

石材間摩擦に着目した石アーチの動的解析手法の検討

熊本大学大学院 学生会員 ○古賀 圭一郎 熊本大学大学院 フェロー 山尾 敏孝
 熊本大学大学院 正会員 葛西 昭 九州産業大学工学部 正会員 水田 洋司
 熊本大学工学部 学生会員 藤田 千尋

1. はじめに

近年、経年劣化による石橋の損傷が顕著であり、特にアーチを構成する輪石には石材の割れや抜け落ち、幅方向への隙間等が、壁石には孕みや隙間等が報告されるようになってきている。このような背景から損傷を有する石橋について適切に健全度を評価することが望まれている。石橋の力学挙動を解明するために離散型有限要素法を用いた手法によって静的・動的挙動の解明が行われてきているが、特に動的挙動に関しては解の精度や妥当性について十分な検討が行われていない^{1),2)}。そこで本研究では、石材間の摩擦を考慮した石アーチ模型解析手法を提案する。そして石アーチ模型を用いた振動台加振実験と有限要素法を用いた動的解析結果により解析手法の検討を行った。

2. 実験概要

図1に示す石アーチ模型は実石橋でも広く用いられる溶結凝灰岩で作成し、材料特性はヤング係数 $E=17140(\text{N/mm}^2)$ ポアソン比 $\nu=0.16$ 、密度 $\rho=2.16(\text{g/cm}^3)$ 、動摩擦係数 $\mu=0.65$ である。図1の振動台と治具は固定されており、その上に石アーチ模型を設置している。石アーチを構成する石材は自重による摩擦力によって安定している。L/4, L/2, 3L/4の各点にはひずみゲージ式加速度計を設置し感度方向はアーチ法線方向とした。同時に振動台上にも感度方向を鉛直方向として1点設置した。実験は正弦波加振実験と地震波加振実験を行った。正弦波加振実験では、石アーチの周波数特性を把握するために振幅 20gal の正弦波を 10Hz~40Hz の振動数範囲で 0.2Hz ごとに振動数を不連続に変化させて加振するした。1 振動数あたりの継続時間は 20sec とし、その範囲に石アーチの固有振動数が存在すれば共振を確認できる。地震波加振実験では、1995 年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 EW 成分の波と、1994 年北海道東方沖地震の釧路川堤防周辺地盤上の波の両方について最大加速度を 50gal に換算したものを使用した。兵庫県南部地震に関しては継続時間を 10sec ごとに 10~50sec に圧縮したものを、釧路地震波についても同様に 10sec ごとに 10~60sec にしたものを合計 11 波を鉛直方向に加振した。

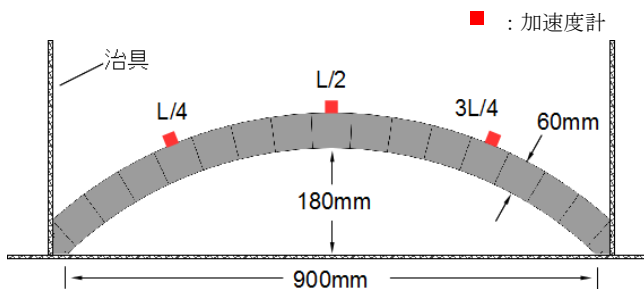


図1 石アーチ模型と治具

3. 解析概要

石アーチは石材間の摩擦によって安定している離散体構造であるため、石材間の接触面での挙動が支配的である。そこで有限要素法による数値解析において要素間に接触モデルと摩擦モデルを導入して実験値との比較を行った。アーチ部分の要素は2次元連続体要素で基部の底面と側面には剛なはり要素と接触させ、はり要素を介して外力として波を作用させる。個々の石材は4×4でメッシュ分割を行い要素の物性値は実験で用いたものと同じとした。作用外力として正弦波(10Hz~40Hz, 継続時間 3sec で 1Hz ずつ上昇)と振動台上で計測した 11 波の地震波を作用させた。

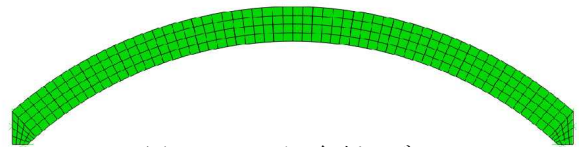


図2 石アーチの解析モデル

要素と要素の接触では接触面で貫入が発生しないことが重要であるが、厳密に貫入量がないとして計算すると膨大な繰り返し計算が必要となる上、実橋となると多数の接触面を有するため現実的ではない。そこで貫入(間隙)量と接触圧の関係を指数関数で定義する接触モデルを導入した。³⁾図3に示すこのモデルは接触前に接触圧が発生する間隙量 c_0 と間隙量が 0 の時の接触圧 p_0 を式(1),(2)に適用したものである。接触圧 p_0 はモデルに重力加速度が作用したときに発生する最大接触圧の 1/5 倍とし、間隙量 c_0 は任意に変化させて解析を行った。また、実現に近い摩擦現象を導入するために固着状態とすべり状態の二段階で表現するバイリニア型の摩擦モデルを使用した。このモデルの特徴は、ある有限のすべり量 U_s において固着状態をすべり状態に変化させ、静摩擦係数とこのすべり発生変位 U_s によって摩擦挙動を表す。実験から $U_s=0.36\text{mm}$ と静摩擦係数 $\mu=0.65$ の値を得たのでこの値としている。また静摩擦係数と動摩擦係数は同じ値として扱っている。

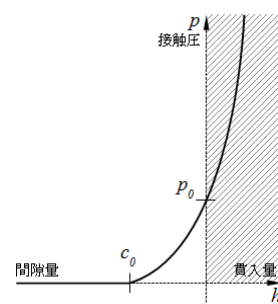


図3 指数関数則を用いた接触モデル

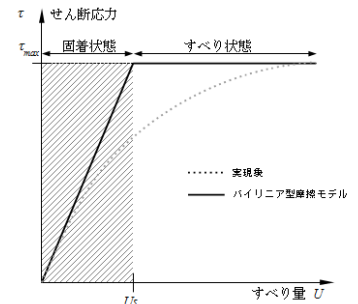


図4 バイリニア型摩擦モデル

$$p=0 \quad \text{for } h \leq -c_0 \quad (1)$$

$$p = \frac{p_0}{(\exp(1)-1)} \left[\left(\frac{h}{c_0} + 1 \right) \left(\exp\left(\frac{h}{c_0} + 1 \right) - 1 \right) \right] \quad \text{for } h \geq -c_0 \quad (2)$$

4. 結果と考察

図5は石アーチ模型に正弦波加振した時の実験値と解析値の結果を無次元化して示した。実験値のL/2点において振動数が大きくなるにつれ徐々に応答も大きくなり、31.6Hzでピークを迎えた後急激に減少していることから31.6Hzが共振点であることが推察される。また、3L/4点では18.2Hzで2倍近い応答が確認できるが、L/4点では逆に小さくなった。L/4, 3/4点ともに変化が急激であり、アーチの左右で応答が異なるモードが低振動数で現れることは考えにくく、この模型特有の挙動と思われる。解析値は $c_0=0.01\text{mm}$, $p_0=1.132\text{N/mm}^2$ とした結果である。L/2点において31Hzで応答が最大となり、その後急激に小さくなり、L/4, 3L/4点ではL/2点でピークを迎えた後に大きくなり、その後緩やかに上昇を続けた。これより実験値との対応は十分取れていることがわかる。

図6と表1は固有値解析の結果であるが、1次モードは34.9Hzで、2次モードは53.4Hzで確認できる。この1次モードの結果は、共振曲線におけるL/2点のピークの31.6Hzではなくその後現れた34Hz付近の急激な応答値の減少した点でのモードを示し、L/2点が節となりL/4, 3/4点が腹となった。実線で示す実験値では33.2HzでL/2点の急激な減少のピークを示し、L/4, 3L/4点では上昇している傾向が確認できる。有効質量比を見ると3次モードまでで80%となっており、2次モードと3次モードが支配的であることがわかる。

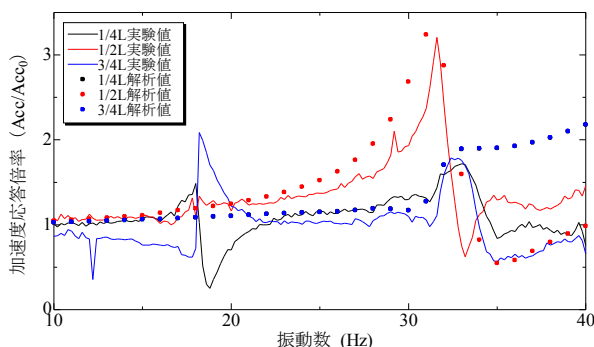


図5 共振曲線の実験値と解析値の比較

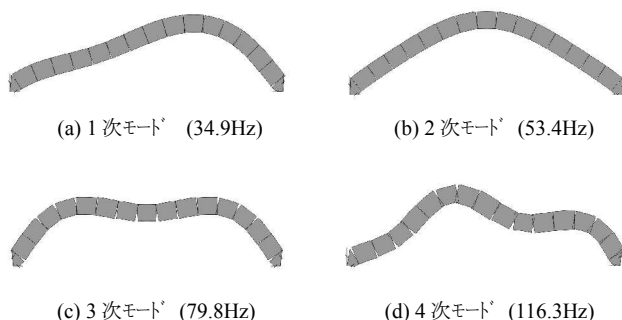


図6 各振動モード (変形倍率:50倍)

表1 鉛直方向の有効質量比とその累積値

モード次数	振動数(Hz)	有効質量比(%)	累積(%)
1	34.9	0.0	0.0
2	53.4	46.6	46.6
3	79.8	33.5	80.1
4	116.3	0.0	80.1
5	151.0	0.0	80.1

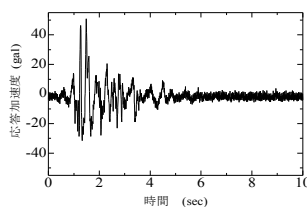


図7 入力地震波

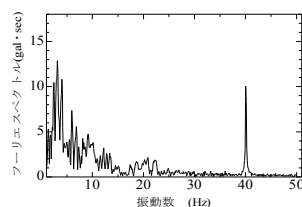
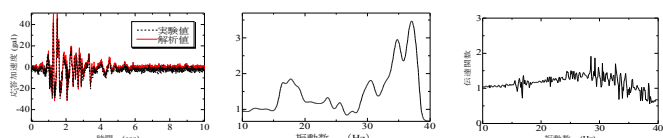


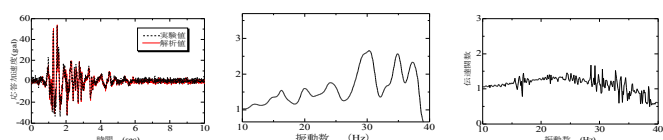
図8 フーリエスペクトル

次に地震波応答として兵庫県南部地震の継続時間10secの波を用いた結果を用いてL4点とL/2点の実験値と解析値を比較した。図7, 8は振動台上で計測した加速度応答とそのフーリエスペクトルであり、この波を解析モデルに作用させる。図8に示すこの波の周波数特性は継続時間を圧縮する前の50secの波と比較して最大振幅を持つ波の振動数が0.61Hzから3.05Hzと、成分全体においても振動数が大きくなっている点である。応答加速度の大きさはよく対応しているため、図9(b)に示す周波数伝達関数について見ると、図5の共振曲線で確認された18.2Hzの特徴的なピークが確認できる。高振動数域では37Hzにピークがあり、共振曲線の結果と一致しなかった。(c)の解析値では30Hz付近でピークがあり、その後減少している。共振曲線と伝達関数はグラフの概形が対応していることが理想であるが、30Hz以降は減少しているため実験値との対応はとれているものの、共振曲線は上昇しているため整合が取れていない。これは、地震波の実験と解析のデータ間隔を0.01secで整理しているため高振動数の領域の波を捉えきれていないことが原因であると考えられる。

次に図10のL/2点を見ると(b)では共振点である30.5Hzで大きなピークが確認できるため共振曲線で得られたモデルのピークと一致するが、高振動数域では減少しておらず大きい値が確認できる。(c)の解析値では30Hz付近でのピークがあるものの顕著ではない。高振動数域ではL/4点と同様に値が小さい上に高振動数側ではノイズが確認された。



(a) 応答加速度 (b) 実験値の伝達関数 (c) 解析値の伝達関数
図9 L/4点の地震波応答



(a) 応答加速度 (b) 実験値の伝達関数 (c) 解析値の伝達関数
図10 L/2点の地震波応答

参考文献

- 1) 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，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，平成20年度 熊本大学修士論文，2009.3
- 3) Dassault Systèmes Simulia Corp, Abaqus analysis User's Manual, Version 6.11