



Title	CFTアーチ橋（新西海橋）の振動モデルの検証に関する研究
Author(s)	宮本, 敬太; 高橋, 和雄; 中村, 聖三; 呉, 慶雄; 永田, 正美
Citation	鋼構造年次論文報告集, 16, pp.297-304; 2008
Issue Date	2008-11
URL	http://hdl.handle.net/10069/30113
Right	© 日本鋼構造協会

This document is downloaded at: 2020-10-24T06:44:30Z

CFT アーチ橋 (新西海橋) の振動モデルの検証に関する研究

Research on the Validation of the Vibration Model of a CFT Arch Bridge (New Saikai Bridge)

○宮本 敬太* 高橋 和雄** 中村 聖三*** 呉 慶雄**** 永田 正美*****
Keita MIYAMOTO Kazuo TAKAHASHI Shozo NAKAMURA Qingxiong WU Masami NAGATA

ABSTRACT The New Saikai Bridge is a CFT arch bridge with a concrete-filled steel tube (CFT) adopted for the arch ribs of the road bridge for the first time in Japan. It is necessary to understand the natural vibration and response characteristics of the CFT bridge. The authors measured microtremors of the bridge to estimate the natural frequency and damping constant. The validity of the analysis model was evaluated by comparing the measured natural frequency with the analysis result. In addition, the author carried out a non-linear seismic response analysis using two analysis models, i.e. one with the confinement effect and the other without the confinement effect, to evaluate the confinement effect of steel pipe on the increase in the strength of concrete.

Keywords: CFT アーチ橋, 常時微動, サブスペース法, 固有振動特性, 非線形地震応答
A CFT arch bridge, microtremors, subspace method, natural vibration,
nonlinear seismic response

1. はじめに

平成18年3月に開通した新西海橋は、新設道路橋として、日本初のコンクリート充填鋼管 (Concrete Filled Steel Tube: 以下CFTと略す) をアーチリブに採用したCFTアーチ橋である¹⁾。これまで、CFTアーチ橋である新西海橋を対象とした解析による研究が行われ、固有振動数、動的応答特性 (地震応答、走行荷重応答) が明らかにされた^{2), 3)}。

また、新西海橋の完成時に走行荷重応答に関する振動実験⁴⁾が行われたが、固有振動特性 (固有振動数、減衰定数) に関する実験は行われていない。本研究の目的であるCFTアーチ橋の解析モデルの妥当性および減衰の大きさを把握するために

は、実橋の固有振動特性の把握が必要である。そこで、本研究は新西海橋の常時微動計測を行い、サブスペース法を用いたデータ解析から固有振動特性 (固有振動数、固有振動形、減衰定数) を推定する。得られた結果を解析による固有振動数²⁾と比較して、解析モデルの妥当性の評価を行う。また、本橋の減衰の大きさを推定する。

さらに、鋼管によるコンクリートの拘束効果を評価するために、拘束効果の考慮・無視の2個の解析モデルを用いた非線形地震応答解析を行い、拘束によるコンクリートの強度増が非線形地震応答に及ぼす影響を評価する。

*工学士 長崎大学大学院学生

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

**工博 長崎大学工学部教授

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) 第2種正会員

***博(工) 長崎大学工学部准教授

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) 第2種正会員

****博(学) 中国福州大学准教授

中国福州市工並路523号

*****長崎大学工学部技術職員

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

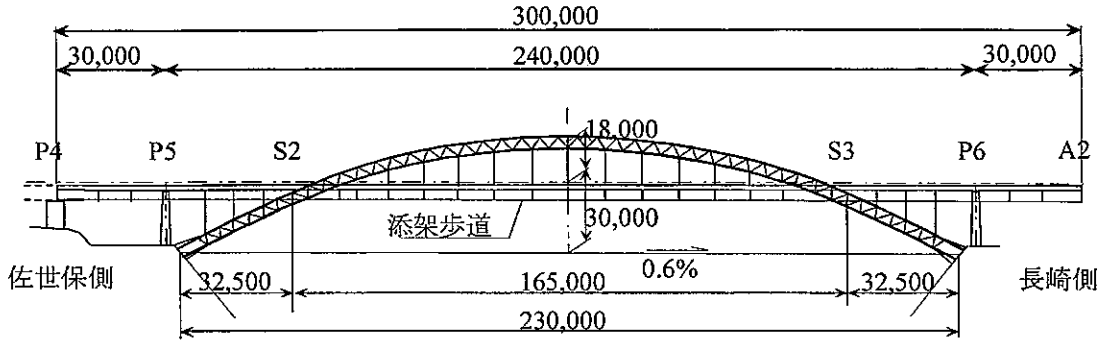


図-1 新西海橋の一般図 (単位: mm)

2. 解析対象橋梁の概要

本研究の対象となる新西海橋は、長崎県佐世保市と西海市を隔てる針尾瀬戸を跨ぐ橋梁である¹⁾。本橋は、新設道路橋としては国内で初めてとなるCFTアーチ橋として計画され、平成18年3月5日に供用開始された。本橋の一般図と断面図を図-1、図-2に示す。

アーチリブは、直径812.8mmの鋼管3本を弦材とする逆三角形トラス2連で構成されている。左右のアーチリブは2組の横桁によって連結されており、横桁以外に左右を連結する部材はない。アーチリブの基部は、架設時はピン構造であるが、アーチリブ閉合後に鉄筋コンクリート巻き立て構造によって固定されている。

補剛桁および横桁は、高さ2m、幅1.5mの箱形断面で、縦桁はI形断面である。補剛桁は横桁の位置では支承によって、上路部は支柱によって、下路部はハンガークーブルによって、横桁位置から張り出したブラケットで、それぞれアーチリブから支持されている。

本橋は自動車専用道路として計画されたが、本橋架設地点の両岸が県立公園に指定されていることから、桁下には公園利用者の利便性に配慮して添架歩道が設けられている。この添架歩道は鋼床版H形鋼主桁橋で、横桁から鋼管(約30mピッチ)およびストランドロープ(約10mピッチ)によって支持されている。また、添架歩道の中央部は拡幅して展望スペースとなっている。主橋部の諸元を表-1に補足する。

3. 固有振動解析

3.1 振動モデル

新西海橋主橋部の構造モデルを図-3に示す²⁾。添架歩道を含む全部材をはり要素とトラス要素を用いてモデル化した3次元有限要素モデルである。

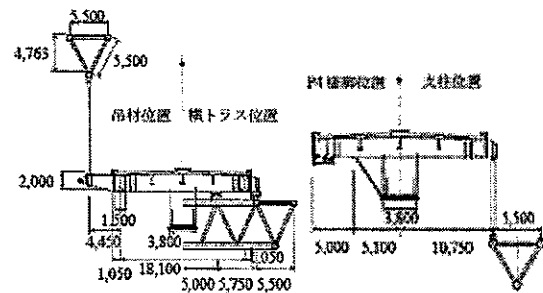


図-2 新西海橋の断面図 (単位: mm)

表-1 新西海橋の主橋部諸元

路線名	一般国道202号
計画場所	長崎県佐世保市針尾東町 ～西海市西彼町小迎
形式	鋼中路コンクリート充填 ブレースドリブアーチ橋
道路規格	第1種第3級
設計速度	80km/h
設計荷重	B活荷重
橋長	300.000m
支間	300.000m+240.000m+30.000m
アーチ支間	230.000m
有効幅員	190.000m

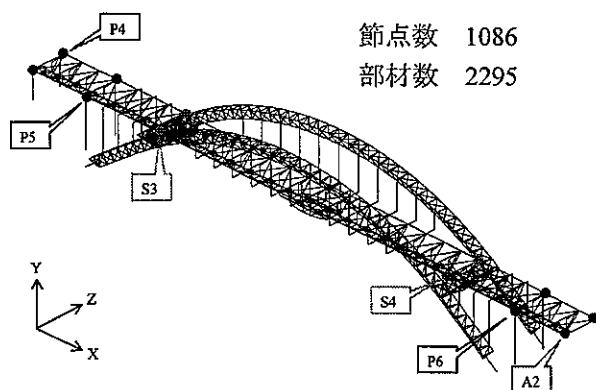


図-3 新西海橋の構造モデル

表-2 材料特性

部 材		弾性係数 (kN/m ²)	せん断弾性 係数(kN/m ²)	ポアソン比	
本橋部	アーチリブ	2.00×10 ⁸	7.69×10 ⁷	0.3	
	補剛桁	2.00×10 ⁸	7.69×10 ⁷	0.3	
	ハンガーロープ	1.96×10 ⁸	7.54×10 ⁷	0.3	
	橋 脚	2.50×10 ⁷	1.07×10 ⁷	0.167	
添架 歩道	主 桁	2.00×10 ⁸	7.69×10 ⁷	0.3	
	吊材	ストランドロープ	1.40×10 ⁸	5.40×10 ⁷	0.3
		鋼 管	2.00×10 ⁸	7.69×10 ⁷	0.3

実橋のアーチリブの全体形状は三心円であるが、構造モデルでは、節点間を直線で結んで近似している。鋼管トラス構造であるアーチリブおよびトラス横梁では、部材間の結合をピン結合とし、軸力部材とするのが一般的であるが、本論文においては、結合条件をより実際に近い状態である剛結合とし、部材は曲げを考慮できるように、はり要素を用いている。さらに、次のようなモデル化を行っている。

- ・アーチリブ弦材は、鋼コンクリート合成構造とし、鋼管とコンクリート間の付着は考慮しない。
- ・合成床版は、床組に仮想部材を用いることで水平力に抵抗できるように配慮するとともに、剛性は主桁に考慮する。
- ・ケーブルは非抗圧縮性軸力部材としてモデル化する。

なお、各構造の断面性能は、アーチリブ、補剛桁、添架歩道主桁については、場所によって値が異なるので、それぞれの中央位置での値を代表値と用いる。また、実施設計段階で図面の変更等がなされ、設計時には床版が重量のみ与えられていたので、剛性および質量は完成断面を用いている。

各部材に用いた要素種別および材料特性を表-2に示す。節点数は1086、部材数は2295である。

3.2 支承条件

図-3に示した本橋主橋部の支承について、表-3に主橋部本体の支承条件を示す。アーチリブ基部および橋脚基部は固定とする。また、補剛桁と橋脚の結合部(S1とP4、S2とP5およびS5とP6)、補剛桁と橋台の結合部(S6とA2)および補剛桁とトラス横梁の結合部(S3およびS4)には反力分散ゴム支承が用いられているため、ばね要素による弾性支持とし、バネ定数を決定している。

添架歩道の支承条件については、トラス横梁部水平脊位置において橋軸直角方向の変位を固定と

表-3 支承条件

方向	P4	P5	S3	S4	P6	A2	
支持条件	鉛直	固定	固定	固定	固定	固定	固定
	橋軸	弾性 固定 k=5	弾性 固定 k=8	弾性 固定 k=10	弾性 固定 k=10	弾性 固定 k=8	弾性 固定 k=5
	面外	弾性 固定 k=5	弾性 固定 k=8	固定	固定	弾性 固定 k=8	弾性 固定 k=5
支 承	鉛直	/	/	/	/	/	/
	橋軸	ゴム 支承	ゴム 支承	ゴム 支承	ゴム 支承	ゴム 支承	ゴム 支承
	面外	支承	支承	水平 支承	水平 支承	支承	支承

k: (×10³kN/m)

する。

3.3 解析ソフト

本研究の固有振動および後述の地震応答の数値解析には土木・建築向け汎用3次元動解析プログラムTDAPIII⁵⁾を用いている。なお、固有振動解析では減衰を設定していないが、走行荷重応答解析²⁾では、橋梁の減衰にRayleigh減衰を用いた。減衰定数は鋼橋に用いられる0.01であると仮定した。CFTアーチ橋の場合、減衰の大きさが鋼橋に近いのか、コンクリート橋に近いのかのデータが無いので、鋼橋のデータを使用した。

4. 常時微動計測による固有振動数特性の推定

4.1 常時微動計測の目的

新西海橋完成時に走行荷重応答試験や人力加振による振動計測⁴⁾がなされたが、これらのデータから本橋の固有振動数や減衰定数の評価をすることができないので、完成後に常時微動計測を行った。加速度計のチャンネル数が3チャンネルだけであったので、振動方向毎に向きを変えながら、補剛桁の常時微動計測を行った。自動車専用道路

橋のため、アーチリブに加速度計を設置することができないので、補剛桁のみの計測とした。

なお、本橋の側径間長が30mで固有振動数が自動車の固有振動数に近く、車両走行時に大きな動的応答が発生することが懸念されたため、常時微動計測を側径間についても実施した。

4.2 計測機器

計測には、圧電式加速度計(3チャンネル)、圧電型トランスデューサ用アンプ、動ひずみレコーダー、パーソナルコンピュータなどの機器を用いた。加速度計の諸元を表-4に示す。

4.3 振動計測

新西海橋主橋部、側径間を対象に常時微動計測を行った。主径間の鉛直振動、橋軸方向振動、面外振動とねじれ振動および側径間の鉛直振動を計測した。計測時間は1238秒、時間刻みは0.2ミリ秒とした。現地で常時微動計測の予備実験を行ったところ、5kHzのサンプリングレートが安定したデータを得ることができたので、このレートを採用した。

圧電型加速度計の設置位置を図-4に示す。補剛桁、横桁内に加速度計3チャンネルを設置し、加速度計のチャンネル数が少ないので加速度計の向きを変えて鉛直、橋軸、面外の各方向の加速度を計測した。主橋部の鉛直、橋軸方向および面外振動は同じ箇所で行い、図中に示すように外桁で実施した。ねじれ振動の計測点はスパン中央(⑩)および佐世保よりの点(⑫)の2箇所、側径間での鉛直振動の計測点は長崎側の3点とした。

4.4 データ解析

常時微動振動実験のように Output-only の構造同定に対して、サブスペース法(部分空間同定法)を用いて、固有振動数、減衰定数および固有振動形を同定した。本論文に用いたサブスペース法は、文献⁶⁾に詳細な誘導がある。

平成19年12月13日に実施した常時微動計測の推定の一例を図-5および図-6に示す。図は鉛直振動の計測データの解析結果であるが、固有振動数および減衰定数が推定されていることがわかる固有振動形については3点のみのため、対称振動か逆対称振動かの区別の判別に適用できる。

5. 解析結果

5.1 固有振動数

表-4 加速度計諸元

圧電型 加速度計	型名	710 (TEAC社)
	感度	300±20% (mV/m/s ²)
	最大加速度	±5 (m/s ²)

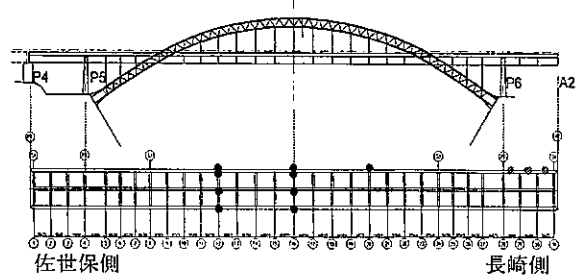


図-4 加速度計の設置位置

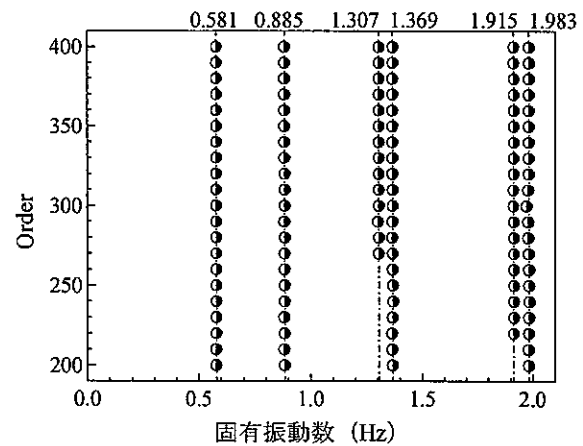


図-5 固有振動数の推定

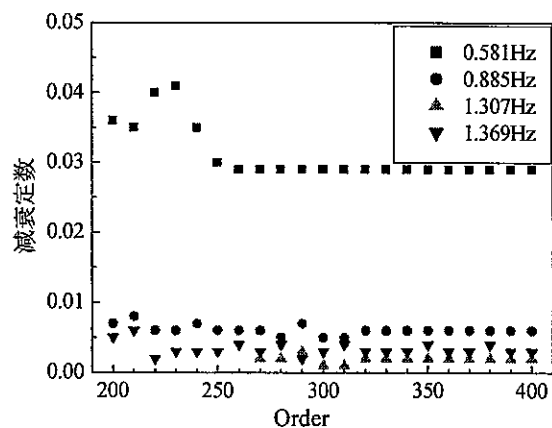


図-6 減衰定数の推定

主径間における鉛直振動、面外方向振動および側径間における鉛直振動の常時微動計測結果を用いて、サブスペース法による解析から得られた固有振動数および減衰定数、ならびに解析から得られた固有振動数の一覧を表-5に示す。表には複数回計測して得られたすべての振動数をまとめて

いる。3点の計測値の振幅と位相から固有振動形を特定した。

1次, 3次, 6次, 7次, 10次および12次については計測値が得られていない。これは、これらの固有振動形がアーチリブの面外振動が卓越するため、補剛桁のみの計測では把握できないことによるものである。本橋の2本のアーチリブは連結されていないために、低次振動で面外方向に多くの固有振動数を持っている。

解析値と計測値を比較すると、4次および13次の振動を除くと10%以内の差で両者が一致している。このことから本橋のモデル化は適切に行われていると評価できる。

5.2 減衰定数

計測から得られた減衰定数に着目すると、表-5のように2次振動と5次振動の値が大きい。この2つの振動形は橋軸方向の変位が卓越する振動で、反力分散ゴム支承の減衰の影響と推定される。反力分散ゴム支承は、構造解析ではばね定数のみで評価しているが、地震応答解析を行う場合は減衰の影響を考慮すべきことを示唆している。このほかの面外および鉛直振動の減衰定数は0.01程度で小さい。減衰の大きさは鋼橋と同程度といえる。

6. 非線形地震応答に及ぼすコンクリートの拘束効果の影響

6.1 検討の理由

CFTは鋼管によるコンクリートの拘束効果が期待できるために、コンクリート強度の増加が見込まれている。この前提として、鋼材とコンクリートが密着していることが必要である。しかし、温度差による鋼管とコンクリートの拘束状況の変化と、設計どおりの完全な施工は無理なことなどから鋼管とコンクリートが完全に一体となっているとは限らない。また、架設中の打音検査によれば、夏場は鋼管とコンクリートが離れている音がするが、冬場では一体となった音がすることが指摘されている。そこで本章では、コンクリートの拘束効果が、アーチリブ外側上弦材の応答に及ぼす影響を、拘束効果の考慮ありおよび考慮なし(無視)の2つのモデルに非線形地震応答解析を行い、応答を比較することにより明らかにする。

6.2 地震応答解析モデル

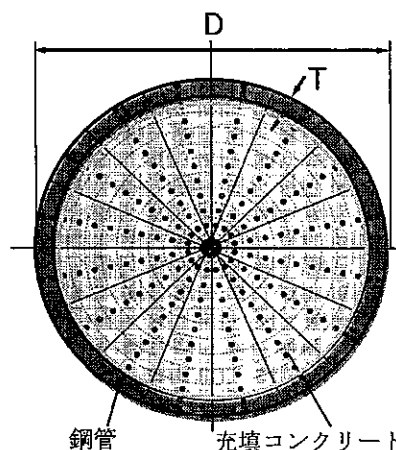
6.2.1 解析モデル

解析モデルは振動解析モデルにおいて、添架歩

表-5 固有振動数, 減衰定数, 固有振動形の一覧

次数	固有振動数 (Hz)		差	減衰定数	固有振動形
	解析値	計測値			
1	0.365	—	—	—	面外1次(対称)
2	0.470	0.434	-7.7	0.065	橋軸1次(逆対称)
3	0.473	—	—	—	面外2次(対称)
4	0.574	0.490	-14.6	0.010	面外3次(対称)
5	0.640	0.581	-9.2	0.029	橋軸2次(逆対称)
6	0.683	—	—	—	面外4次(逆対称)
7	0.833	—	—	—	面外5次(逆対称)
8	0.850	0.836	-1.6	0.006	面外6次(対称)
9	0.927	0.885	-4.5	0.006	鉛直1次(対称)
10	1.113	—	—	—	面外7次(逆対称)
11	1.128	1.110	-1.6	0.003	面外8次(逆対称)
12	1.253	—	—	—	面外9次(対称)
13	1.455	1.307	-10.2	0.002	鉛直2次(対称)
14	1.475	1.365	-7.5	0.008	面外10次(逆対称)
15	1.510	1.369	-9.3	0.003	橋軸4次(逆対称)
16	1.867	1.766	-5.4	0.013	面外11次(対称)
17	1.944	1.920	-1.2	0.007	面外12次(対称)
18	1.948	1.915	-1.7	0.005	鉛直3次(対称)
19	2.012	1.969	-2.1	0.006	面外13次(逆対称)
20	2.026	1.983	-2.1	0.004	鉛直4次(対称)
27	2.644	2.766	4.6	0.012	側径間鉛直1次(対称)
34	3.200	3.308	3.4	0.010	側径間鉛直2次(逆対称)

※差 = (計測値 - 解析値) / 解析値 × 100 (%)



D: 鋼管径 T: 鋼管厚

図-7 ファイバーモデルの要素分割(アーチリブ)

道の質量を補剛桁に加えるモデルとする。

CFT構造であるアーチリブ弦材の材料非線形性を考慮するために、軸力変動, 2軸曲げを自動的に考慮できるファイバーモデルを用いた³⁾。ファイバー要素分割を図-7に示す。鋼管は径方向に2分割, 周方向に16分割し, コンクリートは, 径方向に10分割, 周方向に16分割した。全ファイバー数は192個である。

6.2.2 材料特性

鋼管, 充填コンクリートおよびコンクリートの

材料定数を表-6 に示す。

鋼管の材料特性は道路橋示方書に基づいた完全弾塑性モデルとし、局部座屈に関しては、充填コンクリートによる鋼管の変形拘束が利くため考慮していない。

充填コンクリートの材料特性については、鋼管による影響を付加する、佐藤が提案した応力ひずみ曲線および式を用いた⁷⁾。以下に式を示す。

降伏応力：

$$f_{cB} = -\{\sigma_{ck} + 0.8(2T/D)\sigma_{sy}\} \quad (1)$$

降伏ひずみ：

$$\varepsilon_{cB} = -(2.5 + 0.025\sigma_{ck}) \times 10^{-3} \quad (2)$$

ここに、

σ_{sy} ：鋼管の降伏応力 (kN/m²)

σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度 (kN/m²)

D：鋼管径，T：鋼管厚

CFTアーチリブの鋼管径Dは0.8128mで一定であるが、鋼管厚は弦材ごとに、またはアーチリブの位置によって異なっている。最も鋼管厚が大きい下弦材のスプリング部(T=0.047m)において、降伏応力 f_{cB} は69144 kN/m²になる。同時に式(2)を用いると、充填コンクリートの降伏ひずみは、 $\varepsilon_{cB}=0.0035$ となり、通常のコンクリートに比べ、降伏応力および降伏ひずみが増加し、変形性能が高いことが確認できる。鋼管厚最大断面と標準断面(T=0.015m)のコンクリートの応力ひずみ関係を図-8に示す。

表-6 鋼管およびコンクリートの材料定数

	ヤング係数 (kN/m ²)	ポアソン比	σ_{sy} (σ_{ck}) (kN/m ²)
鋼管 STK400	2.0×10^8	0.300	235000
鋼管 STK490	2.0×10^8	0.300	315000
充填 コンクリート	2.0×10^7	0.167	40000
コンクリート	3.1×10^7	0.200	40000

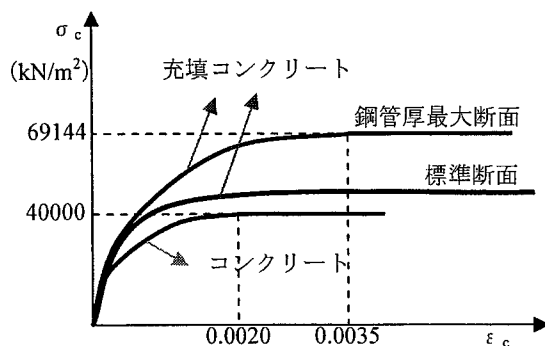


図-8 コンクリートの応力ひずみ関係

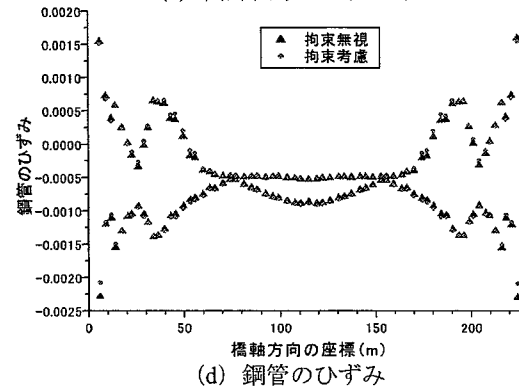
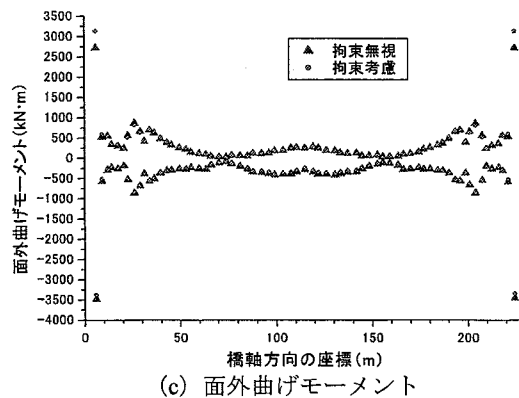
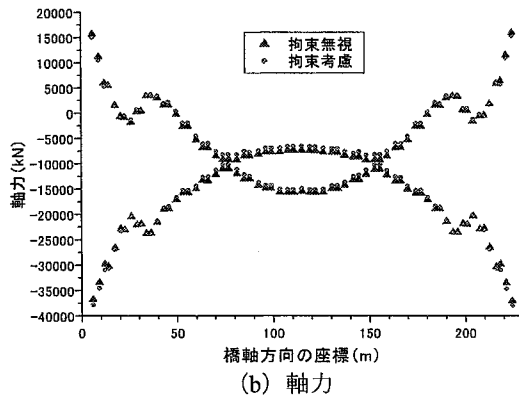
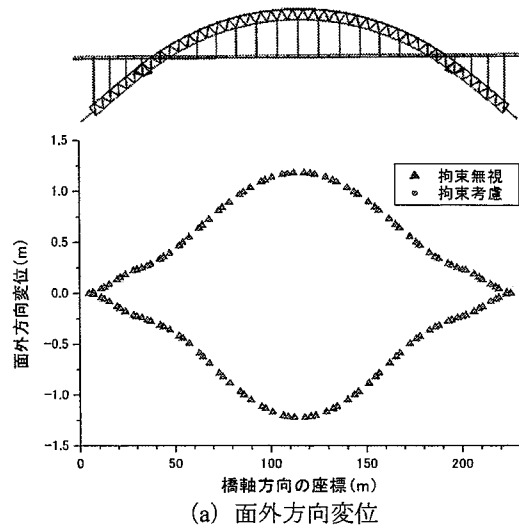


図-9 タイプ I 地震動に対する外側リブの最大応答 (3波平均)

6.2.3 非線形地震応答解析

地震応答解析には、Newmarkの β 法($\beta=1/4$)を用いた直接積分により非線形動的解析を行った。積分時間間隔は1/400sec, 継続時間は40secとする。

減衰は、Rayleigh減衰を用いる。材料の履歴特性を考慮しないため、本研究では道路橋示方書耐震設計編⁸⁾に基づいて、減衰定数を0.02とする。

新西海橋直下の地盤は、道路橋示方書⁸⁾の分類ではI種地盤とされている。よって入力地震動は、I種地盤用のタイプI地震動(T111, T112, T113)およびタイプII地震動(T211, T212, T213)の6波の標準波形を地域別補正係数(長崎県: $C_z=0.7$)で振幅補正したものをを用いる。地震動の入力方向は面外方向とする。

6.2.4 コンクリートの拘束効果の評価

鋼管による充填コンクリートの拘束効果を考慮する場合と拘束効果を見捨てる場合について、タイプI地震動およびタイプII地震動に対する外側アーチリブの最大・最小応答の3波平均を図-9および図-10に示す。図に示すように、面外方向変位については両者の差は見受けられない。軸力、面外曲げモーメントおよび鋼材のひずみについては、絶対値が大きい基部および2本のアーチリブを結ぶ横梁付近で両者に差が見受けられる。特に鋼管のひずみについては基部において拘束の影響が見受けられる。

拘束考慮と拘束無視の場合のタイプI地震動に対する外側リブの応答をまとめると、表-7に示すようになる。これより、コンクリートの拘束効果の影響は鋼管のひずみに効いてくるといえ、その大きさは10%程度である。

表-7 タイプIおよびタイプII地震動に対する外側リブの応答(3波平均)

		位置	拘束考慮	拘束無視	差(%)
タイプI	面外方向変位(m)	中央	1.188	1.180	-0.7
	軸力(kN)	基部	-38041	-37029	-2.7
	面外曲げモーメント(kN・m)	基部	-3371	-3490	3.5
	鋼管のひずみ	基部	-2.09×10^{-3}	-2.30×10^{-3}	9.9
タイプII	面外方向変位(m)	中央	-0.725	-0.723	-0.3
	軸力(kN)	基部	-25731	-24857	3.4
	面外曲げモーメント(kN・m)	基部	2425	2329	-4.0
	鋼管のひずみ	基部	-1.29×10^{-3}	-1.34×10^{-3}	3.9

差 = (拘束無視 - 拘束考慮) / 拘束考慮 × 100 (%)

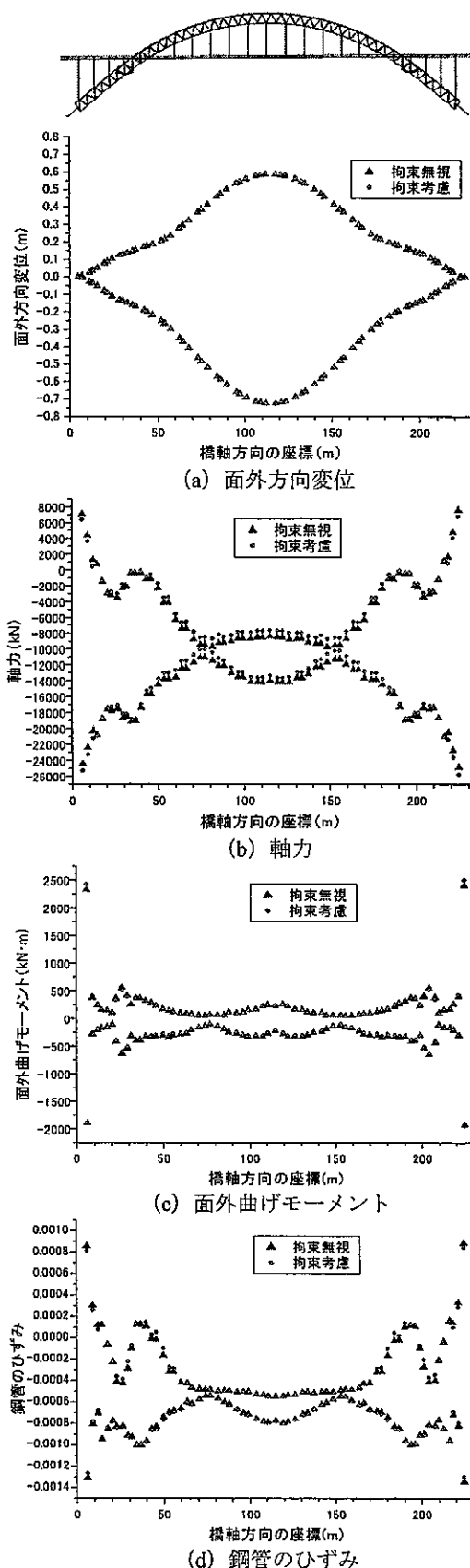


図-10 タイプII地震動に対する外側リブの最大応答(3波平均)

7. おわりに

本研究によって得られた成果を以下に示す。

- (1) 固有振動数の解析値と計測値の値がほぼ 10% 以内に収まり、振動解析モデルの妥当性が確認された。
- (2) 鉛直および面外振動の減衰定数は 0.01 程度で、コンクリート橋よりは鋼橋に近い。
- (3) 橋軸方向の振動については、大きめの減衰定数が得られている。ゴム支承の影響と考えられる。面内方向の地震応答解析に当たっては、ゴム支承の減衰を考慮した解析が必要と思われる。
- (4) コンクリートの拘束効果は、鋼管のひずみが大きいアーチリブ基部において 10% 程度認められる。コンクリートの拘束効果はアーチリブの面外変位や軸力に対しては 2% 程度で小さい。

今回の振動計測と解析によって、固有振動特性や非線形地震応答について上述のような知見が得られた。アーチリブの面外振動や添架歩道の振動計測および反力分散ゴム支承の減衰のモデル化については今後検討の予定でいる。

最後に本研究を行うにあたり、長崎県、三菱重工鉄構エンジニアリング(株)および長崎県道路公社からデータの提供および計測の許可をいただきました。ここに厚く感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 高治正信, 白井武, 田崎智, 茂呂充, 西島儀行, 吉村光弘: 新西海橋主橋部の設計と施工, 橋梁と基礎, 第 40 巻, 第 1 号, pp. 13~22, 2006.1.
- 2) Yoshimura M., Wu Q., Takahashi K., Nakamura S. and Furukawa K. : Vibration analysis of the Second Saikai Bridge -a concrete filled tubular (CFT) arch bridge -, Journal of Sound and Vibration, Vol. 290, pp. 388~409, 2006.
- 3) Wu Q., Yoshimura M., Takahashi K., Nakamura S. and Nakamura T. : Nonlinear Seismic Analysis of the Second Saikai Bridge-Concrete Filled Tubular(CFT)Arch Bridge, Engineering Structures, 28(2), pp.163-182, 2006.
- 4) Ohishi Y., Takahashi K., Wu Q., Yoshimura M. and Nakamura S. : Comparison of Running-Vehicle Tests and FEM Analysis Results for the Shin-Saikai Bridge, 4th International Symposium on Steel Structures, 2006.12(Korea).
- 5) (株) アーク情報システム: TDAPⅢ機能説明書, 1999.
- 6) 片山徹: システム同定-部分空間法からのアプローチ, 朝倉書店, 2004.
- 7) 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そのモデル化, 日本建築学会構造系論文集, 第 452 号, pp.149-158, 1993.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説(V 耐震設計編), 2002.3.