

石橋の動的解析手法による地震時挙動特性の検討

熊本大学大学院 学生員○工藤 祐資 熊本大学大学院 フェロー 山尾 敏孝
熊本大学工学部 学生員 古賀 圭一郎 九州産業大学 正員 水田 洋司

1. はじめに

九州内には多くの石橋が現存しているが、石材の割れ、大きな隙間や抜け落ちなどの損傷が目立つことから、補修・補強の必要性を含め健全度を判断することが求められている。現状では石橋の健全度を評価するための指標は存在せず、また、指標作成のためには石橋の力学的挙動を解明する必要がある。石橋の力学的挙動を解明する手法として離散型有限要素法が提案され、2次元要素による石橋の動的挙動の解明が行われてきた¹⁾。しかし、3次元要素を用いた動的解析手法の妥当性の検討は行われているが、解析手法の妥当性及び動的挙動の解明は不十分であるといえる²⁾。

本研究では、石橋の3次元動的解析手法の確立を目的とし、石アーチ模型の共振及び地震時挙動を調べる動的実験を行い、石アーチの動的挙動特性を把握した。次にこのモデルについて離散型有限要素を用いた3次元石アーチの動的解析を行うことにより、解析手法の妥当性について検討したものである。

2. 実験と解析の概要

実験は図1に示すような石アーチ模型を用い、使用した石材は溶結凝灰岩であり、物性値はヤング率： $E=17100$ (N/mm²)、ポアソン比： $\nu=0.16$ 、密度： $\rho=2.03$ (ton/m³)、摩擦係数： $\mu=0.65$ である²⁾。まず、対象となる模型の固有振動数を算出するために正弦波加振実験を行った。20galの正弦波を5～50Hzの範囲で0.2Hzずつ与え、各振動数で測定した応答加速度を用いて、固有振動数を算出し、共振曲線を描いた。加速度の測定箇所はアーチのスパンLの1/4,1/2,3/4の3点とし、それぞれ幅方向中央の位置である。次に、入力地震波はレベル2のプレート境界型(図2参照)と内陸直下型の地震波を50galに換算した波に加え、それぞれを10秒、30秒に継続時間を短縮した合計6つの地震波とし、鉛直方向及び橋軸直角方向に与えて応答加速度を測定した。継続時間を短縮することで、卓越振動数が高くなり、固有振動数を含む大きな揺れを発生させるために行った。

解析では、図3に示すようにモデル化し、石材間に接触判定を持たせることで挙動を再現する。石材要素間を支配するパラメータとしては摩擦係数に加えて、すべり発生変位がある。これは石材が滑り出す瞬間の変位であり、図4のように石材間のすべり変位と摩擦応力の関係をバイリニアモデルで表すことで実現象に近い摩擦を表現できる。既往の石材間せん断試験からすべり発生変位： $U_s=0.3$ (mm)とした²⁾。要素の分割数は、自重崩壊、要素の貫入を考慮して決めた。境界条件は基部を完全固定とし、荷重条件は重力加速度を入力し、石アーチが安定の状態に入ってから正弦波及び地震波を入力した。なお解析ツールはFEM汎用プログラムMARC³⁾を使用した。

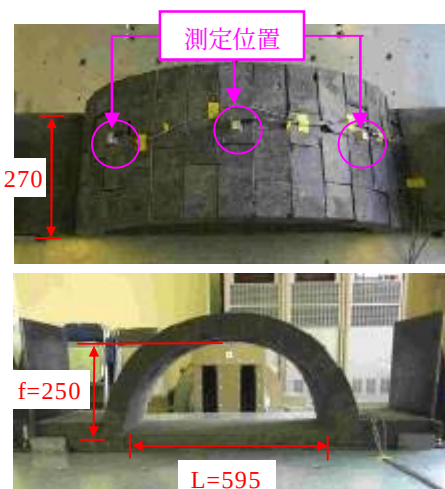


図1 石アーチ模型[単位：mm]
(スパンライズ比： $f/L=0.42$)

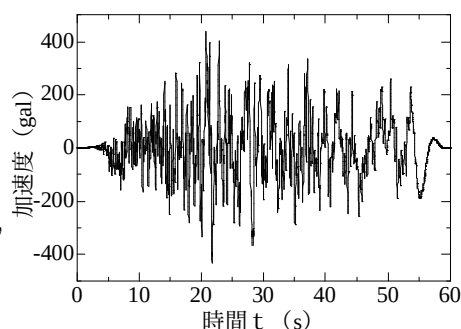


図2 入力地震波形
(レベル2 プレート境界型)

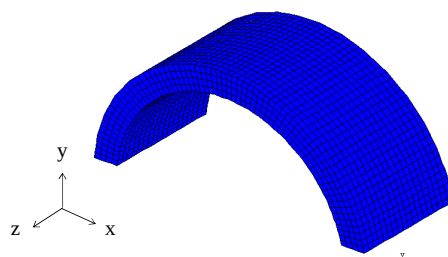


図3 石アーチの解析モデル

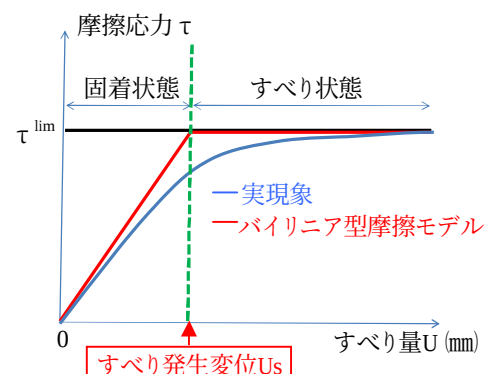


図4 石材間の摩擦とすべりの関係

3. 結果と考察

図4に鉛直方向に正弦波を加振し、得られたアーチ模型の共振曲線の比較を示す。実線は実験値、プロットは解析値を表す。実験では、一般的な共振曲線よりも複雑な曲線が得られた。大きな理由としては、石アーチは離散体構造物であるため、振動を受けた場合に力を伝達しながらもアーチ形状が少しずつ変化していたと考えられる。実験では、アーチの L/2 点の石材が徐々に鉛直方向に移動しながら振動している

のが実際に確認された。図に示すように振動数が 23Hz 及び 38Hz 付近で加速度が上昇しており共振現象が発生していると考えられる。解析では、23Hz で L/2 点のみ応答加速度が大きく上昇し、共振現象が発生していることがはっきりとしており、各点の位相を確認することにより一次の対称モードであることも確認できた。また実験値と比較すると、L/2 点においては第一の共振点が概ね一致していることが確認できたが、第二の共振点は一致しなかった。これは、実験では 0.2Hz ずつ上昇させた正弦波を連続で与えたため、石アーチの形状が連続的に変化している状態であった。それに対し、解析では一つの正弦波を与え、次の正弦波を与える際にはモデルを初期状態に戻すため、第一の共振点以降はうまく解析できなかったと思われる。

図5はプレート境界型の地震波を鉛直方向に入力した際の L/2 点での応答加速度を示したものである。実験、解析それぞれの波形の形状は概ね一致しているが加速度に大きな差が表れた。地震波を時間短縮して入力した影響は、実験においては時間が短くなるほど応答加速度は増加し、10 秒時には最大 94.2gal が観測され、解析においても時間短縮による影響は顕著であり、10 秒時には最大 299.7gal を観測された。この傾向は鉛直方向に地震波を入力した際の結果でも見られ、さらに内陸直下型の地震波を入力した際にも同様であった(図6参照)。また、継続時間 10 秒で橋軸直角方向に入力した場合は、地震波入力終了しても応答加速度が収束しないという特徴も見られた。これらの原因としては、離散化してモデル化しているにも関わらず石アーチが弾性体と同様の挙動を示したのではないかと考えられる。対応策としては、離散化していない石アーチモデルとの挙動を比較・検討する。さらに、すべり発生変位 U_s を数パターン変化させ、石アーチの挙動および応答加速度がどのように変化するかを確認するなど試みて原因を解明し、解析手法としての精度を上げていく必要があると思われる。

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) 日本 MARC(株): MARC Manual Volume A-F & MSC.Marc, 2003

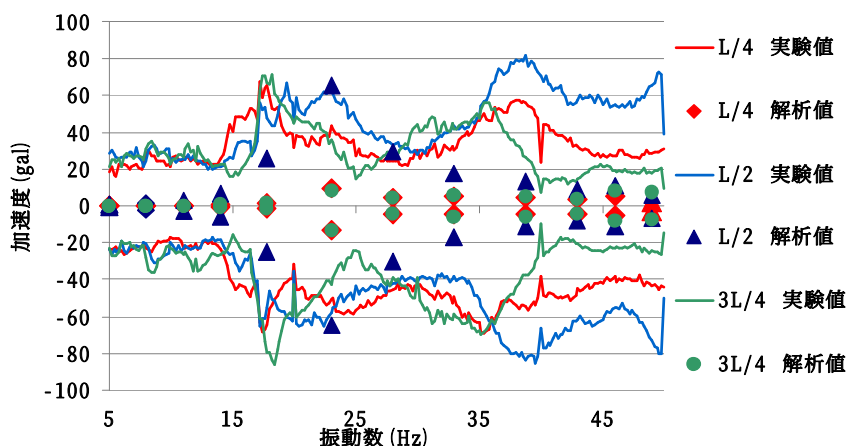


図4 実験と解析で得られた共振曲線(鉛直方向)

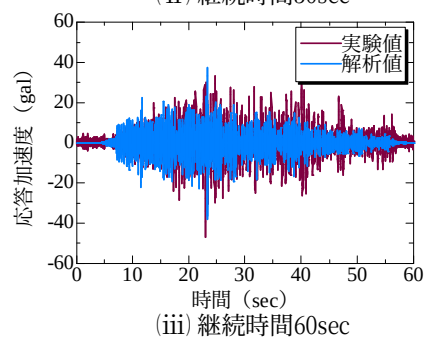
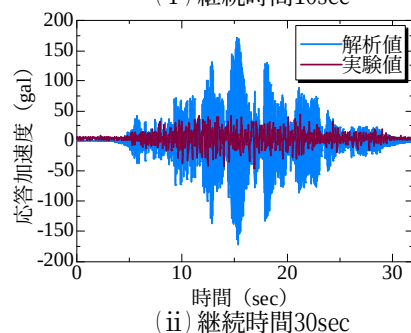
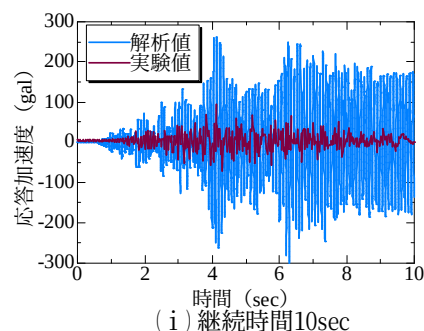


図5 地震波入力結果
(プレート境界型, 橋軸直角方向)

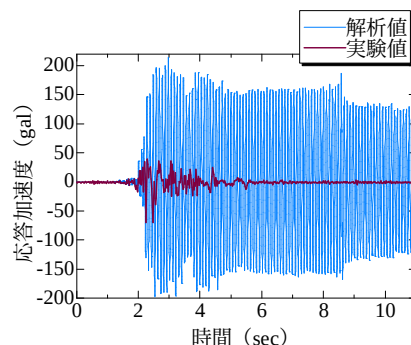


図6 内陸直下型地震波入力結果一例
(継続時間 10sec, 橋軸直角方向)