

歴史的レンガアーチ橋を構成する要素の 圧縮強度に関する実験的研究

Compressive strength tests of the components in historical masonry arch bridges

岸祐介¹・北原武嗣²・野阪克義³・伊津野和行⁴・尼崎省二⁴

Yusuke Kishi, Takeshi Kitahara, Katsuyoshi Nozaka, Kazuyuki Izuno and Shoji Amasaki

¹関東学院大学助手 工学部 社会環境システム学科 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)
Research Assistant, Kanto Gakuin University, Dept. of Civil Engineering

²関東学院大学教授 工学部 社会環境システム学科 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)
Professor, Kanto Gakuin University, Dept. of Civil Engineering

³立命館大学准教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Associate Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

⁴立命館大学教授 理工学部 都市システム工学科 (〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)
Professor, Ritsumeikan University, Dept. of Civil Engineering

Preserving industrial heritages, such as historical masonry arch bridges, it is important task for us to carry on our culture for next generation. In this paper, compressive tests were conducted on structural members of masonry arch bridges in order to evaluate the material properties, including Young's modulus and strength. Furthermore, mortar in different compounding ratio were prepared to compare the material properties between old compounding ratio and new one. Test results revealed that the compressive strength of mortar using limestone was lower than the mortar without limestone. Test results on stacked bricks also indicated that separation between mortar and brick could occur under the compression stress due to the discontinuity.

Keywords : *experimental test, masonry structure, material properties, limestone*

1. はじめに

日本では明治・大正期に数多くのレンガ構造物が建設されたが、濃尾地震、関東地震によって地震への脆弱性が浮き彫りとなり、鉄筋コンクリートの普及に伴い急速に衰退していった。現在では、レンガアーチ橋など少数の構造物が鉄道橋のような社会基盤施設として残されており、その外観や歴史性から近代化遺産として注目を集めている。一方、建設からの経過年数が100年近くなるものは劣化が激しく進み、既に建て替えられてしまっているものも多い。これら近代化遺産を将来に継承していくためには、早急な補修・補強が求められている。

組積造に関する実験では、既設構造物のコア抜きなど幾つかの検討がなされている^{例えは 1)-3)}。セメントが国産化される以前に建設されたレンガ構造物では、モルタルの凝結材として石灰が用いられているものや、モルタルの配合質量比率において砂を多く練り混ぜたモルタルが用いられていたことが確認されている⁴⁾。このようなモルタルの配合質量比率や配合材料の違いは、目地材としての強度など、力学的特性に影響を与えることが明らかである。しかし、その定量的な評価に関してはあまり言及されていない。

そこで本研究では、歴史的レンガアーチ橋を構成する要素として目地材であるモルタルの配合質量比率に

着目し、モルタル単体の強度およびレンガ積み試験体の強度を調べるために圧縮強度試験を行った。

2. 実験内容

実験では、レンガ、目地材（モルタル）およびレンガ積み試験体に関して圧縮強度試験を行い、それぞれの弾性係数および強度を求めた。モルタル試験体として、セメント、石灰および砂の配合質量比率が異なる3種類の試験体を作製した。また、レンガ単体についても圧縮強度試験を行い、配合質量比率の異なるモルタルを用いたレンガ積み試験体についても圧縮強度試験を行った。

(1) 試験体概要

a) モルタル試験体

モルタル試験体に関して、材料は普通ポルトランドセメント、標準砂（乾燥した天然珪砂）を用いた。石灰は市販の消石灰（水酸化カルシウム）を用いた。

まず JIS に規定されている、ポルトランドセメントと砂の比率が 1 : 3 となるモルタルを作製した（以降は MO-103 と記す）。これに対して、ポルトランドセメントに対する砂の比率を JIS 規格より増やし 1 : 4 としたもの（MO-104）と、凝結材として石灰が混合されている場合を考慮し、ポルトランドセメント・石灰・砂の比率を 1 : 1 : 3 としたもの（MO-113）を作製した。水セメント比についてはすべて 0.5 とした。ただし、MO-113 についてはポルトランドセメント+石灰の混合物に対して 50%の水を配合しているため、ポルトランドセメントに対する水セメント比は 1.0 となっている。JIS 規格以外のモルタルの配合質量比率の選定に関しては、宮谷²⁾の研究論文を参考にして明治・大正期に建設されたレンガ造建築物に用いられた目地の配合より、特に多く使用された配合を選定した。各モルタルの配合質量比率および試験体数を表 1 に示す。

モルタルの生成に関して、石灰を用いたモルタルは、あらかじめセメントと石灰を混ぜてから、その混合物を他の材料と攪拌させた。モルタル試験体の形状は $\phi 50\text{mm} \times 100\text{mm}$ の円柱体とし、配合質量比率ごとに圧縮試験用 6 体ずつ計 18 体作製し、養生期間は 21 日とした（写真 1 を参照）。

試験体の形状を円柱体としたことに関して、篠崎ら⁵⁾は既存建築物の仕上げモルタルに関する、圧縮強度試験およびその評価に関する検証を行っている。その結果、圧縮強度試験体の形状に関しては、矩形供試体と円柱供試体での強度差は認められなかったと報告している。

b) レンガ試験体

レンガ試験体は焼成元の異なる 2 種類の普通レンガを、そのまま圧縮試験の試験体として使用した。210×100×60mm（一枚角）と 105×100×60mm（半枚角）のレンガに対して、それぞれキャッピングを施した。

表 1 目地材の配合質量比率および試験体数

Type	セメント	石灰	砂	試験体数
MO-103	1	—	3	6
MO-104	1	—	4	6
MO-113	1	1	3	6

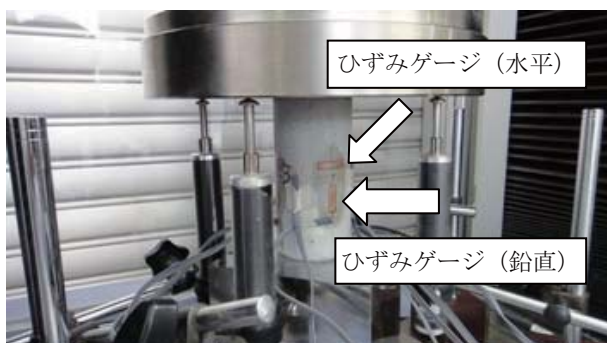


写真 1 モルタル試験体



写真 2 レンガ試験体（一枚角レンガ）

試験体数はモルタル試験体の試験体数に合わせて各 6 体とした（写真 2 参照）。各試験体には A～F のアルファベットを付記しており、キャッピングの方法については、JIS A 1132 に従った。

c) レンガ積み試験体

レンガ積み試験体は、一枚角および半枚角のレンガを用いて 2 段積みの状態にし、目地には配合質量比率の異なる 3 種類のモルタルをそれぞれ使用して作製した（写真 3 参照）。試験体数は一枚角を用いて各タイプ 3 体ずつ作製し、半枚角を用いて各タイプ 1 体ずつ作製した。目地の厚みはおよそ 10mm とし、レンガ試験体と同様にキャッピングを施した状態で圧縮試験を行った。また、JIS 規格のモルタルのみ、2 段積みの試験体とは別に 3 段積みの試験体（写真 4 参照）を 3 体用意し、2 段積みの試験体との結果を比較できるようにした（表 2 参照）。モルタル同様に試験体は空中養生のみとし、材齢 21 日で試験を行った。

(2) 実験方法

モルタルの圧縮試験は、本来 JIS R 5201「セメントの物理試験」に従うが、今回は試験体の形状を角柱体ではなく円柱体としたため、載荷速度のみ JIS R 5201 に従い、他の部分は JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に従った。試験体の形状を円柱体としたのは、一度に大量の試験体を作製するため、三連型枠に比べて安価なアルミ製モールドを用いたためである。また、モルタルのポアソン比を測定するためにひずみゲージを鉛直方向と水平方向に分けて貼付するようにした。このとき、角柱体ではガラス板を被せた面を研磨することが困難なため、円柱体を採用した。また、載荷中の試験体の変形量をひずみゲージ式変位計によって測定した。モルタルの割裂引張試験に関しては、JIS A 1113「コンクリートの割裂引張強度試験方法」に従った。ひずみゲージはモルタル試験体の側面 4 方向に一軸ゲージを鉛直方向および水平方向の 2 枚ずつ貼り付けた（写真 1 参照）。

レンガの圧縮試験は、JIS R 1250「普通れんが」に記載されている方法を参考にした。ただし、今回の試験では試験開始の 24 時間前に水に浸ける作業は行わず、試験体も記載されている半枚角のレンガのみではなく一枚のレンガを使用した。これは、次に述べるレンガ積み試験体と試験条件を揃えるためである。載荷はレンガの上下面（一枚角：210×100mm、半枚角：105×100mm）に鋼板（写真 3 参照）を置いて圧縮力を負荷させ、試験体の変形量を変位計によって測定した。

レンガ積み試験体の圧縮試験においても、JIS R 1250 に記載されている方法を参考にした。レンガの試験同様に試験体の上下面に鋼板をおいて圧縮力を負荷させ、鋼板間の変位量をひずみゲージ式変位計によって測定した。

表 2 レンガ積み試験体

Type	段数	目地の配合質量比率			試験体数	
		セメント	石灰	砂	一枚角レンガ	半枚角レンガ
MS-103	2	1	—	3	3	1
MS-104	2	1	—	4	3	1
MS-113	2	1	1	3	3	1
3 段積み	3	1	—	3	3	—

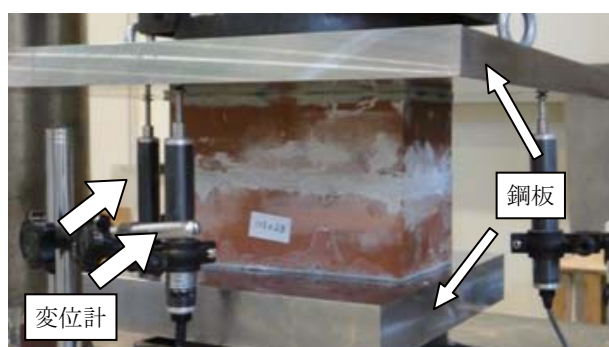


写真 3 レンガ積み試験体（一枚角レンガ 2 段積み）

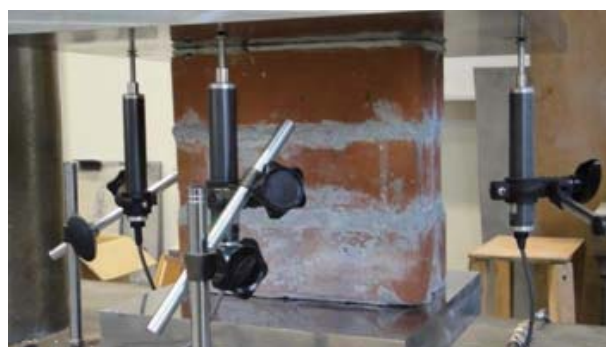


写真 4 レンガ積み試験体（一枚角レンガ 3 段積み）

表3 使用器具一覧

種類	メーカー	型番
変位計 (ひずみゲージ式)	東京測器研究所	CDP-50
ひずみゲージ	東京測器研究所	PFL-10-11-3LT
データロガー	東京測器研究所	TDS-530
万能試験機 (300kN)	島津製作所	オートグラフ AG-300kNXplus
万能試験機 (2000kN)	島津製作所	UH-F200C

表3に実験に使用した器具の一覧を記す。レンガ試験体およびレンガ積み試験体の圧縮試験においては、ひずみゲージを貼付しなかった。その理由に関しては、レンガ試験体およびレンガ積み試験体の実験結果の中で記す。

3. 実験結果

(1) 配合質量比率の異なるモルタルの圧縮試験結果

図1はモルタル試験体の圧縮強度を、配合質量比率ごとに描画したものである。また表4に配合質量比率ごとの圧縮強度の平均値を記す。モルタルの圧縮強度に関して、JISではモルタルに関する強度規格は定められていない。

JISでは、セメントがセメントペーストとして単独で用いられることがほとんど無いため、セメントの強度をモルタルの強度として判断している⁶⁾。そこで、JISに定められているセメントの28日強度規格(30MPa以上)と比較すると、本実験で作製した3種類のモルタルのうちMO-113の試験体のみ規格値を下回った。MO-113のみ規格値よりも実験値の方が小さい値となった原因として、ポルトランドセメントに対する水セメント比が他の2つの配合質量比率のモルタルより、大きかったためだと考えられる。一般に水セメント比が大きいほど、圧縮強度が低下する傾向があることが知られており、そのため配合質量比率間で圧縮強度に差が生じたものと考えられる。

配合質量比率の異なるモルタル同士の圧縮強度の平均値を比較すると、MO-103とMO-104では、MO-103の方が1.3%大きい値となっているが、MO-113においてはMO-103の51%しか強度を有していなかった。圧縮強度の平均値に関して、モルタルの配合質量比率に着目すると、MO-103に比べMO-104はポルトランドセメントが5%少ない配合となっている。しかし、MO-104の強度試験結果では圧縮で1.2%程度の強度低下に留まり、セメント含有率の影響は試験体タイプ間で顕著には現れなかった。砂の配合質量比率はMO-113の方がMO-103より15%少ない配合となっており、その不足分に対して石灰による配合が行われている。我が国では、1875年(明治8年)にポルトランドセメントが国産化⁷⁾される以前から石灰を凝結材として用いている。しかし、強度試験結果より、石灰を凝結材として用いても強度が期待できないことが確認できた。

圧縮弾性係数の平均値を表5に示す。なお表5中の弾性係数の値は、圧縮応力-ひずみ曲線において初期接線剛性を算出した。表5の平均値を見ると、ひずみゲージ計測、変位計計測のいずれにおいてもMO-104が最も剛性が大きくなることが確認できた。このことから、細骨材として使用された砂の含有率は、試

表4 モルタル試験体の配合質量比率別の圧縮強度

Type	圧縮強度 (平均値) : MPa
MO-103	42.2
MO-104	41.7
MO-113	17.1

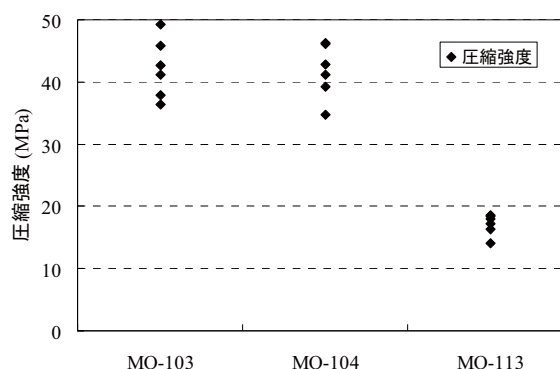


図1 モルタル試験体の圧縮強度

験体の剛性に影響するものと考えられる。一方、MO-113 が最も小さい剛性であることが確認できた。これは、他の 2 タイプと比べて砂の含有率が低いことが影響していると考えられる。今回の実験では、砂の配合質量比率が MO-113 と同じで、セメントと砂のみで配合を行った試験体（セメント：石灰：砂が 2：0：3 となる試験体）を用意していなかったため、セメントと比較して石灰を使用した場合に剛性がどのように変化するのかの確認は行えなかった。

ひずみゲージを使用した場合、求められるひずみはゲージの貼付箇所（小範囲）で生じるひずみである。一方で、変位計を使用した場合、試験体の高さ方向全体を対象としてひずみを算出した。そのため局所的なひずみと、モルタル試験体全体から算出するひずみでは、写真 5 のように破壊性状が影響すると考えられる。ひずみゲージが貼付されているモルタル表面が剥がれるように破壊が生じ（写真 7 赤丸）、試験体の高さ全体に対して生じるひずみとひずみゲージ貼付部分で生じるひずみが異なる場合、弾性係数を求める際に変化量として分母に用いるひずみの値が、変位計計測の方が大きい値となるため、弾性係数は変位計計測の値が小さくなる。特に、ひずみゲージを用いた場合では、モルタル試験体の上下面が載荷板に接して生じる摩擦は考慮されない。レンガ造を形成する際には目地材はレンガに挟まれた状態になり、レンガとの接着面に生じる摩擦は考慮する必要がある。このことから、得られた弾性係数を数値モデルに用いることを考慮し、変位計計測により全体から得られた数値に関して述べていく。

また表 6 に、モルタル試験体の配合質量比率ごとのポアソン比を示す。ポアソン比の算出は、鉛直ひずみと水平ひずみの関係が理想型（線形関係）にある状態での値を求めている。配合質量比率ごとに平均値を比較すると、MO-113 が 0.21 と最も大きい値を示し、MO-104 が 0.16 と最も小さい値となった。この結果から、MO-104 が圧縮により最も体積変化の影響を受けやすいことが確認できる。

表 5 モルタル試験体の圧縮弾性係数（平均値）

Type	ひずみゲージ計測	変位計計測
MO-103	24.6	9.75
MO-104	29.1	10.6
MO-113	10.2	5.54

（単位：GPa）

表 6 モルタル試験体のポアソン比

タイプ	ポアソン比（平均値）
MO-103	0.20
MO-104	0.16
MO-113	0.21



写真 5 モルタル試験体の破壊の様子

(2) レンガの圧縮試験結果

レンガの圧縮試験は一枚角、半枚角それぞれ 6 体行い、強度および弾性係数は平均値を採用した。今回レンガ試験体では一枚角 3 体にひずみゲージ貼付して圧縮試験を行ったが、載荷後、すぐにレンガの表面が剥離したと思われ、レンガに貼付したひずみゲージは全て計測不能となっていた。そのため、残りの一枚角レンガ 3 体および半枚角レンガ 6 体にはひずみゲージの貼付を行わず、ひずみは変位計より得られた計測値と試験体寸法を用いてひずみを算出し、ひずみゲージのデータは用いないものとした。また、以降に記すレンガ積み試験体においても、レンガ試験体での結果を参考に、ひずみゲージの貼付は行わなかった。

図 2 は、一枚角、半枚角それぞれのレンガ試験体における圧縮試験結果より、変位計の計測変位量と試験体高さからひずみを算出した場合の応力-ひずみ曲線を描いたものである。表 7 にレンガ試験体の弾性係数および圧縮強度の平均値を種類別に記す。弾性係数に関してはモルタル試験体と同様に応力-ひずみ曲線の初期接線剛性を算出した。

表 7 レンガ試験体の圧縮弾性係数の平均値

Type	弾性係数：GPa	圧縮強度：MPa
一枚角	7.64	63.6
半枚角	9.27	72.8

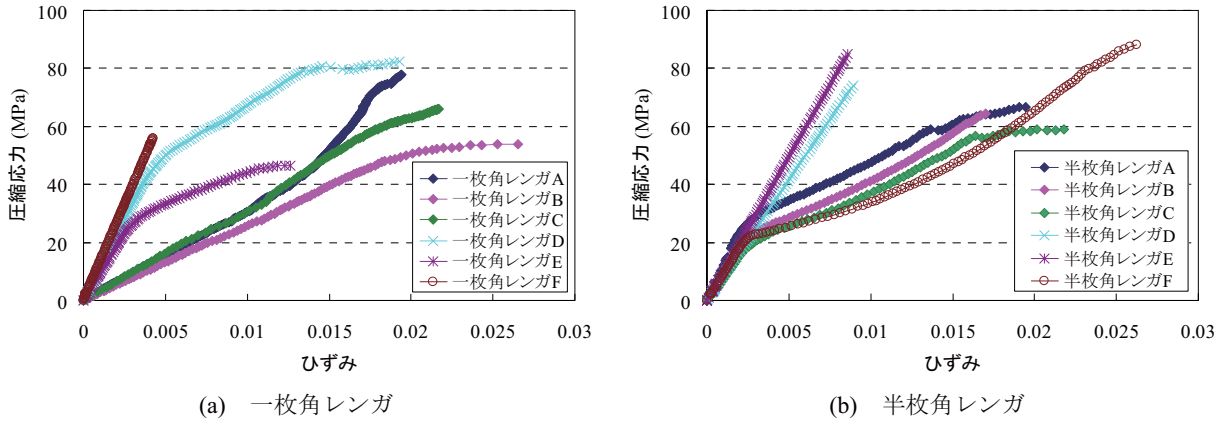


図 2 レンガ試験体の圧縮応力-ひずみ曲線

図 2 を見ると、一枚角レンガで初期剛性が大きく異なっていることが確認できる。レンガは生成段階で載荷面の上下で寸法が異なるなどの形状の個体差や組成自体にも個体差がある。試験体の寸法による個体差は、ノギスによる寸法の実測値を応力の算定に用いているため、結果に影響を与えないと考えられ、初期剛性の違いはレンガの組成による影響だと考えられる。弾性係数の平均値に着目すると、半枚角レンガに比べて一枚角レンガの方が、剛性が小さいことが確認できた。またモルタル試験体の値（変位計計測結果）と比較すると、両タイプのレンガともに MO-103、MO-104 よりは剛性が小さいことが確認できる。

表 7 に一枚角、半枚角のレンガ試験体に関する圧縮強度の平均値を記す。一枚角レンガと半枚角レンガの圧縮強度を比較すると、半枚角レンガの方が 14% 大きい値となった。これは弾性係数の場合と同様に、焼成元が異なることが影響していると考えられる。モルタルの試験結果と比較すると、圧縮強度の平均値は一枚角レンガで MO-103 の 1.5 倍、半枚角レンガで 1.7 倍の値となっており、モルタルに比べて強度が高いことが確認できる。圧縮強度の値を JIS の規格値と照らし合わせると、一枚角レンガ、半枚角レンガともに最も強度の大きい 4 種に分類されることが確認できた。

(3) レンガ積み試験体の圧縮試験結果

レンガ積み試験体においては、圧縮強度、弾性係数ともに一枚角レンガを使用した 3 体から平均値を求め、半枚角レンガを使用した 1 体については値を別にまとめた（表 8 参照）。ただし、MO-104 の目地材を使用したケースのみ、載荷前にレンガ-目地間での剥離が生じてしまったため、平均値は一枚角レンガを使用した 2 体から平均値を算出した。また 3 段積み試験体に関しては、半枚角レンガを使用した試験体を作製していないため、一枚角レンガを使用した 3 体から求めた平均値だけをまとめた。

表 8 にレンガ積み試験体のタイプごとの圧縮強度の平均値を示す。圧縮強度の平均値を確認すると、一枚角レンガを使用した場合のタイプごとの強度関係は MS-104 が最も大きい値を示し、MS-113 が最も小さい値となった。この強度関係は、モルタル単体における強度関係と異なる。ただし、石灰入りのモルタルを用いた場合に最も強度が低下するのは同様の傾向にある。半枚角のレンガを使用した場合の強度関係に関しては、目地に用いたモルタルの強度と同じ大小関係となり、一枚角レンガと半枚角レンガを使用した場合で強度関係に違いが生じた。

圧縮強度の平均値をレンガ試験体と比較すると、レンガ積み試験体では半枚角レンガの MS-103 を除いたいずれの目地材を用いた場合でもレンガ単体の圧縮強度の平均値よりも低い値となった。またモルタル試験体と比較を行った場合、いずれの目地材の配合質量比率においても、レンガ積み試験体はモルタル試験体より圧縮強度が大きいことが確認できる。

表9は、レンガ積み試験体における圧縮試験結果より、変位計による計測変位量と試験体高さからひずみを算出した場合の弾性係数の平均値を示している。ただし、MS-104に関しては試験体のうちの一体が、載荷前に目地とレンガの間に剥離が生じていたため、弾性係数の平均値の算出には用いていない。

弾性係数の平均値に着目すると、モルタル試験体と同じく砂の配合質量比率の高い MS-104 において剛性の値が最も大きくなった。一方、石灰入りの目地材を用いた MS-113 に比べて、JIS 規格の目地材を用いた MS-103 が最も低い剛性を示した。表 9 より 2 段積みの試験体と 3 段積みの試験体で弾性係数の平均値を比較すると、3 段積みの試験体の剛性は 2 段積み試験体の 2 倍以上の値となった。

圧縮による破壊性状は写真 6 のようにレンガ・モルタルの双方で亀裂が生じていることが確認できる。これは、載荷された際、目地の厚さが均一でなかったり、レンガの面が平らでなかったりしたために、圧縮応力の不均一が生じたものと考えられる。また、破壊されたレンガ積み試験体を確認すると、鉛直方向の破壊面とは別にレンガと目地の層が剥がれていた。

本実験で計測されたモルタルのポアソン比は、林ら⁸⁾が示したレンガのポアソン比 (0.19) とほぼ同じである。この場合、レンガと目地それぞれの単体に圧縮応力のみが作用したときの水平方向に生じるひずみは、弾性係数の大きいモルタルのほうが小さくなる。レンガ積み試験体はこのように弾性係数の異なる物体 (レンガと目地) が重なっているため、レンガ積み試験体に圧縮応力のみが作用したとしても、レンガと目地の境界付近には水平方向 (境界面に対して水平) の応力が生じることになる。これにより境界面での剥離が生じたと考えられる。

このことから、せん断や引張でなく、圧縮力のみが作用した場合でもレンガと目地の間で剥離が生じるものと推測される。このような、圧縮力による剥離が生じた後に引張が作用した場合、レンガと目地の間では引張力を伝達することができない状態になると考えられ、今後、レンガ積み構造物の挙動を把握するうえで重要ではないかと考える。ただし、どの程度の圧縮応力でレンガと目地が剥離するかは今回の実験のみでは確認できず、今後の課題である。

モルタル単体の圧縮強度はレンガ単体の圧縮強度の25%~59%程度であるのに対し、レンガ積み試験体では目地部で先に破壊が生じることはなく、一枚角レンガを使用した場合はレンガ単体の圧縮強度の64%~77%程度、半枚角レンガを使用した場合は60%~114%に達したところでレンガとともに破壊した。モルタル単体の供試体は高さ100mmの円柱体であり、写真7に示すように圧縮応力から約45度傾いたせん断応力が

表 8 レンガ積み試験体の圧縮強度の平均値

Type	レンガの タイプ	圧縮強度 : MPa
MS-103	一枚角	47.1
MS-104		48.8
MS-113		40.5
3 段積み		47.1
MS-103	半枚角	83.5
MS-104		55.2
MS-113		43.8

表 9 レンガ積み試験体の弾性係数の平均値

タイプ	レンガの タイプ	弾性係数 : GPa
MS-103	一枚角	4.37
MS-104		12.8
MS-113		8.95
3 段積み		10.9
MS-103	半枚角	15.8
MS-104		4.48
MS-113		9.06



写真 6 レンガ積み試験体の破壊の様子

大きくなる面での崩壊が見られるが、レンガ積み試験体のモルタル層の厚さは10mmと薄く、このようなせん断応力による崩壊が抑制される応力状態になっていたと考えられる。また、たとえせん断応力により亀裂が生じたとしても、厚さが10mmであり上下をレンガで拘束されているために、亀裂を境にずれが生じ直接レンガ積み構造としての崩壊にいたるとは考えられず、モルタル単体の圧縮強度よりレンガ積み供試体の圧縮強度が増加するものとする。

4. まとめ

実験では、レンガ、目地材（モルタル）およびレンガ積み試験体に関して圧縮強度試験を行い、それぞれの弾性係数および強度を求めた。モルタル試験体として、セメント、石灰および砂の配合質量比率が異なる3種類を作製した。また、レンガ単体についても圧縮強度試験を行い、配合質量比率の異なるモルタルを用いたレンガ積み試験体についても強度試験を行った。以下に本実験から明らかになったことを記す。

- ①モルタル試験体を配合質量比率ごとに比較すると、JIS規格のモルタルが引張、圧縮ともに最も強度が大きいたことが確認できた。圧縮の弾性係数に関しては、砂の配合質量比率が多い場合に剛性が最も大きくなり、石灰入りのモルタルは強度、弾性係数ともに最も低い値を示した。
- ②レンガ試験体においては、圧縮弾性係数は石灰を練り混ぜた場合を除いて、モルタルより小さい値となることが確認できた。また、圧縮強度に関してはいずれの配合質量比率のモルタル試験体よりも、レンガの方が大きいたことが確認できた。
- ③レンガ積み試験体においては、圧縮強度の大小関係は目地の圧縮強度の大小関係と同様の傾向があることが確認できた。また2段積み試験体と3段積み試験体では、同程度の圧縮強度を得ることが確認できた。
- ④破壊形式として、圧縮力のみ作用したとしてもレンガと目地との境界面で剥離が生じることが確認できた。また、縦割れはレンガか目地のどちらかで生じるのではなく、同時に生じることが確認できた。

謝辞：本研究は文部科学省グローバルCOEプログラム「歴史都市を守る『文化遺産防災学』推進拠点」（立命館大学）の一環として実施されたことを付記する。

参考文献

- 1) 木野淳一，菅野貴浩，古谷時春：既設レンガ構造物から採取したコアの強度試験，土木学会第56回年次学術講演会概要集，第5部，pp. 222-223，2001.
- 2) 田所敏也，鳥取誠一：レンガ積み構造における基礎材料試験，土木学会第58回年次学術講演会概要集，第5部，pp. 491-492，2003.
- 3) 富永善啓，定岡聖二，中村由香里，西村泰志：レンガ組積造建築物の構造性能に関する実験的研究（その1）組積要素体の圧縮試験とせん断試験，平成18年度日本建築学会近畿支部研究報告集，pp. 361-364，2006.
- 4) 宮谷慶一：明治期組積造建築の目地モルタルにおける石灰の使用について，日本建築学会計画系論文集，第585号，pp. 169-176，2004.
- 5) 篠崎徹，藤沢正視，阿部秋男，梅本宗宏：既存建築物の仕上げモルタル圧縮強度試験および評価に関する研究 モルタル圧縮強度に与える形状効果に関する研究，日本建築学会大会学術講演概要集，pp. 1033-1034，1998.
- 6) 社団法人日本材料学会：建設材料実験，2001.
- 7) 川村満紀：土木材料学，森北出版，1996.
- 8) 林章二，松波秀子，宮谷慶一：歴史的建造物の保存修理における研究開発の課題とその考察，清水建設研究報告，第86号，pp. 43-50，2007.