

鹿児島大学工学部
長崎大学工学研究科
熊本大学工学研究科

正 吉原 進
○ 学 萩 亮
水迫光広

1. はしがき 九州にはかつて建造された各種の石造アーチ橋が数多く遺されており、それらは幾多の洪水、地震等の自然災害にも生き残り、また建造時には想像もされなかった重量車両の走行に耐えているものもある。このことは、これら石造アーチ橋の静的・動的強度が相当大きいものであることを示すものであるが、近年になって損傷の程度が大きくなったものが一部にあることも報じられてはいる。同様な石造アーチ橋が今後建造されるとは考えられないが、この種構造物の振動特性がいかなる程度のものであるかを把握することは、学術上の興味が大いばかりでなく、保存策を考える上でも重要な資料となるものと考えられ、実際上の意義も大きい。

そこで今回鹿児島市内を貫流する甲突川に架かる五大石橋のうち、武之橋を測定対象として取りあげ、とりあえずその中央アーチ部において各種振動計測を行って得られた石造アーチ橋の振動特性について、以下に概略を示す。

2. 振動試験法の概要

図-1に示す武之橋は、全長72mの5連続石造アーチ橋で、

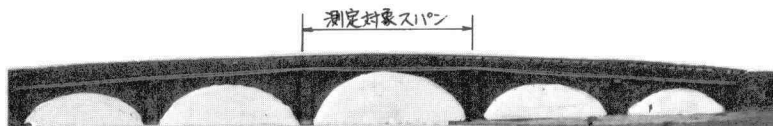


図-1. 武之橋全景図

その中央アーチのスパンは15.5m、ライズは5.5mの欠円のようなものである。図-2に中央アーチ部の一般図および測点、加振点等の配置状況を示す。

図示の如く適当なアーチ軸石に13点の測点を設け、各点で鉛直方向(図中に↓で示す)、アーチ軸直角方向(図中に↑で示す)の面内の振動を測定した。計測pick up (サーボ型加速度計、固有振動数450 Hz)が3個しかなかったため、中央測点⑦を基準点とし順次p.u.の配置を変更した。地盤上には基礎に接近した河床④と、これより下流側に20m離れた点⑤に測点を設け、鉛直方向の振動成分を測定した。

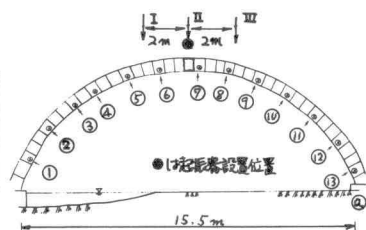


図-2. 測点、加振点等配置図

アーチ部測点へのp.u.の設置は、アーチ軸石の端面中央部に石膏を薄く塗布し、これに木片を固着し、この上に両面テープで接着するという方法で行った。この設置方法で、今回の測定には問題のないことを、別途確認している。

実施した試験は、(A)常時微動測定、(B)路面での人間の跳躍による衝撃試験および補助的に(C)起振器による加振試験の3種を行った。なおこれを以後簡単に「試験A」等と呼称する。まず試験Aは特定のノイズの少ない深夜に、各測点配置毎に1分程度の記録を1~2回とった。試験Bは、図-2に示す路面上のⅠ~Ⅲの各点で1~2人の人間が最高約1mの高さから落下したときの衝撃応答を、多数回連続的に記録した。以下例えばⅠ・2人なる表現をする。試験Cは自重が約70kgの起振器の偏心質量を既製の1/2とし、かつ偏心量を最小にしている(この状態でモーターの最大回転数は約26Hz、最大起振力は約300kg)、アーチ石に影響を与えないように長時間の過大な共振を避けるためにスウィープ試験のみを行った。なおこの起振器を路面上に直接アンカーすることができなかったため、路面上に置いた約200kgのコンクリートブロックに固定した。モーターが最大回転数に近い時は人間がこのブロック上に乗って、浮き上りを防いだ。どの試験結果でも、データレコーダーに最高速で収録し、必要に応じて適当なFilter処理を経て、シグナルプロセッサー(記憶容量4kw)にて、1成分毎に各種演算を行った。なお演算前にD.R.の各成分間の演算取込時を指定するためのパルスを録音して、各測点の解析結果の同時性を保証し、モード判定に便ならしめた。

3. 試験結果と考察

図-3(a)に試験Aによる記録例および同(b)に試験Bによる記録を $f_c=60\text{Hz}$ のL.P.フルータ処理した例を示す。(a)から両記録には大差がなく、ともに10数Hzの振動数成分が卓越すること、振幅の小さい方が更に高い振動数成分も含むことなどが読み取れる。また(b)から、人間の跳躍程度によっても石造アーチ橋は明瞭な減衰振動を行い、しかも高次振動成分も現われていることがわかる。しかしこの試験Bでは、着地状況の変化が記録に直接現われ、試験毎に幾分異なる結果になった。このような記録より、フーリエスペクトル(以下F.S.という)やパワースペクトル(以下P.S.という)を求め振動数領域での考察を行う。図-4は、試験Aの記録のF.S.で、これらによるとアーチ橋より離れた地盤⑩は13Hz強の卓越振動数を持つ、かなり良好な地盤であり、しかもアーチの振動の影響をほとんど受けていないこと、これに対しアーチ橋にはこの地盤の振動を入力として、ある種の基準振動が生じている。一方図-5はアーチ中央部付近の3測点のP.S.で、これは $f_0=17\text{Hz}$ とした狭帯域のB.P.フィルタ処理により、基準振動によると思われるピークを明瞭にして後の解析に便ならしめている。これによると、この基準振動によるピークはアーチ中央から離れるにつれて相対的に小さくなって、振幅レベルが減少することが示唆される。さらに図-6は試験Bによる記録のF.S.である。完全なパルス状の衝撃による応答のF.S.は、その系の周波数応答曲線となることは周知のところであるが、試験Bは人間の跳躍によるもので、これらの図はこのアーチ橋の周波数応答曲線と同一であるとはいえないにしても、それに類似したものであるといえよう。たしかに同各図には明瞭なピークが多数現われており、しかも振動数によってこれらのピークは適宜消長して、高次基準振動が何通りか存在していることは認められる。これらの次数を確定するには、振動モードを調べる必要がある。そこでまず図-7に、試験Aの各測点のF.S.から16.8Hzの成分のみを逆フーリエ変換して得た位相図を示す。これから測点⑦に対する各測点の位相関係を知ることができる。かくして各試験結果から、17Hz前後のピークに対応するモード図を描いたものが図-8で、このピークに対応する基準振動は1次のものと判定できる。なお高次振動についての振動モードは、今回は確定できなかったが、振動数の低いピークから順次その次数を推定し、参考のため以下の表には掲げている。表-1は固有振動数、表-2は減衰定数である。この減衰定数はi)試験AのP.S.、ii)試験Bの衝撃応答のF.S.およびiii)このF.S.の基準振動領域のみを逆フーリエ変換して得られる減衰曲線等より求めた。同表は測点⑦の結果のみから求めたもので、かつ<>内の値はiii)による結果である。また表-3に各試験での最大加速度および1次の固有振動数を用いて算出した最大変位振幅をまとめた。この結果をも参照すると、石造アーチ橋の減衰はその振幅レベルと密接に関連しており、振幅が大きくなると大きな減衰力が働く機構となっているようである。石造アーチ橋全体についての計測、高次基準振動の抽出、重量車両通行に伴う応答等は今後の課題とする。

図-3 (a) 試験Aによる記録例および同(b)に試験Bによる記録を $f_c=60\text{Hz}$ のL.P.フルータ処理した例を示す。(a)から両記録には大差がなく、ともに10数Hzの振動数成分が卓越すること、振幅の小さい方が更に高い振動数成分も含むことなどが読み取れる。また(b)から、人間の跳躍程度によっても石造アーチ橋は明瞭な減衰振動を行い、しかも高次振動成分も現われていることがわかる。しかしこの試験Bでは、着地状況の変化が記録に直接現われ、試験毎に幾分異なる結果になった。このような記録より、フーリエスペクトル(以下F.S.という)やパワースペクトル(以下P.S.という)を求め振動数領域での考察を行う。図-4は、試験Aの記録のF.S.で、これらによるとアーチ橋より離れた地盤⑩は13Hz強の卓越振動数を持つ、かなり良好な地盤であり、しかもアーチの振動の影響をほとんど受けていないこと、これに対しアーチ橋にはこの地盤の振動を入力として、ある種の基準振動が生じている。一方図-5はアーチ中央部付近の3測点のP.S.で、これは $f_0=17\text{Hz}$ とした狭帯域のB.P.フィルタ処理により、基準振動によると思われるピークを明瞭にして後の解析に便ならしめている。これによると、この基準振動によるピークはアーチ中央から離れるにつれて相対的に小さくなって、振幅レベルが減少することが示唆される。さらに図-6は試験Bによる記録のF.S.である。完全なパルス状の衝撃による応答のF.S.は、その系の周波数応答曲線となることは周知のところであるが、試験Bは人間の跳躍によるもので、これらの図はこのアーチ橋の周波数応答曲線と同一であるとはいえないにしても、それに類似したものであるといえよう。たしかに同各図には明瞭なピークが多数現われており、しかも振動数によってこれらのピークは適宜消長して、高次基準振動が何通りか存在していることは認められる。これらの次数を確定するには、振動モードを調べる必要がある。そこでまず図-7に、試験Aの各測点のF.S.から16.8Hzの成分のみを逆フーリエ変換して得た位相図を示す。これから測点⑦に対する各測点の位相関係を知ることができる。かくして各試験結果から、17Hz前後のピークに対応するモード図を描いたものが図-8で、このピークに対応する基準振動は1次のものと判定できる。なお高次振動についての振動モードは、今回は確定できなかったが、振動数の低いピークから順次その次数を推定し、参考のため以下の表には掲げている。表-1は固有振動数、表-2は減衰定数である。この減衰定数はi)試験AのP.S.、ii)試験Bの衝撃応答のF.S.およびiii)このF.S.の基準振動領域のみを逆フーリエ変換して得られる減衰曲線等より求めた。同表は測点⑦の結果のみから求めたもので、かつ<>内の値はiii)による結果である。また表-3に各試験での最大加速度および1次の固有振動数を用いて算出した最大変位振幅をまとめた。この結果をも参照すると、石造アーチ橋の減衰はその振幅レベルと密接に関連しており、振幅が大きくなると大きな減衰力が働く機構となっているようである。石造アーチ橋全体についての計測、高次基準振動の抽出、重量車両通行に伴う応答等は今後の課題とする。

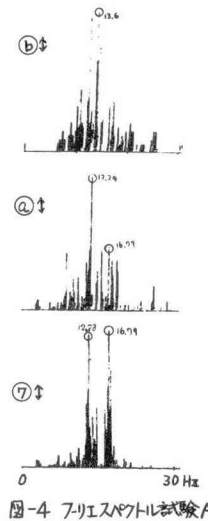


図-4 フーリエスペクトル試験A

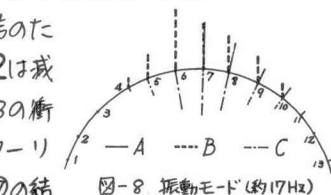


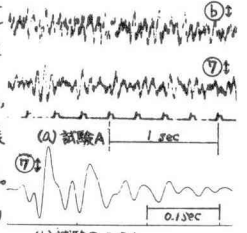
図-8 振動モード(約17Hz)

表-1. 固有振動数(Hz)

試験	1次	(2次)	(3次)
A	16.8	—	—
II-1A	17.2	—	—
I-2A	17.2	29.6	35.9
C	16.6	—	—

表-2. 減衰定数(%)のり

試験	1次	(2次)	(3次)
A	2.0	—	—
II-1A	3.4<4.2>	—	—
I-2A	7.8<5.6>4.7<4.3>	2.2	—



(b) 試験B I-2A
図-3 記録例

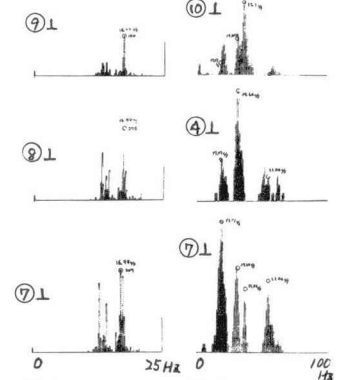


図-5 17Hzスペクトル試験A

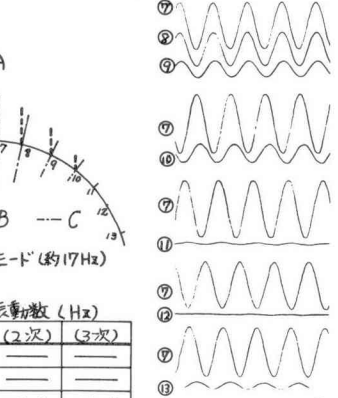


図-7 試験A 16.8Hz

表-3. 最大振幅

試験	$\times 10^{-6}g$	$\times 10^{-6}mm$
A	0.007	6
II-2A	0.2	170
C	0.3	250