

支点移動に着目した石造アーチ橋の構造安定性に関する基礎的研究 (その4)

福岡大学 正会員 ○今泉 暁音  
 福岡大学 正会員 坂田 力  
 九州産業大学 フェロー会員 水田 洋司  
 (株)建設プロジェクトセンター 正会員 筒井 光男

1. はじめに

九州には、多くの石造アーチ橋が存在している。それらの中には建設から 100 年以上経過したものも存在し、適切に維持管理していくことが重要である。

そこで、著者らは供用中の石造アーチ橋の構造安定性に関する基礎的な研究を進めている。特に、石造アーチ橋の安定性に大きく影響する支点の水平移動に着目し、崩壊挙動との関係について、個別要素法による数値解析や模型実験<sup>1)</sup>を実施してきた。本報告では、文献1)から支間や輪石数を増やし、支間と輪石厚の比が実際の石造アーチ橋により近い模型2橋を用いて、数値解析の妥当性を検討した。

2. 模型及び模型実験の方法

実験では、支間  $L$ 、輪石厚  $T$ 、輪石奥行 (60mm) が等しく、ライズ  $f$  が異なる図-1 に示す輪石のみからなる2つの木製アーチ橋模型を用いる。支点土台は、図-2 に示すように左右の部分が継手状に組み合わさっており、スライドさせて支間を広げることができる。

実験では、崩壊しないことを確認しながら、片方(右側)の支点土台をアーチ外側へできるだけゆっくり手で移動させ、その様子を動画で記録する。これを10回行った。

3. 個別要素法による解析条件

解析には、2次元個別要素法 (Distinct Element Method, DEM) の解析コード UDEC<sup>2)</sup>を用いる。実際の石造アーチ橋を想定した基本物性値を表-1 に示す。

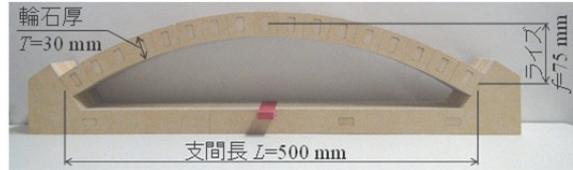
解析手順の概要を図-3 に示す。STEP2, 3 の各々で平衡状態に至るまで計算し、自重に対して安定している状態を作成する。STEP4 では、片方(右側)の支点をアーチの外側へ等速度 ( $v = 0.1\text{mm/sec}$ ) で水平移動させる。支点を 1mm (10 秒間) 移動させる毎に停止させ、平衡状態に至るまで計算し、平衡状態に至るか、崩壊するかを確認した。崩壊前に平衡状態を確保できる最大の水平移動量を支点の“限界水平移動量”とする。

4. 解析・実験の結果と考察

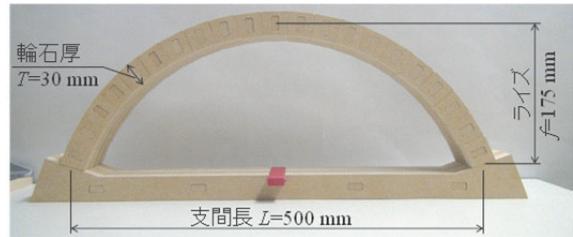
図-4~図-7 に模型実験、及び解析の様子を示す。

(1) 形状変化 (実験と解析)

模型 A では、実験・解析共に両支点部付近と要石部の3点でヒンジ (○) が生じ、崩壊に至った (図-4, 図-6)。模型 B では、両支点から約  $(1/8)L$  の部分と要石



(a) 模型 A ( $f/L=0.15$ , 輪石数 17 個)



(b) 模型 B ( $f/L=0.35$ , 輪石数 21 個)

図-1 木製石造アーチ橋輪石模型



図-2 支点土台

表-1 基本物性値

石材ブロック	密度	$d$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2,000
	体積弾性係数	$K$ (Pa)	$4.00 \times 10^9$
	せん断弾性係数	$G$ (Pa)	$4.50 \times 10^9$
石材間のばね (不連続面)	垂直方向剛性	$jkn$ (Pa/m)	$1.00 \times 10^{10}$
	せん断方向剛性	$jks$ (Pa/m)	$5.00 \times 10^9$
	摩擦角	$jf$ ( $^\circ$ )	35
	粘着力	$jc$ (Pa/m)	0

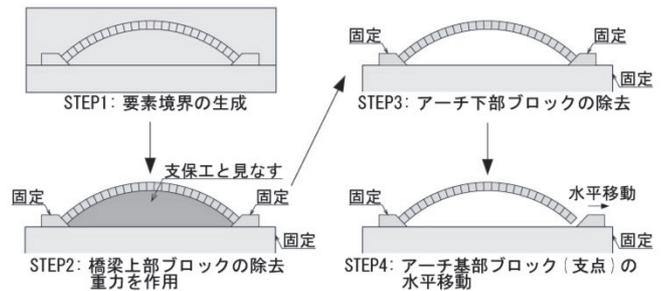


図-3 解析手順

部の3点でヒンジが生じ、崩壊に至った (図-5, 図-7)。

模型 A の数回の実験では左支点部、模型 B の数回の実験、及び解析では  $(1/8)L$  部において、ヒンジ位置が内側の輪石境界へ移る挙動が見られた (図-8)。支点移動に伴う支間長増加によって、各接目に働く圧縮応力の分布状態が変化したことによるものと考えられる。

(2) 限界水平移動量 (実験と解析)

実験では、崩壊時の支点水平移動量の平均は、模型 A は 23.3mm, 模型 B は 27.8mm となった。これら平均から

キーワード 石造アーチ橋, 個別要素法, 維持管理, 構造安定性, 支点移動

連絡先 〒814-0180 福岡県福岡市城南区七隈 8-19-1 福岡大学工学部社会デザイン工学科 TEL: 092-871-6631



(a) 支点水平移動量  $dL=22.5\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=4.5\%$ ) 【崩壊直前】



(b) 支点水平移動量  $dL=23.0\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=4.6\%$ ) 【崩壊時】  
図-4 模型 A の実験の様子 (4 回目)



(a) 支点水平移動量  $dL=27.0\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=5.4\%$ ) 【崩壊直前】



(b) 支点水平移動量  $dL=27.5\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=5.5\%$ ) 【崩壊時】  
図-5 模型 B の実験結果の様子 (7 回目)

1mm (支間の 0.2%) 減じた値を限界水平移動量とする。

実験と解析の結果より、限界水平移動量  $dL$  を支間  $L$  で除し無次元化した  $dL/L \times 100$  を求め、ライズ支間比  $f/L$  との関係を図-9 に示す。なお、模型以外の形状の解析も実施した。解析では、ライズ支間比と限界水平移動量の関係は上に凸で示された。実験では、両模型とも限界水平移動量は解析より同程度小さく、下記(3)より本検討の範囲では模型の製作精度や組立誤差が影響している可能性が考えられる。

(3) 物性値と大きさの影響 (解析)

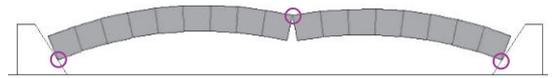
模型 A, B モデルの解析において、表-1 の基本物性値の密度のみを  $500 \sim 5000\text{kg/m}^3$ 、モデルの規模を 20 倍, 40 倍としても、限界水平移動量は変化しなかった。石材間ばねの垂直方向剛性  $jkn$  とせん断方向剛性  $jks$  のみを共に 0.05, 0.1, 10, 100 倍とすると、限界水平移動量は基本物性値の場合に比べ、 $\pm 1\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=0.2\%$ ) 異なるケースもあるが、石材間ばねの剛性による影響は小さいと考えられる。

表-1 の基本物性値の摩擦角のみを変化させた解析結果を図-10 に示す。限界水平移動量は、ライズが高い  $f/L=0.35$ ,  $0.45$  では摩擦角  $20^\circ$  付近以下で減少していくが、一般的な摩擦角の範囲では影響は非常に小さいと考えられる。

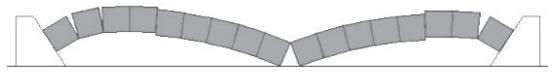
5. まとめ

本報告では、支点水平移動に伴う石造アーチ橋の挙動について、模型実験と個別要素法による解析の両結果を比較検討した。ヒンジの生成状況の傾向はほぼ同等であり、支間増による形状変化を捉えることができた。限界水平移動量の実験と解析の差は、模型の製作精度や組立誤差の影響が可能性として考えられる。

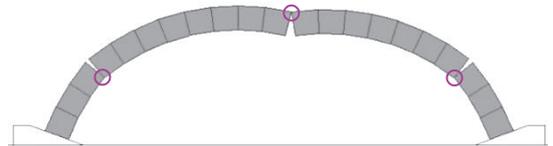
謝辞：個別要素法についてご教授頂きました山口大学大学院創成科学研究科 清水則一教授に感謝の意を表します。



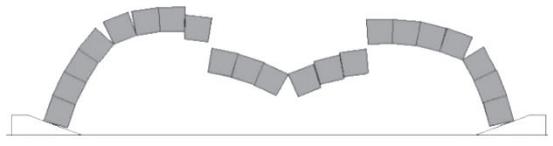
(a) 支点水平移動量  $dL=31\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=6.2\%$ ) 【崩壊直前】



(b) 支点水平移動量  $dL=32\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=6.4\%$ ) 【崩壊時】  
図-6 模型 A の解析の様子



(a) 支点水平移動量  $dL=38\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=7.6\%$ ) 【崩壊直前】



(c) 支点水平移動量  $dL=39\text{mm}$  ( $dL/L \times 100=7.8\%$ ) 【崩壊時】  
図-7 模型 B の解析の様子



(a) 実験：支点水平移動量  $dL=22\text{mm} \sim 23\text{mm}$  のとき (8 回目)



(b) 解析：支点水平移動量  $dL=14\text{mm} \sim 15\text{mm}$  のとき  
図-8 模型 B のヒンジ位置の移動の一例

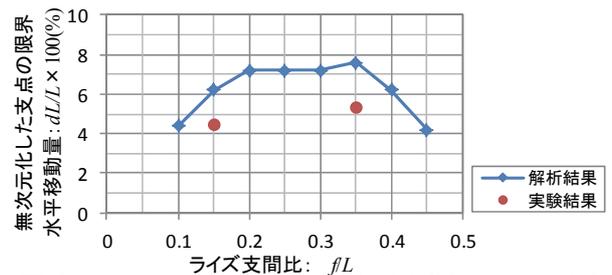


図-9 ライズ支間比  $f/L$  と限界水平移動量  $dL/L$  の関係

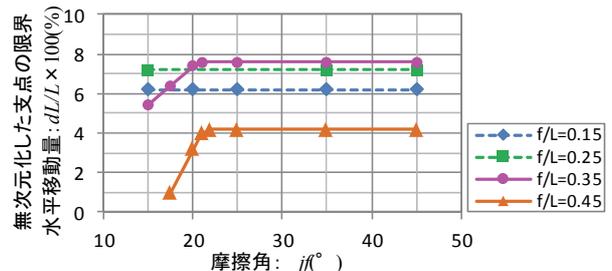


図-10 摩擦角  $\phi$  と限界水平移動量  $dL/L$  の関係 (解析)

参考文献：1) 今泉暁音, 他3名：支点移動に着目した石造アーチ橋の構造安定性に関する基礎的研究(その3), 平成28年度土木学会西部支部研究発表会講演概要集, I-032, pp.63-64, 2017.3. 2) ITASCA Consulting Group, Inc. : UDEC, Version 6.00, User's manual, 2014.