

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検討

室野剛隆¹⁾, 西村昭彦²⁾, 永妻真治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(基礎担当) (〒185 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(基礎担当) (〒185 東京都国分寺光町 2-8-38)

³正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(基礎担当) (〒185 東京都国分寺光町 2-8-38)

鉄道における軟弱地盤中の杭基礎構造物の耐震設計法として、応答変位法が用いられている。これは慣性力の他に地盤変位による影響を加味したもので、地盤変位を相互作用ばねを介して構造物に作用させるものである。この場合、慣性力と地盤変位は独立に作用するものではなく、お互いに影響を及ぼし合っている。今後の L2 レベルの地震に対して設計を考える場合に、両者の影響度合いについて明確にする必要がある。そこで本論文では、シリコン地盤を用いた振動実験によって上記の内容について検討したので、その内容を報告する。

Key Words: Seismic Deformation Method, Pile Foundation in Soft Ground, Kinematic Interaction, Inertial Interaction, Shaking Table Test with Soil-Pile-Structure

1. はじめに

過去の地震から、鉄道橋梁等は軟弱地盤で震害が多いことが指摘されている。その原因の 1 つとしては、軟弱地盤では地震時に表層地盤に大きな変形が生じることが挙げられる。そのため軟弱地盤中の鉄道橋梁の基礎構造物の耐震設計法においては応答変位法によって慣性力の他に地盤変位の影響を考慮している¹⁾。

応答変位法とは、杭頭に作用する慣性力の他に地盤変位の影響を考慮して杭応力を算定する方法であり、地盤の相対変位量を地盤ばねを介して基礎に外力として作用させるものである。しかし、慣性力と地盤変位は独立に杭に作用を及ぼしているわけではなく、相互に関係している。表層地

盤の影響を考慮した深い基礎構造物の合理的な耐震設計法確立のためにはこれら 2 種類の外力が杭にどのように作用しているかを解明することは極めて重要である。そこで、これまで地盤-杭-構造物系の解析的な検討によってこれらの影響を定量的に検討してきた。またこの結果に基づいて耐震設計法の提案²⁾を行ってきた。今回は、上記の結果の妥当性を検証するために実験的に検討をおこなったのでそれらの結果について報告する。

2. 実験概要

(1) 模型概要

軟弱地盤中の杭基礎構造物を想定して作成した模型の

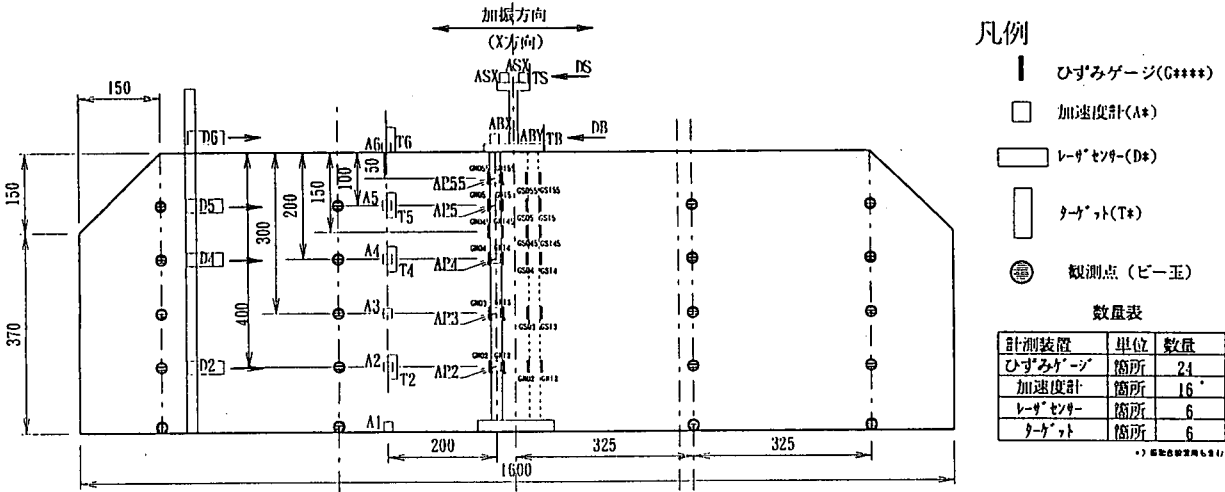


図 1 実験概要図

表1 模型諸元

	模型諸元	想定実物
密度(tf/m ³)	1.00	1.80
層厚(m)	0.50	25.00
弾性係数(kgf/cm ²)	3.00	270.00
せん断波速度(m/s)	9.90	70.00
ポアソン比	0.50	0.50
せん断弾性係数(kgf/cm ²)	1.00	90.00
密度(tf/m ³)	2.26	4.07
ヤング率(kgf/cm ²)	4.36E+03	3.92E+05
杭径(cm)	2.00	100.00
杭長(m)	0.50	25.00
断面2次モーメント(cm ⁴)	7.85E-01	4.91E+06
曲げ剛性(kgfc ²)	3.42E+03	1.93E+12

概観図を図1に、諸元を表1に示す。今回の実験は、杭の地震時応力にかかわる慣性力と地盤変位の影響を把握するのが目的であったので、地盤等は線形範囲の検討とした。

そこで、地盤をシリコン材料で、杭基礎をテフロン材でそれぞれ製作した。杭は4本の群杭構造とし、杭先端はピン支持構造、杭頭はフーチングに固定した。また上部構造物は重りを4本のテフロン脚で支持させて振動体構造とし、重りの重量とテフロン脚の長さを変化させることでその固有周期を調整した。

(2) 実験ケース

実験ケースを表2に示す。地盤の1次固有周期 T_g と構造物の固有周期 T_s との大小関係の影響を見るために4種類の構造物周期を設定した(以下、本論文では T_g と T_s という記号を用いる)。入力についてはホワイトノイズを用いて伝達関数を算定し、次に主要なピークと同じ振動数の正弦波を入力した。また、鉄道構造物の耐震設計用の暫定波(G0波)³⁾を用いた。

また、振動実験の前に地盤の K 値を求めるためにシリコン地盤中の群杭の静的載荷試験を行った。載荷方法はフーチング中心部分に取り付けたワイヤーの他端におもりをつけて250gずつ2000gまで8Step載荷した。

3. 伝達関数

Case1(構造物無)の入力に対する地表面の応答加速度の伝達関数を図2に示す。5.2Hz付近に地盤の1次モード、13.6Hz付近に2次モードのピークが見られる。1層地盤の場合、理論的には2次の固有周期は1次の3倍になるはずであるが、実験では2.6倍となっている。これは模型の側方境界の影響が現れたものと考えられる。

次に、地盤一杭一構造物系の場合の伝達関数を図3に示す。実線は上部構造物、点線はフーチングの応答加速度の伝達関数である。 $T_s < T_g$ の場合(Case2)には、上部構造物の伝達関数には明確に2つのピークが見られる。1つは T_s 付近でありこれは構造物の振動が卓越したモードであり、他方は T_g 付近で地盤の振動が卓越したモードである。 $T_g = T_s$ の場合(Case3)にはピークは1つになり、共振現象のために非常に大きな応答を示す。 $T_s > T_g$ の場合

表2 実験ケース

実験ケース	内容	備考
Case-1	地盤一杭	
Case-2	地盤一杭一構造物系	$T_s=8.2$
Case-3	地盤一杭一構造物系	$T_s=5.3$
Case-4	地盤一杭一構造物系	$T_s=4.1$
Case-5	地盤一杭一構造物系	$T_s=2.8$
Case-6	地盤一杭一構造物系	剛体
Case-7	地盤一杭	

ただし T_s は連成系の固有周期

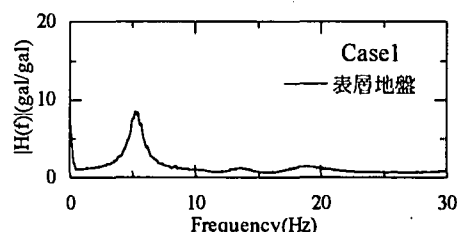


図2 地盤の伝達関数

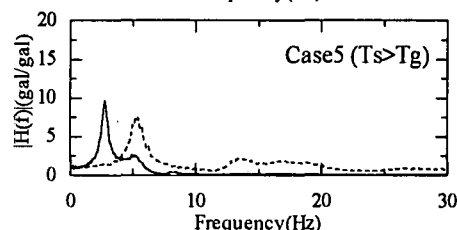
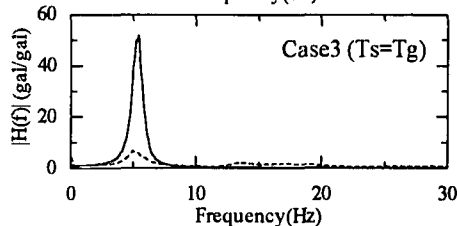
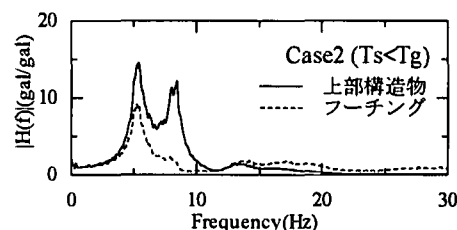


図3 上部構造物の伝達関数

(Case5)には、2つのピークが見られるものの、 T_g のピークは小さくなり、構造物の挙動は地盤の影響をあまり受けないことが分かる。

フーチングについては、いずれの場合も地盤によるピークが卓越しており地盤とともに振動していることが分かる。

4. 応答特性

地盤変位と慣性力が杭の応力に与える影響を検討するために、地表面と上部構造物の加速度の応答波形に注目した。地盤の固有周期 T_g と同じ正弦波を入力した場合の実験結果を図4に示す。 $T_s < T_g$ では地表面と上部構造物の

加速度は同位相であり、地盤変位と慣性力が同位相で杭に作用することが分かる。一方、 $T_s > T_g$ (Case-5) の場合には、両者は逆位相で杭に作用する。 $T_s = T_g$ (Case-3) の場合には、地盤と構造物が共振して大きな加速度 (慣性力) を生じるものの、地盤変位と慣性力の作用には 90 度の位相差を伴うことが分かる。

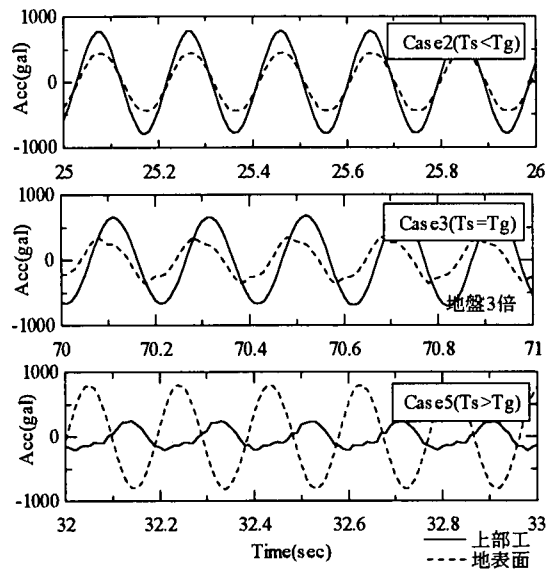
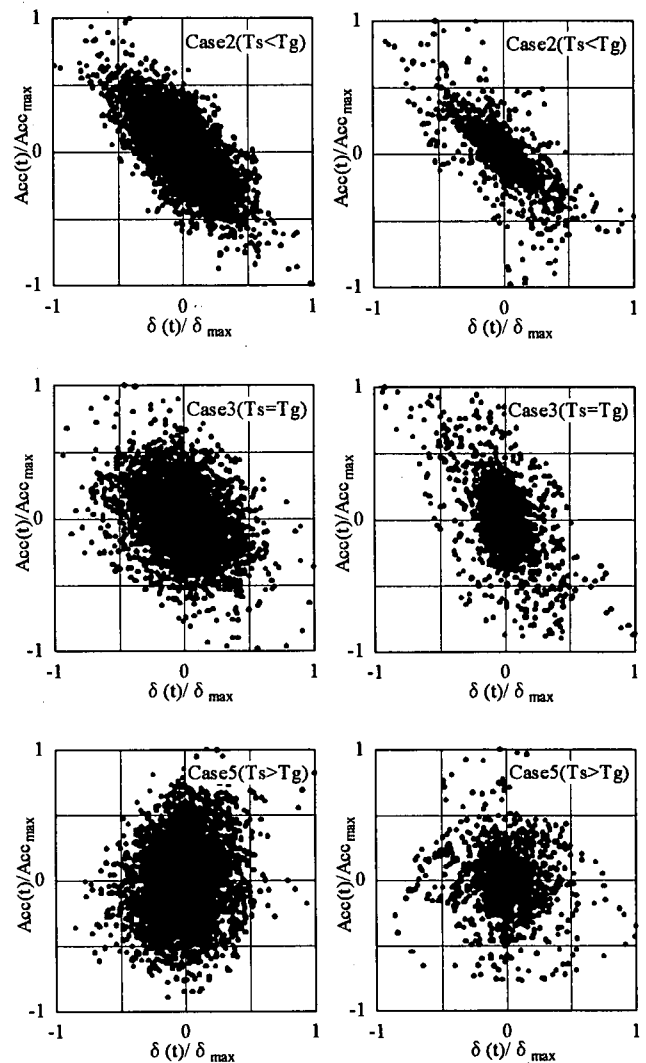


図4 応答波形の比較

次に、構造物の固有周期 T_s と同じ周期の正弦波を入力した場合には (紙面の都合上、図は省略)、構造物が常に共振状態であるために、 $T_s < T_g$ (Case-1)、 $T_s = T_g$ (Case-3)、 $T_s > T_g$ (Case-5) いずれの場合も、地表面と構造物とは位相がほぼ 90 度ずれて振動していることが分かった。

5. 杭応力に与える地盤変位と慣性力の関係

正弦波を入力した場合には波形を見ることにより地盤震動と慣性力の位相差が明確に分かったが、ランダム波の場合には分かりづらい。そこで各時刻における上部構造物加速度と地盤変位量との関係をホワイトノイズおよび地震波 G0 を入力した場合について表したのが図 5 である。横軸に最大値で正規化した地盤変位量 ($\delta(t)/\delta_{max}$) を、縦軸に最大値で正規化した上部構造物加速度 ($Acc(t)/Acc_{max}$) をとっている。 $T_s < T_g$ (Case2) の場合にはデータが原点を通る傾き -1 の直線上に分布している。これは、上部構造物の振動が地盤震動に大きく影響を受けており、慣性力 (加速度とは位相が 180 度ずれる) と地盤変位が 1:1 で同位相で杭に作用する時間が多く、両者が同時に最大となって杭に作用する可能性が非常に高いことを示している。 $T_s = T_g$ (Case3) の場合には、より傾きの大きい直線上にデータが分布しており、全体的に見るとデータのばらつきがやや大きくなっている。つまり地盤震動と上部構造物加速度が同時に最大となって杭に作用する可能性が Case2 よりも小さくなっていることが分



(a) ホワイトノイズ入力

(b) 地震波入力

図5 地盤変位と慣性力の関係

かる。 $T_s > T_g$ (Case5) の場合には、データのばらつきがさらに大きくなり、原点を中心とした円形状内に分布している。これは地盤変位と慣性力がほぼ 90 度近くずれて杭に作用することが多いことを示している。

軟弱地盤中の杭基礎の耐震設計法では、主に慣性力による影響に対して照査する場合と、主に地盤変位による影響に対して照査する場合の 2 段階設計を取り入れるのが望ましいと考えられる。図 5 からは、耐震設計上、地盤変位と慣性力を組み合わせる考え方として以下のようなことが言える。 $T_s < T_g$ の領域では地盤変位が最大の時に慣性力も最大となる可能性が高く、 $T_s > T_g$ の領域ではどちらかが最大の時に他方は 0 もしくは逆方向の作用となることがあることになる。その具体的な考え方は、参考文献 4) および限界状態設計法を取り入れて新しく改訂された鉄道基礎構造物の設計標準⁹⁾に示している。

6. シミュレーション

地震時の杭応力の発生のメカニズムを検討するとともに、

応答変位法の妥当性を検討するために、正弦波を入力した場合の実験結果をシミュレーションする。地盤と杭が変形した時の力の釣り合い式は次式で表せる⁹⁾。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = kD \{f(x) - y\} \quad (1)$$

ここで、 EI は杭の曲げ剛性、 D は杭径、 x は地表面からの深度、 y は杭の変位、 k は地盤反力係数、 $f(x)$ は地盤の変位である。(1)式を模型実験と同じ境界拘束条件のもとに、杭頭に働く加速度に構造物重量を乗じた慣性力の効果を与えて、杭体に作用する曲げモーメントを算定する。地盤変位の深度分布 $f(x)$ は、

$$f(x) = a_g \cos \frac{\pi x}{2H} \quad (2)$$

で求めた。ここに、 H は層厚、 a_g は地表面の水平変位量である。解析では、 a_g を実験値から設定した。また、地盤反力係数 k は静的載荷試験から求めた。地盤－杭－構造物系のシミュレーションでは、地盤変位以外に、杭頭に水平荷重 H_0 とモーメント荷重 M_0 を載荷する。このときに地盤変位と組み合わせる慣性力は、地盤変位が最大時刻での構造物の加速度より算定した。図 6 にモーメント分布の実験値および計算値を示す。図には、地盤変位、杭頭水平荷重、杭頭モーメント荷重による杭曲げモーメント分布をそれぞれ M_G 、 M_H 、 M_M として各々示した。

図(a)より応答変位法によって計算された地盤変位によるモーメント M_G (フーチングの慣性力は考慮) は実験結果とよく一致している。 M_G は地中部でも大きなモーメントを示しており、静的載荷試験の結果および慣性力によるモーメント分布とは大きく異なっている。次に、図(b) $T_s < T_g$ の場合 (Case2) では、全体系のモーメントは地盤変位と慣性力を同方向に載荷することで実験結果を説明することが可能であることが分かる。一方、図(c)より $T_s > T_g$ の場合 (Case5) には、地盤変位と慣性力を同方向に載荷 (図中、点線) すると実験

結果とシミュレーション結果では 30cm 以浅で大きく異なっており、位相差を考慮して載荷 (実線) すると実験結果をよく説明できた。つまり、前節でも述べたように T_s と T_g の大小関係で地盤振動と慣性力が杭に与える影響が大きく異なってくるという特性を考慮しなければ、振動中の杭の応力を説明できないことが分かる。

7. まとめ

地盤－杭－構造物系の模型振動実験を行った結果、(1) T_g と T_s の相対的な大小関係で地盤－杭－構造物系の振動特性が大きく変化し、地震時杭応力の発生には、地盤変位と慣性力が複雑に絡んでいること、(2) 応答変位法を用いる場合に地盤と構造物の位相差を考慮した荷重の組み合わせによってこの応力を説明できること、等を明らかにした。今後の耐震設計では、地盤および構造物の非線形化の問題に対する検討は必要不可欠であり、これについては解析、非線形材料を使った実験により検討を進めている。

謝辞: 本実験を行うに当たり東急建設 (株) 技術研究所の皆様にご協力を頂きました。紙面を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- (財) 鉄道総合技術研究所監修: 鉄道構造物等設計標準・同解説－基礎構造物・抗土圧構造物－、平成 9 年 4 月 10 日、丸善 (株)
- 室野、西村、永妻: 地盤変位に着目した杭基礎構造物の耐震設計法への一提案、土木学会第 51 回年次学術講演会概要集
- (財) 鉄道総合技術研究所: 新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料、平成 8 年 3 月
- 西村、室野、永妻: 地盤震動を考慮した軟弱地盤中の杭基礎構造物の耐震設計法、第 24 回地震工学研究発表会概要集、1997
- 西村昭彦: 地盤の変位を考慮した構造物の設計法、基礎工、Vol6, No.7, pp48-56, 1978

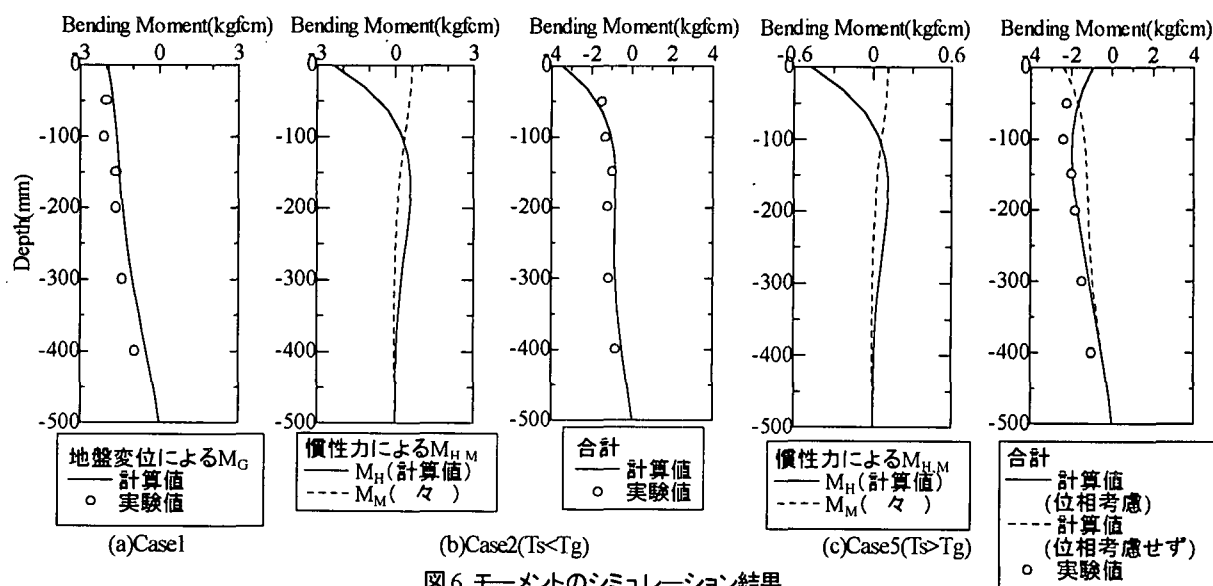


図 6 モーメントのシミュレーション結果