

石アーチ模型の共振曲線と地震時動的挙動の実験的研究

Experimental study on the seismic behavior of stone bridges

古賀圭一郎¹・工藤祐資²・山尾敏孝³

Keiichirou Koga, Yusuke Kudo and Toshitaka Yamao

¹熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1)

Master's student, Kumamoto University, Dept. of Civil and Environmental Engineering

²㈱IHI 本社 (〒135-8710 東京都江東区豊洲3-1-豊洲IHIビル)

Engineer, IHI Corporation

³熊本大学 大学院自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪2-39-1)

Professor, Kumamoto University, Dept. of Civil and Environmental Engineering

It is not found a suitable evaluation method of soundness for damaged stone bridge with cracks, bridge gaps and falling stones though there are a lot of stone bridges in Kyushu. In order to propose the soundness evaluation method and the simply inspection method for these damaged stone bridges, it is necessary not only to develop the static and dynamic analytical method but also to become clear the mechanical behavior of the stone bridges theoretically and experimentally. The resonant vibration and the 3D dynamic response behavior of stone arch test models were investigated experimentally. From the experimental results, it was recognized the the seismic characteristic of the stone arch bridget was shown.

Key Words : stone arch bridge, 3D dynamic response behavior, resonant vibration, stone arch tst model

1. 序 論

架設から 100 年以上経過現在も当時の姿を残し、人々を対岸へと渡す役割を果たしている石橋は、人々に癒しを与え生活に溶け込んでいる。しかし一部の石橋に、石の抜け落ち、ひび割れ、ずれといった損傷が確認されており、健全度評価方法の開発や補修対策が急務となっている。九州で独自に発展を遂げ、数多くの石橋が現存しており、水路橋など今もなお重要な役割を担っているものもある。諫早眼鏡橋や通潤橋をはじめとし、多くの石橋が文化財として保護されている。このような貴重な石橋群を守り、先人たちの足跡を後世に引き継ぐことは我々の重要な責務である。

近年、劣化の著しい石橋を対象に静的・動的載荷試験により健全性の調査が行われているが、その健全性を評価する指標が存在しないため、鋼橋・コンクリート橋など既存の健全度指標を参考にした有識者独自の判断に頼らざるを得ないのが現状である。石橋の健全度評価作成のためにも、模型実験による強度特性の解明、そして静的・動的挙動が可能な数値解析手法の開発が必要となる。既往の研究により、損傷の有無による石アーチの強度への影響が少ないこと、また、自重および活荷重による石材の圧壊の可能性は低いと報告されている^{1), 2)}。石橋の力学的挙動の解析手法として有限要素法と接触・摩擦モデルを組み合わせた離散型有限要素解析手法が提案され³⁾、静的解析の妥当性については実験との比較・検討により解明されてきた。しかしながら、離散型有限要素を用いた石橋の 3次元動的解析手法の妥当性についての検討が不十分であり、石橋の地震時挙動の実験的研究も少ないようである。石橋とは石アーチの軸力の伝達により強度が発揮される構造物であり、特に地震を受けたときの軸力の変動による挙動特性を解明することが、健全性評価の指標作成のためにも必要であり、それに伴い 3次元動的解析手法の確立が必須となってくる。

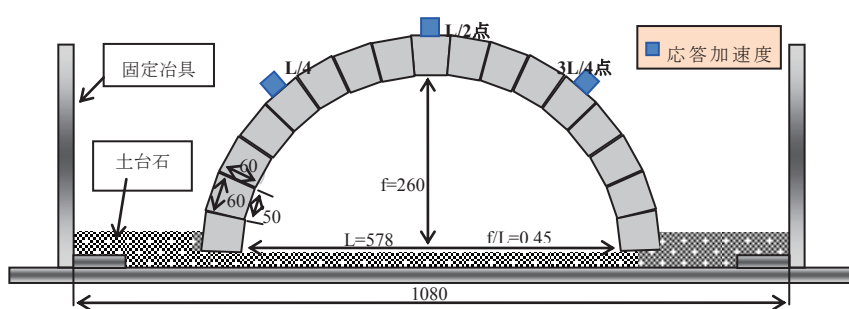
本研究では、石橋の 3次元動的挙動の解明を目的とし、まず石アーチ模型の動的載荷試験を行い、力学的挙動の実験的評価を行った。使用した石アーチ模型は実石橋挙動が再現可能な幅方向に 3列の石材を有し、

正弦波加振により模型に入力することで共振現象の有無を確認，固有振動数の算出を試みた．そして石アーチ模型に複数の地震波を入力し，応答加速度の違いについて確認を行った．解析では，実験同様の条件，方法で解析モデルの固有振動数の算出を試みた．

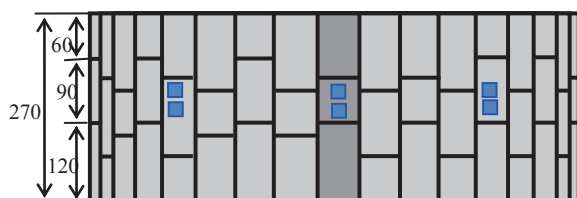
2. 石アーチ模型の動的実験

(1) 石アーチ模型

石アーチ構造の動的挙動特性を調べるために，本実験では既往の静的載荷試験で用いられてきた石アーチ模型を使用した．この模型は阿蘇溶結凝灰岩を台形に成形した部材を積み重ねたもので，石材間に接着材等は使用していない．石材表面については切断機で切り出した状態のままであり，比較的平滑である．実験により石アーチの減衰定数および，固有振動数の算出のための正弦波加振実験と地震波入力による応答加速度の測定を実施した．模型は，図 1 に示すような治具および土台石で基部を固定した 3 列×17 の石により組まれたアーチ構造である．スパンライズ比は一般的な石橋に最も多く存在する 0.4~0.5 を参考にし， $f/L=0.45$ とした²⁾．石材は，熊本県下に広く分布しており実際の石橋にも活用されている阿蘇溶結凝灰岩である．その断面形状は上辺幅 60mm，下辺幅 50mm，高さ 60mm であり，奥行きについては 60mm，90mm および 120mm の 3 種類で，これらの石材を組み合わせてアーチを形成している．応答加速度計の測定位置は図 1 に示すが，スパン L の $L/4$ 点， $L/2$ 点， $3L/4$ 点の橋幅中央の 3 箇所と振動台上の合計 4 箇所に，鉛直方向および橋軸直角方向の応答値が測定できるようにした．

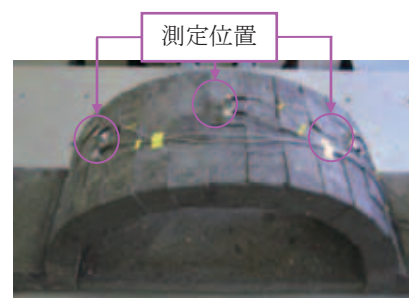


(a) 側面図

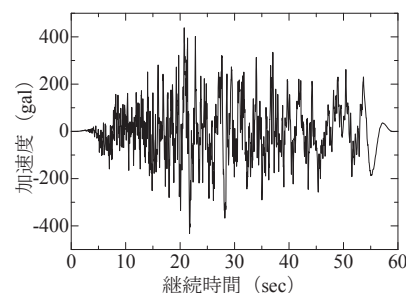


(b) 平面図

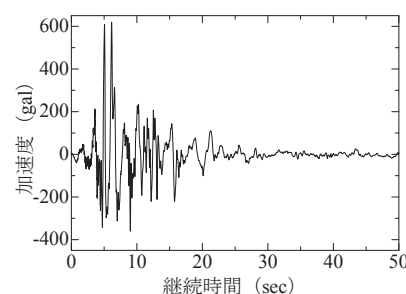
図 1 石アーチ模型および加速度計の設置位置 (単位: mm)



(c) 石アーチ模型と加速度計の設置状況



(a) Type I -III-3 「鉋路」



(b) Type II -III-3 「神戸」

図 2 入力地震波形

(2) 正弦波加振実験

対象となる模型の固有振動数を算出する手段として，正弦波加振実験を行った．これはある一定の振動数を含む正弦波の振動数を，少しずつ変えながら模型に一定の時間間隔で連続的に加振することで共振現象を起こし，最も揺れが激しくなった振動数を固有振動数と決定する方法である．加速度 20gal の正弦波を振動数 5~50Hz の範囲，20sec 間隔で 0.2Hz ずつ増加しながら模型に連続的に与え，各振動数での最大および最小の応答加速度を測定した．さらに振動数を横軸，最大および最小の応答加速度を縦軸にとり測定値をプロットすることで，振動数と応答加速度の関係性を明らかにできる共振曲線を描いた．共振

曲線から応答加速度が急激に増加しピークを迎えたときの振動数が固有振動数となる。なお、振動数の範囲については、減衰波形からフーリエ解析を行い卓越振動数を算出した結果、約 8Hz、約 17Hz、約 23Hz を示したためその値を含む範囲で決定した。

(3) 地震波入力実験

入力地震波は、波形の違いによる共振現象の発生のしやすさを考慮し、プレート境界型と内陸直下型の 2 種類で検討した。図 2 に示すように、北海道東方沖地震の釧路川堤防周辺地盤上で観測された Type I-III-3(以下釧路と示す)と、兵庫県南部地震のポートアイランド内地盤上で観測された Type II-III-3(以下神戸と示す)である。この波形の最大応答加速度を 50gal に換算し直し、さらにそれぞれを 10sec, 30sec に継続時間を短縮した合計 6 つの地震波を、鉛直方向および橋軸直角方向に入力し応答加速度を測定した。継続時間を短縮することで、卓越振動数を小さくすることが可能となり、石アーチに種々の卓越振動数をもつ地震波入力できると考えた。図 3 に入力地震波形の継続時間を短縮した場合の卓越振動数の違いについて示した。

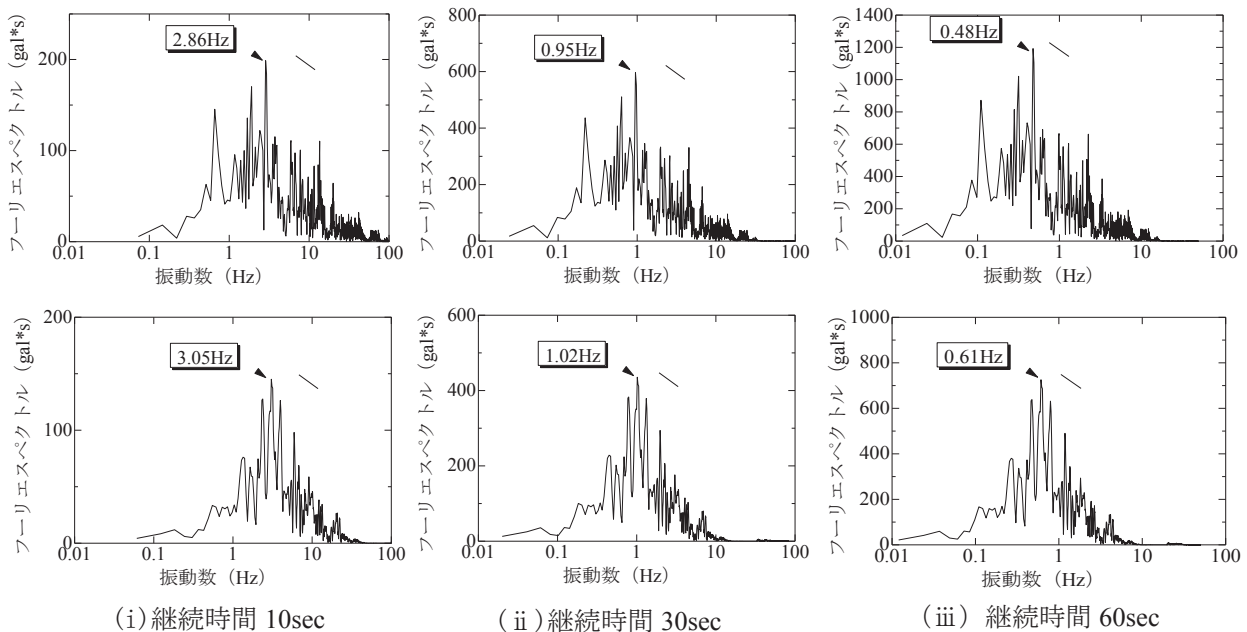


図 3 地震波形のフーリエスペクトル（上段：釧路地震波，下段：神戸地震波）

(4) 正弦波加振解析

正弦波加振実験の結果の妥当性を、浅井ら³⁾が既に開発している市販の汎用解析ソフト MSC.Marc⁴⁾を援用した離散型有限要素解析法により共振点の推定を試みた。実験モデルの解析モデルに正弦波を入力し、その最大および最小応答加速度を出力して共振曲線を求め、固有振動数の算出を行った。図 4 は正弦波加振のイメージで、表 1 は石材の物性値である。まず、自重を入力しアーチモデルが安定させ、実験値結果を参考にして決定した振動数を有する正弦波を入力し応答値を出力する。これを各振動数で繰返し、鉛直方向および橋軸直角方向それぞれの共振曲線を描くためのプロット点を作成した。振動数が高くなるほど入力するデータが多くなるため、解析時間の短縮のために継続時間は、実験時の 20sec ではなく 4sec で行った。なお、継続時間の短縮による解析結果への影響がほぼ無いことは、継続時間 20sec でも数値解析を行い事前に検討した。また収束計算法としては Newton-Raphson 法を使用した。

表 1 石材の物性値

ヤング率 E (N/mm ²)	17,140
ポアソン比 ν	0.16
圧縮強度 (N/mm ²)	62.6
密度 ρ (ton/m ³)	2.03
動摩擦係数 μ'	0.65
すべり発生変位 U_s (mm)	0.3

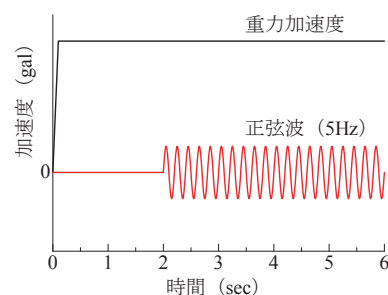


図 4 正弦波入力のイメージ

3. 実験結果と考察

(1) 減衰定数

実験はまず、減衰定数の算出に必要な減衰波形を測定した。測定方法は、ある測定点近くを指先で衝撃を与え、そのときの各点の応答である、図 4 に示すような減衰波形を測定する。これを各点で繰り返し行い、減衰定数の算出に必要な波形を複数得た。この波形を算定式 (1)、(2) に適応することで減衰定数を算出することができる⁵⁾。

$$\text{対数減衰率 } \delta \quad \delta_{1,4} = \frac{1}{3} \log_e \frac{Y_1}{Y_4} \quad \delta_{n,n+1} = \log_e \frac{Y_n}{Y_{n+1}} \quad (1)$$

$$\text{減衰定数 } h \quad h_{1,4} = \frac{\delta_{1,4}}{2\pi} \quad h_{n,n+1} = \frac{\delta_{n,n+1}}{2\pi} \quad (2)$$

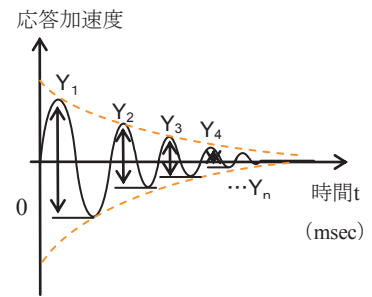


図5 減衰波形

測定した波形より減衰定数 h を算出し、その平均値を示したのが表 2 である。石アーチのみの平均減衰定数 h は 0.055 前後であり、これは表 2 に示す道路橋示方書⁵⁾の各構造要素の等価減衰定数と比較しても大きな値を示した。壁石を有する場合の平均減衰定数 h は石アーチのみの場合と比較し、約 0.02~0.03 大きくなり、コンクリート下部構造物に匹敵する減衰力であることが分かった。

表 2 各構造要素の等価減衰定数との比較

	鋼	コンクリート	石アーチ
上部構造	0.02~0.03	0.03~0.05	0.055
ゴム支承	0.02		
下部構造	0.03~0.05	0.05~0.1	
基礎構造	0.1~0.3		

(2) 正弦波加振実験

図 6 は実験と数値解析で得られた鉛直方向加振時の応答加速度の比較を示したものである。実線が実験値、プロット点は解析値である。解析値は L/2 点においてのみははっきりとしたピーク値が算出されたが、L/4 点、3L/4 点ではピーク値の出方が顕著ではなかった。実験値と比較してみると、23Hz の第一のピーク値が概ね対応した。しかし第二のピークである 39Hz あたりではピーク値が出ることはなく、以降応答加速度が収束する結果となった。第二のピークが出なかった理由としては、解析ではモデルへの正弦波の入力が連続的でなく、各振動数ごとに処理されたことが原因ではないかと考えられる。実験では、5~45Hz の振動数を一貫して連続的に入力し測定したため、アーチ模型が常に変形を起こし、違う構造特性を有することで複数のピークが測定できたと考えられる。しかしながら、解析では、1つの振動数の解析が終了した後にモデル形状を初期状態に戻さなければならないので、ピーク値が1つしか得られなかった可能性がある。この推論が正しいかどうかを確認するためには、振動数を 0.2Hz 刻みの 20sec 間隔で連続的に入力して解析する必要があるが、実験や解析からも分かるとおり石橋の有する第一の固有振動数が、地震波が有する卓越振動数よりもはるかに大きいため、石橋が実際に地震波を受けた場合、共振現象を起こす可能性は低いといえる。よって今回の解析手法でも、固有振動数を算出し、共振現象の有無を分析することにより十分可能であるといえる。

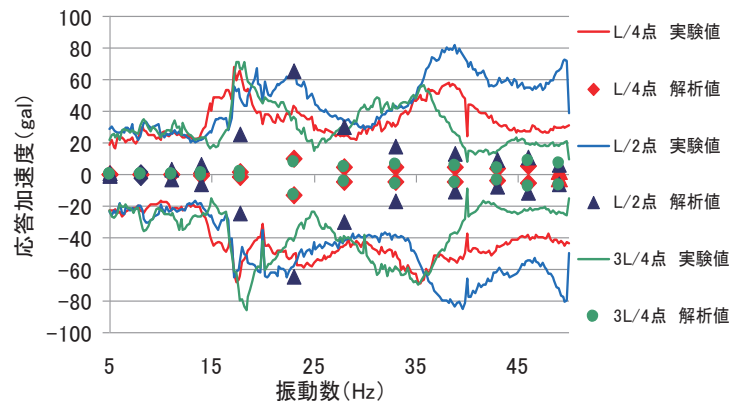


図 6 応答加速度の比較 (鉛直方向加振)

(3) 地震波入力実験

① 鉛直方向

図 7 に釧路地震波を鉛直方向に入力した結果を示す。継続時間を 10sec と 30sec にした場合について比較すると、継続時間が 10sec の方が大きな揺れが生じていることがわかる。これは、継続時間が 10sec の入力地震波の方が固有振動数に近い成分を多く含んでいるということが裏付けられた。また、各波形のフーリエ

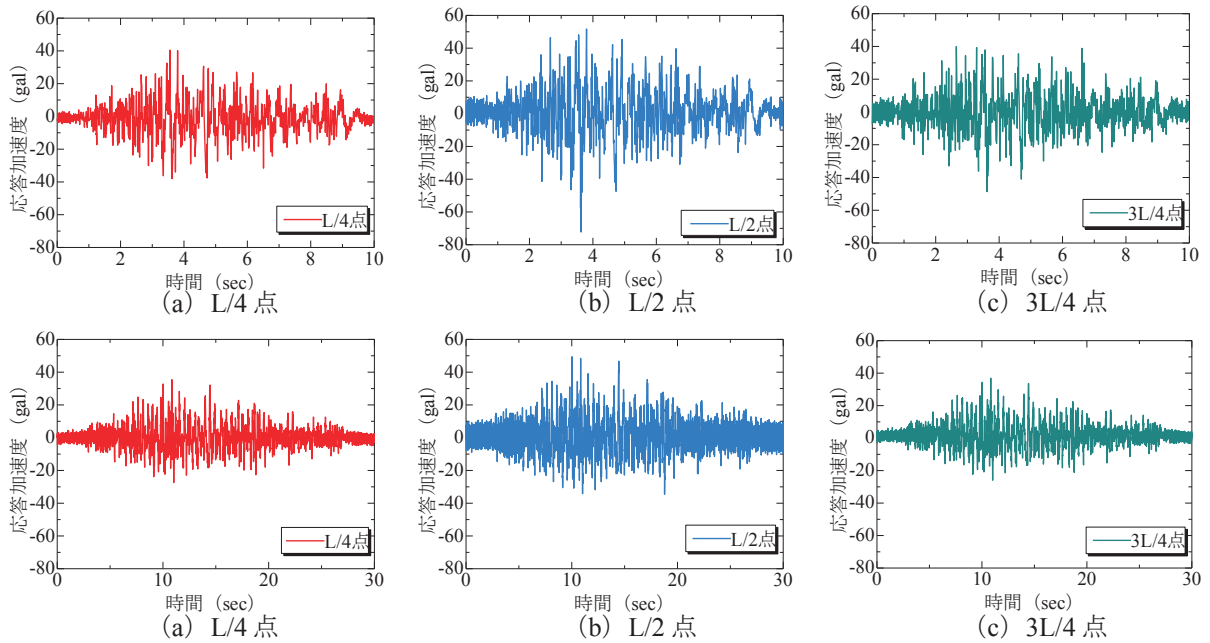


図7 釧路地震波による鉛直応答加速度（継続時間 上段：10sec,下段：30sec）

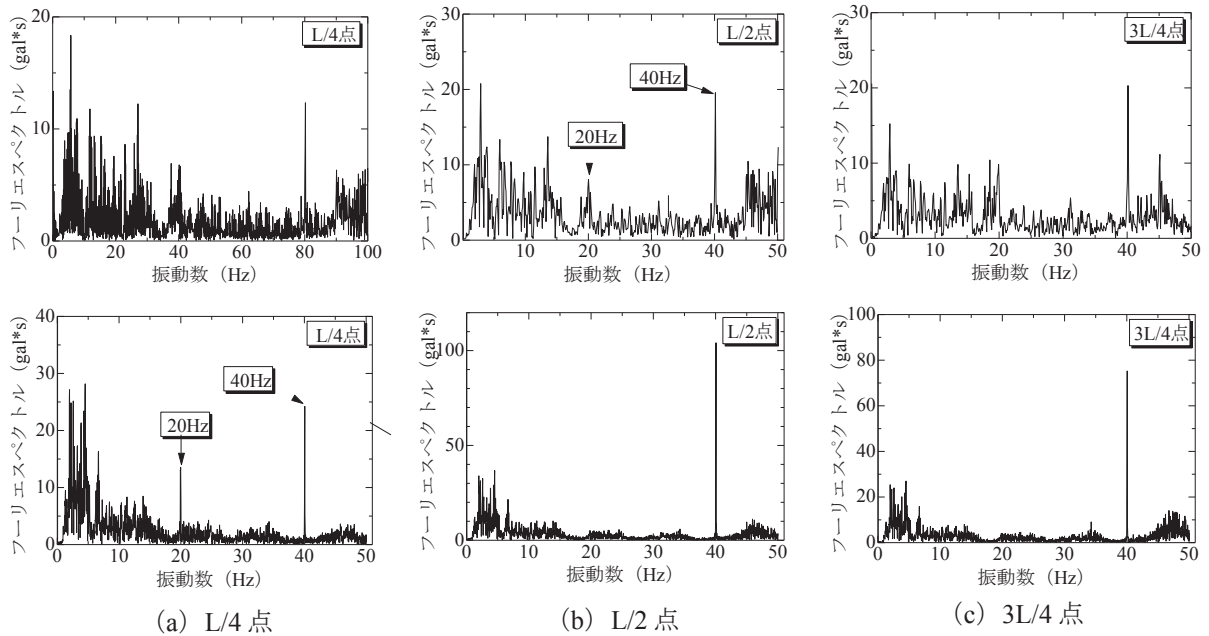


図8 フーリエスペクトル（継続時間 上段：10sec,下段：30sec）

スペクトルの算出結果を図8に示しているが、約20Hzと約40Hzでピーク値を迎える傾向が見られた。20Hz点は、図6の共振曲線において3L/4点のピーク値17.8HzとL/2点のピーク値23Hzのおよそ中間を取る値である。正弦波加振実験においても石アーチが連続的な変形を起こさなければ、共振点は20Hzであったかもしれないため、固有振動数は23Hzでなく20Hzとなる可能性がフーリエスペクトル結果から考えられる。また、40Hzは共振曲線でも38.8Hzにピーク値を示しており、ほぼ一致するため、これは正確な固有振動数であると言える。

神戸地震波を入力した結果とフーリエスペクトルの結果を図9および図10にそれぞれ示す。継続時間が10secに比べて30secの方が応答加速度が大きいのは、30secの地震波が含む40Hz時のフーリエスペクトルの値が10sec時よりも大きいからと考えられる。全てのフーリエスペクトルで40Hz時にピークを迎えており、釧路地震波のフーリエスペクトルと併せて40Hzに固有の振動数が存在すると言える。

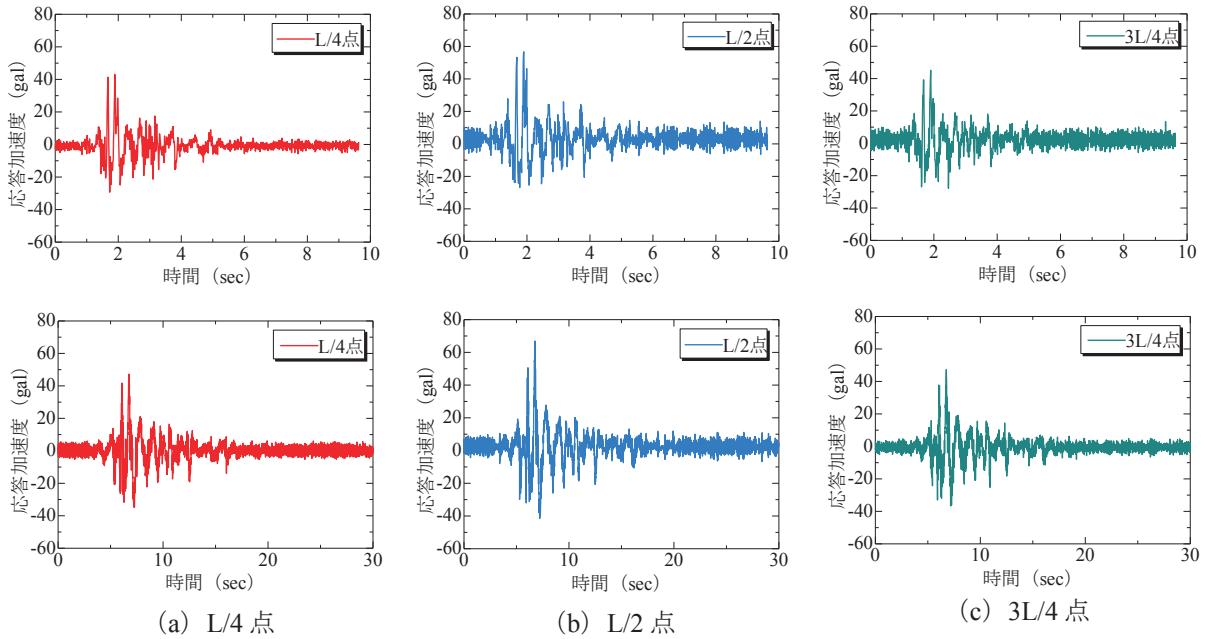


図9 神戸地震波による鉛直応答加速度（継続時間 上段：10sec,下段：30sec）

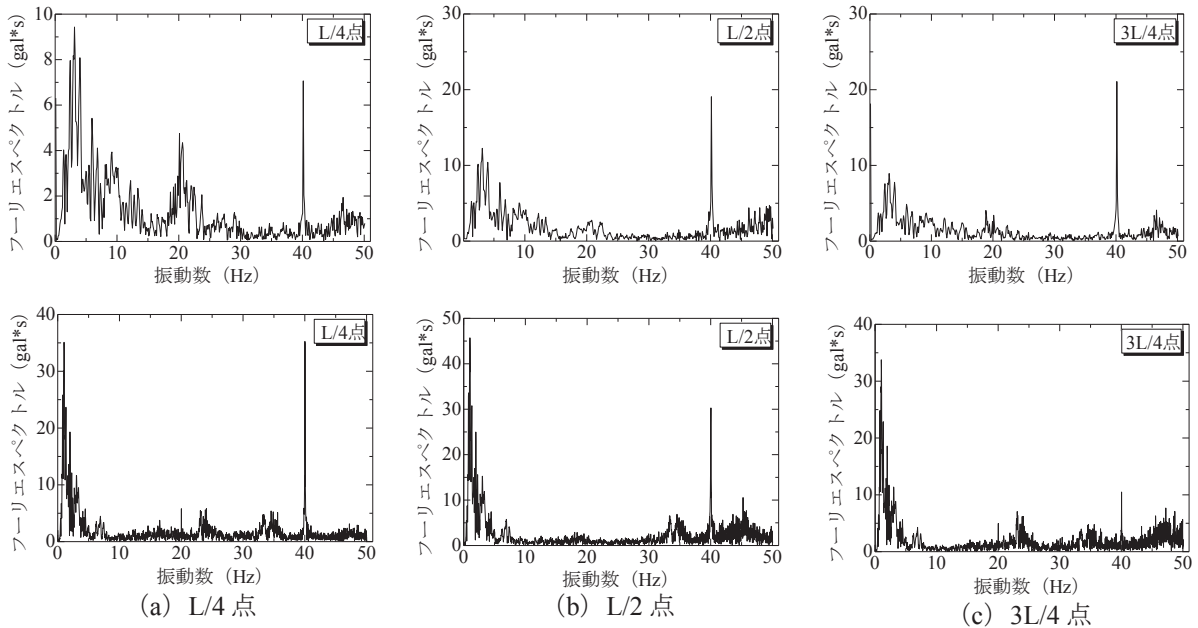


図10 フーリエスペクトル（継続時間 上段：10sec,下段：30sec）

②橋軸直角方向

図11および図12に釧路地震波を橋軸直角方向に入力した応答加速度、フーリエスペクトル結果を示す。継続時間が10secについてみると入力加速度が50galに対して約90galの応答加速度が生じており、鉛直方向入力時よりも20~40gal程大きな値が測定された。石アーチのみの構造では軸力が十分に伝わらないため、継続時間の短い地震波に対しては加速度の急激な変化に抵抗できずに大きな慣性力が働き応答速度が大きくなったと考えられる。橋軸直角方向の共振曲線から29Hzの振動数で共振点として確認されており、さらに継続時間10secの入力地震波に含まれていることは確認できたが、地震波応答値のフーリエスペクトルからはその卓越する振動数を確認することはできなかった。この理由もやはり、地震波により大きな力を受け模型の形状が変化し、固有振動数もそれに応じて変化した可能性が高いと考えられる。

図13に示す、神戸地震波を入力した応答加速度およびフーリエスペクトル結果においても、釧路地震波を入力した場合の結果と同様のことが言え、卓越振動数の把握はできなかった。そこで、振動台の加速度計

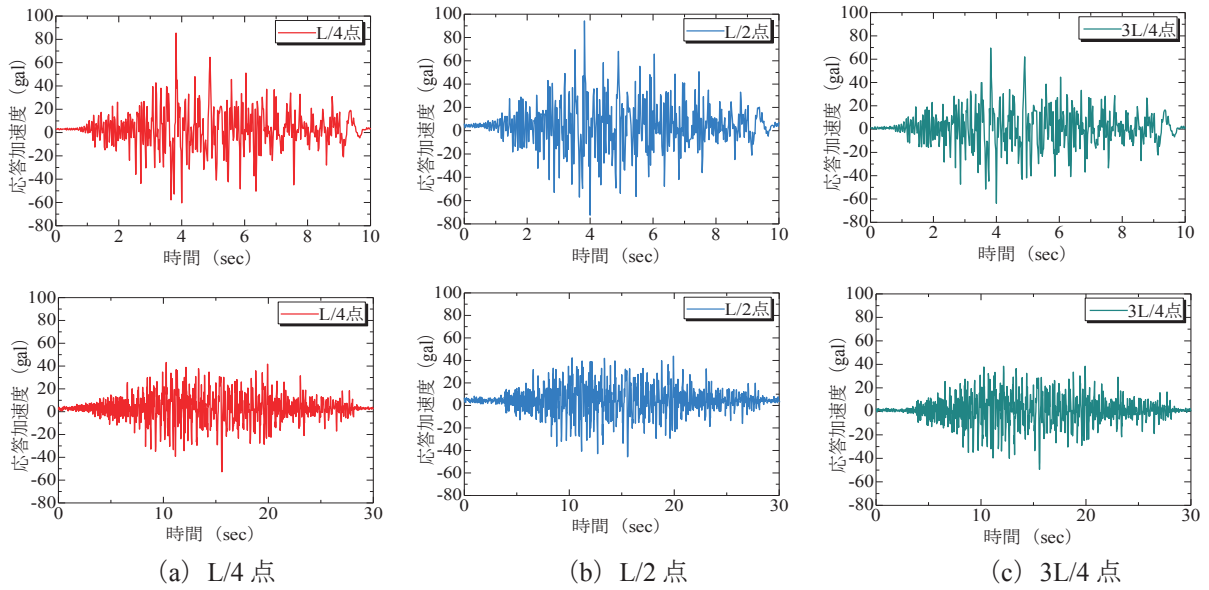


図 11 鉏路地震波による橋軸直角応答加速度 (継続時間 上段: 10sec, 下段: 30sec)

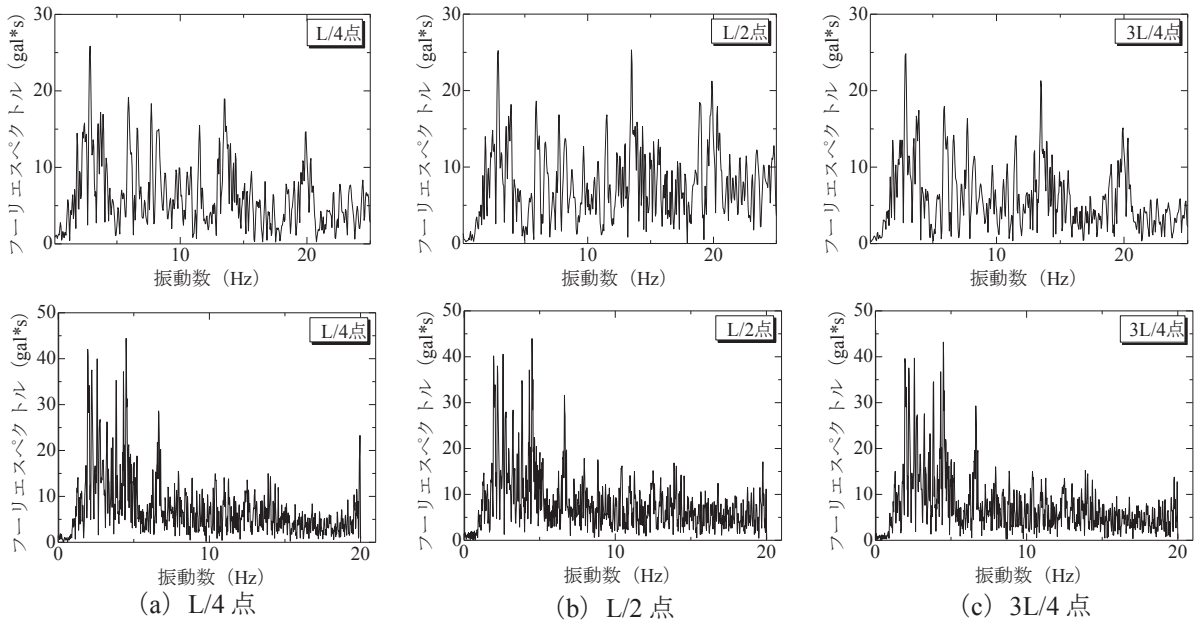


図 12 フーリエスペクトル (継続時間 上段: 10sec, 下段: 30sec)

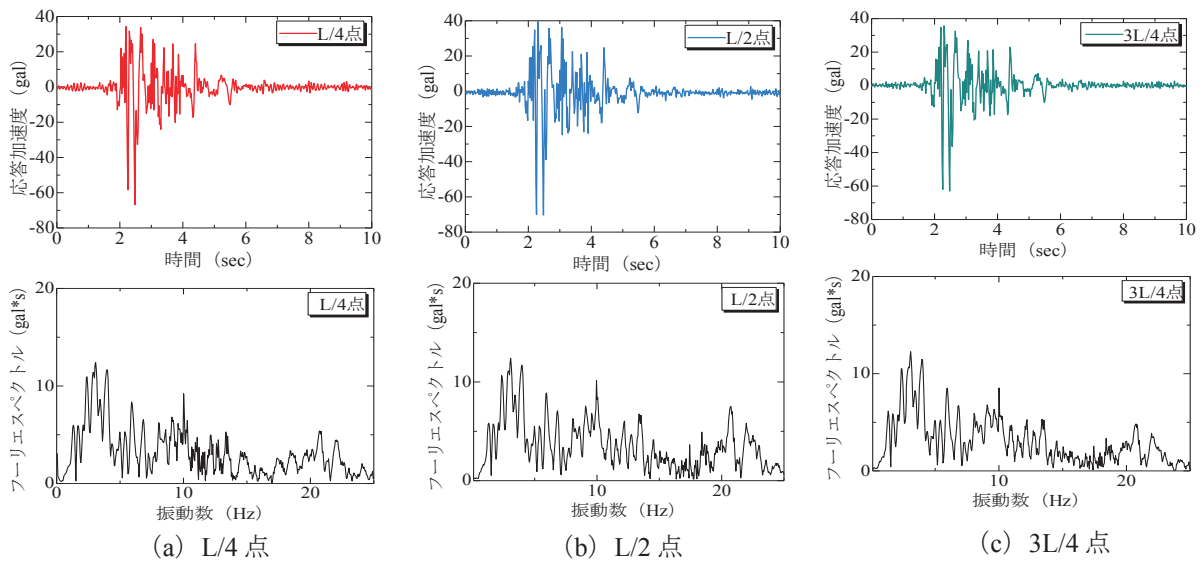


図 13 神戸地震波による応答加速度およびフーリエスペクトル (継続時間 10sec, 橋軸直角方向加振)

で測定した応答加速度のフーリエスペクトルを入力フーリエスペクトル、L/4点、L/2点、3L/4点で測定した応答加速度のフーリエスペクトルを出力フーリエスペクトルとして、出力値を入力値で除することで伝達関数を求め、固有振動数の算出を試みた。図14に入出力フーリエスペクトルの一例を示すが、値は処理プログラムにより平滑化した。出力フーリエスペクトルを入力フーリエスペクトルで除した結果が図15である。この結果から15.7Hzおよび23Hzに固有振動数が存在する可能性が高いことが分かったが、共振曲線で表れた共振点は約29Hzであり大きく異なっていた。橋軸直角方向加振における共振曲線、地震波入力応答値結果が妥当であるかを検討するため、今後実験を繰り返し行うことで結果の信頼性を向上させる必要があると考えられる。しかし、石アーチ構造において、正弦波加振は鉛直方向の固有振動数の把握に有効な手段であること、地震波入力では鉛直方向よりも橋軸直角方向の方が激しく揺れるということがこの実験で確認された。

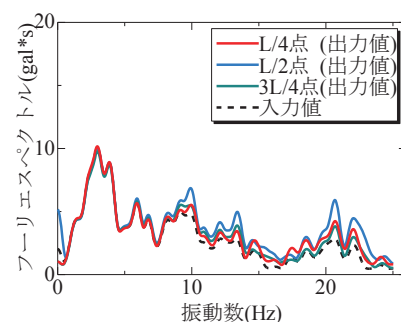


図14 入出力フーリエスペクトル (神戸地震波 10sec, 橋軸直角方向加振)

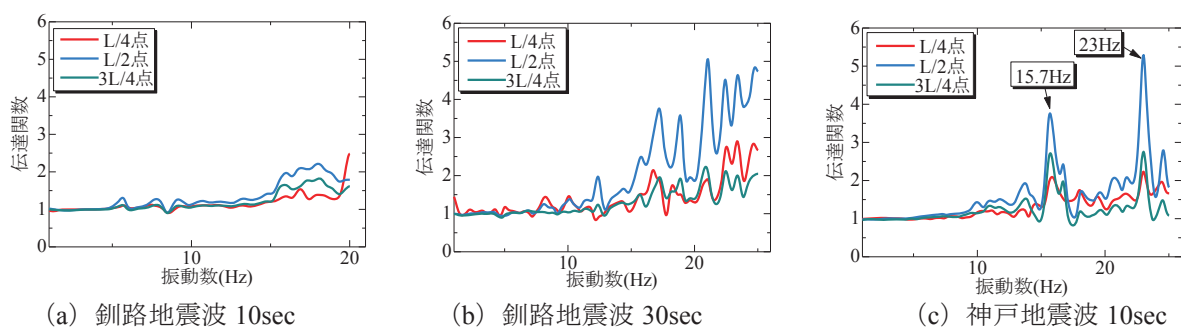


図15 伝達関数 (橋軸直角方向加振)

4. 結論

本論文では、石アーチ模型を対象に動的载荷実験を行い、その挙動特性に関する考察・検討を行った。以下に得られた主な結論を述べる。

- (1) 石アーチ模型の減衰定数は、減衰定数算定実験により鋼構造、コンクリート構造の減衰定数よりも比較的高く、地震に対し高い減衰効果を有していることを確認した。
- (2) 石アーチ模型の正弦波加振実験において、鉛直方向加振をした際、第一の共振点に至る直前で応答加速度が一度下がり、その後共振点が見られるという特徴が見られた。これは、振動を受けたアーチが連続的に微小変形起こしており、ピークを迎える直前で大きく変形し、より安定した構造を有して固有振動数が変化したからと考えられる。
- (3) 石アーチモデルの正弦波加振解析は、鉛直方向の揺れにおいて最初の共振点の実験値とよく対応した。

今後は、本実験と同様の条件の下で地震時挙動の数値解析を実施し、より精度が高く、再現性の高い解析手法を確立することが可能となり、石橋の健全度評価のために必要と思われる。

参考文献

- 1) 山尾敏孝, 山本健次郎, 小石剛之, 工藤輝彦: 損傷を有する石造アーチ橋の力学的挙動特性の検討, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.23-33, 2009.3
- 2) 工藤輝彦: 石橋の3次元静的・動的挙動解析手法の開発に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科, 平成20年度修士論文, 2009.
- 3) 浅井光輝: 離散型有限要素モデルによる石造アーチ橋の静的・動的強度評価, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.172-180, 2009.
- 4) エムエスシーソフトウェア(株): MSC.Marc 2003 日本語オンラインマニュアル, 2003.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V耐震設計編), 2002.