

横ずれ断層近傍における連続高架橋の地震応答特性

Seismic response characteristics of a continuous viaduct near a strike slip fault

原田隆典¹・野中哲也²

Takanori Harada · Tetsuya Nonaka

¹ 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)

² ヤマト設計株式会社 企画開発部 (〒889-1403 宮崎県児湯郡新富町大字上富田3191-1)

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 an extended seismic source.

Key Words: earthquake ground motions, kinematic source model, vortex of seismic wave, earthquake response, continuous bridge

1. まえがき

構造物の耐震設計用入力地震動は、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。

このような視点から第1著者らは、地震学分野で発展してきた運動学的断層モデルによる地震動の理論的合成法を工学分野へ応用することを目指して研究を進めてきた。未だ満足できる段階にはないが、運動学的断層モデルと水平成層地盤モデルに対して剛性マトリクス法に基づく定式化を行うと、比較的簡単な数値計算アルゴリズムによって地震動波形の合成ができることを突き止めた^{1),2)}。構造技術者は、剛性マトリクス法に馴染み深いので、見通しよく地震動波形を合成することができるものと思われる。また横ずれ断層を想定した数値計算例から、震源断層近傍の地震波はあたかも台風の雲の動き

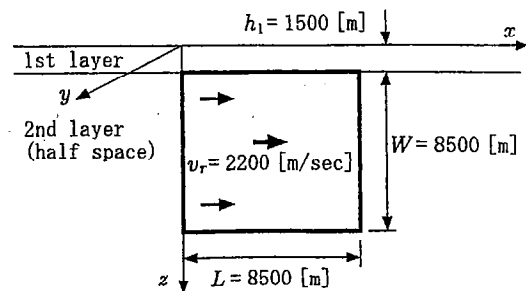
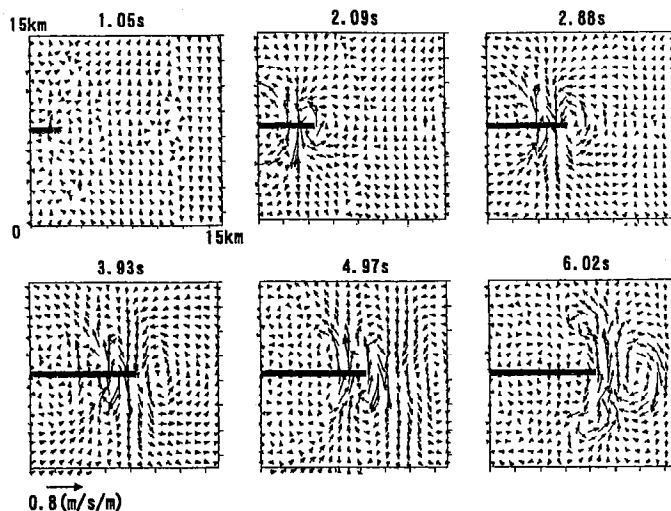


図-1 震源断層-地盤系モデル

のように渦を巻きながら伝播してゆくため、震源断層近傍の地震動は時空間的に極めて複雑であることがわかってきた^{2),3)}。なぜ断層近傍の地震波が渦を巻きながら伝播するのかについての検討は十分ではないし、これまでそのような地震波の渦現象を実証したという報告は見あたらない。しかしこのような時空間的に複雑な地震動が、仮に地中パイプラインや連続高架橋などの線状構造物に作用するならば、その構造物も時空間的に複雑な応答をするものと予測される。著者らの知る限りでは、このような震源断層近傍における時空間的に複雑な地震動特性と線状構造物の応答特性を検討した研究はこれまで見当たらない。

そこでこれまでの論文^{1),2)}で取り扱った横ずれ断層近



図一 2 6つの時刻毎の断層近傍地表15x15kmにおける水平速度分布図

傍に仮定の連続高架橋が存在するものとして、渦を巻きながら伝播し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てみた。特に本論文では、橋梁の一般的な耐震設計においては、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、この一般的な耐震設計で行われるように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地震応答解析結果との比較に焦点を当てて応答特性を整理したので、その内容を述べるものとする。

2. 震源断層近傍地震動の渦現象と解析入力地震動

2.1 横ずれ断層近傍の地震動の渦現象

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、図一1に示すような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¹⁾に従って計算する。この方法では、運動学的震源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。ここで採用した震源断層—地盤系のモデルは、1966年パークフィールド地震のモデルとしてBouchon⁴⁾が求めたもので、震源断層近傍のいわゆるステーション2での観測波形と理論的計算波形のよい一致が得られている。なお震源断層モデルのパラメータの定義やそのモデルの再検討結果は原田らの論文¹⁾に記載されているので詳細は省略するが、ここで用いた震源断層モデルのパラメータを表一1に再掲する。ここでSlip Type 1とは、図一1に示す断層の左端から破壊が始まり右端へ一様にすべる破壊形式のすべりを意味する。

表一 1 震源断層パラメータ

Seismic Moment M_0	[N·m] ([dyne·cm])	2.230×10^{17} 2.230×10^{24}
Rise Time of the Ramp Function τ	[sec]	0.3
Length of Fault L	[m]	8500
Width of Fault W	[m]	8500
Velocity of Rupture v_r	[m/sec]	2200
Depth of Upper Edge of Fault z_{00}	[m]	0.0
Strike Angle ϕ	[°]	0.0
Dip Angle δ	[°]	90.0
Slip Angle λ	[°]	0.0
Slip Type		Type 1

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/m³、2300kg/m³、Q値=400、150で、これらは論文^{1),4)}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。

このような横ずれ断層—地盤系において、断層近傍の地震動の時空間分布特性を見るために、図一2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(15km x 15km)における地震動の水平速度分布をプロットした。図一2に示す6つの時刻毎の水平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、地表の各地点における断層の平均すべり量1m当たりの水平速度の向きと大きさを表す。

図一2によると、断層破壊終了付近の地表に半時計回りの渦が現れ、この渦の後に接するよう同じく反時計回りの少し半径の大きい渦が断層破壊方向に伝播している。このような現象は断層破壊終了時刻(3.9秒)程度まで続く。それ以後、2つの渦のうち前方の渦の振幅は勢力を弱め、6.02秒にはこれまでとは逆の時計回りの

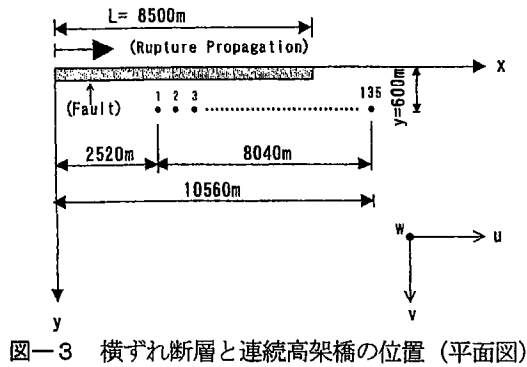


図-3 横ずれ断層と連続高架橋の位置 (平面図)

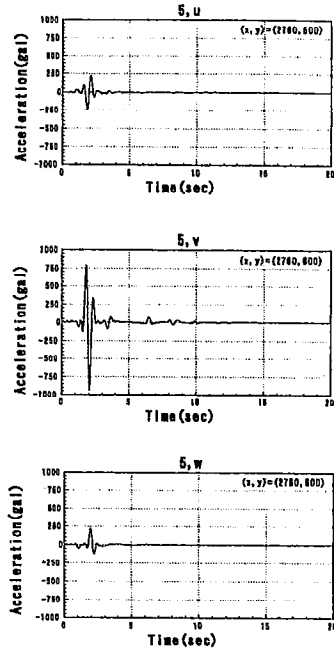


図-4 a 5番橋脚への3成分入力加速度波形

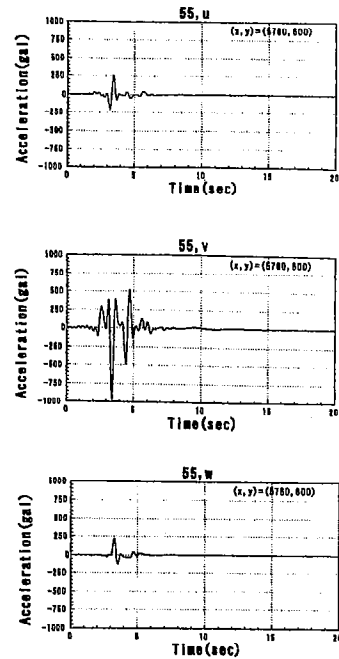


図-4 b 55番橋脚への3成分入力加速度波形

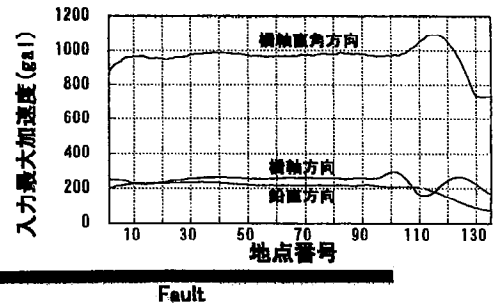


図-5 全橋脚(1から135番)への3成分入力加速度波形の最大値分布

渦が現れている。後方の渦の方向は変わらず反時計回りのままである。

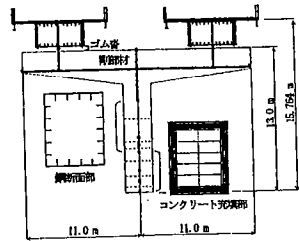
本計算では、785m 間隔で地表面の速度波形を計算したが、図-2に示すように、断層破壊終了付近の地表面において785mの間隔で逆方向に大きな速度振幅が現れるなど、2つの渦の重なり具合から地震動速度波形の複雑な空間分布特性が見られる。

すでに前論文¹⁾の数値計算例(本数値計算例と同じ震源-地盤モデル)で指摘されているが、震源断層近傍の地震動、特に速度や加速度波形は、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特性の相互作用によって大きな影響を受ける。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、震源断層近傍において地震動速度波形の渦現象が現れたと考えられる。しかし震源断層特性と表層地盤特性の条件がどのようなになったときに、地震動の時空間分布特性がどのようなかを予測するまでには至っていない。また観測記

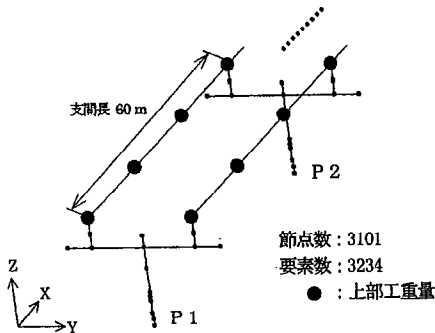
録によって実証されているわけでもない。しかしこのような震源断層近傍における地震動速度波形の時空間分布特性の複雑性または渦現象をもつ地震波が、地中パイプラインや連続高架橋などの線状構造物に作用するならば、その構造物も時空間的に複雑な応答をするものと予測されるので、仮想の連続高架橋の地震応答解析を実施してその影響がどのようなものであるかを調べるものとした。

2. 2 解析用入力地震動

そこで図-1に示すような震源断層-地盤系モデルの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。図-3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。5番と55番橋脚位置での橋軸(u)、橋軸直角(v)、鉛直(w)方向の加速



図一六 コンクリート充填T型鋼製橋脚



図一七 連続高架橋の離散化モデル

度波形を図一四に示す。この入力波形は(1)節で述べたように振動数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。(1)節では、断層の平均すべり量 D で規準化した速度波形の時空間分布特性を見たが、ここでは、断層の平均すべり量を $D=0.5\text{m}$ とした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(振動数は約1.5Hz)が見られることは共通しているが、両地点における橋軸直角(v)方向の波形のみ継続時間はかなり違う。しかし図一五に示すように、各橋脚位置における最大加速度値の場所的な違いはあまり大きくない。

3. 仮想連続高架橋のモデルと解析方法

対象橋梁として、図一六と表一三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⁵⁾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。対象路線全体を図一七のように総質点数3101個、総要素数3234個の質点系に離散化した。

表一三 a 連続高架橋モデルの諸元

橋脚数	135
支間長(m)	60
橋脚高さ(m)	13.0
上部工慣性力作用位置(m)	15.764
コンクリート充填高さ(m)	3.65
高架橋全長(m)	8040

表一三 b 柱部断面寸法

	幅(mm)	板厚(mm)	パネル数	リブ(mm)
フランジ	2700	33	5	270×26
ウェブ	3066	33	6	270×26

表一三 c 材料物性値

	比重 (kN/m^3)	横せん断係数 (N/mm^2)	降伏応力 (N/mm^2)
鋼材(SM490Y)	77	1.02e4	355
コンクリート	23	7.70e4	21

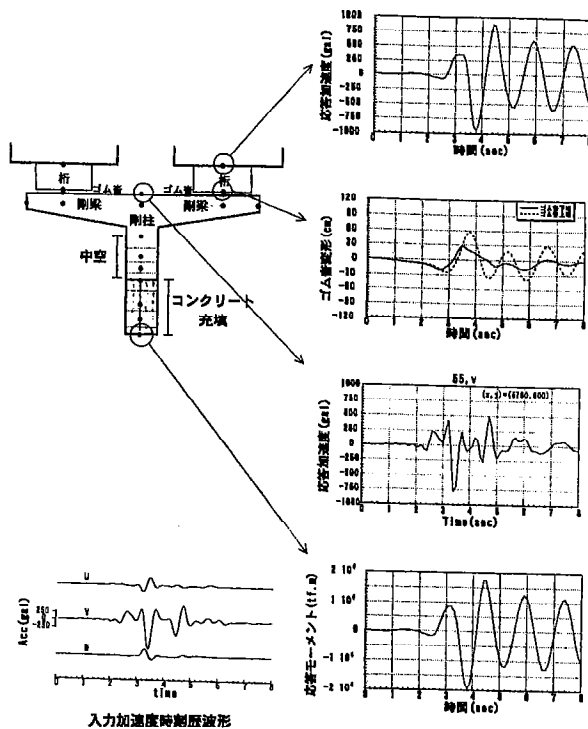
各橋脚下端は基礎固定と仮定し、各橋脚下端に2章(2)節のような3成分加速度波形を入力した。応答解析では、第2著者らの開発した解析コードY-FIBER3D⁶⁾を使い、ファイバーモデルを用いた3次元非線形動的解析(3次元モデルと呼ぶ)を行った。なお、死荷重に相当する軸圧縮力が作用したときの静的解析を行い、これを初期状態として地震応答解析を実施した。

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。そこで本論文では、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を全橋脚に同時に作用させるという非線形動的解析(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。ここで言う2次元モデルとは、本解析用いた全長8040mの連続橋は全て一様な橋脚と桁から構成されているため、1地点の地震動水平加速度波形を全橋脚に同時に作用させることは、2次元的な解析をしていることに等しいという意味である。

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、以下では主に橋軸直角方向の応答結果を考察するものとする。

図一八には、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55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

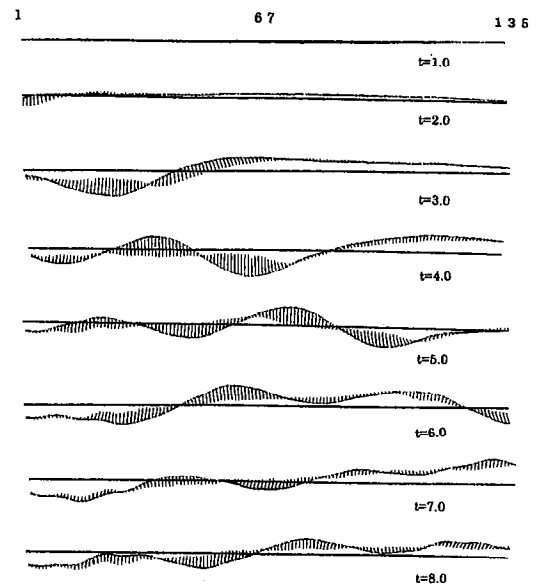


図一八 55番橋脚の橋軸直角方向応答波形

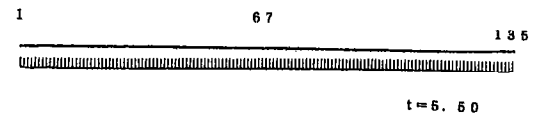
により応答が長周期化し、基部の曲げモーメント波形も長周期化したものとなっていることがわかる。

図一九は、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。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、橋脚番号117地点の最大入力加速度が最も大きいので(図一五参照)、この地点の橋軸直角(y)方向の加速度波形を全橋脚に同時に入力する非線形動的解析(2次元モデルと呼ぶ)を行った。得られた変位分布を図一10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。図一九と図一10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



図一九 真上から見た1秒毎の全橋脚上の桁の橋軸直角方向変位分布図(3次元モデルの場合)



図一10 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角方向変位分布図(2次元モデルの場合)

番から135番の橋脚基部最大曲げモーメントとゴム支承の最大相対変位に注目して、入力最大加速度と共に示すと図一11のようになる。この図の横軸は橋脚の地点番号(1番から135番)で、横ずれ断層の地表面への投影位置も黒帯で描かれている。断層はこの図の左端から破壊し始め、右端で終了する(図一三参照)。この図より、55番橋脚基部の曲げモーメントと、同じ橋脚のゴム支承の最大相対変位がもっとも大きいこと、2次元モデルの応答よりも3次元モデルの応答の最大値は、曲げモーメントでは約1.5倍、最大相対変位で2.4倍大きいことがわかる。

次に、橋軸方向の結果を図一12に示す。橋軸方向では、橋軸直角方向とは逆に、3次元モデルの応答最大値の方が小さくなっている。これは、橋軸方向の剛性が大きいいためその剛性によって地震動の場所的違いが平均化され応答が出てくるため、平均化効果による結果といえる。

5. 考察

前章では、震源断層近傍の地震動の中から単純に最大加速度が最大となる1地点の地盤加速度波形を選んでこれを全ての橋脚に同時に作用させる2次元非線形動的解析を実施して、3次元非線形動的解析結果と比較した。ここでは橋軸直角方向の応答において、3次元非線形動

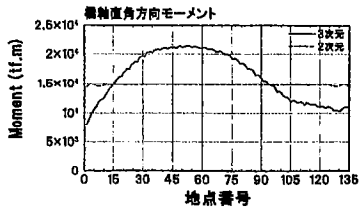


図-1 1 a 1から135番橋脚基部の最大曲げモーメント（橋軸直角方向の2次元と3次元モデルの比較）

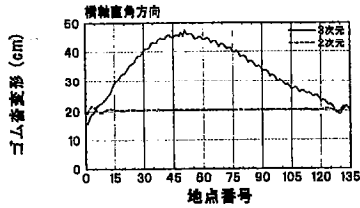


図-1 1 b 1から135番橋脚のゴム支承の最大相対変位（橋軸直角方向の2次元と3次元モデルの比較）

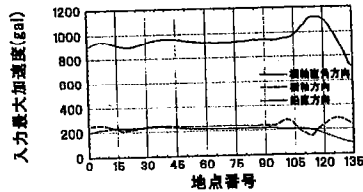


図-1 1 c 1から135番橋脚への入力最大加速度

的解析で最大の曲げモーメントが得られた橋脚番号49（図-1 1参照）地点の橋脚直角方向の地盤加速度波形を用いた2次元非線形動的解析を実施し、3次元解析結果と比較してみた。

図-1 3にその結果を示す。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倍大きな値を与えている。

図-1 1と図-1 3を比較すると、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。しかし解析結果の図は省略するが、1地点における橋軸直角方向の加速度波形を全ての橋脚に同時に作用させる2次元解析では生じない橋軸方向の橋脚基部の曲げモーメントと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1000 tf.m、約2000 tf.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。さらに本解析では、連続橋の全長が一様であったが、そうでない場合についての検討も必要である。したがって現時点では、震源近傍の連続橋については、地震動の時空間分布特性の複雑性と構造物特性を同時に

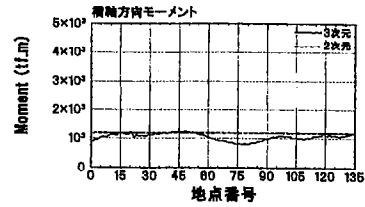


図-1 2 a 1から135番橋脚基部の最大曲げモーメント（橋軸方向の2次元と3次元モデルの比較）

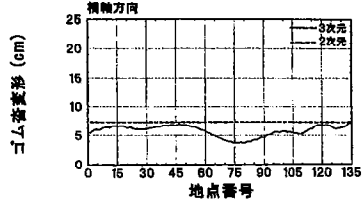


図-1 2 b 1から135番橋脚のゴム支承の最大相対変位（橋軸方向の2次元と3次元モデルの比較）

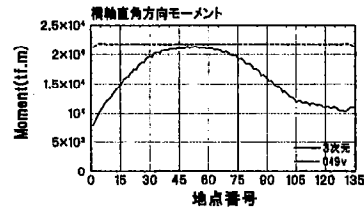


図-1 3 a 1から135番橋脚基部の最大曲げモーメント（橋軸直角方向の2次元と3次元モデルの比較）

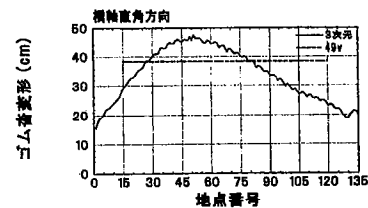


図-1 3 b 1から135番橋脚のゴム支承の最大相対変位（橋軸直角方向の2次元と3次元モデルの比較）

考慮した動的解析に基づいて耐震設計をすることが必要であると結論するのが適当であろう。

6. まとめと課題

原田らの方法^{1),2)}を使って、運動学的震源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一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。このモデルはBouchon⁴⁾が1966年パークフィールド地震の横ずれ断層一地盘系モデルとして採用したものである。

この横ずれ断層近傍における地表面地震動の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つ

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った。また現行の橋梁の耐震解析では、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ことが一般的であるので、この一般的な耐震設計で行われるように1地点の地震動水平加速度波形を全ての橋脚に同時に作用させる疑似的2次元モデルを使った非線形動的解析(2次元モデルと呼ぶ)を実施し、両解析結果を比較した。図-11と図-13を比較すると、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軸方向の橋脚基部の曲げモーメントと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1000tf.m、約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。さらに本解析では、連続橋の全長が一様であるとしたが、そうでない場合についての検討も必要である。したがって現時点では、震源近傍の連続橋については、地震動の時空間分布特性の複雑性と構造物特性を同時に考慮した動的解析に基づいて耐震設計をすることが必要であるという結論とするのが適当である。

今後の主要な課題としては、以下の点が考えられる。本論文では、3次元地震動6成分のうち座標軸方向の3成分加速度波形を入力し、座標軸回りの3成分回転地震動

を零とした。回転地震動の影響を検討する必要がある。さらに本論文では、1.9Hz以下の低振動数の地震波を対象とし、基礎固定として連続橋の地震応答解析を行ったが、基礎と地盤の動的相互作用を考慮したもっと現実的なモデルによる検討も必要である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) Harada, T. and Ohsumi, T. (2000): Stiffness matrices based formalism of ground motion synthesis and differential ground motions, *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering*, Auckland, New Zealand, Paper No.603/4/R.
- 4) Bouchon, M.: Predictability of ground displacement and velocity near an earthquake fault, An example: The Parkfield Earthquake of 1966, *Journal of Geophysical Research*, Vol.84, No.B11, pp.6149-6156, 1979b.
- 5) 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.
- 6) Y-FIBER3D, ヤマト設計株式会社.

(2000年9月14日受付)