

橋脚－基礎－地盤系の非線形動的応答解析 －杭の損傷が橋脚の地震応答に与える影響について－

川中 徹人¹・高橋 祐治¹・砂坂 善雄²・高原 秀夫³

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

²正会員 工博 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

In this paper, in order to evaluate the dynamic behavior of bridge systems, we conduct the seismic response analysis for soil-structure system, whose structure consists of foundation, pier and superstructure. The dynamic behavior of bridge systems is studied from viewpoint of the interaction due to mass effect of a superstructure and kinematic interaction due to soil deformation. The effects of damage to piles on the dynamic behavior of bridge systems are discussed considering the combination of natural periods of bridge system and ground.

Key Words : bridge foundation, soil-structure system, numerical analysis, lumped masses model, Interaction, natural period

1. はじめに

杭基礎などの深い基礎は、地震時に地盤内を伝播する地震動を上部構造物に伝えるとともに、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。杭基礎構造物の地震時挙動はこのような構造物－基礎－地盤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、地盤震動による影響を受ける。兵庫県南部地震では上部構造物のみならず基礎も大きな被害を受けた。その被害を及ぼした要因を外力という観点から分類すると、「慣性力によって杭頭部に大きな応力が発生して杭が損傷する場合」と「地盤震動によって杭が強制的に変形させられ、杭中間部で杭が損傷する場合」が考えられる。

「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計¹⁾」においては、上部構造物の慣性力と地盤変位が基礎に与える影響は、表層地盤の固有周期と構造物の固有周期の大小関係で大きく異なることが示されている。そして慣性力と地盤変位の作用には位相差を伴い、必ずしも両者の影響が同時に最大とならないことから、地盤と構造物の固有周期の比に応じて両者の影響を考慮するよう規定されている。しかし、杭の損傷が橋脚の地震応答に与える影響や破壊過程は、まだ十分には解明されていない。

2. 研究目的

本研究の目的は、構造全体系としての地震時の挙動を解析に解明し、橋梁設計の合理化、経済性の向上、さらには既設橋梁の最適な補強方法の開発に資する基礎資料を得ることである。

本報告では、地盤の固有周期と構造物の固有周期に注目した構造物－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施し、杭の損傷が橋脚の地震応答に与える影響について検討する。

3. 検討条件

(1) 対象構造物および地盤

本報告では、図-1に示すような橋脚－基礎および地盤を対象とする^{2), 3), 4)}。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^{5) 6)}。本報告では、橋脚の断面形状を相似形で変化させて構造物の固有周期を $T_s < T_g$, $T_s = T_g$, $T_s > T_g$ に設定する。本報告での構造物の固有周期 T_s とは、橋脚－基礎－地盤全体系の弾性域での値である。なお、図-1の橋脚は、 $T_s = 0.75s$ のケースである。

(2) 杭の非線形特性

杭には常時軸力作用下でのトリリニアな $M-\phi$ 関係を設定し、履歴特性は武藤モデルを用いた。本報告では、杭の損傷による構造物－基礎－地盤系の応答特性に注目しているため、橋脚は線形とした。図-2に杭の $M-\phi$ 関係を示す。

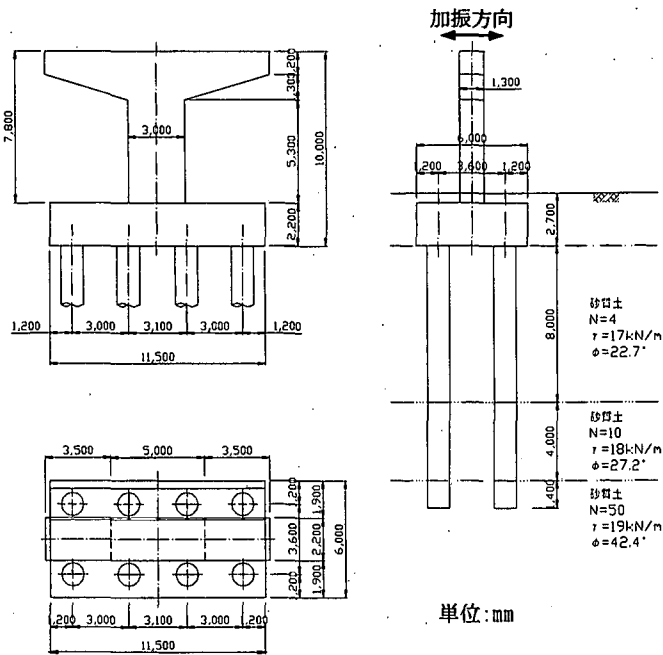


図-1 対象構造物および地盤

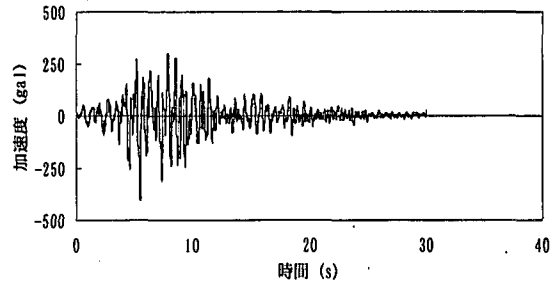


図-3 入力地震波形

(1) 解析モデルおよび解析手法

本解析では、橋脚および群杭を1本の曲げせん断棒でモデル化した多質点系モデルを用いる。また、各質点に接続する地盤との相互作用ばねは薄層要素法⁹⁾¹⁰⁾により算出する。図-4に解析モデルを示す。

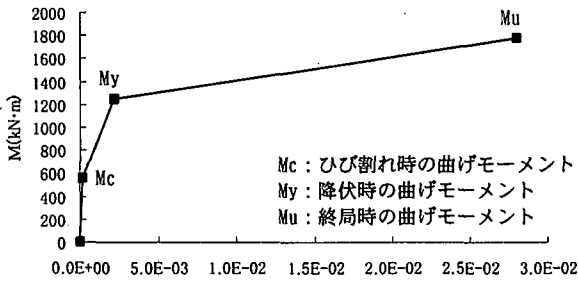


図-2 杭のM-φ関係

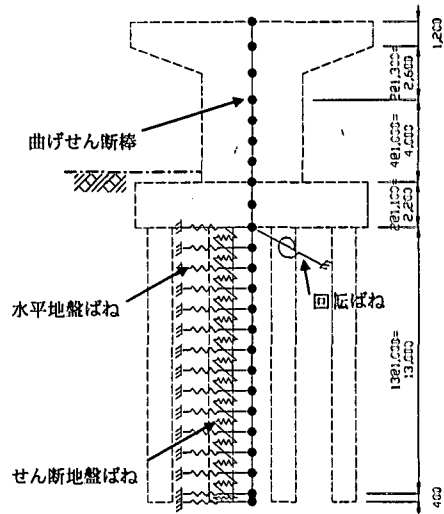


図-4 解析モデル

(3) 地盤の動的変形特性

地盤の初期のせん断剛性は式(1)によって算定し、動的変形特性として歪依存性および拘束圧に対する依存性⁷⁾を等価線形法で評価する。

$$G_0 = \frac{\gamma_t V_s^2}{g} \quad (1)$$

- ここに、
 G_0 : 地盤のせん断剛性 (kN/m²)
 γ_t : 地盤の単位体積重量 (kN/m³)
 V_s : 地盤のせん断弾性波速度 (m/s)
 (= $80 N_i^{1/3}$)
 g : 重力加速度 (= 9.8 m/s^2)
 N_i : 地層 i における地盤の N 値

(4) 入力地震動

第3層 (N=50) を入力基盤面とし、道路橋示方書⁸⁾に規定されるI種地盤が、動的応答解析で想定する工学基盤と考え、タイプIIの標準波II-I-1を最大加速度400galに調整して入力した(図-3)。

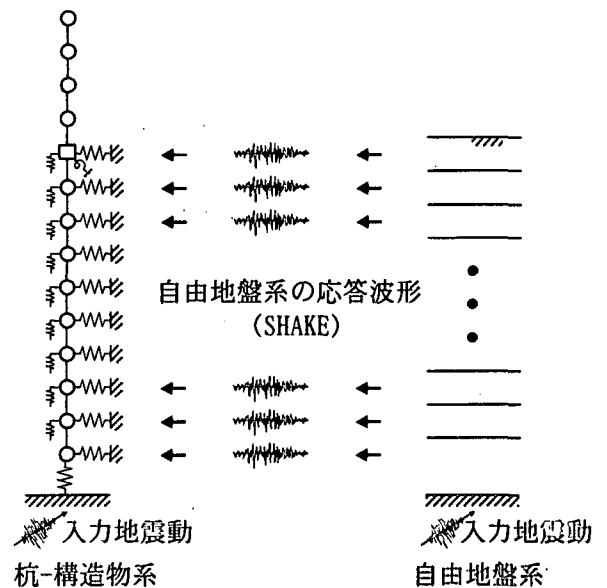


図-5 解析手法概要図

4. 解析手法

構造系全体の地震応答解析は、自由地盤の動的応答解析（本報ではSHAKEを使用）から得られた各質点深さでの変位応答波形を、相互作用ばねを介して多質点系モデルに入力することにより行う。図-5に解析手法の概要を示す。

(2) 地盤および構造物の固有周期

自由地盤の固有値解析結果として、卓越する1次固有モードを図-6に示す。ここで、地盤剛性にはSHAKEによる等価剛性を用いている。構造物については固有周期 T_s を $T_s < T_g$, $T_s = T_g$, $T_s > T_g$ となるように $T_s = 0.75, 1.2, 2.0$ (s) に変化させた。卓越する構造物の1次の固有モードを図-7に示す。 $T_s = 0.75$ (s) の1次モードは、基礎-地盤 (GL-0.5m以深) と橋脚が同方向に振動するモードとなるが、 $T_s = 1.2, 2.0$ (s) では主に橋脚が振動するモードとなる。

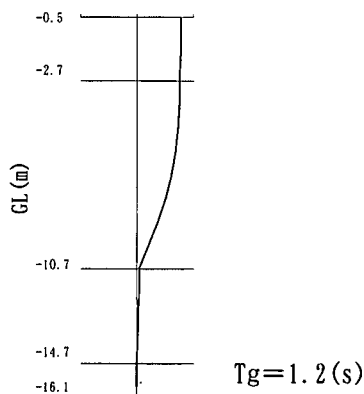


図-6 自由地盤の固有モード (1次)

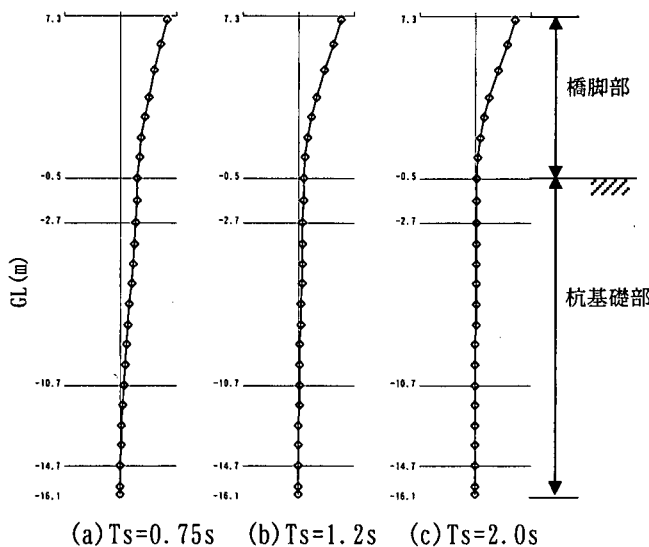


図-7 構造物の固有モード (1次)

5. 解析結果

(1) 構造物応答の位相特性について

杭を線形弾性とした場合の橋脚天端の加速度と地表面の加速度の応答波形を図-8に示す。 $T_s < T_g$

の場合 (図-8(a)), 橋脚天端と自由地盤地表面が同位相で振動する。 $T_s = T_g$ の場合 (図-8(b)) には、橋脚天端と自由地盤地表面は多少の位相のずれを伴う。 $T_s > T_g$ (図-8(c)) になると、橋脚天端と自由地盤地表面がおおむね逆位相に近い関係で振動する。

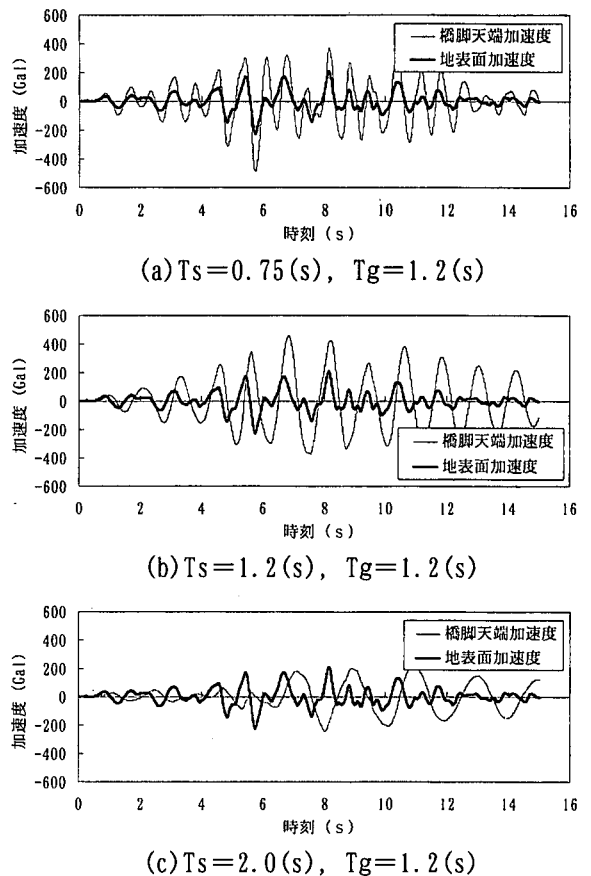


図-8 橋脚天端と地表面の時刻歴応答加速度波形 (杭線形)

橋脚天端の加速度波形の応答スペクトルを図-9に示す。 $T_s (=0.75) < T_g$ の場合、橋脚の加速度は、杭剛性を線形とした結果と非線形とした結果の差は大きい。 $T_s (=1.2) = T_g$ の場合、構造物と地盤が共振し、橋脚の加速度が大きくなる。また、橋脚の加速度は、杭剛性を線形とした結果と非線形とした結果の差は小さい。 $T_s (=2.0) > T_g$ の場合、橋脚の加速度は、杭剛性を線形とした結果と非線形とした結果で、ほぼ同程度となる。

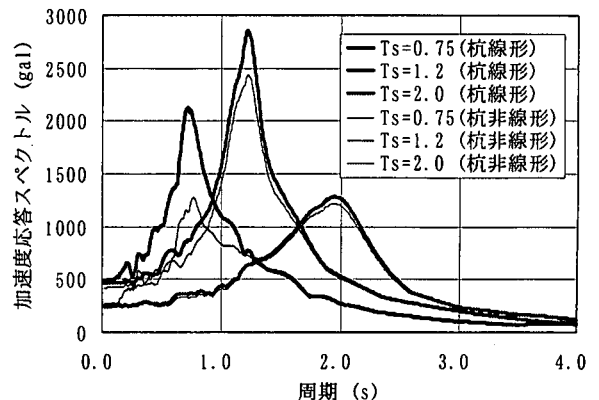


図-9 橋脚天端の加速度応答スペクトル

(2) 杭の断面力について

杭剛性を非線形とした場合の杭の断面力を、橋脚の慣性力による断面力 (Inertial) と地盤震動による断面力 (Kinematic) に分離して検討する。

ここで、Kinematic は、図-4 の解析手法概要図で橋脚を取り去り、基礎は剛性のみを残し質量を 0 とした無質量基礎を持つ杭基礎の動的応答解析を行って得られる、地盤震動のみによる杭の断面力である。Inertial は、全体系モデルの断面力 (Total) から地盤震動による断面力 (Kinematic) を差し引いて得られる杭の断面力である。図-10 に、この方法で分離した杭の断面力を示す。また、表-1 に Total, Kinematic; Inertial の曲げモーメントの最大値の発生時刻を示す。

$T_s < T_g$ の場合 (図-10(a))、前節で示したように、構造物と地盤が同位相で振動しており、曲げモーメントおよびせん断力の Inertial と Kinematic の最大値がおおむね同時刻で発生し、Total の杭断面力はほぼ両者の合計になっている。杭頭の曲げモーメントの最大値は Kinematic のみでは My (降伏モーメント) を超えないが、Inertial の影響により Total の曲げモーメントの最大値は My を超える。 $T_s > T_g$ の場合、表-1 から分かるように、Total の曲げモーメントの最大値が発生する時刻と Kinematic の曲げモーメントの最大値の発生する時刻はほぼ等しく、図-10(c) より両者の値はほぼ等しい。この場合、前節で述べたように、構造物と自由地盤がおおむね逆位相で振動しており、杭の Total の最大値は Kinematic が支配的で、Inertial の影響は小さい。 $T_s \approx T_g$ の場合、表-1 より、Total の杭の曲げモーメントの最大値、Inertial の杭の曲げモーメントの最大値と Kinematic の杭の曲げモーメントの最大値の発生時刻が異なる。図-10(b) より、Total の杭断面力は Inertial の杭断面力と Kinematic の杭断面力の最大値の合計にはならない。ただし、Total の杭頭曲げモーメントの最大値は Inertial の影響を多少受け、My をわずかに超える。

また、入力地震動を道路橋示方書⁸⁾に規定されるタイプ I の標準波に変更した解析も実施したが、杭の断面力の特性は、上に述べたものと同様であることが確認されている。

(3) 橋脚の断面力について

ここでは Inertial の影響に着目し、橋脚の断面力について検討する。

表-1 杭の最大曲げモーメントの発生時刻

Ts (s)	発生時刻 (s)		
	Total	Kinematic	Inertial
0.75	5.87	5.84	5.89
1.2	8.23	5.84	6.24
2.0	5.84	5.84	11.10

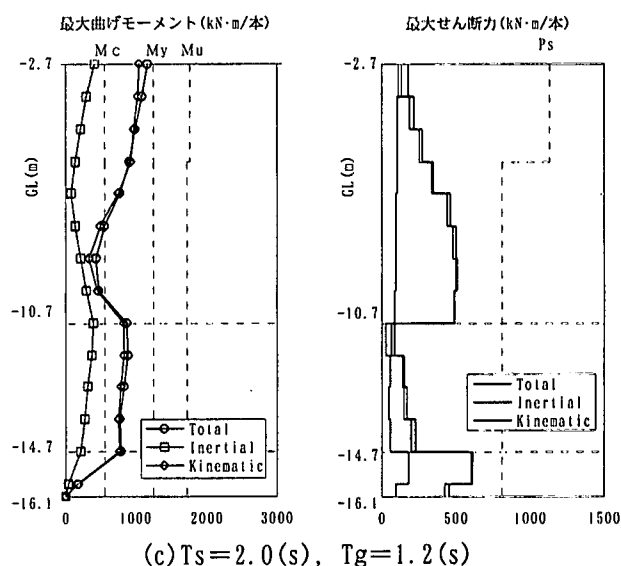
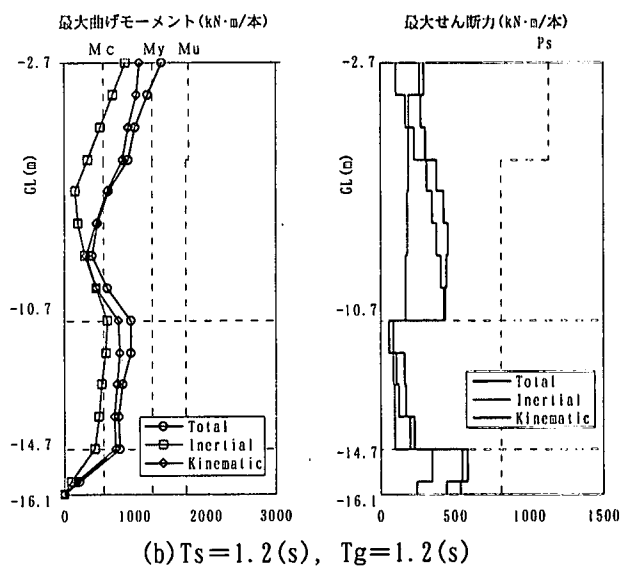
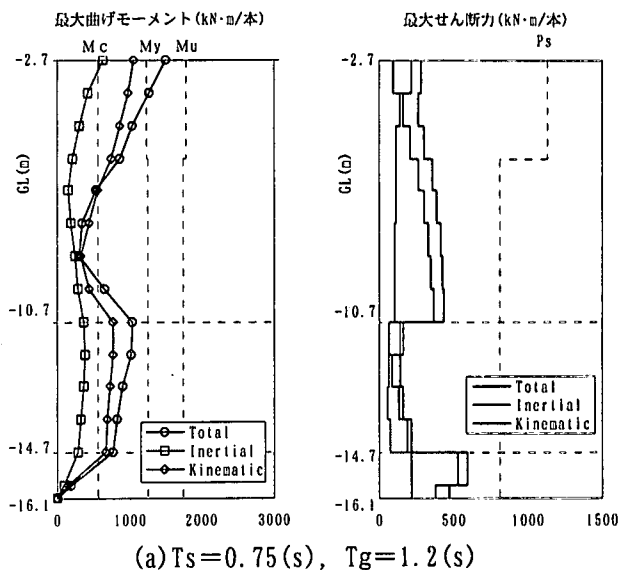


図-10 分離した杭の断面力 (杭非線形)

(a) 解析手法および解析モデル

Inertialの影響のみを考慮するために、図-11(a)に示すモデルを作成し、有効入力動を入力する。有効入力動とは、地震時に振動している地盤から基礎部を通じて上部構造物に入力する地震動であり、基礎部の剛性を受け自由地盤の地震時振動とは異なったものとなる。有効入力動は、図-11(b)に示すように、フーチング部の質量を0とした基礎部の応答加速度として求まる。本検討では、基礎部の剛性を非線形として有効入力動を求めた。以下、このようなモデルを、単一入力モデルと呼ぶ。単一入力モデルによる結果と、図-5に示した橋脚の慣性力と地盤震動を考慮したモデル(以下、多点入力モデルと呼ぶ)との比較検討を行う。

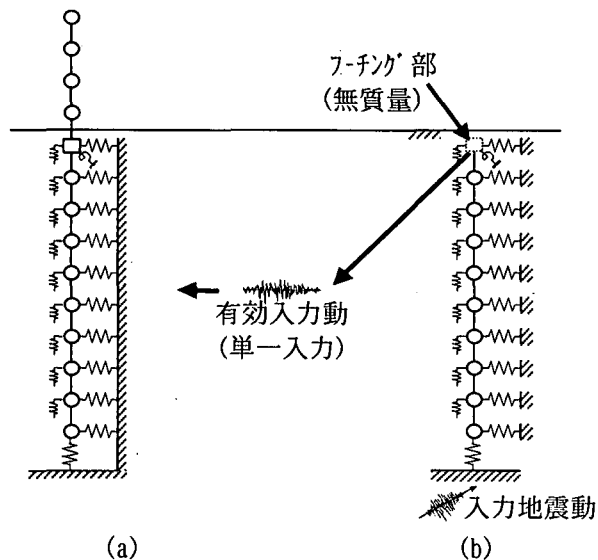


図-11 単一入力モデル概要図

本解析条件において、入力地震動の最大加速度が400galの場合、Kinematicのみの杭断面力では杭体が塑性化しない。Kinematicのみの杭断面力で杭体が塑性化するように、入力地震動の最大加速度を2000galに調整して比較検討を行った。なお、2000galを入力した場合、Total, Kinematic, Inertialの何れの杭頭曲げモーメントもMyを超える。

(b) 解析結果

図-12に単一入力モデルと多点入力モデルの橋脚断面力の比較を示す。

$T_s < T_g$ の場合(図-12(a))、入力地震動の最大加速度を400gal, 2000galとした場合とも、杭剛性を非線形とした解析結果は、杭剛性を線形とした結果に比べて橋脚の断面力の低下が顕著である。これは構造物と地盤が同位相で振動しているため、橋脚の慣性力が杭の塑性化に及ぼす影響が大きいためである。杭剛性が線形の場合、単一入力モデルによる橋脚の断面力と多点入力モデルによる橋脚の断面力は一致する。このことは、杭剛性が線形の場合、有効入力動の評価が妥当であることを示している。一方、杭剛性が非線形の場合、単一入力モデルによる

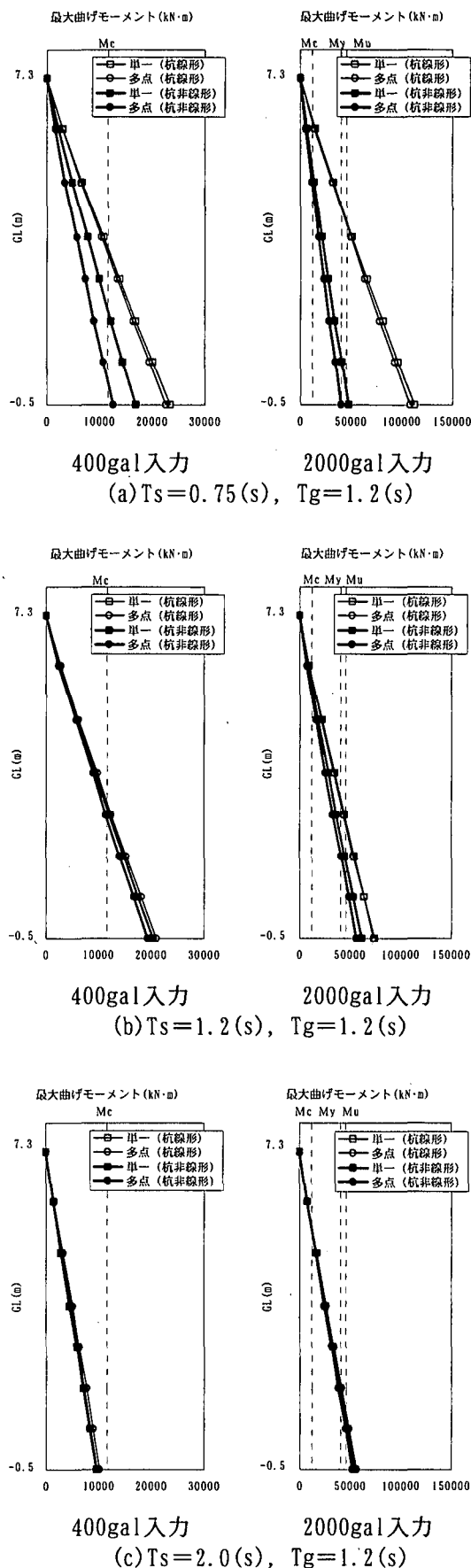


図-12 Inertialによる橋脚の断面力図

橋脚の断面力は、入力地震動の最大加速度が 2000 gal の場合は、多点入力モデルによる橋脚の断面力と同程度であるが、入力地震動の最大加速度が 400gal の場合は、多点入力モデルによる橋脚の断面力より大きくなっている。このことは、単一モデルに用いた有効入力動が、必ずしも適切でないことを示している。入力地震動の最大加速度が 400gal の場合は、Kinematic によっては塑性化しなかった杭が、Inertial の影響で塑性化し、有効入力動を正しく評価できないためと考えられる。

$T_s > T_g$ (図-12(c)) の場合、杭体が塑性化しない入力地震動の最大加速度が 400gal の場合、杭体が塑性化する入力地震動の最大加速度が 2000gal の場合とも、単一入力モデルによる橋脚の断面力と多点入力モデルによる断面力は一致する。また、杭剛性を線形とした結果と非線形とした結果は同程度となる。これは、橋脚と地盤が逆位相に近い関係で振動し、橋脚は地盤の振動と関係なく独立した振動をするため、杭体の塑性化の影響は橋脚の断面力にほとんど反映されないと考えられる。

$T_s = T_g$ (図-12(b)) の場合、構造物と地盤は多少の位相のずれを伴い、Inertial の影響による杭の塑性化は $T_s < T_g$ に比べて小さく、杭体の塑性化による橋脚の断面力の低下も小さい。

これらの解析結果より、構造物と地盤の固有周期の関係により適切な解析モデルを設定する必要があることが分かった。 $T_s < T_g$ の場合、Inertial の影響により杭体が塑性化することがあるため、多点入力モデルを用いなければならないことが分かった。 $T_s > T_g$ の場合には、橋脚と地盤が逆位相で振動し、橋脚は地盤の振動とは独立した振動をするため、単一入力モデルを用いて解析を行ってもよいと考えられる。

6. まとめ

本報告では、地盤の固有周期と構造物の固有周期に注目した構造物-基礎-地盤系の非線形動的応答解析を実施し、杭の損傷が橋脚の地震応答に与える影響について検討した。

橋脚の慣性力と地盤震動が基礎に与える影響は、構造物の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係で大きく異なることが確認された。慣性力と地盤震動の作用には位相差を伴い、 $T_s < T_g$ では同位相、 $T_s > T_g$ ではおおむね逆位相に近い関係になる。同位相の場合、橋脚の慣性力と地盤震動は基礎に同一方向に作用する。逆位相の場合は、杭の断面力は地盤震動の影響が支配的となる。

橋脚の断面力を評価する場合、構造物と地盤の固有周期の関係により適切な解析モデルを設定する必要があることが分かった。 $T_s < T_g$ の場合、Inertial の影響により杭体が塑性化することがあるため、多点入力モデルを用いなければならないことが分かった。 $T_s > T_g$ の場合には、橋脚と地盤が

逆位相で振動し、橋脚は地盤の振動とは独立した振動をするため、単一入力モデルを用いて解析を行ってもよいと考えられる。杭の設計・補強を考える場合、L2 地震動に対して弾性範囲に収めることは経済的に合理的ではないが、 $T_s < T_g$ の場合、杭の塑性化をある程度認めるような設計が可能となれば橋脚の断面力を小さくすることができ合理的である。

謝辞：本研究は、平成 13 年度科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施したものである。(社)土木学会技術推進機構に設置された「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」第 3 分科会の「橋脚の破壊過程と最適補強法」研究班において、貴重な意見を賜った。また、解析を行うに当たり鹿島小堀研究室の宮本裕司次長、酒向裕司主任研究員に御尽力を賜った。関係各位に深く感謝します。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 1999. 10
- 2) 小林寛他：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, 2000. 3
- 3) 高橋祐治他：地盤-基礎との連成を考慮した橋脚の動的応答解析, 第1回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, 2000. 3
- 4) 高原秀夫他：地盤-基礎との連成を考慮した橋脚の非線形動的解析, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, 2001. 3
- 5) 田蔵 隆他：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講演集, 1992
- 6) 室野 剛隆他：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, 構造工学論文集, Vol. 44A, 1998. 3
- 7) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室：地盤の地震時応答特性の数値解析法-SHAKE, DESRA-, 昭和57年2月
- 8) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 平成8年12月
- 9) 宮本 裕司他：非線形、液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第471号, 1995. 5
- 10) 高橋 祐治他：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験のシミュレーション解析, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム, 2001. 3