

アーチリブの架設段階における 振動特性の測定と解析

VIBRATION MEASUREMENT AND ANALYSIS OF ARCH-RIBS

加藤雅史^{*} 田中信治^{**} 大浦 隆^{***}

By Masafumi KATO, Shinji TANAKA and Takashi OHURA

At the present time, the vibrational characteristics of bridges can be measured very accurately, and can be estimated very accurately using numerical analysis. But still, some differences in the results are recognized. Two reasons of these differences have become of major interest lately: magnitude of the exciting force in the vibration tests, and how to assume a model of the bridge including the boundary conditions. In this study, field vibration tests were conducted in order to investigate the vibrational behavior of three structural types of arch-ribs during the construction. First, the measured results by various exciting methods are compared. Second, the test results are simulated numerically by various analytical models.

1. まえがき

近年、数多くの橋梁で振動測定が行われ、計測器やデータ処理装置の発展と共に測定・データ処理技術も非常に進歩してきている。一方、橋梁振動の数値解析においても、コンピュータの発展等により比較的容易に計算が行えるようになり、相当精度良い解析が行えるようになってきている。しかしながら、実橋における振動測定結果と数値解析結果が一致しないことも多い。

このように、測定および数値解析の精度が高まってきたにもかかわらず、測定結果と数値解析結果には相変わらず差が生じている。現在この差の生じる理由として、測定時における加振力の大きさの程度（大振幅の振動か微振動か）と、その数値解析における境界（支持）条件を含めたモデル化の問題が注目されている。

本論文は、後述するようなアーチ橋架設時の3種のアーチリブ構造を対象とし、以下の事項の把握を目的として振動測定とその数値解析により検討を加えたものである。ここで対象とした3種のアーチリブ構造は、①2ヒンジ鋼管アーチ、②2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチ、③固定コンクリートアーチ、である。

- 1) 架設用部材が振動特性に及ぼす影響の把握
- 2) 微振動時の各アーチリブ構造の振動特性の把握
- 3) 各アーチリブ構造での加振方法の比較

* 工博 名古屋大学講師 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

** 名古屋大学研究生 工学部土木工学科 (〒464-01 名古屋市千種区不老町)

*** 工修 ビー・エス・コンクリート(株) 第1技術部 (〒100 東京都千代田区丸の内3-4-1)

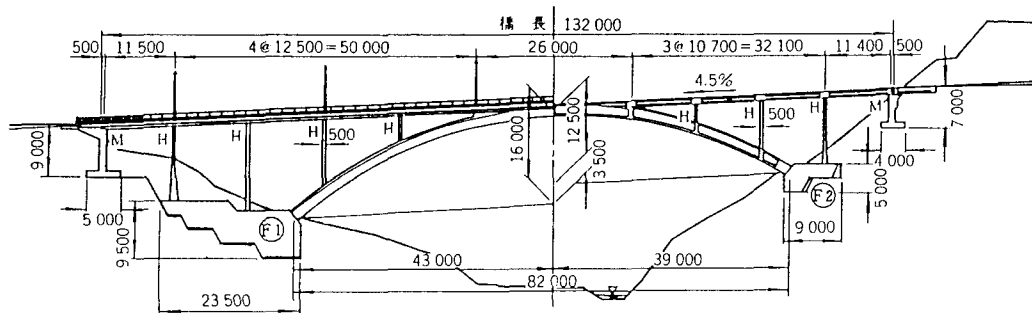


図-1 対象橋梁の一般図

2. 対象とした橋梁

本論文で対象とした橋梁は、新潟県佐渡島に合成アーチ巻立て工法（CLCA工法）によりアーチリブを架設したアーチ支間82mのRC固定アーチ橋（城址橋）である¹⁾²⁾³⁾。その一般図を図-1に示す。この合成アーチ巻立て工法とは、①まず2ヒンジ鋼管アーチを架設し、②次にこの鋼管内にコンクリートを充填して2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチ（合成アーチ）とする。③その後合成アーチを支保工材としてその周りにコンクリートを順次巻立ててアーチリブを完成させる工法である。アーチリブ断面の模式図を図-2に示す。

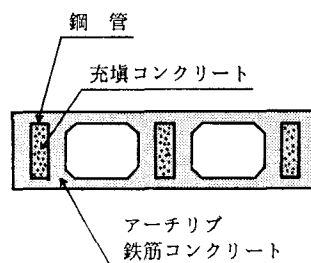


図-2 アーチリブ断面

したがって、この橋梁のアーチリブ架設においては、アーチリブの構造が架設段階とともに3種類に変化する。この1つの橋梁の3段階のアーチリブを測定・解析の対象としたわけであるが、これは同一アーチ軸線および同一支間の構造の異なる3つのアーチリブを対象としたことになる。

3. 振動測定方法

一般に橋梁の振動特性とは、固有振動数、振動モード及び構造減衰をいう。これらを測定する試験方法にはいくつかの種類があるが、それぞれに長所短所があり、試験目的および現地状況に応じて適切な方法を選択する必要がある⁴⁾。

本測定においては、面内および面外方向の固有振動数、振動モードを測定対象として、以下に示すような各施工段階が終了した時点で振動測定を行い、表-1に示すように各段階に応じて加振法を選択した。なおここで衝撃加振は、測定Aおよび測定Bでは人力により木ハンマーで打撃し、測定Cでは吊り上げた砂袋（60kg）を落下させる方法とした。また、人力加振は人がアーチリブ上を歩行することにより加振した。なお、測定においては圧電型加速度計をアーチリブ各点に設置し、加速度データをデータレコーダに記録した。

測定A……2ヒンジ鋼管アーチ（鋼管アーチ閉合時）

測定B……2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチ（充填コンクリート打設・養生終了時）

測定C……固定コンクリートアーチ（巻立てコンクリート施工終了・アーチリブ完成時）

表-1 各段階における加振法

測定	アーチリブ構造	常時微動	衝撃加振	人力加振
測定A	2ヒンジ鋼管アーチ	○	○	○
測定B	2ヒンジコンクリート 充填鋼管アーチ	○	○	○
測定C	固定コンクリートアーチ	○	○	

4. 2ヒンジ鋼管アーチの測定および解析結果

4. 1 測定結果

2ヒンジ鋼管アーチの状態は、コンクリート充填の前でアーチリブの重量も軽く、剛性も小さいため、非常に揺れやすい構造であった(写真-1参照)。このため常時微動測定においても、わずかな風によって揺れ、増幅器の感度を余り高くしなくても測定できた。

測定データはスペクトル解析によってデータ処理した。スペクトル解析結果より各データのパワースペクトル値がピークを示す卓越振動数を読み取り、それぞれの卓越振動数付近のパワースペクトルデータより、スペクトル関数を最適次数多項式で近似し、得られた多項式関数よりパワースペクトルのピーク値とその振動数を推定した。以上より各成分データごとの卓越振動数、スペクトルの大きさ、位相角等を総合的に検討し、固有振動数とその振動モードを推定した⁵⁾⁶⁾。

測定では3つの加振法を用いたが、得られた結果に加振法による違いはほとんど無く一致していた。これはアーチリブが揺れやすく、固有振動が得やすかったためと考えられる。得られた固有振動数は面内振動が1～2次、面外振動が1～3次の計5個である。測定結果を表-2に示す。

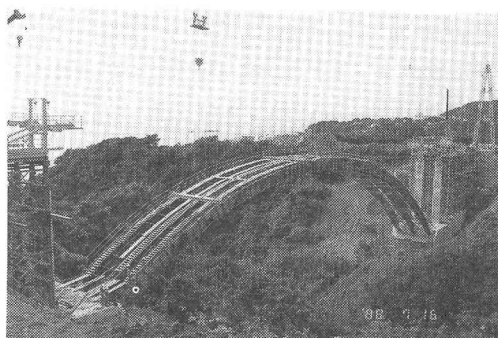
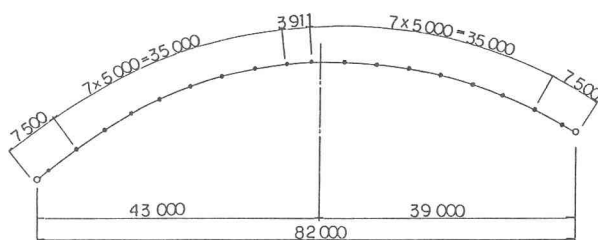


写真-1 2ヒンジ鋼管アーチの状況



== 鋼管アーチ == H型鋼 ---- $\phi 48$ mm鋼棒

図-3 2ヒンジ鋼管アーチの解析モデル

表-2 2ヒンジ鋼管アーチの実測および解析結果

4. 2 固有値解析結果

解析モデルを図-3に示すが、まず始めに構造部材のみを考えたモデルで解析を行った(解析ケースA1)。測定時の現場の状態は解析ケースA1のモデルと大きく異なっており、鋼管アーチ閉合のためのローリング用に、スパン中央付近にH-588(H型鋼588×300×12×20)が2本、スパン1/4点と3/4点とにH-400(H型鋼390×300×10×16)がそれぞれ1本ずつ架設用部材として加えられていた。そのためこれらの4本のH型鋼材を考慮に入れて解析を行った(解析ケースA2)。一般的に構造物のモデル化は難しく、構造物をより忠実に表現すれば、そのモデルはより複雑

次数	解析ケース A 1 (架設材なし)	解析ケース A 2 (架設材 H 鋼)	解析ケース A 3 (架設材 H 鋼) (仮設材 鋼棒)	実 測 結 果
1	0.425 Hz (面外 1 次)	0.689 Hz (面外 1 次)	1.378 Hz (面外 1 次)	1.34 Hz (面外 1 次)
2	1.084 Hz (面外 2 次)	1.284 Hz (面外 2 次)	1.703 Hz (面内 1 次)	1.50 Hz (面内 1 次)
3	1.851 Hz (面内 1 次)	1.774 Hz (面内 1 次)	2.583 Hz (面外 2 次)	2.64 Hz (面外 2 次)
4	2.137 Hz (面外 3 次)	2.295 Hz (面外 3 次)	3.634 Hz (面内 2 次)	3.08 Hz (面内 2 次)
5	3.536 Hz (面外 4 次)	3.499 Hz (面外 4 次)	4.376 Hz (面外 3 次)	4.00 Hz (面外 3 次)
6	4.066 Hz (面内 2 次)	3.865 Hz (面内 2 次)	6.075 Hz (面内 3 次)	

になっていく。しかしながら現場の状況と一致させるために、各節点に格子（斜め方向）状態の仮設鋼棒φ48mmを考慮にいれて解析を行った（解析ケースA3）。各解析ケースとも支持条件は、y軸（橋軸直角方向）回りの回転だけを許しその他は固定とした、通常の2ヒンジアーチとした。各解析ケースの結果を表-2にまとめて示す。

4.3 比較検討

表-2からも判別できるように、実測値と最も適合しているのは解析ケースA3である。解析ケースA1およびA2と実測値とを比較した場合、解析結果では2次の振動まで面外振動であり3次の振動で初めて面内振動が現れる。しかしながら実測では2次の固有振動として面内振動が測定された。これは解析ケースA1、A2における面外方向の剛性が実橋より小さく計算されたためと考えられる。そのため解析ケースA3においては実橋の架設状態に適合させるため、1つの部材としては、わずかな剛性しか持たない鋼棒を各節点に連結させることによって、面外方向の剛性を正しく評価できたと考えられる。また解析値の面内振動の固有振動数と実測値とでは少しずれがあるが、これは実橋において架設用の階段、手すり等あまり剛性のない部材が載っており、これらの重量を解析にうまく反映できなかったことが原因と考えられる。以上のように、解析と実測を比較検討した結果、コンクリート充填前における2ヒンジ鋼管アーチの振動性状は、架設用部材を十分考慮した理論値とよく一致しており、非対称アーチの振動特性も概ね把握できた。

5. 2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチの測定および解析結果

5.1 測定結果

充填コンクリート打設・養生終了時の2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチでは、前述の2ヒンジ鋼管アーチ（コンクリート充填前）と同一の測定点で同一の測定方法により振動測定を行った。充填前に比してアーチリブ全体の重量も大きくなり、このため常時微動測定においては増幅器の感度を充填前の約2倍に高めて測定を行った。

コンクリート充填後ではアーチリブ重量が大きく剛性も高まったため振動測定の結果は、各ケース各チャンネルにおいてかなりのばらつきがあり、同じ面内振動においても加振法が異なることによって卓越振動数が異なり、面内振動において面外振動の影響をうけているもの、またその逆のケースもあり判別しにくい状態であった。特に常時微動のデータからは無風状態であったこともあり良い結果は得られなかった。このため、衝撃加振および人力加振の測定データより振動特性を求めた。スペクトル解析結果のピーク振動数および各成分間のコヒーレンス、位相差等から判別した固有振動数は、面内振動が1～2次、面外振動が1～4次の計6個である。これを振動モードと共に表-3に示す。

5.2 コンクリートの弾性係数の算定

一般に、コンクリートの弾性係数はその品質によっても異なり、その圧縮強度の関数として表示する方法については、古くから多くの提案がなされている。今回実施した振動試験において振動時の応力レベルは微小であり、解析に用いる動弾性係数 E_d は初期弾性係数 E_i にほぼ一致すると考えられることから、コンクリートの弾性係数の算定にはCEB-FIP国際指針⁷⁾の次式を用いることとした。

$$E_i = 20665 \sqrt{f_c} \quad (1)$$

ここに、 E_i ：コンクリートの初期弾性係数（Kg/cm²）

f_c ：円柱供試体による圧縮強度（Kg/cm²）

なお、振動測定時の円柱供試体による圧縮強度は、約300 Kgf/cm²であり、コンクリートの弾性係数は式(1)より 3.5×10^5 Kgf/cm²とした。一方、鋼管コンクリート合成柱に関するこれまでの研究⁸⁾を参考にし、鋼管と充填コンクリートによる合成効果が予想されるため、コンクリートの弾性係数を約30%程度高くした値 4.5×10^5 Kgf/cm²を一部採用し、解析検討をすることとした。

5. 3 固有値解析結果

コンクリート充填後の現場の状態は、前述の2ヒンジ鋼管アーチの状態とほとんど変化はなく鋼管アーチ

内にコンクリートを充填しただけである。ここで問題となるのが、①コンクリートの剛性をどの程度評価するか、②支持条件は充填前と同じでよいか、③各節点での斜め方向の鋼棒はアーチリブ全体の剛性に影響しているか、である。これらの問題点を解決するために以下に示す4ケースの3次元固有値解析を行った。解析モデルとその座標値はコンクリート充填前と同じである。各解析ケースの結果一覧を表-3に実測値と共に示す。

解析ケースB1 鋼とコンクリートの剛性をそれぞれの断面2次モーメントの重みで換算し、架設用部材はH鋼4本と斜め方向の鋼棒を考慮した。

解析ケースB2 解析ケースB1の支持条件をすべて固定とした。

解析ケースB3 解析ケースB1においてコンクリートの剛性を約30%高くした。

解析ケースB4 解析ケースB3の支持条件をすべて固定とした。

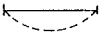
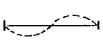
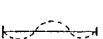
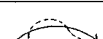
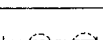
5. 4 比較検討

解析ケースB1～B4の結果について大まかに分類すると、面外方向については1次から概ね3次までは、振動数および振動モードもほぼ実測値と対応している。面内方向については、支持条件によって大きく解析値が異なり、解析ケースB2、B4のように全てを固定にした方が実測値とよく対応していることがわかる。以上のようなことは充填前には生じなかった現象であり、コンクリートを鋼管内に充填させたためアーチリブ全体の重量が増加したことに起因している。つまり言い換えると、理論上は2ヒンジアーチであってもアーチ全体の重量が増加することによって、実橋においては振動振幅が小さいために固定アーチの挙動を示すこととなる。これらのことが解析ケースB2およびB4が比較の実測値と適合している原因と考えられる。

解析ケースB2とB4の違いはコンクリートの剛性であり、どちらのケースも実測値と似かよっている。しかしながら高次の振動モードまで比較していくと、解析ケースB2においては4次の振動モードは明らかに面内2次であり、5次の振動モードは面外3次である。しかし解析ケースB4の4次と5次の振動モードは、面内振動とも面外振動とも判断できないところがある。

以上の結果、コンクリートの剛性を上げた解析ケースB4が1番よく実測値と適合しているといえよう。つまり、円柱供試体の圧縮強度から推定した弾性係数よりも、鋼管内の充填コンクリートの方が大きな弾性係数を持っていることになり、鋼管とコンクリートの合成効果が現れたものと考えられる。

表-3 2ヒンジコンクリート充填鋼管アーチの実測と解析結果

次数	解析ケース B 1 (架設材H鋼) (仮設材鋼棒)	解析ケース B 2 (ケースB1 + 両端固定)	解析ケース B 3 (ケースB1 + 剛性77%)	解析ケース B 4 (ケースB3 + 両端固定)	実 測 結 果
1	0.655 Hz (面外1次)	0.695 Hz (面外1次)	0.679 Hz (面外1次)	0.715 Hz (面外1次)	0.68 Hz (面外1次) 
2	0.659 Hz (面内1次)	1.039 Hz (面内1次)	0.733 Hz (面内1次)	1.127 Hz (面内1次)	1.14 Hz (面内1次) 
3	1.196 Hz (面外2次)	1.239 Hz (面外2次)	1.235 Hz (面外2次)	1.314 Hz (面外2次)	1.24 Hz (面外2次) 
4	1.444 Hz (面内2次)	1.761 Hz (面内2次)	1.596 Hz (面内2次)	1.879 Hz (面内2次) (面外3次)	2.13 Hz (面外3次) 
5	1.867 Hz (面外3次)	2.073 Hz (面外3次)	1.980 Hz (面外3次)	2.265 Hz (面内2次) (面外3次)	2.46 Hz (面内2次) 
6	2.635 Hz (面外4次)	2.747 Hz (面内3次)	2.802 Hz (面外4次)	2.882 Hz (面外4次)	3.32 Hz (面外4次) 

6. 固定コンクリートアーチの測定および解析結果

6. 1 測定結果

アーチリブが完成した後の現場は架設系から完成系へと変化し、3本の鋼管アーチを一体化したコンクリートアーチは人がジャンプしたぐらいではびくともしなかった(写真-2参照)。しかしながら測定当日は冬型の天候となり、日本海から吹く強い季節風もあって、常時微動測定においても測定が可能であった。一方、衝撃加振においては砂袋を落下することによって行った。基本的にはコンクリート充填前、充填後と同様であるが、今回の振動測定はアーチリブが完成した後で、構造物としては非常に剛な形式となったため、加振方法は本橋の施工用に架設されているケーブルクレーンを利用して衝撃加振を行った。すなわち、ケーブルクレーンで砂袋(60Kg)を番線を介して吊り上げ、この番線を切断して砂袋を落下させることにより、衝撃加振した。加振位置は現場の状況にあわせて、アーチクラウンとF₂側スパン1/4の地点で行った。

前回と同様の方法で固有振動数と考えられるピークの振動数とその時の概略のモード形状を求めた。アーチリブ完成時の振動測定の結果は、各ケース各チャンネルにおいてほとんどばらつきがなく、解析判定は明解であった。原因としては、構造系が架設系から完成系に変わりシンプルになったこと、現場が冬季休暇に入り他の作業がなかったこと、加振方法が適切であったことなどが考えられる。以上のような明解な測定データよりピーク振動数および各成分間のコヒーレンス、位相差等から判別した固有振動数は、面内振動が1～2次、面外振動が1～3次の計5個である。測定結果は振動モードと共に表-4に示す。

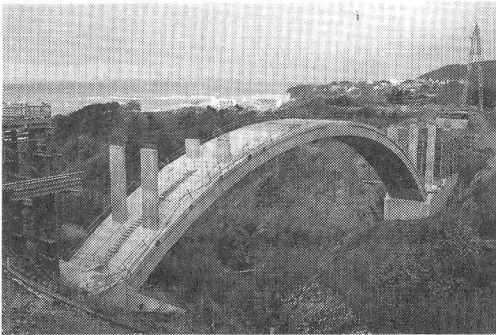


写真-2 固定コンクリートアーチの状況

6. 2 固有値解析結果

アーチリブ完成時の現場の状態は、以前とうって変わり右岸側左岸側には共に4本ずつの垂直材も完成しており、また現場の冬季休暇と重なって架設用部材もほとんど取りはらわれていた。構造系としてはシンプルであるが、3次元解析を行うにあたって

表-4 固定コンクリートアーチの実測および解析結果

次数	解析ケース C 1 (L = 82 m)	解析ケース C 2 (ケースC1 + 剛性777)	解析ケース C 3 (L = 78 m)	解析ケース C 4 (ケースC3 + 剛性777)	解析ケース C 5 (L = 82 m)	解析ケース C 6 (ケースC5 + 剛性777)	解析ケース C 7 (L = 78 m)	実 測 結 果
1	1.720Hz (面内1次)	1.951Hz (面内1次)	1.880Hz (面内1次)	2.132Hz (面内1次)	1.851Hz (面内1次)	2.106Hz (面内1次)	2.384Hz (面内1次)	2.52 Hz (面内1次)
2	2.269Hz (面外1次)	2.573Hz (面外1次)	2.549Hz (面外1次)	2.891Hz (面外1次)	—	—	—	2.87 Hz (面外1次)
3	3.109Hz (面内2次)	3.526Hz (面内2次)	3.396Hz (面内2次)	3.852Hz (面内2次)	4.045Hz (面内2次)	4.587Hz (面内2次)	5.052Hz (面内2次)	4.39 Hz (面内2次)
4	4.468Hz (面外2次)	5.067Hz (面外2次)	4.810Hz (面外2次)	5.455Hz (面外2次)	—	—	—	6.61 Hz (面外2次)
5	5.749Hz (ねじれ)	6.52 Hz (ねじれ)	6.281Hz (ねじれ)	7.123Hz (ねじれ)	—	—	—	8.24 Hz (面外3次)
6	6.655Hz (ねじれ)	7.546Hz (ねじれ)	6.897Hz (ねじれ)	7.821Hz (ねじれ)	7.952Hz (面内3次)	9.017Hz (面内3次)	10.037 Hz (面内3次)	—

はモデル化が問題となる。すなわちアーチリブの断面において上床版、下床版および横桁の剛度の判定、両端固定部付近の判断のしかた、垂直材の取り扱い等、さまざまな問題がある。まず始めにモデル化として考えられるものは、①アーチリブを1本の梁とする、②3本の鋼管アーチを横桁で結び、上下床版は各節点に荷重として解析する、③②と同じであるが、上下床版の剛度を横桁に加えて解析する、④上下床版の質量および剛性を、各節点に格子状(斜め方向)に換算し解析する。以上の4ケースのモデル化を考えて比較検討した。その結果①と④が比較的良好に一致したため④のモデルを基準としてそれ以外の問題に対応することとした。今回の振動測定の目的は、アーチリブとしての構造系の振動性状を評価しようとするものであり、垂直材の影響は考えていない。そのため垂直材は解析モデルに取り入れずその質量だけを考慮した。以上のようにいろいろ考えられる中で、2次元解析も含めて以下に示す4ケースの3次元解析と3ケースの2次元解析を行った。解析モデルを図-4に示す。各解析ケースの結果一覧を表-4にまとめて示す。

3次元解析

解析ケースC1 解析モデル④に基づき垂直材を荷重として考慮した(アーチ支間82m)。

解析ケースC2 解析ケースC1においてコンクリートの剛性を約30%高くした。

解析ケースC3 図-5のようにアーチリブの中空断面部の先端を固定端とし、解析ケースC1の支間を78mとした。

解析ケースC4 解析ケースC3においてコンクリートの剛性を約30%高くした。

2次元解析

解析ケースC5 解析ケースC1の2次元解析。

解析ケースC6 解析ケースC2の2次元解析。

解析ケースC7 解析ケースC4の2次元解析
(アーチ支間78m)。

6.3 比較検討

表-4全体からわかるように、ほとんどのケースにおいて実測値より解析値が低い値を示している。このことは一般的に、橋梁の固有振動数の実測結果は、解析結果より高くなるという傾向に一致している。しかしながら解析ケースC4の面外方向と解析ケースC7の面内方向に注目すれば、解析ケースと実測値が比較的良好に一致しており、このことは鋼管とコンクリートが合成効果を生み出したことと考えられる。一方、両端固定部付近はその構造上断面に空間がなく、すべてコンクリートで間詰めされており振動振幅が小さいために、その先の中空断面部の先端が支点となって振動したものと判断される。

解析ケースC4において面内振動が実測値と一致していない原因としては、モデル化の問題があり、これに関しては鋼管とコンクリートから成る3本の主桁間および横桁に囲まれた、上下床版の剛性評価に起因するものと思われる。この上下床版は面内、面外両方向の剛性に関与するが、今回の場合面外方向は概ね正しく評価できたが、面内方向に対しては不十分であった

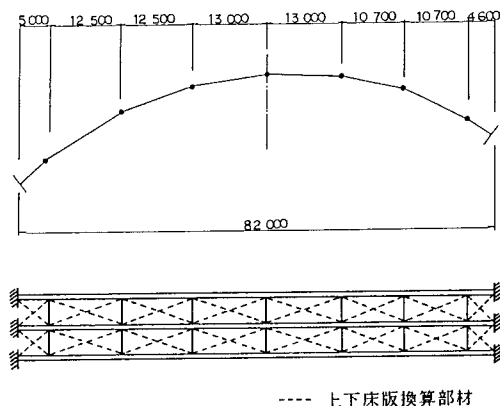


図-4 固定コンクリートアーチの解析モデル

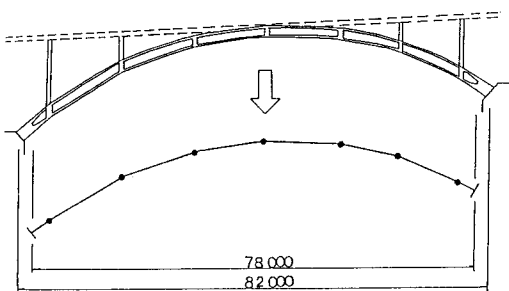


図-5 中空断面部分をスパンとした解析モデル

と思われる。また、鋼管内の充填コンクリートは無筋コンクリートであり、わずかではあるが解析値の重量より軽いことも原因の1つと考えられる。

以上のように、固有振動数に関しては解析値と実測値に多少差がみられるが、アーチリブ完成時の振動特性は概ね把握できたと考えられる。

7. 結 論

新潟県佐渡島に架けられた城址橋のアーチリブを対象として、そのアーチリブが各施工段階によって3種の構造系に変化することを利用し、各アーチリブ構造における振動測定を行った。そして、その測定結果からアーチリブの振動特性を把握すると共に、それぞれについて固有値解析を行い、実測と解析結果を比較検討することによって以下のような結論を得た。

- 1) 各構造系のアーチリブにおける振動測定の結果、面内振動に関しては1～2次、面外振動に関しては1～3又は4次の固有振動数が得られた。
- 2) 仮設用部材が振動特性に及ぼす影響は大きく、数値解析を行う際には、たとえ1本の部材ではわずかな剛性しか持たなくても、十分考慮してモデル化を行う必要がある。
- 3) 微振動時の振動特性は必ずしも設計通りの境界条件とはならない。たとえば、ヒンジ支持であっても微振動では固定支持の挙動を示すことがある。また、固定コンクリートアーチの例のように、加振力の大きさによって振動の構造系が変わることがある。
- 4) 振動測定においては、対象とする構造系の重量・剛性の大きさによって、適切な加振方法を用いる必要がある。

最後に、本測定の実施に際し御便宜を図っていただいた新潟県土木部佐藤靖氏をはじめ、御協力いただいた方々に対し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大浦・加藤・田辺・島田：コンクリートアーチ橋架設用アーチ支保工への鋼管コンクリート構造の適用に関する実験的研究、コンクリート工学、Vol.22、No.12、pp101～111、1984年12月。
- 2) 井上・佐藤・登石：剛性アーチ巻き立て工法による城址橋の計画、橋梁と基礎、Vol.22、No.2、pp27～34、1988年2月。
- 3) 佐藤・佐川・小林：合成アーチ巻き立て工法によるコンクリートアーチ橋の施工、コンクリート工学、Vol.27、No.6、pp16～27、1989年6月。
- 4) 加藤・島田：橋梁の現地振動実験法、土木学会誌、Vol.66、No.2、pp38～42、1981年2月。
- 5) 島田・加藤・山田：コンクリート構造物の老朽化と振動性状の変化、コンクリート工学、Vol.20、No.7、pp24～31、1982年7月。
- 6) 加藤：橋梁の振動調査法とその適用に関する研究、名古屋大学提出学位論文、1984年7月。
- 7) 岡田・六車：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp465～468、1981年11月。
- 8) 河井・吉川・石崎：合成柱（充填コンクリート方式）を有する鋼製橋脚の諸問題（上）（下）、橋梁と基礎、Vol.17、No2、pp42～50、No3、pp45～47、1983年2月3月。

（1989年10月 2日受付）