

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

高橋 祐治¹・砂坂 善雄²・高原 秀夫²・大野 晋也³
田村 敬一⁴・小林 寛⁵・大内 一⁶・伊藤 浩二⁷

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)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 横浜支店 (〒231-0011 神奈川県横浜市太田町4-51)

⁴正会員 工博 国土交通省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

⁵正会員 工修 国土交通省土木研究所 振動研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市大字旭1)

⁶正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁷正会員 工修 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

This paper shows the analytical method to simulate hybrid vibration experiment of a bridge structure. The bridge structure consists of foundation, pier and superstructure. The seismic response analyses were performed applying two different models: two-dimensional finite element model and lumped masses model. Either of the analytical results showed general agreement with the corresponding experimental result. The analytical method can be used as a practical alternative to evaluate the behavior of the soil-structure system.

Key Words : hybrid vibration experiment, bridge foundation, soil-structure system, numerical analysis, lumped masses model, two-dimensional finite element model

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では多くの橋梁に被害が生じた。その後、橋脚の補強は、より高い靱性を与えることを主眼として、外周に鋼板や炭素繊維を巻き付ける方法によって行われてきている。

一般に、これら補強方法の検討は、上部構造（橋脚－上部構造）と基礎構造（地盤－基礎構造）を切り離して行われている。しかし、地震時に上部構造が基礎構造に及ぼす影響、また基礎構造が上部構造に及ぼす影響が存在することは明らかであり、地盤、基礎、上部構造を含む構造系全体としての挙動を把握した補強方法の検討が望まれる。

本研究では、地盤、基礎、橋脚および上部構造を含む構造系全体としての挙動を実験的および解析的に解明し、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を最終目標としている。

本報では、このような観点から実施した地盤－基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験^{1),2)}を、a)杭基礎を1本の曲げせん断棒に置換し、地盤との相互作用ばねを付けた質点系モデルによるフレーム解析（以下多質点系モデルと称す）と、b)杭をビーム要素、地盤をソリッド要素にモデル化する二次元有限

要素解析（以下二次元FEMモデルと称す）の2種類の解析手法を用いてシミュレーション解析を行い、解析手法の有効性の検討を行ったものである。

2. 解析目的

本報では、土木研究所で実施されたハイブリッド振動実験^{1),2)}を対象にシミュレーション解析を行った。

ハイブリッド振動実験は、上部構造、橋脚、フーチングを数値モデルとし、図-1に示す実験模型を振動台で振動させるとともに、数値モデル部の応答変位を加振機（アクチュエータ）を介して入力することで、全体系の応答を再現する実験である。図-2に実験模型の諸元を示す。なお、実験の詳細は参考文献1),2)を参照されたい。

シミュレーション解析では、多質点系モデル、二次元FEMモデルともに、杭、地盤、およびフーチング、治具、ウエイトをモデル化し、モデル底面から振動台加速度を、加振機取り付け位置に加振機荷重を入力する。すなわち、実験では加振機により実験模型に変位を与えているが、これを荷重としてモデルに与える点を除き、振動台での実験をそのまま再現した解析を行う。

この結果と実験結果とを比較し、解析手法の有効性を検証する。

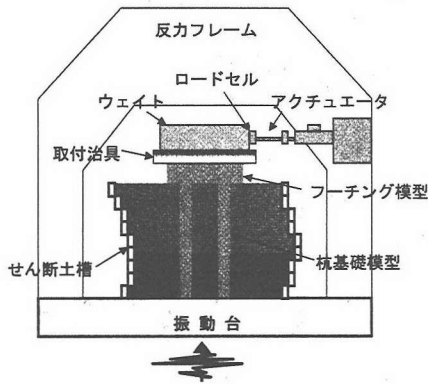


図-1 実験模型の概要

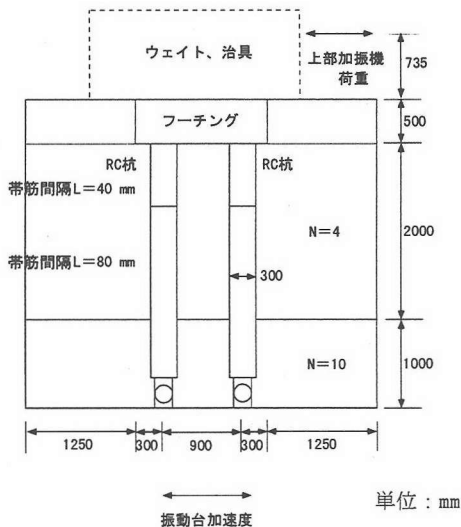
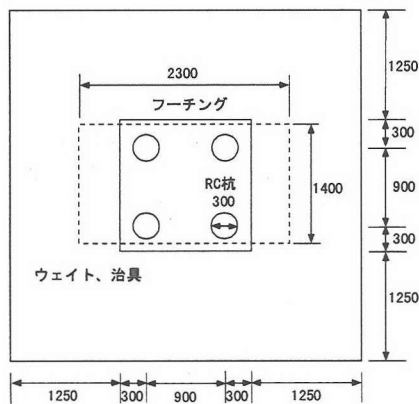


図-2 実験模型の諸元

3. 解析手法

(1) 多質点系モデル

本解析で用いる杭基礎の多質点系モデルは4本の杭を1本の曲げせん断棒に、フーチング、治具、ウ

エイトを剛ビームにモデル化し、杭の各質点には地盤との相互作用ばねを取り付けたモデルである。図-3に多質点系モデルの解析モデルを示す。

多質点系モデルの応答解析は、自由地盤系の応答解析(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入力するとともに、加振機の荷重をその作用位置に点加振することにより行う。

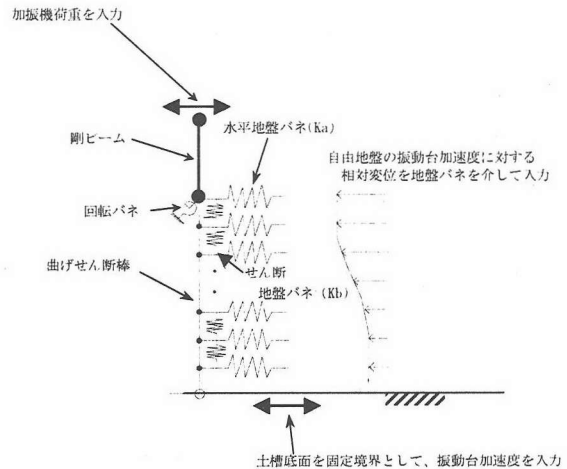


図-3 多質点系モデル

相互作用ばねは、自由地盤の解析から得られた等価剛性を用い、三次元薄層要素法によるリング加振解により求められる群杭全体の相互作用ばねを縮約して求める³⁾。さらに、この相互作用ばねには、杭と地盤との相対変位に伴う非線形性を考慮するため、Masing 則に従う Hardin-Drnevich モデルを用いる。

ここで、水平地盤ばね K_a の極限地盤反力は Broms による(1)式に示す値を、せん断地盤ばね K_b の極限地盤反力 $P_b^i \max$ は、地盤のせん断強度 τ_f に(2)式から求められる等価な支配領域 S を掛け合わせた(3)式とする。

$$P_a^i \max = 3 \cdot \sigma_0 \cdot K_p \cdot D \cdot l \cdot n \quad (\text{砂質土}) \quad (1)$$

$$K_b = G \cdot S / l \quad (2)$$

$$P_b^i \max = \tau_f \cdot S = \tau_f \cdot K_b \cdot l / G \quad (3)$$

ここに、 σ_0 : i 節点における初期鉛直有効応力

K_p : 受働土圧係数

$$= (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi')$$

D : 杭の直径

l : i 節点の質点重量に相当する杭長

n : 杭本数

ϕ' : 有効内部摩擦角

G : 等価せん断剛性

杭頭位置の回転ばねは、杭頭をピンとした群杭に対しフーチング位置を回転加振した解から算定し、線形とした。

これらの相互作用ばねは振動数ごとに算定されるが、振動台の加振振動数での値を用いることとした。

(2) 二次元FEMモデル

二次元FEMによる解析は、解析幅をフーチング奥行き幅とした平面ひずみ条件で、杭をビーム要素、フーチング、治具、ウエイトを剛ビーム、地盤をソリッド要素にそれぞれモデル化する。地盤にはMasing則に従う履歴特性を持つダイレイタンスーを考慮しない弾塑性モデルを適用した。ここで、塑性成分に関する定数は、多質点系モデルでのSHAKEに適用する $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係を満足するように設定した。また、せん断土槽に相当する側方境界を、左右の境界面の節点の自由度を共有するMPC境界とし、せん断土槽底面を固定境界としてモデル化した。応答解析は、振動台加速度と加振機荷重を同時に作用させることにより実施する。図-4にFEMモデルの解析モデルを示す。

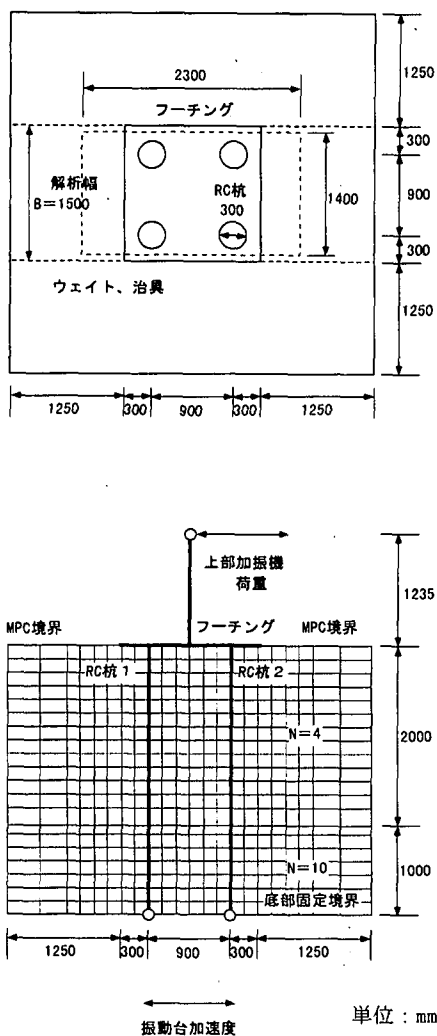


図-4 FEMモデル

4. 解析条件

(1) 検討対象実験ケース

振動台加振振動数 5.53Hz, 加振レベル 200Gal で正弦波加振した実験ケース (橋脚非線形特性 A¹⁾) を対象とした。振動台加振加速度, 加振機荷重の時刻歴を図-5, 6 に示す。

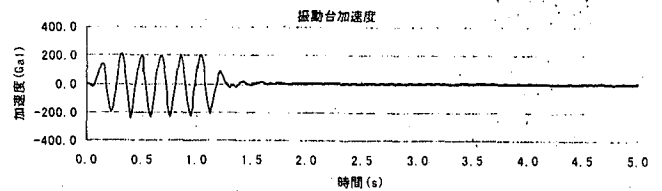


図-5 振動台加速度時刻歴

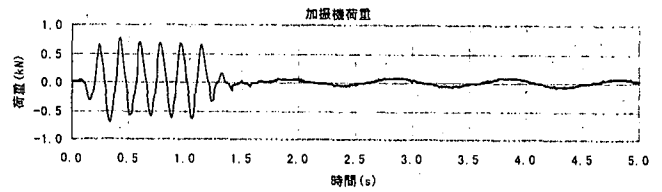


図-6 加振機荷重時刻歴

(2) 杭の非線形特性

杭には、常時軸力に基づく表-1 に示すトリリニアな $M-\phi$ 関係を持つ紡錘型の履歴特性を考慮した。

表-1 杭の定数

		RC 杭 (φ300)	
軸力	N_0	kN	
		22.7	
帯筋間隔	L	mm	
		40	80
弾性係数	E_c	kPa	
		2.550×10^7	
せん断弾性係数	G_c	kPa	
		1.109×10^7	
断面2次モーメント	I_e	m^4	
		4.171×10^{-4}	
断面積	A_e	m^2	
		7.069×10^{-2}	
ひび割れモーメント	M_c	kN*m	
		6.3	6.3
降伏モーメント	M_y	kN*m	
		19.4	19.7
破壊モーメント	M_u	kN*m	
		31.2	30.2
ひび割れ時の曲率	ϕ_α	1/m	
		5.924×10^{-3}	5.924×10^{-3}
降伏時の曲率	ϕ_y	1/m	
		1.143×10^{-2}	1.127×10^{-2}
破壊時の曲率	ϕ_u	1/m	
		1.572×10^{-1}	8.342×10^{-2}

(3) 地盤の動的変形特性

実験で測定している地盤物性は、単位体積重量, N 値, 間隙比 e である。これらの値から地盤の動的変形特性を推定した。地盤の $G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$ 関係として(4)式に示す拘束圧に依存した土木研究所提案式⁴⁾を、初期せん断剛性には、供試体作成時に測定した間隙比 e から(5)式に示す電力中央研究所提案式⁵⁾を用いた。

$$\left. \begin{aligned} [G/G_0]_{\sigma_m} &= [G/G_0]_{\sigma_m=100kN/m^2} \times \sigma_m^{m(\gamma)} \\ h &= 0.3(1-G/G_0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$G_0 = 2243 \times (2.17 - e)^2 / (1 + e) \times (\sigma_m)^{0.269} \quad (5)$$

ここで、 G_0 : 初期せん断剛性 (kN/m²)

G/G_0 : せん断剛性低下率

γ : せん断ひずみ

σ_m : 拘束圧 (kN/m²)

$m(\gamma)$: ひずみの関数である指数

h : 減衰定数

e : 間隙比

5. 解析結果

(1) 自由地盤の応答

ハイブリッド振動実験のシミュレーションに先立ち、推定した地盤の動的変形特性の妥当性を確認するため、自由地盤の応答をSHAKEにより求め実験計測値と比較した。解析結果を図-7に示す。なお、図-7には模型実験で計測したせん断土槽の加速度分布、および加速度を積分して求めた最大変位分布も示している。また、各深度での加速度時刻歴の解析結果と、実験での計測値の比較を図-8に示す。

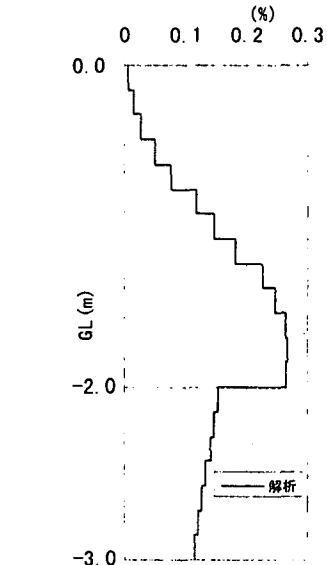
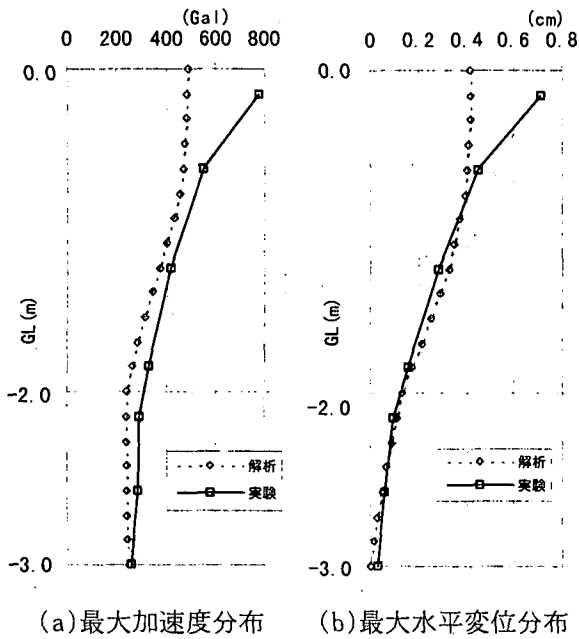


図-7 自由地盤の応答値の比較

これらの結果から、推定した地盤物性での解析結果は、ごく表層部分を除いて実験結果とよく一致している。ごく表層部分での相違は、土被りが小さいため、せん断土槽の当該層では土槽の重量が無視で

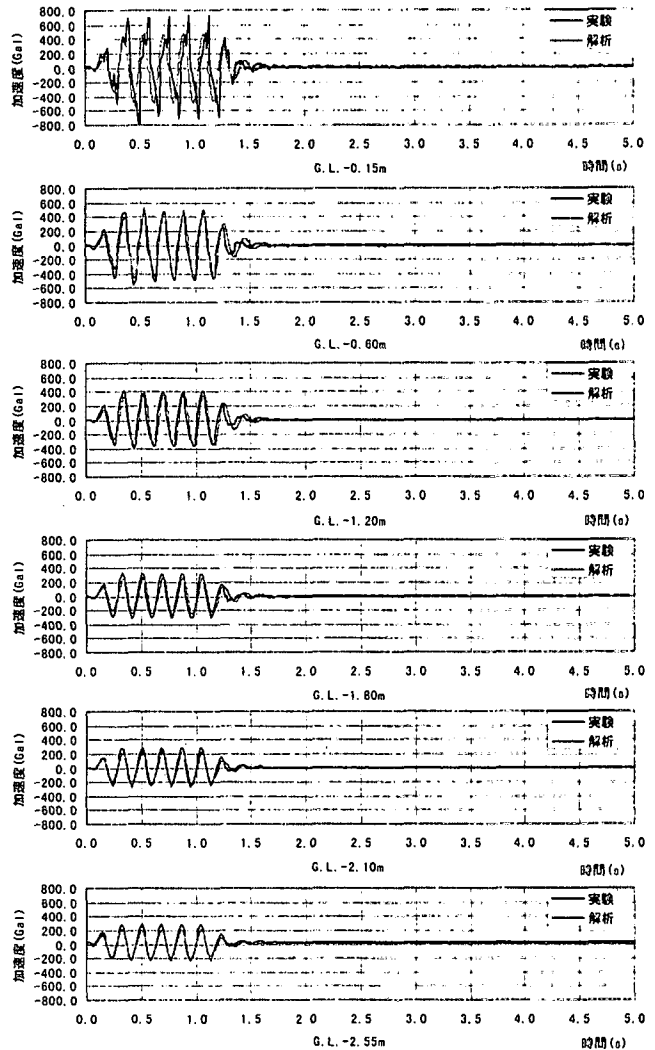


図-8 自由地盤の加速度時刻歴の比較

きなく、地盤のみの解析と条件が変化している可能性があること、拘束圧が極めて小さい領域では、SHAKEの適用範囲を越えるような強い非線形性を示す可能性があること等が原因であると考えられる。

以上の結果から、推定した地盤物性は、概ね実験結果を再現できており、妥当な設定であるといえる。

SHAKEにより求められた地盤の等価剛性を用い、地盤の固有値解析をした結果、1次振動数は5.41Hzであった。今回の実験では、振動台加振振動数が5.53Hzであり、地盤の1次振動数とほぼ等しい。すなわち、今回の実験では地盤が振動し易い振動数での実験であるといえる。

また、地盤のせん断ひずみは、GL-2.0mの土層境界部付近で最大となっている。

(2) シミュレーション解析結果

多質点系モデルおよび二次元FEMモデルによる解析で得られた杭の加速度時刻歴を実験での計測結果と比較して図-9,10に示す。また、杭の最大加速度分布、最大水平変位分布、最大曲げモーメント分布、最大せん断力分布の比較を図-11に示す。

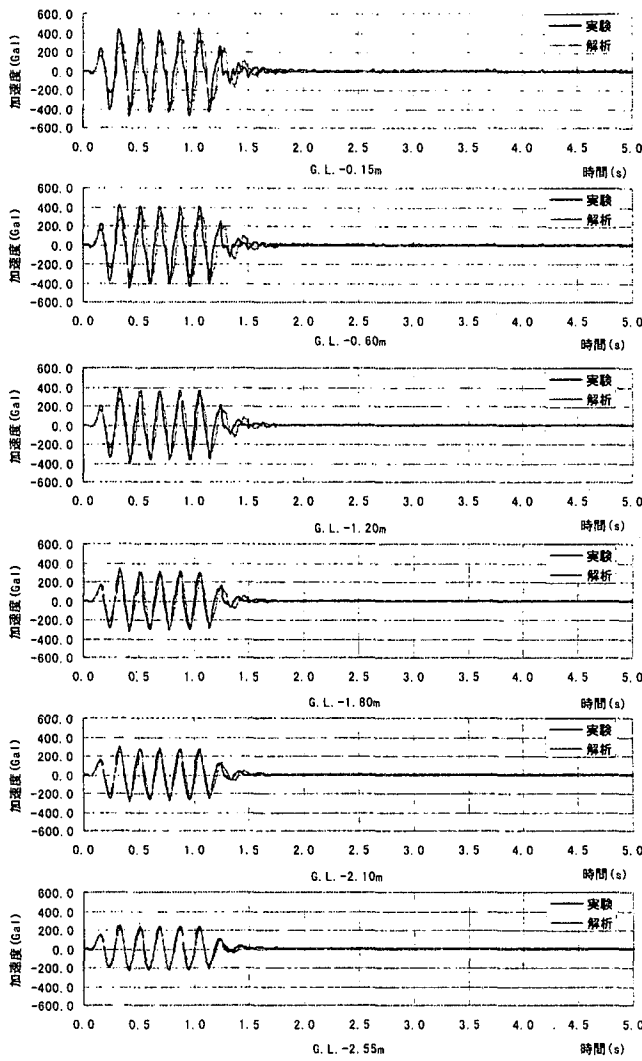


図-9 杭の加速度時刻歴の比較 (多質点系モデル)

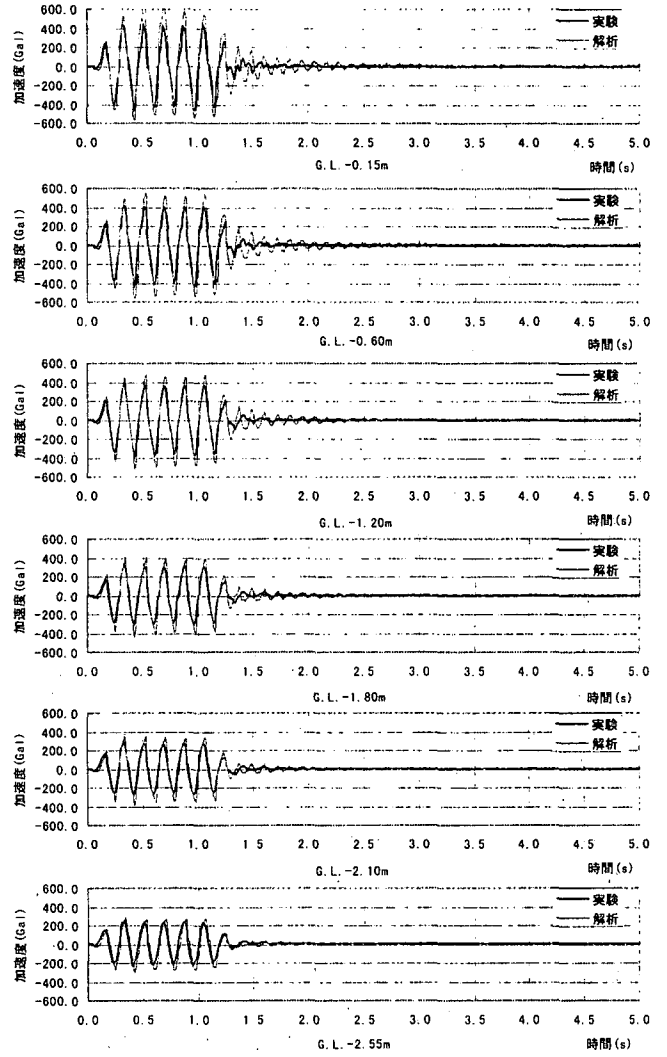


図-10 杭の加速度時刻歴の比較 (二次元FEMモデル)

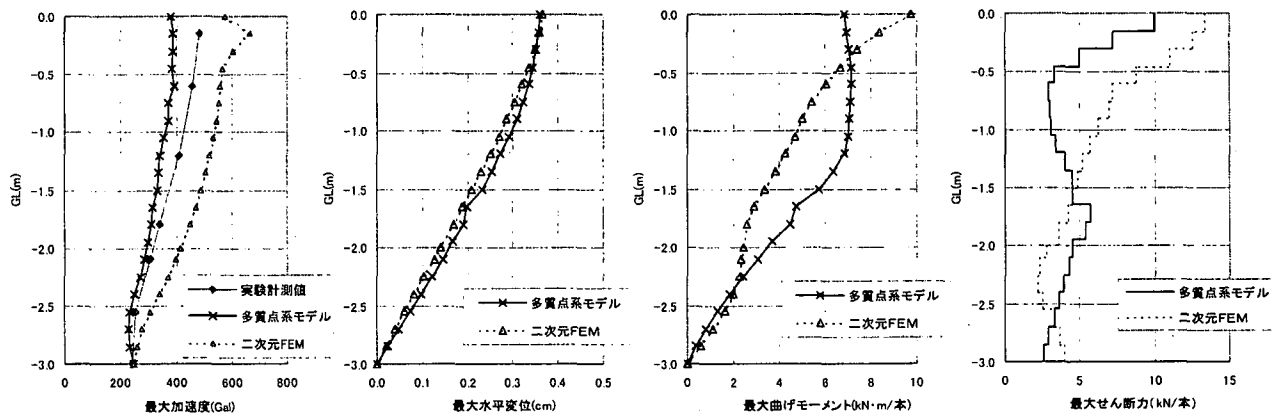


図-11 最大応答値分布の比較

加速度時刻歴図から、多質点系モデルでは実験結果より若干小さめの結果を、二次元FEMモデルでは若干大きめの結果を与えているが、ともに実験での杭の挙動を概ね再現できているといえる。

しかし、杭の断面力に着目すると、多質点モデルと二次元FEMモデルでは、断面力の分布形状に差が見られる。多質点系モデルのせん断力分布では、杭頭部の他に、土層境界（GL-2.0m）付近が大きくなっている。これは、自由地盤の応答解析結果で土層境界付近のひずみが大きかったことと整合的であるが、二次元FEMモデルでは、この傾向が明瞭でない。

図-12に、多質点系モデルでの杭の断面力を、地盤振動による断面力(Kinematic)と、フーチング、治具、ウェイトの慣性力および加振機荷重による断面力(Inertial)に分離した結果を示す。

これによると、多質点系モデルの断面力は、Kinematicな影響を強く受けていることが判る。また、多質点系モデルでのInertialな断面力の分布形状は、図-11に示した二次元FEMモデルの断面力の分布形状と類似している。すなわち、二次元FEMモデルでは、Kinematicな断面力の分布の特徴が明確に現れていないと言える。

これは、二次元FEMモデルで、杭をモデル化する際に等価な剛性を持つ矢板としてモデル化している点、解析モデルの奥行き方向に分布する地盤がモデル化されていない点で、杭と地盤との相互作用のメカニズムが、三次元薄層要素法に基づき相互作用ばねを算定している多質点系モデルと異なっていることが原因と考えられる。

ただし、二次元FEMモデルでも、杭の耐震性評価で重要な杭頭部の断面力は、多質点系モデルよりも幾分大きめに評価されること、杭の加速度時刻歴は、概ね実験結果を再現できていることから、橋梁全体系の挙動を把握する上で、実用的な手法であると考えられる。

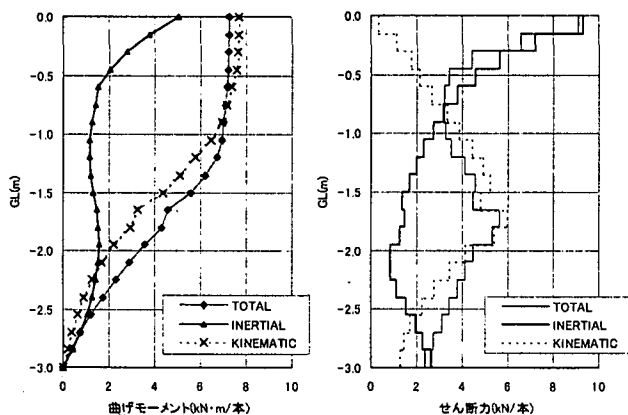


図-12 多質点系モデルの杭断面力の分解

6. まとめと今後の課題

本研究では、地盤-基礎-橋脚-上部構造からなる橋梁全体系の地震時の挙動を解明する解析手法として、多質点系モデルによる解析、二次元FEMモデルによる解析を取り上げ、その有効性の検討を、別途実施されたハイブリッド振動実験結果と比較することで実施した。

その結果、手法により杭と地盤の相互作用の評価が若干異なるが、両手法とも、実験での杭の挙動を概ね再現することができ、今後の、合理的な橋梁設計、さらには既設橋梁の最適補強方法を検討する際の実務的な方法となり得ることが明らかとなった。

なお、橋梁全体系の地震時の挙動を解明する目的で研究しているハイブリッド振動実験は、これまでの研究^{1),2)}で有用な成果が得られているが、実用化に向け更に検討を要するテーマである。今後、本研究で有効性が確認された解析手法を用い、ハイブリッド振動実験の有効性を検証するとともに、橋梁の最適補強方法の開発に資する資料を得るための解析を実施していく予定である。

謝辞：本研究は、平成12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分科会第3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いたします。

参考文献

- 1) 小林, 田村: 基礎-地盤系模型を用いたハイブリッド振動実験に関する研究, 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, 平成13年3月
- 2) 小林, 田村: 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, 平成12年3月
- 3) 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年5月
- 4) 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
- 5) (財)電力中央研究所土木技術研究所: 低拘束圧下の模型材料実験(岐阜砂等)の静的・動的特性, 電力中央研究所報告 研究報告: 380045, 昭和56年5月
- 6) 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, 平成12年3月
- 7) 孫 利民他: 杭基礎を有する橋脚の土槽加振実験模型のFEM解析, 土木学会第55回年次学術講演概要集, I-B450, 平成12年9月