歴史的煉瓦造建築の壁の面外曲げ実験

EXPERIMENTS OF HISTORICAL BRICK WALLS SUBJECTED TO OUT-OF-PLANE BENDING

牛谷和弥 — * 1 田中千裕 — * 2
金尾伊織 — * 3 西村清是 — * 4
北條稔郎 — * 5 橋本宗明 — * 6
荒木勇多 — * 7 森迫清貴 — * 8

Kazuya USHITANI — * 1 Chihito TANAKA — * 2
Iori KANAO — * 3 Kiyoshi NISHIMURA — * 4
Toshio HOJO — * 5 Muneaki HASHIMOTO — * 6
Yuta ARAKI — * 7 Kiyotaka MORISAKO — * 8

キーワード：

煉瓦壁, 漆喰目地, 面外曲げ, 曲げ耐力, 復元性

Keywords:

Brick wall, Lime plaster joint, Out-of-plane bending, Bending strength, Stability

This paper presents data obtained from experiments on an historical brick building. Two kinds of experiments were conducted. First, an out-of-plane bending test of the brick wall, and second, a material test for brick with lime plaster joints. The following information is obtained:

(1) Valuable material test data of the lime plaster joints.

(2) For a simple supported brick wall specimen, serious strength deterioration occurs from cracks in lime joints. However, brick walls reinforced by aramid fiber or SRF sheet do not show serious strength deterioration.

(3) The fixed wall specimen has high strength due to arch action.

1. はじめに

近年では外国からの観光客も増加し、街並みが観光資源として認識され、街並み保存の機運が高まってきている。そうした中、日本には数多くの煉瓦造建物が現存し、日本各地で煉瓦造建物の保存が進められてきている。2014年には、東京駅に免震構造による耐震補強が施され、建設当時の姿に復元された。建設から100年経った今も駅として利用され、当時の様子を伝える貴重な建物となっている。しかし、煉瓦造建物の耐震補強に関しては、北海道建築技術協会によって「煉瓦造建築物の耐震診断基準¹⁾」がまとめられているものの、煉瓦造の挙動には不明な点が多いため、鉄筋コンクリート造の耐震診断基準に従った基準となっている。それゆえ、煉瓦造の性能評価には未だ不十分な点もある。また、煉瓦造は比較的壁厚が厚いことが多いため、面内の水平耐力は多くの場合十分期待できるが、面外の水平耐力についての評価はなく、面外曲げに対する補強が問題となっている。実際、煉瓦造の崩壊挙動の特性として、煉瓦壁は倒壊ではなく、局所破壊の集合による崩壊であり、面外曲げによって崩壊に至るという報告があるが²⁾、面外耐力をどのように評価すべきか明確になっていない。文献3)は煉瓦壁の面外挙動に対する実験的研究であり、佐野²⁾が提案する式との耐力比較を行っているが、試験体は新しく作られた煉瓦壁であり、現存している煉瓦壁を対象とした実験は見られない。また、目地の特性が煉瓦造の挙動に影響を与えると考えられるが、目地にはモルタル目地の他、石灰が含まれた漆喰目地があり、石灰の配合が多い程、強度が低下するという

報告があるが⁴⁾、目地による壁耐力への影響については、考慮されていないのが現状である。

上記のように煉瓦造の耐震性能評価方法が確立されていない中、歴史的煉瓦造建築であり、近代化産業遺産に指定されている倉敷アイビースクエア(1889年)における煉瓦壁の一部を保存する計画があり、著者らの一部は、景観を崩すことなく耐震性能を向上させる補強方法を提案することとなった。しかし、面外曲げ耐力の評価方法が明確ではないこと、目地が漆喰目地であり参考とする文献および実験結果も極めて乏しい状況であることから、耐震補強によって耐震性能を確保するため、保存対象建物の壁を使って採用候補の補強方法について実物大実験を実施した。また、煉瓦および目地の材料試験も行った。それらの実験結果を報告する。

2. 煉瓦壁の補強方針

煉瓦壁の耐震性能の検討において、煉瓦壁の長期荷重および地震荷重に対する煉瓦壁の倒壊および崩落を防止しなければならない。経年劣化や不陸があるものの、長年自立していることを考えると、現状で長期荷重で倒壊することは考えにくい。しかし、地震荷重に対しては、耐力の評価方法が明確ではなく、倒壊の危険性を否定できない。地震時の耐震性を上げるための方法として、意匠計画・施工性・コスト・工期等を考慮した結果、以下の方針が決定された。

① 面内方向の地震力に対しては、本実験に先行して行われたせん断強度実験結果から、目地のせん断耐力で抵抗できると考えら

¹⁾ 前田建設工業 修士(工学)
(〒102-0071 東京都千代田区富士見二丁目10番2号)

²⁾ 京都工芸繊維大学大学院 大学院生

³⁾ 京都工芸繊維大学 教授・博士(学術)

⁴⁾ ㈱浦辺設計 代表取締役

⁵⁾ ㈱北條建築構造研究所 会長・博士(工学)

⁶⁾ ㈱北條建築構造研究所 所長

⁷⁾ ㈱北條建築構造研究所 修士(工学)

⁸⁾ 京都工芸繊維大学 学長・博士(工学)

¹⁾ MAEDA CORPORATION, M. Eng.

²⁾ Graduate Student, Kyoto Institute of Technology

³⁾ Prof., Kyoto Institute of Technology, Ph.D.

⁴⁾ Representative Director, URABESEKKEI

⁵⁾ President, Hojo Structure Research Institute, Dr. Eng.

⁶⁾ Chief, Hojo Structure Research Institute

⁷⁾ Hojo Structure Research Institute, M. Eng.

⁸⁾ President, Kyoto Institute of Technology, Dr. Eng.

れるため、無補強とする。

- ② 面外方向の地震力に対しては、控え壁としてブレース架構を一定スパンで設け、その間に煉瓦の脱落防止と面外変形拘束を目的とした間柱を立て、ブレース架構と間柱を水平構面部材で繋ぎ、地震時の面外水平力はブレース架構で負担する。

さらに、崩落防止を目的として、景観を保全しなければならない壁面はアラミドロッド挿入による目地補強を施し、外観上問題ない壁面には SRF シート貼り付けによる煉瓦壁補強を併用する。なお、面外曲げの補強方法として、ステンレスピンを用いた補強方法⁵⁾も考えられるが、ここでは崩落防止効果を期待してアラミドロッド等の方法を検討することとした。

以上の方針に基づき、無補強の壁の面外加力実験および、補強効果を検討するため、補強した壁の面外加力実験を実施した。壁から試験体を切り出し、実験室へ運搬することは極めて困難であったことから、現地の壁に治具を取り付けて実験を実施した。

3. 材料実験

対象とした煉瓦壁の煉瓦および目地の材料特性を調べるため、煉瓦壁より試験体を取り出し、煉瓦および目地の圧縮実験、割裂実験を実施した。なお、目地は漆喰目地であるが、材料分析などはしていないため、石灰・砂・セメントの配合比率は不明である。材料実験は京都工芸繊維大学で実施し、500kN 万能試験機を使用した。なお、今回の材料実験用の試験体における目地の充填率は、ほぼ 100%であった。

表1 煉瓦圧縮実験

	幅(mm)	奥行(mm)	高さ(mm)	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(N/mm ²)
煉瓦圧縮1	112.65	109.33	71.29	23.27	8488
煉瓦圧縮2	109.91	109.37	65.98	24.83	12751
煉瓦圧縮3	108.00	108.00	62.00	19.50	13403
平均	110.19	108.90	66.42	22.53	11547

表2 煉瓦引張実験

	直径(mm)	高さ(mm)	引張強度(N/mm ²)
煉瓦引張1	99.71	59.16	3.30
煉瓦引張2	99.59	63.83	1.20
煉瓦引張3	99.64	63.85	2.10
平均	99.65	62.28	2.20

表3 目地圧縮実験

	幅(mm)	厚さ(mm)	高さ(mm)	圧縮強度(N/mm ²)
目地圧縮1	22.17	7.73	19.53	2.85
目地圧縮2	20.55	10.91	23.73	1.46
目地圧縮3	18.96	8.18	28.46	2.16
平均				2.16

表4 目地引張付着強度実験

	直径(mm)	高さ(mm)	引張付着強度(N/mm ²)
目地付着1	123	81.90	0.52
目地付着2	123	100.22	0.45
目地付着5	123	102.92	0.67
平均	123	95.92	0.55

実験前

終了後

(a) 煉瓦圧縮実験

実験前

終了後

(b) 煉瓦割裂引張実験

試験体1~3

試験体4

(c) 目地圧縮実験

実験前

終了後

(d) 目地割裂引張実験

写真1 材料実験

3.1 煉瓦圧縮実験

実験対象壁および同一建物の別の壁面より採取した煉瓦を、JIS (R 1250) の規定に従い半分程度の大きさに切り出した直方体の試験体を対象とした。目地部分を取り除き、モルタルでキャッピングして平滑な面とした。試験体および実験の様子を写真 1(a)に示す。試験体表面にひび割れが入ると荷重の上昇が緩やかになり、その後ひび割れが進行し荷重が低下する。載荷後の試験体においてひび割れが内部まで進行し試験体内部で圧壊が発生していることを確認した。実験結果（応力-ひずみ関係）を図 1 に示す。応力は荷重を断面積で除して算出し、ひずみは試験体側面に貼付したひずみゲージの値を用いる。ひび割れが発生するとひずみゲージによるひずみの計測が不可能となるため、図 1 はひずみゲージによるひずみの計測が可能であった範囲での応力 - ひずみ関係を示している。

実験結果のばらつきが大きかったため、5 体の試験体で実験を実施し最大と最小のものを除いた 3 体の結果および試験体寸法を表 1 にまとめて示す。圧縮強度は 22.53N/mm²、ヤング係数は 11547N/mm² である。なお、ヤング係数は、図 1 に示す応力-ひずみ関係の直線区間において、応力の変化量をひずみの変化量で除して算出した。JIS 規格によると 2 種の普通煉瓦の圧縮強度は 15N/mm² 以上となって

図1 煉瓦圧縮実験結果

図2 目地圧縮実験結果

おり、その値よりも高い材料であることがわかる。また、ヤング係数のばらつきが大きい。

3.2 煉瓦割裂引張実験

直径約 100mm の円柱試験体を用いて、写真 1(b)に示すように横に寝かせた試験体に鉛直荷重を載荷し、割裂引張実験を実施した。引張強度は式(1)で算定する。P：最大荷重、D：直径、L：長さである。

σ_t = 2P / πDL (1)

試験体寸法および得られた最大引張応力を表 2 にまとめて示す。実験結果より、試験体 3 体のばらつきは大きいものの、煉瓦の平均引張強度は 2.2N/mm²であり、圧縮強度の約 1/10 であった。通常、圧縮強度の 1/15～1/10 程度の引張強度を示す⁹⁾ものも多く、同様の結果を示した。

3.3 目地圧縮実験

横目地と煉瓦が一体となった試験体の圧縮実験も実施したが、煉瓦部分が崩れ、目地の圧縮強度を把握することはできなかった。そこで、目地のみを取り出して目地単体の圧縮実験を実施した。煉瓦より剥がしとった目地を断面諸量が算定できる矩形に成形し試験体を作成したため、試験体の大きさは統一されていない。図 2 に目地圧縮実験の応力-ひずみ関係を示す。ひずみは試験機のスロークと試験体高さより算出した。写真 1(c)に示すように試験体 1～3 は写真目地の厚さと直交方向に載荷したもの、試験体 4 は目地の厚さ方向に載荷したものである。試験体 4 のように目地の厚さ方向に載荷した場合は、全体が少しずつ崩れるような破壊形状を示し明確な圧縮強度を把握することができなかったが、参考として示しておく。試験体寸法および得られた圧縮強度を表 3 にまとめて示す。目地圧

縮強度の平均値は 2.2N/mm²であった。対象とした煉瓦壁は漆喰目地であり、一般的なモルタルの圧縮強度と比較すると低いことがわかる。

3.4 目地・煉瓦引張付着強度実験

目地と煉瓦間の引張強度（以下、引張付着強度）を調べるため、円柱コアから目地が中央を貫通する部分を取り出し、写真 1(d)に示すように目地部分が鉛直となるように寝かせて円柱の側面に対して上部から載荷し割裂実験を行なった。試験後は目地と煉瓦の界面部分で剥離する破壊形状を示していた。この実験により得られた結果が煉瓦と目地の引張付着強度に相当すると考えられ、実験で得られた最大荷重より式(1)を用いて算定した引張付着強度を表 4 に示す。平均値は 0.55 N/mm²であった。

4. 面外曲げ実験

4.1 面外曲げ実験の概要

煉瓦壁の面外曲げ耐力を検証する目的で、既存煉瓦壁の一部を切り欠いて梁せい 550mm、スパン 1500～2000mm の梁を製作し、面外曲げを与える実験を行った。試験体は、無補強単純梁、アラミド補強単純梁、SRF 補強単純梁、無補強固定梁の 4 種類である。無補強梁の面外耐力、アラミドロッド、SRF シートの補強効果を確認する

表5 面外曲げ試験体寸法

試験体名	D (mm)	t (mm)	span (mm)
無補強単純梁	547	341	1711
アラミド補強単純梁	554	355	1733
SRF補強単純梁	563	354	1726
無補強固定梁	548	348	1480

図3 煉瓦壁実験の概要

図4 面外曲げ実験結果

図5 固定梁の面外曲げ実験結果

こと、柱による拘束の影響を把握することを目的としている。

実験の概要を図3に示す。単純梁試験体は両端が壁面から切り離され、固定梁は梁端部が壁面と連続している。载荷は、試験体両端の裏表にH形鋼柱を取り付け、そこからはね出した梁に油圧ジャッキを取り付けて载荷点間距離 300mm の2点载荷とした。反力は煉瓦壁で受ける形式とした。計測は油圧ジャッキの圧力、载荷点の変位のほか面外変位及び鉛直変位を計測した。面外変位については単純梁試験体では载荷点側、固定梁試験体では载荷点と反対側で計測している。各試験体の寸法を表5、荷重変位関係を図4、5、面外変形の様子を図6、最大変形時の载荷面と反対側のひび割れの状況を図7にまとめる。

4.2 無補強単純梁試験体

無補強単純梁の荷重－载荷点変位関係を図4に示す。最大耐力 19.12kN 到達後、ひび割れが発生し耐力が急激に低下した。最大耐力時の载荷点変位はわずか 2mm 程度であり、その後 15mm 程度で耐力がほぼ 0 になった。ひび割れはスパンの中央付近で発生していた。载荷面と反対側の下部からひび割れが発生し、徐々にひび割れが進行し、最終的には载荷面まで貫通した。ひび割れ幅は最大 20mm 以上であった。写真 2(a)に実験の様子、図 6(a)に変形の様子を示す。変形は中央のひび割れ部分に集中しており、試験体にひび割れが発生したものの、地震時被害でみられるように、煉瓦壁全体が崩落して形状を保てないような壊れ方はしなかった。また、荷重を取り除いても、ひび割れはほとんど閉じなかった。

最大耐力は目地の破壊によって決定していると考えられるため、前述した目地の引張付着強度を用いて最大耐力を検討する。式(2)を用いて曲げ耐力を算定し、式(3)より载荷条件に基づき曲げ耐力時の荷重を計算した。 Z は断面係数、 σ_t は目地の引張付着強度である。また、 l は支点と载荷点間の距離であり無補強単純梁では 705.5mm である。

$$M = \sigma_t \cdot Z \quad (2)$$

$$P = \frac{2M}{l} \quad (3)$$

材料試験より得られた引張付着強度 0.45～0.67N/mm²を用い算定

(a) 無補強単純梁

(b) アラミド補強単純梁

した曲げ耐力時の推定荷重は 13.52～20.14kN であった。平均値 0.55N/mm²を用いて算定した推定荷重(16.5kN)を図4に示す。曲げ実験による最大荷重と近い値を示していることがわかる。

4.3 アラミド補強単純梁

アラミド補強は、アラミドロッドを目地部分に埋め込むことで煉瓦壁の面外変形能力の向上を図る補強方法である^{7),8)}。今回用いたアラミドロッドは公称直径 2.7mm、保証耐力 7.8kN 以上、ヤング係数 68600N/mm²、破断ひずみ 1.6%である。このアラミドロッドを梁せい中央の目地部分に引張側面から 15mm 程度内側の位置に 1 本埋め込み、補強を行った。煉瓦 8 段に対して 1 本のアラミドロッドを配置したことに相当する。また、補強に用いたモルタルの強度は、76.8N/mm²である。実験により得られた荷重－载荷点変位関係を図4に示す。ひび割れ発生時の荷重、ストロークは無補強試験体と類似しているが、アラミド補強試験体ではひび割れ発生後も耐力が急激に低下することではなく、面外変位 12mm まで耐力を維持続けた。また、除荷時には面外変形が減少し、復元性を示した。面外変位 12mm 時に、大きな音とともに急激に耐力が低下した。アラミドロッドが破断したためと考えられる。実験終了時に目地をはつり取り、アラミドロッドが破断していることを確認した。無補強試験体に比べ、4 倍の変形まで耐力を有していたこと、アラミドロッドが破断するまでは除荷時に面外変形の戻りが確認できたことから補強により変形性能の向上が期待できる。無補強試験体ではひび割れは目地部分にのみ発生していたが、写真 2(b)II および図 7(b)に示すようにアラミド補強試験体では補強が施された目地上下の煉瓦にもひび割れが発生していた。これは、アラミドロッドを埋め込む際にモルタルを使用していたことが影響していると考えられる。図6に変形の様子を示す。無補強試験体と同様に、変形は中央部に集中しており試験体が崩壊するような破壊形状を示すことはなかった。なお、試験体に対して挿入したアラミドロッドは 1 本であり、梁の耐力を向上させるには至らなかったと考えられる。

4.4 SRF 補強単純梁

SRF (Super Reinforcement with Flexibility) 補強はポリエステル製の高延性シートを接着し柱・梁のせん断強度、変形性能、軸力支持

(c) SRF補強単純梁

(d) 無補強固定梁

図6 面外変形

能力を改善する耐震補強工法である。一般的には鉄筋コンクリートの補強に用いられている。コンクリートブロック壁に対してこの補強方法の効果が確認されており⁹⁾、煉瓦壁の耐力向上にも効果が期待できるが、煉瓦壁に対する検討は行われていない。意匠性の観点から、今回は壁面の片側にのみ SRF による補強が検討されていることから、面外曲げ実験においても載荷面と反対側の面に SRF シートによる補強を施した。ここでは、厚さ 0.5mm の SRF シートを、ウレタン系接着剤を用いて 1 層貼りしている。SRF シートの破断強度の規格値は 148N/mm^2 、接着剤の平均接着強度は 1.0N/mm^2 以上である。実験により得られた荷重-載荷点変位関係を図 4 に示す。

ひび割れは、無補強試験体、アラミド補強試験体と同程度の荷重時において確認されたが、その後の耐力低下はみられなかった。面外変位 30mm まで載荷した際に試験体の下端部から煉瓦が崩れはじめたが、試験体が崩れ落ちるような崩壊には至らなかった。また除荷時には変形の戻りが確認できた。最大面外変位 30mm まで載荷し

たが、残留変形は 13mm 程度であり、変形回復性が高く崩落防止には効果的な補強方法であることを確認した。図 6 に変形の様子を示す。最大変形が発生している個所が試験体中央とずれているが、これは写真 2(c)Ⅱ に示すように載荷により一部煉瓦が崩れていたためであると考えられる。煉瓦が崩れていた個所と最大変形個所は概ね一致していた。

4.5 無補強固定梁

今回の耐震補強では、間柱を煉瓦壁に取り付けることでその位置で煉瓦壁の崩落を防止する効果を期待している。そこで間柱が煉瓦壁の壊れ方に影響を与えないかを確認する目的で、連続する壁の載荷実験を実施した。荷重-面外変形関係を図 5 に示す。端部を拘束していない単純梁試験体に比べ非常に大きな耐力を示した。載荷装置の都合上、150kN 程度で載荷を中止した。大きな耐力を示した要因として、梁両端部が拘束されていることによって、煉瓦壁内部に圧縮束が形成され、面外荷重に抵抗したことが推測される。図 8(a)

写真2 面外曲げ実験の様子

図7 試験体のひび割れ状況

図8 圧縮束の形成の様子

に示すモデルを用いて FEM 解析を行い、(b)に示すように圧縮束が形成されていることを確認している。これは、煉瓦壁の面外曲げ耐力が一般に考えられている耐力よりも大きい可能性を示唆している。

写真 2 に実験の様子を示し、変形の様子を図 6 に示す。面外変形は極めて小さく、除荷時には残留変形がほぼなかった。またひび割れについても除荷後には閉じていることが確認できた。

5. まとめ

歴史的煉瓦造建築における煉瓦、目地の材料実験および煉瓦壁の面外曲げ実験を実施し、以下の知見を得た。

- ① 煉瓦の圧縮強度および引張強度、目地の圧縮強度および引張付着強度のデータを取得できた。特に漆喰目地に関する情報は少ないため貴重なデータとなった。
- ② 無補強単純梁試験体ではひび割れが発生すると急激に耐力が低下することを確認した。ひび割れは目地部分に発生していた。また、補強を行っていない煉瓦壁の面外曲げ耐力には目地の引張付着強度に関係している可能性があることを示した。
- ③ アラミド補強試験体では最大耐力に達し、ひび割れが発生した後もアラミドロッドの破断までは急激な耐力低下はみられなかった。また、アラミドロッドが破断するまでは除荷時に変形の戻りが確認できた。
- ④ SRF 補強試験体では大幅に耐力が向上するとともに除荷後の変形回復性も極めて高いことが確認できた。
- ⑤ 端部を固定した試験体では、壁面内に圧縮束が形成されることによって無補強であっても高い耐力を示すことが確認できた。変形も極めて小さく、除荷後の残留変形は 1mm 程度であった。

なお、今回の実施設計ではアラミド補強および SRF 補強は煉瓦の崩落防止の目的で用いることとしている。

謝辞

本実験に際し、多大な御協力を頂いた関係各位に心から感謝申し上げます。特に、現地での実物煉瓦壁の破壊実験という貴重な機会を与えてくださった倉敷紡績株式会社、株式会社倉敷アイビースクエアには、ここに深くお礼申し上げます。また、実験をサポートしてくださった、株式会社藤木工務店、株式会社コンステック、構造品質保証研究所株式会社に対して感謝申し上げます。実験を行うにあたり、京都工芸繊維大学村本真講師、同大学高度技術支援センター技術職員の小山清司氏、四方利和氏、同大学院生および学部生にご協力いただきました。ここに記して、感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 社団法人 北海道建築技術協会：煉瓦造建築物の耐震診断基準，pp.2012.3
- 2) 佐野利器：家屋耐震構造論 第3章煉瓦造家屋，震災豫防調査會，震災豫防調査會報告，第83號(甲)，pp.70-142, 1916.10
- 3) 富永善啓，西村泰志：煉瓦造建造物の構造的特性に関する実験的研究 実大煉瓦壁の面外水平曲げ実験，日本建築学会構造系論文集，第74巻，No.641，pp.1387-1394，2009.7
- 4) 寺井雅和，南宏一：煉瓦目地モルタルの強度に関する実験的研究，日本建築学会中国支部研究報告集，第32巻，pp.266-1-4，2009.3
- 5) 荒木慶一，吉田亘利：ステンレスピン挿入補強された歴史的煉瓦造壁体の単調載荷面外曲げ耐力，日本建築学会技術報告集，vol. 25，pp.147-152，2007.6
- 6) 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，pp.222-223，2001.3
- 7) 佐藤壮太，西川忠：アラミドロッド挿入目地置換工法による煉瓦造建築物の耐震補強実験 その1. 実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.821-822，2014.9
- 8) 西川忠，佐藤壮太：アラミドロッド挿入目地置換工法による煉瓦造建築物の耐震補強実験 その2. 実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），pp.823-824，2014.9
- 9) 壁谷澤寿海，棟安敦史，真田靖士，五十嵐俊一：コンクリートブロック内蔵耐震壁のポリエステル製繊維シートによる耐震補強に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，2006

[2018年2月7日原稿受理 2018年5月1日採用決定]