

CFT アーチ橋の非線形地震応答に及ぼす床版のモデル化の影響 Influence of the Modeling of the Slab on the Nonlinear Seismic Analysis of the CFT Arch Bridge

○向井 大吾* 吉村 光弘** 呉 慶雄*** 高橋 和雄**** 中村 聖三*****
Daigo MUKAI, Mitsuhiro YOSHIMURA, Qingxiang WU, Kazuo TAKAHASHI, Shozo NAKAMURA

ABSTRACT It is required to make a model of floor slab appropriately in the analysis of an arch bridge. The exact model of the floor slab is proposed in this paper. Natural vibration analysis and nonlinear seismic response analysis of the Second Saikai Bridge are reported. The effect of the floor slab on the out-of-plane vibrations is more apparent than in the out-of-plane vibration modes. It is also found that the nonlinear out-of-plane seismic response of the arch rib is affected by modeling of the floor slab.

Keywords: CFT アーチ橋, 床版のモデル化, 非線形地震応答

CFT arch bridge, Modeling of the slab, nonlinear seismic response

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、土木構造物の耐震性能が厳しく要求されている。特に上・中跨式アーチ橋は1次振動モードだけでは地震時の挙動が正しく評価できない挙動が複雑な橋に該当しており、動的解析による耐震検討が必要とされている¹⁾。さらに、挙動が複雑ということで、床版のモデル化の方法によって、動的解析の結果に影響を与えることがあるため、地震応答解析を行う場合には床版および補剛桁の剛性を正しく評価する必要がある。

野中らによってこれらのことを考慮した上跨式鋼アーチ橋の研究²⁾がなされ、実橋を対象とした研究に関しては、上跨式鋼アーチ橋である西海橋を解析対象とした研究³⁾がなされている。さらに現在、西海橋に隣接して架設中である第二西海橋(仮称、スパン230m、中跨式ブレースドリブアーチ橋)は、道路橋としては日本で初めて、CFT(コンクリート充填鋼管)をアーチリブに用いた適用事例⁴⁾ということもあり、固有振動および地震応答特性が明らかにされつつある。

第二西海橋に関する既往の研究⁴⁾⁵⁾に用いられた解析モデルは、床版は設計中のため仮定値を用いて床版の重量は補剛桁に、剛性は横桁に合成断面としてそれぞれ考慮した解析モデルであり、床版の剛性を過小評価していた。そこで本研究では、既往の研究に用いられた解析モデルに加えて床版を重量および剛性を有する独立した一本の部材としてモデル化した解析モデル¹⁾²⁾を用いて固有振動および地震応答解析を行い、応答値を比較することで床版のモデル化が橋全体の応答に及ぼす影響を明らかにする。

2. 第二西海橋の概要

解析対象である第二西海橋(仮称)は、佐世保都市圏と長崎都市圏を結ぶ延長50kmの西彼杵道路(地域高規格道路)西海パールラインの2期工事区間の中で針尾瀬戸海峡に架けられる橋梁である。橋長は300m(30m+240m+30m)、アーチ支間はL=230m、橋梁幅員は19m(8.5m+2m+8.5m)で全幅は20.2m(0.6m+19m+0.6m)である。主径間の橋梁形式は、架設予定位置の景観や現在の西海橋との調和、海上

*工学士 長崎大学大学院 生産科学研究科 学生 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

**工 修 三菱重工業(株)長崎造船所 (〒850-8610 長崎市飽の浦町1番1号)

***博(工) 中国・福州大学 土木建築工程院 助教授 (中国 福建省福州市工業路523号)

****工 博 長崎大学 工学部社会開発工学科 教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

*****博(工) 長崎大学 工学部社会開発工学科 助教授 (〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

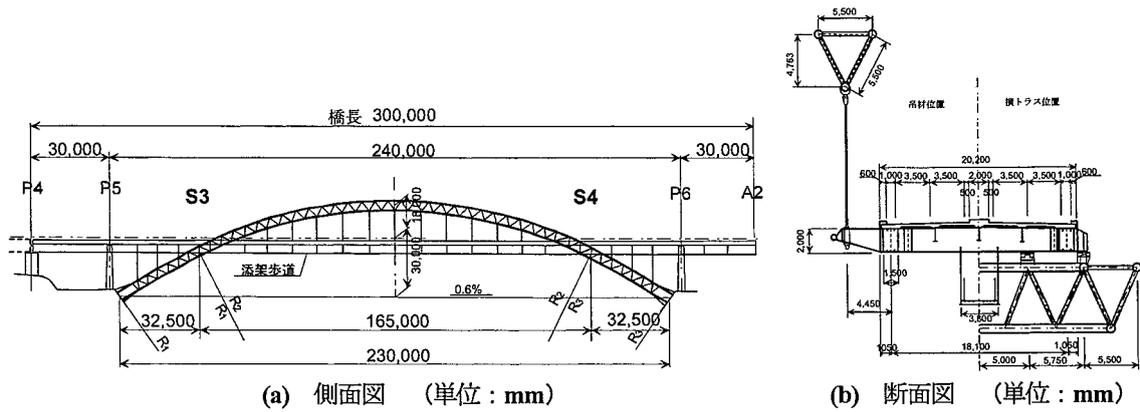


図-1 第二西海橋の一般図

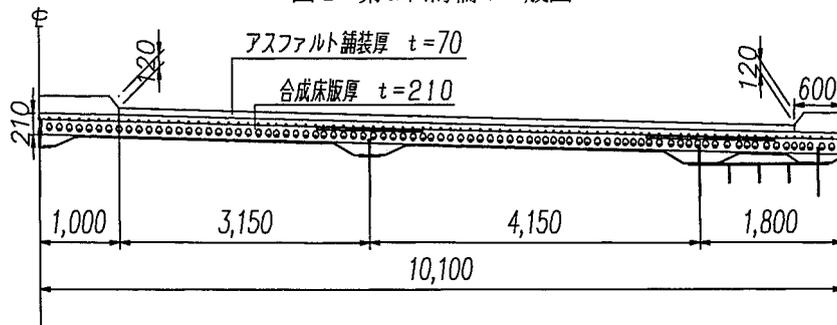


図-2 床版断面図 (単位: mm)

からの視点および橋梁の建設費の縮減等を考慮して、道路橋としては日本国内で初めてコンクリート充填鋼管をアーチリブに採用した中路式ブレースドリブアーチ橋である (図-1)。

アーチリブ形状は、3本の円弧を組み合わせた形状となっており、アーチリブ左側スプリング部からそれぞれ、半径 $R_1=634.1836\text{m}$ 、 $R_2=149.3938\text{m}$ 、 $R_3=547.9010\text{m}$ である。

アーチリブ断面は、三角形断面のパイプトラス構造を形成しており、外側上弦材、内側上弦材および下弦材それぞれの鋼管 (直径: $\Phi=318.5\sim 812.8\text{mm}$ 、材質: STK490, STK400) に高流動コンクリート ($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$) を充填した CFT 構造である。

床版は、底鋼版、縦リブ、配力鉄筋の3種類の鋼部材とコンクリートで構成されており、厚さ 210mm の合成床版である (図-2)。

3. 解析モデル

本解析では、床版のモデル化の影響を評価するために、2種類の床版モデルを用いる (図-3-a,b)。両モデルともに、腹材、横構、補剛桁、横桁および橋脚にははり要素、支柱および吊材には圧縮力に抵抗

できないトラス要素を用いてモデル化し、CFT 構造であるアーチリブは、材料非線形性を考慮するため、軸力の変動および2軸曲げの非線形性を自動的に考慮できるように3次元ファイバーモデルでモデル化した。ファイバー分割するにあたって、鋼管は厚さ方向に2分割、径方向に16分割、コンクリートは厚さ方向に10分割、径方向に16分割であり、ファイバー数は $(2+10)\times 16=192$ である (図-4)。

支承条件について、アーチリブスプリング部および橋脚は固定とする。補剛桁と橋脚 (P4、P5 および P6)、補剛桁と橋台 A2 の結合部および補剛桁とトラス横桁の結合部 (S3 および S4) は反力分散ゴム支承を用いるため、弾性支承を用いる。弾性支承の剛性を表-1 に示す。

3.1 床版モデル A

モデル A は、床版と補剛桁を別々のはり要素でモデル化しており、床版の重量および剛性はそのはり要素に考慮している。2本の補剛桁において橋軸方向で同じ位置にある要素節点に剛結した2本の剛棒要素を床版の断面中心位置まで垂直に立て、この2つの剛要素上端を結ぶ剛なダミー棒部材 (剛性大) を設ける。そして、このダミー部材の中央に節点を

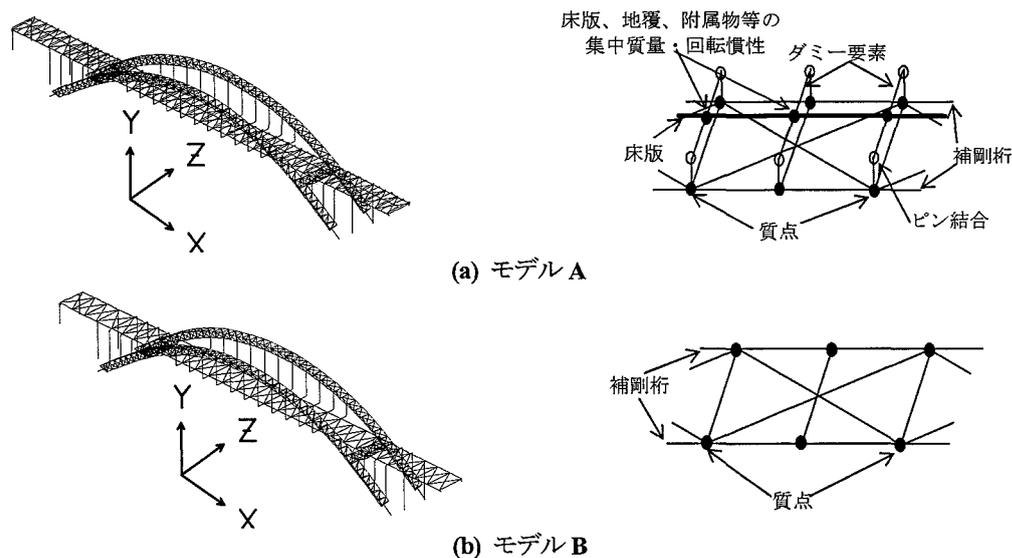


図-3 解析モデル

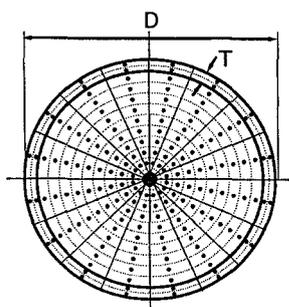


図-4 アーチリブのファイバー分割

設け、この点と床版要素の節点とを剛結したモデルである。なお、ダミー棒部材と剛要素の節点での結合条件は、橋軸直角水平軸回りの回転のみ拘束し、その他の軸回りは回転自由とする⁹⁾。なお、床版は2軸曲げの影響を考慮できるように3次元ファイバーモデルでモデル化した。節点数は915、部材数は1,793である。

3.2 床版モデルB

モデルBは、既往の研究⁹⁾に用いられた解析モデルで、床版の重量は補剛桁に、剛性は横桁に合成断面としてそれぞれ考慮している。なお、モデルBには床版自体の要素は存在しない。節点数は732、部材数は1,489である。

両解析モデルの床版の断面諸元を表-2に示す。

これら2種類の解析モデルを用いて固有振動および非線形地震応答解析を行い、解析値を比較することで、床版のモデル化の影響を明らかにする。なお、解析には土木・建築向け汎用3次元振動解析プログラムTDAPIII⁷⁾を用いる。

表-1 支承条件

	P4	P5	S3	S4	P6	A2
鉛直方向	固定	固定	固定	固定	固定	固定
橋軸方向	5,000	8,000	10,000	10,000	8,000	5,000
橋軸直角方向	5,000	8,000	固定	固定	8,000	5,000

※数値：バネ定数 (kN/m)

4. 固有振動特性

4.1 面内固有振動特性

両モデルの面内固有振動モードとその固有振動数(約1.0Hzまで)を表-3に示す。

面内1次固有振動モードは、斜張橋のような遊動円木振動モードである。これは、補剛桁と橋脚(P4、P5およびP6)および橋台(A2)の連結部において橋軸直角方向にバネ係数 $K=5,000, 8,000, 10,000$ kN/mに相当する弾性支承を設置しているためであると考えられる⁹⁾。また、面内2次固有振動モードがアーチ橋特有の逆対称モードに対応している。

4.2 面外固有振動特性

両モデルの面外固有振動モードとその固有振動数(約1.0Hzまで)を表-4に示す。

面外1次固有振動モードは、対称モードである。面外振動に、2本のアーチリブの面外方向変位が逆方向となる振動モードが存在する。これは、アーチリブと補剛桁の連結部のみに横構が配置されていることに起因すると考えられる⁹⁾。

表-2 解析モデルの床版の断面諸元

モデル	部材	A (m ²)	J (m ⁴)	I _y (m ⁴)	I _z (m ⁴)	E (kN/m ²)
A	床版(合成断面)	6.071	6.232×10 ⁻²	2.619×10 ⁻²	2.061×10 ⁻²	2.550×10 ⁷
B	横桁(合成断面)	3.511×10 ⁻¹	6.400×10 ⁻²	2.035×10 ⁻¹	3.820×10 ⁻²	2.000×10 ⁸

表-3 面内固有振動モードと固有振動数

①: モデル A		②: モデル B		(①/②-1) ×100(%)
モード次数	振動数(Hz)	モード次数	振動数(Hz)	
3	0.494	3	0.490	+1%
5	0.692	5	0.659	+5%
8	1.014	9	0.956	+6%

表-4 面外固有振動モードと固有振動数

①: モデル A		②: モデル B		(①/②-1) ×100(%)
モード次数	振動数(Hz)	モード次数	振動数(Hz)	
1	0.379	1	0.365	+4%
2	0.462	2	0.462	0%
4	0.663	4	0.584	+14%
6	0.706	6	0.695	+2%
7	1.010	8	0.882	+15%

全ての面内・面外固有振動モードにおいて、モデルBよりもモデルAの固有振動数の方が高くなっていることが確認できる。そして、面外固有振動数に及ぼすモデル化の影響が大きく現れている。これは、モデルBは有効幅で床版の剛性を考慮しているが、モデルAは全幅で床版の剛性を考慮しているためであると考えられる。

5. 非線形地震応答特性

5.1 材料特性、解析条件および入力地震波

鋼管の応力-ひずみ関係は図-5(a)に示すように道

路橋示方書⁷⁾に基づいた完全弾塑性モデルとし、鋼管の局部座屈⁸⁾を考慮していない。

充填コンクリートの応力-ひずみ曲線を図-5(b)に示す。このコンクリートの計算モデルは、佐藤が提案している Mohr-Coulomb の破壊基準を基に、円形鋼管の充填コンクリートの拘束効果を考慮した応力-ひずみ関係⁹⁾である。

RC 橋脚 (P4, P5, P6) について、ひび割れを考慮した武田 M-Φ モデルとして、除荷剛性の低下指数は RC 橋脚の正負交番載荷実験を参考に 0.5 とする¹⁰⁾。

地震応答解析は、Newmark β 法(β=1/4)を用いた直

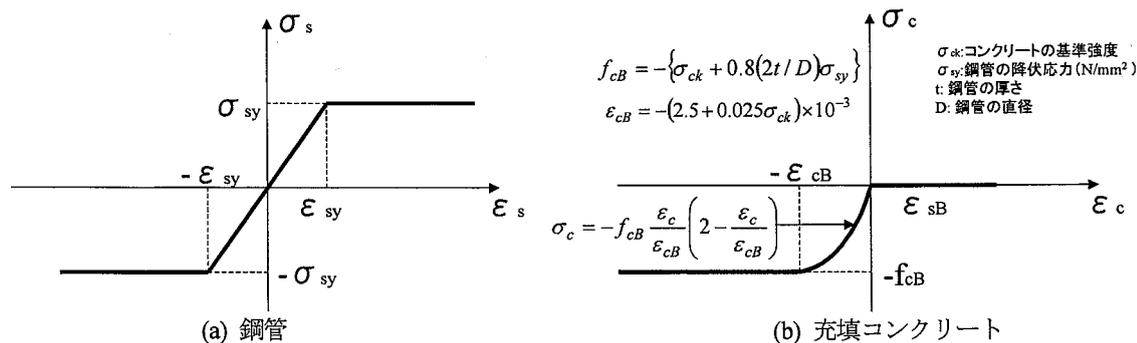


図-5 応力-ひずみ曲線

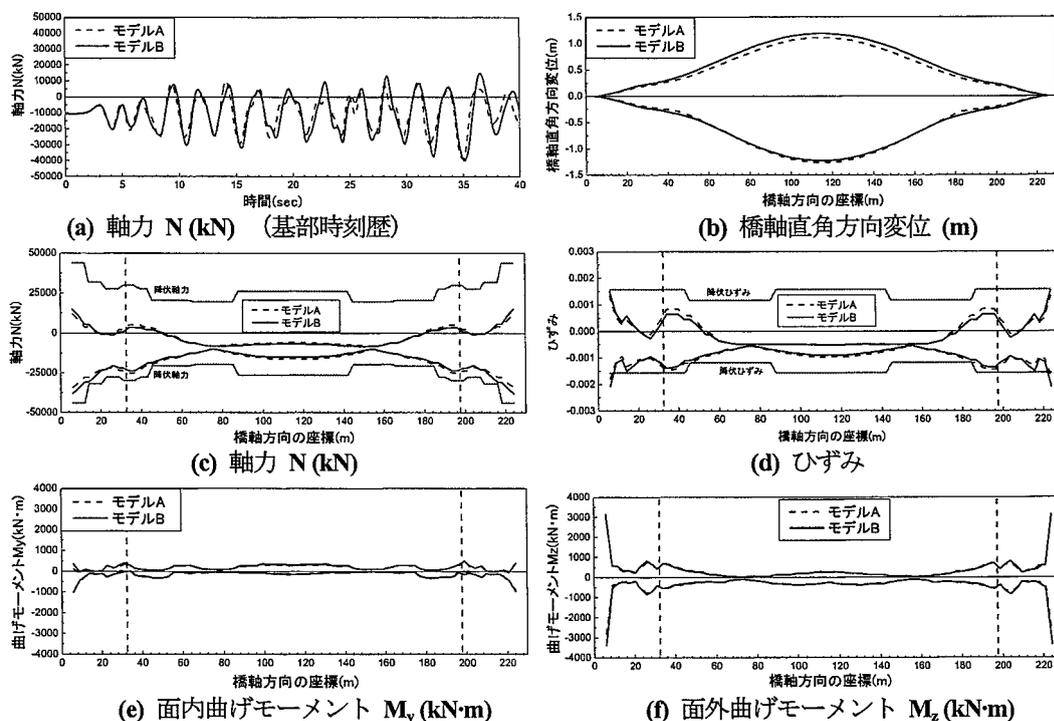


図-6 T11z-3波平均 (外側アーチリブ)

表-5 T11z-3波平均 最大応答の比較 (外側アーチリブ)

	①: モデル A	②: モデル B	(①/②-1) × 100(%)	位置
橋軸直角方向変位 (m)	-1.263	-1.225	3%	中央部
軸力 N (kN)	-33,988	-37,838	-10%	基部
ひずみ	-0.00179	-0.00207	-14%	基部
面外曲げモーメント M_z (kN·m)	3,105	3,139	-1%	基部

接積分法による非線形動的解析であり、積分時間間隔は1/400、継続時間は40secとする。減衰は、Rayleigh減衰を使用し、減衰定数は0.02とする。Rayleigh減衰の設定に関する2つのモードは、有効質量が大きい低次モードを採用する⁴⁾。

入力地震波は、道路橋示方書⁷⁾に基づくI種地盤用のタイプI (T111,T112,T113)およびタイプII (T211,T212,T213)の6波の標準波形を地域別補正係数(長崎県: $C_z=0.7$)で振幅補正し、橋軸方向および橋軸直角方向にそれぞれ入力する。

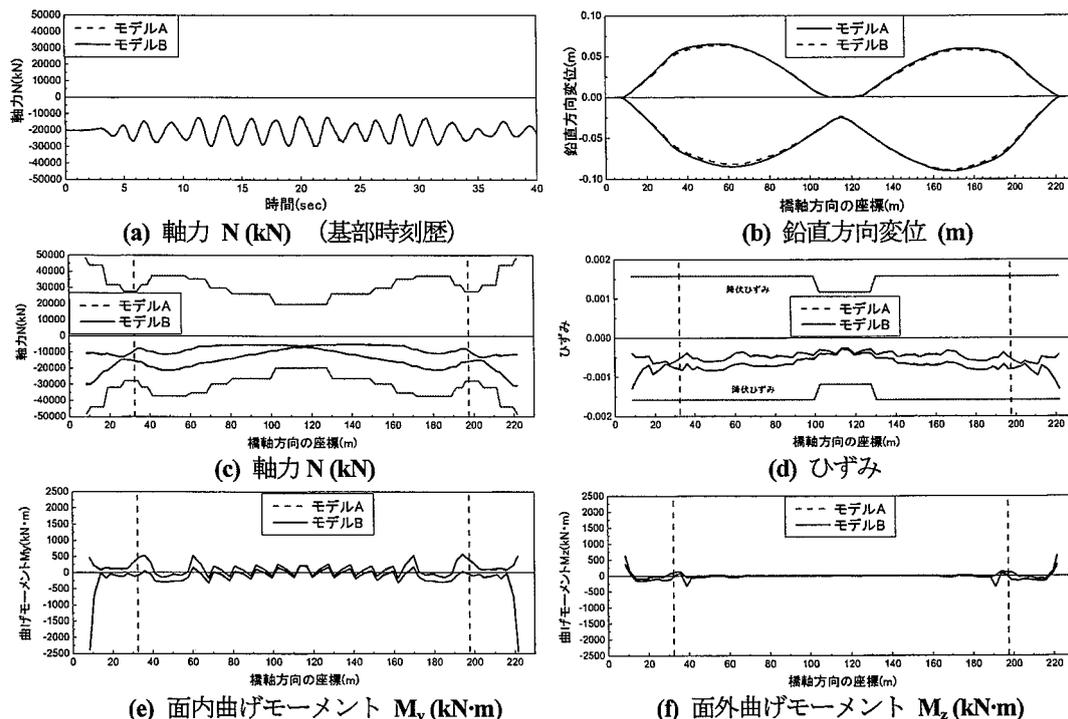


図-7 T11x-3 波平均 (下側アーチリブ)

表-6 T11x-3 波平均 最大応答の比較 (下側アーチリブ)

	①: モデルA	②: モデルB	(①/②-1) × 100(%)	位置
鉛直方向変位 (m)	-0.089	-0.091	-2%	3/4 点
軸力 N (kN)	-30,162	-30,641	-2%	基部
ひずみ	-0.00128	-0.00130	-2%	基部
面内曲げモーメント M_y (kN·m)	-2,373	-2,426	-2%	基部

5.2 地震応答特性の比較

応答を比較するにあたって、両タイプの3波平均を用いる。結果の着目点は、3本のアーチリブのうち、橋軸直角方向加震時には外側のアーチリブ、橋軸方向加震時には下側アーチリブである。理由は、それぞれの加震時において、軸力が卓越していたためである。

5.2.1 橋軸直角方向加震の場合(アーチリブの応答)

図-6(a)にI種地盤用タイプI(T113)地震波を橋軸直角方向に作用させた場合の外側アーチリブ基部における軸力の時刻歴応答を、(b)~(f)にI種地盤用タイプI地震波を橋軸直角方向に作用させた場合の外側アーチリブ応答の3波平均を示す。

図-6(a)より、床版のモデル化による応答の違いはほとんどない。また、ほとんどの時刻においてモデルAの方が小さい。橋軸直角方向変位はアーチリブ中央付近で、断面力はアーチリブ基部で最大応答を

示している。これは、アーチリブスプリング部が拘束されているためであると考えられる。また、図-6(c)より、軸力は降伏軸力に達していないが、図-6(d)を見ると、アーチリブ基部で降伏ひずみを上回っている。これは、面外曲げモーメントがアーチリブ基部で卓越しているためと考えられる。

モデル化の影響を見るために、モデルAが最大応答を示した箇所の応答値を比較する(表-5)。

橋軸直角方向変位では3%、モデルAの応答が大きいこと、そして、断面力については軸力で10%、面外曲げモーメントで1%、ひずみで14%、モデルAの応答が小さいことが明らかになった。

5.2.2 橋軸方向加震の場合(アーチリブの応答)

図-7(a)にI種地盤用タイプI(T113)地震波を橋軸方向に作用させた場合の下側アーチリブ基部の軸力の時刻歴応答を、(b)~(f)にI種地盤用タイプI地震波を橋軸方向に作用させた場合の下側アーチリブ応答

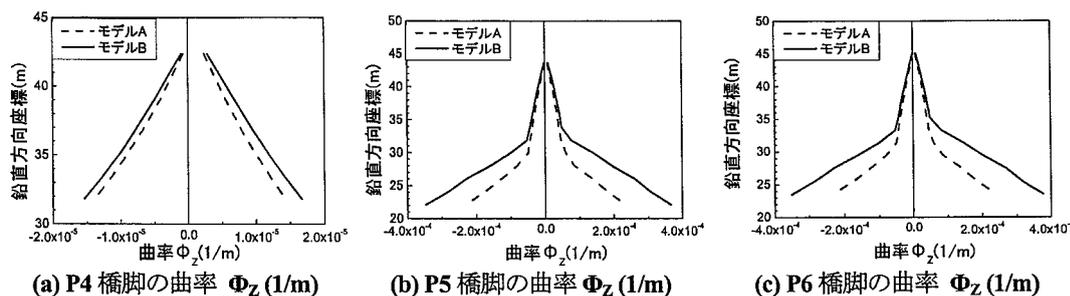


図-8 T11_z-3 波平均 (P4,P5,P6 橋脚)

表-7 T11_z-3 波平均 (最大応答の比較)

	①:モデルA	②:モデルB	(①/②-1) × 100(%)	位置
P4 橋脚	1.43×10^{-5}	1.67×10^{-5}	-14%	基部
P5 橋脚	2.36×10^{-4}	3.68×10^{-4}	-36%	基部
P6 橋脚	2.39×10^{-4}	3.78×10^{-4}	-37%	基部

の3波平均を示す。

図-7(a)より、両モデルの軸力はほぼ一致しているといえる。また、全て引張側であり振幅は橋軸直角方向加震時よりも小さい。鉛直方向変位はアーチリブ1/4、3/4点付近で、断面力は橋軸直角方向加震時と同様、基部で最大応答を示している。図-7(c),(d)より、下側アーチリブは降伏していない。

モデル化の影響を見るために、モデルAが最大応答を示した箇所において応答値の比較を表-6に示す。

鉛直方向変位では2%、軸力では2%、面内曲げモーメントでは2%、ひずみで2%、モデルAの応答が小さい。

橋軸直角方向加震の場合、アーチリブの軸力で10%、面外曲げモーメントで1%、ひずみで14%、モデルAの応答が小さい。これは、モデルBの面外方向の剛性が小さいからである。

橋軸方向加震時の場合、アーチリブ、橋脚の応答は、ほとんど変わらない。

5.2.3 橋軸直角方向加震の場合 (橋脚の応答)

橋脚の応答に関しては、橋軸直角方向加震時における曲率にモデル化の影響が大きく現れているため、橋軸直角方向加震時における曲率にのみ着目する。

図-8にI種地盤用タイプI地震波を橋軸直角方向に作用させた場合の橋脚(P4,P5,P6)の応答の3波平均を示す。

図より、全ての橋脚において、基部で最大値を示しており、基部に近いほど値が大きくなる傾向にある。

モデル化の影響を見るために、モデルAが最大応

答を示した箇所における比較を表-7に示す。

全ての橋脚について最大値はモデルAの方が小さい(P4で14%、P5で、36%、P6で37%)。

6. まとめと考察

本研究では、第二西海橋(仮称)について、固有振動および地震応答特性に及ぼす床版のモデル化の影響を明らかにした。得られた知見を以下に列挙する。

1.固有振動特性について

全ての固有振動モードにおいて、モデルBよりもモデルAの固有振動数の方が高い。また、面内固有振動数よりも面外固有振動数に及ぼす影響の方が大きい。

2.地震応答特性について

1)アーチリブへのモデル化の影響

最大応答値はモデルAの方が小さく、橋軸直角方向加震時におけるモデル化の影響は大きい(軸力:-10%、面外曲げモーメント:-1%、ひずみ:-14%)が、橋軸方向加震時におけるモデル化の影響はほとんどない。(軸力:-2%、面内曲げモーメント:-2%、ひずみ:-2%)。

2)橋脚へのモデル化の影響

橋軸直角方向加震時における軸力の最大応答値は、全ての橋脚でモデルAの方が大きい。しかし、曲率はモデル化の影響が大きい(P4で-14%、P5で、-36%、P6で-37%)。一方、橋軸方向加震時においては、全ての橋脚の軸力および曲率について、両モデルの差はほとんどない。

床版のモデル化の違い、すなわち床版の剛性の評価方法の違いにより、固有振動解析および地震応答解析の結果は、橋軸直角方向加震時における影響の方が大きいという特徴が得られた。これは、モデルAは全幅で床版の剛性を考慮しているのに対して、モデルBは有効幅で床版の剛性を考慮しており、モデルBの方が面外剛性を過小評価しているためである。一方、面内剛性はほとんど同じであるため、面内固有振動数に対しての影響は面外固有振動数に対する影響に比べると小さい。

文献3)を基に鋼アーチ橋である西海橋とCFTアーチ橋である第二西海橋の解析結果を比較する。なお、西海橋の解析においては、固有振動解析でのみ本論文と同様に床版のモデル化の影響を評価している。

文献3)より、西海橋の固有振動数は、全体的に第二西海橋の固有振動数よりも高いという結果が得られている。また、モデルAの固有振動数の方が高く、面外固有振動数に、モデル化の影響が大きく現れている。さらに、西海橋は振動実験を行っているため実測値との比較も行っている。その結果から、モデルAの方が実測値に近い値を示すことが明らかにされている。

西海橋の固有振動数に及ぼす床版のモデル化の影響は、最大で19%（面外2次固有振動モード）であり、第二西海橋の固有振動数に及ぼす床版のモデル化の影響は、最大で15%（面外5次固有振動モード）である。このことから、鋼アーチ橋である西海橋とCFTアーチ橋である第二西海橋の固有振動解析における床版のモデル化の影響はほとんど同じである。

7. 結論

本研究の解析結果によって、CFTアーチ橋である第二西海橋は床版のモデル化の違い、すなわち剛性の評価方法の違いによって、面外固有振動数、橋軸直角方向加震時におけるアーチリブおよび橋脚の地震応答値に大きく影響が現れることが明らかになった。このことから今後、アーチリブにCFTを使用する中路的アーチ橋の固有振動および非線形地震応答解析、耐震安全性の評価を行う際には、全幅で床版の剛性を考慮しているモデルを用いた方が、より実橋に近い解析結果が得られるのではないかと考えられる。

本論では、床版をはり要素でモデル化したのが、床版が薄くかつ幅が広いため、シェル要素としてのモ

デル化も検討する必要がある。このことが今後の課題といえる。

謝辞

第二西海橋（仮称）の床版のデータを長崎県北振興局道路建設課から提供を受けたことを付記する。

【参考文献】

- 1) 日本鋼構造協会・鋼橋の性能照査型設計対応研究委員会鋼橋の耐震性部会：鋼橋の耐震性能設計の基本と応用，2000.9
- 2) 野中哲也，宇佐美勉，吉野広一，坂本佳子，鳥越卓志：上路式鋼アーチ橋の大地震時弾塑性挙動および耐震性向上に関する研究，土木学会論文集，No.731/I-63，pp.3I-49，2003.4
- 3) D. Mukai, K. Takahashi, Q. Wu, and S. Nakamura: Influence of the Nonlinearity of RC Slab on the Seismic Response of the Saikai Arch Bridge, 3rd International Symposium on Steel Structures, Seoul, Korea, Vol. 1, pp.255-262, 2005
- 4) Q. Wu, M. Yoshimura, K. Takahashi, S. Nakamura, H. Fujita and K. Furukawa: Vibration and nonlinear seismic analysis of the Second Saikai Bridge- Concrete Filled Tubular (CFT) arch bridge-, Proceedings of the 5th Japan-German Joint Symposium, Osaka, Japan, pp.133-142,2003
- 5) M. Yoshimura, Q. Wu, K. Takahashi, S. Nakamura, K. Furukawa: Vibration analysis of the Second Saikai Bridge-a concrete filled tubular (CFT) arch bridge, Journal of Sound and Vibration (under printing), 2005
- 6) (株)アーク情報システム：TDAPIII機能説明書，2003.9
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，1996.12
- 8) 渡辺浩，崎元達郎：コンクリートを充填した角形鋼管柱の局部座屈を考慮した地震応答解析，土木学会論文集，No.647/I-51，pp.357-368，2000.4
- 9) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとモデル化，日本建築学会構造系論文集，第452号，pp.149-158，1993.10
- 10) 大塚久哲編：中径間橋梁の動的耐震設計，(財)九州大学出版会，2000.5