

長大スパンを想定した石アーチ模型の動的挙動特性の検討

八千代エンジニアリング 小倉 孟 熊本大学大学院 フェロー会員 山尾 敏孝
熊本大学大学院 学生会員 林野 将大, 金子 和明

1. はじめに

九州には数多くの石橋が現存し、現在でも歩道橋や車道橋として使用されている。石橋の健全度評価法として、目視調査や車両載荷試験で行われているが、時間やコストがかかるのが現状である¹⁾。健全度評価方法として数値解析法による耐力や耐震検討が行えればより簡便な方法と思える。著者らは、解析手法の開発を目指し、模型による静的・動的試験を実施してきた。既往の研究では、スパンが20m程度の石橋を想定した石アーチ模型が扱われてきた。そこで本研究では、さらに大きなスパンを想定した石アーチ模型を作製し、動的試験を行った。試験結果や既往の模型の結果との比較により解析手法の妥当性や問題点、試験で用いた治具が結果に及ぼす影響について検討したものである。

2. 模型試験の概要

石アーチ模型の寸法は、30m以上の長大スパンの石橋を想定し、既存の模型と同じスパンにしたため輪石の大きさを小さくし、分割数を多くした。図1は製作した模型で、形状寸法はスパン $L=900\text{mm}$ 、ライズ $f=180\text{mm}$ (スパンライズ比 $f/L=0.2$)、アーチ輪石全幅 270mm とし、橋軸方向に33列とし、アーチ輪石を全幅方向3個の石材で構成した。輪石石材の厚さ寸法は 45mm で、石材長は 60mm , 90mm , 120mm の3種類とし、図1(b)のように石材組合わせて配置した。本模型は分割が多いため石材の勾配が小さくなり、模型の自重のみでは自立できなかった。そこで写真1に示すような壁石を想定した鋼板治具を作成し、模型を安定させた状態でアーチ基部に加振する方法を試みた。既往の研究で用いた $f/L=0.2$ の模型の結果との比較を通し、治具の影響を検討した。なお、治具とアーチ輪石模型の間には、模型を自立させ、治具の力を全体に伝えるためゴムを挟んだ。

3. 解析の概要

既往の研究で開発された接触モデルと摩擦モデルを導入した解析手法²⁾により正弦波加振解析を行い、応答加速度やスペクトル解析の結果と測定値との対応を調べた。解析対象は模型試験に用いた模型をモデル化した。解析モデルは2次元連続体要素で作成し、基部の底面と側面には剛なはり要素と接触させ、はりを介して外力を作用させた。個々の石材の要素分割数は、解析時間や解の精度等を検討した結果、 4×4 分割とした。図-3には解析モデルの形状を図示しているが、鋼板治具は1つの連続体と考え、2次元連続体要素とした。石材の材料特性は表1のように既往の材料試験で得られた結果を参考に決定した²⁾。なお、輪石のみでは自重で崩壊することを解析でも確認している。

正弦波解析は、解析モデルに正弦波を入力し、その最大応答加速度により共振曲線を求め、固有振動数を算出した。

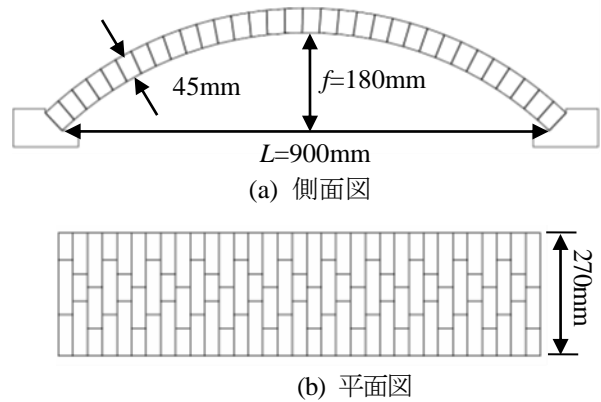


図1 石アーチ模型図面

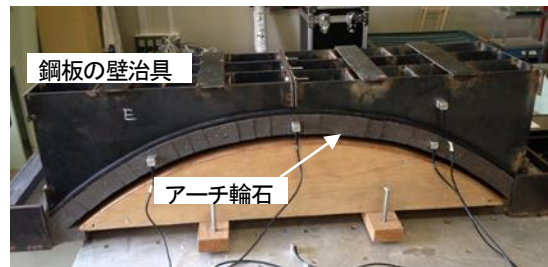


写真1 アーチ輪石模型と鋼板壁治具の様子

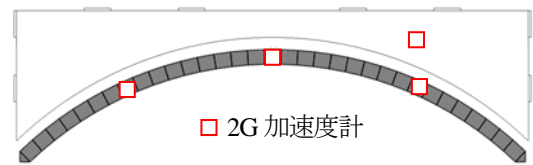


図2 加速度計の設置位置

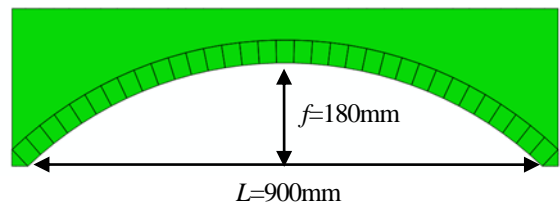


図3 解析モデル

表1 材料特性

	輪石石材	鋼板治具
ヤング係数 E (N/mm ²)	11500	205000
ポアソン比 ν	0.21	0.3
密度 ρ (g/cm ³)	1.74	1.89
動摩擦係数 μ	0.726	
すべり発生変位 U_s	0.36	

入力正弦波は、試験と同様に加速度振幅50galの波を作成し、5~45Hzの振動数範囲とし1Hz刻みで振動数を上昇させ

キーワード 接触モデル, 摩擦モデル, 動的解析, 動的挙動, 鋼板治具, 正弦波
連絡先(〒860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2-39-1 TEL 096-344-2111)

入力した。各振動数の継続時間は、既往の研究³⁾を参考にし、時間コストを考慮して3秒とした。なお、2次元モデルのため加振方向は橋軸方向のみとした。解析では汎用有限要素法解析プログラムABAQUS⁴⁾を用いた。

4. 解析と測定結果との比較及び考察

図4には石アーチ模型に、橋軸方向へ正弦波加振した時の測定値と解析値の各振動数の最大応答加速度 (Acc) を、振動台で計測した加速度 (Acc₀) で除することにより無次元化した共振曲線を示した。測定値を見ると、20~23Hz で応答が大きくなり、その後急激に減少していることから、この大きなスパン模型の橋軸方向の共振点は 20Hz から 23Hz の間にあることがわかる。共振点を迎え応答が急激に減少した後、さらに振動数が大きくなるにつれて再び応答が大きくなり、30Hz 付近で急激に応答が大きくなっていることから、30Hz 付近にも共振点が存在していると推測される。解析値を見ると、治具が輪石よりも振動が大きいため分かる。しかし、ピークを迎える振動数は非常に良く似ており、解析上では輪石と治具は一体となって動いている。解析値は、間隙量 $c_0=0.02\text{mm}$ 、接触圧 $p_0=1.132\text{N/mm}^2$ として得られた結果であり、図4によると解析値は測定値よりも小さい 15~20Hz の辺りでピークを迎えている。また、解析モデルのピークは、3点とも応答倍率が同程度であるが、測定値は L/4 点と 3L/4 点で応答が異なる。解析モデルは全石材がずれることなく常に加振でき、試験では試験回数が増えるごとに石材同士のずれが生じていた可能性がある。このため、L/4 点と 3L/4 点の差はこの模型の精度によるものであると考えられる。解析値は1つ目のピーク後急激に小さくなるが、輪石は再び緩やかに上昇を続け、治具は1つ目のピーク後、緩やかに応答が小さくなり大きくなることはなかった。この理由については今後の検討である。しかし、測定値では若干応答の大きさは異なるものの、ピークを迎える振動数はおおそ対応しており、治具を用いることによって試験結果に及ぼす影響は小さいと考える。

図5には、既往の研究で用いたスパンが小さい石橋の場合の模型の加振試験結果と解析結果を比較したもので、加振の入力方向は同じで、同じ試験台である。図からわかるように模型の橋軸方向の共振点は 13Hz となっており、今回の模型試験の結果より小さくなっていることがわかる。これは、模型のスパンサイズは同じであるが、想定スパンの差が影響したと考えられるが今後詳細に検討する必要が有る。

図6には、解析において治具の重量を変化させて L/4 点の応答倍率を比較した結果を示した。図より、治具の重量が大きくなると応答が小さくなり、ピークを迎える振動数が小さくなることが分かった。つまり、鋼板治具の重量がアーチ輪石の剛性を高め、揺れを抑えていることが確認できる。また、卓越振動数は13~16Hzの間に収まっており、特に大きな影響は見られなかった。ちなみに、治具の重量を変化させても L/4 点以外の箇所の卓越振動数がずれるというような現象は起きず、L/4 点、L/2 点、3L/4 点とも同じような傾向が見られ、治具は同じ振動数で大きい応答が得られた。しかし、実際の壁石の影響については、2次元から3次元モデルへ拡張するなどして、さらに詳細な検討が必要と

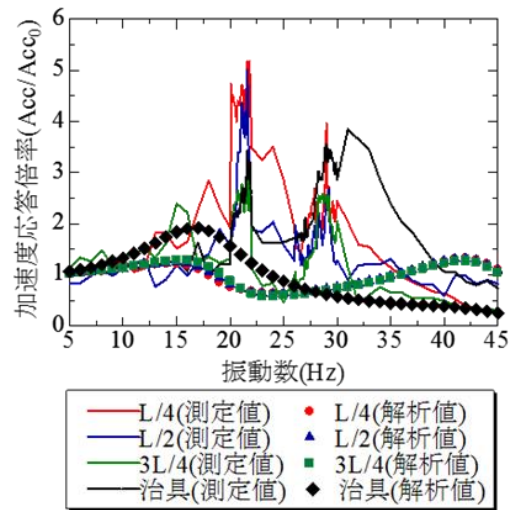


図4 本模型の共振曲線の解析値と測定値の比較

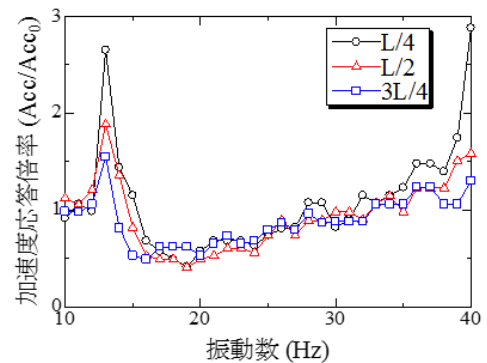


図5 既往のアーチ輪石のみ模型の共振曲線の結果

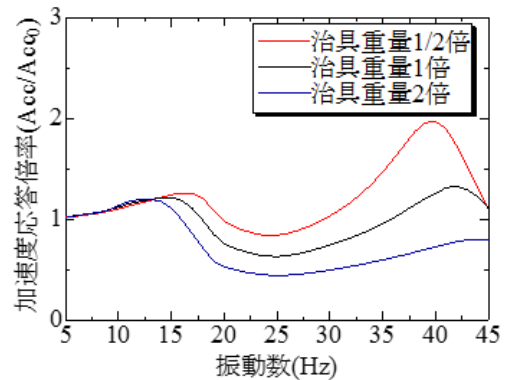


図6 治具重量を変化させた際の L/4 点の応答倍率

思われる。

参考文献

- 1) 工藤輝彦, 他3名: 3列組石アーチの挙動特性に及ぼす損傷形態の影響について, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), I-465, pp.829-830, 2008.
- 2) 藤田千尋, 他3名: 石橋に用いられる石材の材料特性とすべり挙動の解析手法の検討, 土木構造・材料論文集, 第28号, 2012.
- 3) 藤田千尋: 石造アーチ橋の模型実験および動的解析による地震時挙動の検討, 平成25年度熊本大学修士論文, 2014.
- 4) Dassault Systèmes Simulia Corp, ABAQUS Analysis User's Manual Version 6.11, 2011.