### 石材間摩擦に着目した石アーチの動的解析手法の開発

NEXCO 西日本 正員 〇古賀 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 正員 葛西 昭 九州産業大学工学部 正員 水田 洋司 熊本大学工学部 学生員 藤田 千尋

### 1. はじめに

石橋の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 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<sup>1),2)</sup>. 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 は実験に用いた石アーチ模型であり、実石橋で広く 用いられている溶結凝灰岩材で,材料特性はヤング係数 E=17140 (N/mm<sup>2</sup>), ポアソン比 v=0.16, 密度  $\rho=2.16$ (g/cm<sup>3</sup>), 動摩擦係数 *u*=0.65 である. 写真 1 に示すよう に,治具は振動台に固定され,その上に石アーチ模型 を設置している. L/4, L/2, 3L/4 の各点にはひずみゲ とし、同時に振動台上にも同じ感度方向に1 点設置し た.実験では正弦波と地震波による加振実験を行った.の値を得た.なお,静摩擦係数と動摩擦係数は同じ値とした. 石アーチの周波数特性を把握する正弦波加振実験では, 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、1 振動数で 20sec 間 加振した.この範囲に石アーチの固有振動数が存在す れば共振が確認できる. 地震波加振実験は, 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最大加速度を 50gal に換算したも

のを使用した.継 続時間を兵庫地震 波は 10sec ごとに 10~50sec に変更, 釧路地震波は 10~60sec にした合 計 11 波を用いた.





# 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,有限要素法解析において要素間に接触モデル 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 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波を作用させた. 石材の要素分割数は検討の結果,個々の石材を 4×4 でメッ シュ分割を行い(図 2 参照),物性値は実験石材と同じとした.

> 本解析では,要素と要素の接触の扱いが重要な点であるこ とから,図3に示す貫入(間隙)量と接触圧の関係が指数関 数で定義する接触モデルを導入した<sup>4)</sup>. 図は接触前に接触 圧が発生する間隙量  $c_0$ と間隙量が 0 の時の接触圧  $p_0$ の関 係を示したものである. 接触圧 po 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 co は任意に変化させて解析を行った.

また,図4に示すような摩擦現象を導入するために固着状 ージ式加速度計を設置し、感度方向はアーチ法線方向 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. 石材の大きさから、 すべり変位 Us=0.36 mm



### 4. 結果と考察

図 5 は、スパンライズ比 0.2 と 0.35 の石アーチ模型に正 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. 図 5(a)では, 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, 31.6 Hz でピークを 迎えた後急激に減少しており、振動数 31.6 Hz が共振点で あると推察される. また, 3L/4 点では 18.2 Hz 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. ここでの L/4, 3L/4 点における加速度応答の変化がともに急激であり, 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、この型特有の挙動と思われる. 解析値は間

キーワード: 石アーチ模型,動的解析手法,接触摩擦モデル,加振実験,周波数特性 連絡先: 〒860-8555 熊本市中央区黒髪 2-39-1 TEL 096-342-3533



隙量 *c*<sub>0</sub>=0.01mm, 接触圧 *p*<sub>0</sub>=1.132N/mm<sup>2</sup> とした結果 である. 両者に他所の差があるが, これは, 実験での サンプリング周波数は 0.01 秒で実施したため, 高振 動数領域では現象を捉えきれなかったと推測される. 図 5(b)のスパンライズ比 0.35 モデルの実験値では, L/2 点の明確なピークが 27.4Hz で確認できる. このピ ークの特徴は緩やかに上昇して緩やかに減少してい る点である. ピークが減少すると同時に L/4, 3L/4 点が 上昇しちょうど 30Hz で入れ替わっている点では, スパ ンライズ比 0.2 モデルの共振曲線結果と同様である.

次に実験で使用した神戸地震波と釧路地震波を入 力した場合の実験値と解析値を、各点での応答加速 度とそのフーリエ・スペクトルを用いて比較した.継続 時間は図に示す.解析条件は、スパンライズ比 fL=0.2 モデルで、 $c_0 = 0.01$  mm、 $p_0=1.132$  N/mm<sup>2</sup>,  $U_s=0.36$  mm、スパンライズ比 fL=0.35 モデルで、 $c_0$ =0.02 mm、 $p_0=1.606$  N/mm<sup>2</sup>、 $U_s=0.36$  mm である.

まず,図6と図7は、スパンライズ比0.2のモデルに 神戸地震波を10 sec と釧路地震波 30 sec を入力した 場合の L/4 点, L/2 点での加速度応答とフーリエ・スペ クトルを示した. 図より, L/4 点と L/2 点での応答加速 度および周波数成分のフーリエ・スペクトルの解析値 は実験値と傾向もよく対応していることがわかる.特に, 短周期の波を多く含む地震波 10sec のケースでは,各 計測点で周波数全域にわたってよく対応していること がわかる.なお,図 5(a)の共振曲線の結果においては, 18.2Hz で L/4 点と 3L/4 点に解析には現れなかったピ ークを確認できた.また,図に示していないが,神戸地 震波 30sec, 50sec のフーリエ・スペクトルで 18Hz~19Hz に解析値にはない山が確認できた.これ により、 地震波に含まれる 18~19Hz の 波が実験模型 に伝わっていることが確認できた. なお, フーリエ・スペ クトルの図においてどの点でも 40Hz で卓越している が,このピークは加振している振動台の振動数である. 図 8 はスパンライズ比 0.35 のモデルに神戸地震波

10 sec 入力した場合の L/2 点での加速度応答とフーリ エ・スペクトルの実験値と解析値を比較して示したもの である. 応答加速度の波形は、スパンライズ比 0.2 の モデルと同様に、どの地震波の場合でも、また、各点 において両者がよく対応していることがわかった.



## 図 8 スパンライズ比 0.35 モデル 神戸地震波 10sec

### 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.
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) Dassault Systèmes Simulia Corp, Abuqus analysis User's Manual, Version6.11

4)日本道路協会:道路橋示方書·同解説(V 耐震設計編),2002.

-081