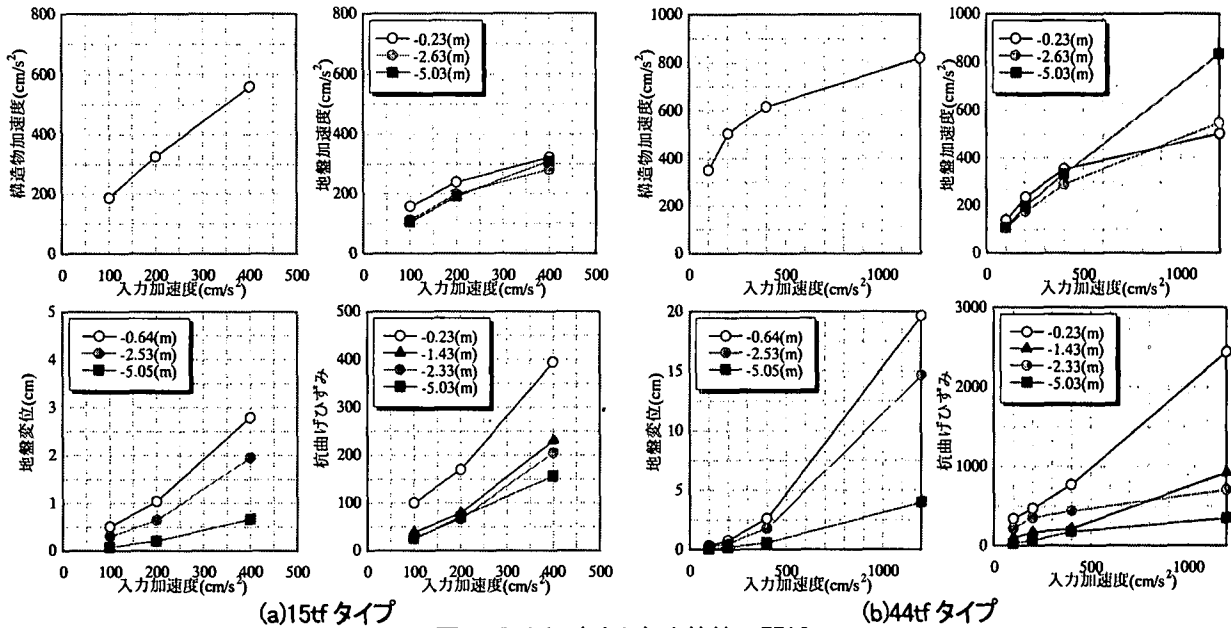


図2 入力加速度と各応答値の関係

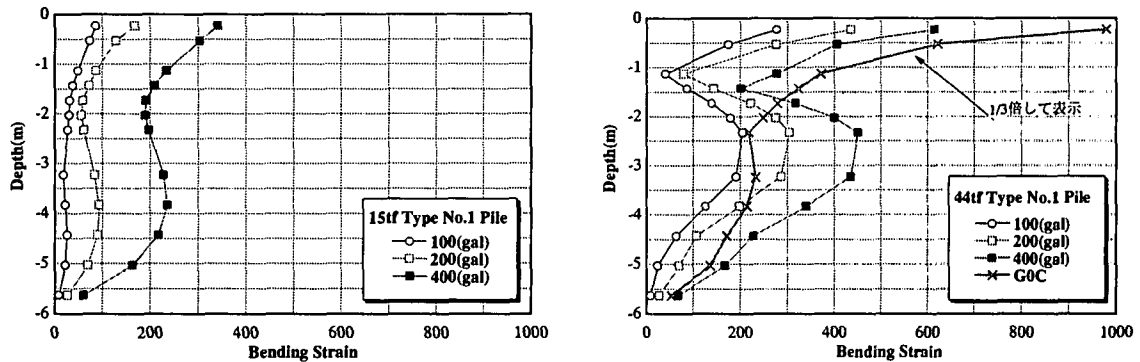


図3 曲げひずみ分布

があまり進んでいないと考えられる。杭の曲げひずみ分布は深さによって傾向が異なり、各深さにより地盤変位と慣性力の影響度合いが異なっていることが分かる。杭頭(-0.23(m))ではほぼ線形的に増加しており、構造物の加速度と地盤変位の中間的な傾向を示し、慣性力と地盤変位の両者の影響を受けていることが考えられる。深さ-2.33(m)の位置では構造物加速度と同一の傾向で、慣性力の影響を大きく受けていると考えられる。

(2) 杭の曲げひずみ分布

曲げひずみの最大分布を図3に示す。15tf タイプと 44tf タイプで曲げひずみ分布が大きく異なる。15tf タイプはひずみ分布が比較的なだからで地盤変位の影響を受けた分布と言える。44tf タイプは 1～2(m)付近で曲げひずみが大きく変化している様子が見られる。杭頭載荷の時のひずみ分布と似ており、慣性力の影響を大きく受けた分布であると言える。ただし、G0C 入力(1200gal)のときは、100～400(gal) 入力の時と大きく異なり、むしろ 15tf タイプに似ている。G0C 入力では地盤の非線形化が極端に進んだために、地盤変位による影響が現れたためであると思われる。

4. 相互相関関数による評価

相互相関関数を用いて、各応答値の時間遅れ構造を調

べることにより、慣性力の影響と地盤変位の影響を評価する。本検討では、振動台加速度に対する(a)地盤の加速度、(b)杭・フーチングの加速度、(c)杭の曲げひずみについて検討した。その結果を図4に示す。なお、本論文では 400(cm/s^2)加振のみを取り上げて考察を行う。

(1) 15tf タイプ

図(a)より、地盤の加速度と杭の加速度の時間遅れ τ (最大値をとる時刻とする)は、杭頭付近で若干差が生じるものの深さ方向にわたってほぼ一致しており、構造物全体が地盤とほぼ一体となって挙動しており、位相差は生じてないことが分かる。図(c)より、曲げひずみの時間遅れ τ は、全体的にはほぼ地盤加速度のそれとよく似ており地盤変位の影響を大きく受けていることが分かる。ただし、-1.13～-2.03m で相互相関関数の形状が変化するのは、慣性力によるひずみの符号が反転し、慣性力と地盤変位によるひずみが複雑に絡み合っているためと考えられる。

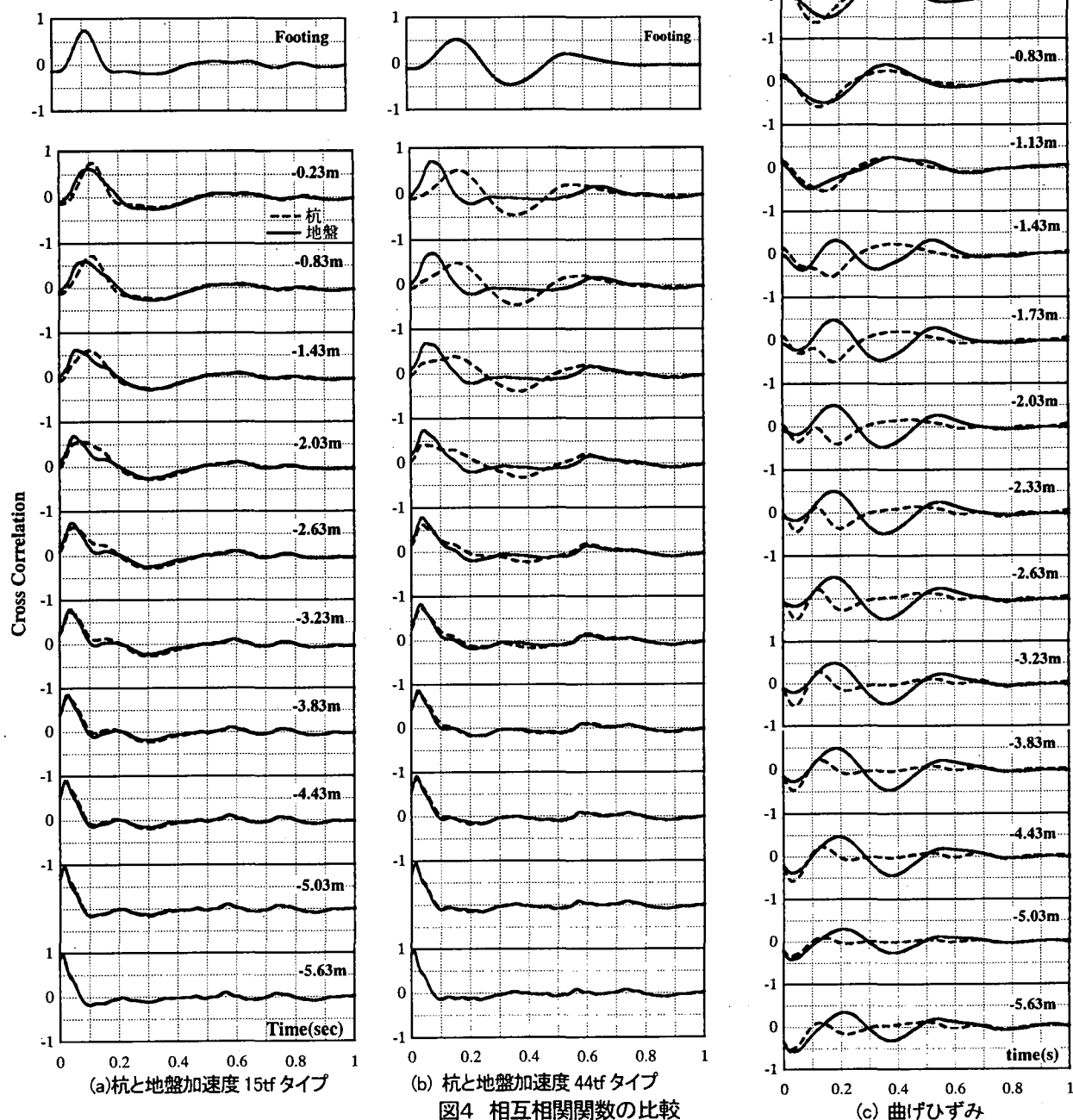
(2) 44tf タイプ

図(b)より、-2.63m 以深では 15tf タイプ同様、杭の加速度と地盤の加速度の遅れ時間がほぼ一致しており、地盤と一体となって挙動していることが分かる。しかし、それ以浅では、相互相関関数の形状も大きく異なり、杭加速度の時間遅れも急激に遅くなっている。ほぼフーチングの遅れ時間

と一致しており、地盤と構造物の挙動に位相差が生じている。図(c)の杭ひずみに関しては、杭頭付近では、ひずみの時間遅れ τ とフーチングの τ がほぼ一致していることから、慣性力による寄与が大きいことが分かる。-1.13と-1.43mの2点では τ がその前後の深さのものと明らかに傾向が異なり、地盤加速度の τ に近い。これは慣性力によるひずみが反転する領域のため、見かけ上慣性力によるひずみが小さくなり、相対的に地盤変位によるひずみが現れたものと解釈できる。-1.73～-4.43mでは相互相関関数の形状は、杭頭付近のものと符号が反転してほぼ対称の形状となっており、 τ も杭頭部のそれと一致している。地中部でも慣性力によるひずみの寄与が大きいことが分かる。-5.03mと-5.63mでは、 τ 地盤加速度のそれと似ており、地盤変位による影響を大きく受けていることが分かる。

5. シミュレーション

動的解析に用いた解析モデルは、図5に示す離散系多質点モデルである。地盤系モデルについては、著者の一部が提案した応力～ひずみモデルを用いた時刻歴非線形解析⁴⁾により行った。杭-フーチング系モデルでは、400(gal)加振までは杭が塑性化していないことが確認されているので、杭部材は線形とした。また、模型では杭とフーチングはモルタルで結合されているが、その強度はそれほど大きくなく、加振中には杭の抜け出しの効果等があると考えられる。そこで、地表面に突出している杭部材の剛性を、構造物重量



15tf タイプでは 1/2, 44tf タイプでは 1/4 にそれぞれ低下させている。地盤バネは、鉄道構造物等設計標準(基礎構造物)により算定した。バネ定数の算定に用いる弾性係数は、3. から求める地盤の時間遅れから求めた加振中の平均せん断波速度より算定した。水平バネは有効抵抗土圧で上限値を有するバイリニア型の非線形特性を有するものとした。また杭頭から 1/β の範囲は周面せん断バネは無視した。

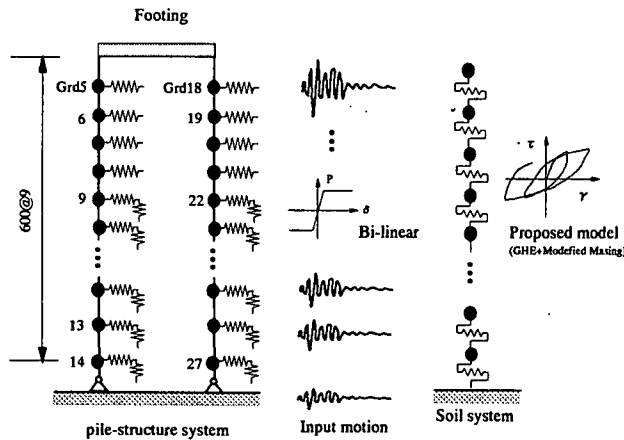


図5 解析モデル図

図6にフーチングの水平加速度の時刻歴応答波形と実験結果との比較を示す。15tf タイプでは応答値の大きさおよび位相もよく合致している。44tf タイプでは実験結果と多少位相がずれるところがある。しかし、両タイプとも比較的良好にシミュレーションされている。

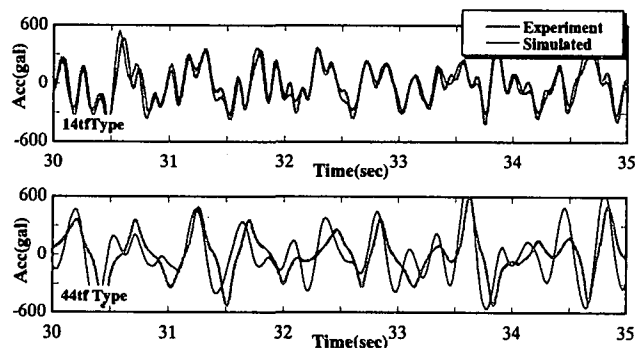
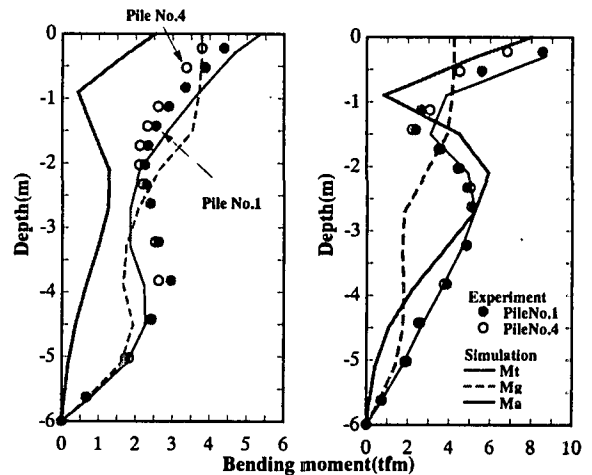


図6 時刻歴応答波形の比較

そこで、このモデルを用いて解析的に地盤変位によるモーメント M_g と慣性力によるモーメント M_a を分離する。 M_g は構造物モデルのマスを 0(ゼロ)として、動的解析を行うことによって算定した。 M_a は全体系の解析結果(M_t)から M_g を差し引くことで求めた。模型が、非線形系なので重ね合わせの原理は厳密には成立しないが、ここでは定性的な傾向を見るためにこのような方法により M_a と M_g を分離した。解析の結果得られた最大モーメント分布を図7に示す。

15tf タイプでは、フーチング重量が軽いため、地盤変位による影響が顕著に現れ、全体系のモーメント M_t は、全深さにわたって地盤系のモーメント M_g が支配的である。その結果、 M_a が深さ-0.9(m)位置で符号が反転するにもかかわ

らず、杭の全体系のモーメント分布は滑らかな分布となったことが確認できた。44tf タイプでは、フーチング重量が大きいため、杭頭および地中部とも慣性力によるモーメント M_a の影響が支配的となっている。また、 M_a の影響を大きく受けた結果、深さ-1m 前後で全体系のモーメント M_t の符号も反転することが分かる。また、-4.5m 以深では M_g の方が M_a よりも大きくなっている。動的解析から得られた図7の傾向は、相互相関関数による検討結果とよく一致している。深さ位置で明らかにモーメントの要因が異なっており、耐震設計上は地盤変位による杭の応力を考慮した設計が望ましいことが分かる。



(a) 15tf Type

(b) 44tf Type

図7 杭の最大モーメント分布の比較

6. まとめ

大型せん断土槽を用いた鋼管杭の振動実験を行い、測定データの相互相関関数を用いた解析により、杭基礎の地震時挙動について検討した。その結果、杭基礎の地震時挙動は慣性と入力との2つの相互作用を受けること、杭の応力についても両者の影響を複雑に受けていることが確認できた。また、地盤-杭-フーチング系の非線形動的解析によるシミュレーションを行った結果、相互相関解析の結果と同様の傾向が得られた。応答変位法のような地盤変位の影響を考慮した照査法が望ましいことが再認識された。

謝辞: 本実験を行うにあたり、科学技術庁・防災研究所の大型せん断土槽を利用させていただきました。科学技術庁防災研究所の箕輪氏、東京ソイルリサーチの阿部氏に多大な協力を得ました。ここに感謝の意を表します。

参考文献 1)室野, 西村: 杭基礎構造物の地震時応力に与える地盤・構造物の非線形性の影響とその評価手法, 第10回日本地震工学シンポジウム, 1998. 2)室野, 西村ら: 地盤震動を考慮した杭基礎構造物の耐震設計法に関する実験的研究, 第24回地震工学研究発表会, 1997. 3)長縄, 室野ら: 基礎と地中構造物の大型振動実験(その10), 第33回地盤工学研究発表会, 1998. 4)西村, 室野: GHE モデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 第25回地震工学研究発表会