

液状化を考慮した橋脚－基礎－地盤系の 動的応答解析

平尾 謙一¹・砂坂 善雄²・高橋 祐治³

¹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)

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 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 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. We study the effect of liquefaction to seismic response of piles from viewpoint of the combination of natural periods.

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

1. はじめに

杭基礎などの深い基礎構造物の地震時挙動は構造物－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、基礎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。

筆者らは昨年度の報告¹⁾で、非液状化地盤に対する構造物－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施し、上部構造物の慣性力と地盤震動が基礎に与える影響が、以下のように構造物の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係で異なることを確認している。

- ① $T_s < T_g$ の場合、慣性力と地盤震動の作用は同位相に近い関係になり、橋脚の慣性力と地盤震動は杭に同一方向に作用する。
- ② $T_s > T_g$ の場合、慣性力と地盤震動の作用はおおむね逆位相に近い関係になり、杭の断面力は地盤震動の影響が支配的となる。

一方、液状化地盤では、地盤の固有周期が著しく長周期化するため、慣性力の位相と地盤震動の作用の位相の関係が非液状化地盤の場合と異なる可能性がある。液状化地盤における慣性力と地盤震動の作用の関係について把握することは、杭基礎構造物の合理的な設計を図る上で重要であると考えられる。

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

動を解析的に解明し、橋梁設計の合理化、経済性の向上、さらには既設橋脚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、液状化地盤における構造物－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施し、表層地盤の固有周期と構造物の固有周期の大小関係が杭の地震応答に与える影響について検討する。

また、橋脚－基礎の応答を非液状化地盤と液状化地盤とで比較し、地盤の液状化が橋脚－基礎の応答に与える影響についても検討を行う。

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)}。地盤に関して表層部 (GL-14.7m以浅) が液状化するとしたケースを「液状化地盤」、表層部が液状化しないとしたケースを「非液状化地盤」とし、両ケースについて非線形動的応答解析を実施する。また、橋脚－基礎－地盤連成系の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係が基礎の応答に与える影響を調べるため、昨年度の報告¹⁾と同様に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3ケース (本報告では $T_s = 0.75s$, $T_s = 1.06s$, $T_s = 2.00s$ の3ケース) 設定する。なお昨年度の報告¹⁾では地盤の地震応答を等価線形解析により算出し、 T_s , T_g が地震の経過中変化しないものとして検討を行ったが、本報告では地盤の地震応答を時刻歴非線形解析により算出し、地震の経過に

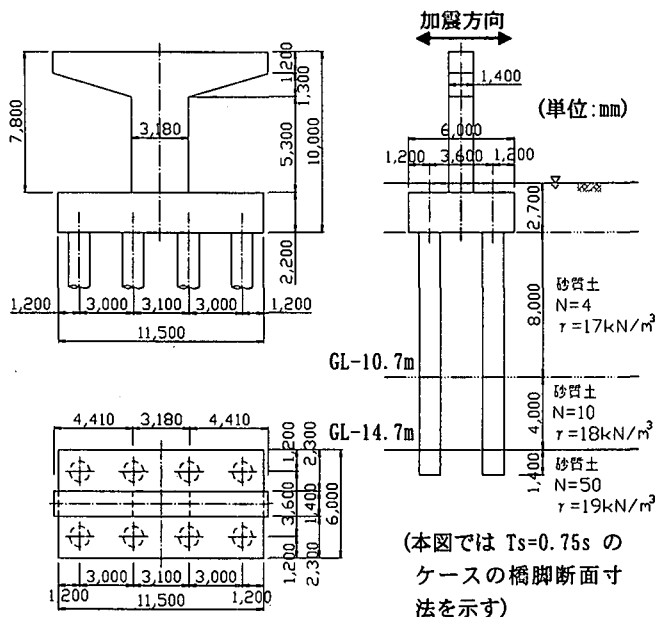


図-1 対象構造物および地盤

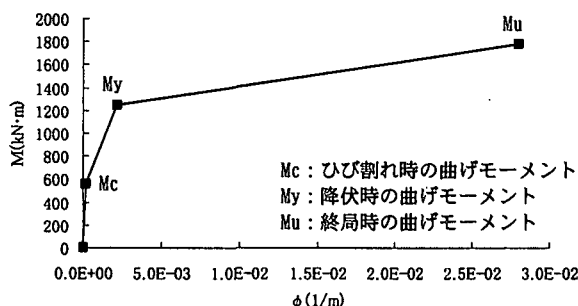


図-2 杭のM-φ関係

伴う T_s , T_g の経時変化および大小関係の変化を考慮した検討を行う。

(2) 杭および橋脚の非線形特性

杭には常時軸力作用下でのトリリニアなM-φ関係を設定し、履歴特性は武藤モデルを用いた。図-2に杭のM-φ関係を示す。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。

(3) 地盤の解析用物性値

本検討では有効応力解析プログラム FLIP⁵⁾を用いて自由地盤の動的応答解析を実施した。FLIP に用いるパラメータは港湾技研資料に示される簡易設定法⁶⁾を参照し、N値から設定した。なお、細粒分含有率は全層で $F_c=10\%$ としている。地盤の解析用物性値を表-1に示す。

(4) 入力地震動

第3層 (N=50) 上端 (GL-14.7m) を入力基盤面とし、道路橋示方書⁷⁾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)。

表-1 地盤の解析用物性値 (FLIP)

		第1層 (N=4)	第2層 (N=10)
せん断弾性係数 (*)	G_{sa} (kN/m ²)	5.51×10^4	7.43×10^4
体積弾性係数 (*)	K_{sa} (kN/m ²)	1.44×10^5	1.94×10^5
内部摩擦角	ϕ_f (°)	39	39
履歴減衰の上限値	h_{max}	0.24	0.24
変相角	ϕ_p (°)	28	28
液状化パラメータ	w_1	6.37	9.24
	p_1	0.5	0.5
	p_2	1.02	0.95
	c_1	1.6	1.6
	s_1	0.005	0.005

(*) : 有効拘束圧 $\sigma'_m = 98 \text{ kN/m}^2$ での値

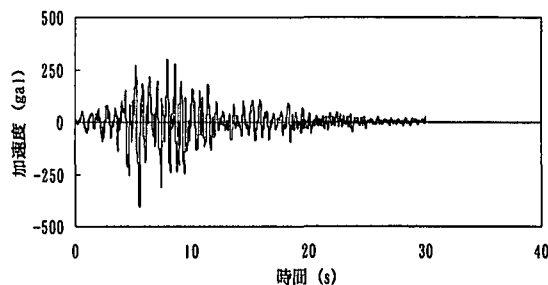


図-3 入力地震波形

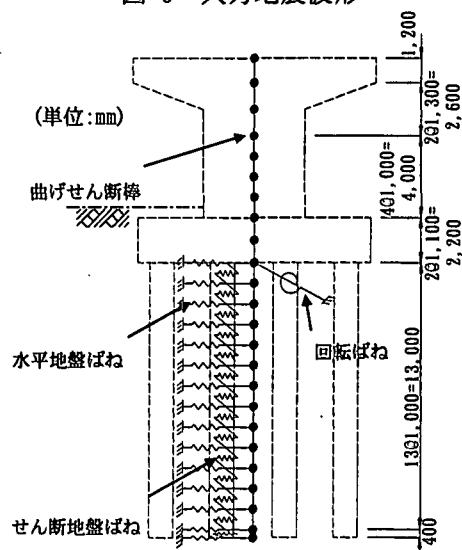


図-4 解析モデル

4. 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。図-4に解析モデルを示す。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^{8),9)}により算出する。

相互作用ばねの非線形特性としては図-5に示すMasing則に従うHardin-Drnevichモデルを用い、過剰間隙水圧の上昇による有効応力の低下に応じて、時々刻々ばね定数の初期値および上限降伏値を変化させて応答解析を行う⁸⁾。

構造系全体の地震応答解析は、自由地盤の動的応答解析 (本報では時刻歴非線形解析FLIP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-6に解析手法の概要を示す。

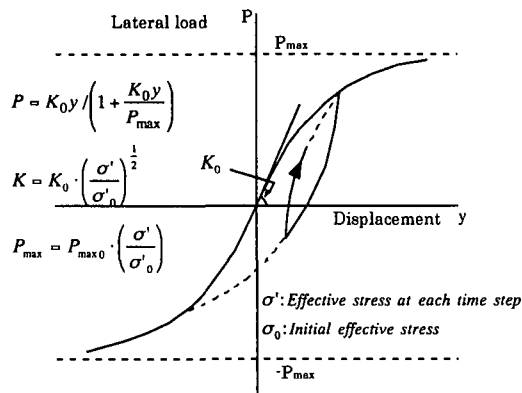


図-5 相互作用バネの非線形特性⁸⁾

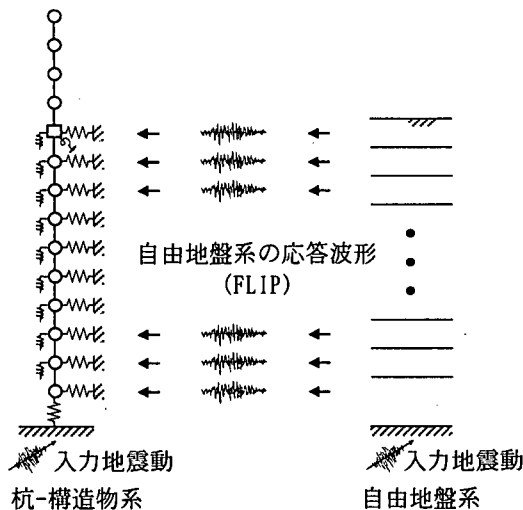


図-6 解析手法概要図

5. 解析結果

(1) 構造物応答の位相特性について

液状化地盤の地震応答解析結果から得られた過剰間隙水圧分布の経時変化を図-7に示す。第1層 (GL-10.7m以浅) と第2層で過剰間隙水圧 Δu の上昇の状況が異なり、第1層のほうが Δu の上昇が速く、過剰間隙水圧比も大きい。

地震の経過時間に伴う T_s , T_g の推移を図-8に示す。なお、 T_s の経時変化は各ケースともわずかであるので、本報告では各ケースを T_s の初期値で呼称している。非液状化地盤の場合 (図-8(a))、地盤のせん断ひずみの増加に伴う地盤の剛性低下により T_g が長周期化し、その結果 $T_s=2.00s$ を除くケースでは時間の経過に伴い T_s と T_g の大小関係は $T_s > T_g$ から $T_s < T_g$ に推移している。また、液状化地盤の場合 (図-8(b))、過剰間隙水圧の上昇の影響で、非液状化地盤と比較して T_g の長周期化が著しく、全ケースで $T_s > T_g$ から $T_s < T_g$ に推移している。

図-9に橋脚天端の加速度と自由地盤地表面の加速度の応答波形を示す。なお、 $T_s=1.06s$ のケースは $T_s=0.75s$ のケースと同傾向なので記載を省略している。図-8に示した T_s , T_g の大小関係に着目すると、応答加速度波形の位相特性は以下のようにまとめられる。

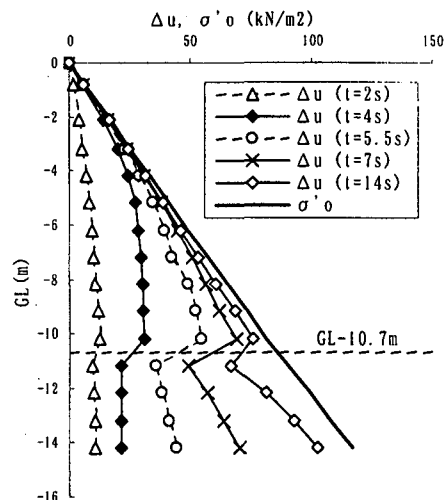
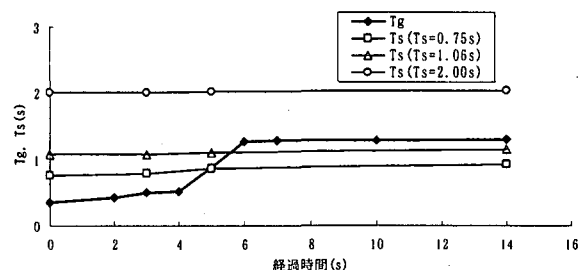
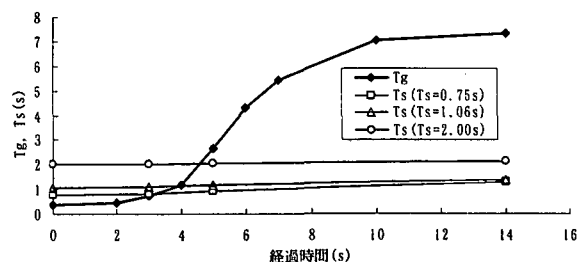


図-7 過剰間隙水圧分布の経時変化



(a) 非液状化地盤



(b) 液状化地盤

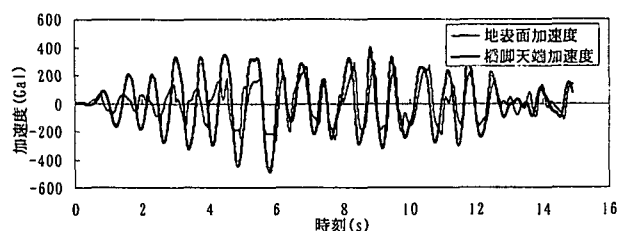
図-8 地震の経過時間に伴う T_s , T_g の推移

非液状化地盤の場合、 $T_s=0.75s$ のケース (図-9(a)) では、 $T_s > T_g$ の時間帯 ($t=0.0 \sim 4.0s$) で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が、 $T_s < T_g$ の時間帯 ($t=5.5s$ 以降) では橋脚天端と自由地盤地表面が同位相で振動する。また、 $T_s=2.00s$ のケース (図-9(b)) では全時刻で $T_s > T_g$ であるが、地盤が長周期化する前 ($t=6.0s$ 以前) は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し、地盤が極端に長周期化した後 ($t=6.0s$ 以降) は、橋脚天端は自由地盤地表面の加速度波形と無関係に振動している。

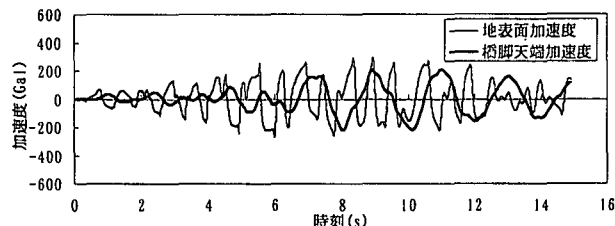
また、液状化地盤の場合 (図-9(c), (d)) も、過剰間隙水圧がほぼ最大となる $t=5.5s$ 以降では T_g と T_s の乖離が大きくなるため、 $T_s < T_g$ にもかかわらず、橋脚天端は自由地盤地表面の加速度波形と無関係に振動している。

(2) 非液状化地盤の杭の断面力について

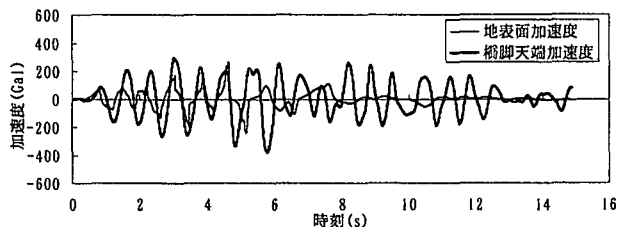
杭の断面力を、上部構造物の慣性力による断面力



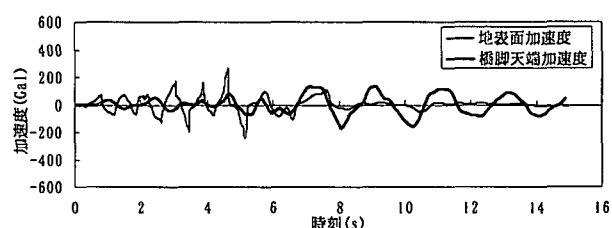
(a) 非液状化地盤 $T_s=0.75(s)$



(b) 非液状化地盤 $T_s=2.00(s)$



(c) 液状化地盤 $T_s=0.75(s)$



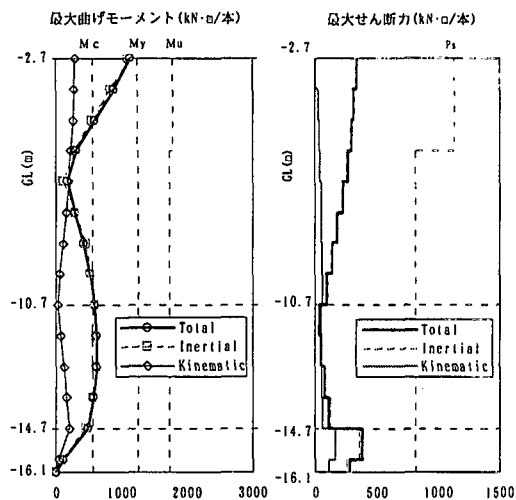
(d) 液状化地盤 $T_s=2.00(s)$

図-9 橋脚天端と地表面の時刻歴応答加速度波形

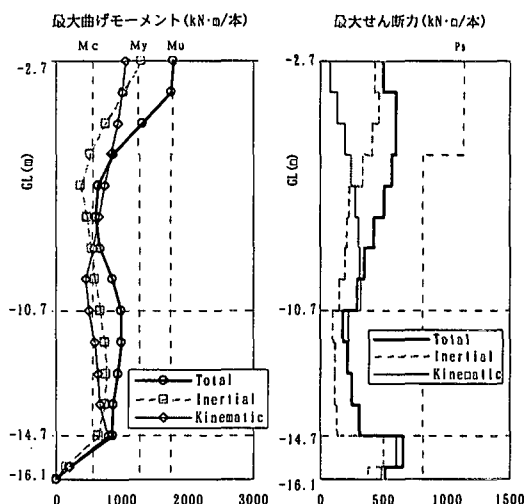
(Inertial)と地盤震動による断面力 (Kinematic) に分離して検討する。

ここで、Kinematic は、図-6 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。代表的なケースについて、図-10 にこの方法で分離した杭の最大断面力を示す。ここで、 T_s 、 T_g の大小関係と Total 断面力に対する Inertial、Kinematic の寄与率との関係を把握するため、図-10 では T_s 、 T_g の大小関係で区分した時間帯における最大値分布を示している。

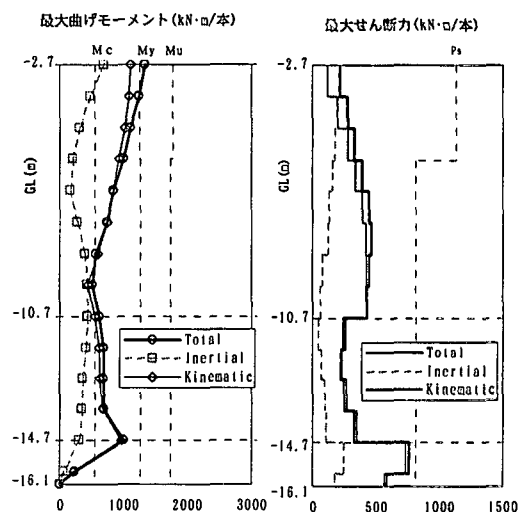
$T_s > T_g$ の場合 (図-10(a), (c))、前節で示したように、構造物と自由地盤がおおむね逆位相で振動しており、杭の Total の最大値は Inertial の最大値あるいは Kinematic の最大値のいずれかとほぼ一致している。一方、 $T_s < T_g$ の場合 (図-10(b))、構造物と地盤が同位相で振動しており、杭頭部の Total の杭断面力は Inertial と Kinematic の最大



(a) $T_s=0.75(s)$; $T_s > T_g$ の時間帯
($t=0.0s \sim 4.0s$)



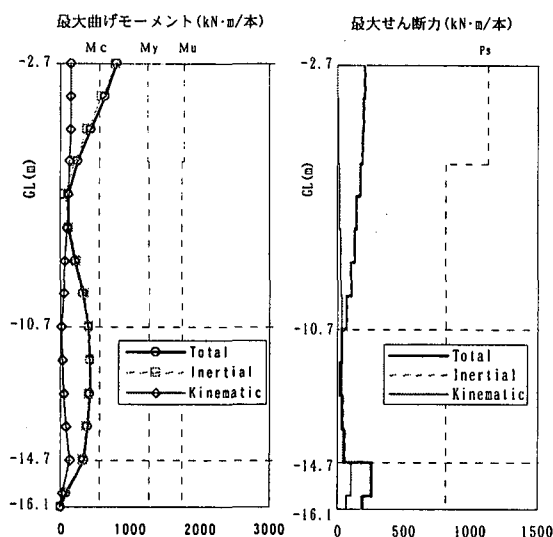
(b) $T_s=0.75(s)$; $T_s < T_g$ の時間帯
($t=0.0s \sim 4.0s$)



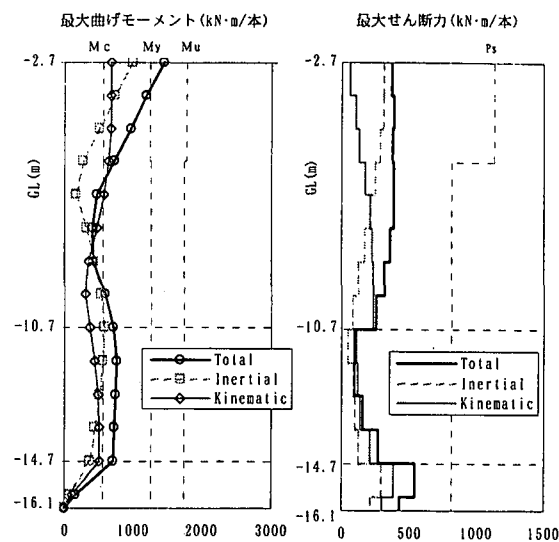
(c) $T_s=2.00(s)$; $T_s > T_g$ の時間帯
($t=0.0s \sim 15.0s$)

ここで、Mc : ひび割れ時の曲げモーメント
My : 降伏時の曲げモーメント
Mu : 終局時の曲げモーメント
Ps : せん断耐力 (以下同様)

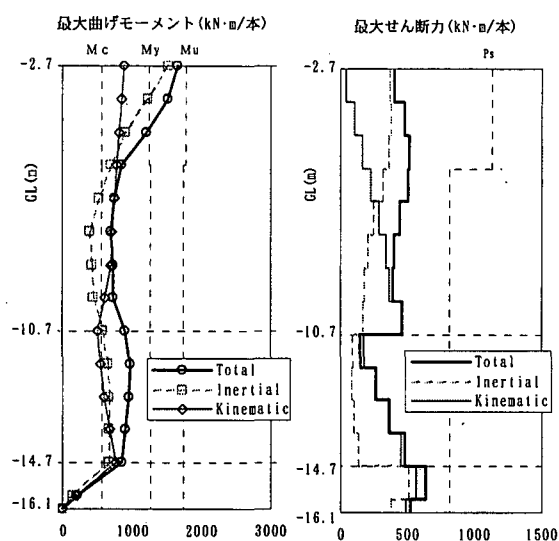
図-10 分離した杭の最大断面力 (非液状化地盤)



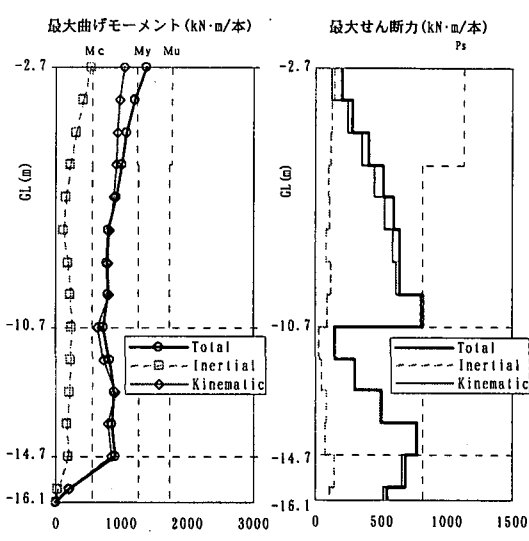
(a) $T_s=0.75(s)$; $T_s > T_g$ の時間帯
($t=0.0s \sim 2.0s$)



(b) $T_s=0.75(s)$; $T_s < T_g$ (Δu 上昇過程) の時間帯
($t=4.0s \sim 5.5s$)



(c) $T_s=0.75(s)$; $T_s < T_g$ (Δu ほぼ最大) の時間帯
($t=5.5s \sim 15.0s$)



(d) $T_s=2.00(s)$; $T_s < T_g$ (Δu ほぼ最大) の時間帯
($t=5.5s \sim 15.0s$)

図-11 分離した杭の最大断面力 (液状化地盤)

値の合計に近くなっている。なお、 $T_s=1.06s$ のケースは $T_s=0.75s$ のケースと同傾向である。

(3) 液状化地盤の杭の断面力について

液状化地盤についても杭の断面力を Inertial と Kinematic に分離した検討を行った。図-11 に分離した杭の最大断面力を示す。なお液状化地盤の場合は、(1)節により構造物と自由地盤の振動の位相の関係が T_s 、 T_g の大小関係だけでなく液状化の程度にも関係していることから、 $T_s < T_g$ の時間帯を過剰間隙水圧 Δu が上昇過程にある時間帯および Δu がほぼ最大に達する時間帯に分離して検討した。

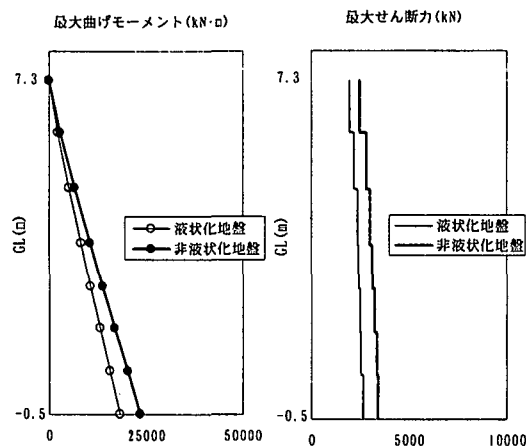
$T_s=0.75s$ のケースでは、 $T_s > T_g$ の時間帯 (図-11(a)) および $T_s < T_g$ で Δu が上昇過程にある時間帯 (図-11(b)) では非液状化地盤と同様の傾向が見られるが、 $T_s < T_g$ で Δu がほぼ最大に達する時間帯 (図-11(c)) では杭頭付近の Total のモーメント

は Inertial と Kinematic の合計とはならず、両者の位相が再びずれ始めている。

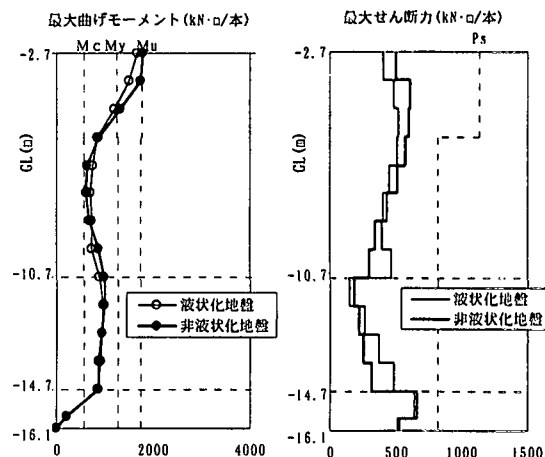
一方、 $T_s=2.00s$ のケースでは、 $T_s < T_g$ で Δu がほぼ最大に達する時間帯 (図-11(d)) でも杭頭付近の Total のモーメントは Inertial と Kinematic の合計に近く、Inertial と Kinematic の位相はほぼ一致している。これは、 $T_s=2.00s$ のケースでは $T_s=0.75s$ のケースと比較して Δu が最大に達した時間帯でも T_s と T_g の乖離が小さいことが原因であると考えられる。なお、 $T_s=1.06s$ のケースは $T_s=0.75s$ のケースと同傾向である。

(4) 液状化が構造物の応答に与える影響について

液状化が構造物の応答に与える影響を検討するために、橋脚および杭断面力に生じる最大断面力を非液状化地盤と液状化地盤で比較した。 $T_s=0.75s$ のケースの結果を図-12 に示す。本報告の検討条件の場合、橋脚では液状化地盤における断面力は非液状



(a) 橋脚の最大断面力



(b) 杭の最大断面力

図-12 液状化地盤と非液状化地盤の最大断面力の比較 ($T_s=0.75s$)

化地盤より小さくなっている。一方、杭では液状化地盤における断面力が非液状化地盤より大きくなる場合があり、特に地層境界 (GL-10.7m および GL-14.7m) 付近の液状化地盤におけるせん断力が、非液状化地盤と比較して顕著に大きくなっている。以上の傾向は他の解析ケース ($T_s=1.06s$, $T_s=2.00s$) でも同様に見られた。液状化地盤における地層境界付近の最大せん断力は前出の図-11(c) より主に地盤振動の影響 (Kinematic) で発生しているが、地層境界では上層と下層の液状化の程度の違いに起因する地盤剛性の差が大きく、その結果大きなせん断力が発生しているものと考えられる。

6. まとめ

本報告では、液状化を考慮した構造物-基礎-地盤系の非線形動的応答解析を地盤の固有周期と構造物の固有周期に注目して実施し、液状化地盤における地盤の固有周期と構造物の固有周期の関係が杭の地震応答に与える影響について検討した。

液状化地盤における上部構造物の慣性力と地盤震動が基礎に与える影響は、非液状化地盤と同様、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、 $T_s > T_g$ ではおおむね逆位相、 $T_s < T_g$ では同位相に近い関係になる。ただし、液状化の影響で T_s と T_g の乖離が大きい場合は地盤が構造物と無関係に振動する。杭の断面力に着目すると、逆位相の場合および T_s と T_g の乖離が大きい場合は上部構造物の慣性力か地盤振動の影響のどちらか一方が支配的となるが、同位相の場合、上部構造物の慣性力と地盤振動の影響を同時に考慮する必要がある。

また、液状化地盤では非液状化地盤と比較して橋脚の断面力が小さくなる場合でも、地盤深部の地層境界では主に地盤振動の影響で、液状化地盤のほうが断面力が大きくなる場合があることが確認された。

謝辞：本研究は、平成14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) 川中徹人他：橋脚-基礎-地盤系の非線形動的応答解析，第3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論文集，pp. 213-218, 2002. 3
- 2) 小林寛，田村敬一：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性向上に関するシンポジウム論文集，pp. 145-150, 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性向上に関するシンポジウム論文集，pp. 151-156, 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性向上に関するシンポジウム論文集，pp. 207-212, 2001. 3
- 5) 井合進他：ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル，港湾技術研究所報告，第29巻第4号，pp. 27-56, 1990. 12
- 6) 森田年一他：液状化による構造物被害予測プログラム FLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法，港湾技研資料，No. 869, 1997. 6
- 7) 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14年3月
- 8) 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，pp. 41-50, 1995. 5
- 9) 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，pp. 201-206, 2001. 3