

## 兵庫県南部地震における高架橋の破壊を地盤との関係で究明

岡山大学環境理工学部教授 竹宮宏和

岡山大学大学院工学研究科 岸田健太郎、江草弘章、伊吹善仁

本論文は、兵庫県南部地震での阪神高速神戸線の深江地区のピルツ高架橋の倒壊に至った原因究明を当該地の地盤増幅を経た入力地震動と高架橋の動特性に注目して調べたものである。解析には対象構造系（18径間ピルツ高架部とその両端の1径間ずつ）を3次元フレーム構造の多点入力系としてモデル化をしている。地形/地盤の条件による地震波の空間分布に関しては、1次元あるいは2次元解析法により求めている。杭基礎の杭頭インピーダンス評価にはリング杭法を採った。地震波の周期特性と高架橋の固有周期、モード形状との関係で、橋軸方向、橋軸直角方向の応答性状を捉えて、倒壊への過程を推論している。

### 1. まえがき

兵庫県南部地震で、高速道路高架橋が倒壊、損壊して土木構造物の耐震設計に衝撃を与えた。阪神高速道路3号神戸線の深江地区に焦点をあてると、なぜピルツ高架橋が壊れ（図1参照）、その周辺の民家が破壊から免れたか大きな疑問が投げかけられた。そこで本研究では、高架橋のようなトップ・ヘヴィーな構造物の動的挙動を地盤との相互作用で捉え、線形解析ではあるが、地震時の倒壊へのいとぐちを探ることとする。

#### (1) 阪神高速道路3号神戸線

地震動に与える表層地盤の影響は大きく、そのため基盤入力の下で不整形沖積地盤の増幅特性を評価する。深江地区の地盤構造は、図2に示すように、軟弱層が広がっている。阪神高速神戸線（3号線）の倒壊区間は、この地盤上に図に示した位置で建設されている。地盤種別は第Ⅱ種地盤で砂層または砂礫層からなる。

阪神高速道路3号神戸線の倒壊区間は橋長635mの18径間プレストレスコンクリート高架橋である<sup>1)</sup>。橋脚構造は1本柱円形断面のピルツ構造形式である。橋脚躯体の高さは、神戸側から大阪側に向かって高くなっている。基礎構造は場所打ちコンクリート杭基礎である。

#### (2) 高架橋の被災状況

現地の証言者によれば、ピルツ高架橋の倒壊は大阪寄りの方から始まり、順次西側に続く橋脚が引きづられて“ふぁーと”全径間にわたっての倒壊となった。P126からP142に至る17本の橋脚が図1に示すようにおおむね中間高さで破壊し、内部のコンクリートまで砕け、鉄筋の座屈・破断が生じた。それは、場所的には、軸方向鉄筋の段落し位置付近で著しかった。

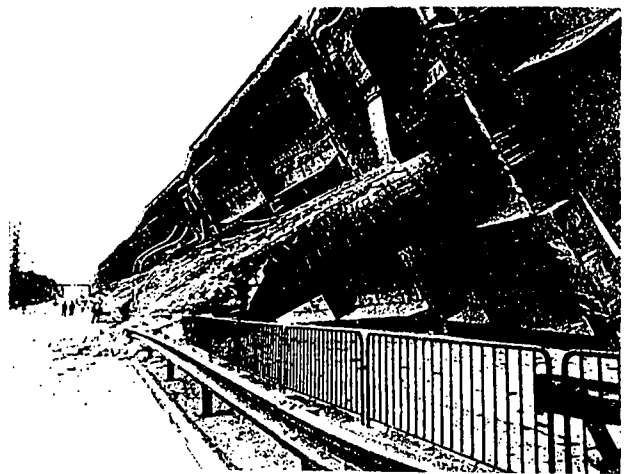


図1 阪神高速道路3号神戸線倒壊現場

キーワード：高架橋、地震応答、地盤との動的相互作用

岡山大学環境理工学部

岡山大学大学院工学研究科修士過程

## 2. 阪神高速道路深江地区の地盤増幅

対象高架橋の地盤増幅効果を考えた地震動を評価するため、表層部をモデル化して入射波の想定の下で2次元解析、あるいは1次元解析を行った。使用した物性値は同図に記入してある。表層地盤の内部減衰は5%とした。面内解析ではSV波入力のもとで2次元シミュレーションをBEM-FEMハイブリッド解析から、SH波入力のもとでは1次元シミュレーションを重複反射理論から実施した。その結果、地盤構造を反映した地表面の地震動は芦屋川寄りの表層厚の大きい方がより増幅される結果となった。図3は神戸海洋気象台の記録波形のNS成分をSH波と仮定したときの地表面の変位成分と、同記録のEW成分をSV波と仮定したときのそれを描いている。表層の厚さにより僅かの差が現れているのが判る。

## 3. 高速道路高架橋の地震応答

### (1) モデル化

対象高架橋は支間中央部にゲルバー吊り桁を有する2ヒンジ形式の設計(図4参照)の18径間であったが、施工においてヒンジ部は連結構造とされたので、動的解析においてのモデル化では全18径間を連続高架橋として仮定した。高架橋を3次元骨組み構造によって表現した。本解析ではピルツ高架橋の両端の1径間ずつも取り込んでいる。杭基礎部は杭頭ばねを評価してフーチング底面に配置した。<sup>2)</sup>地震応答解析は橋軸直角方向と橋軸方向の地震入力動の下で行った。

### (2) シミュレーション結果と考察

固有振動モード： 図5に全体系の固有振動モード形状を最初の6次までを示す。これより低次の1次から3次までの固有振動モードは主に東端の数スパンのねじれ応答に関係したものであり、4次モード

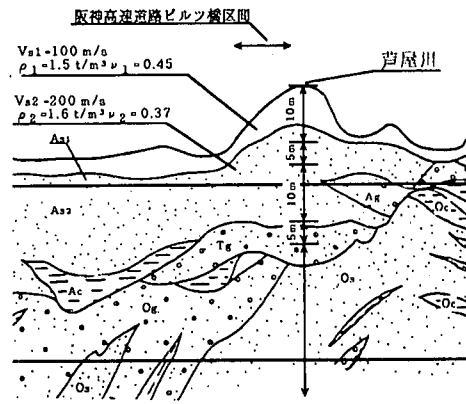
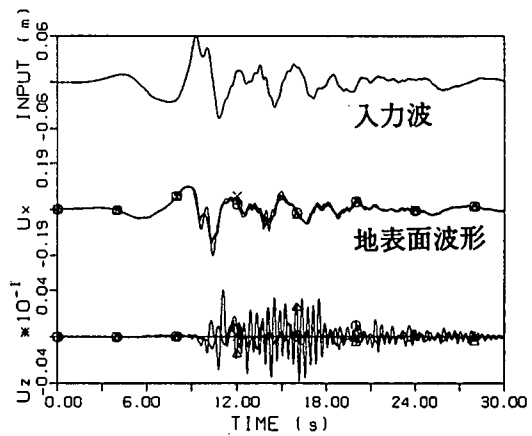
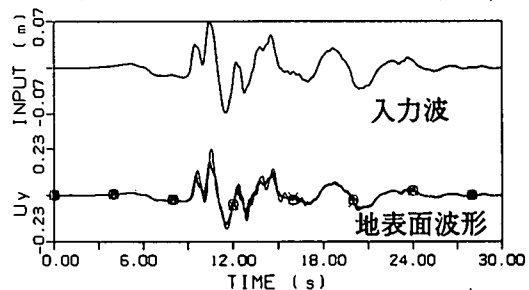


図2 高架橋地点の地盤状況図



(a) SV波  
(神戸海洋気象台記録 EW 成分使用)



(b) SH波  
(神戸海洋気象台記録 NS 成分使用)

図3 入力地震動

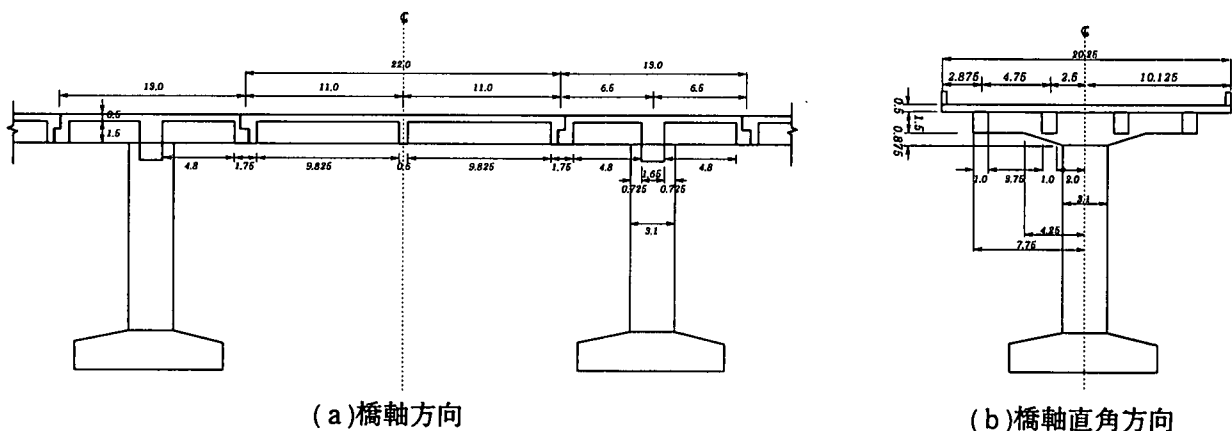
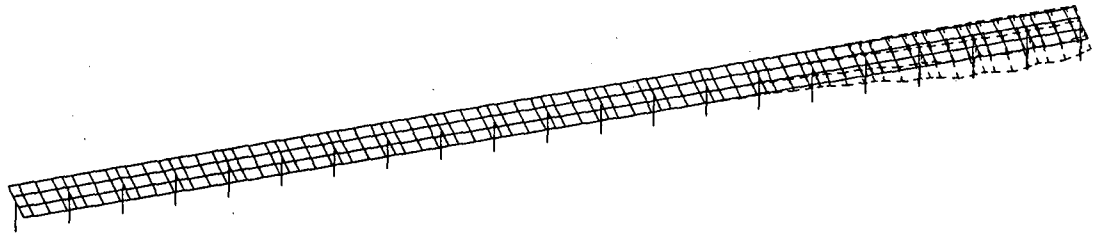
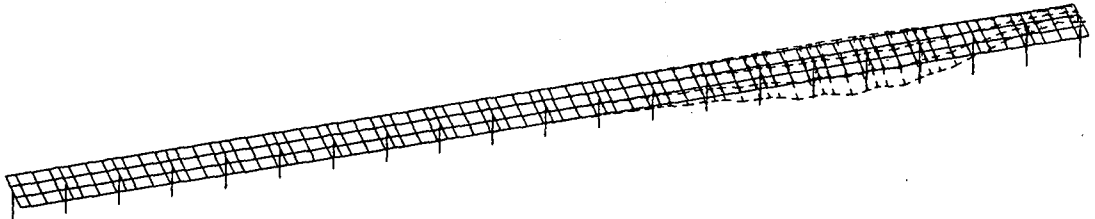


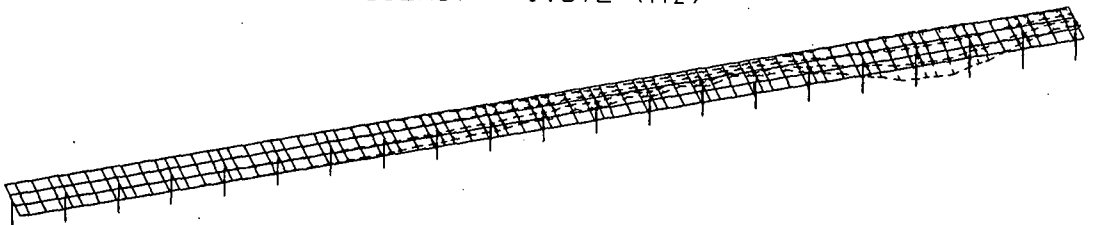
図4 対象高架橋



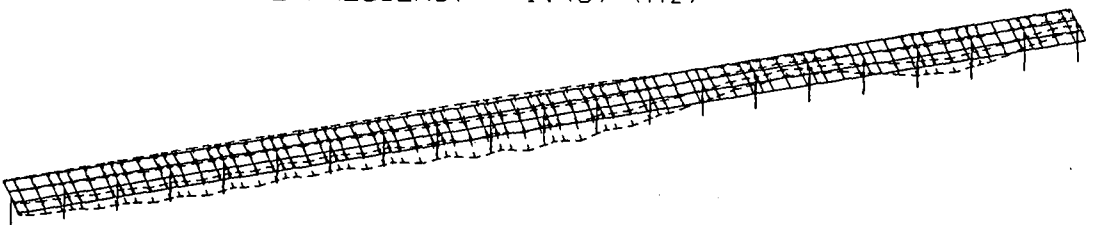
MODE 1, NATURAL FREQUENCY = 1.275 (Hz)



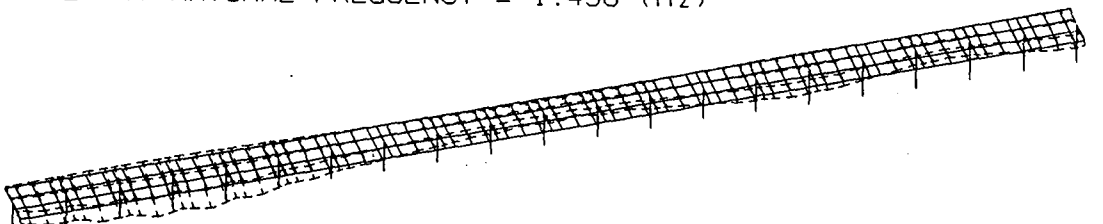
MODE 2, NATURAL FREQUENCY = 1.372 (Hz)



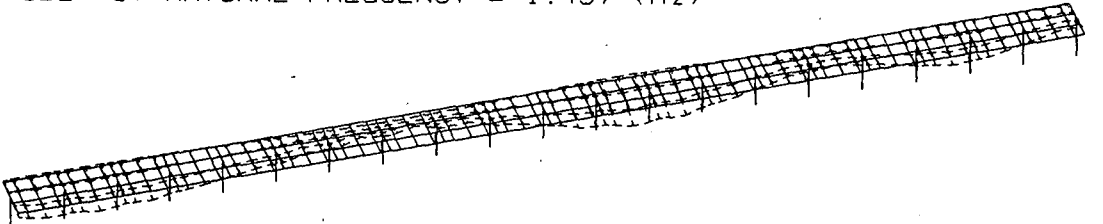
MODE 3, NATURAL FREQUENCY = 1.457 (Hz)



MODE 4, NATURAL FREQUENCY = 1.490 (Hz)



MODE 5, NATURAL FREQUENCY = 1.497 (Hz)



MODE 6, NATURAL FREQUENCY = 1.538 (Hz)

図5 対象高架橋の固有振動モード

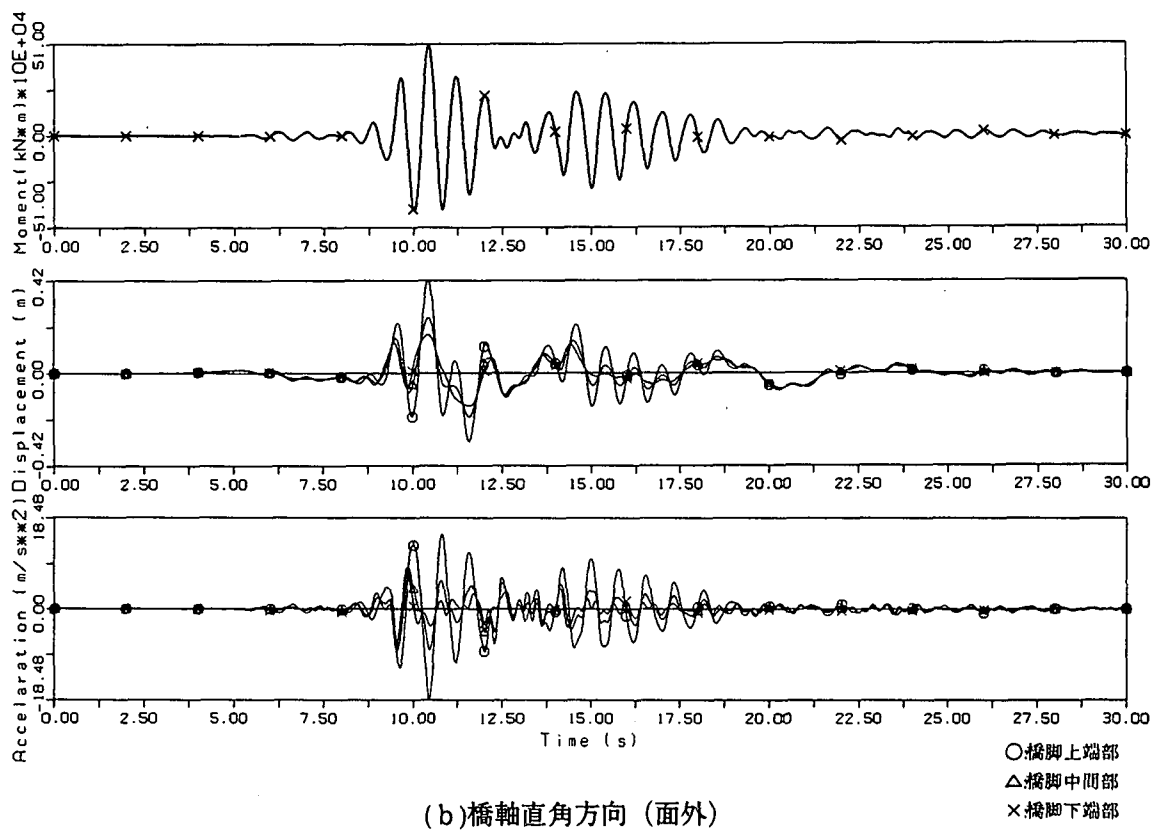
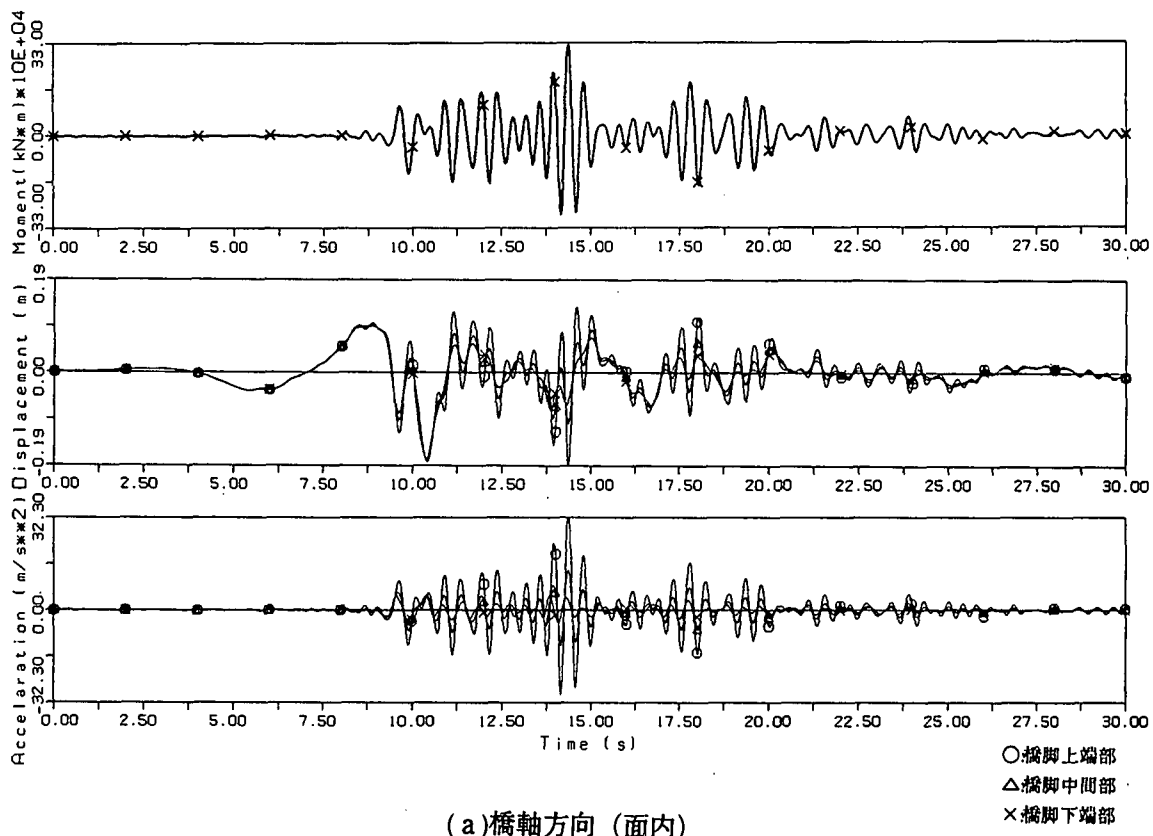
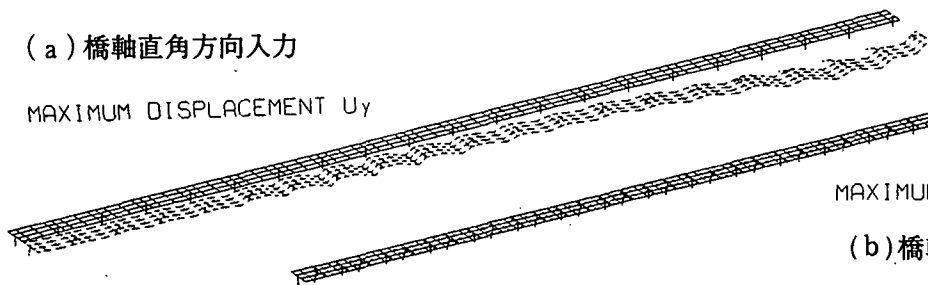


図6 ピルツ橋東端橋脚の時刻歴応答

(a) 橋軸直角方向入力

MAXIMUM DISPLACEMENT  $U_y$



MAXIMUM DISPLACEMENT  $U_x$

(b) 橋軸方向入力

図7 最大変位

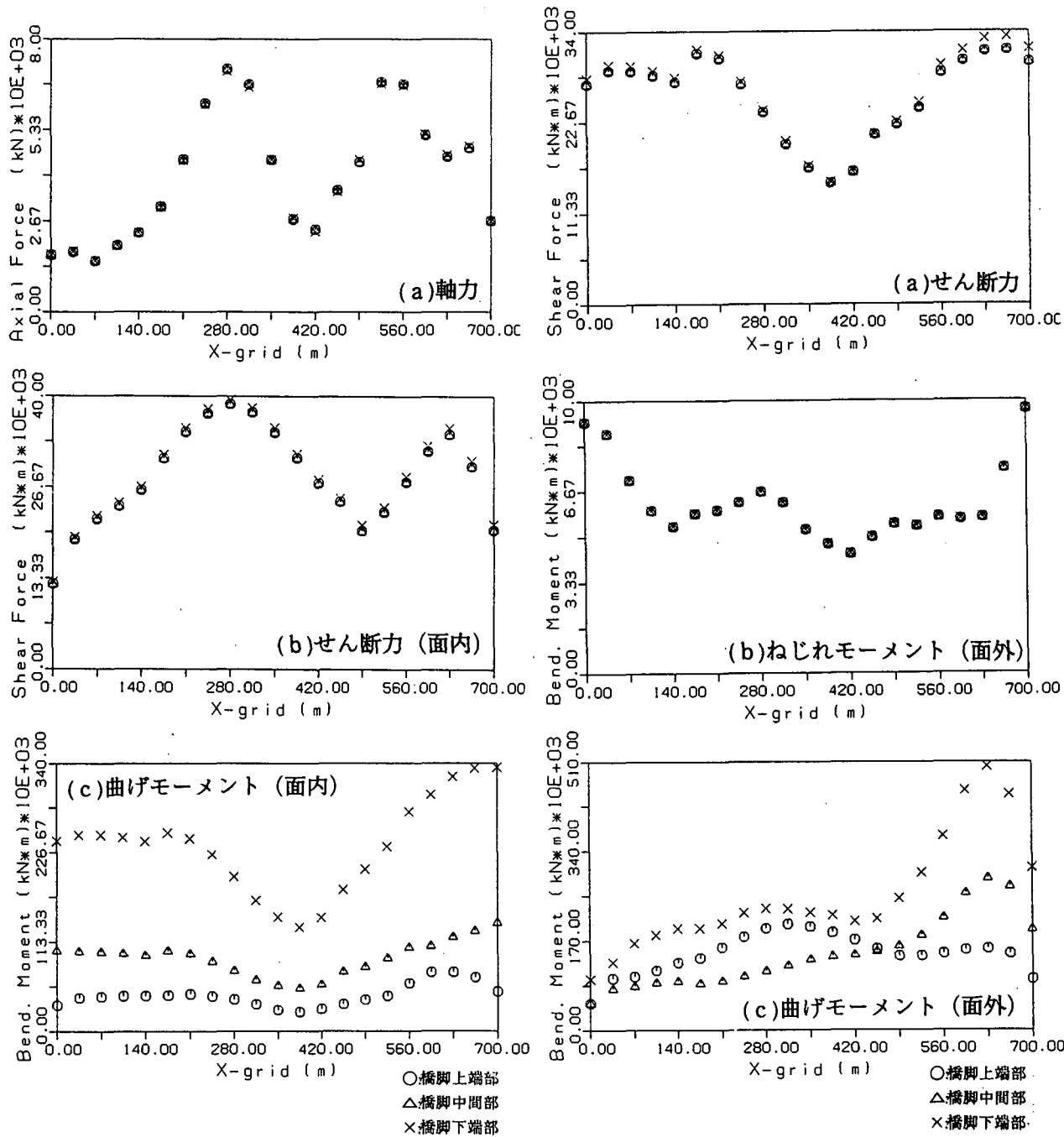


図8 橋軸方向入力による橋脚の最大断面力分布

図9 橋軸直角方向入力による橋脚の最大断面力分布

は中央の数スパンのねじれ応答に、そして5次、6次の振動モードは西端の数スパンのねじれ応答に関係したものであることが明瞭である。対象橋梁の橋軸直角方向の振動モードは多スパンにわたって全体系がねじれ振動するような応答性状を示している。橋軸方向の挙動が現れてくるのは高次振動モードである。軟弱表層地盤も東端の数スパンのところがその他の箇所より深くなっており、さらに橋脚高さは東端の大阪寄りの方に徐々に高くなっているのを反映したものとなっている。固有振動数は低次振動モードで0.6~0.7秒台であることから地盤の震動との共振が関係する範囲である。

地震応答：神戸海洋気象台の記録に基づいて、振動数領域の応答を計算し、その逆フーリエ変換から時刻歴応答を求めた。図6はそのときのピルツ高架橋の東端橋脚の応答時刻歴を描いたものである。橋軸直角方向の応答が橋軸方向の応答より先に最大応答値を示すことが分かる。橋軸直角方向（面外）では最大変位は橋脚下端と上端では相対的に20cm程も現れ橋脚上端の加速度は2,000galにも達しており、そのときの縁端曲げ応力は、全断面の計算で1,754 kg/cm<sup>2</sup>である。これにより橋脚下端の面外曲げモーメントは鉄筋コンクリート部材の破壊域に大きく入っている。一方、橋軸方向の応答は、橋軸直角方向に比べて短い周期でしかも遅く最大値に達する。このときの最大加速度は橋軸方向応答より高く、3,000galにも達する。しかし橋脚下端の曲げモーメントは橋軸直角方向のそれより小さい。ところで時間的には橋軸直角方向において既に東端橋脚が破壊域に入っており、これにより西側の他の橋脚は影響を大きく影響を受けるので、その後の線形応

答は意味を持たない。

図7は変位の最大値分布を全スパンにわたって描いたもので、これよりピルツ橋の東端が大きく変位しているのが分かる。

図8は橋軸方向入力による橋脚の断面力の分布を全スパンにわたって描いたものである。図9は橋軸直角方向入力による最大断面力の分布を示す。橋軸方向、橋軸直角方向のいずれの応答方向に対してもピルツ橋の東端の全スパンにおいて非常に大きい曲げモーメントが現れており、これ以外の他のスパンのところと比べて約2倍となっている。面外曲げモーメントは面内曲げモーメントの約1.5倍大きい。

以上のことから、ピルツ高架橋部がその東端橋脚の破壊から始まり、それに引きずられ格好で最西端橋脚まで破壊が及んだと推論できる。

#### 4. むすび

兵庫県南部地震における阪神高速道路深江地区の高架橋の倒壊に関して、同地区の地盤構造による地震波の増幅、基礎構造と上部構造との動的相互作用解析から、線形解析ではあるが、地震時の発生断面力の場所的な差から東端スパンから始まった橋軸直角方向への倒壊の状況を推論できた。

#### 参考文献

- 1) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会、兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査、中間報告書、平成7年3月
- 2) 竹宮、片山：フレキシビリティ法による群杭基礎の動的解析と設計への提案、土木学会論文集、No.489/I-27, pp.207-215, 1994.

## Soil effects on a highway viaduct during the Hyogo-ken Earthquake

Hirokazu Takemiya, Kentaro Kishida, Hiroaki Egusa and Yoshihito Ibuki

This paper investigates the collapse mechanism of the Hanshin Expressway viaduct at Fukae section in view of the soil effects which reflect the topography at the site. The total system of the 18 spans with additional one span at the both sides were modeled for the matrix structural analysis with soil springs attached at the foundations. The different input motions are imposed at the respective footings that are computed through site analysis either one-dimensional or more complicated two-dimensional wave propagation from the base to the surface. The seismic waves recorded at the JMA Kobe station are used for the along bridge axis motion or perpendicular to it by selecting the appropriate components as input motions. Discussions are made through the simulation results to answer the question why the collapse started with the far east side piers followed by those west side others successively.