

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2015

課題番号：24700929

研究課題名(和文) 鋼製ワイヤーを用いた歴史的レンガアーチ橋の補修方法の確立に向けた研究

研究課題名(英文) Research on the establishment of repairing method for historical masonry arch bridges using steel wires

研究代表者

岸 祐介(Kishi, Yusuke)

首都大学東京・都市環境科学研究科・助教

研究者番号：50613999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：

本研究では、歴史的レンガアーチ橋を対象として目地部に着目し、破壊強度について検討を行った。破壊強度に関しては、レンガ目地間の剥離強度およびせん断強度について、それぞれ供試体を作製し破壊実験を行った。その結果、石灰入りの目地材を用いた場合、現行のJIS規格のモルタルを目地材として用いた場合に比べて、破壊強度が低下することを確認した。また、せん断強度に比べ剥離強度の値が小さく、レンガ造においては剥離破壊が先行するものと予測した。実験結果を踏まえ、鋼製ワイヤーを用いた補修・補強効果について有限要素解析により検討した結果、剥離破壊に対する強度向上が期待できる結果となった。

研究成果の概要(英文)：

In this research, peeling and shear strength tests of masonry specimens are conducted in order to reveal failure mechanism of historical masonry arch bridges. Moreover, 2 types mortar which were mixed different compound ratio are compared to confirm the effect of limestone for the strength of masonry structures. The results of experimental tests shows the value of shear strength was larger than the value of peeling strength. Therefore occurring peeling failure previously is predicted for masonry structures based on the experimental results. In addition, improvement of failure strength for masonry structures using steel wire is verified by FE analysis. The results of numerical calculation shows failure strength for peeling is increased by repair and reinforced method using steel wires.

研究分野：構造工学，耐震工学，地震防災

キーワード：歴史的建造物 組積造 耐荷力 破壊強度 補修 補強

1. 研究開始当初の背景

明治初期に新しい建築材料として入ってきたレンガは、日本各地で広く利用され、多くのレンガ造構造物が建設された。レンガアーチ橋もまた、鉄道橋などとして数多く建設されている。しかし、1891年(明治24年)に発生した濃尾地震、続く1923年(大正12年)の関東大地震により、多くのレンガ造構造物が崩壊に至り、地震への脆弱性が浮き彫りとなった。またこの頃、鉄筋コンクリートが登場し、レンガが建設材料として使用される時代は終焉を迎えた。

年代が進むと、技術の発達とともに耐震基準の見直しなども行われ、それに伴って多くのレンガ造構造物が建て替えられた。一方で、地震災害などによる被害を免れた構造物の中には、現在も社会基盤設備などとして供用され続けているものも存在する。1990年代に入ってから、文化庁がそれらを近代化遺産として保全対象と考えるようになり、近年は文化財としての注目を集めている。

しかし、架設から100年ほど経過する中で、レンガアーチ橋などの残された橋梁構造物も、経年劣化や荷重の変化による影響などにより損傷が生じており、本格的に補修・補強へ取り組まなければ、これら近代化遺産を将来に継承することができないと懸念されている。

レンガ造のような組積造構造物について、損傷例としては、目地部の欠損(目地切れ、目地やせなど)、レンガおよび石材のひび割れ、表面へのはらみおよび表面部分の剥落などが挙げられる。損傷の程度が軽度であれば、構造物自体への影響は少ないと考えられるが、ひび割れや目地の欠損が進展すれば、せん断破壊などを生じる原因となり得る。レンガ造はその構造上、目地部との境界が最も脆弱であると考えられており、軽度の損傷が進展していく可能性が高い。

これらの損傷はいずれも風雨による浸食によって生じる可能性がある。加えて、地震などの外力の作用や、地盤変動などによる基礎の沈下、また交通荷重による繰り返し載荷なども、上記の損傷原因として考えられる。経年的変化によって生じる要因は、構造物を構成する部材固有の耐久性能に起因するため、損傷状況の予測が困難であると考えられる。これに対し、上記に挙げたような外的要因によって生じる損傷は、レンガ、目地などの要素を持つ材料特性と構造物に作用する外力などの要因を力学的に捉えることが可能であり、そのメカニズムを明らかにすることにより、損傷状況を予測することが可能と考えられる。また損傷状況を予測できれば、組積造構造物が致命的な破壊状態に至る前に予防策を施すことも可能であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では、文化的価値のある歴史的レン

ガアーチ橋について、実験と解析に基づいて災害時の被災予測を示すことを念頭に置き、破壊強度に関する定量的な評価を行うとともに、外的作用に対する補修・補強方法についての検討を行う。具体的には、2種類の異なるモルタルを用いた組積造試験体について、破壊形式の違いに着目した実験を行う。また、実験結果を踏まえて鋼製ワイヤーを用いた補修・補強効果について検討することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 破壊強度に関する検討

本研究では、レンガ造構造物のレンガ一目地間における破壊形式について、剥離およびせん断強度に着目した。そこで、これらの破壊強度についての検討を行うために、剥離強度試験体とせん断強度試験体の2種類の試験体を作成し、それぞれの試験体を用いた破壊強度試験を行った。

また、目地材の材料特性の違いによる、それぞれの破壊強度への影響についても検討するため、配合質量比率の異なる2種類のモルタルを作製し、各モルタルの材料特性を調べるため、レンガ造試験の破壊試験に先んじてモルタルの強度試験を行った。試験体作製に用いた目地材(モルタル)は、セメントと砂の配合質量比率をJISの規格によって定めたものと、既往の研究にもとづいて石灰を加えたものを使用した。上記の2種類の目地材を使用してレンガ造試験体を作製し、剥離およびせん断強度に関する実験を行った。

剥離強度試験においては、レンガと目地材での付着強度をレンガ造試験体の剥離強度として仮定した。そこで、Khalaf¹⁾の実験を参考に図-1に示すような試験体を作製した。万能試験機を用いて鉛直荷重を漸増させていき、目地位置において剥離が見られた時点で実験を終了し、目地部での剥離強度を求めた。

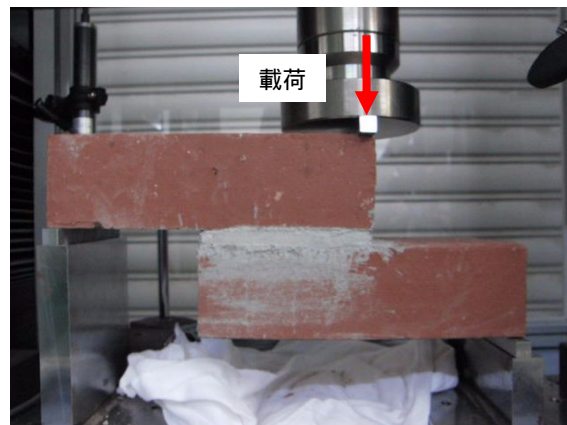


図-1 剥離強度試験の様子

せん断強度試験においては、図-2に示すようなレンガを、3段積みにしたレンガ造試験体を作製した。

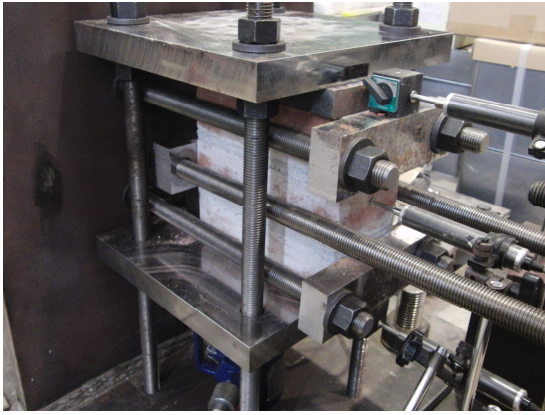


図-2 せん断試験体

せん断強度試験は、油圧ジャッキを用いて鉛直方向を拘束し、その拘束のもと、アクチュエーターを用いて水平方向から荷重を漸増させた。レンガと目地部分がせん断破壊した時点で実験を終了し、その時のせん断強度を調べた。また、この際の鉛直方向の拘束荷重の大きさとせん断強度との関係についても検討を行った。

油圧ジャッキで与える鉛直方向の拘束荷重に関しては、初期拘束荷重として 0, 10, 20, 30kN の 4 ケースに分けて実験を行った。

(2) 補修・補強方法に関する検討

レンガ造試験体の結果に基づき、有限要素解析によって、実験結果に関する破壊時の応力性状を確認した。また、鋼製ワイヤーを用いた補修・補強方法に関して、数値モデルを用いて検討を行った。

鋼製ワイヤーの効果に関する検討では、数値モデル作成にあたり Bourzam²⁾の実験を参考に、図-3 に示すような解析モデルを作成し、地震時挙動を想定した水平変位を作用させて、破壊に対する検討を行った。

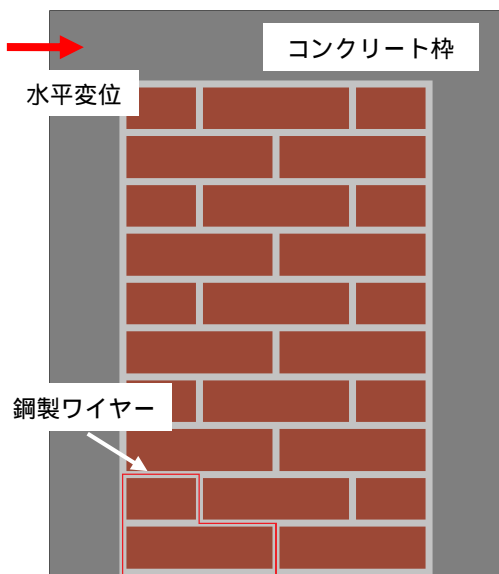


図-3 数値解析モデル概要

過年度の実験結果および解析的検討を踏まえ、レンガ造の部分モデルに関してレンガ・目地間で剥離が生じるような荷重を作用させ、その際の応力、ひずみ分布を確認することとした。今回の検討ではモデルのメッシュ数を十分に細かく分割する必要があったため、計算負荷との関係から鋼製ワイヤーとモルタルについては節点を共有する簡易モデルとして作製した。また、ワイヤー径は 2mm とし、物性地については硬鋼線に関する JIS 規格の機械的性質より定義した。

4. 研究成果

(1) 目地材の物性試験結果

モルタルの物性試験結果を表-1 に示す。現行基準モルタルの圧縮強度は 30.0 N/mm²以上である。一方、石灰入りモルタルの圧縮強度は平均値が 12.3N/mm²と低く、すべての試験体が 30.0 N/mm²を下回る結果となった。変動係数においては、現行基準のモルタル、石灰入りのモルタルともに 10 %未満となった。現行基準モルタルと石灰入りモルタルの圧縮強度を比較してみると、現行基準モルタルは石灰入りモルタルより 4 倍ほど大きい値となった。

表-1 モルタルの物性試験結果

	現行基準	石灰入り
圧縮強度	43.9	12.3
変動係数	4.1 %	6.8 %
引張強度	2.6	0.9
変動係数	39.6 %	9.3 %
弾性係数	27826	9877
変動係数	2.3 %	27.2 %

(単位：N/mm²)

現行基準モルタルの引張強度は、表-2 に示すように変動係数が 40 %ほどとなり、ばらつきが大きかった。現行基準モルタルと石灰入りモルタルの引張強度を比較してみると、圧縮強度と同様に現行基準モルタルの方が大きい値となり、3 倍ほどの強度となった。

圧縮強度と引張強度を比較すると、現行基準モルタルと石灰入りモルタルのいずれにおいても引張強度の方が小さく、現行基準のモルタルでは引張強度よりも圧縮強度の方が 17 倍ほど大きく、石灰入りモルタルでは圧縮強度が引張強度の 14 倍ほど大きい値となった。

現行基準モルタルと石灰入りモルタルの弾性係数の平均値を比較すると、現行基準モルタルの方が石灰入りモルタルよりも 2.8 倍程大きいことが分かる。つまり、石灰入りモルタルよりも現行基準モルタルの方が、剛性が高く、荷重が加わっても変形量が小さいと考えられる。

(2) レンガ造試験体の破壊強度

剥離強度の算定にあたっては、Khalaf⁽¹⁾の実験結果から算出した。図-4 に剥離強度試験の自由物体図を示す。図-4 に示す点 H をヒンジとして、モーメントの計算を行い、反力 R_A および剥離強度 f_{fb} は次のように計算される。

$$R_A (l_b - 0.5t_{bar}) = 0.5l_b W + 0.667l_{mj} F_{fb} + 0.5t_{bar} P \quad (1)$$

$$f_{fb} = \frac{(0.5l_b^2 - l_b t_{bar} + 0.5t_{bar}^2) P + (0.75l_b^2 + 1.25l_b t_{bar} + 0.5t_{bar}^2) W}{(0.44l_{mj}^2 w_b)(1.5l_b - t_{bar})} \quad (2)$$

$$F_{fb} = 0.667(l_{mj} f_{fb} w_b) \quad (3)$$

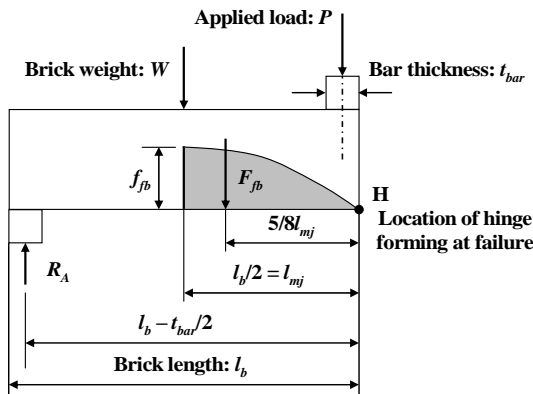


図-4 Khalaf の剥離強度算定方法

表-2 より現行基準モルタルと石灰入りモルタルの剥離強度を比較すると、現行基準モルタルは石灰入りモルタルより 0.1 N/mm^2 程大きい値となった。

表-2 剥離強度試験結果

	現行基準	石灰入り
剥離強度	0.47	0.37
変動係数	40.3 %	27.9 %

(単位： N/mm^2)

現行基準モルタルのせん断強度は、図-5 から、拘束荷重が 0 kN、10 kN、20 kN、30 kN で平均値がそれぞれ 1.35 N/mm^2 、 1.66 N/mm^2 、 2.07 N/mm^2 、 2.53 N/mm^2 となり、拘束荷重が大きくなるに伴い、せん断強度の値が大きくなっていることが確認された。石灰入りモルタルを用いた場合においても現行基準モルタルを用いた場合と同様の傾向となり、各拘束荷重におけるせん断強度はそれぞれ 1.04 N/mm^2 、 1.25 N/mm^2 、 1.39 N/mm^2 、 1.77 N/mm^2 となった。

また、剥離強度と比較すると、せん断強度の値は拘束荷重が 0 kN の場合において、現行基準モルタルを用いた場合で約 2.9 倍、石灰入りモルタルを用いた場合で約 2.8 倍大きく、曲げなどの引張力が働く状態に比べると、せん断方向への抵抗が大きいものと考えられる。また、現行基準モルタルを用いた場合

の方が、石灰入りモルタルを用いた場合と比べて 1.4 倍程せん断強度が大きかった。

2 軸応力状態において圧縮応力の法線方向に引張応力が働くため、モルタルの物性より、現行基準モルタルの方が石灰入りモルタルに比べて引張強度が強いため、現行基準モルタルの方がせん断強度の値が大きくなったと考えられる。

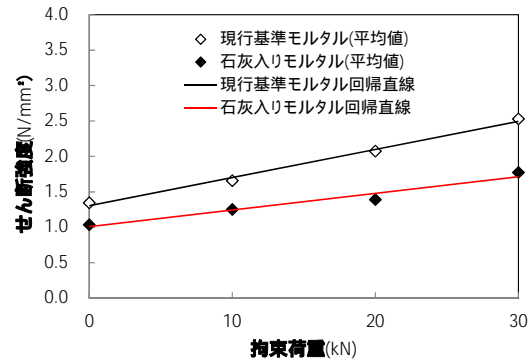


図-5 せん断強度試験における回帰分析結果

せん断強度 - 拘束荷重の関係性に関して、回帰分析によって重相関 R を求めた結果、現行基準モルタルを用いた場合で 0.99、石灰入りモルタルを用いた場合で 0.98 となり、せん断強度と拘束荷重の相関については、いずれのモルタルにおいても高い相関性がある。せん断強度試験結果および回帰分析による結果から、石灰入りモルタルを用いた場合に比べて現行基準モルタルを用いた場合の方が、水平力に対する抵抗が大きいことが明らかとなった。つまり、外乱である地震の水平力に抵抗するためにも、レンガ造構造物の補修・補強には現行基準のモルタルを用いることが望ましいと考えられる。

(3) 数値解析による検討

図-3 に示す数値解析モデルについて、鋼製ワイヤーの設置範囲は数値モデルの破壊開始位置に対する検討の一例を示すものである。図-6 に、水平変位を作用させた場合の剥離方向のひずみ分布を示す。

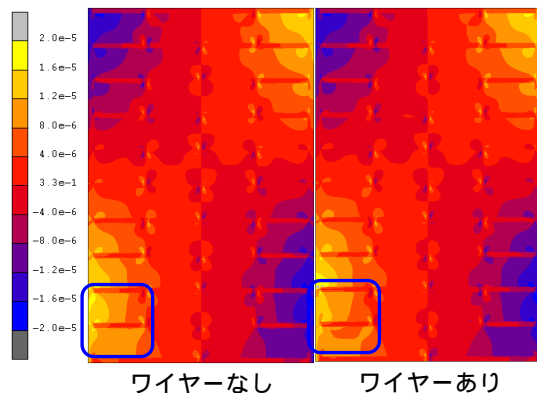


図-6 数値解析モデルのひずみ分布

ひずみ分布を確認すると、鋼製ワイヤーを埋め込むことにより、ワイヤーによって囲まれた部分のレンガ - 目地部におけるひずみの値が小さくなっている。剥離ひずみの低減により、剥離破壊に対する強度としては大きくなっており、鋼製ワイヤーによる補修・補強効果が期待できるものと考えられる。また、補強策として鋼製ワイヤーによって囲む範囲を重ねることにより、剥離応力に達する分布範囲の拡大が抑制される結果となり、レンガ造構造物全体としては破壊の進展が抑制されるものと考えられる。

<参考文献>

- 1) Fouad M. Khalaf, "New test for determination of masonry tensile bond strength." *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, Vol.17, No.6, pp.725-732, 2005.
- 2) Bourzam, A., Goto, T. and Miyajima, M. : Shear capacity prediction of confined masonry walls subjected to cyclic lateral loading, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp. 692-704, 2008.
- 3) 安井一貴, 森實直人, 大内雅博: 自己充填モルタルのせん断付着強度, コンクリート工学年次論文集, 32 巻, 1 号, pp.1637-1642, 2010.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計3件)

岸祐介, 北原武嗣, 野阪克義, 伊津野和行: 歴史的レンガ造構造物の剥離およびせん断強度に関する実験的検討, 第10回複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 6頁, 2013年11月22日, 日本建築学会建築会館(東京都港区)。

瀧深瑞翔, 富岡大暉, 岸祐介, 北原武嗣: 歴史的レンガ造構造物における目地部の剥離・せん断強度に関する実験的検討, 第40回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集(CD-ROM) 2013年3月15日, 宇都宮大学(栃木県宇都宮市)。

Yusuke Kishi, Takeshi Kitahara, Katsuyoshi Nozaka and Kazuyuki Izuno: Experimental evaluations for peeling and shear strength of masonry arch bridges, *Proc. of the 15th World Conference on Earthquake Engineering*, Lisbon, Portugal, Paper No.4123 (CD-ROM), 8 pages, September 24-28, 2012.

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

[その他]
ホームページ等

研究代表者のHP:

http://www.geocities.jp/eq_galsec/index.html/researchmap:

http://researchmap.jp/disaster_prevention/

6. 研究組織

(1)研究代表者

岸 祐介 (KISHI, Yusuke)

首都大学東京・都市環境学部・助教

研究者番号: 50613999

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

野阪 克義 (NOZAKA, Katsuyoshi)

立命館大学・理工学部・教授

研究者番号: 50373105