

## 生月大橋の常時微動計測による構造解析モデルの検証

論文

### Verification of analytical model of the Ikistuki Bridge by ambient vibration measurement

○川端将太郎\* 古賀 智己\*\* 高橋 和雄\*\*\* 中村 聖三\*\*\*\* 呉 慶雄\*\*\*\*\*

Shotaro KAWABATA Tomoki KOGA Kazuo TAKAHASHI Shozo NAKAMURA Qingxion WU

**ABSTRACT** The model used for bridge analyses of the Ikitsuki Bridge which is truss bridge with long spans in Nagasaki Prefecture have yet to be validated, although the bridge have undergone natural vibration analysis and nonlinear earthquake response analysis. This study compared the measured natural frequencies of microtremors with the analytical values calculated. The study confirmed that the analysis models are appropriate, since the models produced values for the natural frequencies of these bridges that closely corresponded to the measured values.

**Keyword** : 橋梁震動, 常時微動計測, トラス橋

Bridge vibration, ambient vibration measurement, truss bridge

#### 1. はじめに

平成7年に発生した兵庫県南部地震による道路橋の被害を契機に耐震設計法は大きく改訂された<sup>1)</sup>。現在の耐震設計は、地震時の挙動が複雑な橋梁に関して動的照査法により耐震性能を照査することが一般的となっている。道路橋示方書によれば、構造解析モデルの確認を行うことが求められている。これまで生月大橋は、固有振動解析・非線形地震応答解析<sup>2)</sup>は行われているものの、解析モデルの妥当性に関しては評価されていない。生月大橋の斜材にき裂が発生していることが平成21年12月に発見され、解析モデルの検証が必要となった。そこで、本研究ではまず、生月大橋上部工のFEモデルを再検討し、固有振動解析を行い、固有振動特性を把握する。次いで、常時微動計測を行い、サブスペース同定法によって推定した固有

振動数を解析値と比較し、線形振動すなわち弾性範囲における解析モデルの妥当性を評価する。

#### 2. 生月大橋の概要

生月大橋は長崎県北西部に位置する生月島と平戸島との辰ノ瀬戸に架かる離島橋梁で、形式は3径間連続鋼トラス橋である。平成3年に供用開始された。生月大橋の側面図を図-1に、平面図を図-2に示す。中間支点上対傾構と橋門構をそれぞれ図-3, 4に示す。橋長は960mで、その内主橋梁部が800mである。主橋梁部は中央径間400m、側径間はそれぞれ200m、幅員6.5mである。中央スパン400mは連続トラス形式では世界最長である。橋脚上のトラス高は45mで主構間隔13.5mと狭く、非常に細長い橋である。このため、製作

---

* (株)東京鐵骨橋梁	(〒302-0038 茨城県取手市下高井1020番地)
** 久留米市役所	(〒830-8520 福岡県久留米市城南町15番地3号)
***工博 長崎大学名誉教授	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号)
****博(工) 長崎大学大学院教授	(〒852-8521 長崎市文教町1番14号) 第2種正会員
*****博(学) 中国福州大学教授	(中国福州市工並路523号)

に当たってブロック反転工法が採用された<sup>4)</sup>。  
また、維持管理の効率化を図るために、フッ素樹脂塗装が全面的に採用された<sup>5)</sup>。

主要鋼材は、SS400, SM520, SM570, SM490Yで、床版はI型鋼格子床版(0.16m)である。

### 3. 解析モデル

生月大橋の上部工を生月大橋設計図<sup>5)</sup>を

用いて図-5のように有限要素法によりモデル化した。床版部分の解析モデルを図-6に示す。床版の剛性を考慮するモデルを作成するにあたり、床版(厚さ0.16m)と縦桁は別々にはり要素でモデル化する。3本の縦桁のうち両端の2本の縦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本の剛な鉛直棒要素を立て、この2つの剛要素

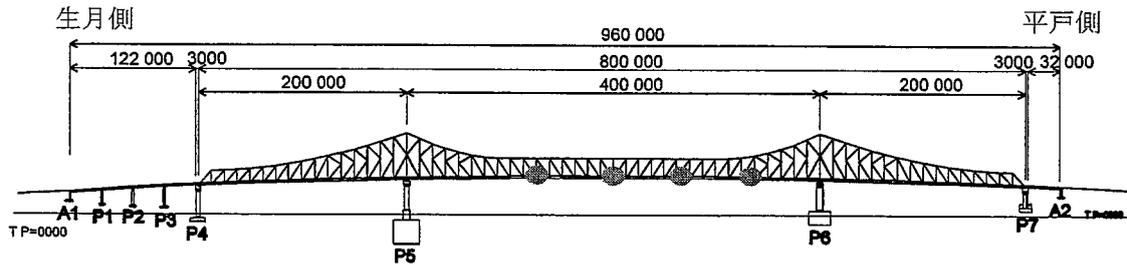


図-1 側面図 (mm)



図-2 平面図

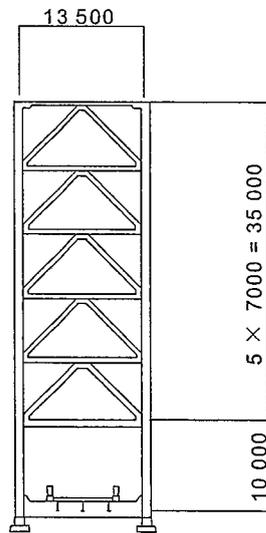


図-3 中間支点上対傾構 (mm)

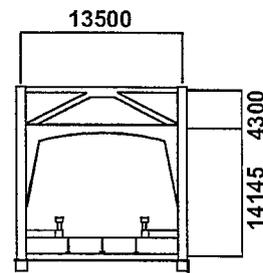


図-4 橋門構 (mm)

● : 加速度計

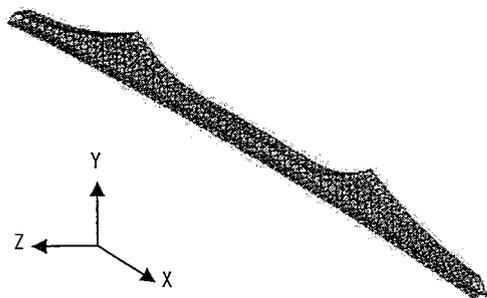


図-5 解析モデル A

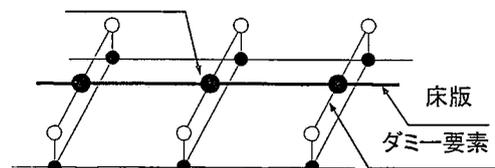


図-6 床版モデル

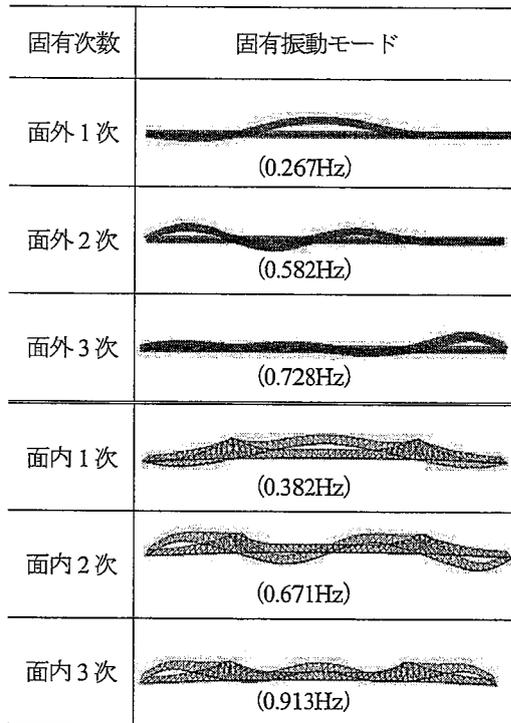


図-7 固有振動モード

上端を結ぶ剛なダミー要素を設ける。解析ソフトは TDAPⅢを用いる。各部材の断面積、断面二次モーメント、ねじれ剛性および重量を求め、全ての部材をはり要素として3次元骨組モデルを作成する。床版の剛性を評価したモデルをモデル A、床版の剛性を無視し、質量のみ考慮したモデルをモデル B とする。なお、両モデルとも下部工の橋脚の影響を考慮していない。支承は、ピンとローラーで構成され、ゴム支承は使用されていない。境界条件は鉛直方向、橋軸直角方向の変位は全ての支点で固定で、橋軸方向の変位は P6 橋脚上の支点のみが固定である。回転に関しては全支点で自由である。

解析結果の振動モードを図-7に示す。振動モードに着目すると、境界条件が P5 橋脚上支点および P6 橋脚上支点で異なるため、面外二次モードは非対称となっている。なお、生月大橋は幅員が 6.5m で、主構間隔が 13.5m と狭いため、面外振動の固有振動数が、面内振動に比べて小さい結果が得られている。

表-1 固有振動数の比較

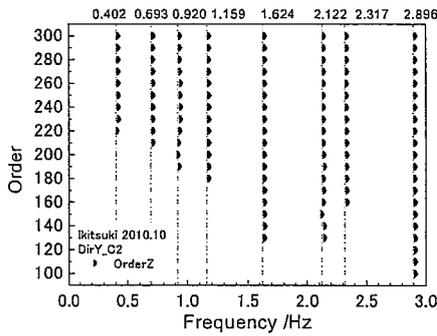
振動方向 振動次数	解析値 A (Hz)	既往研 究 (Hz)	差(%)	
面内 振動	1	0.382	0.372	2.7
	2	0.671	0.648	3.5
	3	0.913	0.878	4.0
	4	1.107	1.096	1.0
	5	1.195	1.156	3.4
	6	1.679	1.614	4.0
	7	2.183	2.083	4.8
	8	2.280	2.167	5.2
	9	2.423	2.324	4.3
	10	3.039	2.914	4.3
面外 振動	1	0.267	0.266	0.4
	2	0.582	0.577	0.9
	3	0.728	0.723	0.7
	4	0.766	0.764	0.3
	5	0.974	0.946	3.0
	6	1.223	1.212	0.9
	7	1.259	1.245	1.1
	8	1.463	1.442	1.5
	9	1.606	1.572	2.2
	10	1.716	1.691	1.5

差=((解析値 A-既往研究)/既往研究)×100

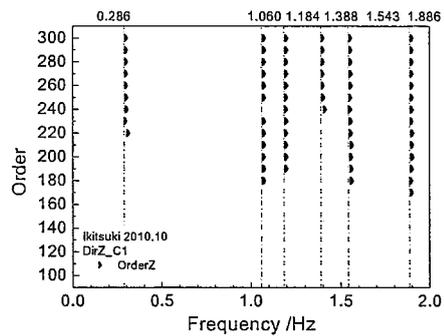
#### 4. 断面の見直し結果

平成21年12月に発見された生月大橋の斜材の損傷を受けて、長崎大学では損傷の原因究明のために、現地計測と解析による検討を開始した。解析に当たって、既往の研究室で作成した文献2)の解析モデルを設計図の部材断面を元にチェックしたところ、いくつかの部材の断面積と断面2次モーメントに差が見受けられた。今後、原因究明のための動的解析が予定されていることから、すべての断面の断面定数の再計算を実施した。

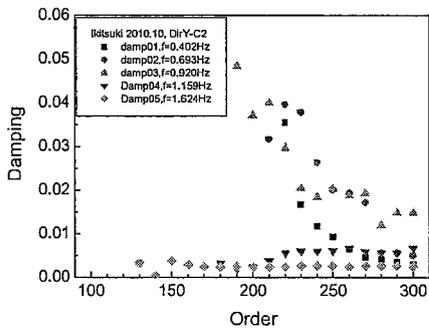
文献2)において使用した既往の断面2次モーメントと今回再計算した断面2次モーメントを比較すると、下弦材については両者が一致した。上弦材については、側径間の一部に差があった。斜材については側径間の他に主径間にも差が見られた。断面積については、斜材の断面積が既往研究よりも小さい結果となった。床版の剛性を考慮した解析モデルAについて今回の結果と既往研究の比較を表-1に示す。表に示すように面内振動については、今回の解析値が既往研究よりも最大5%程度大きい。面外振動については、最大3%程度大きい。



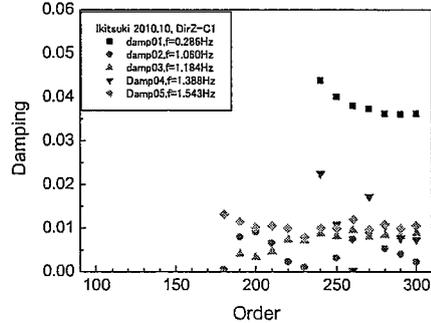
図一 8 固有振動数の推定 (鉛直振動)



図一 10 固有振動数の推定 (面外振動)



図一 9 減衰定数の推定 (鉛直振動)



図一 11 減衰定数の推定 (面外振動)

### 5. 常時微動計測

生月大橋の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一 1, 2に示す。図中に●で示す加速度計を中央点に 1 チャンネル, 66.7m ずつ平戸側に 2 チャンネル, 生月側に 1 チャンネルを設置し, 測定項目は鉛直振動, 橋軸方向振動および面外振動である。計測時間は 1048.576 秒で, 時間刻みは 0.002 秒に設定している。測定項目が変わる度に加速度計の向きを変え, それぞれ 2 回ずつ計測した。計測は, 平成 22 年 10 月 14 日午後実施した。計測時間中の平均風速は, 長崎県平戸測候所のデータによれば 2.4m/s であった。

### 6. 解析値と計測値の比較

全計測点データを用いて, 多点計測によるサブスペース同定法で推定した固有振動数の平均値を図一 8, 10に, 減衰定数の推定を図一 9, 11に示す。ここで, 図一 8, 9は鉛直振動 2 回目の結果で, 図一 10, 11は面外振動 1

表一 2 固有振動数および減衰定数の一覧

振動 次数	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	0.382	0.343	0.402	-5.0	-14.7	0.011
	2	0.671	0.596	0.693	-3.2	-14.0	0.021
	3	0.913	0.800	0.920	-0.8	-13.0	0.024
	4	1.107	0.914	1.159	-4.5	-21.0	0.005
	5	1.195	1.083	—	—	—	—
	6	1.679	1.509	1.624	3.4	-7.1	0.002
	7	2.183	1.918	2.122	2.9	-9.6	0.009
面外	1	0.267	0.237	0.286	-6.6	-17.1	0.038
	2	0.582	0.493	—	—	—	—
	3	0.728	0.582	—	—	—	—
	4	0.766	0.630	—	—	—	—
	5	0.974	0.867	1.060	-8.1	-18.2	0.005
	6	1.223	1.034	1.184	3.3	-12.7	0.007
	7	1.259	1.142	1.388	-9.3	-17.7	0.011

$$\text{差} = ((\text{解析値} - \text{計測値}) / \text{計測値}) \times 100 \quad \%$$

回目の結果である。最大エントロピー法 (MEM) によって計算した鉛直振動と面外振動のパワースペクトルを図一 12, 13に示す。サブスペース同定法による推定値が, パワースペクトルのピーク振動数に完全に一致していることから推定は適切に行われていると判断される。

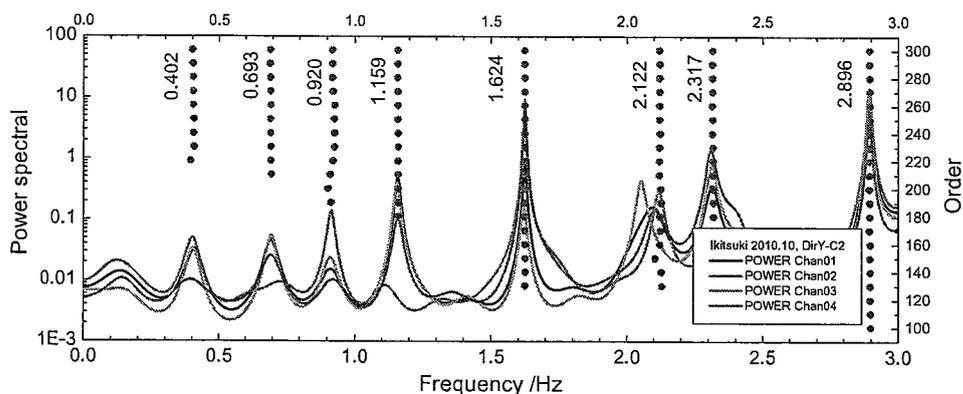


図-12 鉛直振動のパワースペクトル

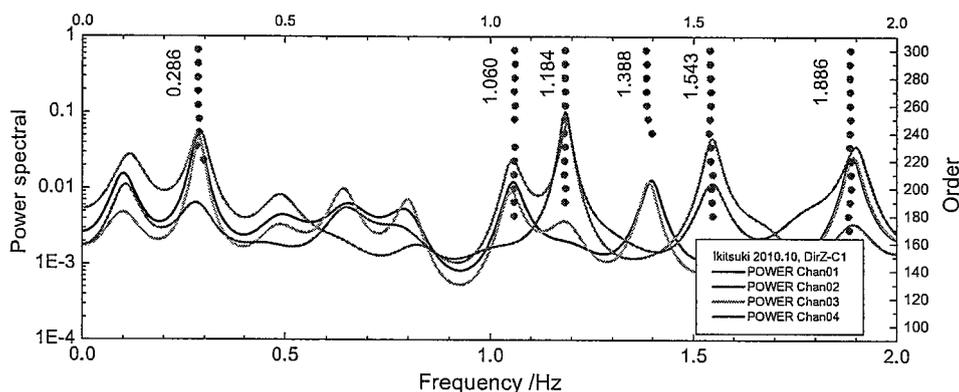


図-13 面外振動のパワースペクトル

表-2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, さらにそれぞれの解析値と計測値との差, 減衰定数の一覧を示す. 固有振動数の解析値に着目すれば, 床版の剛性を考慮したモデルAがモデルBに比べ高くなっている. また, それぞれの解析値と計測値の差に着目すれば, 面内振動・面外振動ともにモデルAが計測値と近い値となった. 特に, モデルAの面内振動については, 最大でも5%の差となった. モデルBは, 床版の剛性を考慮していないため固有振動数が小さく, 面内振動・面外振動ともに計測値との差が大きくなり, 最大21%の差が現れた. これらのことから, 本橋のモデル化においては, 床版の剛性を評価すべきと言え, 解析モデルAが妥当と判断される. 減衰定

数に関しては, 0.002~0.038であった. この大きさは, 同じ長崎県の3径間トラス橋である若松大橋と同程度である.

## 7. まとめ

本研究は, 生月大橋の構造解析モデルを検証したものである. 得られた結果をまとめると次のようになる.

(1)生月大橋の有限要素法による解析モデルを設計図面に基づいて再検討したところ, 側径間の上弦材の一部と斜材の一部に既往の研究と差異があることを確認した.

(2)今回修正した解析モデルによる固有振動数は, 既往の結果よりも, 面内振動で最大5%程度, 面外振動で最大3%程度大きい.

(3)生月大橋の常時微動計測より、面内振動と面外振動の固有振動数と減衰定数を推定できた。

(4)固有振動数の解析値と計測値を比較すると床版の剛性を考慮したモデルが、計測値とよく一致することを確認した。これより、本橋の解析モデルに当たっては床版の剛性を考慮すべきと判断される。

(5)減衰定数は、0.002～0.038であった。

以上の結果より、今回の解析によって、より正確な生月大橋の構造解析モデルを作成できた。なお、本橋の支承はピンとローラーで単純な構造なため、そのモデル化に問題は生じない。もし、境界条件が違えば、解析結果は大きく異なることになるが、今回の2解析モデルによる結果は計測値と対応している。このことから、境界条件の設定は妥当と考える。また、生月大橋の上部工の中央径間長が世界一長大かつ幅員が狭いため、面内および面内の固有振動数が小さく、下部工の固有振動数が離れていることから、吊橋の場合と同様に上部工の固有振動数に及ぼす下部工の影響は小さいことが考えられる。

また、既往の解析モデルとの固有振動数解析結果の差は最大5%程度で、その差は小さいため、前回実施した非線形地震応答解析<sup>2)</sup>をやり直す必要はないと考えられる。

#### 謝辞

最後に、生月大橋の計測の許可をいただきました長崎県田平土木事務所、長崎県平戸警察署の方々に御礼を申し上げます。また、振動計測に当たって、長崎大学永田正美技術職員および土木構造学研究室の学生諸氏の協力を得たことに感謝します。

#### 【参考文献】

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，2002
- 2) 窪田圭吾，犬束洋志，呉慶雄，高橋和雄，中村聖三：連続トラス橋（生月大橋）の固有振動および非線形地震応答特性，鋼構造年次論文報告集，第12巻，pp.1-8，2004.11
- 3) 犬束洋志，高橋和雄，川村昭宜，大山雄司，今金真一：長大トラス橋「生月大橋」の大

- ブロック制作・架設についての考察，構造工学論文集，Vol.38A，pp.1201-1212，1992
- 4) 犬束洋志，高橋和雄，川村昭宜，大山雄司：長大トラス橋生月大橋へのフッ素樹脂塗装全面採用の考察，土木学会論文集，Vol. I -28，pp.69-76，1995
  - 5) 長崎県道路公社：生月大橋工事誌，1996.2