

西海橋の地震応答に及ぼす床版のモデル化の影響

高橋和雄*・向井大吾**
呉慶雄*・中村聖三*

Influence of the Nonlinearity of the RC Slab on the Seismic Response of the Saikai Bridge

by

Kazuo TAKAHASHI*, Daigo MUKAI**
Qingxiong WU* and Shozo NAKAMURA*

The rigidities of the slab and stiffening girder were not considered in our previous nonlinear seismic analysis of the Saikai Bridge that is the deck steel arch bridge. Therefore, the model that can evaluate the rigidities of the slab and the stiffening girder correctly is developed in this study. Natural frequencies obtained by the present analysis are compared with our previous results and the experimental results and then validity of the present analysis is confirmed. Nonlinear seismic responses are evaluated and the effect of the nonlinearity of the concrete slab on the responses of the bridge is discussed by using two different nonlinear material models. It is confirmed that it is necessary to use the models of the exact floor slab and material property from the analysis result of the present research.

1. はじめに

上落式鋼アーチ橋である西海橋（伊ノ浦橋）は、長崎県佐世保市と西彼杵郡西彼町とを結ぶスパン216 mの日本でも有名なアーチ橋であり、「夢の架け橋」と呼ばれる橋梁である。また、西海橋は日本最大級のアーチ橋であり、当時の最高技術が駆使されて架設された歴史的な橋である。

上・中落式アーチ橋は全自重の大部分を占める床版および橋面工の水平慣性力が、主に、補剛桁、アーチリブ、支承、基礎の順に伝達するため地震時の挙動が複雑である。よって、アーチ橋の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。しかし、文献1)に示した西海橋の解析に用いられた解析モデルでは、それらを実評価していなかった。そこで本研究では、まず床版および補剛桁の剛性を正しく評価できるモデルを作成し、固有振動解析を行う

ことによって振動特性を明らかにする。次に、これによって得られた解析値を実測値²⁾および解析値¹⁾と比較し、本モデルの妥当性を評価する。さらに、異なる2つの材料特性をもつ床版モデルを用いて非線形地震応答解析を行い、アーチリブ、床版および補剛桁に及ぼすモデル化の影響を明らかにする。

2. 西海橋の概要と解析モデル

本橋の橋梁形式については、中央径間は上落式固定アーチであり、また側径間は鉄骨2径間ラーメン桁である。橋梁総延長は316.20 mで支間長は216.00 m、側径間長は72.26 mである。幅員は7.50 mで、橋面高は平均水面高より43.31 mであり、建設当時はトラス形式のアーチ橋としては世界一の支間長であった。リブ形状は放物線型アーチである(図-1, 2)。床版はRC床版(厚さ13 cm)で、鋼材はSS400を使用している。

平成16年4月16日受理

*社会開発工学科 (Department of Civil Engineering)

**大学院生産科学研究科 (Graduate School of Science and Technology)

モデル化は橋梁の設計書³⁾を参考に行った。部材の節点の座標を求め、アーチ・トラス・支柱・主桁・横桁・ラテラルそれぞれの部材の断面積、断面2次モーメント、ねじれ剛性および重量を求めて有限要素モデルを作成する。なお、アーチリブ上・下弦材・縦桁は非線形はり、アーチリブ垂直材、斜材・支柱・横桁は線形はり、ラテラル・支柱の斜材はトラスとして作成した。また、床版の厚さは13cmの合成床版である。材料非線形性を考慮した正確な動的解析を行うためにファイバーモデルを用いる(図-3)。

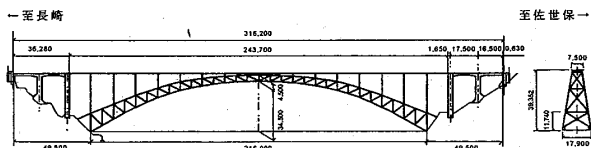


図-1 側面図(単位:m)

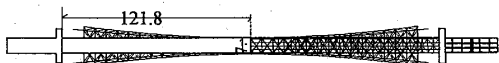


図-2 平面図(単位:m)

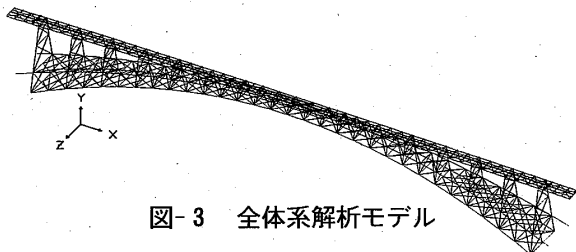


図-3 全体系解析モデル

固有振動解析に用いる3種類の床版モデルを説明する。モデル1はRC床版および補剛桁の剛性を正しく評価できるモデルで、RC床版と補剛桁を別々のはり要素でモデル化し、RC床版と補剛桁の間は剛部材で剛結合したモデルである(図-4)⁴⁾。つまり、2本の補剛桁において橋軸方向で同じ位置にある2つの剛要素上端を結ぶ剛なダミー棒部材を設ける。さらに、この中央に節点を設け、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。モデル2と3は文献1)の解析に用いられたモデルである(図-5)。モデル2は、横桁を支点とする連続合成桁とみ

なしてコンクリート床版の有効幅を算出し、その剛性と縦桁の剛性を考慮したモデルで、モデル3はRC床版と縦桁の剛性を無視したモデルである。なお、質量に関しては、どのモデルも図の質点に考慮してある。

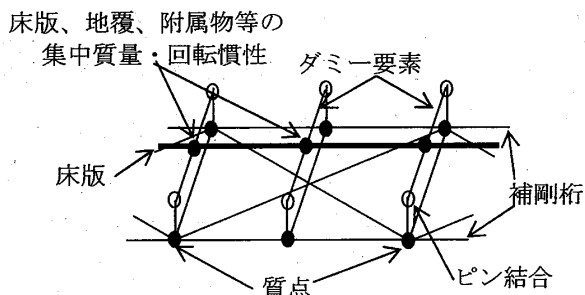


図-4 床版モデル1

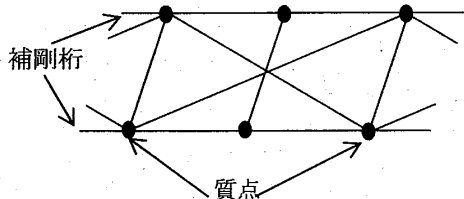


図-5 床版モデル2・3

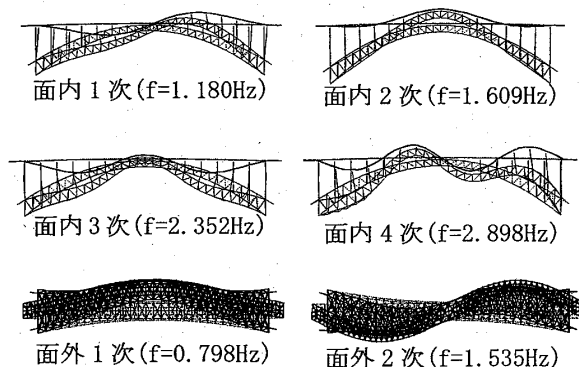


図-6 固有振動モード

3. 固有振動解析

3.1 固有振動特性

上述の3種類の床版モデルを用いて固有振動解析を行い、本研究で得られた解析値、実測値²⁾および文献¹⁾の解析との比較を行い、モデルの妥当性を評価する。なお、解析にはTDAPⅢを使用する。モデル1の面内1次~4次および面外1次・2次の固有振動モードを図-6に示している。図-6より面内方向ではアーチ橋特有の逆対称モードが基本振動モードで現れてい

表-1 固有振動数の比較

(a) 面内固有振動数

モード	①：床版モデル1	②：床版モデル2	③：床版モデル3	実測値	②/①	③/①
	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)		
1	1.180	1.153	1.147	—————	0.98	0.97
2	1.609	1.507	1.483	1.695~1.786	0.94	0.92
3	2.352	2.320	2.306	—————	0.99	0.98
4	2.898	2.834	2.639	2.817~3.030	0.98	0.91

(b) 面外固有振動数

モード	①：床版モデル1	②：床版モデル2	③：床版モデル3	実測値	②/①	③/①
	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)	振動数 (Hz)		
1	0.798	0.732	0.723	—————	0.92	0.91
2	1.535	1.249	1.225	—————	0.81	0.80
3	1.859	1.650	1.604	—————	0.89	0.86
4	2.666	2.410	2.394	—————	0.90	0.90

る。また、面外方向では1次モードが対称振動モードである。

3.2 固有振動数の比較

各モデルの解析値および実測値を表-1に示す。モデル1とモデル2の結果の比較よりモデル2では床版の剛性が過小評価されていることと、剛性の影響は、面外振動の方が大きいことがわかる。また、面内2次モードの固有振動数に関しては、モデル1が実測値に最も近い値になっている。面内4次モードの固有振動数に関しては、モデル1とモデル2の結果が実測値に近い値になっている。

以上のことより、モデル1が実測値によく一致しており、また、実態に近いモデルであるため、固有振動数を求めるにあたっては床版の剛性を正しく評価することが必要であることを示している。

4. 非線形地震応答解析

4.1 解析条件

固有振動解析で、より実態に近いと判断されたモデル1を用いて非線形地震応答解析を行う。入力地震波は道路橋示方書⁹⁾に基づくI種地盤用のタイプIおよびタイプIIの標準波形のうちタイプIではT111、タイプIIではT213を選んだ。この選定理由は既往の解析結果¹⁾でこの2波がアーチリブで最大軸力を示したためである。なお、地震波は地域別補正係数 ($C_z = 0.7$) で振幅補正した値を使用し、橋軸直角方向および橋軸方向に入力する。

4.2 解析法と減衰特性

解析法についてはNewmark β 法 ($\beta = 1/4$)を用い、積分時間間隔を0.0025sec、継続時間は40secとする。また、減衰についてはRayleigh減衰を用いて、減衰定数は0.02とする。なお、解析ソフトはTDAP IIIを用いる。

非線形地震応答解析で使用する2つの床版モデルに用いるコンクリートの材料特性を図-7に示す。(a)の材料モデルIはコンクリート示方書⁹⁾に示されたモデルで、(b)の材料モデルIIはバイリニアモデルである。

4.3 解析結果

今回着目したアーチリブ、RC床版、補剛桁の応答のうちで、応答比(モデルIIの結果をモデルIの結果で除した値)が最大値を示したものを記す。なお、本研究の解析では、床版のひずみは降伏ひずみを超える結果は得られていない。

(a) アーチリブ

図-8にI種地盤用タイプI地震波(T111)が橋軸直角方向に作用した場合のアーチリブの最大軸力および最大曲げモーメント、さらにI種地盤用タイプII地震波(T213)が橋軸方向に作用した場合のアーチリブのひずみを示す。ここで、ひずみとは、実ひずみを降伏ひずみで除した値であり、以下も同様とする。図-8より、断面力の最大値はスプリング部で発生している。また、図-8のグラフより得られた応答比の最大値を表-2に示す。表-2より軸力では22%、曲

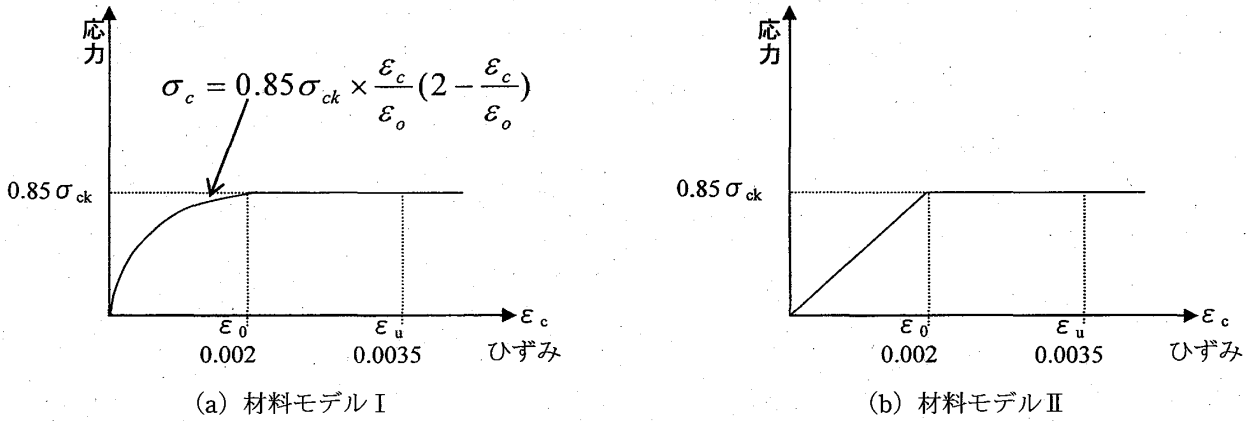
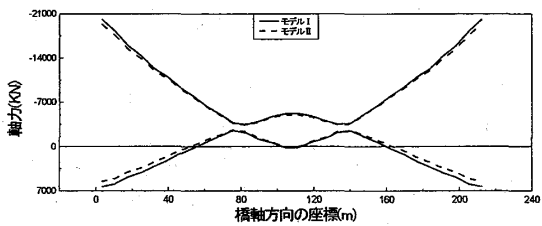
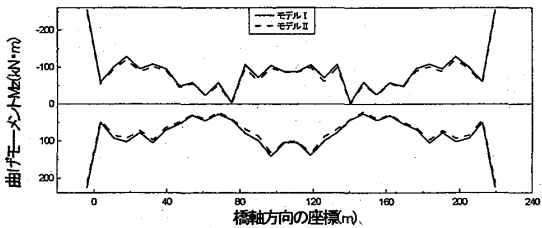


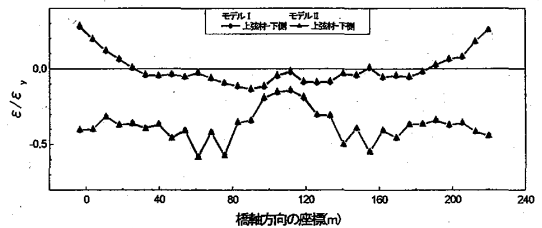
図-7 コンクリートの材料特性



(a) アーチリブ最大軸力 (kN)



(b) アーチリブ最大曲げモーメント (kN·m)



(c) アーチリブ最大ひずみ

図-8 アーチリブ最大応答

げモーメントでは8%, ひずみでは1%の差がそれぞれ生じている。また、図-9にI種地盤用タイプII地震波(T213)が橋軸直角方向に作用した場合のアーチリブの橋軸直角方向変位, 同波が橋軸方向に作用した場合のアーチリブの橋軸方向変位, およびI種地盤用タイプI地震波(T111)が橋軸方向に作用した場合のアーチリブの鉛直方向変位を示す。図-9のグラフより得られた応答比の最大値を表-3に示す。図-9のグラフより橋軸直角方向変位は, クラウン部で最大

表-2 アーチリブ応答比の最大値

(a) 軸力 (kN)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
183.6490	3167	2475	0.78

(b) 曲げモーメント (kN·m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
3.6005	289.8	268.0	0.92

(c) ひずみ

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
18.003	-0.3568	-0.3593	1.01

表-3 アーチリブ最大変位応答の最大値

(a) 橋軸直角方向変位 (m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
108.027	0.4007	0.4118	1.03

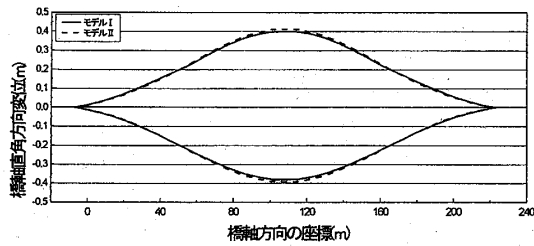
(b) 橋軸方向変位 (m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
100.825	-0.03690	-0.03730	1.01

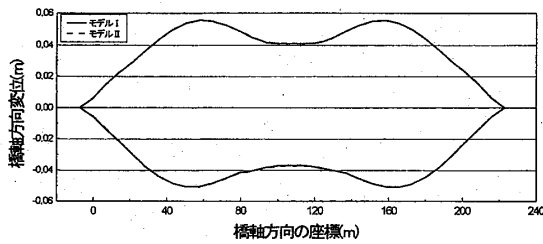
(c) 鉛直方向変位 (m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
122.431	0.04660	0.04740	1.02

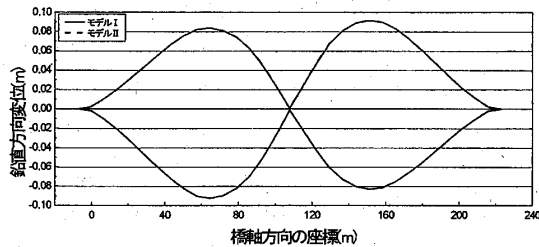
となり, スプリング部では発生していない。橋軸方向変位と鉛直方向変位はアーチリブの1/4点で最大



(a) アーチリブ橋軸直角方向変位 (m)



(b) アーチリブ橋軸方向変位 (m)



(c) アーチリブ鉛直方向変位 (m)

図-9 アーチリブ最大変位

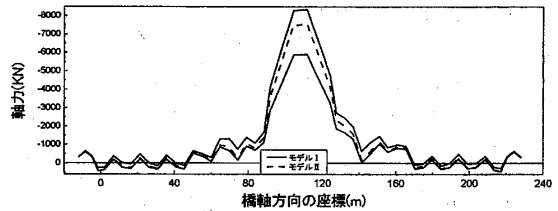
となっている。また、鉛直方向変位はアーチリブのクラウン部とスプリング部では発生していないこともわかる。表-3より、橋軸直角方向変位では3%、橋軸方向変位では1%、鉛直方向変位では2%の差がそれぞれ生じている。

(b) RC床版

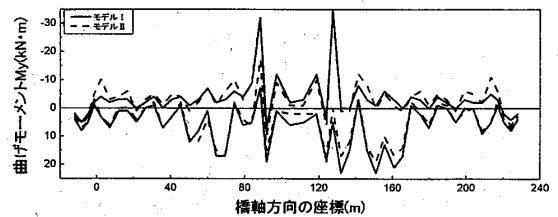
図-10にはI種地盤用タイプI地震波(T111)が橋軸直角方向に作用した場合のRC床版の最大軸力、同波が橋軸方向に作用した場合の最大曲げモーメントおよびひずみを示す。また、図-10のグラフより得られた応答比の最大値を表-4にまとめている。表-4より軸力、曲げモーメントおよびひずみで、それぞれ28%、26%、24%の差が生じている。

図-11にI種地盤用タイプI地震波(T111)が橋軸直角方向に作用した場合の補剛桁の最大軸力およびひずみ、さらにI種地盤用タイプII地震波(T213)が橋軸直角方向に作用した場合の最大曲げモーメントを示す。また、図-11のグラフより得られた応答比の最大値を表-5にまとめている。表-5より軸力では19%、曲げモーメントでは15%、ひずみでは11%の差がそれぞれ生じている。

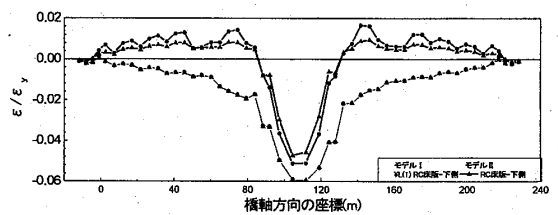
以上の結果から、床版の材料の非線形性の影響はアーチリブの応答よりもRC床版および補剛桁の応答に大きく表れている。



(a) 床版の最大軸力 (kN)



(b) 床版の最大曲げモーメント (kN・m)



(c) 床版のひずみ

図-10 床版の最大断面力

表-4 床版応答比の最大値

(a) 軸力 (kN)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
111.623	-5896	-7539	1.28

(b) 曲げモーメント (kN・m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
132.176	23.03	17.12	0.74

(c) ひずみ

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
118.83	-0.03676	-0.02798	0.76

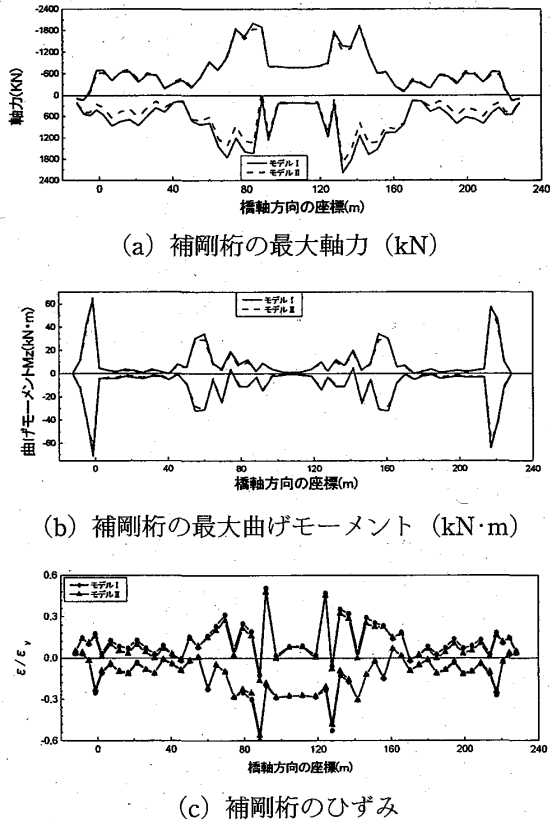


図-11 補剛桁の最大断面力

表-5 補剛桁応答比の最大値

(a) 軸力 (kN)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
83.875	1630	1325	0.81

(b) 曲げモーメント (kN・m)

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
155.8815	34.00	29.00	0.85

(c) ひずみ

橋軸座標 (m)	材料モデル I	材料モデル II	比
83.875	-0.3226	-0.2856	0.89

5. まとめ

本研究によって得られたことは以下に記す。

(a) 固有振動解析

本研究の解析値を実測値および既往の解析値と比較をしたところ、既往の解析結果が過小評価であったこと、床版と補剛桁の剛性を正しく評価できるモデルの方がより実測値に近いことがわかった。したがって、固有振動解析を行うにあたっては床版と補剛桁の剛性を正しく評価できるモデルを用いる必要がある。

(b) 非線形地震応答解析コンクリート示方書に示されたコンクリートの非線形材料モデルとバイリニアモデルの2個の材料モデルによる地震応答を比較したところ、RC床版と補剛桁の応答にモデル化の影響が顕著に表れており、RC床版と補剛桁の断面力を求めるにあたっては、コンクリート示方書モデルを用いた床版モデルでの地震応答解析の必要性が示された。

参考文献

- 1) 呉・高橋・小林・中村：西海橋の固有振動特性および非線形地震応答に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第11巻，pp.185-192,2003.11
- 2) 村上・吉田：伊ノ浦橋の応力測定（第2報）及鋼材の温度分布並に振動測定について，第3回橋梁・構造工学研究発表会講演概要，pp.73-87,1956.9
- 3) (株) 横河橋梁：西海橋（伊ノ浦橋）の設計書，1954.1
- 4) 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，pp.71-73,2000.9
- 5) (社) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編,2002.3
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.23-24,1996.3