

横ずれ断層近傍における連続高架橋の応答特性

原田隆典¹・野中哲也²

¹正会員 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正会員 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)

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ッ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、剛性マトリッ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

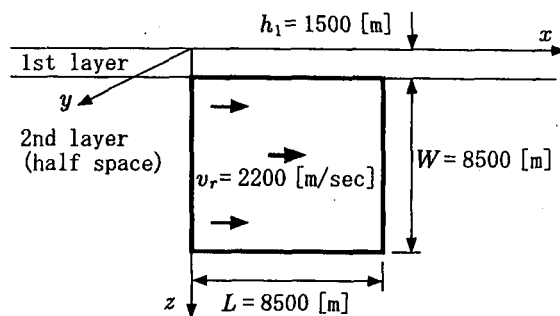


図-1 震源断層—地盤系モデル

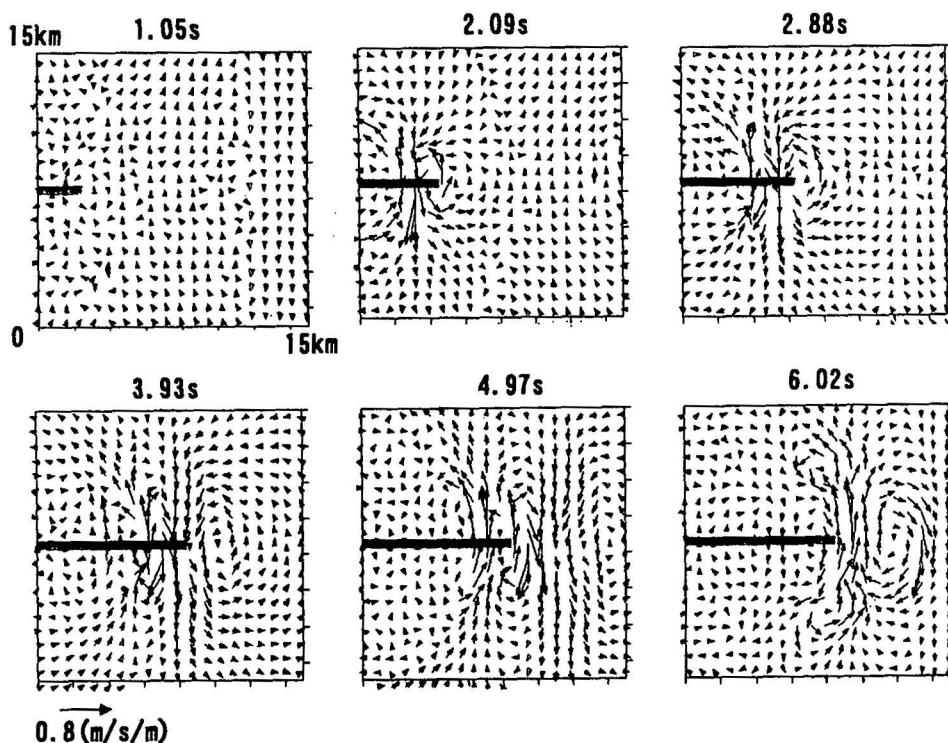
予測される。

そこでこれまでの論文^{1),2)}で取り扱った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、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用入力地震動

(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-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



図—2 6つの時刻毎の断層近傍地表面15x15kmにおける水平速度分布図

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。またそのモデルの再検討結果が原田らの論文¹⁾に記載されている。この震源断層モデルのパラメータを表—1に示す。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)}のものと同一である。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—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面(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—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1m当たりの水平速度の向きと大きさを表す。

図—2によると、断層破壊終了付近の地表面に

表—1 震源断層パラメーター

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

半時計回りの渦が現れ、この渦の後に接するように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

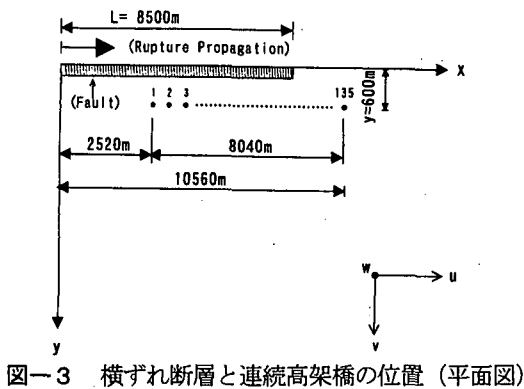


図-3 横ずれ断層と連続高架橋の位置 (平面図)

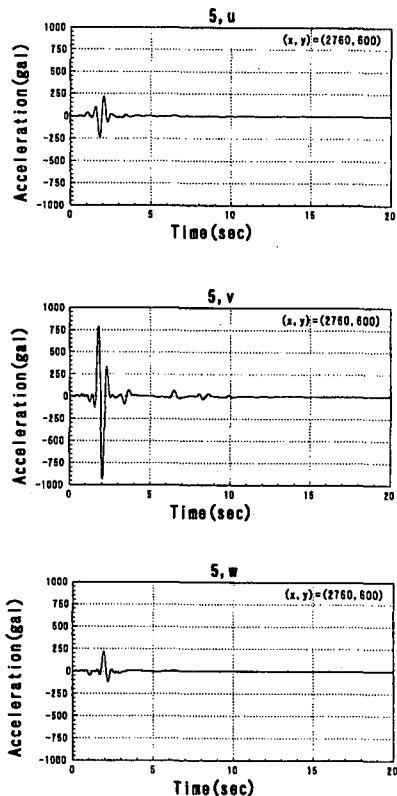


図-4 a 5番橋脚への3成分入力加速度波形

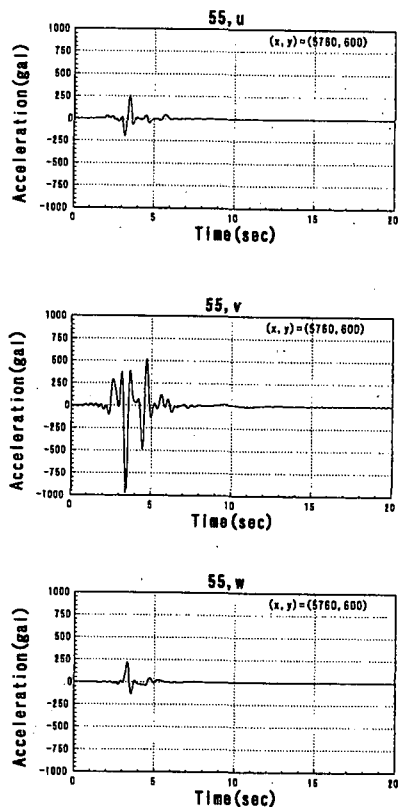


図-4 b 55番橋脚への3成分入力加速度波形

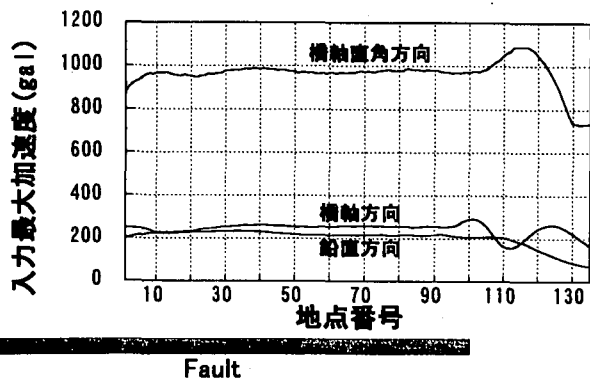


図-5 全橋脚 (1から135番) への3成分入力加速度波形の最大値分布

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になったときに、地震動の時空間分布特性がどのようになる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) 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)方向の加速度波形を図-4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

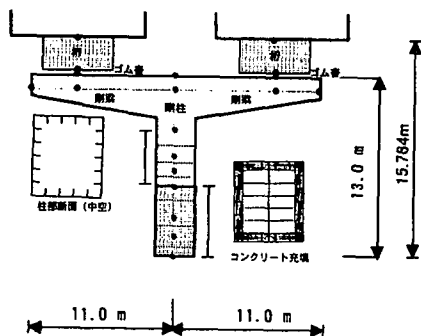


図-6 コンクリート充填T型鋼製橋脚

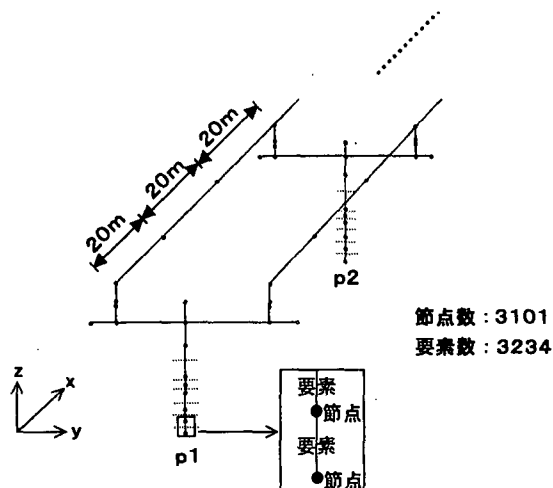


図-7 連続高架橋の離散化モデル

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-5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

想定した連続高架橋は、図-6と表-3に示すようなコンクリート充填のT型鋼製橋脚が60m毎にある全長8040mの連続高架橋である。鋼製桁はゴム支承で支えられており、支承はせん断変形をする線形ばねとしてモデル化している。図-7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-DYNA/NL⁵⁾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次元的な地盤の揺れのうち、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

表-3 a 連続高架橋モデルの諸元

橋脚数	135
橋脚間隔(m)	60
橋脚高さ(m)	13
橋脚柱部断面の断面積(m^2)	6.25
コンクリート充填高さ(m)	3.65
高架橋最高高さ(m)	15.764
高架橋の全長(m)	8040

表-3 b 柱部断面寸法

			リブ		
	幅(m)	板厚(m)	リブ数	幅(m)	板厚(m)
y 軸平行鋼材	2.5	0.03	4	0.21	0.03
x 軸平行鋼材	2.5	0.03	3	0.21	0.03

表-3 c 材料物性値

	比重	横せん断係数	降伏応力(tf/m^2)
鋼材(SM520)	7.85	8100000	-
コンクリート	2.5	1020000	2100

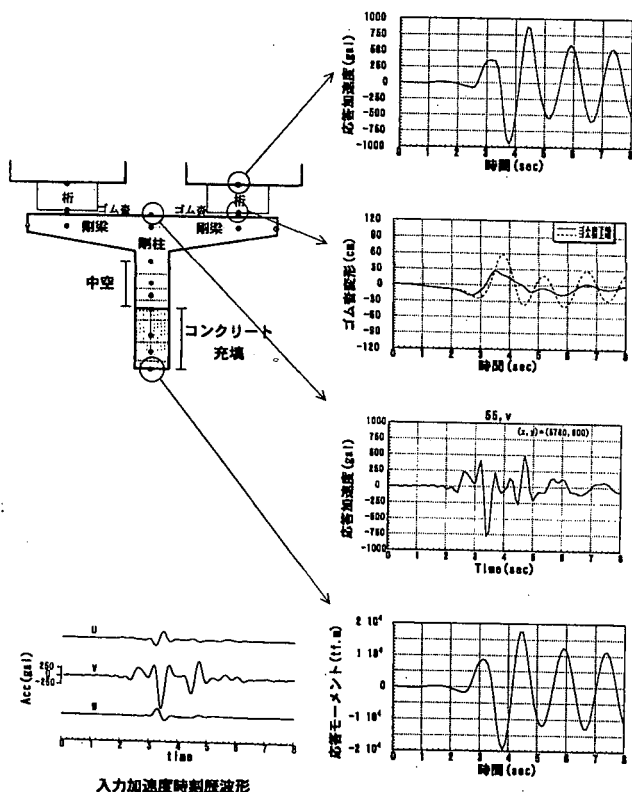
方向を対象として2次元的にモデル化した橋梁に作用させて、断面等が設計されるので、この一般的な耐震解析で行われるように1地点の地震動水平加速度波形と2次元モデルを用いた非線形動的解析(2次元モデルと呼ぶ)を実施し、両解析結果を比較するものとする。

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-8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。これを見ると、ゴム支承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。

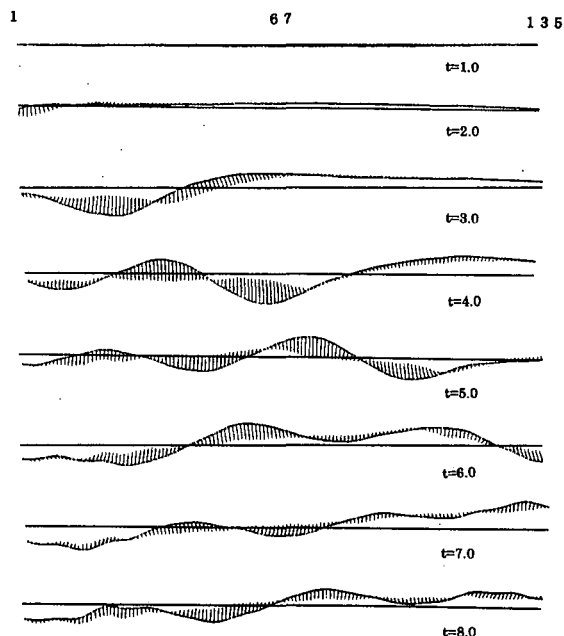
図-9は、橋脚番号1から135番の全長8040mの連続高架橋の橋軸直角方向の応答変位を真上から1秒毎に見たときの変位分布を描いたものである。2章で示したような断層近傍地震動の場所的違いの複雑さに影響され、全長8040mの連続高架橋が変形している様子がわかる。一方比較のため、橋脚番号117地点の最大入力加速度が最も大きいので(図-5参照)、この地点の橋軸直角(v)方向の加速度波形を、橋軸直角方向を対象に2次元的にモデル化した連続高架橋の全橋脚に同時に入力する2次元非線形動的解析を行った。得られた変位分布を図-10に示す。ここでは最大応答変



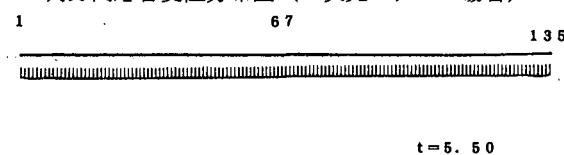
図一 8 55番橋脚の橋軸直角方向応答波形

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。図一9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(図一3参照)。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



図一 9 連続橋を真上から見た時の1秒毎の全橋脚の橋軸直角方向応答変位分布図(3次元モデルの場合)



図一 10 連続橋を真上から見た時の最大変位発生時刻の全橋脚の橋軸直角方向応答変位分布図(2次元モデルの場合)

2.4倍大きいことがわかる。

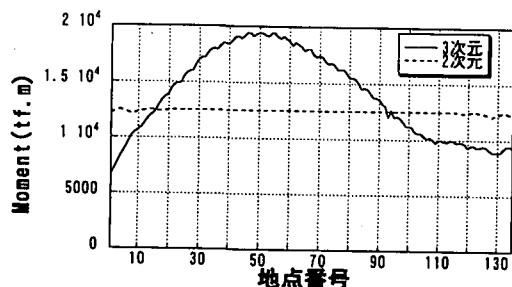
参考として、橋軸方向の結果を図一12に示す。橋軸方向では、3次元モデルの応答最大値は曲げモーメントで約2.5倍、相対変位で1.7倍ほど2次元モデルの結果よりも大きい。

5. まとめと課題

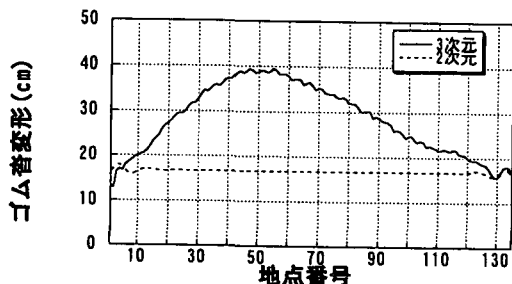
原田らの方法^{1),2)}を使って、運動学的震源モデルと水平成層地盤の剛性マトリックスによって解析的に求められる振動数一波数領域の地震波動場を3重逆フーリエ変換して理論的に地震動波形を合成した。このモデルはBouchon⁴⁾が1966年パークフィールド地震の横ずれ断層一地盤系モデルとして採用したものである。

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。

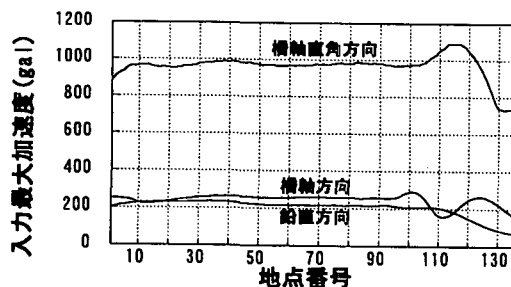
ファイバーモデルを用いた3次元非線形動的解析によって、この横ずれ断層近傍に想定した全長8040mの仮想的な連続高架橋の地震応答を計算した。また現行の橋梁の耐震解析では、3次元的地盤の揺れのうち、加速度が最も大きい1地点における水平1方向の加速



図一 1 1 a 全橋脚（1 から 1 3 5 番）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）



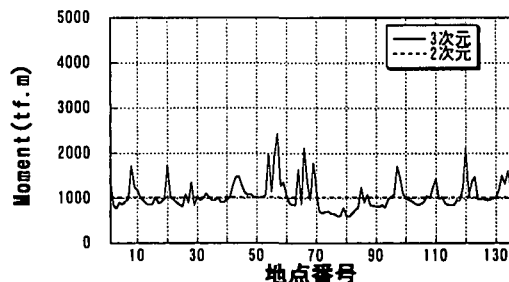
図一 1 1 b 全橋脚（1 から 1 3 5 番）のゴム支承の最大相対変位（橋軸直角方向の 2 次元と 3 次元モデルの比較）



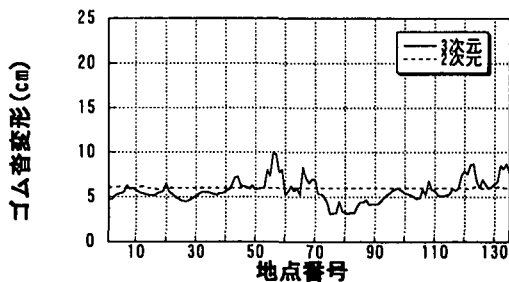
図一 1 1 c 全橋脚（1 から 1 3 5 番）への入力最大加速度

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と 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。2 次元モデルに比べると 3 次元モデルの方が約 2 倍前後応答値が大きくなった。このことは、震源断層近傍の地震動が時間的、空間的に複雑に変化しているため、このような地震動の 3 次元複雑性を考慮した構造物の応答計算に基づく耐震設計が必要であることを示しているものと思われる。

しかし本論文では、上記のような 2 次元と 3 次元モデルの応答の違いの主要原因は何かに関しては検討をしていない。例えば、橋軸または橋軸直角方向を対象とした連続橋の 2 次元モデルに場所的に違う入力地震動



図一 1 2 a 全橋脚（1 から 1 3 5 番）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）



図一 1 2 b 全橋脚（1 から 1 3 5 番）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）

を作用させると、その応答は 3 次元モデルの応答に比べどの程度になるのか、また 3 次元モデルにおいて、鉛直方向や橋軸方向の入力地震動を零として作用させた場合、応答の違いはどの程度かなどを今後検討して、2 次元と 3 次元モデルの応答の違いの主要原因を検討する必要がある。また本論文では、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, 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) Y-DYNA/NL (非線形動的解析システム), ヤマト設計株式会社.