

## 15. 東京低地の既設橋梁をモデル化した橋脚-基礎系の耐震解析

### FEM Analysis of Typical Pier-Baseament Systems Existing in Tokyo Lowland

技術調査課 小川 好、岡田 佳久（現・北多摩南部建設事務所）、廣島 実

#### 1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震以降、東京都建設局では約 1200 橋ある管理橋梁の耐震整備事業を進めている。これらの橋梁の架設年次は、関東地震（1923 年）後の震災復興期と第 2 次大戦後の復興期、高度成長期の 3 つの年代時期に分けられる結果、その耐震性能も大きく異なっている。一般に、過去の耐震基準によって設計された既設の橋梁の耐震性を評価する場合、現在の耐震基準が要求している強度や配筋細目と比較することは意味がないとされている<sup>1)</sup>。これは、耐震基準が広範囲な設計条件下において必要とされる耐震性を確保できるように安全側の結果を与える規定から成っているものであり、新設橋の耐震設計では必要とされる耐震性を与えるものの、どのような橋に対しても同じ耐震性を与えるわけではないことによるものである。

したがって、既設橋の耐震性の判定は、耐震基準との比較ではなく、より詳細な方法によらなければならない。橋脚-基礎系の場合、この判定には FEM による動的解析が最適とも考えられるが、対象橋梁の多さに伴う時間と経費の問題のほか、解析結果の物理的な解釈が難しいという点も残されている。このような問題に対処するため、著者ら<sup>2)</sup>は 2 質点 3 自由度のスウェイ・ロッキングモデル（以下 SR モデルとよぶ）による簡易な解析法を提案している。

SR モデルは図-1 に見られるように、橋脚の運動を表現する 1 質点 1 自由度系と、基礎の運動を表す 1 質点 2 自由度系を結合したものである。橋脚の系は上部構造の質量と、橋脚の相対変位とせん断応力

との関係を表現するせん断バネおよび粘性減衰を表現するダッシュポットから構成される。この系は応答スペクトルなどに利用される 1 自由度質点系と同類のものであることから、弾性あるいは橋脚が降伏した後の非弾性応答についても、比較的容易に構成関係を設定することができる。

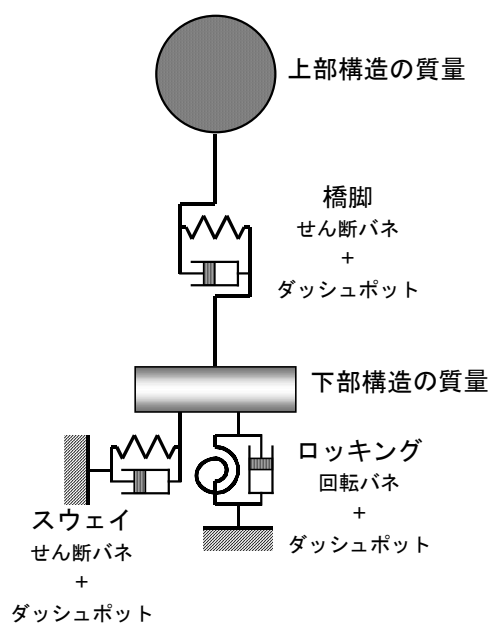


図-1 SR(スウェイ・ロッキング)モデルの構成要素

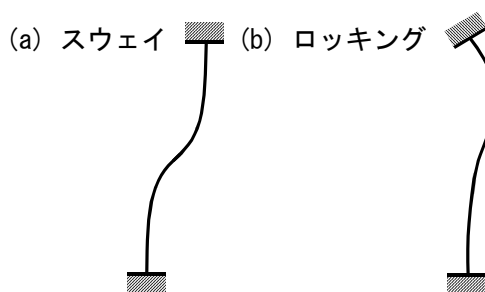


図-2 杭と地盤からなる集約バネの 2 つの変形形状

一方、基礎の系は杭によって支えられたフーチングと地盤との相互作用を表現するもので、図-2 に示すスウェイ（併進）とロッキング（回転）の2つの自由度をもっている。SR モデルの構成要素（図-1）では、スウェイはせん断バネと粘性減衰のダッシュポットによって、ロッキングは回転バネと回転方向での粘性減衰を表現するダッシュポットによって構成される。集約バネと呼ばれるこれら2つのバネと減衰定数は、杭と地盤が弾性であれば論理的に求めることができ、道路橋示方書<sup>3)</sup>を参考にして設定することができる。しかし、地盤はレベル1程度の地震動でも容易に非線形化するとともに、レベル2といった強い地震動の下では杭が降伏することも十分に考えられることから、土岐ら<sup>4)</sup>はプッシュオーバー解析によって集約バネを決定する方法を提案している。

東京の場合多くの橋梁が低地に建設されていることから、問題は地盤の非線形化だけでなく、液状化によって地盤性状が大きく変化することも考慮にいれなければならない。このため、筆者ら<sup>5,6)</sup>は同様のプッシュオーバー解析に液状化の影響を取り入れる手法を開発するとともに、実在する2橋の耐震性をFEM解析の結果と比較することで検討している。解析結果は、フーチング位置および橋脚上端の運動でSRモデルとFEMがよい一致を示した。また、厚い沖積層上に建設された長尺の杭基礎をもつ橋梁では、地盤-杭基礎の集約バネの影響はきわめて小さく、集約バネが線形か非線形かの違いはフーチング

の運動に大きな差異を与えないことがわかった。これは、フーチングの運動は、橋梁が存在しないとして地盤を1次元解析したときの地震動と比較的よく一致することに表れており、このことがSRモデルという簡易なモデルでもFEMの結果とよく再現できるという結果をもたらしている。

もちろん、上述の結果は数値解析のみによる結論であることから、遠心場でのモデル実験を行うことで検証を試みた。対象とする橋梁は図-3に示すように橋脚高さが10m、杭長が30mの場所打ち杭からなり、地盤の上層10mは液状化地盤と非液状化地盤の2タイプとしている。また、モデル実験に先立ち、FEMによる解析を実施してフーチング位置と橋脚から離れた地盤での運動を比較した。この報告ではFEM解析の概略を報告する。

## 2. 解析モデルと解析方法

### (1) 橋脚-基礎系のモデル化

実験および解析のプロトタイプとなった橋脚とフーチング、杭の構造図<sup>7)</sup>を図-3に示す。橋脚の剛性はプロトタイプの橋脚の降伏剛性  $EI_y = 4.08 \times 10^7 \text{ kNm}^2$ （降伏モーメント  $M_y = 4.86 \times 10^4 \text{ kNm}$ 、弾性限曲率  $\phi_y = 1.19 \times 10^{-3} / \text{m}$ ）と等価とする。また、橋脚の非線形特性としては、弾性限曲率を越えると降伏モーメントを維持する完全弾塑性とした（図-4参照）。この橋脚上面に上部構造に相当する質量を載せることで、固有周期を調整した。基本形の固有周期は非液状化地盤と液状化地盤とも0.5秒とする

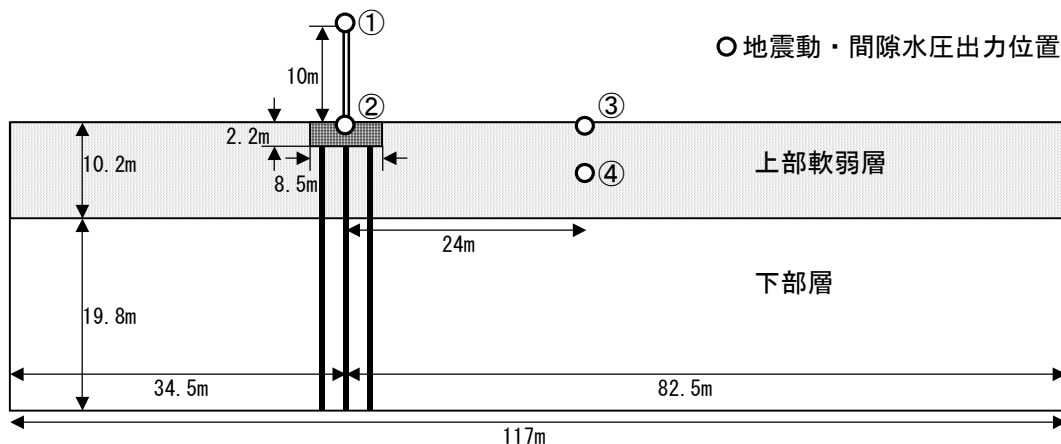


図-3 橋脚-基礎系と地盤のモデル

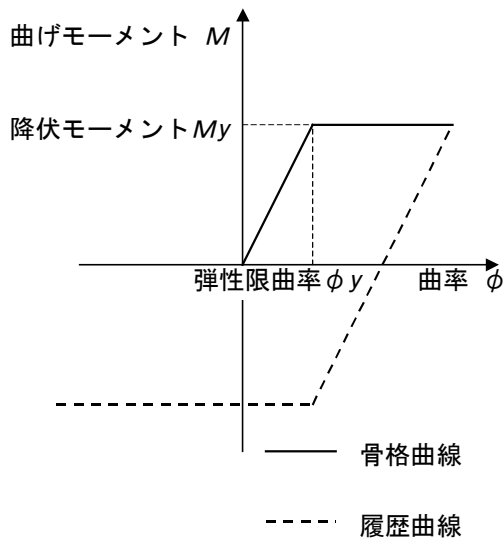


図-4 橋脚の非線形特性のモデル

とともに、地盤の卓越周期に近い、表-1 に示す固有周期の橋脚を非液状化地盤と液状化地盤にそれぞれ設定した。これらの橋脚モデルについては、地盤の卓越周期に近いことから便宜的に共振形と呼ぶが、基礎を無視して橋脚のみの固有周期を調整しているため、必ずしも共振しやすいわけではない。

杭基礎は場所打ち杭を想定し、直径が 1,200mm の杭を 3×3 本配置している。杭の剛性はプロトタイプの杭で軸力が作用した状態での初期剛性  $EIc = 2.66 \times 10^6 \text{ kNm}^2$  (降伏モーメント  $Mc = 5.90 \times 10^2 \text{ kNm}$ 、弾性限曲率  $\phi_c = 2.22 \times 10^{-4} / \text{m}$ ) と等価とする。杭の非線形特性は、橋脚と同様に完全弾塑性である。

FEM の要素としては橋脚と杭は梁要素で、フーチングは 4 節点平面ひずみ要素でそれぞれモデル化した。

表-1 橋脚の形式と固有周期

地盤	非液状化		液状化	
橋脚形式	基本形	共振形	基本形	共振形
固有周期	0.500秒	0.778秒	0.500秒	0.991秒

### (2) 地盤のモデル化

図-3 の地盤のうち、上部軟弱層は相対密度  $Dr$  を 60% とした岐阜産 7 号珪砂、下部層は  $Dr$  が 90% の岐阜産 4 号珪砂によって構成されていると想定したものである。液状化地盤の解析では、上部軟弱層の 7 号珪砂が液状化層となる。7 号珪砂についてはくり返し三軸試験による動的変形特性と液状化強度が求められており、くり返し回数 20 回の液状化応力振幅比  $RL20$  は 0.18 となっている。また、せん断剛性率の平均有効応力による依存性は、0.4 乗則で与えられている。

各層の動的変形特性は修正 Ramberg-Osgood モデル<sup>8)</sup>に従うとして、実験条件からモデルのパラメータを設定した。液状化地盤では過剰間隙水圧の発生規則を“おわんモデル<sup>9)</sup>”とし、実験結果の液状化強度曲線に合うように試行錯誤によってパラメータを設定した。解析に使用した地盤の物性値を表-2 に示す。非液状化地盤は不飽和、液状化地盤は飽和としているため、単位体積重量に違いが見られる。

地盤は 4 節点平面ひずみ要素でモデル化した。また、図-3 の境界条件のうち、側方は水平ローラー境界、底面は固定境界としている。

### (3) 解析の手順

解析は 2 次元の FEM 解析であり、非液状化地盤に

表-2 解析に使用した地盤の物性値

モデルの物性	非液状化地盤		液状化地盤		
	上部層(7号)	下部層(4号)	上部層(7号)	下部層(4号)	
単位体積重量 $\gamma$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	13.7	14.6	18.3	18.9	
初期せん断弾性係数 $G_0$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	35000	65700	28300	51300	
修正 R-0 モデル	$G_{0i}$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	7555	8041	7323	7558
	$h_{\text{max}}$	0.23	0.24	0.23	0.24
	$\gamma_{0.5i}$	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
	$n_1$	0.4	0.4	0.4	0.4
	$n_2$	0.4	0.4	0.4	0.4
おわんモデル	$A$	—	—	-1.5	—
	$B$	—	—	1.5	—
	$C$	—	—	10	—
	$D$	—	—	40	—
	$Cs/(1+e_0)$	—	—	0.005	—
$X_1$	—	—	0.1528	—	

については全応力解析、液状化地盤については有効応力解析となる。基礎杭の奥行きを2次元化するため、フーチング幅の地盤が杭の水平変位に抵抗するとしたモデルと、杭前面の地盤のみが杭の水平変位に抵抗すると考えるモデルの2つを検討したが、今回は一般的な方法である前者の結果を報告する。

解析では地盤と基礎-橋脚系をモデル化したのち、地盤と構造物間の負の摩擦力を解消するため、別々に静的な自重解析を行い、初期応力を計算する。次に、地盤と基礎-橋脚系を一体化して固有値解析を行い、水平方向の有効質量比が卓越する上位2つの固有振動数をもとに、Rayleigh減衰が0.05となるように定数 $\alpha$ 、 $\beta$ を決定した。

解析コードDINAS<sup>10)</sup>に上記の設定値を初期値として与え、全応力および有効応力解析を実施した。入力地震動は兵庫県南部地震の際に埋め立て地盤であるポートアイランドの地中83mで観測されたNS成分を、遠心載荷実験の条件にしたがって+(N)側を5m/sec<sup>2</sup>に調整した波形であり、継続時間は20秒となっている(図-5参照)。

### 3. 解析結果

「はじめに」でも述べたように、解析の目的はSRモデルの検証、特にフーチングの応答が自由地

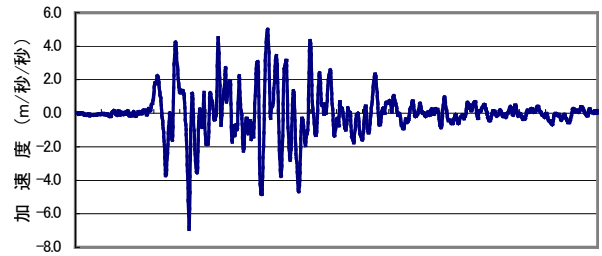


図-5 入力地震動 (ポートアイランド修正波)

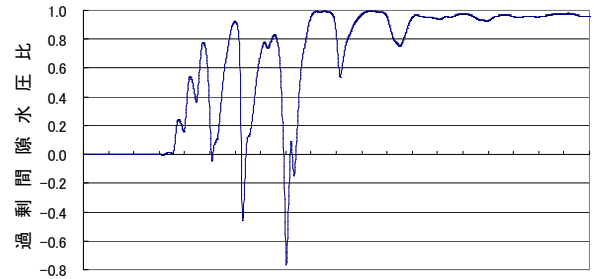


図-6 杭から離れた地盤中での過剰間隙水圧比 (基本形, 図-3の④点での時刻歴)

表-3 最終的な杭と橋脚の変状

地盤	非液状化		液状化	
	基本形	共振形	基本形	共振形
橋脚形式	降伏	降伏	降伏	降伏
杭	降伏	降伏	降伏	降伏
橋脚	降伏	降伏	健全	降伏

盤での地震動から容易に推定できるという点にある。このため、解析結果の考察も、両者での加速度および相対変位の比較が主になるが、入力地震動がレベル2相当であることから杭と橋脚に降伏が発生して

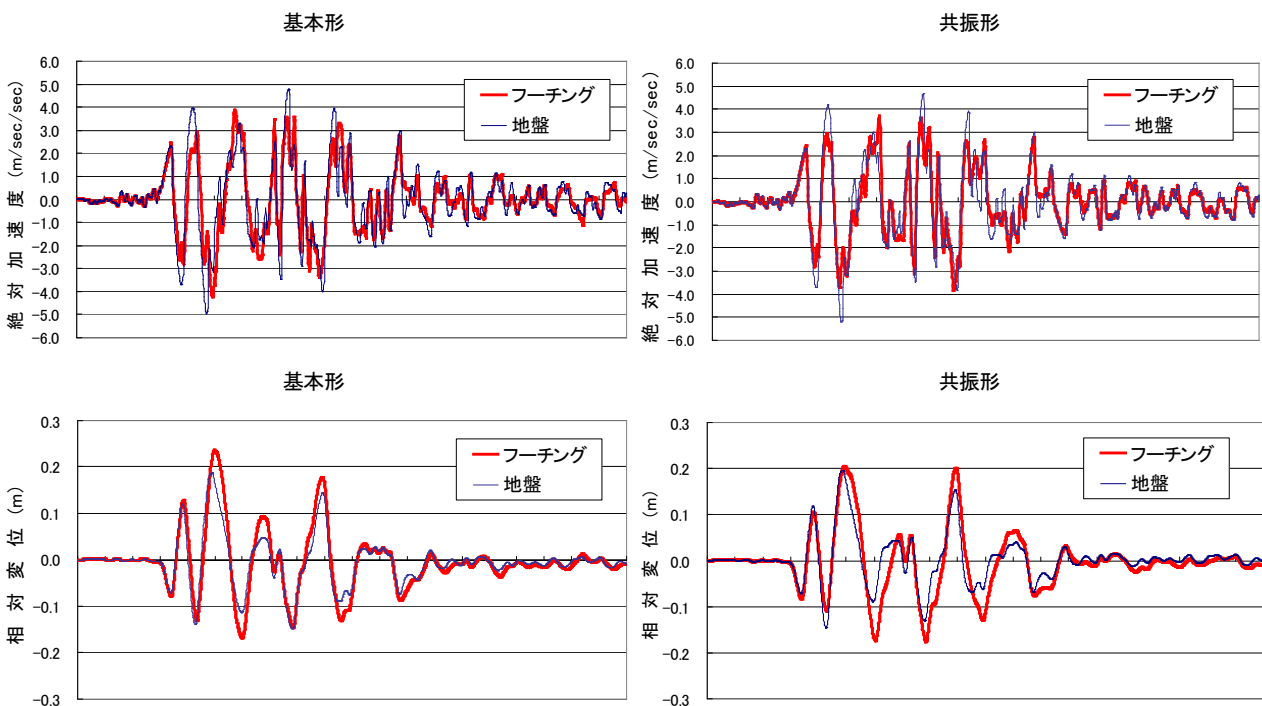


図-7 非液状化地盤でのフーチングと地盤で計算された波形の比較

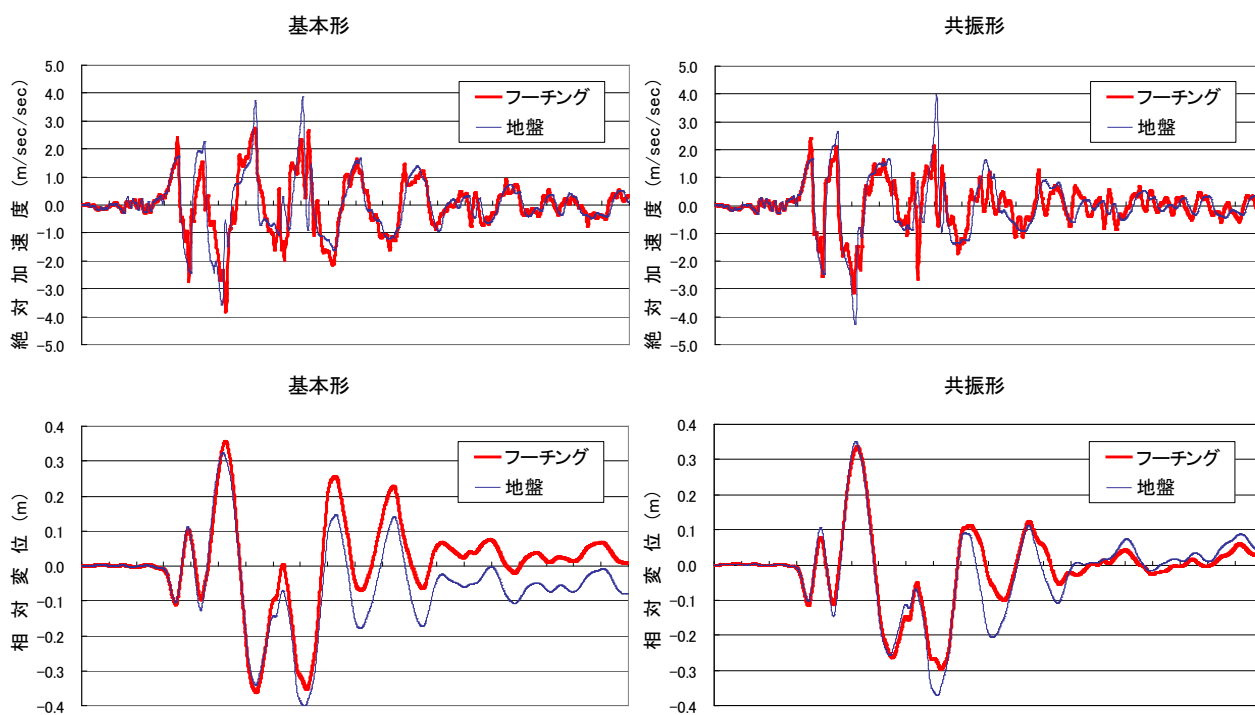


図-8 液状化地盤でのフーチングと地盤で計算された波形の比較

おり、表-3 に示すように液状化時での基本形の橋脚が健全であるほかはすべての条件が降伏となっている。もちろん、耐震性の照査では降伏だけではなく応答塑性率によって被災程度が判断されるが、杭や橋脚が降伏した結果として変位も大きくなっていることに注意を要する。

解析上の留意点としては、このほか液状化時の間隙水圧の変化があげられる。今回の解析では、過剰間隙水圧は図-6 に見られるように負値が発生している。これは、大きなせん断ひずみによって正のダイラタンシーが発生することで静的な状態よりさらに水圧が低下し、結果としてこの時点でのせん断強度は初期値よりも大きくなる。遠心載荷実験でもこのような現象が発生するかどうかは別として、液状化時の地盤としてはきわめて強いという評価となっていることに注意を要する。

#### (1) フーチングと地盤での地震動の比較

解析結果のうち非液状化地盤のフーチング（図-3 の②）と地盤（図-3 の③）での加速度波形と相対変位波形を図-7 に示す。加速度ではフーチングの波形に短周期の振動が目立つものの、全体的な波形の形状は地盤の波形と類似している。また、波形の各ピークでは、振幅は地盤の方が大きくなっているのが注目される。相対変位の波形では、両者は周期、

振幅ともよく一致しているのが見られる。

同様の類似性は、図-8 の液状化地盤での解析結果にも見られる。加速度波形では振幅値は非液状化地盤より小さくなっているものさほど顕著ではなく、前述した負の過剰間隙水圧の影響と考えられる。また、基本形の相対変位波形の後半部には、地盤とフーチング間に累積的な差が見られる。

#### (2) フーチングと橋脚上端での地震動の比較

非液状化地盤と液状化地盤で計算された、フーチングと橋脚上端（図-3 の①）での相対変位を図-9 に示す。フーチングの波形は橋脚の周期（上部構造の質量）の違いにかかわらず、周期、振幅ともほぼ同様の形となっている。また、この類似性は、液状化発生の有無にかかわらず、認められる。

橋脚の相対変位波形の波形は、振幅はフーチングより大きいものの、周期はフーチングとほぼ同一の運動となっており、橋脚の周期はあまり影響をあたえないという結果となった。この類似性も、液状化発生の有無にかかわらず認められた。

橋脚上端での相対変位は桁ずれなど橋梁の機能に影響をあたえることから、耐震評価では重要な項目である。今回の解析では、橋脚の相対変位の周期はフーチングでの相対変位の周期とほぼ同一であり、図-7 と図-8 の結果をあわせて考えれば地盤での相

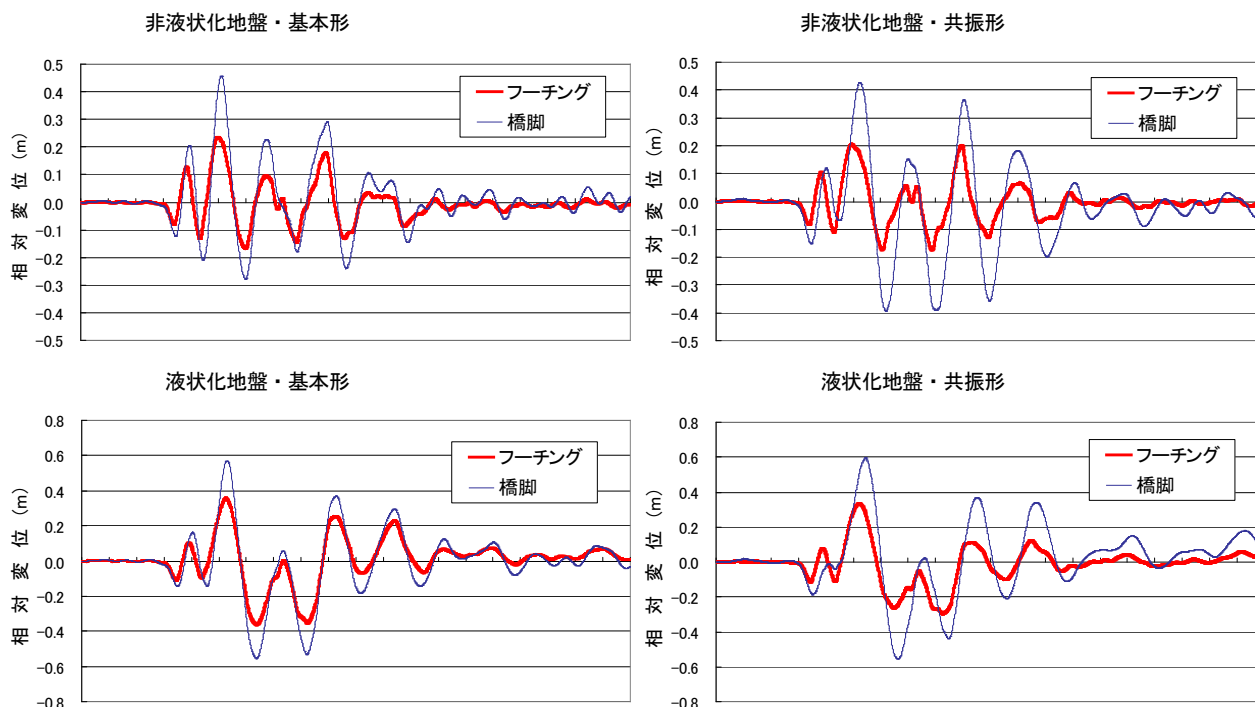


図-9 非液状化地盤と液状化地盤でのフーチングと橋脚で計算された相対変位波形の比較

対変位の周期にほぼ一致するという結果となった。

#### 4. まとめ

既設橋の耐震性を判定するため、2 質点 3 自由度の SR モデルによる簡易な解析法を開発している。これまでの解析結果では、フーチング位置および橋脚上端の運動は SR モデルと FEM がよい一致を示すとともに、厚い沖積層上に建設された長尺の杭基礎をもつ橋梁では、SR モデルの地盤-杭基礎系バネの影響は小さく、フーチングの運動に大きな差異を与えないことがわかった。これを実験的に検証するため、遠心場でのモデル実験を行とともに、FEM によ

る解析を実施してフーチング位置と橋脚から離れた地盤での運動を比較した。

解析の結果、地盤の液状化発生の有無にかかわらず、フーチングの加速度波形には短周期の振動が目立つものの、全体的な波形の形状は地盤の加速度波形と類似した。また、波形の各ピークでは、地盤の方が振幅は大きくなっており、最大値による簡易的な推定は安全側の結果を与える。相対変位の波形では、両者は周期、振幅ともよく一致しているのが見られることから、地盤-杭基礎系バネの影響は小さいという結果が再確認された。

#### 参考文献

- 1) Priestley, M. J. N., Seible, F. and Calvi, G. M., 川島一彦監訳 (1998) : 橋梁の耐震設計と耐震補強, p. 37, 技報堂出版
- 2) 岡田佳久, 小川 好 (2005) : 振動数領域で同定した既設橋梁の簡易動的解析に用いる基礎の集約バネ定数と減衰係数の検討, 応用力学論文集, Vol. 8, 1009-1018
- 3) 日本道路協会 (2002) : 道路橋示方書 (V耐震設計編) ・同解説
- 4) 土岐憲三, 清野純史, 小野裕輔, 古川愛子 (2002) : 杭基礎-地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について, 土木学会論文集, No. 710/I-60, 235-245
- 5) 岡田佳久, 小川 好, 廣島 実 (2005) : 既設橋梁の簡易地震応答解析手法の液状化地盤への適用性, 平 17. 都土木技研年報, 225-232
- 6) 岡田佳久, 小川 好, 石井武司 (2005) : 液状化地盤を対象とした既設橋梁の簡易地震応答解析手法の適用性, 第 50 回地盤工学シンポジウム, 333-340
- 7) 日本道路協会 (1997) : 道路橋の耐震設計に関する資料, 2-4
- 8) 足立紀尚, 龍岡文夫 (1981) : 新体系土木工学 18, 土の力学(III), 244-250, 技報堂出版
- 9) 福武毅芳 (1997) : 土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究, ORI 研究報告 97-03, 清水建設
- 10) CRC ソリューションズ : DINAS 使用説明書 Ver. 7.0