

西海橋の固有振動特性および耐震性に関する研究

論文

Study on natural vibration and seismic capacity in the Saikai Bridge

呉 慶雄\* ○高橋 和雄\*\* 古賀 智己\*\*\* 中村 聖三\*\*\*\* 永田 正美\*\*\*\*\*

Qingxiong WU Kazuo TAKAHASHI Tomomi KOGA Shozo NAKAMURA Masami NAGATA

**ABSTRACT** Saikai Bridge is a deck-type fixed arch bridge that was constructed in 1955. At the time it was one of a few long-span bridges in Japan, but as this was shortly after the war, the only tests carried out were operating tests during construction. Therefore in this study, ambient vibrations were measured, and the measured values of natural vibrations and the analysis values of natural vibrations obtained from natural frequency analysis were compared to validate the model and estimate the damping constant. Also, non-linear seismic response analysis was carried out to evaluate the seismic resistance, and the seismic resistance results were compared with those of the newly-constructed New Saikai Bridge (Shin Saikai-bashi).

**Keyword** : 西海橋, 常時微動計測, 非線形地震応答解析

Saikai Bridge, Microtremor measurement, Nonlinear seismic response

### 1. はじめに

現行の道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編<sup>1)</sup>では、地震時に挙動が複雑になることが想定される橋に対して、設計段階で動的解析を行うことが推奨されている。上路式固定鋼アーチ橋である西海橋は昭和30年に伊ノ浦瀬戸に架設され、当時は戦後間もない時であり、近年に見る種々の解析・実験は、行えなかった。長崎大学では、西海橋の固有振動特性、非線形地震応答に関する解析<sup>2), 3)</sup>を報告したが、実験に関しては架設当時に行われた走行試験時の計測<sup>4)</sup>のみである。そこで、今回初めて常時微動計測を行い、計測値を先の研究に用いた解析モデルによる固有振動解析の解析値と比較することにより、モデル化の妥当性の検証お

よび減衰定数の推定を行う。比較に当たっては、床版のモデル化の影響を評価する。また、非線形地震応答解析を行い、耐震性を評価する。さらに、耐震性に関して、コンクリート充填鋼管をアーチリブに採用した新西海橋の結果<sup>5)</sup>と比較を行う。

### 2. 西海橋の概要と解析モデル

西海橋は、大村湾口の伊ノ浦瀬戸にかかる道路橋であり、佐世保市と西彼杵郡西彼町を結ぶ橋梁で、形式は上路式固定鋼アーチ橋である。橋長は316.20m、支間は216.00m、幅員は7.5m、橋面高は平均水面高より43.31mである(図-1, 図-2)。床版はRC床版(厚さ13cm)で、鋼材はSS400が使用されている。FEモデルはアーチリブ上下

\*博(学) 中国福州大学准教授

中国福州市工並路523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

\*\*\*長崎大学大学院学生

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

\*\*\*\*博(工) 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

\*\*\*\*\*長崎大学工学部技術職員

(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)

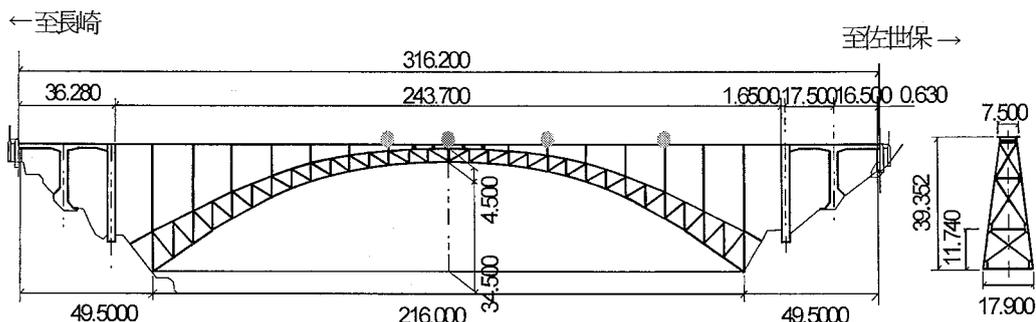


図-1 西海橋の一般図 (単位:m)

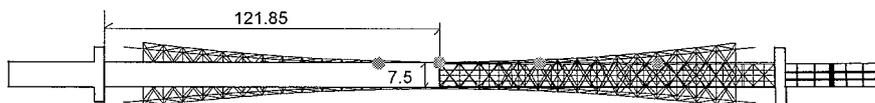


図-2 西海橋の平面図 (単位:m)

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要素を使用する (図-3)。

床版と縦桁の剛性を評価したモデルをモデルA，床版と縦桁の剛性を無視し，質量のみ考慮したモデルをモデルBとする。

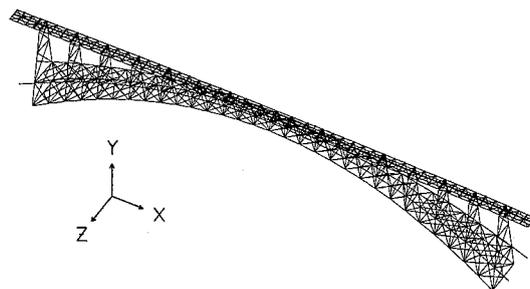


図-3 解析モデル

### 3. 解析モデルの検証

#### 3.1 常時微動計測

西海橋主橋部を対象に常時微動計測を行った。圧電型加速度計の設置位置を図-1および図-2に示す。図中に●で示す位置，すなわち支柱直上の地覆に加速度計4個を設置し，1方向4点同時計測を面内2方向と面外方向に実施した。なお，測定項目ごとに向きを変えてそれぞれ2回ずつ計測した。計測時間は655.36sec，サンプリング間隔は0.01secとした。当日の風速は佐世保測候所で3.0m/secとなっており，海上の西海橋では風が強く，また交通量が多く振動が励起される環境にあった。

#### 3.2 固有振動特性の推定

Subspace同定法を用いて固有振動数，固有振動形および減衰定数を推定する<sup>6)</sup>。また，最大エントロピー法 (MEM) によって，Subspace同定法による結果を検証した。Subspace同定法によって推定した鉛直振動の固有振動数と減衰定数を図-4および図-5に示す。MEMによって計算したパワースペクトルを図-6に示す。固有振動数の推定結果を，図-7に示す固有振動解析結果と比較する。

表-1 固有振動数および減衰定数の一覧

固有振動形	固有振動数 (Hz)			差 (%)		減衰定数	
	解析値A	解析値B	計測値	A	B		
面内	1	1.180	1.147	1.304	-9.5	-12.0	0.019
	2	1.609	1.483	1.626	-1.0	-8.8	0.006
	3	2.352	2.306	2.380	-1.2	-3.1	0.006
	4	2.898	2.639	2.983	-2.8	-11.5	0.012
面外	1	0.798	0.723	0.761	4.9	-5.0	0.008
	2	1.535	1.225	1.240	23.8	-1.2	0.032
	3	1.859	1.604	1.812	2.6	-11.5	0.027
	4	2.666	2.394	2.603	2.4	-8.0	0.007

※差 = (解析値 - 計測値) / 計測値 × 100 (%)

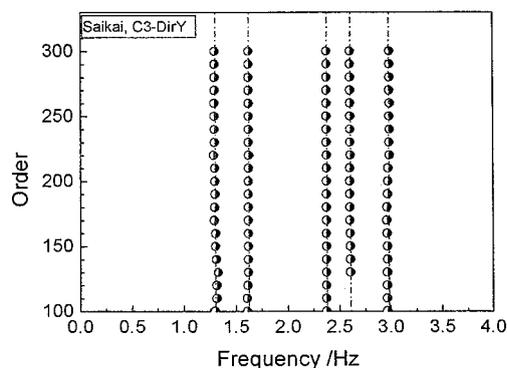


図-4 固有振動数の推定 (鉛直振動)

### 3.3 解析モデルの妥当性

表-1にモデルA, Bを用いた固有振動数の解析値A, Bと計測値, さらに解析値A, Bと計測値との差, 減衰定数を示す。鉛直方向の常時微動計測で得られた2.603Hzは面外方向の振動が卓越するため, 面外振動に分類している。固有振動数の解析値に着目すると, 床版の剛性を評価することにより, 固有振動数が高くなっており, その影響は面外振動により顕著に現れている。また, 両モデルの固有振動解析による固有振動数と計測による固有振動数の差に着目すると, 両者に大きな差は見られない。これより, 全体のモデル化は両モデル共に妥当と判断される。また, 面内振動に注目すると, モデルAがBに比べ計測値に近いが, 面外振動では, 2次振動で, 最大の差を示した。しかしながら, モデルAの差は全体的に小さくなっている。これらのことより, 本橋のモデル化に当たっては, 床版等の剛性を評価すべきと言える。ただし, モデル化に当たって, 床版を一枚のはりとしてモデル化しており, 過大に評価している可能性がある。また, 減衰定数に関しては, 0.01~0.03程度の値が得られた。支承部にゴム支承が使用されていないので, 面内方向の減衰定数が大きくないことがわかる。

### 4. 架設時の固有振動数との比較

表-2にF Eモデルによる固有振動解析結果と架設当時のエネルギー法による計算値および走行試験時の計測値を示す<sup>5)</sup>。計測値は走行荷重応答によるアーチリブのひずみの時間応答から読み取った結果である。架設当時の計算値と計測値は, F Eモデルによる解析・実験と比較してもよく一致している。

### 5. 耐震性に関する新西海橋との比較

ここでは, 実構造の再現性が高いと判断された西海橋のモデルAにアーチリブに軸力変動, 2軸曲げを自動的に考慮できるファイバー要素を用いた非線形地震応答解析の結果<sup>3)</sup>を示す。同時に, コンクリート充填鋼管をアーチリブに採用した新西海橋のアーチリブに同じくファイバー要素を用いた非線形地震応答解析結果<sup>5)</sup>を示し, 両橋の耐震性の比較を行う。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する。コンクリート材料特性は, コンクリート標準示方書モデル

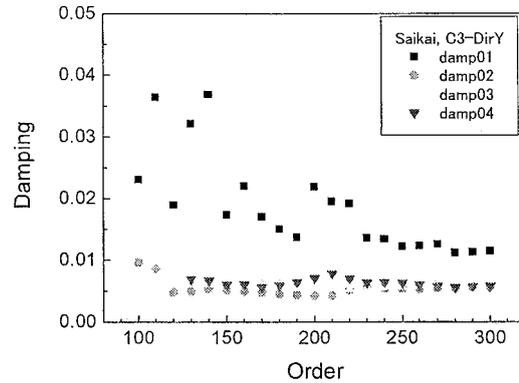


図-5 減衰定数の推定結果 (鉛直振動)

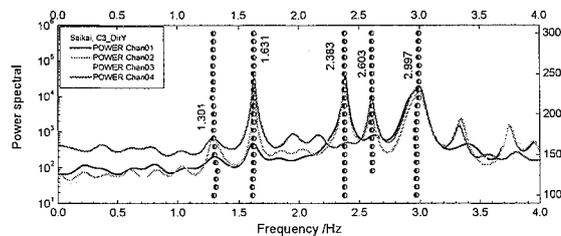


図-6 パワースペクトル (鉛直振動)

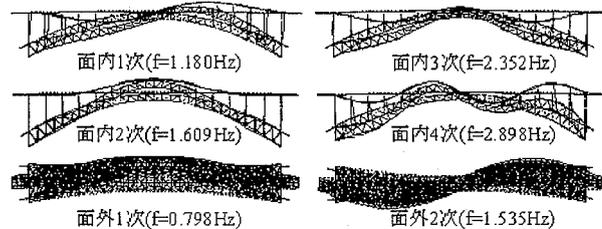


図-7 固有振動数および固有振動形

表-2 架設当時の結果との比較 (Hz)

固有振動形	FEM	架設当時		
	解析値A	計算値	計測値	
1	1.180	1.271	—	
面内	2	1.609	1.779	1.695~1.786
	3	2.352	—	2.381~2.500
	4	2.898	2.985	2.817~3.030

表-3 解析条件

地盤種	I種地盤
入力波形	タイプI, IIの標準6波形
補正係数	0.7
入力方向	面外および橋軸
積分方法	Newmark β法 (β=1/4)
時間刻み	1/400 sec
継続時間	40 sec
減衰	Rayleigh 減衰 (h <sub>2</sub> , h <sub>1</sub> =0.02)
解析ソフト	TDAPIII

とする。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。

地震応答の解析条件は両橋梁とも同じである(表-3)。図-8に T213 地震波に対する西海橋の下弦材基部、図-9に T113 地震波に対する新西海橋の外側上弦材基部における N-M<sub>Z</sub> 相関曲線を示す。なお、ここに示す両図は、部材にとって最も厳しくなった面外方向加震時の結果を選んだ。西海橋に関しては部材の降伏に至っておらず、新西海橋は鋼の降伏が見られるものの、充填コンクリートは降伏していない。以上のことから、単位長さの重量が小さい西海橋の方が地震力は小さいことから、設計当時の断面は、強地震に対してより安全であると評価できる。西海橋は耐震設計はなされていないが、十分な耐震性を有することが確認された。

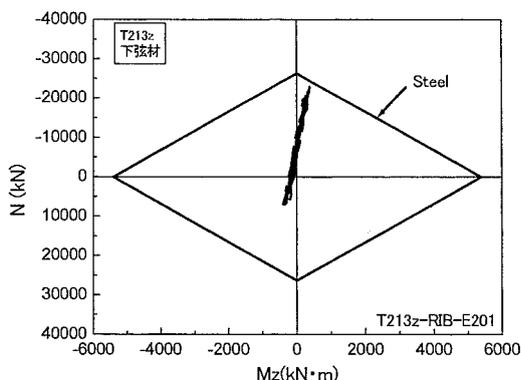


図-8 西海橋の N-M<sub>Z</sub> 相関曲線

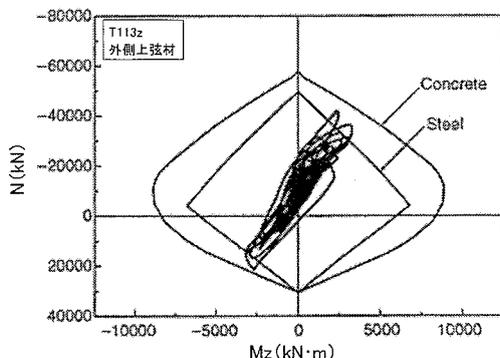


図-9 新西海橋の N-M<sub>Z</sub> 相関曲線

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 有限要素法による解析値と常時微動計測による計測値を比較すると両者が良く一致しており、西海橋の主構全体の解析モデル化は適切に

行われている。床版等の剛性の影響が固有振動数に効いてくるため、床版の影響を考慮した解析が必要である。また、減衰定数は0.01~0.03程度の値が得られた。

(2) 上部工の重量が小さいため、西海橋のアーチリブは強地震に対して安全であり、西海橋は耐震設計がなされていない設計時の断面でも、強地震に対して安全である。

西海橋の振動計測中にも大型車両の通行時に鉛直振動に加えて面外振動が発生していた。西海橋の床版厚は13cmで、現在の大型車両の通行を前提としていない。有料の新西海橋が開通しているが、西海橋は無料のために、大型車両が通行するものと想定される。日本最初の長大鋼アーチ橋は、橋の文化財としても貴重で、大型車両の通行制限等の対策が早急になされるべきである。

## 謝辞

振動計測に当たり長崎県土木部道路建設課のお世話になったことを付記する。

## 【参考文献】

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002。
- 小林， 呉， 高橋， 中村， 郭：西海橋（上路式鋼アーチ橋）の固有振動特性および耐震性に関する研究，土木学会第58回年次学術講演会講演概要集，第1部門，pp.1467-1468，2003.9。
- 向井， 呉， 高橋， 中村：西海橋の地震応答解析に及ぼすRC床版の非線形性の影響，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，第1部門，pp.591-592，2004.9。
- 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。
- Wu, Q., Yoshimura, M., Takahashi, K., Nakamura S., Nakamura, T.: Nonlinear seismic properties of Second Saikai Bridge -A concrete filled tubular (CFT) arch bridge, Engineering Structures, 28 (2), pp.163-182, 2006。
- 田中， 高橋， 中村， 宮本：鷹島肥前大橋の常時微動計測による解析モデル検証と交通振動解析，鋼構造年次論文報告集，第17巻，pp.239-246，2009。