

横ずれ断層を横断する連続高架橋の応答挙動解析

Analysis of seismic response behaviors of viaduct crossing a strike slip fault rupture

原田隆典*, 王宏沢**, 野中哲也***, 山下典彦****

Takanori Harada, Koutaku Oho, Tetsuya Nonaka, Norihiko Yamashita

*工博, 宮崎大学教授, 工学部土木環境工学科 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

** 宮崎大学大学院学生, 工学研究科土木環境工学専攻 (〒889-2192 宮崎市学園木花台西 1-1)

***ヤマト設計(株), 企画開発部部长 (〒460-0002 名古屋市中区丸の内 1-17-6 ナカトウ丸の内ビル 2F)

****工博, 神戸市立工業高等専門学校助教授, 都市工学科, (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

Because the seismic wave motions near a fault are quite complex in time and space by showing the vortexes of waves, it may be considered to be appropriate that a response analysis of long structures is performed on the basis of three dimensional model of them. In this paper a three dimensional nonlinear response analysis of viaduct crossing a strike slip fault is performed, and its results are compared with those of the two dimensional model. The input seismic wave motions are simulated by a stiffness matrices based formulation of seismic waves in stratified media with an extended seismic source.

Key Words: seismic wave motions, fault, earthquake response, long bridge.

1. まえがき

構造物の耐震設計の実務や研究においては、これまで、海洋性地震に対する地震対策が主流だったこともあり、直下地震に対する構造物応答に関する研究は比較的少ない。このような研究の現状には、比較的頻繁に発生する海洋性地震による構造物の被害経験と強震動記録の蓄積が、直下地震によるものよりも圧倒的に多いこと並びに、経験的方法に依存しがちな実務設計の特質という2つのことが大きく関係している。したがって、直下地震に対する合理的な耐震設計をするためには、断層近傍の強震動記録と構造物被害経験の不足を補うために、理論的方法を重視した研究の蓄積が不可欠である。

本論文は、地震の物理に基づく地震動の波形合成とその合成波形による構造物の非線形応答解析法を使った理論的方法によって、断層が地表面に現れる場合と断層上に 0.5km 厚、1.5km 厚の表層地盤がある場合の横ずれ断層を横断する連続高架橋の地震時挙動を調べ、その内容を述べるものである。本論文の背景と目的を以下に述べる。

本研究で取り扱う連続高架橋のような線状の構造物には、多地点から振幅特性、位相特性、振動数特性等の異なる地震波が入射されるため、このような地震動の場所的違いを定量化し、それによる応答挙動を把握しなければならない。断層近傍の地震動に関する理論的研究もなされているが^{2), 3), 6), 7), 8)}、これまでの研究は、観測記録に基づく地震動の時空間分布特性が主流であったこともあり、直下地震など観測記録の少ない断層近

傍における地震動の時空間分布特性や、線状構造物の応答挙動に関してもわからないことが多い。

そこで著者は、震源断層破壊—地盤応答—構造物応答という一連の物理現象を一貫してとらえて構造物の地震時挙動を解明することを目的に、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに基づいて、断層永久変位を含む地震動波形を理論的に合成し、断層近傍の地震動の時空間分布特性と仮想的な連続高架橋の応答挙動を調べてきた¹⁾。この研究から、断層近傍では、断層破壊伝播特性と地盤内での地震波伝播特性が影響し、振幅や振動数の違うあらゆる種類の波があらゆる方向から入射するため、その結果として得られる地表面の地震動は場所的に大きく異なり、あたかも台風の雲の動きのように渦を巻きながら地震波が伝播しているように見えることがわかってきた^{1), 3)}。この断層近傍の特異な地震動による仮想的連続高架橋の応答挙動に関しては、断層に沿って平行に走る連続高架橋を想定し、その非線形応答挙動を調べ、その3次元複雑な応答挙動等を明らかにした。

次の段階として、本論文では、横ずれ断層を横断する連続高架橋の応答挙動を調べることにした。横ずれ断層を横断する連続高架橋の場合、断層近傍の地震動の特徴である断層直交方向の大きな地盤加速度を橋軸方向に受けると共に、断層を跨ぎ、断層から等距離の2地点における断層平行方向の地盤の動きは大きさが等しく向きが逆転し、このような地震動が橋軸直交方向に作用するため、3次元応答挙動は、横ずれ断層に平行な連続高架橋の場合とはかなり異なることが予想される。一般的

には、断層を横断する連続高架橋は破壊されると思われがちであるが、本論文では断層上端の表層地盤の有無や表層地盤の厚さ等のパラメータによっては連続高架橋が必ずしも破壊されるわけではないということを理論的な応答挙動の試算例から示すと共に、横ずれ断層を横断する構造物の応答挙動を支配する主要なパラメータを明らかにする。

2. 断層近傍地震動の時空間分布特性の複雑性と解析用入力地震動

2. 1 横ずれ断層近傍地震動の時空間分布の複雑性

横ずれ断層近傍の仮想連続高架橋の地震応答解析に用いる入力地震動は、図-1 で示すような断層長さ 8.5km、断層幅 8.5km の大きさの矩形鉛直横ずれ断層を含む 3 つの断層-地盤系モデル (Model A は表層地盤が無くいわゆる地表に断層が現れる地表断層の場合、Model B は断層上に 0.5km 厚の表層地盤がある場合、Model C は断層上に 1.5km 厚の表層地盤がある場合) を想定し、さらに、Model A において、断層上端の深さを 0.5km (Model A') と 1.5km (Model A'') として地震動に及ぼす断層深さの影響を調べることにする。地震動は、原田らの方法^{2),3)}に従って求める。この方法では、運動学的断層モデルと水平成層地盤の剛性マトリックスから解析的に求められる振動数-波数領域の地震波動場を 3 重逆フーリエ変換して、地震動波形が合成される。

表-1 は半無限地盤と表層地盤の物性値を示す。計算では、震源断層や地盤系の不確定性を考慮すると、1Hz 程度以下とも考えられるが、各断層-地盤系モデルでは、振動数 2.5Hz までの低振動数の地震波を合成した。しかし仮想連続高架橋の卓越振動数は約 0.6Hz 程度であり、高架橋の主要な応答特性は本入力地震動の振動数範囲でカバーされている。

先ず Model A (地表断層) において、断層深さによって地表面地震動がどの程度変わるかを見るために、断層から 30m 離れた 67 番地点 (図 4 参考) の変位波と加速度波形を図-2 に示す。図-2 から地表断層 (Model A) の場合に比べ、断層上端の深さが 0.5km (Model A') と 1.5km (Model A'') の波形は極端に小さくなっていることがわかる。また、図は省略するが、最大加速度においても、67 番地点では、Model A で 1.2G、Model A' で 0.22G、Model A'' で 0.16G と、断層上端の深さによって極端に最大加速度も小さくなる。したがって、本論文では、断層を横断する連続高架橋の応答挙動を Model A、Model B、Model C の 3 つ断層-地盤系モデルについて調べるものとする。

このような 3 つの異なる横ずれ断層-地盤系における断層近傍の地震動加速度波形の時空間分布特性を見るために、図-3 に示すように断層破壊開始から約 2 秒毎の断層近傍地表面 (30km × 30km) における地震動の水平加速度分布をプロットした。図-3 に示す 4 つの時刻毎の水平加速度分布図において、中央から右方向に延びる黒帯は、震源断層の破壊領域の地表面への投影長さを表す。断層長さ 8.5km、断層破壊速度 2.2km/sec を仮定しているため、約 3.9 秒で破壊が終了する。また各図の矢印の方向と長さは、断層の平均すべり量 D = 1.3m と仮定したときの地表面各地点の水平加速度の向きと大きさを表す。

図-3 によると、断層近傍の地表面全体の動きは、断層破壊中央付近から終了付近にかけて時計回りや反時計回りの大小の

渦をともなって、断層破壊方向に円弧状に地震波が伝播していることがわかる。表層地盤の厚さの違い (Model A~C) によって加速度の分布や向き、大きさの違いが著しい。地表断層の Model A では断層が直接に地表面に現れるため、断層破壊開始から継続時間の短いパルスの波形が現れ、その後漸的に減衰していくのが特徴である。一方、断層上に 0.5km 厚の表層地盤が存在する Model B では、震源断層と表層地盤の動的特性の影響によって、波形が大きく増幅され、継続時間も長くなり、全体的に加速度波形が大きい。また、断層上に 1.5km 厚の表層地盤が存在する Model C では、地震波の地表面への到達時間が遅れ、波形の振幅も Model B より小さくなっている。

本計算では、480m 間隔で地表面の加速度波形を計算したが、図-3 に示すように、断層破壊先端附近の局所的な地表面領域において 480m の間隔で逆方向に大きな加速度振幅が現れるなど、2 つの渦の重なり具合から地震動加速度波形の複雑な空間分布特性が見られる。

これらの複雑な時空間分布特性は、論文³⁾でも示されているが、震源の複双力に基づいた運動学的断層モデルにおける破壊特性と表層地盤内の S 波の伝播特性に、ディレクティビティー効果も加わった結果として現れる現象であると考えられる。

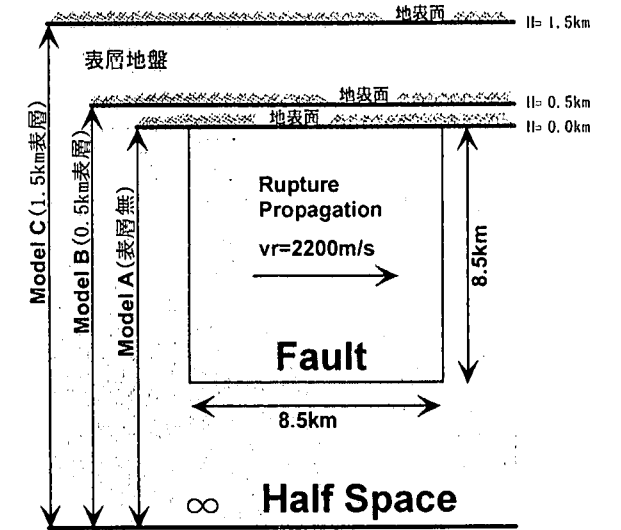


図-1 3つの震源断層-地盤系モデル

表 1. 地盤の物性値

物性値	表層地盤			半無限地盤
	Model A	Model B	Model C	
表層地盤厚 H (m)	0	500	1500	----
P 波速度 (m/sec)	2800	2800	2800	6000
S 波速度 (m/sec)	1600	1600	1600	3500
密度 (t/m ³)	2.3	2.3	2.3	2.8
Q 値	150	150	150	400

2. 2 解析用入力地震動

図-3 のような断層近傍の特異な地震動による横ずれ断層を横断する連続高架橋の応答を調べるために、論文¹⁾と同じ 60m スパンから成る全長 8040m の連続高架橋が断層を横断するものとする。図-4 は、横ずれ断層の地表面への投影位置と連続

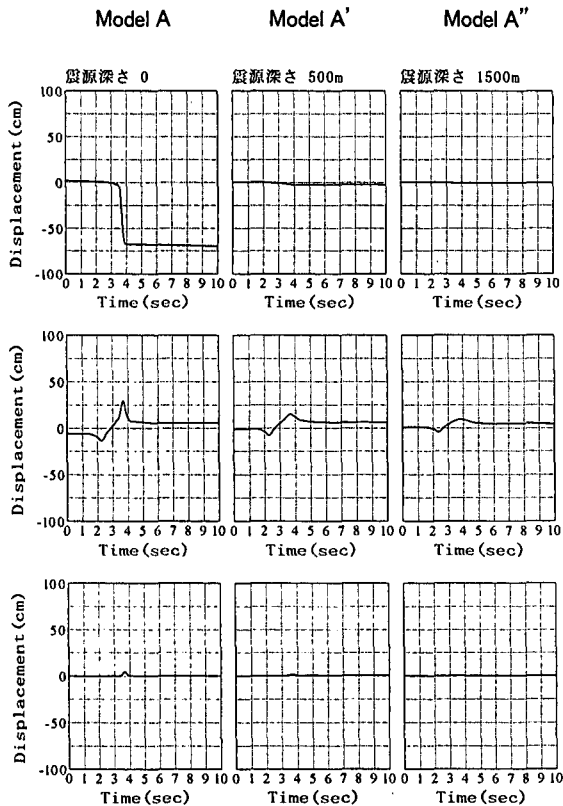


図-2a 断層から30m離れた67番地点の3成分変位波形

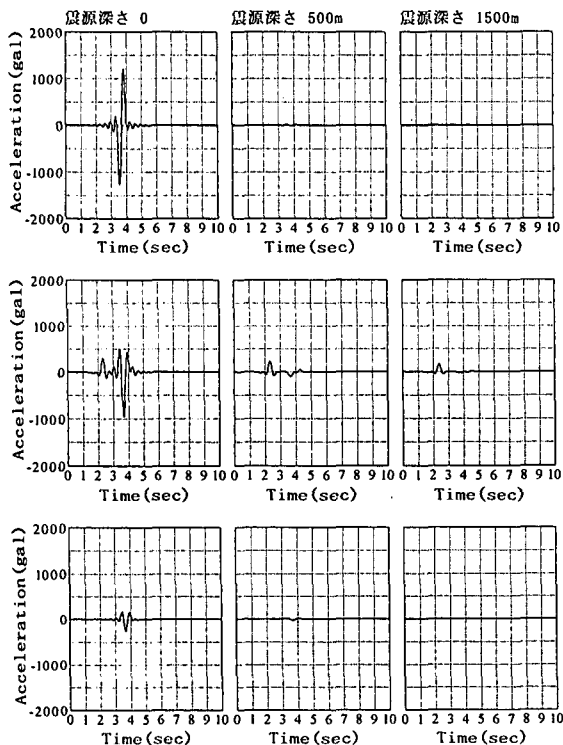


図-2b 断層から30m離れた67番地点の3成分加速度波形

高架橋の位置を示している。この図に黒丸で示す1、2、3…135の番号は60m毎にある橋脚の番号を表す。3つの断層-地盤系モデルの67番橋脚位置での橋軸直交(u)、橋軸(v)、鉛直(w)方向の加速度波形と変位波形並びに、回転加速度波形と回転変位波形を図-5に示す。地表断層のModel Aでは、橋軸直交方向への入力加速度が圧倒的に大きく、約1.2Gのパルス的な波

形(約振動数1.5Hz)と断層の横ずれによる大きな永久変位波形が見られる。表層地盤が存在するModel BとModel Cでは、橋軸方向への入力加速度が圧倒的に大きい、Model Aの場合に比べ、断層の永久変位が小さい。波形の継続時間が長く最大約1.8Gの加速度波形(約振動数0.8Hz)がModel Bで観察される。このように表層地盤の厚さによって違う全入力波形は、断層の平均すべり量を $D=1.3\text{m}$ と仮定し、振動数2.5Hz以下の低振動数地震波を対象に理論的に合成したものである。

図-6は、各断層-地盤系モデルから求めた135個の全橋脚位置における橋軸(v)方向と橋軸直交(u)方向の入力加速度波形の加速度応答スペクトル(5%減衰定数)を重ねて示したものである。図-6の上段に示す地表断層の場合(Model A)、地盤の最大加速度とほぼ等しい構造物の固有周期0.1秒における加速度応答スペクトルの値は、橋軸方向で0.15~1.02G程度、橋軸直交方向で0.13~1.28G程度と場所による違いが大きい、全橋脚地点での加速度応答スペクトルの形状は比較的似ており、入力波形の振動数特性の場所による違いは少ない。同様な特性は0.5km厚と1.5km厚の表層地盤をもつ断層-地盤系にも見られる。断層を横断する場合のこのような入力波形の特徴は、最大加速度の場所的違いはほとんどなく、振動数特性の場所的違いが大きいという特徴^{1), 5)}を有する断層に平行な連続高架橋の入力波形と対照的である。

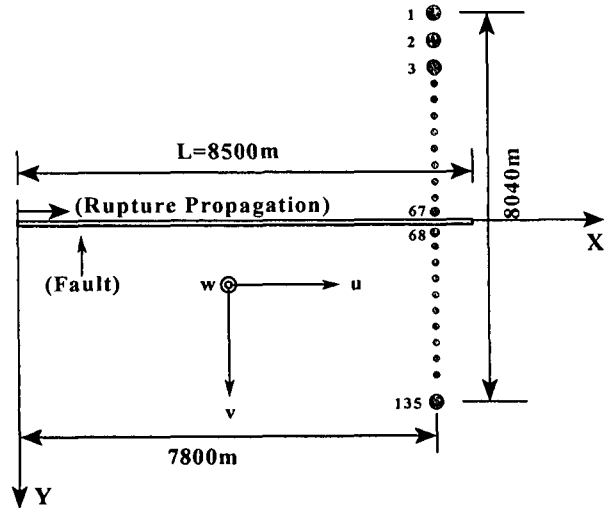


図-4a 横ずれ断層と連続高架橋の位置(平面図)

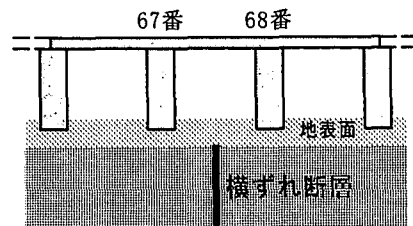


図-4b 横ずれ断層と連続高架橋の位置(側面図)

このように入力地震動の最大加速度は場所的に大きく違うため、135個の全橋脚位置での入力地震動の最大加速度を図-7に示しておく。ここで、横ずれ断層のため、断層線(67番橋脚と68番橋脚の真中)を境に、最大加速度は左右対称となる。断

層が地表面に露頭する地表断層 (Model A) では、断層と交差する
 近辺の橋軸直交方向 (u) の入力地震動が最大値をとり、表層地盤

が存在するような断層－地盤系では橋軸方向 (v) の入力地震動
 が最大値をとるという点に、注意しておかなければならない。

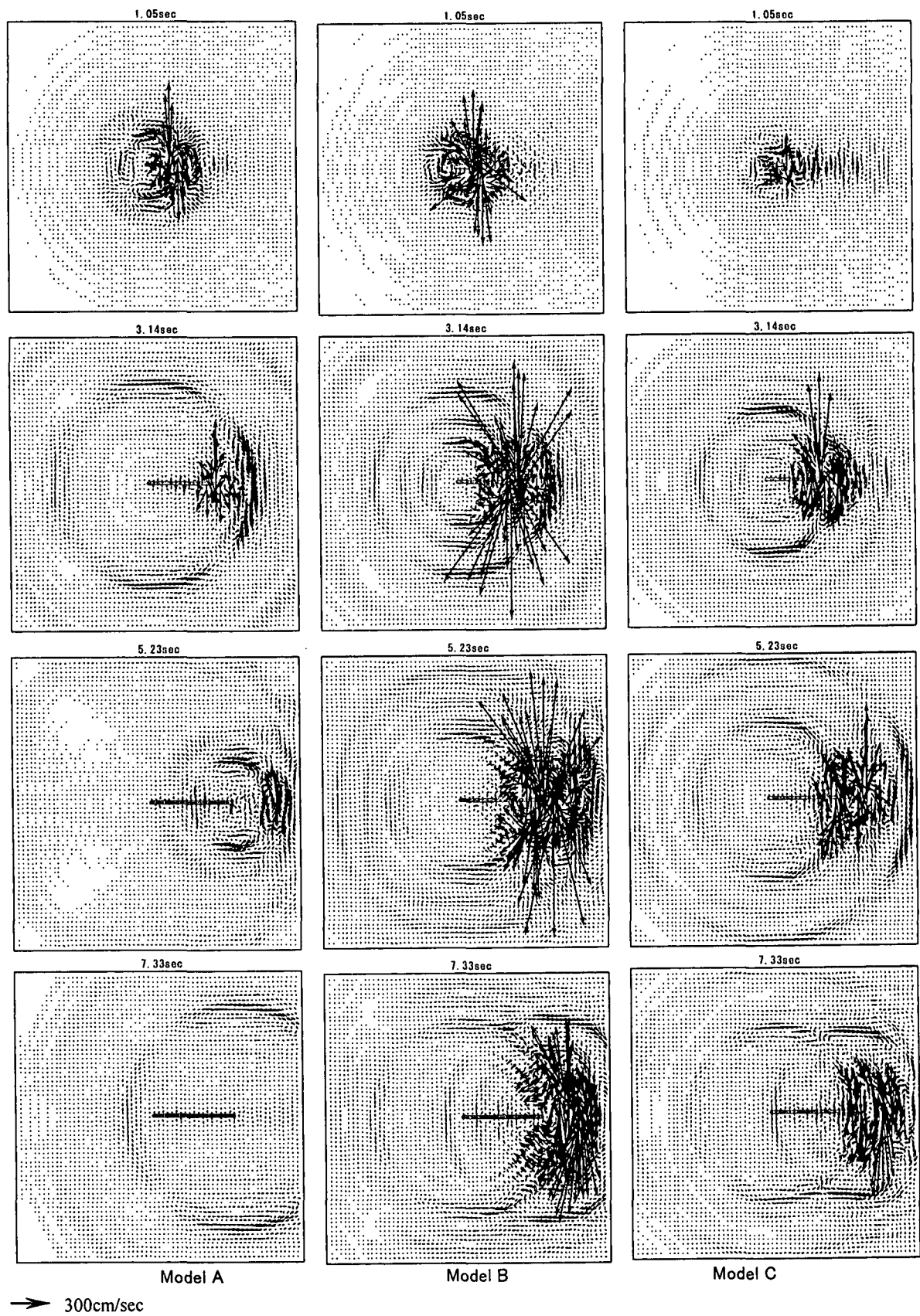


図-3 4つの時刻毎の断層近傍地表面 30km x 30km における水平加速度分布

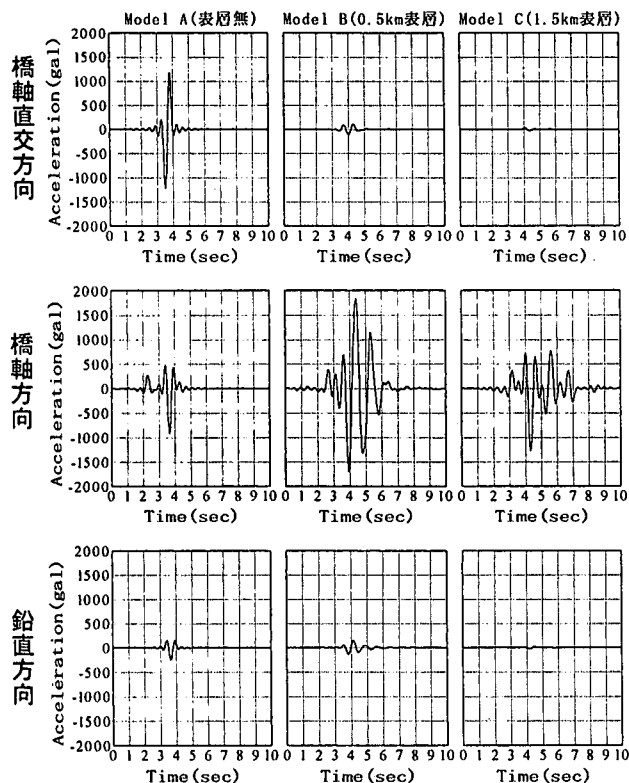


図-5a 67 番橋脚への3成分入力加速度波形

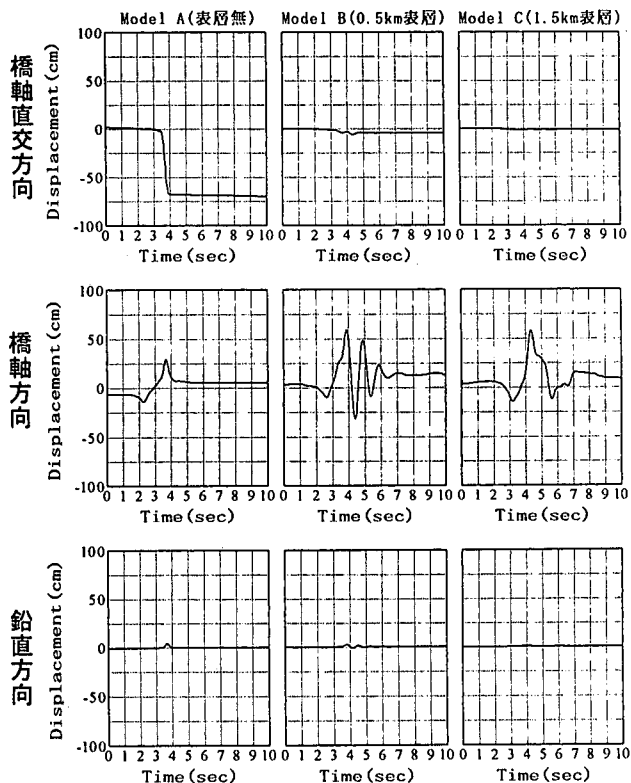


図-5b 67 番橋脚への3成分入力変位波形

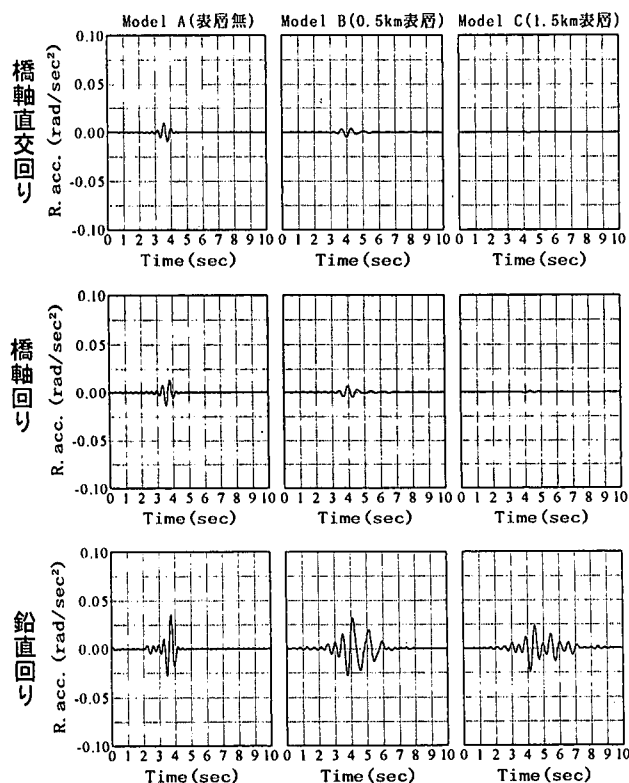


図-5c 67 番橋脚への回転地震動3成分入力加速度波形

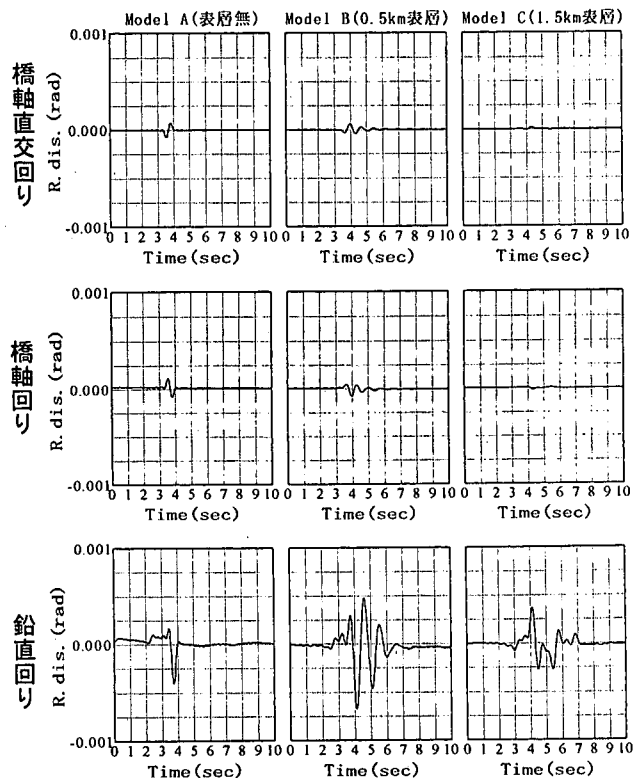
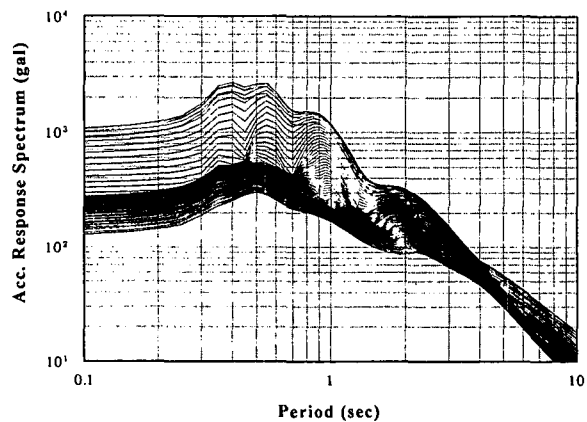
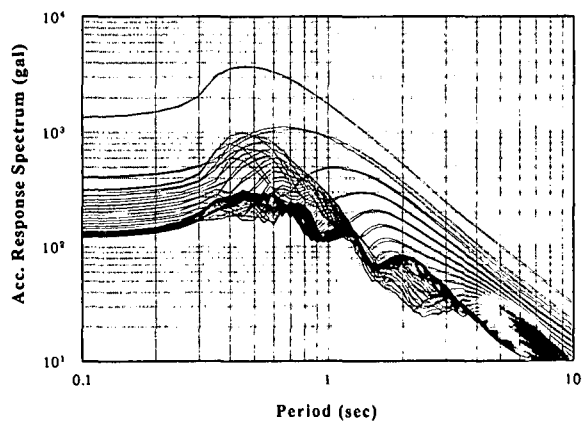


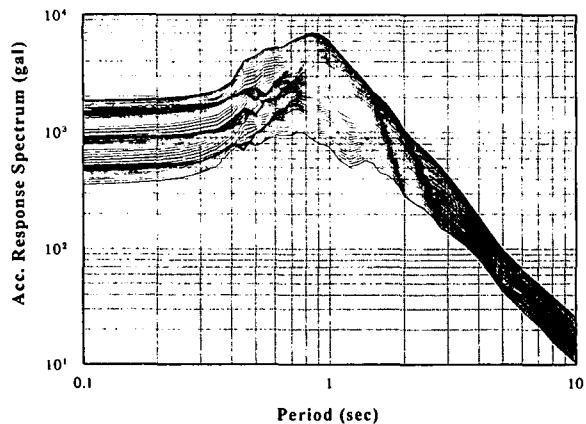
図-5d 67 番橋脚への回転地震動3成分入力変位波形



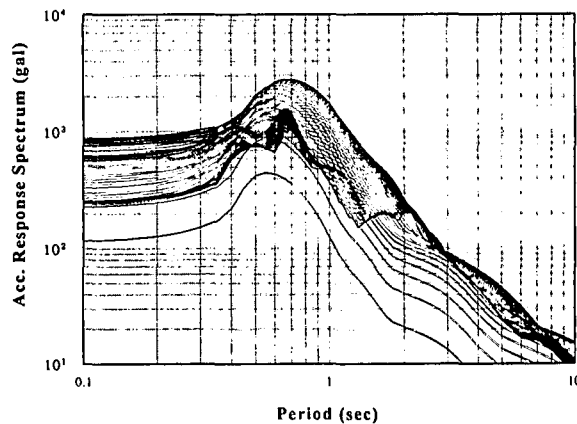
Model A



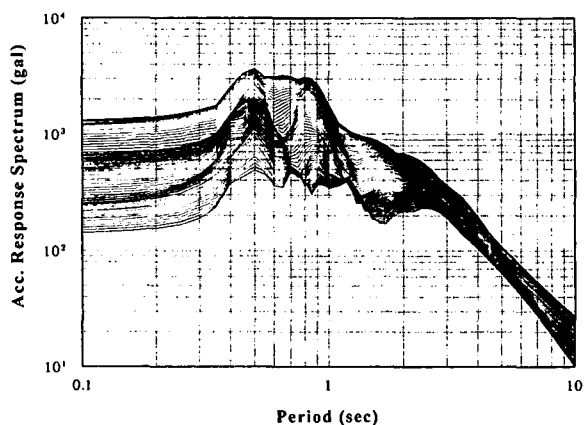
Model A



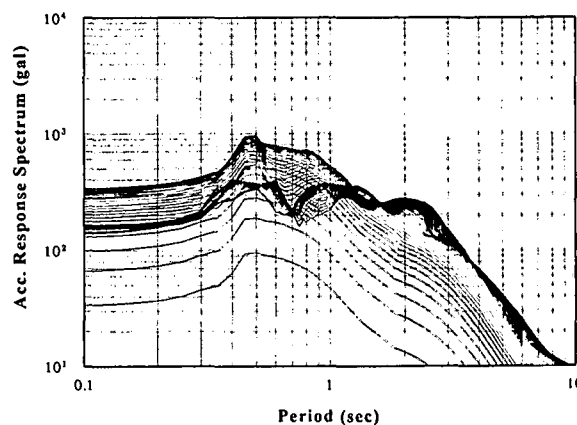
Model B



Model B



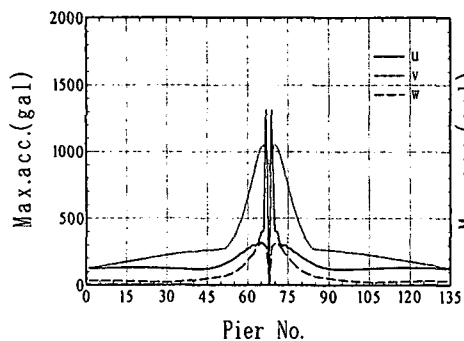
Model C



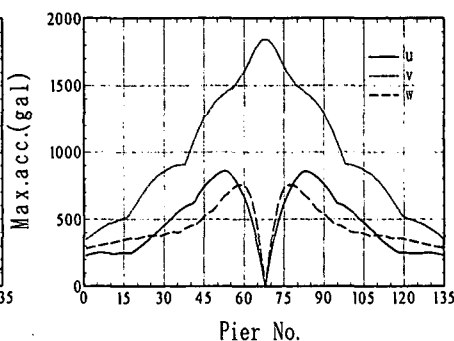
Model C

図-6a 全ての橋脚(135 地点)への橋軸方向入力波形の
加速度応答スペクトル(5%減衰定数)

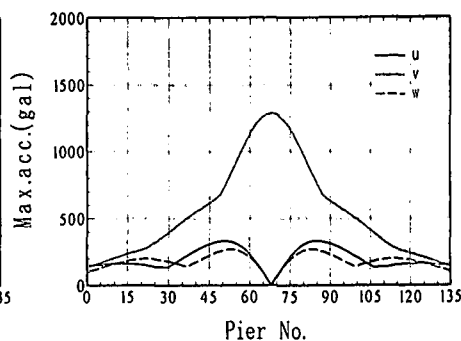
図-6b 全ての橋脚(135 地点)への橋軸直交方向入力波形の
加速度応答スペクトル(5%減衰定数)



Model A (表層無)



Model B (0.5km 表層)



Model C (1.5km 表層)

図-7 全橋脚 135 地点での入力加速度の最大値分布

さらに、地表断層 (Model A) を横断する構造物では、断層を跨いだ 2 地点で大きさが等しく向きが逆転する大きい地震動を受け、地盤の回転や傾きなどによる構造物のねじり被害が大きいと予測される。一方、表層地盤が存在するような断層—地盤系では、表層地盤の影響のため、断層を跨いだ 2 地点間の最大相対変位は大きいものの最大相対変位が生じる 2 地点間の距離が、0.5km 表層の場合 (Model B) で約 2km、1.5km 表層の場合 (Model C) で約 3km と長いこと、構造物へのねじりの影響は相対的に小さいと考えられる。

3. 仮想連続高架橋のモデルと解析方法

対象橋梁として、図-8 と表-2 に示すような高架橋脚からなる全長 8040m の路線を想定した。この様な連続高架橋は、論文^{1), 5)}で断層に沿って平行に走る仮想連続高架橋の応答挙動を調べたものと同じもので、支間長 60m の標準的な高架橋としている。モデルの詳細は論文^{1), 5)}に譲るが、橋脚は基部にコンクリートが充填された T 型鋼製橋脚であり、3 次元ファイバーモデルでモデル化した。このモデル化により、塑性化において 2 軸曲げの影響も考慮できる。上部構造は線形はり要素でモデル化し、支承は減衰効果を考慮しないゴム支承として線形ばねとしてモデル化した。

各橋脚下端は基礎固定と仮定し、各橋脚下端に第 2 章 2 節のような地盤の回転地震動 3 成分を含む 6 成分加速度波形を入力した。応答解析では、第 3 著者らの開発した解析コード Y-FIBER3D⁴⁾を使い、ファイバーモデルを用いた 3 次元非線形動的解析 (3 次元モデルと呼ぶ) を行った。なお、死荷重に相当する軸圧縮力が作用したときの静的解析を行い、これを初期状態として地震応答解析を実施している。

一方、橋梁の一般的な耐震解析では、3 次元的地盤の揺れのうち、加速度が最も大きい 1 地点における水平 1 方向の加速度波形を、橋軸方向または橋軸直角方向を対象として 2 次元的にモデル化した橋梁に作用させて、断面等が設計されるので、この一般的な耐震解析で行われるように 1 地点の地震動水平加速度波形と 2 次元モデルを用いた非線形動的解析 (2 次元モデルと呼ぶ) を実施し、両解析結果を比較するものとする。

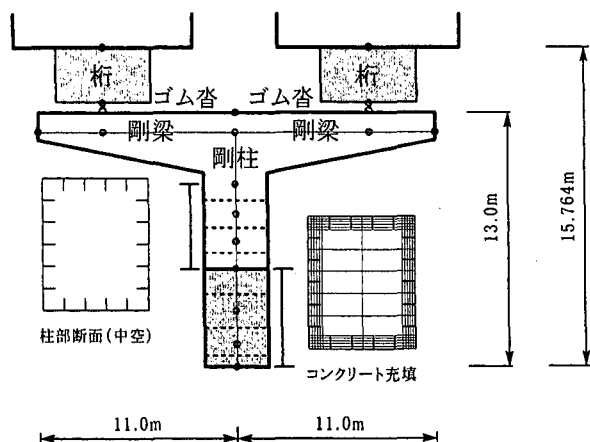


図-8 高架橋のコンクリート充填 T 型鋼製橋脚の断面図

表-2 連続高架橋モデルの諸元

Number of piers	135
Length of span (m)	60
Height of pier (m)	13.0
Height of C.G of deck (m)	15.764
Height of concrete fulfilled portion (m)	3.65
Total length of viaduct (m)	8040

4. 仮想連続高架橋の非線形地震応答解析結果

橋軸および橋軸直交方向の応答を考察する。図-9 には、Model A (地表断層の場合) と Model B (断層上に 0.5km 表層地盤がある場合) から、1 例として 3 次元非線形動的解析によって求められた第 67 番橋脚の代表的な位置における橋軸直交方向および橋軸方向の応答加速度波形やゴム支承の変位波形、橋脚基部曲げモーメント波形を水平 3 成分入力加速度波形と共に示す。これを見ると、ゴム支承により応答が長周期化 (Model A の橋軸直交方向で約 1.1 秒、Model B の橋軸方向で約 1.5 秒) し、橋脚基部の曲げモーメント波形も長周期化したものとなっていることがわかる。また、Model A での橋軸直交方向の場合、横ずれ断層の永久変形の影響によって橋脚基部の曲げモーメントやゴム支承に残留モーメントや残留変位が見られる。

図-10 と図-11 は、各断層—地盤系モデルにおける橋脚番号 1 から 135 番の全長 8040m の連続高架橋の橋軸および橋軸直交方向の応答変位を真上から 1 秒毎に見たときの変位分布を描いたものである。第 2 章で示したような断層近傍地震動の場所的違いの複雑さに影響され、全長 8040m の連続高架橋が変形している様子がわかる。

すなわち、図-10 に示す橋軸方向の応答変位分布では、橋脚基部の変位 (これは地盤地表面の変位にあたる) は、横ずれ断層の動きを反映し、断層線上 (67 番橋脚と 68 番橋脚の真中) を境に左右対称に変形しているものの、連続橋の路面の動きは剛体的で全長に渡ってほぼ一様である。これは、各橋脚毎に振幅の違う地盤変位を受けても橋軸方向の路面の剛性が高いため、連続高架橋の路面の動きは、その地盤変位を平均化したような応答となるためである。一方、図-11 の橋軸直交方向の応答変位分布においても、橋脚基部と路面の動きは、地盤変位に追従した変形となっており、横ずれ断層の動きを反映し、断層線上 (67 番橋脚と 68 番橋脚の真中) を境に左右逆対称に変形している。図-11a に示す Model A (地表断層) の場合、横ずれ断層を跨いだ橋脚が断層ずれによってひきちぎられているように (せん断的に) 変形している。しかし、図-11b, c に示す Model B, C の場合、その変形がなめらかであるのが特徴である。このような断層上の表層地盤の厚さによる連続高架橋の応答の違いは、地表断層の場合 (Model A)、断層を跨いだ 2 地点間の最大相対変位を生じる 2 地点間の距離が短い (60m) が、Model B, C では約 2km、約 3km と長いことに起因しており、断層上の表層地盤の厚さが高架橋の応答挙動の重要な要因であることがわかる。

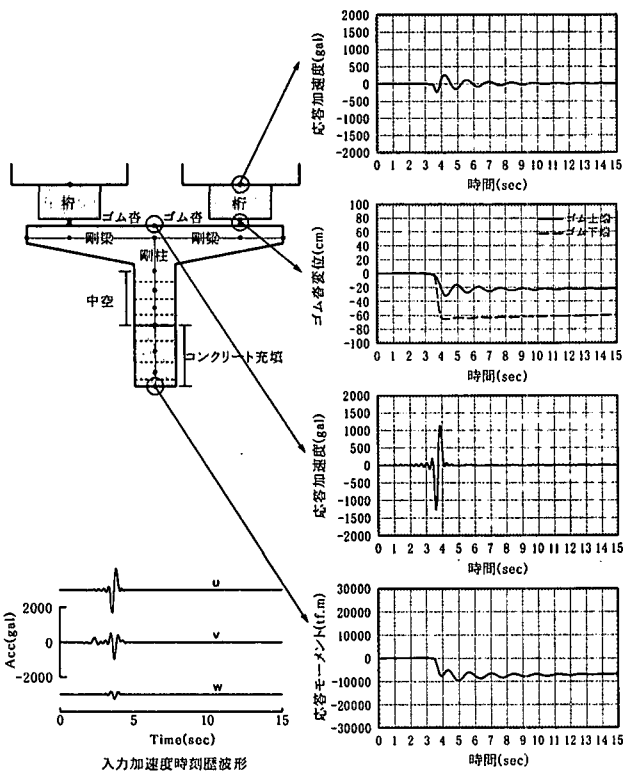


図-9a Model A 橋軸直交方向の応答波形(67 番橋脚)

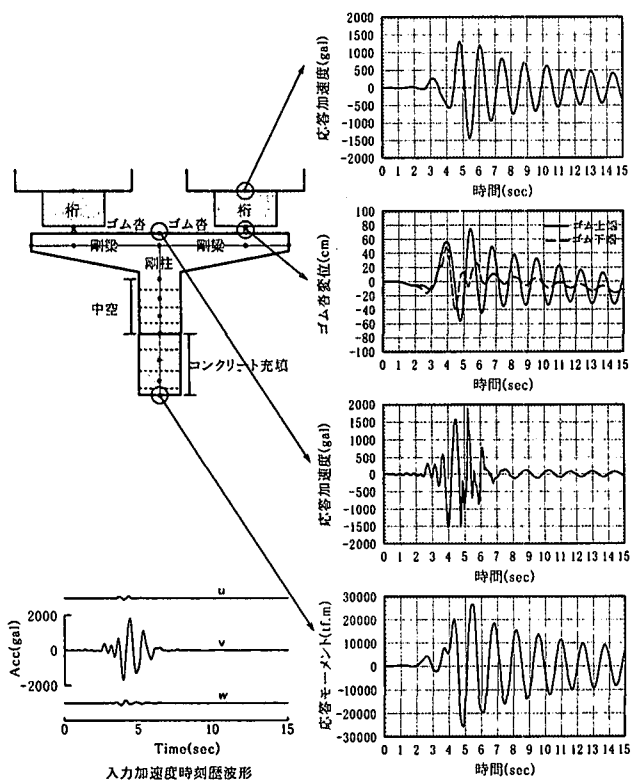


図-9b Model B 橋軸方向の応答波形(67 番橋脚)

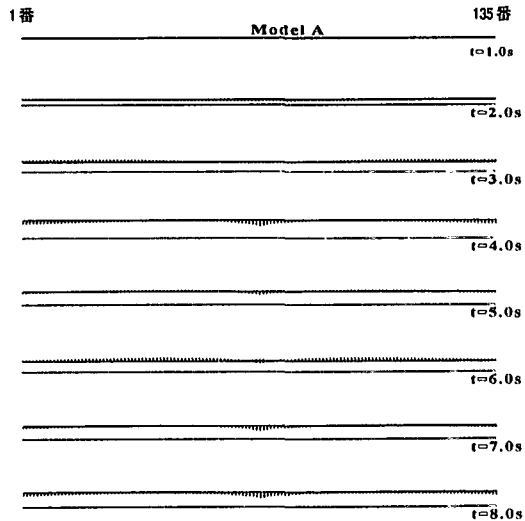


図-10a 真上から見た 1 秒毎の全橋脚上の桁の橋軸方向の変位分布図(Model A の 3 次元モデル)

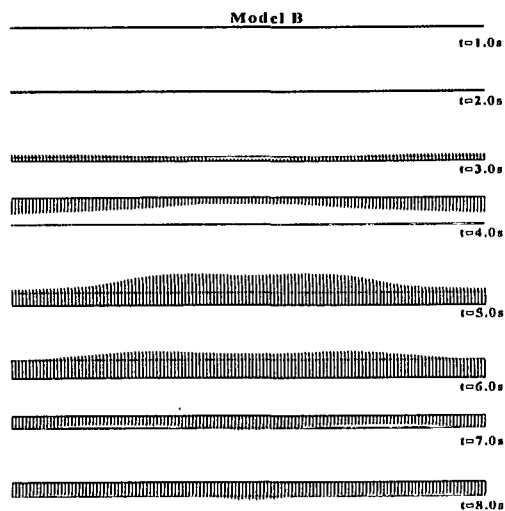


図-10b 真上から見た 1 秒毎の全橋脚上の桁の橋軸方向の変位分布図(Model B の 3 次元モデル)

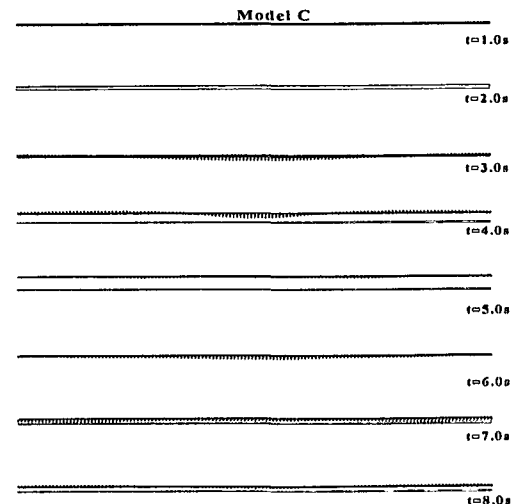


図-10c 真上から見た 1 秒毎の全橋脚上の桁の橋軸方向の変位分布図(Model C の 3 次元モデル)

(灰色の点線は高架橋の元位置、黒い線は断層破壊による高架橋の実変形)

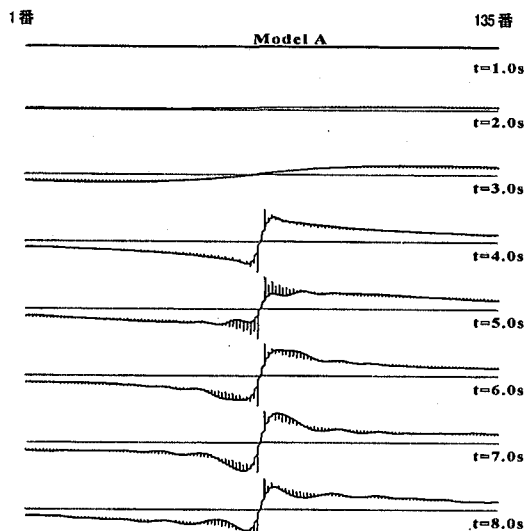


図-11a 真上から見た1秒毎の全橋脚上の桁の橋軸直交方向の変位分布図(Model Aの3次元モデル)

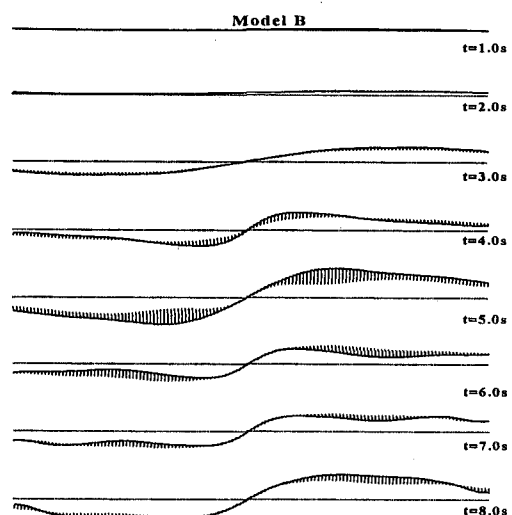


図-11b 真上から見た1秒毎の全橋脚上の桁の橋軸直交方向の変位分布図(Model Bの3次元モデル)

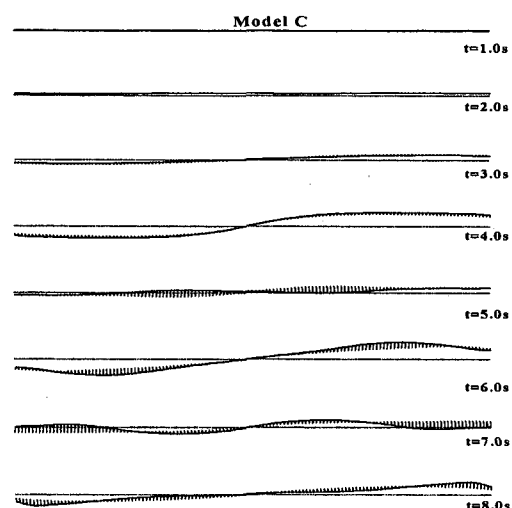


図-11c 真上から見た1秒毎の全橋脚上の桁の橋軸直交方向の変位分布図(Model Cの3次元モデル)

(灰色の点線は高架橋の元位置、黒い縦線は断層破壊による高架橋の実変形)



図-12a 真上から見た最大変位発生時刻の全橋脚上の桁の橋軸方向の変位分布図(Model Bの2次元モデル)



図-12b 真上から見た最大変位発生時刻の全橋脚上の桁の橋軸直交方向の変位分布図(Model Bの2次元モデル)

通常の耐震設計では、最大入力加速度が最も大きい地点の加速度波形を2次元モデルに作用させて応答を求めるため、最大地盤加速度が最も大きい地点の加速度波形 (Model Aでは橋軸方向に70番橋脚地点、橋軸直交方向では67番橋脚地点; Model Bでは橋軸方向に68番橋脚地点、橋軸直交方向では53番橋脚地点; Model Cでは橋軸方向に68番橋脚地点、橋軸直交方向では52番橋脚地点) を連続高架橋の全橋脚に同時に入力する2次元非線形動的解析を行った (2次元モデルと呼ぶ)。得られた変位分布を図-12に示す。ここではModel Bの2次元解析で、最大応答変位が生じた時刻 (橋軸方向では4.80秒、橋軸直交方向では6.30秒) における変位分布を描いている。一様な構造系をもつ連続高架橋の全橋脚に同じ加速度波形が同時に入力されているので、応答変位分布は場所に寄らず一定となっている。

図-10、11と図-12のModel Bの応答変位分布を比較すると、橋軸方向では、2次元モデルの方が圧倒的に大きな応答変位となっている。これは、3次元モデルでは各橋脚に入力される地盤変位が橋軸方向の連続高架橋の剛性によって平均化され応答が生じることに起因する。橋軸直交方向では、3次元モデルの応答は2次元のものより圧倒的に大きい。

3次元と2次元モデルによる応答の違いをさらに調べるために、各断層-地盤系モデルについて全橋脚1番から135番の橋脚基部最大曲げモーメントとねじりモーメント並びにゴム支承の最大相対変位の比較を行う。結果をそれぞれ図-13と図-14に示す。

図-13の上段に示す橋軸方向の比較では、前述したように、橋軸方向の連続高架橋の剛性による地盤変位の平均化の程度が大きく、このために、3次元と2次元モデルによる応答の違いが生じている。特にModel Cの断層-地盤系では一点破線で示している2次元モデルの結果が3次元モデルの応答よりも約2倍ほど大きい。3次元モデルの応答と比較すると、地盤の最大加速度が最大となる橋脚地点の地盤加速度波形を用いた2次元モデルの応答は過大であると言える。3次元モデルにおける水平3成分入力の場合と回転3成分を含む6成分入力の違いはほとんどないが、6成分入力の方がわずかに大きい。

一方、図-13の中段に示す橋軸直交方向の比較では、断層を跨ぐ2地点間の地盤が逆向きに動き、この地盤変位に追従して高架橋が変形する (図-11参照)。本論文で想定したModel A (地表断層) では、断層を跨ぐ2地点間の最大相対変位を生じる地点間距離が短く、3次元モデルの橋軸直交方向の曲げモーメントの相殺効果によって応答はそれほど大きくなかった。曲げモー

メントの相殺効果の無い2次元モデル(破線)では、約22000t・mのモーメントが求められ、応答が過大であることがわかる。Model BとModel C(表層地盤が存在する断面層-地盤系モデル)では、表層地盤の影響により橋軸直交(u)方向の入力加速度も小さいために3次元モデルの応答はあまり大きくなり、各断面の応力はわずかに非線形領域に入る程度におさまっている。3次元と2次元モデルによる応答の差異はそれほど大きくないことも読み取れる。

図-13 の下段に示す橋脚鉛直軸回りのねじりモーメントの比較に関しては、2次元モデルでは、ねじりモーメントは殆ど生じないが、3次元モデルでは最低1000t・m以上のねじりモー

メントが得られている。特に地表断面の場合では、高架橋に被害をもたらす極めて大きい約最大9000t・mのねじりモーメントが生じている。また、地震時による地盤の回転、傾き等の地震動を考慮した3次元モデルの6成分入力(点線)では、3成分入力よりも大きいねじりモーメントが生じている。

図-14に示すゴム支承の相対変位に関しては、橋軸方向では、2次元モデルの方が過大に相対変位を評価するようであるが、橋軸直交方向では、逆に3次元モデルの方が大きい。しかし、2次元と3次元モデルによる最大相対変位の差はあまり大きくない。

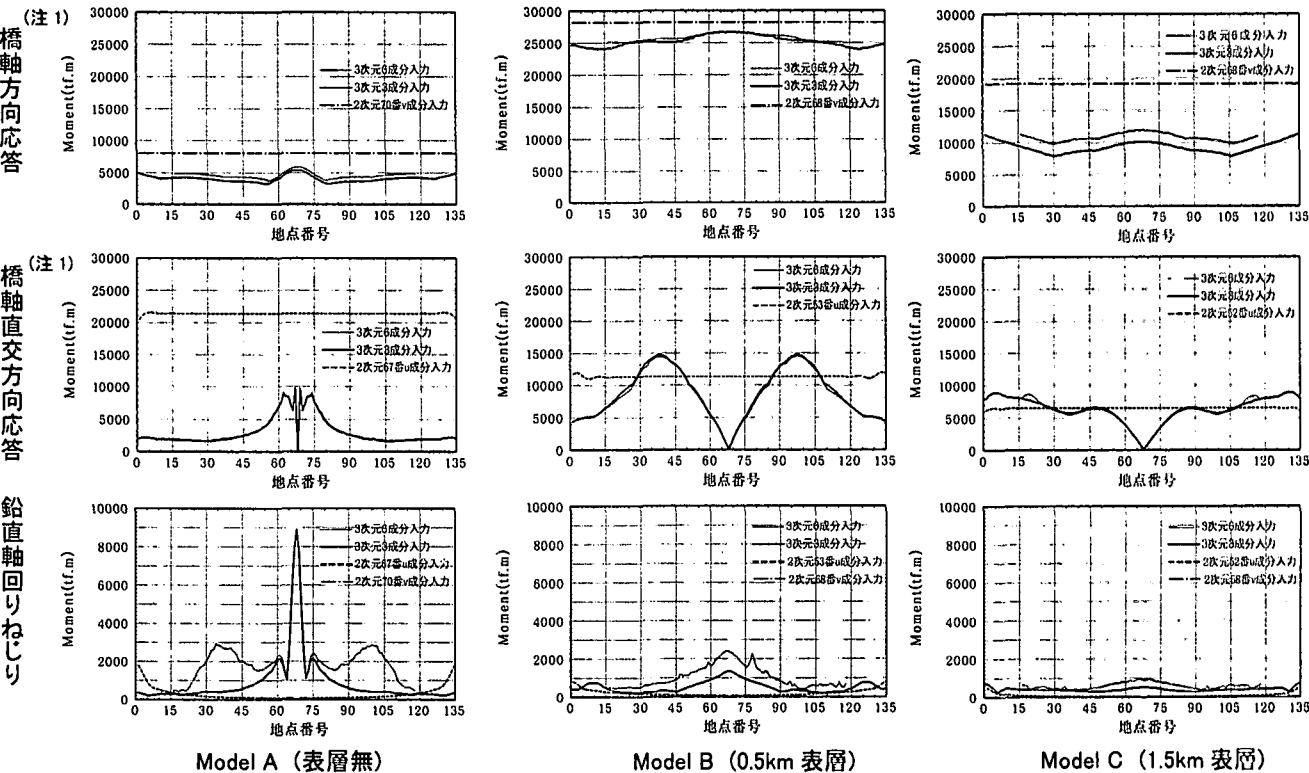


図-13 1から135の橋脚基部の最大曲げモーメントと最大ねじりモーメント(2次元と3次元モデルの比較)

(注1:橋軸方向応答、橋軸直交方向応答による曲げモーメントという意味)

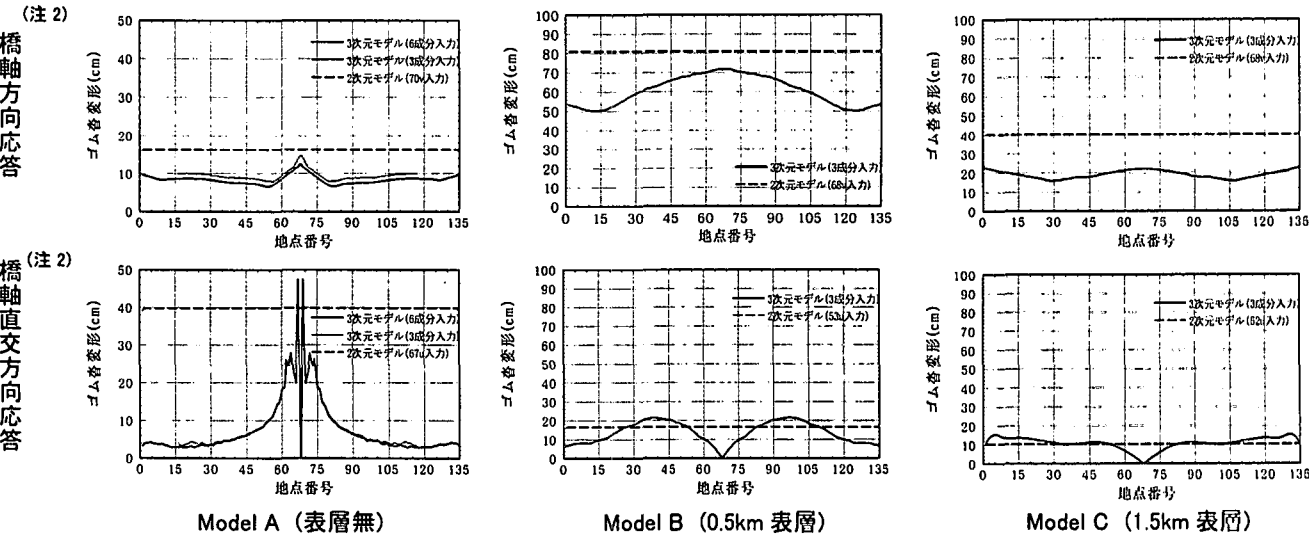


図-14 1から135の橋脚のゴム支承の最大相対変位(2次元と3次元モデルの比較)

(注2:橋軸方向応答、橋軸直交方向応答によるゴム支承の変形という意味)

5. まとめと課題

原田らの方法^{2),3)}を使って、運動学的断層モデルと水平成層地盤の剛性マトリックスによって解析的に求められる振動数-波数領域の地震波動場を3重逆フーリエ変換して理論的に断層永久変位を含む地震動波形を合成した。この横ずれ断層近傍における地表地震動の加速度波形の時空間分布特性を描いてみると、渦を巻きながら地震波が伝播するなど、時空間分布特性が複雑であることを示した。

本論文で想定した断層-地盤系モデルにおいて横ずれ断層を横断する連続高架橋基部への入力波形の最大加速度値の分布は場所による違いが大きい。しかし、全橋脚地点での加速度応答スペクトルの形状は比較的似ており、入力波形の振動数特性の場所的違いは少ないことが入力地震動の特徴である。

また、2次元と3次元非線形動的解析から、横ずれ断層を横断する仮想連続高架橋の応答挙動に関して、次のようなことがわかった。

(1) 橋軸方向の応答に関しては、橋軸方向における連続高架橋の剛性が高いために、連続高架橋は、入力地震動の場所的違いを平均化するように応答し、橋軸方向の入力地震動の場所的違いが大きいため、その平均化の程度が大きい。したがって、地盤最大加速度が最大となる地点の入力地震動を使った2次元モデルによる応答は、3次元モデルの応答よりも大きく、過大評価となる。

(2) 橋軸直交方向の応答に関しては、表層地盤が存在する断層-地盤系では、連続橋の応答はあまり大きくならず、各断面の応力はわずかに非線形領域に入る程度におさまっている。2次元および3次元モデルによる応答にも大きな差異はなかった。地表断層の場合には、3次元モデルの曲げモーメントの相殺が大きく影響し、2次元モデルによる応答の方が大き目の評価を与える。

(3) 橋脚鉛直軸回りのねじりモーメントに関しては、2次元モデルでは殆ど生じないが、地表断層における3次元モデルでは、最大9000 t・mの大きいねじりモーメントが生じ、橋脚は破壊される。

(4) また、3次元モデルにおける水平3成分入力と回転3成分を含む6成分入力の場合を比較すると、各断層-地盤系の橋軸方向と橋軸直交方向の応答においては、その違いは少なく、6成分入力の場合の応答がわずかに大きくなる。しかし、橋脚鉛

直軸回りのねじりモーメントに関しては、地表断層(Model A)の場合、6成分入力の方がかなり大きい値を与える。

(5) 地表断層(Model A)の場合には、断層を横断する近辺の橋脚鉛直軸回りのねじりモーメントによって橋脚は破壊に至るが、表層地盤(Model B、Model C)が存在する場合には、橋脚基部の曲げモーメント、ねじりモーメントは緩和され、橋脚の破壊を避けることは可能である。すなわち、横ずれ断層を横断する連続高架橋の応答挙動に対しては、断層上の表層地盤の厚さが大きな要因であることがわかった。

なお以上の結論は、本研究で用いた震源断層-地盤系並びに連続高架橋に対するもので、連続橋の全長が一樣であるとしたが、そうでない場合についての検討も必要である。

参考文献

- 1) 原田隆典, 野中哲也: 横ずれ断層近傍における連続高架橋の地震応答特性, 構造工学論文集, Vol. 47A, pp. 843-849, 2001.
- 2) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世: 3次元直交座標系における波動場の解析解とその地震動波形作成への応用, 土木学会論文集 No. 612/I-46, pp. 99-108, 1999.
- 3) 原田隆典, 山下肇(2000): 剛性マトリックスに基づく地震動の波形合成法と震源断層近傍地震動の渦現象, 土木学会応用力学論文集, Vol. 3, pp. 569-576, 2000.
- 4) Y-FIBER3D, ヤマト設計株式会社
- 5) 原田隆典, 王宏沢, 野中哲也, 大角久雄: (2002) 震源断層近傍の連続高架橋の3次元応答挙動, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, CD-ROM Paper No. 296.
- 6) Bouchon, M.: The motion of the ground during earthquake The case of a strike slip fault, Journal of geophysical Research Vol. 85, No. B1, pp. 367-375, 1980.
- 7) Inoue, T. and Miyatake, T.: 3D simulation of near-field strong ground motion based on dynamic modeling, Bulletin, Seismological Society of America, Vol. 88, pp. 1445-1456, 1998.
- 8) 宮武隆: 断層近傍の強震動パルスの成因, 地震, 51巻, pp. 161-170, 1998.

(2003年4月18日受付)