

軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用

Seismic Response of Pile Foundation In Soft Ground And Its Application to Seismic Design

室野剛隆*・西村昭彦**・永妻真治***

Yoshitaka MURONO, Akihiko NISHIMURA, and Shinji NAGATSUMA

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

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

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

Characteristics of pile forces induced by earthquake are discussed from view point of the inertial interaction due to the mass effect of a superstructure and kinematic interaction due to the soil deformation. From the numerical study of soil-pile-structure system, it is indicated that not only the inertial effect but also kinematic interaction effect should be considered to evaluate the seismic forces of pile foundation. These two effects have phase delay, which is varied with the combination of natural periods of structure and soil deposit. The practical method to evaluate the pile forces in the seismic design procedure is proposed based on these results.

Key Words : pile foundation, inertial interaction effect, kinematic interaction effect, seismic design

1. はじめに

地震時に杭基礎などの深い基礎は、地盤内を伝播する地震動を上部構造物に伝える (Kinematic な相互作用) とともに、上部構造物が振動することによって生じる慣性力を地盤に伝える (Inertial な相互作用)¹⁾。杭基礎構造物の地震時挙動はこのような地盤-基礎-構造物系の動的な相互作用の影響に大きく支配される。その結果、杭基礎のように深い基礎構造物の地震時応力は、上部構造物からの慣性力以外に、地盤変位による影響を受けると言われている。既に、岡本ら²⁾は弾性床土上の梁理論に基づいた解析により、杭頭と地中部とでは杭応力に影響を与える支配要因が違うことを指摘している。その後の解析、実験および観測成果^{3)~5)}からも、軟弱地盤においては、地震時に表層地盤が大きく変形し、杭基礎構造物の地震応答は地盤変位の影響を大きく受けることが指摘されている。特に、地盤剛性が急変する地層境界でも大きな応力が生じることも指摘されている。

また、地盤と基礎との動的相互作用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)との兼ね合いが重要な要因となることが指摘されている。田蔵⁶⁾らは T_g と T_s の関係をパラメータとした地盤-基礎-構造物系の動的解析を実施し、動的相互作用の影響による連成系の固有周期の伸びおよび応答倍率の変化を検討した。また、竹宮ら⁷⁾は、 T_g と T_s の関係によって杭

体に発生する水平変位や曲げモーメントの傾向が異なることがあることを指摘している。

このように、深い基礎では上部構造物の慣性力と地盤変位の両者の影響を受けるとともに、そのメカニズムは T_g と T_s の関係で大きく変化し^{8,9)}、その性状は複雑である。地盤-基礎-構造物系の応答性状を的確に把握し、表層地盤の影響を適切に評価することが基礎構造物の耐震安全性を高める上で重要である。

地盤変位による影響を考慮して静的な解析から杭応力を求める方法として、応答変位法が適用されることが多い^{8,9)}。応答変位法とは地盤変位を地盤ばねを介して構造物に作用させるもので、図-1 に概念図を示す。鉄道においては十勝沖地震の高架橋の被害を契機

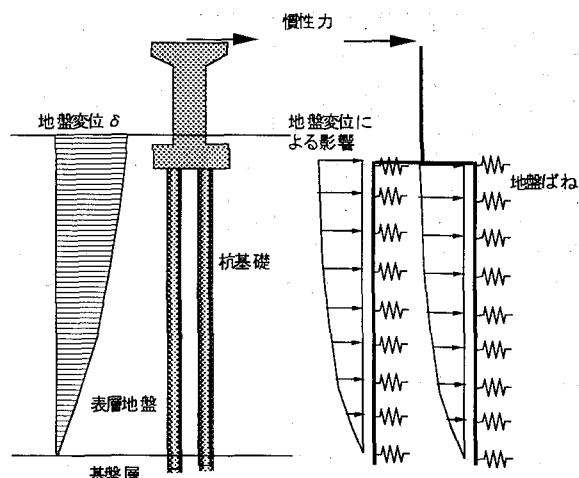


図-1 応答変位法の概念図

に、応答変位法によって地盤変位の影響を設計に取り入れている¹⁰⁾。ただし、このときの設計では、想定する地震力が設計水平震度にして0.2レベルということもあり、地盤変位と慣性力の設計用値（つまり想定する最大値）を単純に足し合わせていた。これは両者の影響に位相差が生じないことを前提としたものと言える。しかし、基礎の設計法が限界状態設計法に移行する¹¹⁾に伴い、考慮する地震力も大きくなり、これまでのような考え方では不経済な設計になる。また、地盤-基礎-構造物系の応答特性は T_g と T_s との関係に大きく依存するという特性に鑑みると、従来の地盤変位と慣性力の組み合わせ方法には検討の余地があると考えられる。

そこで、本研究では、 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な相互作用の関わり合いを定性的に評価するとともに、その影響を基礎構造物の耐震設計法に合理的に取り入れる方法について提案を試みた。なお、著者らはこれまでも実験的な検討も行っており、これについては文献12)を参照されたい。

2. 検討方法

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、地盤-基礎-構造物系モデルを構築した。まず、このモデルに正弦波を入力することで、地盤変位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する。次に、鉄道構造物の耐震設計用の標準波を入力して、その定量的な評価を試みることにした。解析ケースの一覧を表-1に示す。以下にその詳細を述べる。

表-1 解析ケース一覧表

ケース番号	地盤条件	構造物条件	入力波
Case1	TypeGA	TypeSA	G0A波
Case2	TypeGA	TypeSA	G0C波
Case3	TypeGA	TypeSA	1G波
Case4	TypeGA	TypeSB	G0C波
Case5	TypeGA	TypeSC	G0C波
Case6	TypeGA	TypeSD	G0C波
Case7	TypeGA	TypeSA	八戸波
Case8	TypeGB	TypeSA	G0C波
Case9	TypeGC	TypeSA	G0C波

(1) 解析モデル

本論文では解析パラメータが多いこと、および地盤変位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おり、図-2のような比較的簡単なモデルを用いた。地盤は剛基盤上の成層地盤としてモデル化し、表層地盤は多層に分割する。構造物は1自由度系とし、杭については単杭とした。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されているとした。

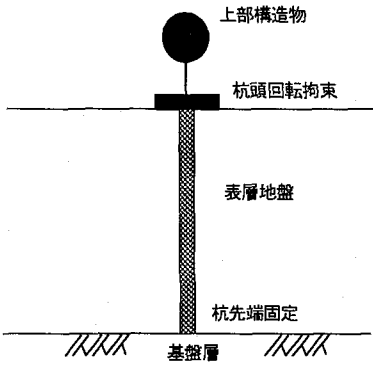


図-2 解析モデルの概念図

(2) 検討ケース

軟弱地盤中に建設された鉄道橋脚、RC 場所打ち杭型式を想定した。地盤は、1層地盤 (TypeGA, TypeGB) と多層地盤 (TypeGC) の2タイプとした。1層地盤については、地盤の初期せん断弾性波速度を $V_{s0}=160$ (TypeGA), 80 (m/s)(TypeGB)とした2ケースを考えた。多層地盤については実際に存在する地盤をモデル化したものである。ただし、地盤が非線形化することを考慮して、初期せん断弾性波速度 V_{s0} を0.5倍($V_s=0.5V_{s0}$)するとともに、地盤の減衰定数 h を $h=0.20$ としたものを解析に用いた。以上、地盤の諸元を表-2に示す。

構造物については4タイプを考えた。TypeSAを基本モデルとし、重量 W の影響を見るために $W=2.0$ 倍したもの (TypeSB) や、杭部材の非線形化を考慮して $EI=0.5$ 倍したケース (TypeSC) も検討した。さらに減衰定数の影響を見るために、上部工の減衰定数 h_s を半分にしたケース (TypeSD) も検討している。各タイプとも固有周期 T_s を $0.3\sim2.5$ (sec)の範囲で変化させた。なお、本論文での構造物の固有周期 T_s とは、橋脚下端固定時の値である。以上の杭-構造物系の諸元を表-3に示す。

(3) 解析方法

解析では、地盤は薄層要素法からリング加振解によるグリーン関数を、杭体は集中加振下のはり要素の伝達マトリックス計算からグリーン関数を評価した。相互作用解析では、相互作用力を未知量として変形適合条件に基づいて支配方程式を解くフレキシビリティ

表-2 解析で用いた地盤モデルの諸元

深さ (m)	TypeA 地盤				TypeB 地盤				TypeC 地盤			
	V_s (m/s)	γ (tf/m ³)	h	ν	V_s (m/s)	γ (tf/m ³)	h	ν	V_s (m/s)	γ (tf/m ³)	h	ν
0												
5									63.0 (126.0)	1.6	0.20	0.40
10	80.0 (160.0)	1.5	0.20	0.49	40.0 (80.0)	1.5	0.20	0.49	104.8 (209.6)	1.8	0.20	0.30
15									132.1 (264.2)	1.8	0.20	0.30
20									72.1 (144.2)	1.6	0.20	0.40
25									76.5 (153.0)	1.8	0.20	0.30
	/// 基礎層				/// 基礎層				124.3 (248.6)	1.8	0.20	0.30
									83.2 (166.4)	1.8	0.20	0.30
									/// 基礎層			

()内は初期 V_{s0}

表-3 解析で用いた構造物モデルの諸元

		TypeSA	TypeSB	TypeSC	TypeSD
上部構造物	上部工重量	$W_u(tf)$	196.85	393.7	196.85
	下部工重量	$W_p(tf)$	80.58	161.16	80.58
	減衰定数	hs	0.10	0.10	0.05
	固有周期	$T_s(sec)$	0.3~2.5	0.3~2.5	0.3~2.5
杭	杭径	$D(m)$	120	120	120
	弾性係数	$E(tf/m^2)$	2.5×10^6	2.5×10^6	1.25×10^6
	単位体積重量	$\gamma_p(tf/m^3)$	2.5	2.5	2.5
	減衰定数	hp	0.05	0.05	0.05

法を適用している⁷⁾。なお、本研究では地盤-基礎-構造物系を「全体系」、地盤変位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。

(4) 入力波

入力波としては、現在の鉄道の耐震設計^{11), 13)}で用いている基礎入力用の設計標準波とした。これは設計速度応答スペクトル($h=20\%$)に適合するように振幅調整させた波形である。2つのレベルを考えており、1つはマグニチュード $M=8$ 、震央距離 $\Delta=40(km)$ 相当の地震(1G 波)、もう1つは兵庫県南部地震相当のもの(G0A, G0C 波)である。解析に用いた波形とその周期特性を図-3 に示す。さらに長周期成分の卓越する波として八戸波(十勝沖地震(1986)で八戸港で観測された NS 成分)についても検討した。

3. 地盤-基礎-構造物系の動的応答特性

(1) 伝達関数

竹宮ら⁷⁾は地盤と構造物の周波数応答特性を、それぞれの固有周期の関係において評価できることを示し

ている。本検討でも、地盤-基礎-構造物系の動的応答特性を把握するために、基礎変位 u_g に対する地表面、フーチング、上部構造物の変位の伝達関数を図-4 に示し、周波数応答特性について検討する。図-4 は Case2 について示したものであるが、他のケースも定性的に同様の傾向であった。なお、図中(a)は $T_s < T_g$ の場合、図(b)は $T_s = T_g$ の場合、図(c)は $T_s > T_g$ の場合である。

a) $T_g > T_s$ の場合

上部構造物の伝達関数は、明確な2つのピークを持つ。1つは地盤の固有周期(T_g)付近である。もう1つは構造物の固有周期(T_s)付近であるが、下端固定時の固有周期よりも若干長周期になっているのは地盤・基礎系の動的相互作用の影響が現れたためである⁹⁾。前者のピークは地盤変位が主体となるモードが励起されたもので、後者のピークは構造物が主体となるモードが励起されたものである。フーチングの伝達関数においても同様の傾向を示し、杭は地盤変位と慣性力の両方の影響を受けることが分かる。これは軟弱地盤中などの杭基礎構造物の耐震設計では通常の慣性力を主体とした設計(震度法)と地盤変位を主体とした設計(応答変位法)の両者が必要であることを示唆するもの

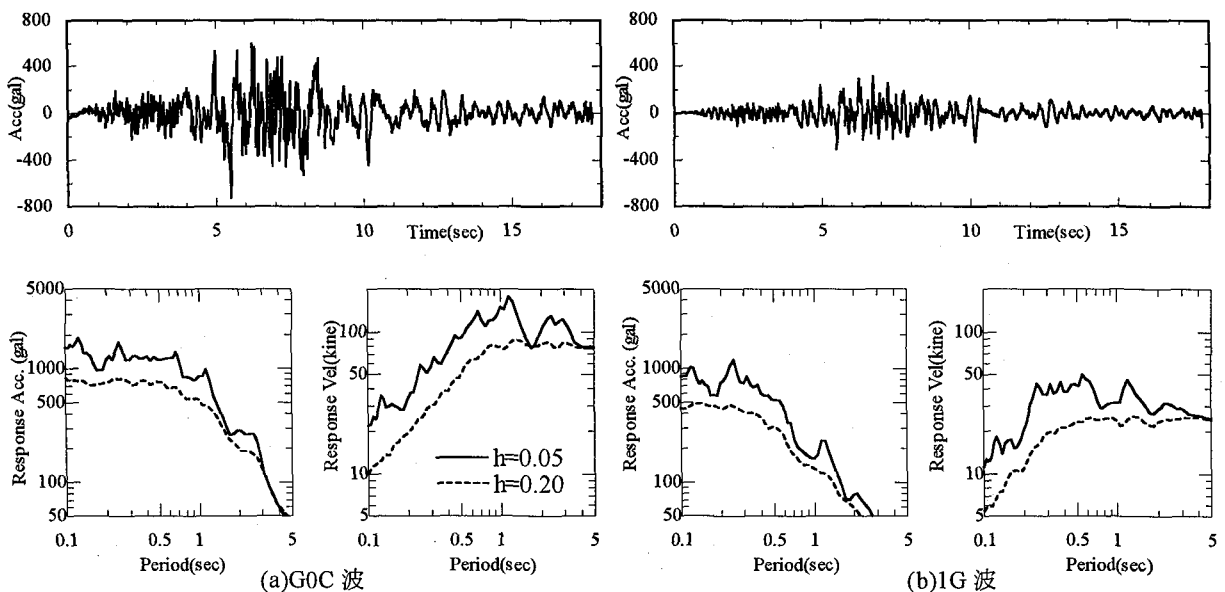


図-3 解析に用いた地震波の時刻歴および絶対加速度応答スペクトル，速度応答スペクトル

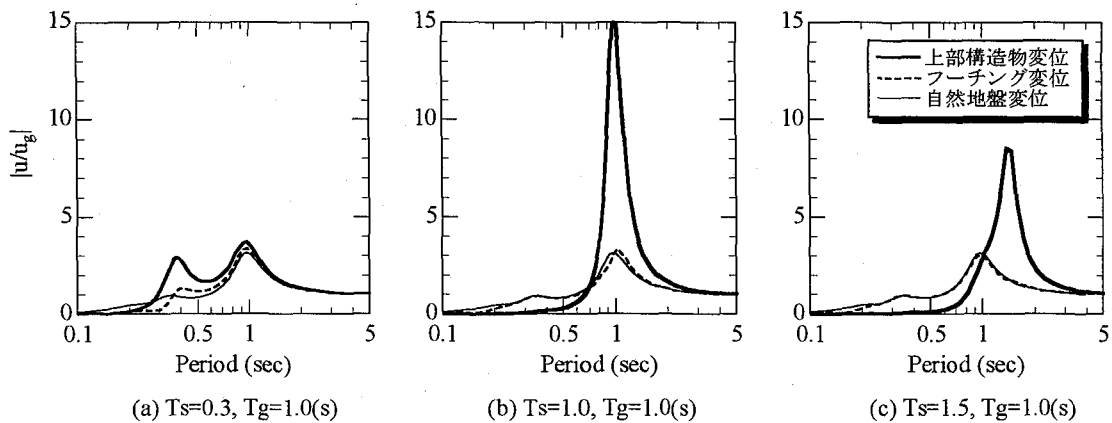


図-4 伝達関数の比較

である。

b) $T_g = T_s$ の場合

上部構造物が地盤と共振を起こし，伝達関数のピークは1つになるとともに，上部構造物の応答は著しく増大する。フーチングの変位は自然地盤とほぼ同じであり，杭が地盤変位に追従していることが分かる。

c) $T_g < T_s$ の場合

上部構造物の変位は， T_g 付近にわずかながらピークが見られるが，もっぱら T_s 付近のピークのみが顕著となる。構造物自身の振動が卓越するようになっている。フーチングの変位は b) と同様の傾向を示している。

(2) 時刻歴応答波形

a) 正弦波入力

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ときの上部構造物の加速度と地表面の加速度の

応答波形および杭頭に作用するモーメントの応答波形の1例をそれぞれ図-5，図-6に示す。これは Case2 の条件の場合である。

図(a) $T_g > T_s$ の場合，地盤と構造物が同位相で振動しており，地盤変位によるモーメントと慣性力によるモーメントの応答波形が同位相となっている。

図(b) $T_g = T_s$ の場合では，地盤と構造物が共振し，上部構造物の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，地盤変位と慣性力の影響は約 90 度近くの位相のずれを伴って杭に作用する。

図(c) $T_g < T_s$ の場合では，地盤変位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ことが分かる。

b) 地震波入力

地震波を入力して応答解析を行った結果(Case2)の1例を図-7，8に示す。図(a) $T_g > T_s$ の場合では，地盤

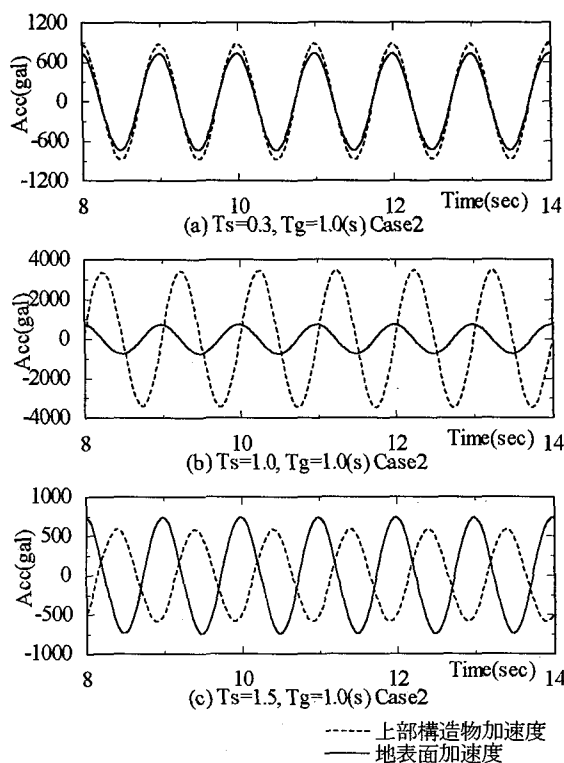


図-5 上部構造物と地表面の時刻歴応答加速度波形
(正弦波入力, Case2)

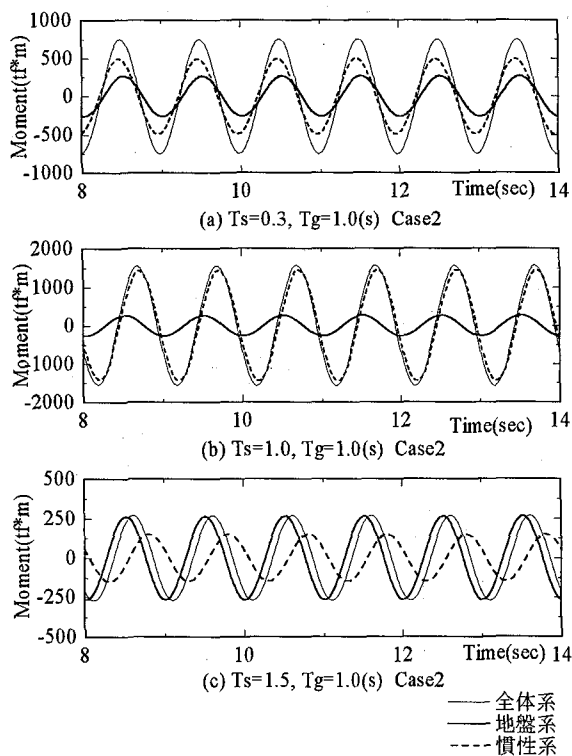


図-6 杭頭モーメントの時刻歴応答波形
(正弦波入力, Case2)

系と慣性系の応答波形に位相のずれはなく、地盤変位と慣性力によるモーメントが概ね同位相で杭に発生している。その結果、杭頭モーメントの最大値 $M_{t_{max}}$ は

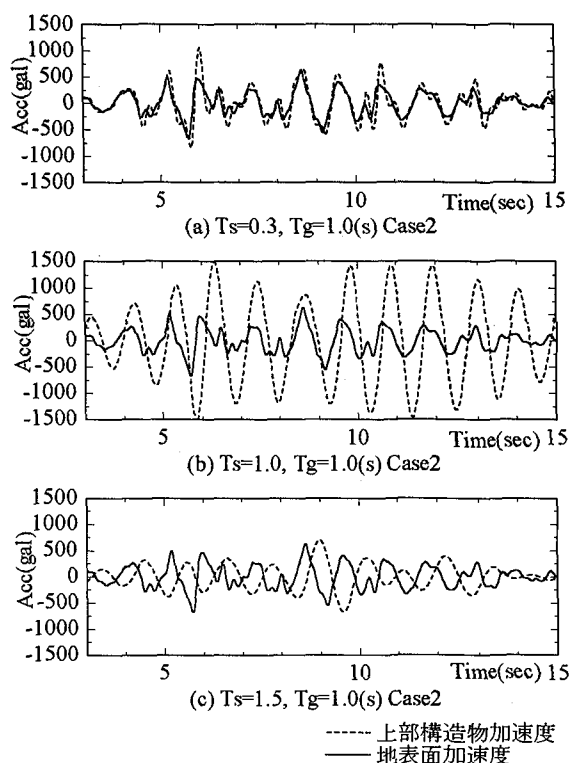


図-7 上部構造物と地表面の時刻歴応答加速度波形
(地震波 G0C 入力, Case2)

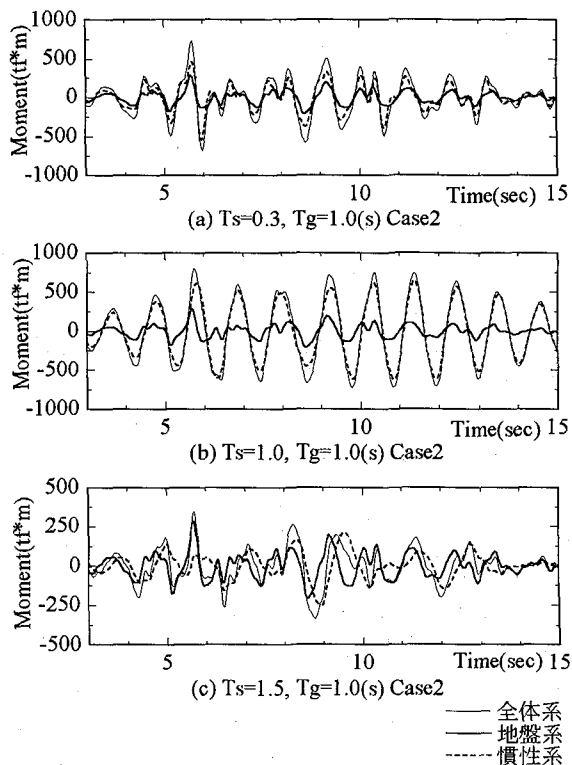


図-8 杭頭モーメントの時刻歴応答波形
(地震波 G0C 入力, Case2)

地盤変位によるモーメントの最大値 Mg_{max} と慣性力によるモーメントの最大値 Ma_{max} の和となっていることが分かる (以後、 M は杭体の曲げモーメントを表し、

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す)。図(b) $T_g=T_s$ では、やはり地盤と構造物が共振し、慣性力の影響が大きく生じている。但し、地盤変位と慣性力の影響に位相差があり、 $M_{t_{max}}$ は $M_{a_{max}}$ と $M_{g_{max}}$ の最大値の単純和よりもかなり小さくなっている。図(c) $T_g<T_s$ の場合では、地盤と構造物の位相にずれが生じており、逆位相に近い関係になっている。以上の傾向は、正弦波を用いた解析結果と定性的には同じである。

(3) 最大モーメント分布

杭に生じている最大モーメントの鉛直方向分布を Case2 および Case9 についてそれぞれ図-9, 10 に示す。いずれのケースを見ても M_a は杭頭で最大で、深さ方向とともに急激に減少するのに対して、 M_g は地盤中でも大きな値を示す。特に多層地盤では軟弱層と硬質層の地層境界部(-10m 付近)において杭頭モーメントと同等の大きなモーメントが発生している。その結果、 T_s と T_g の関係によらず、約 $1/\beta$ (m) 以深の地中部 (β は杭の特性値で今回の解析条件では $1/\beta=3.5$ m 程度) では杭に与える要因としては地盤変位による影響が支配的で、 $M_t \approx M_g$ となっている。しかし、 $1/\beta$ 以浅の杭頭付近では T_s と T_g の大小関係で傾向が異なっている。(a) $T_s<T_g$ の場合では、杭頭付近は慣性力と地盤変位の2つの影響とも卓越しており、 M_a と M_g の両者とも考慮しないと M_t を説明できないことがこの図から分かる。(b) $T_s=T_g$ では、応答波形からも分かるように、構造物の応答加速度が大きく、 M_a が M_t の8割以上に達しており、慣性力の影響が支配的である。逆に、(c) $T_s>T_g$ では構造物の応答加速度が抑えられるとともに、地盤変位による影響と慣性力による影響に位相差を伴うので、 $M_t \approx M_g$ となっている。

なお、解析で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。

(4) T_s/T_g と構造物加速度との関係

図-11 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全ケースについてプロットした。横軸は地盤と構造物の固有周期の比 $\alpha (=T_s/T_g)$ を、縦軸は各最大応答加速度をそのケースの中の最大値で正規化した値をとっている。入力地震波の周期特性の影響により、ケースによって多少ばらついてはいるが、 $T_s=T_g$ 付近では地盤と構造物が共振し大きな加速度を生じ、 T_s が T_g よりも離れるに従って構造物の応答加速度は小さく抑えられる傾向にある。特に $T_s>T_g$ の領域で顕著である。

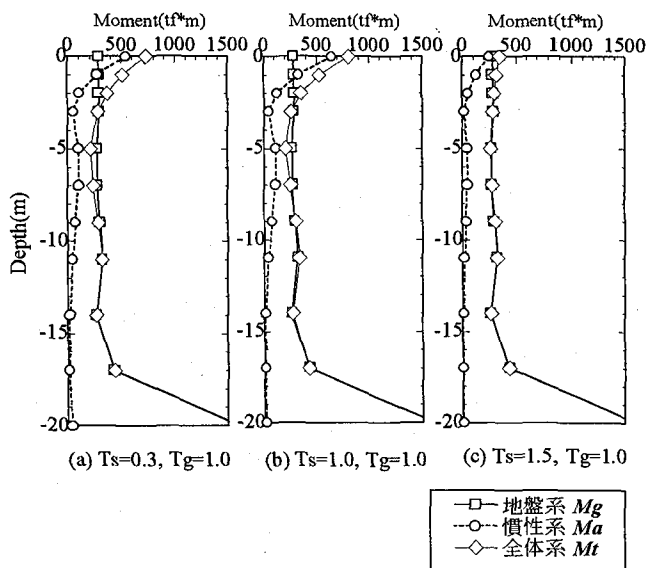


図-9 最大モーメントの鉛直方向分布
(1層地盤 Case2)

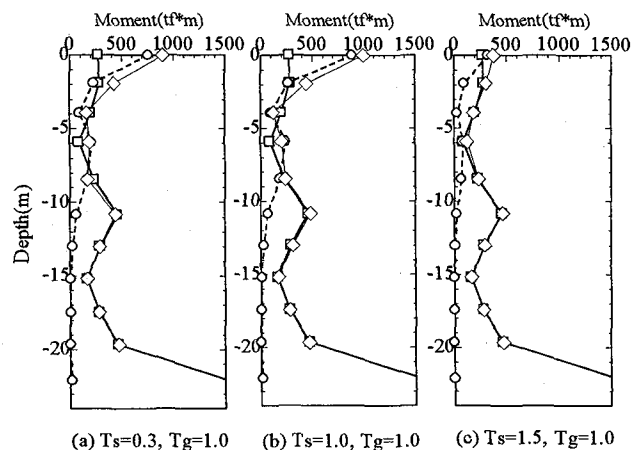


図-10 最大モーメントの鉛直方向分布
(多層地盤 Case9)

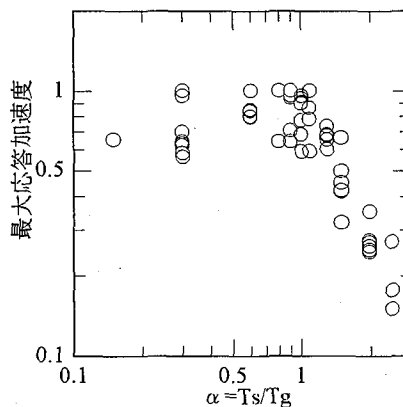


図-11 T_s/T_g と構造物の最大応答加速度の関係

4. 地盤変位と慣性力が杭応力に与える影響に関する考察

これまでの解析結果から、軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性として、

- 1) 杭は慣性力と地盤変位の影響を受けること
- 2) 慣性力と地盤変位の間には明らかに位相差を伴って杭基礎に作用すること

などが分かった。ここでは 2) の事柄についてさらに検討を加える。

(1) 地盤変位と慣性力の関係

同一時刻における n 組の地表面の応答変位 $\delta(t)$ と構造物の応答加速度 $a(t)$ について検討する。いま、地表面変位を $\delta(t)$ 、構造物加速度を $a(t)$ とし、それぞれをその最大値 δ_{max} 、 a_{max} で正規化する。

$$\delta(t) = \delta(t) / \delta_{max} \quad (1)$$

$$a(t) = a(t) / a_{max} \quad (2)$$

Case2 について、 $\delta(t)$ 、 $a(t)$ の関係を図に示したのが図-12、13 である。図-12 は正弦波を入力した場合、図-13 は地震波 G0C を入力した場合である。なお、正弦波を入力した場合の結果では定常状態での 10 秒間のデータのみを示している。また、図中の▽および▼

印は、それぞれ、 $|\delta(t) / \delta_{max}| = 1$ 、 $|a(t) / a_{max}| = 1$ となる点を示している。

正弦波を入力した場合には、 $T_s < T_g$ ではデータは傾き -1 を軸とする幅の狭い楕円を描いている。このことは地盤変位と上部構造物が同位相で振動し、しかもお互いの波形が相似であり、構造物の挙動が地盤に大きく影響を受けていることと対応している。 T_s と T_g が近くなるに従って、幅の大きな楕円を描くようになり、 $T_s = T_g$ となった時点でほぼ円形を描いている。両者の位相が約 90 度ずれていることがこの図からも分かる。さらに T_s が大きくなり、 $T_s > T_g$ になるとデータは傾き 1 の直線を軸とした楕円を描くことになり、両者が逆位相で振動していることを表している。その結果、 $T_s < T_g$ では▽と▼の位置が一致しており、慣性力と地盤変位による影響が最大値同士で作用していることが分かる。 T_s が長くなると徐々に▽と▼の位置がずれはじめ、 $T_s = T_g$ では地盤変位と慣性力の影響は一方が最大の時、他方は 0 となることを示し、さらに $T_s > T_g$ となると再び▽と▼が逆方向で一致する傾向にある。両者の影響が逆方向に作用することが分かる。

地震波を入力した場合については、軌跡はかなり煩雑になるが、全体的な傾向としては図-12 と同様である。

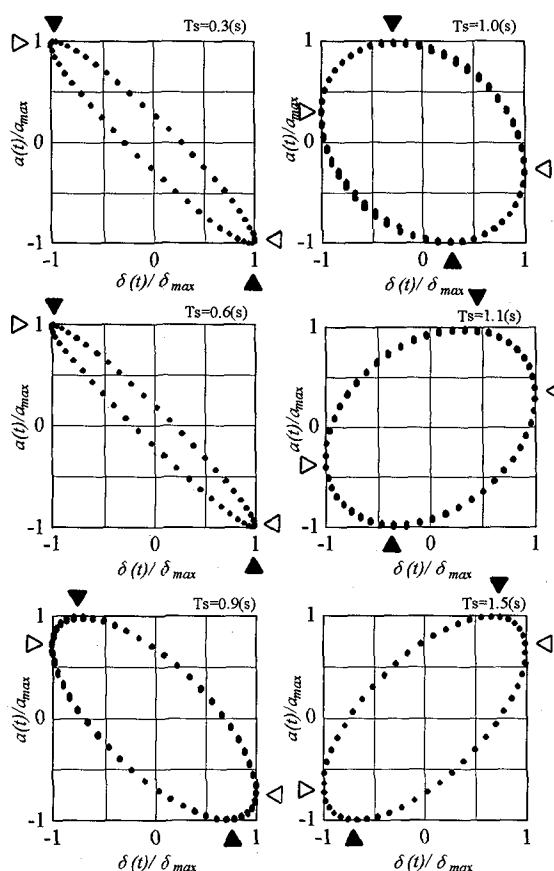


図-12 地盤変位と上部構造物加速度の関係
(Case2 正弦波入力)

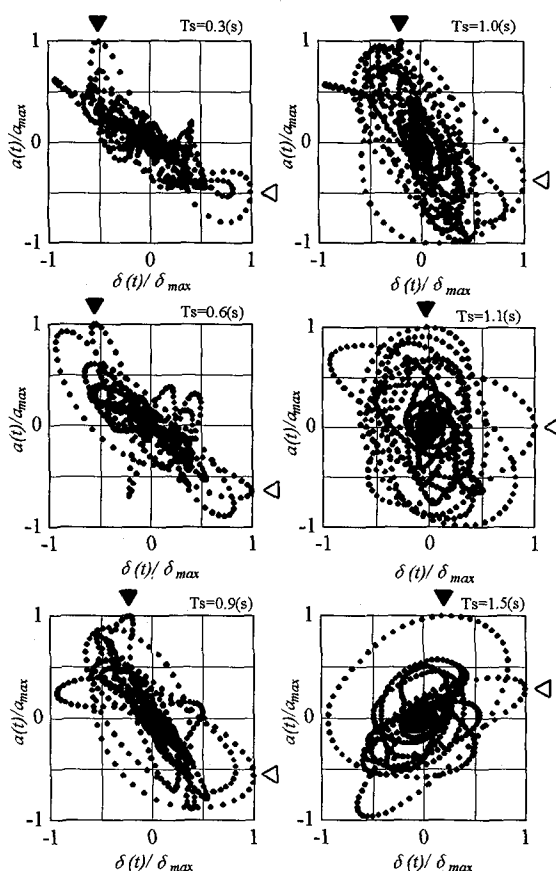


図-13 地盤変位と上部構造物加速度の関係
(Case2 G0C 入力)

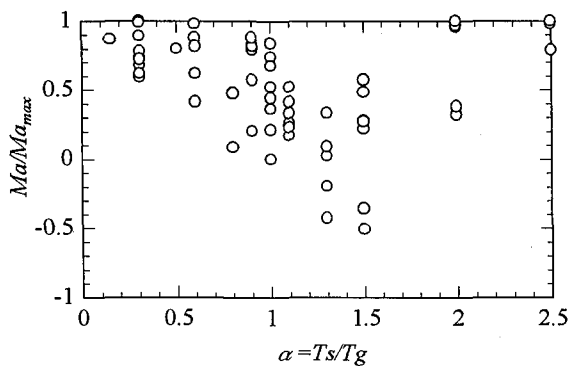


図-14 $\delta(t)/\delta_{max}=1$ の時の Ma/Ma_{max} の値

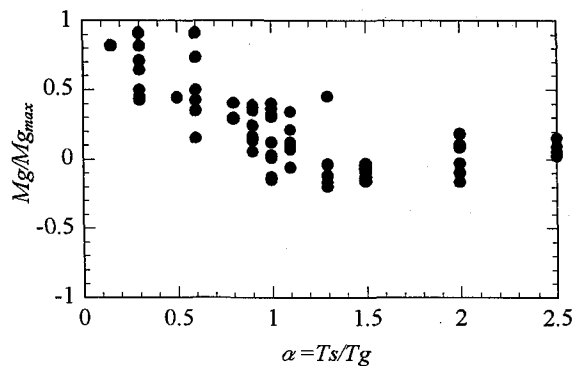


図-15 $a(t)/a_{max}=1$ の時の Mg/Mg_{max} の値

(2) 地盤変位と慣性力の組合せ

図-12,13 からわかるように 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、同時に最大とならないことが分かる。そこで、その傾向を杭モーメントで評価するために、地盤変位が最大となる時刻における慣性力による杭頭モーメント Ma/Ma_{max} の値および構造物加速度が最大となる時刻における地盤変位による杭頭モーメント Mg/Mg_{max} の値を全解析ケースについて図にまとめたのが図-14, 15 である。横軸は固有周期比 $\alpha (=T_s/T_g)$ としている。

図-14 より、 $\alpha < 1$ の範囲ではこれまでの検討からも分かるように構造物が地盤変位に追従するかたちで振動するため、 Ma/Ma_{max} は 1.0 に近い値を示す。 α が大きくなるにつれて Ma/Ma_{max} は徐々に減少し、 α が 1.3~1.5 付近でこの値は最小となる。つまり、 α が 1 より小さいと、地盤変位と慣性力は最大値同士で組み合わせ、 α が 1 よりも大きい範囲では地盤変位に組み合わせる慣性力は小さくてもよいことになる。一方、図-15 でも同様に α とともに Mg/Mg_{max} は徐々に小さくなる傾向がある。

5. 耐震設計法の提案

ここでは耐震設計において地盤変位と慣性力の両者の影響を考慮する場合に、その組合せ方法についてこれまでの検討結果を踏まえて提案する。

(1) 地盤変位と慣性力の組合せ法の提案

これまでの解析からも分かるように地震時の杭応力は慣性力による影響と地盤変位による影響の和として考えられる。耐震設計において考慮する荷重としては概念的には次式のように考えることができる。

$$R_t = \beta \times R_a + \gamma \times R_g \quad (3)$$

ここに、 R_t は地震時の杭応力、 R_a は慣性力による影響、 R_g は地盤変位による影響、 β 、 γ は組合せの比率である。この (β, γ) の組合せをいくつにするかが耐震

設計上重要なファクターになる。本来、 (β, γ) の組合せは多数あると思われるが、ここでは設計の便を考え、以下の組合せの 2 段階設計を考えた。

(i) 慣性力を中心とした設計

$$R_t = 1.0 \times R_a + \gamma \times R_g \quad (4)$$

(ii) 地盤変位を中心とした設計

$$R_t = \beta \times R_a + 1.0 \times R_g \quad (5)$$

(i) は従来からの震度法に相当するものである。ただし従来の震度法は $\gamma=0$ として地盤変位の影響を無視している。本来は、 γ も適切に評価するべきである。(ii) はいわゆる応答変位法による耐震設計法であり、 β についても適切に評価する必要がある。そこで、これら β 、 γ について今回の解析的研究の成果に基づいて決定することとした。

これまでの検討結果から、(i) $\beta=1$ に組み合わせる γ は図-15 から、(ii) $\gamma=1$ に組み合わせる β は図-14 からそれぞれ決定することができる。その結果を図-16 に示す。 $\alpha=0.75 \sim 1.10$ および $\alpha=1.90 \sim 2.25$ の区間では、図-14,15 のデータの平均値的な値となるように設定し、設計上の配慮から下限値を 0.3 としている。図-14 と図-15 では若干値が異なっているが、理想的には一致するものであると考え、 β と γ は同一の値とした。

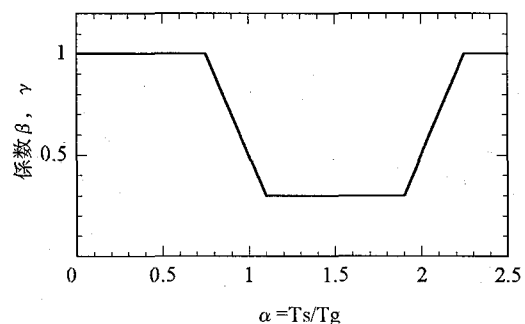


図-16 組合せ係数 β 、 γ の設定値

(2) 提案法の妥当性の検討

(1) で示した方法の検証のために、Case2 について上

記の方法で杭モーメントを算定した結果と、動的解析の結果を比較したのが図-17である。但し、式(4)(5)の Ra , Rg としてそれぞれ動的解析から得られた Ma_{max} , Mg_{max} を用いた。実際の設計を考えた場合には、 Ma_{max} , Mg_{max} はそれぞれ静的解析によって求める。しかし、ここではそれぞれの影響の割合を定式化することを目的としていることから、このようにした。図では杭頭と地中部-9mについて示した。○が式(4)の結果、●が式(5)の結果である。

杭頭部では、 α が 1 よりも小さい範囲では $\beta = \gamma = 1$ であるから、●と○が一致しており、動的解析の結果ともよく一致している。 α が 1 付近では●は過小評価し、○の方が動的解析の結果をうまく説明している。これは $\alpha = 1$ 付近は構造物が共振して慣性力による影響が地盤変位による影響に比べて卓越してくるので、慣性力を主体とした荷重の組み合わせの方が良いことを示している。 $\alpha > 1.5$ の範囲に入ると逆に、○は過小評価となり、●の方が動的解析の結果をうまく説明している。これは図-11 で示したように、慣性力による影響が小さくなり、地盤変位による影響が相対的に大きくなっていくためであると考えられる。

地中部(-9m)では、全般にわたって●の方が動的解析の結果をうまく説明している。これは、図-9, 10 でも分かるように、地中部では地盤変位による影響の方が支配的になるために、式(5)で地震時杭応力を評価した方が適合すると考えられる。

以上のことから、杭の耐震性能を照査する場合には、慣性力を主体とした設計(式(4))と地盤変位を主体とした設計(式(5))の2段階設計を行うことで、杭全体の部材安全性を確保できることが分かる。

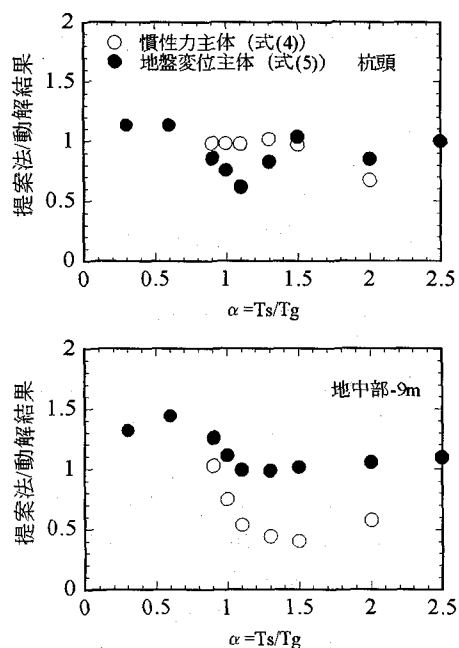


図-17 提案法と動的解析結果の比較

(3) 上部構造物の非線形性の影響

地震力として L2 レベルを考える場合、構造物の非線形性を考慮せざるを得ない。これまで展開してきた議論は、モデルの物性値は非線形化の影響を考慮して等価線形的な値 (Ts は降伏周期, Tg はひずみレベルを概ね 10^{-3} 程度を想定し、初期周期を 2 倍した値) を用いているものの、線形計算に基づいたものである。

一般的な鉄道構造物では、線路方向を考えた場合には、基礎よりも橋脚の部材耐力の方が低い場合が多く、主たる塑性化は橋脚で生じると考えられる。そこで、本論文では上部構造物(橋脚)が非線形化した場合の本提案手法の適用性について検討した。

非線形性を考慮するために、薄層要素法を用いた解析ではなく、杭と地盤を集中質量と地盤ばねに置換した多質点離散化モデル(図-18)を用いた。入力については別途自然地盤の応答解析を行い、その応答波形を各地盤ばねを介して入力した。橋脚の曲げ降伏震度を 0.4 と仮定し、その非線形特性は Bi-linear model で与えた。杭部材および相互作用ばねについては線形とした。地盤ばね定数は鉄道の設計標準¹¹⁾に準じて算定した値を用いた。それ以外の解析条件は Case2 と同じである。

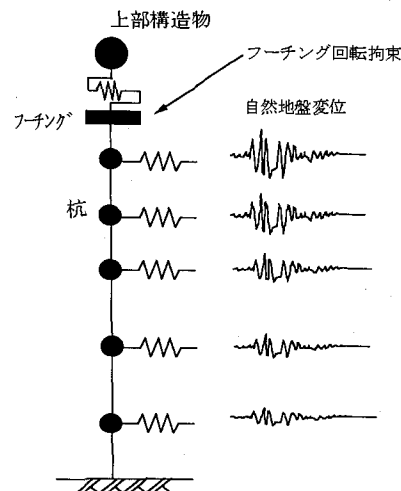
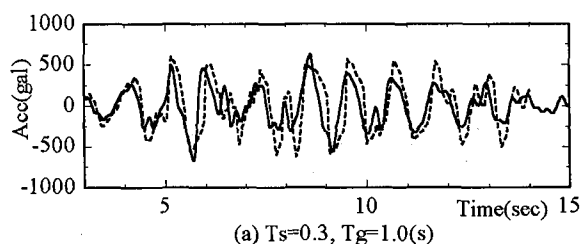


図-18 非線形計算に用いた解析モデル

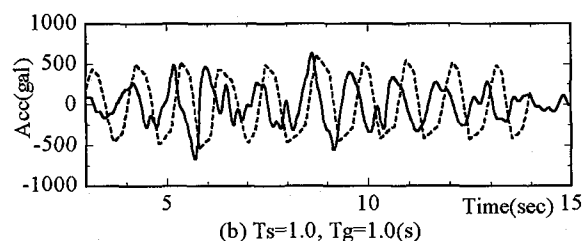
各ケースの上部構造物の応答塑性率(変位塑性率)を表-4 に、上部構造物の加速度と地表面の加速度の応答波形の比較を図-19 にそれぞれ示す。表-4 より、上部構造物の応答塑性率は 2~5 程度の領域に及んでいることが分かる。その結果、線形解析の結果(図-7)と比べると、上部構造物の応答加速度は大きく低減されており、500gal 程度で頭打ちになっている。基礎の設計では上部構造物の慣性力の影響としては橋脚く体の降伏耐力をその最大値として評価しても概ねよいことが分かる。しかし、このように橋脚が塑性化しているにもかかわらず、構造物と地盤の波形の関係は線形

表4 上部構造物の応答塑性率

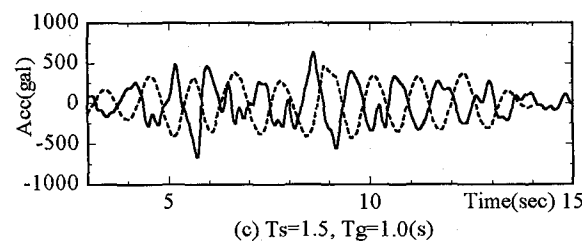
T _g (sec)	T _s (sec)	降伏震度	応答塑性率
1.0	0.3	0.4	5.22
	1.0		4.36
	1.5		1.87



(a) $T_s=0.3, T_g=1.0(s)$



(b) $T_s=1.0, T_g=1.0(s)$



(c) $T_s=1.5, T_g=1.0(s)$

----- 上部構造物加速度
—— 地表面加速度

図-19 橋脚が非線形化した場合の構造物と地表面の加速度応答波形の比較

解析 (図-7) の結果と比較しても、ほぼ同じ傾向であり、 $T_s < T_g$ では同位相、 $T_s > T_g$ では逆位相に近い振動をしている。これより、これまでの地盤変位と慣性力の組合せ係数 β 、 γ は構造物が非線形化した場合でも概ね適用できると考えられる。

6. おわりに

本検討では、軟弱地盤中の杭基礎構造物について、地盤と構造物の固有周期の組合せを変化させた地震応答解析を実施し、以下の点を明らかにした。

- (1) 軟弱地盤中の杭基礎では、慣性力の他に地盤変位による影響を受ける。特に、地層境界部では地盤変位によるモーメントは杭頭モーメントと同等の値になる場合がある。
- (2) T_s と T_g の大小関係によって、地盤-基礎-構造物系の地震応答特性は大きく変化する。特に、慣性力と地盤変位が杭に与える作用には位相差を伴い、 $T_s < T_g$ では同位相、 $T_s > T_g$ では逆位相に近い関係になる。
- (3) 慣性力と地盤変位の位相差の影響を考慮した耐震

設計法を提案した。これにより合理的な設計が可能となった。

(4) 橋脚が塑性化するような構造物でも、上記の傾向は概ね当てはまることが分かった。

今後は、より詳細な非線形地盤-基礎-構造物系の動的相互作用の影響を解析的、実験的に把握する必要がある。また、液状化地盤での耐震設計法など、応答変位法の適用範囲についても検討する必要がある。

謝辞：本検討で、薄層要素法を用いた解析を行うに当たり岡山大学・竹宮宏和教授にご指導を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法，技法堂出版，pp.111～117，1989
- 2) 岡本舜三，加藤勝行，伯野元彦：地中構造物に働く地震力に関する研究，土木学会論文集，第92号，pp.37-51，1963
- 3) 長谷川正幸，中井正一：杭の地震時応力とその評価法に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第432号，pp.105-118，1992.2
- 4) 水野二十一：建物-杭基礎-地盤系模型振動実験，土と基礎 Vol.28，pp.47-58，1980.5
- 5) 和泉正哲，栗田哲，林田敏弘，小駒勲：地震時における建築物を支持する杭の力の伝達機構に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第394号，pp.118～128，1988
- 6) 田蔵隆，清水勝美，佐藤忠信：杭基礎・地盤系の動的相互作用現象の実証的把握，第27回土質工学研究発表会講演集，pp.1033～1036，1992
- 7) 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，pp.207-215，1994
- 8) 高木政美，久野雅祥：東京湾臨海部に立地する高層建築物の基礎の応答特性（その2 応答変位法の建築構造物への適用），日本建築学会大会学術講演概要集 構造I，pp.601-602，1992
- 9) 西村昭彦：地盤変位を考慮した構造物の設計，基礎工，Vol.6，No.7，pp.48-56，1978
- 10) 耐震設計指針(案)解説，日本国有鉄道編，1983.8
- 11) 鉄道構造物等設計標準・同解説 -基礎構造物・抗土圧構造物-，丸善出版，1997.3
- 12) 室野剛隆，永妻真治，西村昭彦：地盤変位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講演論文集 pp.625-628，1997
- 13) (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

(1997年9月26日受付)