

地盤とラーメン高架橋の連成系地震応答解析

吉澤 努¹・川神 雅秀²・湯川 保之³・和田 信良⁴

¹正会員 工修 大日本コンサルタント 技術本部耐震研究室 (〒550 大阪市西区北堀江一丁目22番19号)

²正会員 工博 大日本コンサルタント 技術本部耐震研究室 (〒550 大阪市西区北堀江一丁目22番19号)

³正会員 工修 日本道路公団 四国支社技術部構造技術課 (〒760 高松市朝日町4番1-3号)

⁴日本道路公団 四国支社技術部構造技術課 (〒760 高松市朝日町4番1-3号)

大規模地震動を受ける構造物の耐震設計では、塑性域での耐震安全性を確保した上で建設コストの低減をいかに図るかが大きな課題である。近年、電子計算機の処理能力は著しく進展し、これにより精度の高い解析モデルや解析法の採用が可能となりつつある。この結果は実挙動に近いシミュレーションへの道を開き、精度の高い設計を行うことで適正な安全度の確保と工事費低減が期待できる。本文では、コンクリートラーメン高架橋を対象とし、1995年兵庫県南部地震動規模の大規模地震による地盤と構造物の動的相互作用について、4種類の異なる非線形動的解析法による応答の比較結果を紹介する。

Key Words : seismic, soil-structure interaction, concrete rigid frame bridge

1. まえがき

都市内道路の整備形態として、中央分離帯部に単柱式橋脚のラーメン高架橋を計画し、高架下の土地空間を有効に利用する方法が採用されている。一方、阪神・淡路大震災の貴重な教訓が示唆するように、耐震安全性の観点からは、このようなトップヘビーの単柱式橋脚構造を採用する場合、高架下の二次的影響も含め慎重な技術対応が設計者には要求される。

本文では、地盤とラーメン高架橋の動的相互作用の影響を解析するために採用した4種類の異なる非線形動的解析法について、先ず解析モデルや解析法を紹介し、続いて1995年兵庫県南部地震動規模の大規模地震によるそれぞれの解析法の応答結果を比較し、考察を加える。

2. 非線形地震応答解析法の概要

一般に地盤と構造物の動的相互作用解析には、サブストラクチャー法と直接法が存在する。筆者らは、

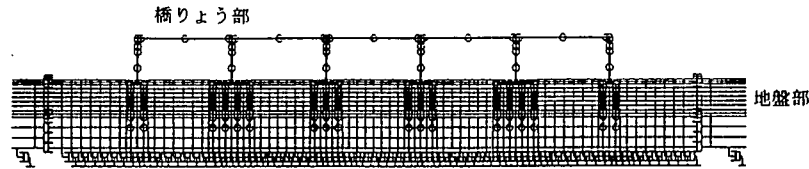
大規模地震動による非線形挙動下での地盤と構造物の動的相互作用を把握する目的で、地盤と構造物の連成系モデルに対して、二次元等価線形有限要素法（以下、二次元等価線形FEMと呼ぶ）、二次元弾塑性有限要素法（以下、二次元弾塑性FEMと呼ぶ）、三次元弾塑性格子骨組解析法（以下、三次元弾塑性格子解析法と呼ぶ）の直接法を適用し、解析法やモデル化の違いが動的相互作用におよぼす影響について検討した。

三次元弾塑性格子解析法は、地盤の土柱間を、ビーム要素とバネ要素で構成する格子骨組モデルに置換して解析するもので、水平方向の適当な範囲を1本の土柱に置き換え、隣接する土柱間を軸バネと非線形せん断バネで連結したモデルである。当該解析法は電子計算機が未発達な時期に有限要素法を補完する目的で提案された簡易解析法であり、有限要素法に比べ演算処理時間の省力化が図れる点に特徴がある。本文ではこの解析法を、地盤の非線形性を考慮した三次元の動的問題に適用した。

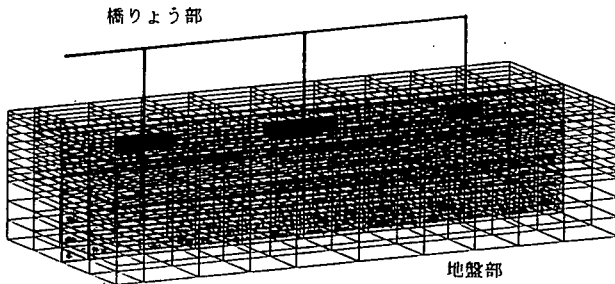
さらに参考として、橋りょうに対する動的解析の

表-1 解析法の概要

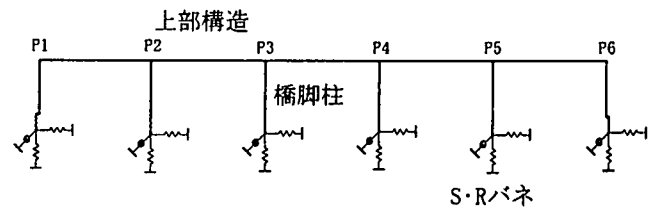
解析法	①等価線形有限要素法	②弾塑性有限要素法	③弾塑性格子解析法	④弾塑性骨組解析法
次元	二次元	二次元	三次元	二次元
構造物モデル	ビーム要素	ビーム要素	ビーム要素	ビーム要素
地盤 モデル	ソリッド要素	ソリッド要素	ビーム要素(格子型)	基礎にS・Rモデルを考慮
構造物履歴特性	等価線形	剛性低下型武田モデル	剛性低下型武田モデル	剛性低下型武田モデル
地盤 履歴特性	等価線形	Ramberg・Osgoodモデル	標準トリニアモデルで近似	—
境界 処理	粘性境界	粘性境界	粘性境界	—
処理 領域	周波数領域	時間領域	時間領域	時間領域



(a) 二次元FEM (①,②)



(b) 三次元弾塑性格子解析法 (③)



(c) 二次元弾塑性骨組解析法 (④)

図-1 解析モデルの概念図

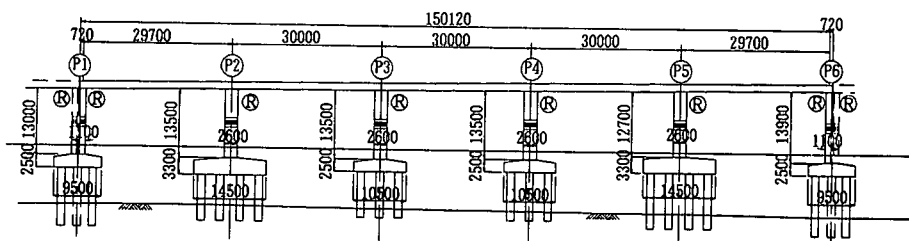


図-2 解析橋りょうの一般形状

単位: mm

表-2 構造諸元

橋りょう形式	5径間連続コンクリートラーメン橋		
支間割	5@30.0m	幅員	15.0m
地盤種別	Ⅱ種地盤	基礎	場所打杭

表-3 地盤定数

土層区分	深度 GL-m	N値	湿潤密度 g/cm ²	S波速度 m/s	初期せん断剛性 kgf/cm ²
Bn	1.5	4	1.7	140	340
Ag	6.7	15	1.8	220	890
Ac ₃	9.6	5	1.6	170	470
Dc ₁	11.6	16	1.8	250	1150
Dg ₁		50	2.0	510	5300

際多用されている、橋体部をビーム要素、基礎部は並進・回転バネ要素で構成する骨組にモデル化した弾塑性骨組解析（以下、二次元弾塑性骨組解析法と呼ぶ）との比較も行った。各解析手法の概要を表-1に、また解析モデルの概念図を図-1に示す。

3. 地盤と構造物の動的相互作用の解析

解析は図-2、表-2の構造諸元を有する5径間連続コンクリートラーメン橋を対象とした。地質構成は沖積層、洪積層ともに粘性土と砂礫土が卓越する地盤であり、解析では表-3に示す地盤定数を使用した。また、地盤のひずみに依存した動的変形特性は文献^{1),2),3)}を参考とした。なお工学上の基礎面はGL -15m付近に存在する。

入力地震波はJR西日本鷹取駅で観測された1995年兵庫県南部地震波を、一次元重複反射理論に基づく解析ソフト (SHAKE) により基礎位置に引き戻し、この地震波を解析対象地盤の工学的基礎に入力した。図-3は基礎位置での入力地震波を示す。なお二次元弾塑性骨組解析法 (④) のみは、地表面位置での地

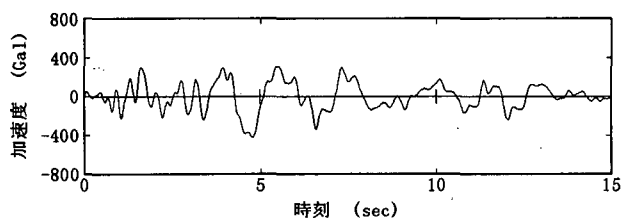


図-3 基盤位置での入力地震動 (2E)

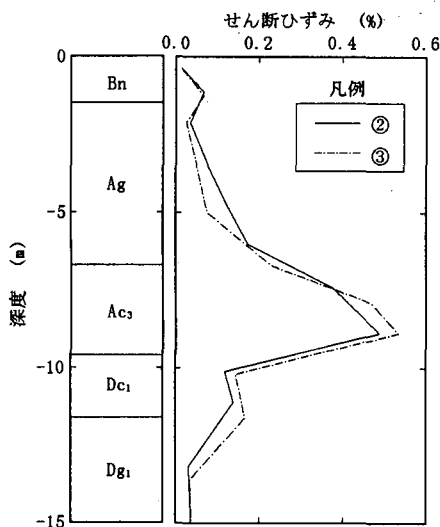


図-4 地盤のせん断ひずみの深度方向分布

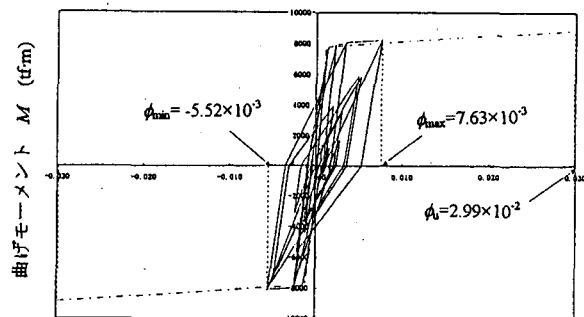
震波を入力波とした。

構造物の減衰定数は上部構造と橋脚躯体の弾性部分は5%，橋脚躯体や基礎部の塑性領域部は2%，また二次元弾塑性骨組解析法 (④) で使用した杭基礎部の並進と回転バネ (S・Rバネ) には20%の粘性減衰を考慮した。

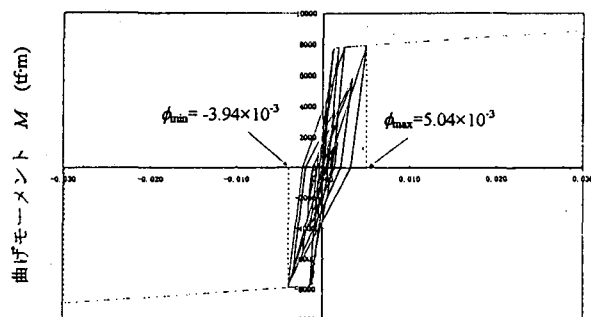
図-4は、一次元の地盤モデルに対して弾塑性FEM (②) と弾塑性格子解析法 (③) とで求めた自由地盤の応答値 (最大応答ひずみ) の深度方向分布を示す。応答値は両者でほぼ同じ分布をしており、地盤のせん断ひずみの最大値は0.5%程度であった。

図-5はラーメン橋P2橋脚の柱基部，図-6はP2橋脚の杭基礎杭頭部における，曲げモーメント M —曲率 ϕ 関係の履歴ループを示す。橋脚柱基部の応答値は，いずれの解析手法 (②,③) による結果も降伏曲げに達しており，ヒステリシスを描いているが，発生最大曲率は終局曲率に対して余裕が見られる。解析手法で比較すると，解析②の方が応答曲率が大きくなっているが，両者の履歴ループはほぼ似通っている。杭頭の応答値も，両者の解析結果が似通っており，いずれも降伏曲げモーメントに達していない。

図-7は，P4橋脚柱基部における応答波の加速度応

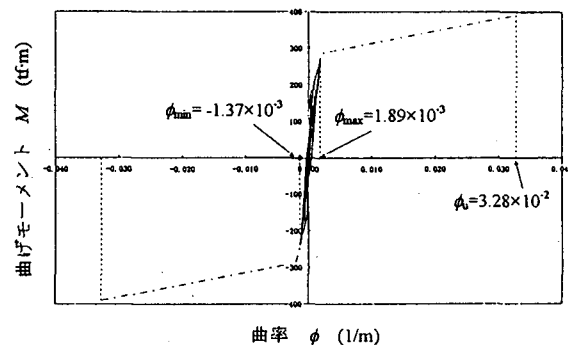


(a) 二次元弾塑性FEM (②)

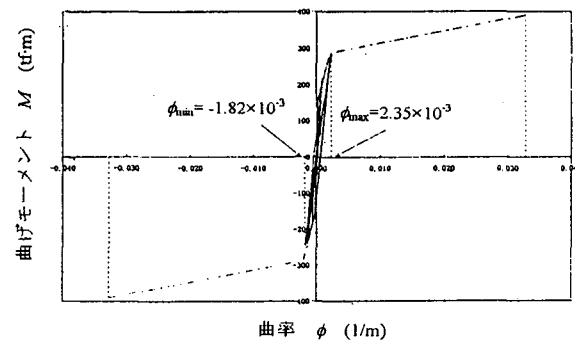


(b) 三次元弾塑性格子解析法 (③)

図-5 P2橋脚柱基部の M - ϕ 履歴



(a) 二次元弾塑性FEM (②)



(b) 三次元弾塑性格子解析法 (③)

図-6 P2橋脚杭頭部の M - ϕ 履歴

答スペクトルを示す。◎は自由地盤地表面の地震波であり，この値と各解析法 (①②③) より求めた応答スペクトルの差が動的相互作用の影響を示している。図中より0.6秒までの短周期側の範囲で加速度

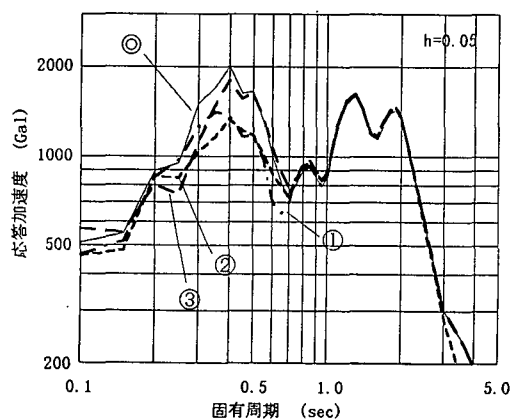


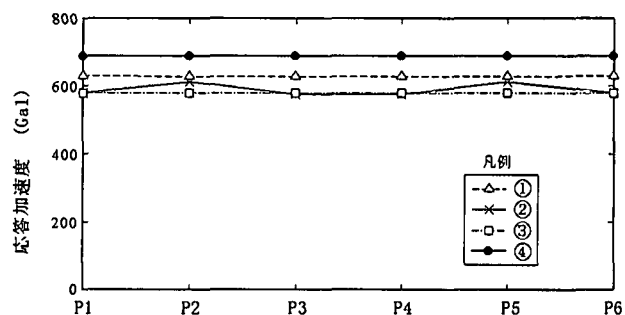
図-7 加速度応答スペクトル (橋脚基部地震波)

応答の低下が確認できる。この傾向は各解析法でもほぼ同様である。これは地盤の卓越周期が0.3~0.5秒付近に存在し、さらにせん断ひずみが最大0.5%程度の比較的安定した地盤であることによる。大規模地震動による構造物の非線形挙動は長周期領域で発現するため、当該解析例では相互作用による構造物の応答の低下は余り見込めない。

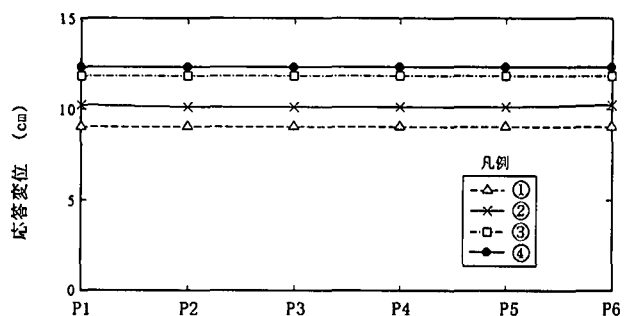
図-8は、各橋脚位置における最大応答値を上部構造、橋脚柱基部に着目して示したものである。上部構造における加速度、水平変位は、二次元弾塑性骨組解析法(④)の応答値が最大であり、設計値はやや安全側の結果を与える。また二次元等価線形FEM(①)は、橋脚部を降伏曲げ剛性と仮定しているため弾性応答の結果を出力している。このため各解析法の中で、水平変位は最も小さく、逆に脚柱基部の曲げモーメントは最も大きい。なお、脚柱基部の加速度応答波を、橋りょう部のみに着目した骨組モデルの脚柱基部に入力して求めた応答結果を⑤で示す。他の解析法による応答値は、⑤も含めて概ね同様な結果が得られた。また二次元と三次元モデルの応答結果については本解析例では顕著な差は生じていない。

4. まとめ

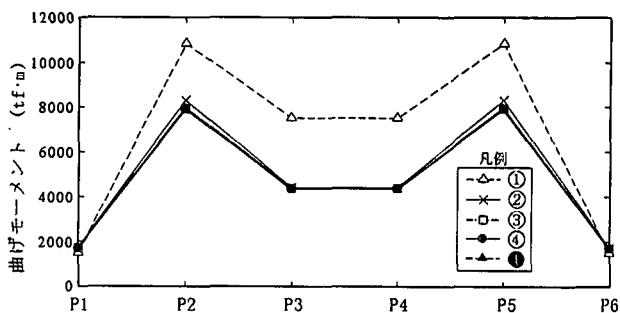
4種類の異なる非線形動的解析法により、ラーメン橋の地盤-構造物系の動的相互作用解析を行った。動的相互作用の影響は、弾塑性FEMおよび弾塑性格子解析法において、上部構造の応答値や橋脚柱基部の応答スペクトルに若干の低減が観察された。一方、橋脚の断面力には顕著な違いは見られなかった。



(a) 上部構造の加速度応答



(b) 上部構造の変位応答



(c) 橋脚下端部の曲げモーメント応答

図-8 各橋脚位置における最大応答値

近年、電子計算機の演算処理能力は著しく改善し、これにより工事費低減をにらんだ解析モデルの精度向上を求める気運がある。今後ともこの方面での解析事例の蓄積がますます必要となろう。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：地盤の地震応答特性の数値解析法-土木研究所資料，第1778号，1982。
- 2) T. Konno, M. Hatanaka, K. Ishihara, Y. Ibe, S. Iizaka : Gravelly Soil Properties Evaluation by Large Scale In-situ Cyclic Shear tests, *ASCE Geotechnical Special Publication* 44, p.177-200, 1994.
- 3) 大岡弘，時松孝次，鈴木善雄，後藤茂，畑中宗憲，西尾伸也，牧原依夫，大原淳良：砂礫地盤の原位置液化強度の評価法に関する研究，建設省建築研究会報告，No.133, 1993。
- 4) 松田哲夫，鶴飼恵三，若井明彦，三浦聡，川神雅秀：三次元非線形地震応答解析による橋脚と基礎杭の耐力に関する検討，第31回地盤工学研究発表会講演集，pp.1783-1784，平成8年7月。