

石アーチの3次元動的解析手法の検討

熊本大学大学院 フェロー 山尾 敏孝 IHI(株) 正員 工藤 祐資

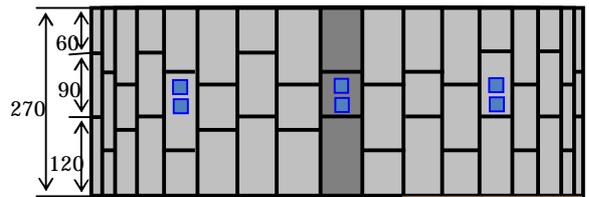
熊本大学大学院 学生員 古賀圭一郎 九州産業大学 正員 水田洋司 九州大学大学院 正員 浅井光輝

1. はじめに

現存している石橋には、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。石橋の健全度評価の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次元石アーチ部材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。



(a) 模型の側面図



(b) 平面図

■ 応答加速度計

図1 石アーチ模型(単位:mm)

2. 実験と解析の概要

実験は図1(a)に示すようなスパンサイズ比が $f/L=0.42$ で、実石橋の形状形式である石アーチ模型を用いた。使用した石材は阿蘇溶結凝灰岩であり、物性値はヤング率: $E=17100(N/mm^2)$, ポアソン比: $\nu=0.16$, 密度: $\rho=2.03(ton/m^3)$, 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図1(b)に示すアーチスパンLの1/4, 1/2, 3/4の3点のアーチ幅方向中央の位置とした。次に、入力地震波はレベル2のプレート境界型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。図2はアーチ模型を解析用にモデル化したもので、8節点アイソパラメトリック6面体要素を用い、各石材を独立的な要素に離散化した。1要素が15mm×15mm×15mmの正6面体となるように設定し、石材間に接触判定を持たせることで挙動を再現した。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、図4に示す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に近い摩擦を表現し、既往の石材間せん断試験より求めたすべり発生変位は、 $U_s=0.3(mm)$ 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MARCを使用した³⁾。

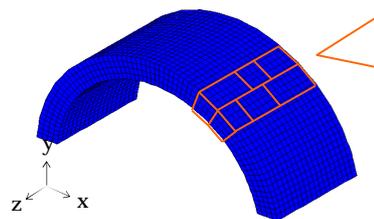


図2 石アーチの解析モデル

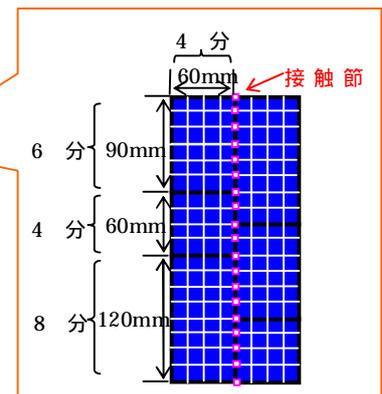


図3 3列アーチ要素の分割

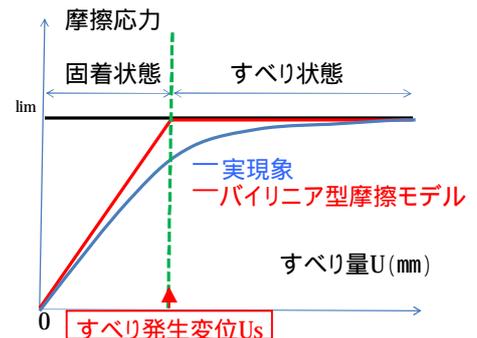


図4 石材間の摩擦とすべりの関係

キーワード: 石アーチ模型, 摩擦モデル, 3次元動的解析, 共振曲線, すべり発生変位

連絡先 〒860-8555 熊本市黒髪 2-3-1 熊本大学大学院自然科学研究科 Tel:096-342-3553 Fax:096-342-3507

3. 結果と考察

図5は鉛直方向に正弦波を加振しアーチ模型の共振曲線であり、実線は実験値、プロットは解析値を表す。実験曲線は、振動を受け力を伝達しながら、アーチ上部の石材が少しずつ下方に移動する形状変化を起こした影響を受けたと思われる。解析では、振動数が23HzでL/2点の応答加速度が大きく上昇し、共振現象が発生しており、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。実験値と比較すると、L/2点においては第一の共振点がよく対応していることが確認できたが、第二の共振点(38Hz付近)は解析では得られなかった。これは、0.2Hzずつ変化させて正弦波を連続で与えた実験では、石アーチの形状が連続的に変化しと考えられるが、解析では常にモデルを初期状態にして正弦波を与えたため、アーチ形状の変化が考慮できなかったと思われる。図6は釧路地震波を鉛直方向に、10secおよび60sec間入力した際のL/2点での応答加速度を示した。すべり発生変位 $U_s=0.3$ に加え、すべり発生変位の影響を調べるため0.1と0.5の解析結果も示した。すべり発生変位 U_s が小さいと応答加速度が小さくなり、大きいと応答加速度も大きくなるという傾向が表れた。また、解析値では継続時間が短いほど応答加速度が大きくなり、実験値よりもその差が大きくなった。図7は神戸地震波を鉛直方向に10sec入力した場合であるが、解析値と実験値に比較的良い対応が見られる。これらの結果から、すべり発生変位を一定値とすると実挙動を再現することが難しいということが確認できた。軸力の違いにより、すべり発生変位が変化することが石材間のせん断試験で確認されており³⁾、今後、すべり発生変位の設定方法を含め解析手法について検討が必要である。また、地震波を入力した場合、応答加速度が収束しないという現象が見られたり、地震動に対する減衰効果の増減もすべり発生変位の依存性が高いことから、更に実験との比較などにより詳細な検討が必要と思われる。

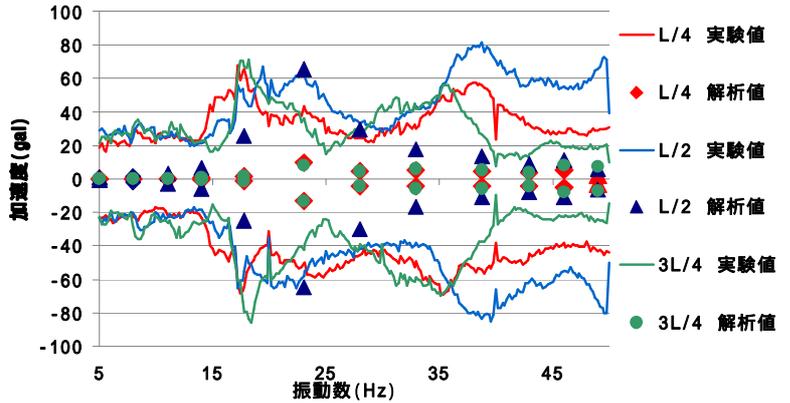
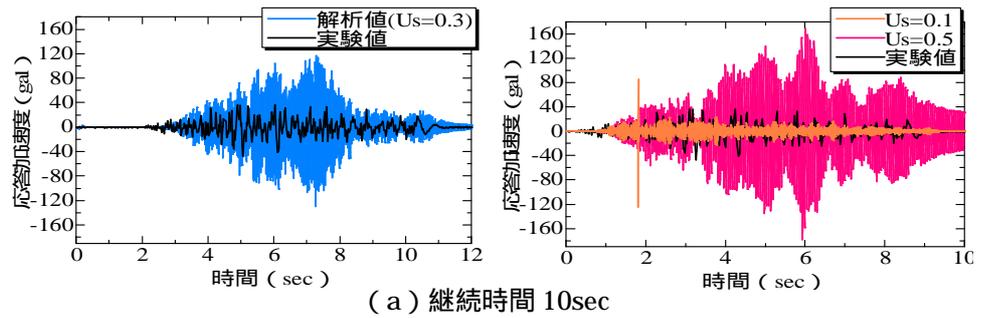
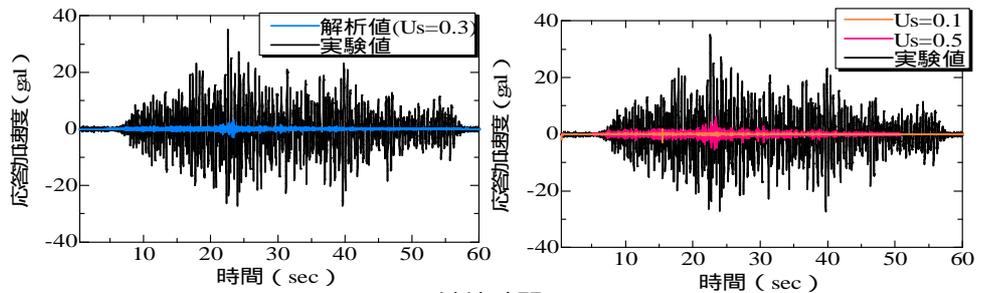


図5 実験と解析で得られた共振曲線(鉛直方向)

第一の共振点がよく対応していることが確認できたが、第二の共振点(38Hz付近)は解析では得られなかった。これは、0.2Hzずつ変化させて正弦波を連続で与えた実験では、石アーチの形状が連続的に変化しと考えられるが、解析では常にモデルを初期状態にして正弦波を与えたため、アーチ形状の変化が考慮できなかったと思われる。図6は釧路地震波を鉛直方向に、10secおよび60sec間入力した際のL/2点での応答加速度を示した。すべり発生変位 $U_s=0.3$ に加え、すべり発生変位の影響を調べるため0.1と0.5の解析結果も示した。すべり発生変位 U_s が小さいと応答加速度が小さくなり、大きいと応答加速度も大きくなるという傾向が表れた。また、解析値では継続時間が短いほど応答加速度が大きくなり、実験値よりもその差が大きくなった。図7は神戸地震波を鉛直方向に10sec入力した場合であるが、解析値と実験値に比較的良い対応が見られる。これらの結果から、すべり発生変位を一定値とすると実挙動を再現することが難しいということが確認できた。軸力の違いにより、すべり発生変位が変化することが石材間のせん断試験で確認されており³⁾、今後、すべり発生変位の設定方法を含め解析手法について検討が必要である。また、地震波を入力した場合、応答加速度が収束しないという現象が見られたり、地震動に対する減衰効果の増減もすべり発生変位の依存性が高いことから、更に実験との比較などにより詳細な検討が必要と思われる。



(a) 継続時間 10sec



(b) 継続時間 60sec

図6 釧路地震波による鉛直方向の応答加速度

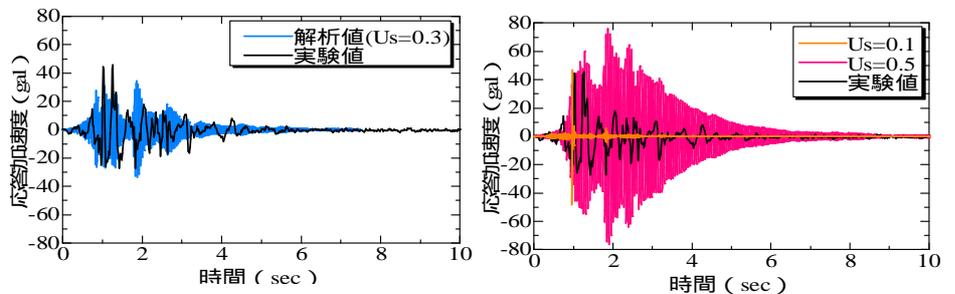


図7 神戸地震波による鉛直方向の応答加速度(継続時間 10sec)

参考文献

- 1) 浅井光輝他: 離散型有限要素... 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) 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.
- 4) 古賀圭一郎他: 阿蘇溶結凝灰岩の材料特性と石アーチ模型による解析手法の検討, 土木学会西部支部研究発表会, 2010.3