

震源断層近傍の連続高架橋の3次元応答挙動

原田隆典 (宮崎大学土木環境工学科, harada@civil.miyazaki-u.ac.jp)

王宏沢 (宮崎大学大学院土木環境工学専攻学生, hongze@civil.miyazaki-u.ac.jp)

野中哲也 (ヤマト設計株式会社 企画開発部, nonaka@yamato-engco.jp)

大角恒雄 (日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部, a3850@n-koei.co.jp)

1 はじめに

横ずれ断層近傍に 60m スパンを持つ全長 8040m の仮想連続高架橋が断層に沿って存在するものとして、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに対する剛性マトリックスに基づく地震動波形の合成法を使い入力地震動波形を計算し、渦を巻きながら伝播する複雑な時空間分布特性を有する地震波を受ける連続高架橋の応答特性を 3次元非線形地震応答解析によって調べた。特に、横ずれ断層近傍の連続高架橋の応答挙動と入力地震動の関係を把握するために、(1)地盤の回転、傾き等の回転地震動 3成分が応答に与える影響、(2)連続高架橋の橋脚のねじれ挙動はどの程度か、(3)横ずれ断層近傍のどのような地震動成分が応答を支配しているのか、の 3点を調べ整理した。

2 震源近傍の地表地震動加速度波形の時空間分布特性の複雑性

Fig. 1 に示すように断層破壊開始から約 1 秒毎の断層近傍地表面 (15km × 15km) における地震動の水平加速度分布をプロットした。左端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。Fig. 1 によると、場所によって加速度の向きは異なるが、断層近傍では断層直交方向の加速度が大きい。本計算では、785m 間隔で地表面の速度波形を計算したが、Fig. 1 に示すように、断層付近の地表面において 785m の間隔で逆方向に大きな加速度振幅が現れるなど、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。

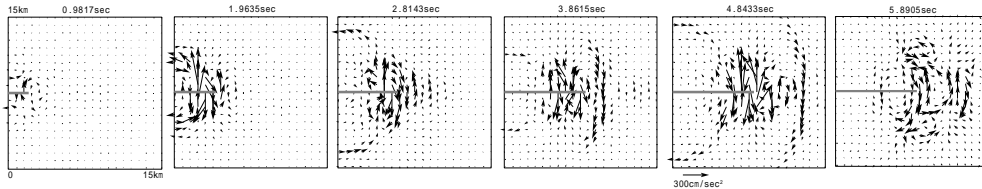


Fig.1 Snapshots of horizontal ground accelerations over 15km × 15km area at 6 time instants

3 連続高架橋の応答解析結果

3次元と2次元モデルによる全橋脚 1番から 135番の橋脚基部最大曲げモーメント (Fig.2)、橋脚軸回りの最大ねじりモーメント (Fig.3)を示す。各図における 3つの図 (a から c) のうち、左端の図は、水平加速度 3成分と地盤の傾き等の各軸回りの回転加速度 3成分の合計 6成分の入力加速度波形を連続橋の 3次元モデルに作用させたもの (3次元 6成分モデル) と、1地点の橋脚直角方向の水平加速度波形 (49番橋脚、または 117番橋脚地点の橋脚直角方向加速度波形) を橋脚直角方向の 2次元モデルに作用させたもの (2次元モデル) を比較している。中央の図は、水平加速度 3成分の入力加速度波形を連続橋の 3次元モデルに作用させたもの (3次元 3成分モデル) と 2次元モデルの比較で、最後に右端の図は、各橋脚地点の橋脚直角方向の水平加速度波形のみを連続橋の 3次元モデルに作用させたもの (3次元 v 成分モデル) と 2次元モデルを比較しものである。図の横軸は橋脚の地点番号 (1番から 135番) を表す。

結果をまとめると、本研究で用いた震源断層 地盤系並びに連続高架橋の例では、地盤の傾き等の回転地震動 3成分の影響はほとんど無視できること並びに、水平地震動 3成分のうち橋脚直角方向 (v) 成分のみの場所的違いを考慮することで 3次元応答挙動が再現できるといえる。橋脚軸回りの最大ねじれモーメントは、2次元解析では生じないが、3次元解析では約 1800 - 2000tf.m と大きな最大ねじりモーメントが橋脚基部に生じている。またゴム支承の最大相対変位も 3次元解析の方が大きな値を与える。

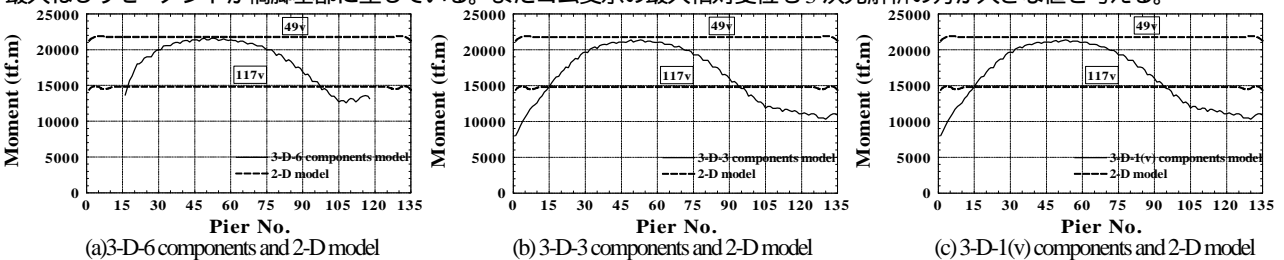


Fig. 2 Comparison of maximum bending moment of piers in bridge normal direction (2-D and 3-D model)

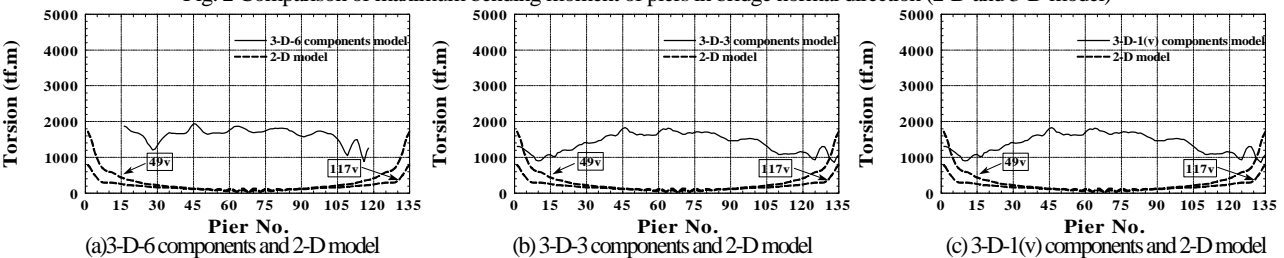


Fig. 3 Comparison of maximum torsion of piers (2-D and 3-D model)

震源断層近傍の連続高架橋の3次元応答挙動 3-DIMENSIONAL RESPONSE CHARACTERISTICS OF CONTINUOUS VIADUCT NEAR A FAULT

原田隆典¹ 王宏沢² 野中哲也³ 大角恒雄⁴

¹宮崎大学土木環境工学科、教授 工博

Takanori Harada, Dept. of Civil and Environmental Eng., Miyazaki University, harada@civil.miyazaki-u.ac.jp

²宮崎大学大学院土木環境工学専攻学生

Koutaku Oho, Graduate Student of Miyazaki University, hongze@civil.miyazaki-u.ac.jp

³ヤマト設計株式会社 企画開発部、部長

Tetsuya Nonaka, Planning and Research Development, Myamoto Sekkei Co. Ltd., nonaka@yamato-engco.jp

⁴日本工営株式会社 中央研究所 開発研究部

Tsunee Ohsumi, Research Development of Central Institute, Nipponkouei Co. Ltd., a3850@n-koei.co.jp

SUMMARY

Because the earthquake ground 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, for example, continuous viaduct, is performed on the basis of three dimensional model of them. In this paper a three dimensional nonlinear response analysis of viaduct near a strike slip fault is performed, and its results are compared with those of the two dimensional model. The input earthquake ground motions are simulated by a stiffness matrices based formulation of seismic waves in stratified media with a extended seismic source.

キーワード：地震動、運動学的断層モデル、連続高架橋、地震応答

Key words: seismic ground motions, kinematic source model, bridge ,dynamic response

1 はじめに

構造物の耐震設計入力地震動は、一般に観測記録の統計処理を主体とした経験的方法によって選定される。しかし1995年兵庫県南部地震による1G近くの大加速度を持つ長周期(1-2秒)パルスの揺れに耐震工学を専門とする多くの技術者が驚かされたことから推察されるように、このような揺れの概略的把握はこれまでなされていなかった。すなわち経験的方法のみに頼るのは危険であるといえる。このため理論的方法を援用して、どのような強震動が起こるのかをシミュレーションによって確認しながら、抜かりなく揺れの特徴を把握して構造物の耐震設計をしておかなければならない。

これまで第1と第3著者は、横ずれ断層近傍に仮想の連続高架橋が存在するものとして、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに対する剛性マトリックスに基づく地震動波形の合成法を使い入力地震動波形を計算し、渦を巻きながら伝播する複雑な時空間分布特性を有する地震波

を受ける連続高架橋の応答特性を3次元非線形地震応答解析によって調べた¹⁾。しかし、応答挙動と入力地震動の関係を十分に把握するまでに至っていなかった。

そこで本論文では、横ずれ断層近傍の連続高架橋の応答挙動と入力地震動の関係を把握するために、前論文¹⁾の課題である、(1)地盤の回転、傾き等の回転地震動3成分が応答に与える影響、(2)連続高架橋の橋脚のねじれ挙動はどの程度か、(3)横ずれ断層近傍のどのような地震動成分が応答を支配しているのか、の3点を調べ整理したので、その内容を述べる。

2 震源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、前論文¹⁾で使ったものと同じで、断層長さ8.5km、断層幅8.5kmの大きさの矩形鉛直横ずれ断

層を含む半無限地盤上に厚さ 1.5km の表層地盤が存在するような震源断層 地盤系を想定し、原田らの方法^{2),3)}に従って計算する。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。また半無限地盤と表層地盤の物性値は、それぞれ P 波速度=6.0km/s、2.8km/s、S 波速度=3.5km/s、1.6km/s、密度=2800kg/m、2300kg/m、Q 値=400、150 で、これらも前論文¹⁾のものと同じである。計算では、震源断層や地盤系の不確定性を考慮して、振動数 1.9Hz までの低振動数の地震波を合成したが、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。

このような横ずれ断層 地盤系において、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、Fig. 1 に示すように断層破壊開始から約 1 秒毎の断層近傍地表面 (15km × 15km) における地震動の水平加速度分布をプロットした。Fig. 1 に示す 6 つの時刻毎の水平加速度分布図において、左端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/s より、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、地表面の各地点における断層の平均すべり量 $D=0.9m$ のときの水平加速度の向きと大きさを表す。

Fig. 1 によると、断層破壊中央付近から終了付近の地表面に時計回りや反時計回りに見えるやや楕円形の渦が現れ、これらの渦が断層破壊方向に伝播している。場所によって加速度の向きは異なるが、断層近傍では断層直交方向の加速度が大きい。本計算では、785m 間隔で地表面の加速度波形を計算したが、Fig. 1 に示すように、断層付近の地表面において 785m 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、震源の複双力に基づいた運動学的断層モデルにおける断層破壊特性と表層地盤内の S 波の伝播特性の相互作用に、さら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。

2.2 解析用入力地震動

Fig. 1 のような震源断層近傍の特異な地震動による連続高架橋の応答を調べるために、断層近傍地表面に横ずれ断層と平行に 60m スパンから成る全長 8040m の連続高架橋を想定するものとする。Fig. 2 は、横ずれ断層の地表面への投影位置と連続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。49 番と 117 番橋脚位置での橋軸 (u)、橋軸直角 (v)、鉛直 (w) 方向、並びに各軸回りの回転加速度波形を Fig. 3 に示す。この 2 地点の入力波形は、4 章で示す 2 次元モデルの応答解析結果から橋脚基部の曲げモーメントが最も大きくなる波形 (49 番) と地盤最大加速度の最も大きい波形 (117 番) を選んだものである。全入力波形は、

振動数 1.9Hz 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。断層の平均すべり量を $D=0.9m$ のときの加速度波形を示している。両橋脚地点において橋軸直角 (v) 方向の加速度波形が圧倒的に大きいこと、約 1G のパルス的な波形 (約振動数 1.5Hz) が見られることは共通している。

回転加速度波形については、橋脚軸回りのものが圧倒的に大きい。本論文の震源断層 地盤系モデルでは、最大回転加速度の大きさは $0.0168(\text{rad}/\text{sec}^2)$ と小さく、4 章の応答結果からもその影響は無視できるようである。

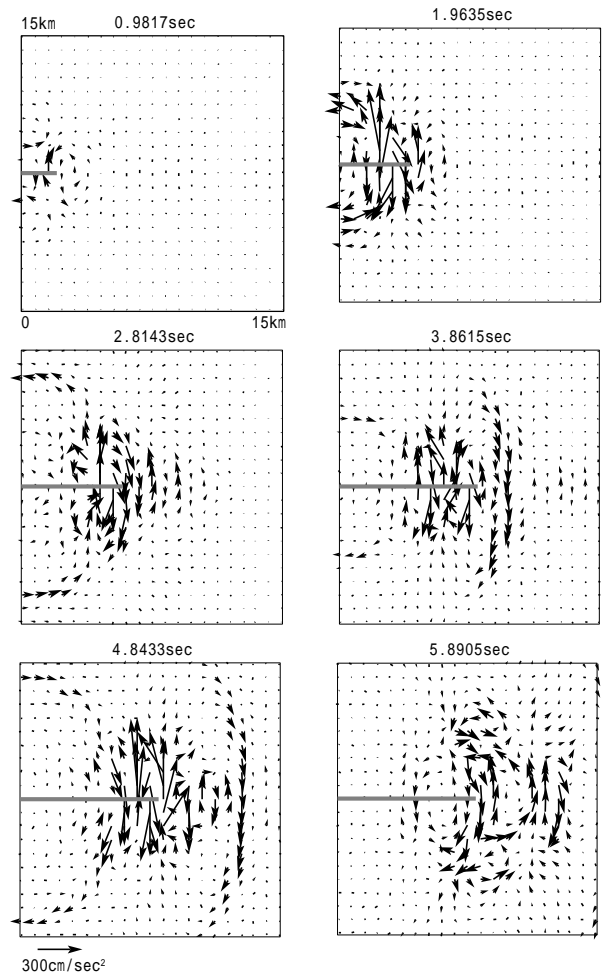


Fig.1 Snapshots of horizontal ground accelerations over 15km × 15km area at 6 time instants

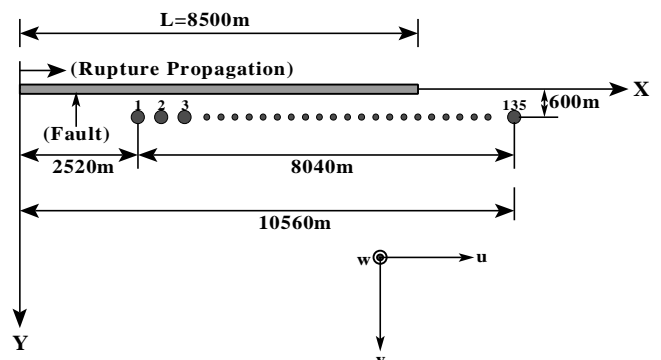


Fig.2 Coordinates and location of the piers of continuous viaduct along the fault

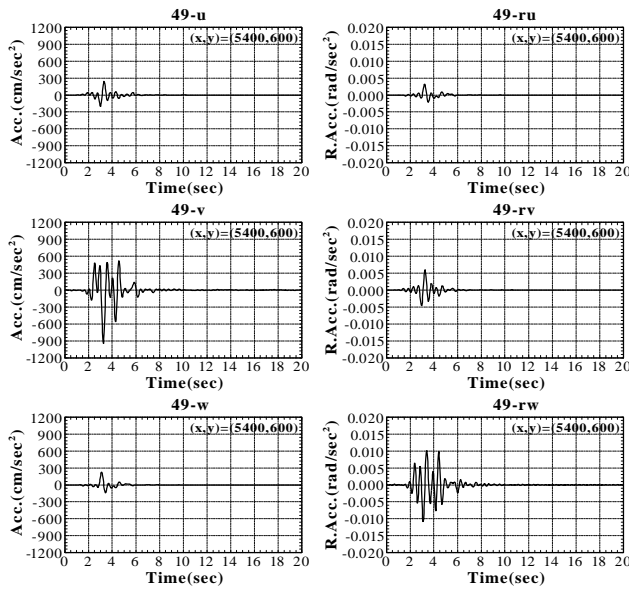


Fig.3a Input 6 components motions at the 49th pier

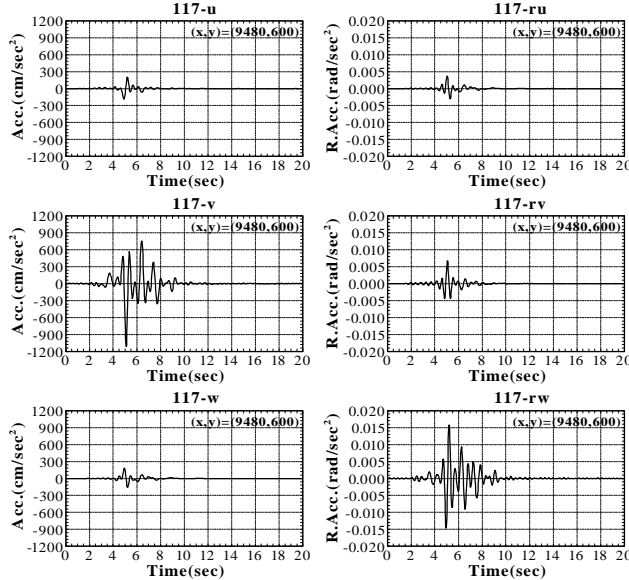


Fig.3b Input 6 components motions at the 117th pier

1-135, v

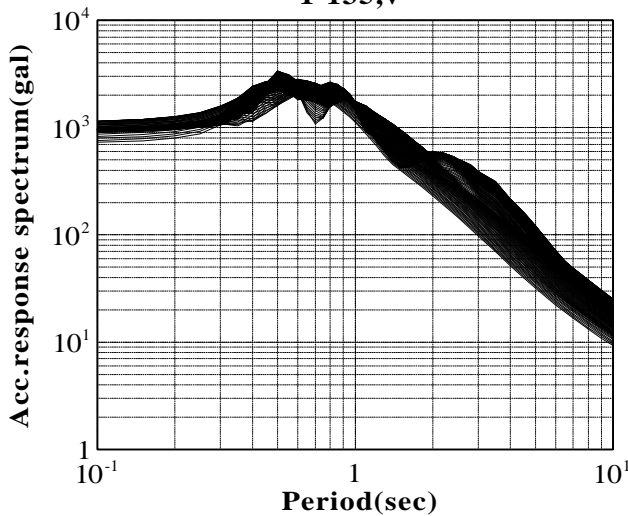


Fig.4 Response spectra of all input transverse accelerations at the 1st to 135th piers

Fig. 4 は、135 個の全橋脚位置における橋軸直角(v)方向の地盤加速度波形の加速度応答スペクトルを重ねて示したものである。地盤の最大加速度とほぼ等しい固有周期 0.1 秒における加速度応答スペクトルの値は、0.8 ~ 1.1G 程度で場所による違いは大きくないが、例えば固有周期 1.5 秒でのスペクトル値は 0.4 ~ 1.0G のように加速度応答スペクトルの場所による違いが大きい。このように震源断層近傍の地震動は場所によってその特性が大きく変わってくるので、連続高架橋のような線状構造物の応答挙動を、現行の耐震設計で多用されているように 1 地点における設計用入力地震動によって応答挙動を調べる方法では、設計用入力地震動の選定に注意を払わなければならない(4 章参照)。

3. 仮想連続高架橋のモデルと解析方法

対象橋梁として、Fig. 5 と Table 1 に示すような高架橋からなる全長 8040m の路線を想定している。この高架橋は、論文⁴⁾を参考にして新たに作成し、支間長 60m の標準的な高架橋としている。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。対象路線全体を Fig. 5b のように総質点数 3101 個、総要素数 3234 個の質点系に離散化した。

各橋脚下端は基礎固定と仮定し、各橋脚下端に 2 章(2)節のような回転 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-FIBER3D⁵⁾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。

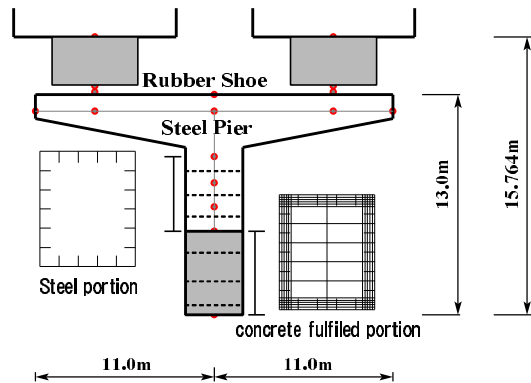


Fig.5a Transverse cross section of the idealized continuous viaduct

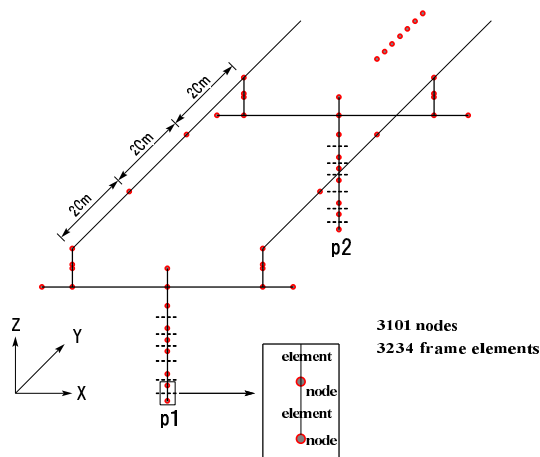


Fig.5b Discrete model of the idealized continuous viaduct

Table 1a Dimension of the continuous viaduct

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

Table 1b Dimension of the continuous viaduct

	Width (mm)	Thickness (mm)	NO. of Panel	Rib (mm)
Flange	2700	33	5	270 × 26
Web	3066	33	6	270 × 26

Table 1c Material properties of the pier

	Density (kN/m ³)	Shear modulus (N/mm ²)	Yield stress (N/mm ²)
Steel(SM490Y)	77	1.02e4	355
Concrete	23	7.70e4	21

4. 仮想連続高架橋の非線形地震応答解析結果

橋軸直角方向の応答が橋軸方向の応答に比べ圧倒的に大きいので、以下では橋軸直角方向の応答結果を考察するものとする。

Fig. 6 には、1 例としてファイバーモデルを用いた 3 次元非線形動的解析によって求められた第 49 番橋脚の代表的な位置における橋軸直角方向の応答加速度波形やゴム支承の変位波形、基部曲げモーメント波形を 3 成分入力加速度波形とともに示す。これらを見ると、ゴム支承により応答が長周期化（約 1.5 秒）し、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。

Fig. 7 は、橋脚番号 1 から 135 番の全長 8040m の連続高架橋の橋軸直角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。一方比較のため、最大入力加速度が最も大きい橋脚番号 117 地点の橋軸直角 (v) 方向の加速度波形を、橋軸直角方向を対象に 2 次元的にモデル化した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。得られた変位分布を Fig. 8 に示す。ここでは最大応答変位が生じた時刻 5.50 秒における変位分布のみを描いている。一様な構造系を持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よらず一定となっている。Fig. 7 と Fig. 8 の応答変位分布を比較すると、入力地震動の最大加速度値はほぼ同じであるにもかかわらず、時空間的に複雑な特性を有する断層近傍の地震動を 3 次元的にモデル化した連続橋に入力するという現実に近いシミュレーション結果の方が、大きな応答変位を与え、場所によって違う応答変位となっている。このため、連続高架橋に生じる断面力等は、3 次元モデルによる方が大きくなると予測される。

そこで例えば、3 次元と 2 次元モデルによる全橋脚 1 番から 135 番の橋脚基部最大曲げモーメント (Fig.9)、橋脚軸回りの最大ねじりモーメント (Fig.10)、並びにゴム支承の最大相対変位 (Fig.11) に注目して示すと Fig.9 から Fig.11 のようになる。各図における 3 つの図 (a から c) のうち、左端の図 (Fig.9a から Fig.11a) は、水平加速度 3 成分と地盤の傾き等の各軸回りの回転加速度 3 成分の合計 6 成分の入力加速度波形を連続橋の 3 次元モデルに作用させたもの (3 次元 6 成分モデル) と、1 地点の橋軸直角方向の水平加速度波形 (49 番橋脚、または 117 番橋脚地点の橋軸直角方向加速度波形) を橋軸直角方向の 2 次元モデルに作用させたもの (2 次元モデル) を比較している。中央の図 (Fig.9b から Fig.11b) は、水平加速度 3 成分の入力加速度波形を連続橋の 3 次元モデルに作用させたもの (3 次元 3 成分モデル) と、2 次元モデルの結果を比較したもので、最後に右端の図 (Fig.9c から Fig.11c) は、各橋脚地点の橋軸直角方向の水平加速度波形のみを連続橋の 3 次元モデルに作用させたもの (3 次元 v 成分モデル) と、2 次元モデルの結果を比較したものである。図の横軸は橋脚の地点番号 (1 番から 135 番) を表す。

Fig.9 から Fig.11 の左の図 (a の付く図) と中央の図 (b の付く図) を比較すると、入力加速度波形のうちの回転加速度波形の影響を見ることができるが、3 次元 6 成分モデルと 3 次元 3 成分モデルの結果はほとんど同じで、本研究で用いた震源断層 地盤系モデルでは、入力回転加速度波形の影響は無視できるといえる。

さらに中央の図 (b の付く図) と右の図 (c の付く図) を比較すると、3 次元 v 成分モデルと 3 次元 3 成分モデルの応答結果はほとんど同じであるので、全橋脚における橋軸直角方向の水平加速度波形のみを入力するモデルによって連続高架橋の 3 次元応答挙動が求められるといえる。

次に Fig.9 から Fig.11 の 2 次元と 3 次元モデルの結果を比較すると、橋脚 49 番地点の地盤加速度波形を入力した 2 次元解析では、3 次元解析の上限の最大曲げモーメントが得られ

ているものの、ゴム支承の最大相対変位では、3次元解析の方が約1.3倍大きい。3次元解析では、49番または117番橋脚位置での入力加速度波形を使うかによって応答に大きな違いがあるが、震源断層近傍地震動の選択が適切であれば（本研究では49番橋脚の入力加速度波形）その1地点の地盤加速度波形を用いた2次元モデルに基づく耐震設計でよいといえよう。しかし Fig. 10 に示す橋脚軸回りの最大ねじれモーメントは、2次元解析では生じないが、3次元解析では約1800 - 2000tf.m の最大ねじりモーメントが橋脚基部に生じてい

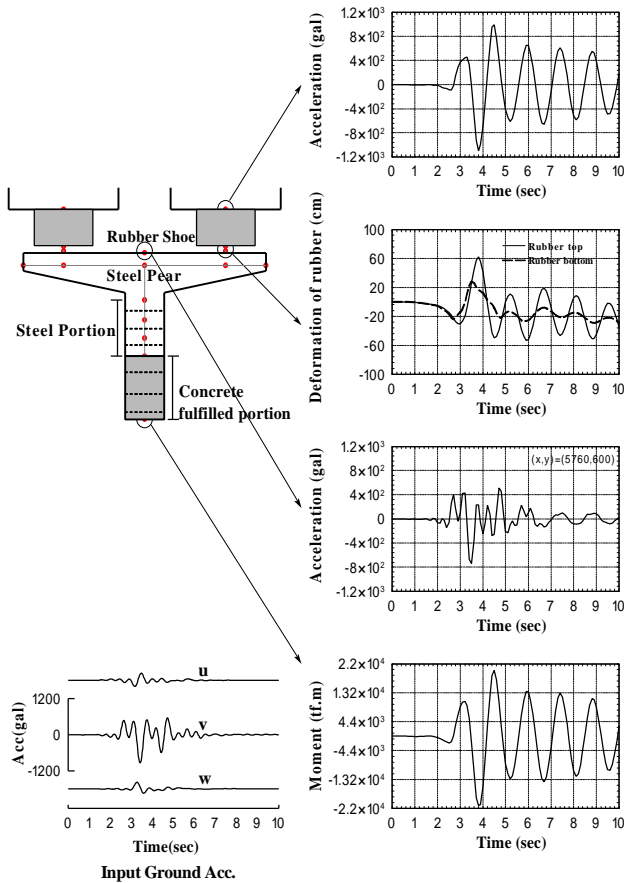


Fig.6 Transverse response time histories of No.49 pier with input ground acc.

る。またゴム支承の最大相対変位も3次元解析の方が大きな値を与える。

以上をまとめると、本研究で用いた震源断層 地盤系並びに連続高架橋の例では、地盤の傾き等の回転地震動3成分の影響は Fig.9 から Fig.11 のようにほとんど無視できること並びに、水平地震動3成分のうち橋軸直角方向(v)成分のみの場所的違いを考慮することで3次元的応答挙動が再現できるといえる。

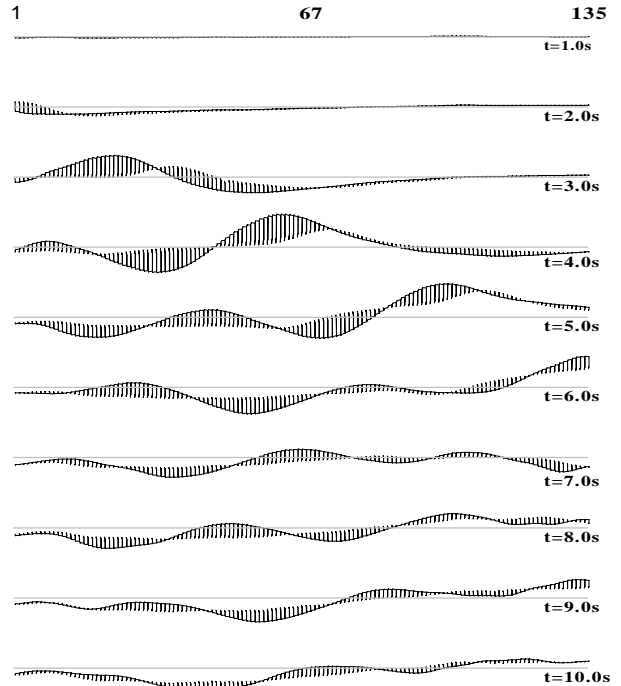


Fig.7 Overhead view of the translational response displacements of the continuous viaduct at 10 time instants by 3-D analysis



Fig.8 Overhead view of the translational response displacements of the continuous viaduct at 10 time instants by 2-D analysis

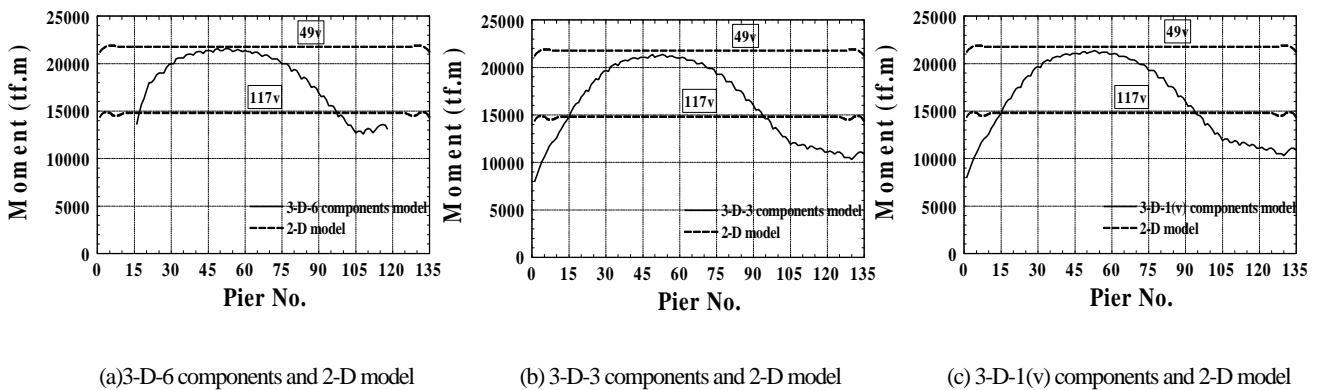


Fig. 9 Comparison of maximum bending moment of piers in bridge normal direction (2-D and 3-D model)

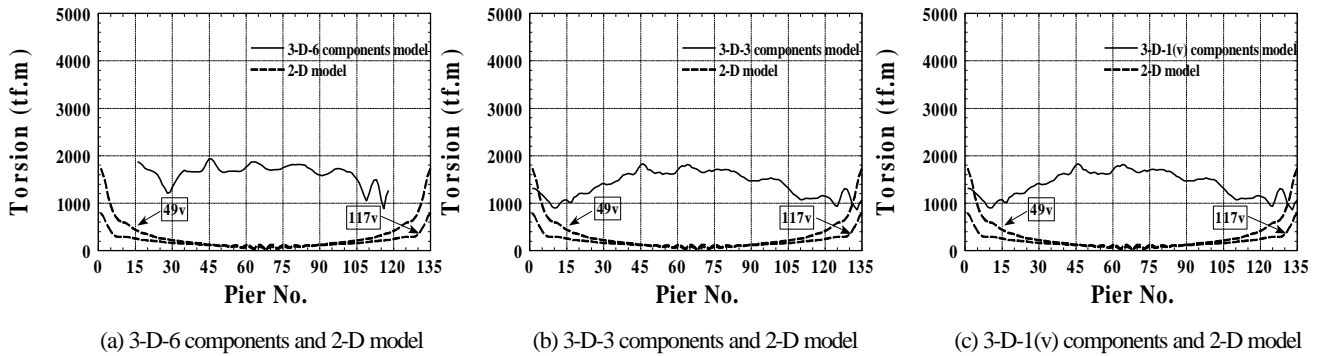


Fig. 10 Comparison of maximum torsion of piers (2-D and 3-D model)

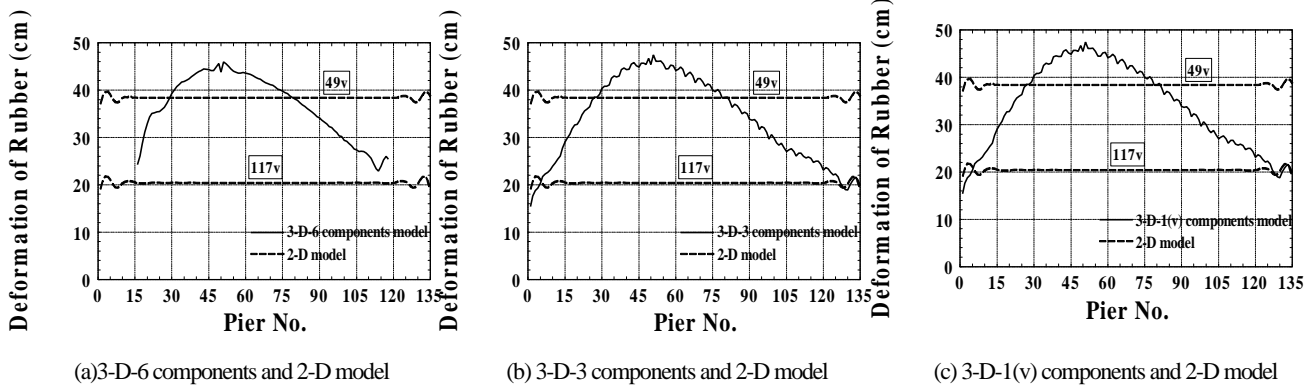


Fig. 11 Comparison of maximum relative deformation of rubber shoes in bridge normal direction (2-D and 3-D model)

6. 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。

ファイバーモデルを用いた3次元非線形動的解析によって、この横ずれ断層近傍の仮想連続高架橋の地震応答計算を行い、次のような結果が得られた。

震源断層近傍の地震動の選択が適切に行われれば、その1地点の地盤加速度波形を用いた2次元モデルによる解析に基づく耐震設計でもよいといえよう。しかし2次元解析では生じない橋脚軸回りの曲げモーメント(ねじり)の最大値において、約1800 - 2000tf.mが3次元解析で求められている。またゴム支承の最大相対変位も3次元解析の方が大きな値を与える。ただし、本研究で用いた震源断層地盤系並びに連続高架橋の例では、地盤の傾き等の回転地震動3成分の影響はほとんど無視できること並びに、水平地震動3成分のうち橋軸直角方向(v)成分のみの場所的違いを考慮することで3次元応答挙動が再現できることがわかった。

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、地表に断層が現れるような例では地盤の傾き等の回転地震動の影響が大きくなること、震源断層を横断する連続高架橋の挙動等に関しては、今後検討をしなければならない重要な課題である。さらに本解析では、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(2001):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.
- 2) 原田隆典, 大角恒雄, 奥倉英世(1999):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.
- 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, 地震の力学問題部門.
- 4) 前野裕文, 森下宣明, 野中哲也(2000):高架橋の耐震設計法の一考察, 第3回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, pp.33-42.
- 5) Y-FIBER3D, ヤマト設計株式会社.