

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

西村昭彦¹⁾・室野剛隆²⁾・永妻真治³⁾

¹⁾正会員 工博 (財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業本部 (〒185 東京都国分寺市光町2-8-38)

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

鉄道における弱地盤中の基礎構造物の耐震設計は、応答変位法を採用している。本法は、杭頭に作用する慣性力とともに、地盤の相対変位を地盤ばねを介して杭に作用させるものである。しかし、慣性力と地盤変位は各々独立に作用しているのではなく互いに影響を及ぼし合っている。そのため、地盤-杭-構造物系の地震応答解析や模型振動実験によって、これらの動的相互作用について検討を進めてきた。その結果、上部構造物の固有周期と地盤の固有周期との関係により構造物と地盤変位との間に位相差が生じること、上部構造物の応答加速度が変化すること等を確認した。本報告では、これまでに得られた知見を示し、その効果を取り入れた応答変位法による耐震設計法を提案した。

Key Words : seismic deformation method, soil-pile-structure system, pile foundations, earthquake response analysis, dynamic interaction force

1. 応答変位法の概要

鉄道における軟弱地盤中の基礎構造物の耐震設計においては、上部構造物の慣性力の他に地震時の地盤変位の影響を考慮している。すなわち、図-1に示すように、杭頭に作用する慣性力とともに、地盤の相対変位を地盤ばねを介して杭に作用させる。そのため、杭頭に作用させる慣性力のみでは考慮しえない、表層地盤の土層構成等によって決定される地震時の地中での地盤変形による杭体への作用を考慮することができ、段落しの位置などの合理的な設定が可能となる。

しかし、これらの慣性力と地盤変位はそれぞれ独立に作用しているわけではなく、互いに影響を及ぼし合っている。そのため地盤-杭-構造物系の地震応答解析や模型振動実験によって、これらの動的相互作用について検討を進めてきた。

本報告では、動的解析結果を中心に、これまでに得られた結果を示し、動的相互作用による効果を取り入れた応答変位法による耐震設計法について提案するものである。なお、模型震動実験については、文献1)にまとめた。

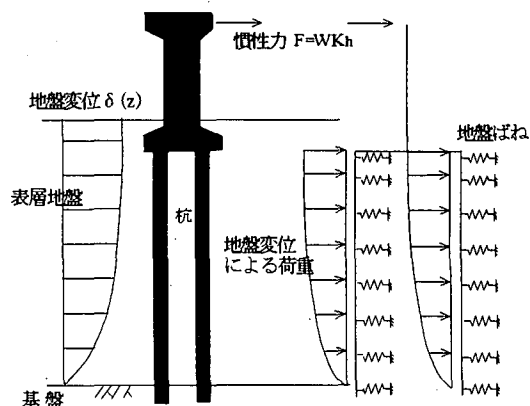


図-1 応答変位法の概念図

2. 地盤-基礎-構造物系の動的解析による検討

地盤と基礎との動的相互作用の問題に関しては地盤の固有周期(T_g)と構造物の固有周期(T_s)との関係が重要な要因となることが指摘されている。そこで、本検討では、 T_g と T_s の組合せをパラメトリックに変化させた地盤-基礎-構造物系の動的解析を実施し、杭応力に与える Kinematic な相互作用と Inertial な相互作用の定性的な関わり合いを把握するとともに、地震応答解析によって杭基礎構造物への影響を評価することとした。

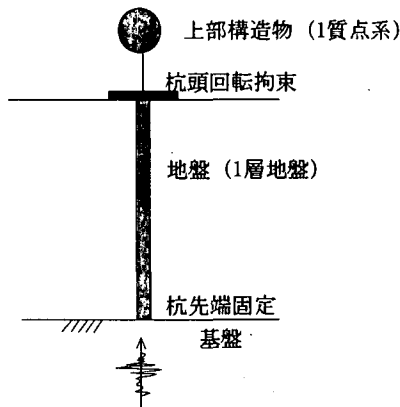


図-2 解析モデル概念図

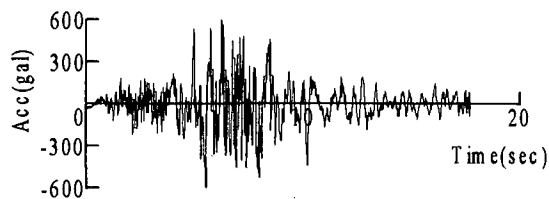


図-3(a) 入力地震波 (時刻歴波形)

表-1 解析モデル諸元

地盤	固有周期	$T_g(\text{sec})$	1.0
	層厚	$H(\text{m})$	20.0
	せん断波速度	$V_s(\text{m/s})$	80.0
	単位体積重量 (地盤)	$\gamma_s(\text{tf/m}^3)$	1.5
	ポアソン比	ν	0.49
杭	減衰定数 (地盤)	h_g	0.2
	杭径	$D(\text{m})$	1.2
	単位体積重量 (杭)	$\gamma_p(\text{tf/m}^3)$	2.5
	減衰定数 (杭)	h_p	0.05
構造物	ヤング率	$E_p(\text{tf/m}^2)$	2.5×10^8
	固有周期	$T_s(\text{sec})$	0.3~2.5
	上部工重量	$W_u(\text{tf})$	196.85
	下部工重量	$W_p(\text{tf})$	80.58
	減衰定数	h_s	0.1

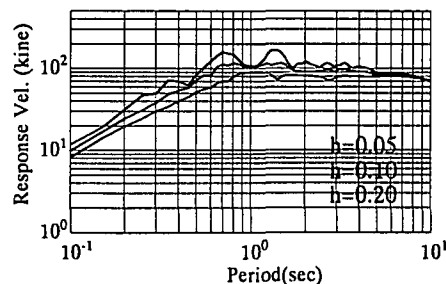


図-3(b) 入力地震波 (速度応答スペクトル)

(1) 解析モデルと解析方法

本解析では、地盤震動と構造物の慣性力が相互に杭基礎に与える影響を把握することを主眼としていることから、比較的簡単なモデルとし、地盤を1層とし、構造物を1質点系とし、杭は単杭とした。ただし、実際には群杭形式の場合が多く、杭を単杭としてモデル化すると杭頭の回転が卓越しがちとなるので、解析では杭頭の回転は拘束させた。また、杭先端は支持地盤中に固定とした。解析モデルの概念図を図-2に示し、諸元は実際の鉄道橋をもとに、表-1のように設定した。

これを基本ケースとし、地盤の1次固有周期(T_g)と構造物の1次固有周期(T_s)の組み合わせをパラメトリックに変化させて解析を行った。

解析は、地盤解析を3次元薄層要素法で、杭解析を伝達マトリクス法で適用し、両者の連成系の定式化をサブストラクチャー法から与えた²⁾。

(2) 入力波

まず、正弦波を入力することで、地盤震動および上部構造物の慣性力が杭応力に与える影響について、基本的な特性を把握し、次に地震波を入力して、その定量的な評価を試みることにした。

入力地震波は、現在の鉄道の設計標準^{2), 3)}で採用している設計速度応答スペクトル(図-3(b))に適合させた波形を基礎波として入力した。地震のレベルは、マグニチュード $M=8$ 、震央距離 $\Delta=40(\text{km})$ 相当の地震と兵庫県南部地震相当のもの2タイプとし、解析モデルの基礎に入力した。解析に用いた波形を図-3(a)に示す。

(3) 解析結果とその検討

ここでは、地盤-基礎-構造物系を「全体系」、地盤震動のみを考慮した場合を「地盤系」とした。上部構造物の慣性力の影響は、両者の差として求め、これを「慣性系」とした。以下、記号で添え字 t は全体系、 g は地盤系、 a は慣性系による応答を表わす。

a) 応答波形

地盤の卓越周期 T_g と同一の周期をもつ正弦波を入力した場合の杭頭に作用するモーメントの応答波形を図-4に示す。(a) $T_g > T_s$ の場合には、地盤震動の影響(地盤系)と慣性力の影響(慣性系)が同位相で杭体に作用することがわかる。よって、全体系のモーメントは地盤系と慣性系のモーメントの和として表せる。(b) $T_g = T_s$ の場合では、地盤と構造物が共振し、上部工加速度が著しく増大し、慣性力によって杭に作用するモーメントも非常に大きい。しかし、地盤変位によって生じる杭応力と慣性力によって作用する杭応力との間には、 90° 近くの位相のずれが見られる。さらに、(c) $T_g < T_s$ の場合では、地盤震動の影響と慣性力の影響がほぼ逆位相に近い関係で杭に作用している。

次に、地震波を入力した地震応答解析によって得られた応答波形(杭頭モーメント)の代表的な例を図-5に示す。(a) $T_g > T_s$ の場合では地盤系と慣性系の応答波形に位相のずれはなく、地盤震動と慣性力によるモーメントが同位相で杭に作用することが分かる。しかし、(c) $T_g < T_s$ の場合では両者の位相が無関係に推移している様子がわかる。正弦波を用いた解析結果と定性的には同じ傾向である。

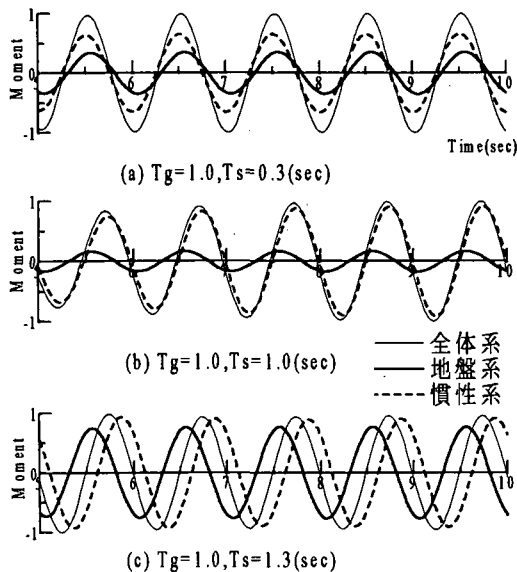


図-4 正弦波入力による時刻歴応答波形:杭頭モーメント

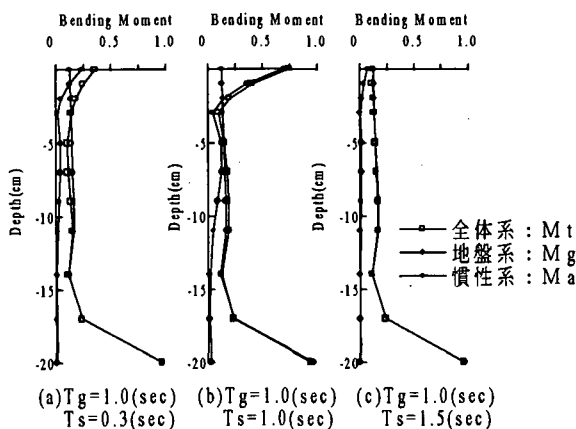


図-6 杭のモーメントの鉛直方向分布

b) モーメント分布

杭に作用する最大モーメント(最大値で正規化)の鉛直方向分布を図-6に示す。Maは深さ方向とともに急激に減少するのに対して、Mgは地盤中でも大きな値を示す。よって、杭頭付近では慣性系による影響が支配的であり、特に地盤と構造物が共振する(b) $T_g = T_s$ の場合にその傾向が顕著である。また、地中部(本ケースでは約4 m以深)においては、地盤震動による影響が支配的であり、地震時の地盤変位による影響が無視できないことが伺われる。(c) $T_g < T_s$ の場合には、MgとMtがほぼ一致しており、慣性力による影響が相対的に小さいことがわかる。なお解析は杭先端を固定としているので杭先端で非常に大きなモーメントが生じている。

c) 杭応力に与える地盤震動と慣性力による影響

以上から、地盤震動による影響と慣性力による影響は、同時に最大になるとは限らないことがわかる。そこで、図-7に示すように、地盤震動が最大となる時刻($t=t_g$)に注目し、解析結果を整理するこ

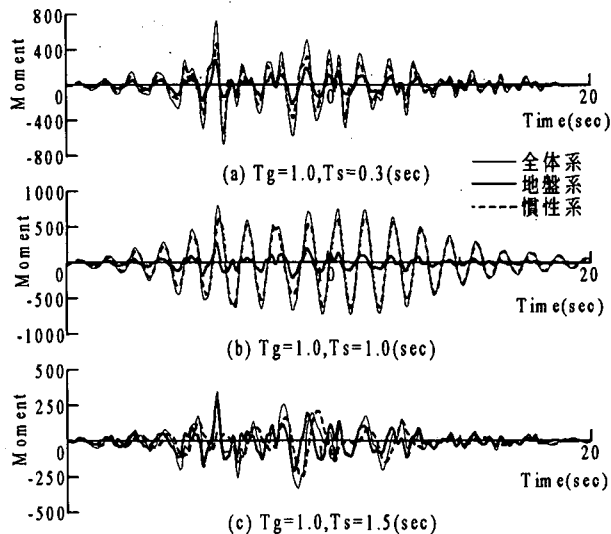


図-5 地震波入力による時刻歴応答波形:杭頭モーメント

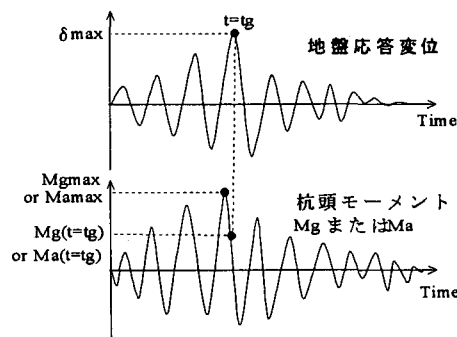


図-6 時刻 $t=t_g$ での荷重の組合せ

ととした。ここでは、構造物の固有周期(T_g)と地盤の固有周期(T_s)の比: $\alpha (=T_s/T_g)$ について; M_g/M_{gmax} (地盤震動による最大モーメントに対する $t=t_g$ でのモーメントの比), M_a/M_{amax} (慣性系による最大モーメントに対する $t=t_g$ でのモーメントの比)をプロットし、図-8に示した。

$\alpha (=T_s/T_g)$ によらず、 M_g/M_{gmax} は、ほぼ1.0であり、地盤変位が最大の時に、地盤変位による杭モーメントも最大になっていることを表している。

一方、 M_a/M_{amax} は、 $\alpha (=T_s/T_g)$ によって異なり、 $T_g > T_s$ の範囲では1.0に近いが、 T_s が長くなるにつれて徐々に減少し、 $T_s \approx 1.3 \sim 1.5 T_g$ 付近でこの値は最小となり、その後再び1.0に近づく。 M_a/M_{amax} の値が1になる場合は地盤変位と慣性力の作用が同時に最大となって杭に作用し、負の側では両者が逆方向に作用することを示している。これは、図-5からもわかるように T_g と T_s の関係によって地盤変位と慣性力の作用の間に位相差が生じ、両者が最大となる時刻に差が生じるためである。

d) T_s/T_g と構造物加速度との関係

次に、図-9に T_s/T_g の関係と構造物の最大応答加速度との関係を示す。ここでは、各ケースの中の最

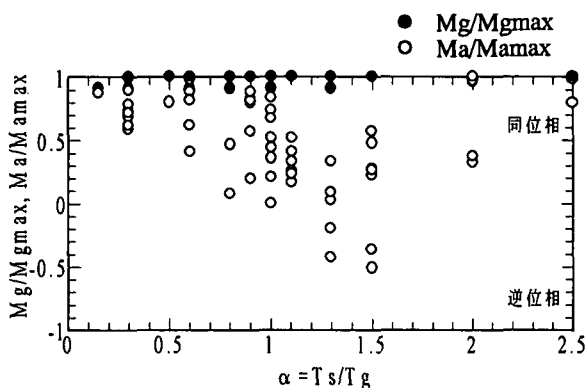


図-8 地盤変位最大時での杭頭モーメントの比

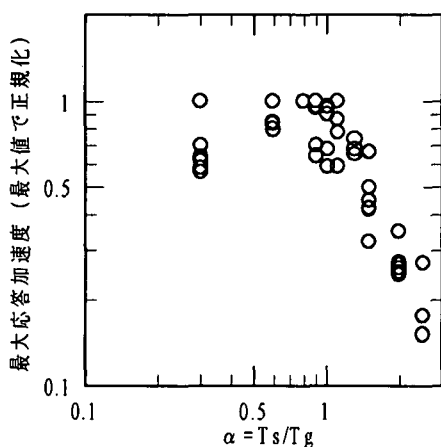


図-9 地盤変位最大時での上部工最大応答加速度

大値で正規化した。 $\alpha=1.0$ ($T_s=T_g$) 付近では地盤と構造物が共振し大きな加速度を生じ、それ以外の領域では T_s が T_g より離れるにつれて構造物の応答加速度は小さく抑えられる傾向にあり、特に $T_s > T_g$ の領域で顕著である。 $T_s < T_g$ の領域では、ケースによるばらつきが大きい、これは入力地震波の周期特性によるものと考えられる。

3. 耐震設計法への応用

以上から、地盤震動による影響と慣性力の影響が同時に最大となるとは限らず、上部構造物の固有周期 (T_s) と地盤の固有周期 (T_g) との関係により構造物と地盤震動との間に位相差が生じること、上部構造物の応答加速度が変化することが確認された。

地震時の杭応力は、慣性力によるモーメントと地盤変位によるモーメントによって、次式のように表わせる。これより、基礎に作用する地震時の断面力は、慣性力によって生じる断面力と地盤変位によって基礎に生じる断面力をたし合わせて求められる。

$$M = \gamma Mg_{max} + \beta Ma_{max} \quad (1)$$

Mg_{max} は、地盤変位による杭モーメントの最大

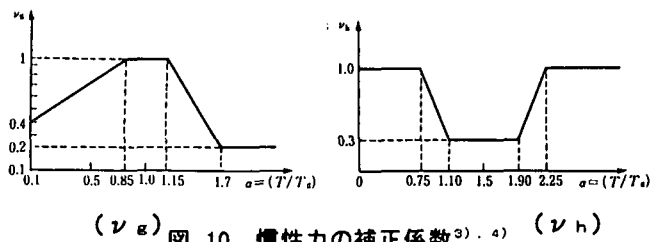


図-10 慣性力の補正係数^{3), 4)} (ν_a) (ν_h)

値で、地震時の地盤の相対変位を地盤ばねを介して杭に作用させることにより求められる。

Ma_{max} は、慣性力による杭モーメントの最大値で、上部構造物からの水平震度をもとに杭頭への荷重を加えることにより求める。

γ , β は慣性力と地盤振動との動的相互作用により決定される比率である。応答変位法は、地盤振動による影響に着目しているため、 $\gamma=1.0$ の場合に相当する。このときに組み合わせる慣性力によるモーメントは必ずしも最大値をとる必要はないから、 $\beta=1.0$ ではなく、構造物の固有周期 (T_s) と地盤の固有周期 (T_g) との関係： $\alpha (=T_s/T_g)$ によって変化するものである。

このときの Ma を算出するための慣性力 (設計水平震度) を、これまでの検討結果から、①構造物および地盤の応答特性から定まる係数 (ν_a) と②慣性力と地盤変位との位相差を考慮した係数 (ν_h) により補正することとした。 ν_a , ν_h は、それぞれ図-8, -9をもとに図-10のように設定した^{3), 4)}。

一方、 $\beta=1.0$ の場合は、慣性力による影響が主体となる場合で、これは震度法に相当する。したがって、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する照査と、地盤震動による影響に対する照査の2段階設計となる⁴⁾。

4. 今後の課題

今回の検討では、線形解析とし地盤の物性値は地盤のひずみレベルを考慮したものを用いたが、より精度の高い設計法とするには、地盤の非線形の影響および大地震時でのひずみレベルを考慮にいれた現象の把握が必要であり、現在、新しい耐震基準の制定に伴い、検討を進めている。

参考文献

- 1) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 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, 第24回地震工学研究発表会, 1997
- 2) 竹宮宏和, 片山吉史: フレキシビリティ法による群杭基礎の動的解析と設計への提案, 土木学会論文集, No. 489/I-27, pp207-215, 1994
- 3) (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, 1996
- 4) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物, 1997. 3