

鋼橋上部構造の梁要素を用いた高精度解析モデル手法

岩田 隆弘¹・木下 幸治²

¹学生会員 岐阜大学大学院博士課程 工学研究科工学専攻（〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸1-1）

²正会員 岐阜大学准教授 工学部社会基盤工学科（同上）

1. 研究の背景と目的

巨大地震に対する橋梁システムの耐震性能の評価をいかに正しく行うことができるかが、地震防災上重要であり、実地震の観測記録や振動台実験に基づき橋梁システムの地震応答解析が勢力的に行われている。例えば、実地震の観測記録に基づく橋梁の数値解析では、観測された高速道路の橋梁構造物の応答値を基に橋梁システムの解析モデルの挙動の再現性を確認している^{1,2)}。また、振動台実験は米国の University of Nevada, Reno³⁻⁵⁾、また中国の同濟大学⁶⁾や西南交通大学⁷⁾において、複数の振動台を並べた振動台試験システムによる大規模な橋梁構造物全体を対象とした振動台実験が勢力的に実施され、橋梁システムの耐震性能評価や数値解析技術の検証が進められている。

このような現状から、橋梁システムを対象とした大規模な振動台実験に基づき数値解析の高度化を目指すといったことが、重要になると考えられる。しかし、複雑な橋梁システムの耐震性能の評価を実務レベルで効率的に行うためには、高精度で、かつ計算コストの低い数値解析モデルの構築が望まれる。従来、橋梁の地震応答解析では上部構造を一本の梁要素でモデル化する簡易な方法が取られてきたが、曲線を有する鋼桁橋では、シェル要素を用いたモデル化と比較すると振動特性等の誤差が大きいことが指摘されており³⁾、改善が必要である。

本研究は、床版と主桁を分けて梁要素を用いてモデル化⁸⁾する、高精度で、かつ計算コストを大幅に落とした上部構造のモデル手法を提案する。本稿では、そのモデル手法の上部構造の要素分割とその剛性、振動特性を他のモデル化方法や実験結果と比較して検討した。

2. 既往の上部構造のモデル手法と本研究のモデル手法の位置づけ

本章では、既往の研究を引用しつつ、近年の橋梁のモデル化について整理し、本研究で提案するモデルの位置づけについて述べる。

(1) 梁要素を用いる場合

上部構造を梁要素でモデル化する方法に関して、日本鋼構造協会が上部構造のモデル化について「ファイバーモデルを用いた橋梁の動的耐震設計の現状と信頼性向上」において2種類のモデル化が示されている⁹⁾。ひとつは上部構造を1本の梁要素でモデル化する方法である。この手法は土木学会の「鋼・合成構造標準示方書耐震設計編」でも示されている¹⁰⁾。この手法は橋梁全体の動的解析を対象とした研究において多く用いられており、大規模地震で被災した橋梁の損傷メカニズム解明や実際に観測した橋梁構造物の応答の再現解析等に用いられることもある^{1,2)}。また、世界的に多く用いられている構造解析ソフトウェア OpenSees を用いた解析では、ほとんどが上部構造を一本の梁要素でモデル化している^{例えば}¹¹⁾。上部構造が簡略化された当該モデルの主たる制限は、上部構造の荷重経路や各部材に生じる損傷を正確に再現できないことである。さらに、複雑な動的特性を有する斜橋や曲線橋梁には適しておらず、Aviramらは、上部構造を一本の梁要素でモデル化するガイドラインを提示しているが、直線橋梁に限定されている¹²⁾。さらに、Monzonの研究では、上部構造を1本の梁要素としたモデルの場合、上部構造にシェル要素を用いた場合と比べると誤差が大きいことを示している^{3,13)}。

もう1種の梁要素を用いたモデル化方法は、床板と鋼桁、対傾構または横構を別々の梁要素とする方

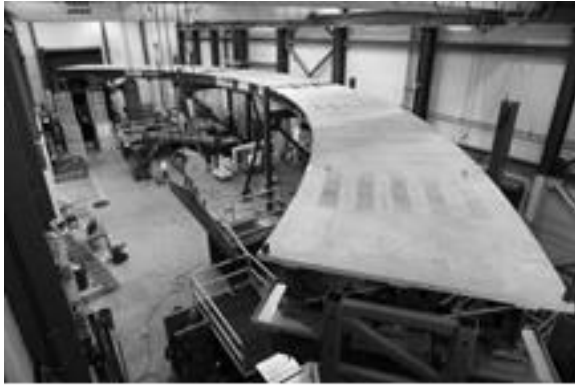


図-1 曲線橋梁振動台実験

法である。この手法は前述の上部構造を一本の梁要素ではモデル化できない対傾構や横構をモデルに取り込むことが可能となる⁹⁾。Amirihormozakiらや Shoushtariらもこれと類似したモデル化を用いて振動台実験の結果を再現している^{5, 14)}。しかし、床板と鋼桁の梁要素を接続するオフセット部材は剛体として取り扱うため、橋軸直角方向の剛性は十分でない。著者らの proposed model はこれを改善するモデルとして、床板と鋼桁の橋軸直角方向の剛性までも考慮した梁要素を用いた上部構造のモデル化を提案し、曲線橋梁の大型振動台実験の結果をよく再現できることを示しており⁸⁾、前述の一本の梁要素でモデル化する方法の制限を解消できる。

(2) シェル要素またはソリッド要素を用いる場合

上部構造をシェル要素あるいはソリッド要素でモデル化する方法に関して、AASHTOは鋼桁橋のためのガイドラインを提示している¹⁵⁾。ガイドラインでは、2D Grid Analysis Method, Plate and Eccentric Beam Analysis Methods, Generalized Grid Analysis Method, 3D FEM Analysis Methods等、上部構造のモデル化が示されており、床版はシェル要素あるいはソリッド要素の使用が前提である。上部構造をすべて梁要素でモデル化する場合と比べると精度はよくなる一方で計算時間が長くなるため、床板と鋼桁のみをシェル要素あるいは床版のみをシェル要素として他の対傾構や横構は梁要素としてなるべく計算コストを低くする場合が多い^{例えば16)}が、鋼桁にシェル要素を用いることで、局所的な応力までも評価可能となり、実地震で被災した橋梁の主桁の損傷を正確に再現する等¹⁷⁾、梁要素では再現できない損傷までも再現可能である。さらには、高次要素を使用し、かつ多径間連続の架空の高架橋モデルを、スーパーコンピューターを使用して計算した例もある¹⁸⁾。

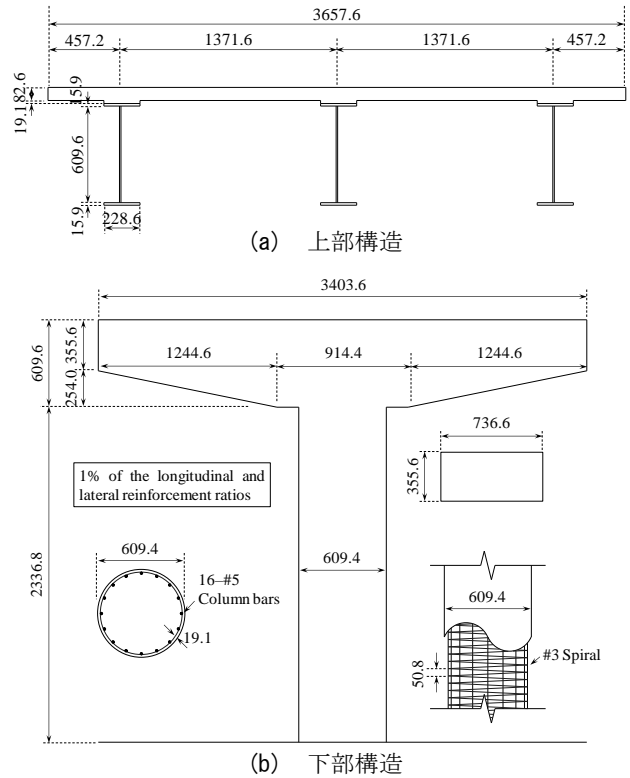


図-2 上部構造と下部構造の寸法 (単位: mm)

表-1 曲線橋梁の桁長と支間長

		G1	G2	G3
総桁長 [m]		47.00	44.20	41.71
支間長 [m]	A1 - P1	13.47	12.75	12.03
	P1 - P2	19.76	18.70	17.65
	P2 - A2	13.47	12.75	12.03

(3) 本研究の解析モデルの位置づけ

以上を踏まえ、曲線橋梁の非線形地震応答解析において計算コストを抑えつつ高い解析精度を得るには、橋軸直角方向の剛性も考慮した梁要素を用いた上部構造のモデル化が必要である。本研究では、このモデル化について検討を進める。

3. 梁要素を用いた上部構造の高精度解析モデル手法の検討

(1) 対象とする曲線橋梁台実験の概要

図-1に曲線橋梁の大型振動台実験を示す。振動台実験は University of Nevada, Reno で行われた^{3, 4)}。橋梁モデルは実大のプロトタイプの 0.4 スケールであり、RC 橋脚を有する 3 径間連続高架橋である。図-2、表-1 に上部構造と下部構造の寸法および桁長と支間長を示す。上部構造は RC 床版を有する鋼 I 形 3 主桁である。中央径間は振動台上の 2 つの RC 橋脚

により支持され、桁端は橋台によって支持されている。RC 橋脚上の支承には、ピポッド支承、橋台上の支承にはテフロン系（PTFE）のすべり支承が用いられている。

振動台実験の入力地震動は 1994 Northridge Earthquake, Syamar record の倍率を 10~350%の間で 10 段階に変えて連続実験が実施されているが¹⁹、本稿では、軸方向鉄筋の座屈が見られなかった 100% 設計地震動の実験結果を対象に提案モデルの振動特性を検討する。

(2) 解析モデルの概要

上部構造のモデル化の違いによる数値解析モデルの剛性および地震時応答の差異を検討するために、以下の 3 パターンの解析モデルで検討を行った。

a) 1-beam model

図-3(a)に 1-beam model を示す。1-beam model は、2011 年に日本鋼構造協会のテクニカルレポートとして出版された「ファイバーモデルを用いた橋梁の動的耐震設計の現状と信頼性向上⁹⁾」において示されている解析手法のひとつである。床版および桁の剛性を考慮した 1 本の梁要素で上部構造をモデル化する。本モデルでは、床版と主桁は全断面有効で完全剛性とし、はりの変形の基本仮定である断面不変、直角保持を仮定する。上部構造の要素座標系の原点は、断面重心としている。上部構造と支承の接続方法は、支承位置と上部構造との幾何学的な位置関係を表すために剛なオフセット部材を導入している。

b) Proposed model

図-3(b)に Proposed model を示す⁸⁾。Proposed model は本研究で提案する梁要素を用いた高精度モデル化手法であり、RC 床版、および主桁、対傾構または横桁をそれぞれ独立した梁要素を用いてモデル化する。RC 床版と主桁の結合は、ウェブの剛性を与えた梁要素を用いている。また、RC 床版の橋軸直角方向部材には、RC 床版の橋軸直角方向の剛性を与えた梁要素を用いている。上部構造と支承の接続方法は前述の 1-beam model と同様である。

c) Shell model

図-3(c)に Shell model を示す。RC 床版および主桁をシェル要素、対傾構を梁要素でモデル化を行う。RC 床版と主桁は並進 3 成分を剛、回転 3 成分を自由とした線形ばね要素で接続した。支承は下フランジの節点にばね要素を設けてモデル化した。なお、1-beam model と Proposed model には解析ソフトウェアとして UC-win/Frame²⁰⁾を用いており、Shell model ではシェル要素を使用可能な Sean FEM²¹⁾を用いた。

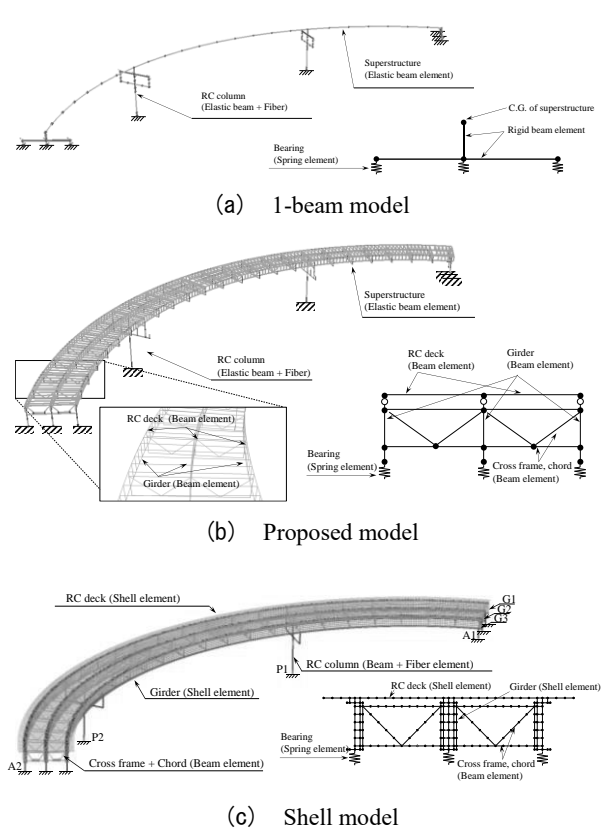


図-3 曲線橋梁の解析モデル

(3) 上部構造の剛性の検討

まず、各上部構造のモデル化の違いによる剛性の差異を検討するため、各モデルのねじれ、水平、鉛直、ねじれ剛性について検討するため、偶力、水平、鉛直荷重の静的解析を行った。図-4に静的荷重方法を示す。偶力荷重では径間中央の内桁と外桁にそれぞれ逆向きの鉛直荷重を 10kN ずつ与えた。水平荷重では径間中央の各桁にそれぞれ 10kN ずつ内側から外側、外側から内側に水平荷重を与えた。鉛直荷重では径間中央の各桁にそれぞれ 10kN ずつ下向きに荷重を与えた。

図-5(a)に偶力荷重の解析結果を示す。なお、図中の数字は、鋼桁と床版の節点の変位量を示している。解析の結果、Proposed model と Shell model の変形にほとんど差異はなく、1-beam model のみ、ねじれ変形が大きく生じた。

図-5(b)に水平荷重の解析結果を示す。解析の結果、1-beam model と Shell model の変形に大きな差異は見られないが、Proposed model にのみ、ねじれ変形が大きいことが分かる。

図-5(c)に鉛直荷重の解析結果を示す。解析の結果、1-beam model にのみ、ねじれ変形が生じていることが分かる。また、Shell model と比べて、Proposed model のたわみが 2 倍程度大きく、鉛直剛

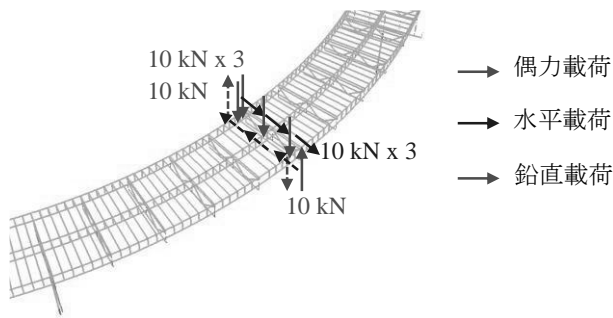


図-4 静的荷重方法

性が低いことが分かる。

以上のように、鉛直荷重および偶力荷重では 1-beam model でねじれ変形が顕著に現れ、水平荷重では Proposed model でねじれ変形が顕著に現れた。1-beam model のねじれ変形の原因は、梁要素に与えたねじれ剛性が、純ねじれのみであるためと考えられる。一方で、Proposed model では水平荷重においてねじれ変形が顕著であることから、上部構造の水平剛性が十分でないことが考えられる。以降では、Proposed model の水平荷重の解析で見られたねじれ変形に着目し、モデル化の改善を検討する。

(4) 上部構造のモデル化の改善

Proposed model では、水平荷重の解析においてねじれ変形が見られた。そこで、まず上部構造のみを対象とした試験体の水平荷重実験とその解析から、解析モデルの RC 床版の橋軸直角方向の分割数を検討する。上部構造試験体の荷重実験は、実大の 0.42 スケールの University of Nevada, Reno の実験結果と、0.24 スケールの著者らの実験結果²²⁾の双方で検討を行う。解析モデルはこれまでに著者らが構築した上部構造試験体の解析モデル²²⁾を用いた(図-6)。床版の分割数は 1~10 分割の 10 ケースとし、RC 床版の分割数が剛性に与える影響について検討した。

図-7 に解析結果を示す。解析結果は本研究で用いている 2 次要素の梁要素を用いた結果に加え、1 次要素の梁要素を用いた結果も示す。1 次要素の場合、5 分割以上で剛性が一定となるが、2 次要素の場合では分割数によらず剛性が一定となる。また、解析結果と実験結果の剛性は概ね近い値を示している。以上より、2 次要素を用いる場合は、ねじれの生じない場合では分割数によらず水平剛性は一定であり、剛性への影響は無いと言える。しかし、曲線橋モデルの場合では前述のようにねじれが生じるため、曲線橋の上部構造の水平荷重の解析より、解析モデルの RC 床版の要素分割数を検討する。解析ケースを図-8 に示す。解析は、これまでの桁間 1 分割として橋軸方向の RC 床版要素を 3 要素とした場合 (Deck

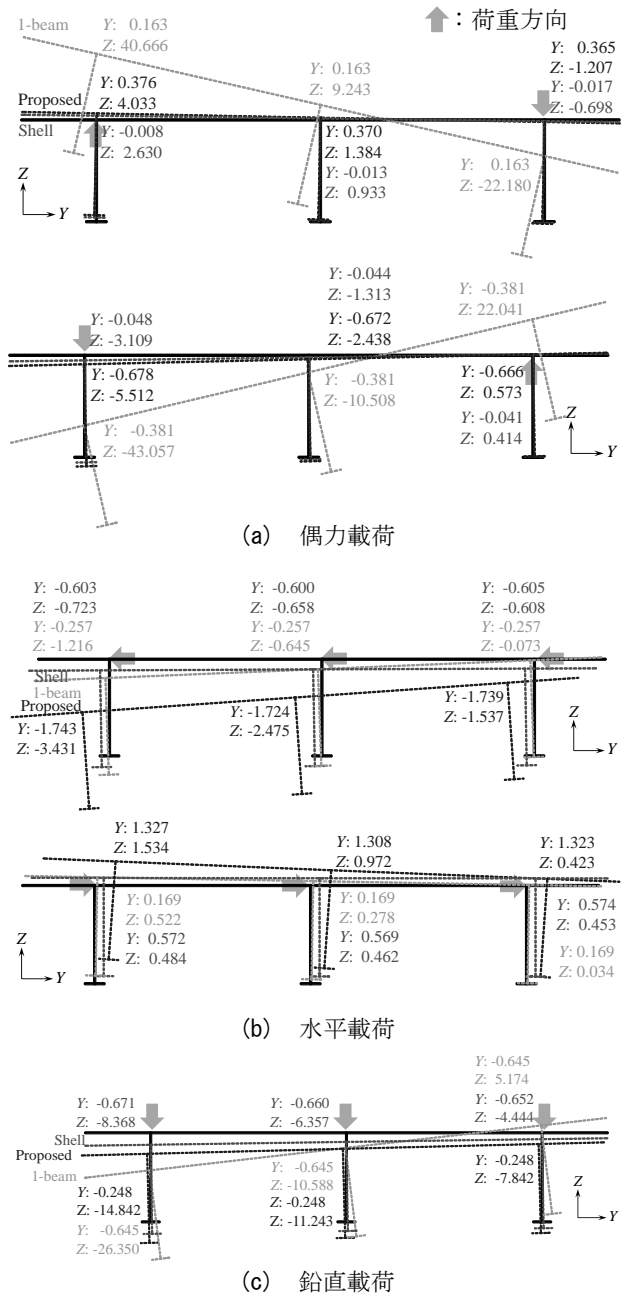


図-5 静的荷重解析結果 (単位: mm, 倍率 10 倍)

3) に加え、桁間 1 分割として橋軸方向の RC 床版要素を 1 要素とした場合 (Deck 1), 桁間 2 分割として橋軸方向の RC 床版要素を 5 要素とした場合 (Deck 5) である。

図-9 に解析結果を示す。桁間 2 分割として橋軸方向の RC 床版要素を 5 要素とすることで、その他のケースで見られたねじれ変形が改善され、Shell model と同程度の変形を有していることが分かる。

以上より、Proposed model では上部構造の床版の分割数は Deck 5 の様に、橋軸方向の RC 床版要素を 5 要素とすることで Shell model と同等の剛性を得ることが可能であると言える。

(5) 橋梁全体系解析モデルの動的特性

a) モデルの概要

図-10 に RC 橋脚の軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係を示す。また表-2 に特性値を示す。軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係の骨格形状は、実際の実験で使用された鉄筋の引張試験結果をトリリニア型で近似し、内部履歴には修正 Menegotto-pinto²³⁾モデルを用いた。

図-11 に RC 橋脚のコンクリートの応力～ひずみ関係を示す。コンクリートの応力～ひずみ関係の骨格形状には Hoshikuma モデル²⁴⁾を用い、内部履歴には堺一川島モデル²⁵⁾を使用した。コアコンクリートは横拘束材の拘束効果による強度増加を考慮し、軟化勾配および強度増加は Hoshikuma モデルに従うものとした。また、終局後は拘束効果による応力収束域を設けている。一方で、カバーコンクリートは拘束効果を考慮していない。

橋台上のすべり支承は、ばね要素とし完全弾塑性型の摩擦履歴を与えた。摩擦履歴の降伏変位は 0.1mm と仮定⁸⁾し、最大摩擦耐力 P_y は次式で与えた。

$$P_y = \mu R_d \quad (1)$$

ここで、 R_d は死荷重解析により求めた各支点の死荷重反力、 μ は滑り係数であり 0.07 とした。橋脚上のピポッド支承は、3方向の並進成分は剛、3方向の回転成分は自由としたばね要素とした。

減衰は Rayleigh 減衰として与えた。図-12 に本研究で用いた Rayleigh 減衰を示す。一般的に地震応答解析で Rayleigh 減衰を用いる場合、解析モデルに与えた構造減衰定数と固有振動モード特性から求めたひずみエネルギー比例減衰法による橋梁のモード減衰と刺激係数を重み係数として Rayleigh 減衰の係数 α および β を最小二乗法によって求めることが多い²⁶⁾。しかし、本解析においては非線形性が比較的強い箇所を扱うため、履歴減衰が支配となると考えられる。そのため、与える減衰を 0%あるいは限りなく 0%に近いものを与える場合もあり、これにより実験結果の再現性が向上している⁸⁾。そのため、本解析においても 2Hz と 25Hz において減衰定数が 0.1%となるように係数を設定した場合 ($\alpha=0.00370$, $\beta=0.00007$) として解析を行う。実際に、一般的な Rayleigh 減衰の係数の与え方で解析を行った場合、解析結果として応答変位が著しく小さくなることを確認している。

b) 固有値解析結果

表-3 に各モデルの固有値解析結果として低次の 1 次から 4 次モードを示す。各モデルのいずれにおいても、1 次と 2 次モードは橋軸直角成分、3 次モードは橋軸成分、4 次モードは鉛直成分となっている。1

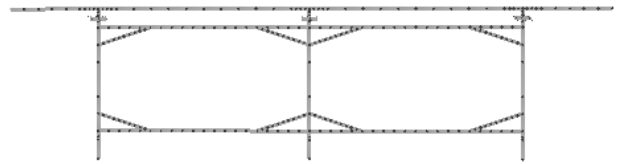


図-6 上部構造試験体の解析モデル²²⁾

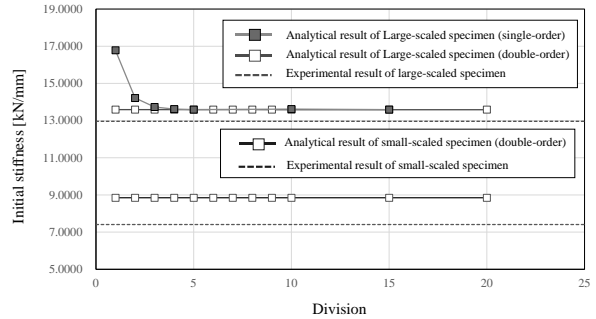


図-7 要素分割数の検討結果

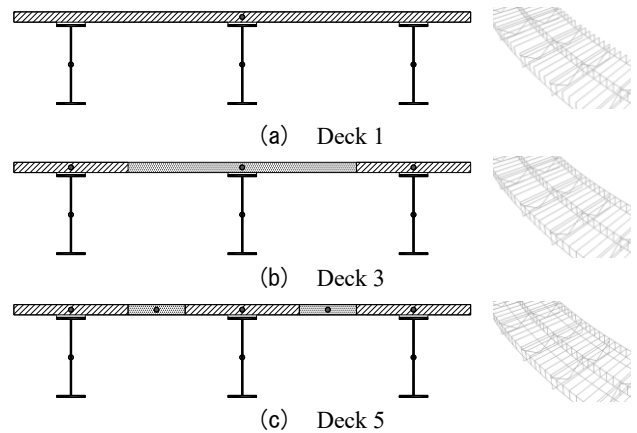


図-8 曲線橋梁モデルの RC 床版の分割方法

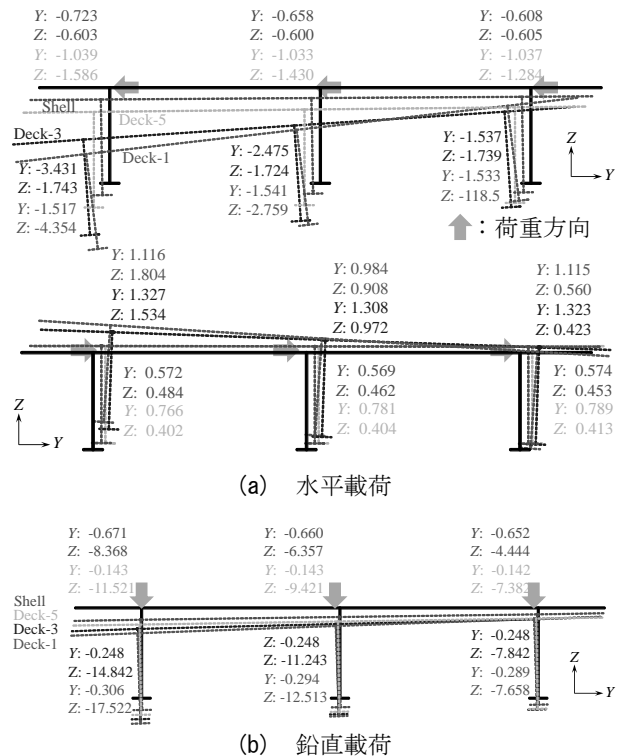


図-9 解析結果 (単位 : mm, 倍率 10 倍)

次から 3 次モードの固有周期は、いずれにおいても差が 10%程度であり、上部構造のモデル化の違いによる全体系の固有周期はほとんどない。これは、橋軸および橋軸直角成分の振動は下部構造の固有周期が支配的となるためである。また、上部構造の鉛直振動である 4 次モードにおいても大差はなく、いずれの結果においても 10%程度の誤差以内に収まっている。以上より、上部構造のモデル化の違いによる橋梁全体系の振動特性に差はほとんどないと言える。

c) 材料線形とした地震応答解析結果

図-13 に時刻歴応答解析の最大応答加速度と固有周期、1 自由度系の減衰定数を 0.1%とした入力地震波の加速度応答スペクトルを示す。また、RC 橋脚単体の結果も示す。橋軸および橋軸直角方向ともに最大応答加速度に若干の差はあるが、概ね同程度であり、上部構造のモデル化の有無による振動特性に大差はないことが分かる。

図-14 に各モデルの部材を材料線形として地震応答解析を行った結果を示す。また、RC 橋脚単体の地震応答解析結果も示す。上部構造のモデル化の有無で応答に多少の差はあるが、上部構造のモデル化方法の違いで比較すると時刻歴応答変位の振幅は概ね同程度あり、各モデルの応答に大きな差はないことが分かる。

以上より、上部構造のモデル化方法の違いによる橋梁全体系の弾性応答に差はほとんどないと言える。

d) 材料非線形とした地震応答解析結果

図-15 に RC 橋脚の材料非線形性を考慮した地震応答解析の結果を示す。橋軸方向の時刻歴応答変位はモデルによらず概ね同程度であり、実験結果とも類似している。一方で、橋軸直角方向の時刻歴応答変位は 1-beam model のみ橋軸直角方向への初期たわみが大きく、応答変位および残留変位が大きい。これは、1-beam model のねじれ剛性が不十分であるためと考えられる。一方で、Proposed model の応答変位は、実験結果と概ね一致しており、Shell model と大差がない。

以上より、Proposed model は、実験結果の時刻歴応答変位をよく再現でき、Shell model と同程度の結果を得ることが可能であることを示した。

4. まとめ

本研究は、床版と主桁を分けて梁要素を用いてモデル化する、高精度で、かつ計算コストを大幅に落とした上部構造のモデル化手法を提案し、上部構造の要素分割とその剛性、振動特性を他のモデル化方法や実験結果と比較して検討した。本研究で得られ

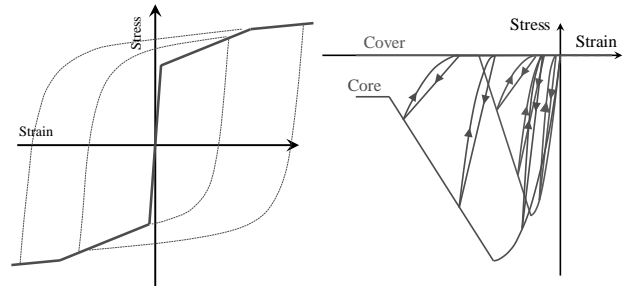


図-10 軸方向鉄筋の応力～ひずみ関係

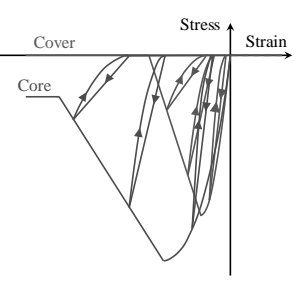


図-11 コンクリートの応力～ひずみ関係

表-2 材料特性

Core Concrete			Cover Concrete			Longitudinal Bar	
σ_{sk} [MPa]	ϵ_0	E_{des} [GPa]	σ_{sk} [MPa]	ϵ_0	E_{des} [GPa]	E_s [GPa]	σ_y [MPa]
55.4	0.006	3.49	37.9	0.002	10.0	200	489.5

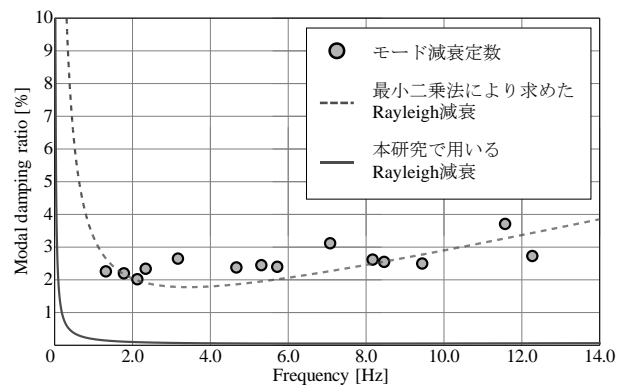


図-12 Rayleigh 減衰

表-3 固有値解析結果

	1-beam model	Proposed model	Shell model
Mode 1	 0.642 sec	 0.661 sec	 0.666 sec
Mode 2	 0.485 sec	 0.503 sec	 0.506 sec
Mode 3	 0.410 sec	 0.412 sec	 0.455 sec
Mode 4	 0.334 sec	 0.386 sec	 0.346 sec

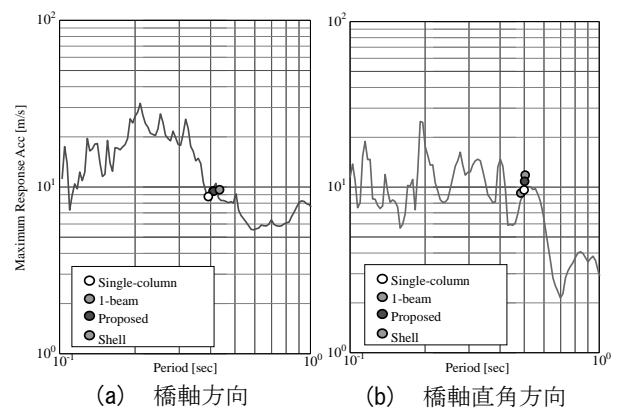


図-13 加速度応答スペクトルと各モデルの最大応答加速度および固有振動数

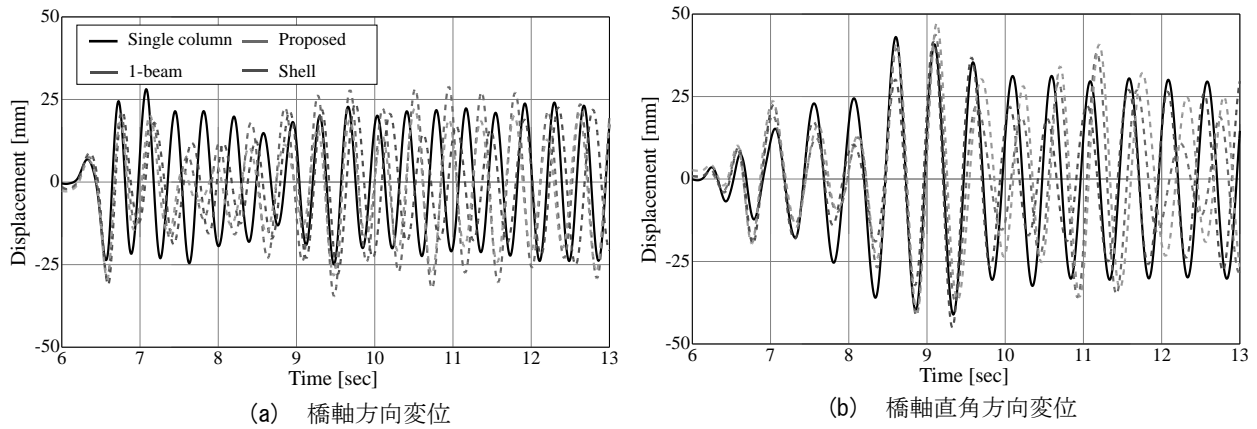


図-14 材料線形とした地震応答解析結果 (P1 橋脚)

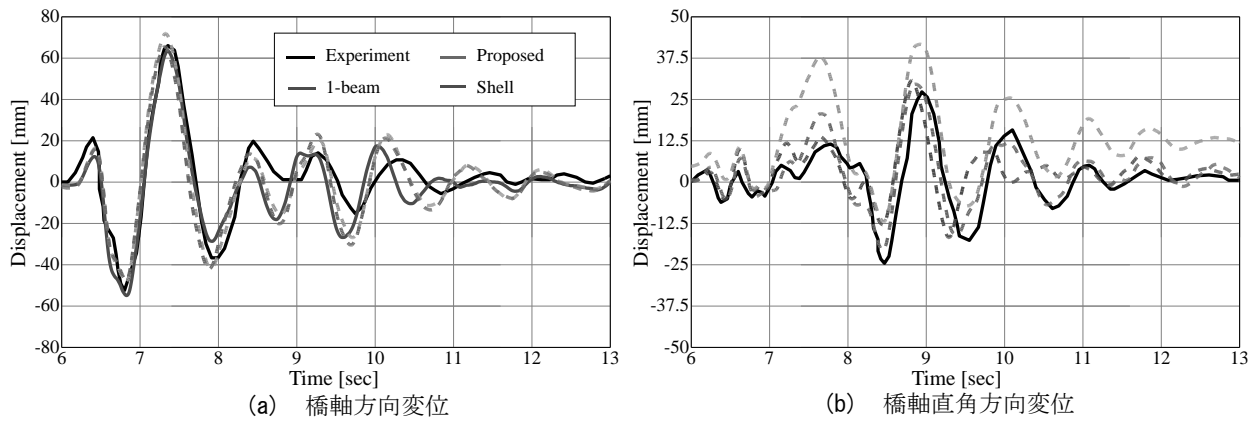


図-15 材料非線形とした地震応答解析結果 (P1 橋脚)

た成果を以下に示す。

- 1) 従来の上部構造を一本の梁要素でモデル化する 1-beam model では、断面特性として与えるねじれ剛性を純ねじりのみを考慮した場合、曲線橋ではねじれ剛性が過小評価となることを示した。
- 2) Proposed model の RC 床版の分割数について静的解析により検討した結果、妥当な分割数は、桁間を 2 分割とし、橋軸方向の RC 床版の要素数を 5 要素とすることを示した。
- 3) 材料線形とした地震応答解析では上部構造のモデル化の違いによる弾性応答に大差はないが、材料非線形とした場合、1-beam model では実験結果と大きく異なった。一方、Proposed model の応答は実験結果およびシェル要素を用いた解析結果と概ね一致し、良好な再現性を示した。

謝辞：構造解析プログラム SeanFEM の使用にあたり、(株)地震工学研究開発センターの馬越一也氏に貴重な助言を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

1) 佐々木達生, 徳橋亮治, 服部匡洋, 馬越一也, 篠原聖二: 10 径間連続 PC 箱桁橋における 2018 年大阪府

北部地震の地震観測記録と応答特性の評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 75, No. 4, pp. I_433-I_442, 2019.

2) 中西泰之, 内田諭, 川邊幸歩, 八木悟, 山田雅行, 服部匡洋, 篠原聖二: 2018 年大阪府北部地震の観測記録を用いた立体ラーメンが隣接する 3 径間連続非合成鋼桁橋の地震時応答評価, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 76, No. 4, pp. I_227-I_236, 2020.

3) Monzon, E. V., Wei, C., Buckle, I. G. and Itani, A. M.: Seismic response of a curved bridge with full and hybrid protective systems, 9th International Conference on Urban Earthquake Engineering, Tokyo, Japan, pp.1139-1146, 2012.

4) Wibowo, H., Sanford, D.M., Buckle, I.G., and Sanders, D.H., Effects of Live Load on Seismic Response of Bridges: A Preliminary Study, Civil Engineering Dimension, Vol. 14(3) (Special Edition), pp. 166-172, 2012.

5) Shoushtari, E., Saiidi, S., Itani, A. M. and Moustafa, M.: Analytical studies and design of steel plate girder ABC bridges under seismic loads, Engineering Structures, Vol. 227, 2021.

- 6) Goto, Y., Ebisawa, T., Obata, M., Li, J. and Xu, Y.: Ultimate Behavior of Steel and CFT Piers in Two-Span Continuous Elevated-Girder Bridge Models Tested by Shake-Table Excitations, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 04017001-1~04017001-14, 2017.
- 7) Li, X., Zang, D., S.M.ASCE, Yan, W., Chen, Y. and Xie, W.: Shake-Table Test for a Typical Curved Bridge: Wave Passage and Local Site Effects, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 20, No. 2, pp. 04014061-1~04014061-14, 2015.
- 8) 木下幸治, I. G. buckle, D. H. Sanders, H. Wibowo : 0.4 スケール 3 径間曲線橋梁モデル振動台実験の数値解析, *コンクリート年次論文集*, Vol. 37, No. 2, pp. 649-654, 2015.
- 9) 日本鋼構造協会 : ファイバーモデルを用いた鋼橋の動的耐震設計の現状と信頼性向上, *JSSC テクニカルレポート No.93*, 2011.
- 10) 土木学会 : 鋼・合成構造標準示方書 (耐震設計編) , 丸善, pp.50-63, 2008.
- 11) Amjadian, M. and Agrawal, A.: Rigid-Body Motion of Horizontally Curved Bridges Subjected to Earthquake-Induced Pounding, *Journal of bridge engineering*, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 21, No. 12, 04016090-1~04016090-20, 2016.
- 12) Aviram, A., Mackie, K., and Stojadinovic, B. [2008a] "Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California," Technical Report 2008/03, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 2008.
- 13) Monzon, E.; Seismic Performance of Curved Steel Plate Girder Bridges with Seismic Isolation, Ph. D thesis, University of Nevada, Reno, 2013.
- 14) Amerihormozaki, E., Pekcan, G. and Itani, A.: Analytical Modeling of Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges for Seismic Analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 19, No. 2, pp. 220-248, 2015.
- 15) AASTO: Guidelines for Steel Girder Bridge Analysis, 3rd ed., AASHTO/NSBA Steel Bridge Collaboration, Washington, D.C., 2019.
- 16) Chen, J., Han, Q., Liang, X, and Du, X.: Effect of pounding on nonlinear seismic response of skewed highway bridges, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 103, pp. 151-165, 2017.
- 17) 本橋英樹, 野中哲也, 馬越一也, 中村真貴, 原田隆典 : 熊本地震断層近傍における地震動と橋梁被害の再現解析, *構造工学論文集*, Vol. 63A, pp. 339-352, 2017.
- 18) 吉野廣一, 野中哲也, 本橋英樹, 金治英貞, 鈴木威, 八ツ元仁, 中村良平 : 京コンピュータによる高架橋の広域 3 次元地震応答シミュレーション, 第 17 回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関する
- 19) Levi, M. J.: Seismic Response of Columns in Horizontally Curved Bridges, M. S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Nevada, Reno, 2011.
- 20) Forum8: UC-win/Frame(3D) Operation Guidance, 2016.
- 21) 地震工学研究開発センター : Sean FEM ver1.22 理論マニュアルと検証, 2007.
- 22) 木下幸治, 岩田隆弘, 井上一磨 : 鋼上部構造へのダンパー・ブレースの適用性を検討可能な縮小試験体と解析手法の構築, *土木学会論文集 A1 (構造・地震工学)*, Vol. 74, No. 4, I_941-I-954, 2018.
- 23) 堺淳一, 川島一彦 : 部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モデルの提案, *土木学会論文集*, No.738/I-64, pp.159-169, 2003.
- 24) 星隈順一, 川島一彦, 長屋和宏 : 鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係, *土木学会論文集*, No.520/V-28, pp.1-11, 1995.
- 25) 堺淳一, 川島一彦, 庄司学 : 横拘束されたコンクリートの除荷および再載荷過程における応力度-ひずみ関係の定式化, *土木学会論文集*, No.654/I-52, pp.297-316, 2000.
- 26) 土木学会地震工学委員会 : 性能に基づく橋梁等構造物の耐震設計法に関する研究小委員会活動報告書, 2018.