札幌軟石を用いた石造アーチの FEM 解析

Finite element analysis of a stone arch by using Shikotsu welded tuff

北海道大学大学院工学研究科	学生員	丹野真仁 (Masahito Tanno)
北海道大学大学院工学研究科	F会員	林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
北海道大学大学院工学研究科	正会員	松本高志 (Takashi Matsumoto)
北海道大学大学院工学研究科	正会員	何 興文 (Xingwen He)

1. はじめに

石造アーチ橋は 17 世紀以降に積極的に建設され,石 造橋については大正末期には約7万橋存在していたとさ れるが,現在では3千橋未満程度となっている¹⁾.石造 アーチ橋の多くはコンクリート橋や鋼橋へと変化してい った.その理由として,高度化した現代社会の進展に伴 い,耐久性,利便性,ライフサイクルコストなど要求さ れる性能が高まったことが挙げられる.この流れは現在 も続いており,今後も石造アーチ橋の数は減少していく ことは確実である.

こうした石造アーチ橋の減少傾向とは逆行して,そ の歴史的価値から石橋を保護・管理し,土木遺産として 後世に残していく動きもある.その一例として,鹿児島 の石橋記念公園事業²⁾や札幌での創成橋復元事業³⁾など が行われている.しかし復元・移設事業ついては,石造 アーチの構造的特性に解明されていない部分もあり,そ の設計方法が未だに確立されていない.また実構造の組 み方における隙間などが石造アーチの全体挙動に対する 評価や模型実験と比較した解析等の研究は少ないのが現 状である⁴⁾.さらに石造アーチについては,その形状や 石材の施工性から不連続で複雑な構造特性となっている.

以上より,石造アーチ橋の構造的特性を検討し設計 基準の確立を目的とする.実構造の組み方における隙間 や,隙間に充填した材料(以後,充填材)が全体挙動に 及ぼす影響を検討する.そのため静的載荷室内模型実験 により得られた実験値と有限要素法によって得られた解 析値を比較することで評価を行う.本研究では,第一段 階として石造アーチ橋の静的垂直荷重に対する挙動の検 討を行う.

2. 静的載荷室内模型実験

石造アーチが静的鉛直荷重を受けた際の構造的特性 を検討するため,既往の研究^{5),6)}にて行われた室内模 型実験を参照した.この模型実験では,石造アーチに集 中荷重と等分布荷重を載荷し,また充填材としては珪砂 と石膏を用いている.本研究では,そこから得られたひ ずみ,鉛直変位のデータを用いる.

2.1 模型供試体

実験供試体については,石材として札幌軟石を用いた.その材料特性を表-1 に示す.また支間長,ライズ,中心角,半径,弧長の値,ダイヤルゲージ,ひずみゲージの位置を図-1 に示す.輪石は左右 12 個ずつ使用し,要石は組み立てによる誤差を考え,調整できるような寸法のものを使用した.充填材として用いた珪砂は粒径が1~2mmのものを用いた.充填材として珪砂と石膏の2

種類を用いたのは充填材が全体挙動に及ぼす影響を検討 するためである.珪砂と石膏については粘着性,粒子の 流動性が性質としての大きな違いであると考えられる. 2.2 載荷方法

(1) 集中荷重載荷実験

充填材に珪砂を用い,要石部に集中荷重を載荷した. 直接要石部に載荷を行うと要石が傷つく可能性や要石部 に均等に力が伝わるようにすることを考慮し,かまぼこ 状の鉄板を設置した.載荷を行ったところ,1tf に満た ない段階で写真-1のように上部の 1/4 部,下部の中央部 付近,右端部付近で隙間が確認された.このため十分な データを得ることができなかった.構造的特性を検討す るために,さらに荷重を加え石造アーチの全体挙動を把 握する必要がある.隙間が生じた要因としては,アーチ 中央部に集中荷重をかけた際に隙間が生じた箇所付近が 引張力を受けていることが挙げられる.解析上において, 連続したアーチに関しても中央部に集中荷重を載荷した 場合,上部の 1/4 部, 3/4 部,下部の両端部,中央部付 近で引張力が生じる.集中荷重載荷実験おいては,充填 材である珪砂に粘着性がないためこの影響を顕著に受け たと考えられる.実際の石造アーチでは壁石や土砂など でスパンドレルを設けているため,アーチ部の1点に荷 重が集中ことは少ない.このことからスパンドレル部の 重要性が確認された.

表-1 材料特性					
	札幌軟石	ポリスチレン	鋼材		
弾性係数	5.6GPa	3.0GPa	200GPa		
ポアソン比	0.143	0.34	0.30		







写真-1 隙間







写真-3 石造アーチ端部

図-2 供試体の解析モデル

(2)等分布荷重載荷実験

集中荷重を石造アーチに載荷した際,1tf に満たない 状態で隙間が生じてしまった.石造アーチの構造的特性 を検討するために、それ以上の荷重を載荷する実験を行 う必要がある.集中荷重載荷実験から 1/4 部と 3/4 部に おいて上向きの変位が生じていたことから,輪石間の隙 間を抑えるためにスパンドレル部に耐熱用発泡スチロー ル(ポリスチレン)を設置し,等分布荷重を載荷した. この実験において,写真-2のようにスパンドレル部の 上部に H 型鋼を設置し,2点で集中荷重を載荷すること で等分布荷重を再現した.この実験により,珪砂充填実 験,石膏充填実験ともに 0.5~5.0tf 載荷時におけるひず み,鉛直変位のデータを得ることができた.しかし等分 布荷重の再現において,耐熱用発泡スチロールと H 形 鋼を用い,2点で集中荷重を載荷する手法の妥当性の検 討を行う必要がある.また両端部付近にてスパンドレル 部と H 形鋼の間に隙間があったこと, 要石がアーチ上 部へ突出していることについても合わせて検討していか なければならない.

3. 有限要素解析

数値計算には有限要素解析ソフト ANSYS を採用した. 石造アーチはソリッド要素を適用して有限要素分割を行 った.アーチ部の分割数は x 軸方向に 100, y 軸方向に 4, z 軸方向に 6 である.

3.1 実験供試体のモデル化

実験供試体と同様にアーチ部,スパンドレル部,H形 鋼をモデル化し(図-2),材料特性はそれぞれ表-1に示 した値を用いた.アーチ部における輪石同士は剛結合と する.解析するにあたり,模型実験における等分布荷重 の再現を検討する必要があるため,模型実験において両 端部付近にてスパンドレル部と H 形鋼の間に隙間があ ったこと,要石がアーチ上部へ突出していることを考慮 した.スパンドレル部と H 形鋼の間に隙間の再現には, 両端部付近のスパンドレル部と H 形鋼の隙間にあたる 箇所の要素を消去することで隙間のモデル化する手法, またはスパンドレル部の弾性係数を端部方向につれて小 さくするという方法を採用した.要石がアーチ上部へ突 出の再現には,要石をモデル化する方法を採用した.

3.2 荷重と境界条件

荷重については, H 形鋼上部に2点で載荷した.また 模型実験においては両端部の輪石側面の上辺と下辺が支 点に接していたことから(写真-3),解析上ではアーチ 部側面の上辺と下辺を完全固定とした.

3.3 解析モデル

模型実験において両端部付近にてスパンドレル部と H 形鋼の間に隙間があったこと,要石がアーチ上部へ突出 していることが応力の伝達にどのように影響しているの かを調査するため, Model-O, Model-K, Model-S, Model-E, Model-E/K の 5 種類の解析モデルを用い解析 を行った.これら5種類の解析モデルについて以下に, またまとめたものを表-2 に示す.

(1)Model-O: スパンドレル部と H 形鋼の隙間, 要石の 突出をともに考慮していない解析モデル

(2)Model-K: スパンドレル部と H 形鋼の隙間を考慮せ ず,要石をモデル化した解析モデル

(3)Model-S:スパンドレル部とH 形鋼の隙間をモデル化 し,要石の突出は考慮していない解析モデル

(4)Model-E:スパンドレル部の弾性係数に勾配を設け, 要石の突出は考慮していない解析モデル

(5)Model-E/K:スパンドレル部の弾性係数に勾配を設け, 要石をモデル化した解析モデル

これらの解析結果より,模型実験において等分布荷 重が再現される可能性の検討を行う.そのため比較対象 として,等分布荷重を直接アーチ部に載荷した解析モデ ルも作成した.各々の条件下で得られた解析値を実験値 と比較し,充填材が全体挙動に及ぼす影響を評価する.

4. 実験値と解析値の比較

4.1 ひずみ

アーチの右端部, 1/4部, 1/2部, 3/4部, 左端部にお ける珪砂,石膏充填実験と各解析モデルのひずみの比較 を図-3 に示す. Model-O と等分布荷重を比較すると異 なる値を示していることがわかる.このことから両端部 付近のスパンドレル部と H 形鋼の隙間,要石のアーチ 上部への突出を考慮せずとも,模型実験での荷重状態は 等分布荷重を再現できていなかったことが確認できる. また Model-O と Model-K, Model-E と Model-E/K の比較 から各々はほぼ同一の値を示し,要石が上部に突出して いる影響は微小であるといえる.また Model-O と Mode 1-S, Model-O と Model-E については各々異なる傾向を 示し,スパンドレル部と H 形鋼の間に隙間が応力の伝 達に影響を及ぼしていることが確認できる. Model-S は 珪砂,石膏充填の実験値との間に誤差が生じている.特 に上部ひずみについては 1/4~3/4 部にて珪砂,石膏充 填の実験については下に凸の傾向を示しているのに対し, Model-S については上に凸の傾向を示している.したが って Model-S は模型実験を再現できていないことがわか る.Model-E については他の解析モデルに比べ実験値と の誤差が小さく,特に Model-E と石膏充填実験に着目 するとより近い値となっている.珪砂,石膏充填実験を 比較すると, 珪砂充填実験は上部裏面のデータはないが 表裏,左右における差が大きいことがいえる.特に中央 部の表裏,中央部裏面の左右,下部表面の左右では対称

性を示していないことがわかる. 珪砂の粒子間の不規則 な隙間が応力の伝達に影響していると推測でき,充填材 の違いが石造アーチの構造的特性,全体挙動の差を生じ る要因となっていると考えられる.

Model-S と Model-E の応力の伝達を検討するため, 最小主応力の比較を行う.Model-Sの最小主応力分布 (図-4)から,スパンドレル部と H 形鋼の接合面の両 端, すなわち隙間の先端部に応力が集中していることが 確認できる.この要因としては,解析上では隙間の大小 にかかわらず,隙間が存在する箇所ではスパンドレル部 に応力の伝達はなされないためである.しかし模型実験 では載荷に伴い隙間が小さくなり,隙間がなくなった箇 所では応力の伝達が生じる.一方で Model-E の最小主 応力分布(図-5)は,応力の伝達も Model-S に比べ滑ら かに行われ,模型実験における載荷に伴い隙間が存在し ていた箇所に応力の伝達が生じる現象を再現できている といえる.また下部における珪砂,石膏充填実験の表裏 の平均ひずみと Model-E の比較を図-6 に示す.表裏の 平均ひずみでは,より誤差が小さくなっていることが確 認できる.上部,中央部においても同様の結果を得るこ とができた.さらに加えて左右の平均ひずみの場合では, その傾向がより顕著になる.

4.2 鉛直変位

アーチの 1/2 部における珪砂,石膏充填実験と各解析 モデルの荷重と鉛直変位の関係の比較を図-7 に示す. Model-O と等分布荷重は異なる値を示し, また Model-O と Model-S, Model-O と Model-E は各々ほぼ同一の値を 示している.したがって鉛直変位の比較からも模型実験 での荷重状態が等分布荷重を再現できていなかったこと, 要石が上部に突出している影響は微小であることが確認 できる.鉛直変位についてもひずみと同様の傾向を示し ていることがわかる.また載荷に伴い,珪砂,石膏充填 実験ともに傾きが大きくなっていることがわかる.その 理由としては、載荷にともない結合部が密な状態になっ ていくことから,結合部の影響が小さくなるためである と考えられる. 珪砂充填実験については結合部にて粒子 の移動が生じ,密な状態になりにくいと考えられる.そ のため石膏充填実験に比べ大きな変位量となっている. しかし荷重が大きくなるにつれ、この差が小さくなって いくことが推測される.またアーチの 1/4 部, 3/8 部, 1/2 部, 5/8 部, 3/4 部における 0.5tf あたりの鉛直変位量 の比較を図-8 に示す.より結合部が密な状態での比較 を行うため実験値においては 4.5~5.0tf での変位量を採 用している.Model-E と石膏充填実験についてほぼ同一 の値を示していることがわかる.このことから石膏充填 実験については 5.0tf 以上を載荷した場合,結合部が全 体挙動に及ぼす影響が微小であると推測できる.また本 研究において模型実験のスパンドレル部に耐熱用発泡ス チロールを用いたが,実際の石造アーチにおいてはアー チ部の上に壁石や土砂などでスパンドレルを設けている ため、アーチ部はある程度の荷重を受けている.スパン ドレル部の重量を大きくするほど結合部の影響は小さく なるが,アーチ部に使用している材料の圧縮強度との関 係から,通行可能重量が限られるという面もある.



表-2 解析モデル

図-3 ひずみの比較



⊠-5 Model-E



図-6 平均ひずみと Model-E の比較





図-10 端部からアーチ 1/2 部までの鉛直変位

5. 荷重のモデル化

ひずみ,鉛直変位の比較からそのため結合部に石膏 などを用いた場合、アーチ部を剛結合として仮定しても、 Model-E にてある程度の再現が可能であった.そのこと から石造アーチに静的載荷を行った場合に,解析におい て全体挙動の予測が可能なると考えられる. Model-Eの アーチ部が受ける荷重の調査を行うため、アーチモデル に2点集中荷重と台形分布荷重を載荷したモデルを作成 し解析を行った.2 点集中荷重と台形分布荷重を採用し た理由は、スパンドレル中央部付近に応力が集中するこ とを考慮したためである. 端部からアーチ 1/2 部までの ひずみの比較をすると(図-9), Model-E は台形分布荷 重と近い値をとっていることが確認でき,2点集中荷重 との間に 1/4~1/2 部にかけて大きな差異が存在する. また鉛直変位についても(図-10),台形分布荷重がよ り Model-E を再現できていることがわかる.ひずみ, 鉛直変位ともに Model-E は台形分布荷重に非常に近い

荷重状態であることがいえる.このことから,模型実験 のアーチ部にかかる荷重は台形分布荷重に近いと考えら れる.模型実験において両端部付近でスパンドレル部と H 形鋼の間に隙間があることにより,スパンドレル部の 中央部に応力が集中し,アーチ部に台形分布荷重のよう に伝わったと推測できる.石造アーチの解析にあたり荷 重条件を簡略化して再現する(スパンドレル等を省略し, アーチ部に直接荷重を与える)場合は,模型実験の微細 な箇所の影響についても詳細に考慮する必要がある.

6. まとめ

本研究では,静的載荷室内模型実験と有限要素法に より石造アーチの構造的特性や全体挙動の検討を行った. 静的載荷室内模型実験では充填材に珪砂と石膏を用い, その違いによる影響を調査した.有限要素解析ではスパ ンドレル部の弾性係数に勾配を設けることでスパンドレ ル部と H 形鋼の隙間を考慮し,アーチ部を剛結合とし た解析モデル(Model-E)を用いることで,静的載荷室 内模型実験におけるひずみ,鉛直変位についてある程度 の再現が可能であった.その詳細を以下にまとめる.

- ひずみについて, Model-E の解析値は実験値と近い 値を示した.しかし実験値では石造アーチの表裏・ 左右に差が生じ,その傾向を解析により再現することは困難であった.平均をとり実験値を補正したと ころ,解析値との差が小さくなることを確認した.
- 2) Model-E の解析値と実験値における 0.5tf あたりの 鉛直変位量の比較(実験値においては 4.5~5.0tf で の変位量を採用)から,載荷に伴い石造アーチの結 合部が密になり,連続体に近い性質を示すことがわ かった.特に石膏充填実験は 4.5~5.0tf において, 解析値とほぼ同一の値であった.
- 3) ソリッド要素を用い,結合部を剛結合とした有限要素解析にて,石造アーチのひずみ,鉛直変位に比較的良好な解析結果を得た.よって札幌軟石を用いた石造アーチの挙動の予測に役立つものと考えられる. 今後は異なる条件での静的載荷模型実験について有限

要素解析を行い,さらなる石造アーチの構造的特性の解 明を行っていく予定である.

【参考文献】

- 1) 逊目英正:石造アーチ橋の新たな可能性, Civil Engineering Consultant, Vol.235, pp.16-19, 2007.
- 吉原進:甲突川五石橋の移設復元計画, 土木学会誌, Vol.83, No.6, 1998.
- 清水英征他:札幌最古の石橋 創成橋の解体と復元, 土木学会北海道支部第 65 回年次学術講演会, CS4-022, 2010.
- 4) 山尾敏孝他:石造アーチ橋の力学的挙動特性の検討, 構造工学論文集, Vol.55A, 2009.
- 5) 清水貴裕他:札幌軟石を用いた円弧アーチ橋の静的 載荷実験,土木学会北海道支部第 64 回年次技術研 究発表会, A-37, 2008.
- 6) 清水貴裕他:札幌軟石を用いた石造アーチの力学的 挙動に関する研究,土木学会北海道支部第66回年 次技術研究発表会,A-10,2010.