# 橋脚ー基礎ー地盤系の地震応答に与える 橋脚及び杭基礎の耐震補強の影響について

平尾 謙一1・砂坂 善雄2・高橋 祐治3

<sup>1</sup>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)
<sup>2</sup>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)
<sup>3</sup>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)

本論文は、地盤の固有周期と構造物の固有周期の関係に着目した橋脚-基礎-地盤系の非線形動的応答 解析を実施し、液状化地盤及び非液状化地盤において杭及び橋脚の補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答 解析に与える影響について検討したものである。検討の結果、上部構造物の慣性力と地盤震動の作用が基 礎に与える影響は位相差を伴い、構造物の固有周期と地盤の固有周期の大小関係で大きく異なることが確 認された.また、構造物の固有周期と地盤の固有周期の関係により、橋脚及び杭基礎の耐震補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答に与える影響が異なることから、耐震補強設計上の留意点を明らかにした.

### キーワード:地震応答解析,質点系モデル,動的相互作用,固有周期,液状化

# 1. はじめに

1995年兵庫県南部地震以降,橋脚の補強はより高 い靱性を与えることを主眼として多くの方法が開発 され,その効果も実験的に確認されて実際に適用さ れている.しかし,橋脚の補強が基礎や周辺地盤も 含めた橋梁全体系としての挙動に及ぼす影響につい ては未解明な点が多い.

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.

「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計<sup>1)</sup>」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.

本論文では、地盤の固有周期と構造物の固有周期

に着目した橋脚-基礎-地盤系の非線形動的応答解 析を実施し,液状化地盤及び非液状化地盤において 杭及び橋脚の補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答 解析に与える影響について検討を行う.

#### 2. 検討条件

#### (1)対象構造物及び地盤

本報告では、図-1に示すような橋脚-基礎及び地 盤を対象とする<sup>2),3),4)</sup>.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Tgと構造物の固有周期 Ts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<sup>5),6)</sup>.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Tsを数ケース設定す る.なお、本報告での構造物の固有周期Tsは、橋脚 -基礎-地盤全体系の固有周期であり、図-1の橋脚 は、Ts=0.75sのケースである.

#### (2) 杭及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 $M-\phi$ 関係 を設定し、履歴特性は武藤モデルを用いる.  $\mathbf{2}$ -2に 杭の $M-\phi$ 関係を示す. ただし、解析及び検討の簡便 化のため、橋脚は線形とする.





# (3)入力地震動

図-1に示す地盤モデルの第3層(N=50)上端 (GL-14.7m)を入力基盤面とし,道路橋示方書<sup>7)</sup>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に調整して入力する(図-3).

# 3. 解析モデル及び解析手法

本解析では、橋脚及び群杭を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.各質点に接続する地盤との相互作 用ばねは薄層要素法<sup>8),9)</sup>により算出する.相互作用 ばねの非線形特性は図-5に示す Maising則に従う Hardin-Drnevichモデルを用い<sup>8)</sup>、液状化地盤を対象 とする場合は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及び上限降 伏値を変化させて応答解析を行う<sup>8)</sup>.

構造系全体の地震応答解析は、自由地盤の動的応



図-5 相互作用バネの非線形特性<sup>8)</sup>

答解析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.

なお、本報告では自由地盤の地震応答解析として 非液状化地盤を対象とする場合、等価線形解析 SHAKEを用い、液状化地盤を対象とする場合、時刻 歴有効応力解析FLIP<sup>10)</sup>を用いて実施する.SHAKEに 用いる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及び拘束圧に対 する依存性<sup>11)</sup>を等価線形法で評価する.



図-6 解析手法概要図

表-1 地盤の時刻歴有効解析 (FLIP) 用物性値

				かっ日
			− 第1 増	第2僧
			(N=4)	(N=10)
せん断弾性係数(*)	G <sub>ma</sub>	$(kN/m^2)$	5. $51 \times 10^4$	7. $43 \times 10^4$
体積弾性係数(*)	K <sub>ma</sub>	$(kN/m^2)$	$1.44 \times 10^{5}$	$1.94 \times 10^{5}$
内部摩擦角	$\phi_{\rm f}$	(°)	39	39
履歴減衰の上限値	h <sub>max</sub>		0.24	0.24
変相角	φ <sub>p</sub>	(°)	28	28
液状化パラメータ	w <sub>1</sub>		6.37	9.24
	p <sub>1</sub>		0.5	0.5
	p <sub>2</sub>		1.02	0.95
	$c_1$		1.6	1.6
	S <sub>1</sub>		0.005	0.005

(\*):有効拘束圧 σ m' =98kN/m<sup>2</sup>での値

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 \tag{1}$$

ここに, G<sub>0</sub>:地盤のせん断剛性(kN/m<sup>2</sup>)

γ<sub>t</sub>: 地盤の単位体積重量(kN/m<sup>3</sup>)

- $V_s$ :地盤のせん断弾性波速度(m/s)(=80 $N_i^{1/3}$ )
- g : 重力加速度(=9.8m/s<sup>2</sup>)
- $N_i$ : 地層 *i* における地盤のN値

また,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<sup>12)</sup>を参照し,N値から設定した. なお,細粒分含有率は全層でFc=10%としている. 地盤の解析用物性値を**表-1**に示す.

# 4. 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自 由地盤地表面の加速度の応答波形を図-7に示す.



なお、本検討では等価線形解析による地盤剛性に基 づきTs、Tgを算出しており、Ts、Tgは地震の経過中 変化しないものとしている. 地盤の固有周期はTg= 1.2sであり、橋脚-基礎-地盤全体系の固有周期Ts はTs=0.75s、Ts=1.2s、Ts=2.0sの3ケースを設 定した. Ts<Tgの場合(図-7(a)),橋脚天端と自 由地盤地表面が同位相で振動する. Ts  $\Rightarrow$  Tgの場合 (図-7(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. Ts>Tg(図-7(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.

## (2)杭の断面力について

# a) 橋脚の慣性力及び地盤震動が杭の断面力に与える 影響

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-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

表-2 杭の最大曲げモーメントの発生時刻

	発生時刻(s)				
Ts (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		

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-8に、この方法で分 離した杭の断面力を示す.また、表-2にTotal, Kinematic, Inertialの曲げモーメントの最大値の 発生時刻を示す.

Ts<Tgの場合,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,表-2より曲げモー メントのTotal, Inertial, Kinematicの最大値が おおむね同時刻で発生していることが分かる.また, 図-8(a)よりTotalの杭断面力はほぼKinematicと Inertial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.

Ts>Tgの場合,表-2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-8(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.

Ts≒Tgの場合,表-2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-8(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.

#### b)橋脚の耐震補強が杭に与える影響

Ts < Tg 及び Ts ≒ Tg の場合,上部構造物の慣性力 と地盤震動の影響が同位相で杭に作用するため,橋 脚を補強し橋脚の自重や耐力が増加すると,杭頭部 に作用する慣性力が大きくなり,杭の断面力が増加 し杭の補強の検討が必要になると考えられる.

一方, Ts>Tg で地盤震動の影響が支配的な場合, 杭の断面力の最大値は橋脚の慣性力にほとんど影響 されないため,従来どおり橋脚のみに着目した橋脚 の耐震補強を行えばよいと考えられる.

ただし、橋脚の補強により Ts が大きく変化する



Ps: せん断耐力 (以下同様)

図-8 分離した杭の断面力(杭非線形)

場合は,解析モデルを修正し再度解析する等,特別 な注意が必要と考えられる.

# (3)橋脚の断面力について a)杭の降伏が橋脚の断面力に与える影響

ここでは杭の降伏が橋脚の断面力に与える影響を 調べるため、杭を線形とした場合と杭を非線形とし た場合の橋脚の断面力の比較を行った.図-9に橋脚 の断面力を示す.なお、本解析条件において入力地 震動の最大加速度が400Galの場合は、Ts=2.0sのケ ースでは杭体が塑性化しない.Ts=2.0sのケースで 杭体が塑性化するよう入力地震動の最大加速度を 800Galとした解析も実施した.ただし、この場合自 由地盤の地震応答解析(SHAKE)は400Gal入力の場 合の地盤の等価剛性を用いた線形解析とした.

Ts<Tg(図-9(a))の場合,入力地震動の最大加 速度が400Gal,800Gal何れの場合にも,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ほぼ1/2程度となる.

Ts>Tg(図-9(c))の場合,入力地震動の最大加 速度が400Galの場合では杭体が塑性化しないため, 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.入力地震動の最大加速度が800Galの場合 は杭体が塑性化するが,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,橋脚が 自由地盤の振動と関係なく独立して振動し,かつ杭 断面力に対するInertialの影響が小さいため,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.

Ts≒Tg(図-9(b))の場合,構造物と地盤は多少の位相のずれを伴い,杭体の塑性化による橋脚の断面力の低下も小さい.

# b) 杭の耐震補強が橋脚に与える影響

Ts<Tgの場合,レベル2地震動に対して杭体を弾 性範囲に収めることは経済的に合理的ではない.杭 の塑性化により橋脚の断面力が低下するので,杭の じん性を向上させることにより,杭の塑性化をある 程度認めるような橋脚-基礎の強度バランスを考え れば合理的な補強設計が可能になると考えられる.

一方,Ts>Tgで地盤震動の影響が支配的な場合, 杭の塑性化は橋脚の断面力に影響を与えないため, 杭の補強としては耐力を増大させる方法,じん性を 向上させる方法とも有効であると考えられる.

### (4) 液状化の影響について

液状化地盤では、液状化の進行に伴って地盤の固 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地震中に大きく変化 することが考えられる.

ここでは自由地盤の応答変位波形及び過剰間隙水 圧の時刻歴を時刻歴有効応力解析FLIPを用いて算出 し、これらを用いて構造物-基礎-地盤系の非線形 動的応答解析を実施した.

## a) 液状化に伴う Tg の長周期化

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-10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.

Ts=0.75sのケースについて,地震の経過時間に 伴うTs,Tgの推移を図-11に示す.ただし,Tsは 地震中の相互作用バネの剛性低下に伴い若干周期が 長くなるが,ここではTs=0.75sと表示する.過剰 間隙水圧の上昇の影響に伴いTgが長周期化し,Ts >TgからTs<Tgに推移している.

# b)液状化地盤における構造物応答の位相特性

図-12にTs=0.75sのケースについて液状化地盤 における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.図-11に示した,Ts,Tg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.

Ts>Tgの時間帯(t=0.0~2.0s)では橋脚天端 と自由地盤地表面がおおむね逆位相に近い関係で振 動するが,Tgが長周期化しTs<Tgとなるに従い(t =2.0~5.5s)両者の位相はほぼ一致する.その後, 過剰間隙水圧がほぼ最大となるt=5.5s以降ではTg とTsの乖離が大きくなるため,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.

なお,非液状化地盤に対しても同様に非線形時刻 歴解析による検討を行っている.Ts>Tgの時間帯 で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,Ts<Tgの時間帯では同位相と なり,前出の非液状化地盤の等価線形解析の結果 (図-7)と同傾向の結果を得ている<sup>13)</sup>.

## c) 液状化地盤における杭の断面力

前出の非液状化地盤の解析(等価線形解析)と同様,杭の断面力を,InertialとKinematicに分離した検討を行った.図-13にTs=0.75sのケースの分離した杭の最大断面力を示す.なお,本検討ではTs,Tgの大小関係が時間とともに変化することから,Ts,Tg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.また,前項より構造物と自由地盤の振動の位相の関係がTs,Tg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,



図-12 液状化地盤における橋脚天端と地表面の時刻歴応 答加速度波形(Ts=0.75s)

8 時刻(s)

Ts<Tgの時間帯をさらに過剰間隙水圧Δuが上昇 過程にある時間帯及びΔuがほぼ最大値に達する時 間帯に分離して検討した.

Ts>Tgの時間帯(図-13(a))では Totalの断面力 は Inertial とほぼ一致し,Kinematic はほとんど 寄与しない.Tgの長周期化に伴いTs=Tgの時間帯 (図-13(b))になると Total にKinematic の寄与分 が見られる.Ts<Tgで $\Delta$ uが上昇過程にある時間 帯(図-13(c))では非液状化地盤のTs<Tgのケー スと同様にTotalの杭断面力はほぼInertialと Kinematic の合計に近くなる.一方,Ts<Tgで $\Delta$ u がほぼ最大に達する時間帯(図-13(d))ではTsと Tgの乖離が大きいため,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.また,杭頭の最 大モーメントはこの時間帯で発生している.





最大せん断力(kN/本)



## d) 橋脚の耐震補強が杭に与える影響

液状化地盤では,液状化の進行に伴い,地盤の固 有周期が著しく長周期化するため,初期にTs>Tg の関係であっても地震中にTs<Tg へ変化していく 場合が考えられる.前項で述べたように,この間, Ts と Tg の大小関係が変化しても上部構造物の慣性 力の影響はかなり大きいと考えられる.したがって, 橋脚を補強し,橋脚の自重や耐力が増加すると杭頭 部の断面力が大きくなり杭の補強の検討が必要にな ると考えられる.

# 5. まとめ

本報告では,地盤の固有周期と構造物の固有周期の関係に注目した構造物-基礎-地盤系の非線形動

的応答解析を実施し、橋脚及び基礎の補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答に与える影響について検討 した.

橋脚-基礎-地盤系のうち,上部構造物の慣性力 と地盤震動が基礎に与える影響は,構造物の固有周 期 Ts と地盤の固有周期 Tg 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,Ts<Tg では同位相,Ts>Tg ではお おむね逆位相に近い関係になる.ただし,液状化の 影響でTs と Tg 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,Ts <Tg の場合,上部構造物の慣性力と地盤震動の影 響を同時に考慮する必要がある.Ts>Tg の場合は 上部構造物の慣性力か地盤震動の影響のどちらか一 方が支配的となる.

また, 杭の塑性化が橋脚の応答に与える影響につ

いては、Ts>Tg で地盤震動の影響が支配的な場合、 杭の塑性化の影響は杭の断面力にほとんど影響を与 えないが、Ts<Tg の場合、杭の塑性化の影響で橋 脚の断面力が低下する.

以上の傾向を橋及び杭の補強設計の観点からまと めると以下のようになる.

Ts < Tg の場合,上部構造物の慣性力と地盤震動 の影響が同位相で杭に作用するため,橋脚を補強し 橋脚の自重や耐力が増加すると,杭頭部に作用する 慣性力が大きくなり,杭の断面力が増加し杭の補強 の検討が必要になると考えられる.また,杭の塑性 化により橋脚の断面力が低下するので,杭のじん性 を向上させることにより,杭の塑性化をある程度認 めるような橋脚-基礎の強度バランスを考えれば合 理的な設計が可能になると考えられる.

一方, Ts>Tg の場合は, 杭の Total の断面力は 上部構造物の慣性力の影響, 地盤震動の影響のうち, どちらか一方が支配的であると考えられる. Ts>Tg で地盤震動の影響が支配的な場合, 断面力の最大値 は橋脚の慣性力にほとんど影響されないため, 従来 どおり橋脚のみに着目した橋脚の耐震補強を行えば よいと考えられる. また, 杭の塑性化は橋脚の断面 力に影響を与えないため, 杭の補強としては耐力を 増大させる方法, じん性を向上させる方法とも有効 であると考えられる. Ts>Tg で上部構造物の慣性 力が支配的な場合, 橋脚の補強を行う場合杭基礎の 断面力が増加する可能性があるので注意が必要であ る. またこの場合, 杭基礎の補強設計においては従 来どおり地盤震動の影響を考慮しない設計が適用可 能である.

液状化地盤の場合,液状化の進行に伴い,地盤の 固有周期が著しく長周期化するため,初期にTs>Tg の関係であっても地震中にTs<Tgへ変化していく場 合が考えられる.この間,TsとTgの大小関係が変化 しても橋脚の慣性力の影響はかなり大きいと考えら れる.したがって,橋脚を補強し,橋脚の自重や耐 力が増加すると杭頭部の断面力が大きくなり杭の補 強の検討が必要になると考えられる.

謝辞:本研究は,平成13年度及び平成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

- 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,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)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, pp. 1033-1036, 1992
- 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, pp. 631-640, Vol. 44A, 1998.3
- 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
- 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
- 10) 井合進他:ひずみ空間における塑性論に基づくサイク リックモビリティーのモデル,港湾技術研究所報告,第 29巻第4号, pp. 27-56, 1990.12
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 平尾謙一他:液状化を考慮した橋脚-基礎-地盤系の動的応答解析,第4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.259-264,2003.3