

(65) 歴史的レンガ建造物の剥離およびせん断強度に関する実験的検討

岸 祐介¹・北原 武嗣²・野阪 克義³・伊津野 和行⁴

¹正会員 首都大学東京助教 都市環境学部都市環境学科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:kishi@tmu.ac.jp

²正会員 関東学院大学教授 理工学部理工学科 (〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東1-50-1)
E-mail:kitahara@kanto-gakuin.ac.jp

³正会員 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)
E-mail:k-nozaka@se.ritsumei.ac.jp

⁴フェロー会員 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)
E-mail:izuno@se.ritsumei.ac.jp

レンガ建造物は、江戸末期から明治にかけて西洋文化の流入に伴い、日本中で建設された。建設から100年余りが経過する中で、既に建て替えられたものも多い。一方で、建設当時のままで供用され続けている建造物も残されており、近年になって近代化遺産として注目されている。しかし、将来へ継承するためには耐荷力などの残存性能に関して把握しておくことが必要である。そこで本研究では、レンガ建造物を構成する目地部材に着目し、配合質量比率に違いに着目して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。

Key Words : masonry structure, experimental test, failure strength, compound ratio

1. はじめに

日本では、文明開化の折に西洋の文化が数多く取り入れられ、その中でも、レンガは新しい建築材料として広く普及、数多くのレンガ造建造物が建設された。しかし、その多くが1891年の濃尾地震、1923年の関東地震で被害を受けて失われてしまった。

被害を免れた少数のレンガ造建造物の中には、現在も供用されているものもある。一方で、建設から100年以上が経過した現在、経年劣化や耐震基準の見直しなどにより、すでに建て替えられてしまったものも多い。残された少数のレンガ造建造物は、近年になって近代化遺産として注目を集めており、文化庁を中心に保存に向けた活動が続いている。

明治・大正期には、レンガ同士の凝結剤として石灰入りのモルタルが使用されていた¹⁾。石灰入りのモルタルは見栄えも良く、強アルカリ性のため殺菌作用が強く防腐の効果もある。また、一般的に石灰入りモルタルに用いられることの多い消石灰は気硬性で、大気中の二酸化

炭素との反応によって石灰石（炭酸カルシウム）へ戻ろうとする性質を有しており、時間の経過とともに強固になる。しかし、石灰自体は水溶性であるため、雨水などによって水分を含んでしまうと、やがて浸食されてしまうため、著者らは当時使用されていた石灰入りモルタルは、JISで規定されている現行のモルタルと比べて、強度が低いのではないかと推測した。

また、日本におけるレンガ造建造物の地震被害事例を振り返ると、レンガ部分よりも、目地位置での破壊や剥離が多く見受けられる。つまり、地震によるレンガ造建造物の崩壊の原因として、レンガ目地間での剥離破壊、せん断破壊が一つの要因として考えられる。

そのため、これまで被災を免れてきた建造物に対して、将来的に大規模地震が発生した際、現状のまま耐えられる可能性は低いのではないかと懸念がある。社会基盤の一つとして受け継がれてきたレンガ造建造物を、今後もより良い状態で後世に残すためには、適切な補修・補強を行う必要があるが、レンガ造建造物における破壊形式やメカニズムについては、研究例が少なく十分

な検討が進められていないのが現状である。

たとえば、Bourzamら²⁾はレンガ壁体の水平載荷試験を実施しており、その際にレンガ積み構造の圧縮試験、およびレンガ積み構造の正方形試験体を用いた立方体割裂試験 (Diagonal test, ASTM E519/ E519M) を行い、引張強度およびせん断弾性係数を求めている。ただし、この手法で得られる値は、試験体の応力-ひずみ関係を2次元問題として扱って求められており、試験体は均質材料で構成されているという仮定に近い状態で検討されている。

また、田所ら³⁾はレンガ構造柱を対象とした破壊試験を行い、破壊形状と強度の関係に関して幾つかの検討を行っている。しかし、多くの検討は目地材であるモルタルの配合に着目せず、構造体としての耐荷力などについて検討している。木野ら⁴⁾が既存のレンガ構造物よりコア抜きを行い、その試験体を用いてレンガおよび目地の引張と圧縮の強度および弾性係数を求めているが、対象構造物の建設時期や目地材の配合に関しては言及されていない。

その中で筆者ら⁵⁾は、これまでレンガアーチ橋の力学的特性を把握するための基礎的な検討として、レンガ積み試験体を用いた圧縮強度試験を行ってきたが、レンガ造の崩壊形式として着目すべき剥離やせん断破壊に関しては検討を行えてこなかった。

そこで本研究では、現行基準のモルタルと石灰モルタルを使用した場合のレンガ造試験体に関して、破壊強度に着目した比較・検討を行った。破壊強度試験に関しては、形状の異なる2種類のテストピースを作製し、目地材を現行基準のモルタルと石灰入りモルタルに分けて剥離強度試験、せん断試験を行った。

2. 剥離およびせん断強度試験

(1) 実験概要

本研究では、レンガ造構造物のレンガ-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、表-1に示すような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。ここで、それぞれのモルタルで水セメント比が異なるのは、石灰入りモルタルにおいてセメントと石灰の合計量を凝結材と見なしたためである。

表-1 モルタルの配合質量比率

	セメント	石灰	砂	水
現行基準	1	—	3	0.5
石灰入り	1	1	3	1

(2) 剥離強度試験

レンガ造試験体の作製では、レンガは24時間前に水中に沈めておいた。また、レンガが目地材の水分を吸収し、レンガの含水状態を変化させることの無いようにした。目地厚は一般的なレンガ造の目地厚として10 mmとした。試験体の数に関して、既往の研究結果よりレンガを用いた試験体は、結果がかなりばらつくことが示されている。そのため、異なるモルタルを用いた試験体をそれぞれ10体ずつ用意した。

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、Khalafの実験⁶⁾を参考に図-1に示すように、レンガと目地材を用いて2枚のレンガを長手方向に半分ほどずらして合わせ、長手積みの一部を取り出したような形状のレンガ造試験体を作製した。万能試験機を用いて図-1に示す「載荷」の位置に載荷速度0.1 mm/minで鉛直荷重を加え、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。

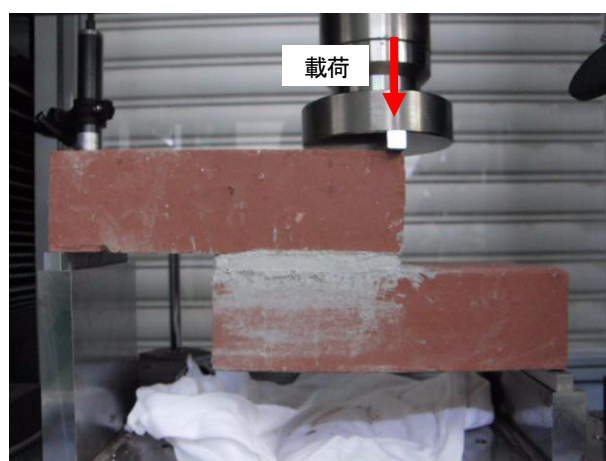


図-1 剥離強度試験の様子

(3) せん断強度試験

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。剥離強度試験のときと同様に、レンガはあらかじめ水中に沈めておいたものを使用し、目地厚は10mmとした。

せん断強度試験は図-3に示すように、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ていき、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。この際、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。

試験体に鉛直方向の拘束荷重を与えたことに関して、実際の構造物における上載荷重を考慮する必要があるため、ジャッキによる鉛直載荷でそれを考慮することとした。また、水平載荷時に偏心による試験体の回転を防ぐ役割も担っている。これらを踏まえた上でレンガと目地部分がせん断破壊したときの荷重を、付着面積で除すことによってせん断強度を求めた。



図-2 せん断試験体

油圧ジャッキで与える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。試験体数に関しては、各ケース8体ずつ用意した。

3. 実験結果

(1) 目地材の物性

JIS R 5210より28日間養生の圧縮強度は30.0 N/mm²以上とされている。現行基準モルタルの圧縮強度は、表-2を見ても分かるように、圧縮強度が30.0 N/mm²以上である。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-2 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

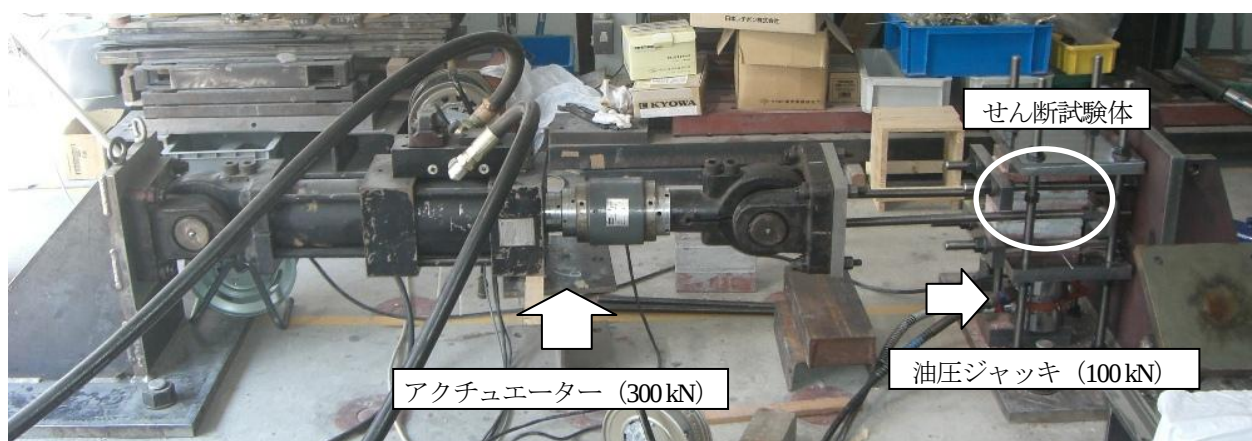


図-3 せん断強度試験の概要

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28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しにくいと考えられる。

弾性係数に差が出てしまった原因として、砂の単位量による影響が考えられる。川上らの研究⁷⁾により、配合における砂の単位量が、モルタルの剛性に影響を与えることが示されている。このことから配合質量比について考えると、石灰入りモルタルの方が現行基準モルタルよりも単位体積あたりに含まれる砂の配合質量比が少ないため、現行基準モルタルの方が大きくなったと考えられる。

(2) 剥離強度試験結果

剥離強度の算定にあたっては、Khalaf⁶⁾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。

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

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

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

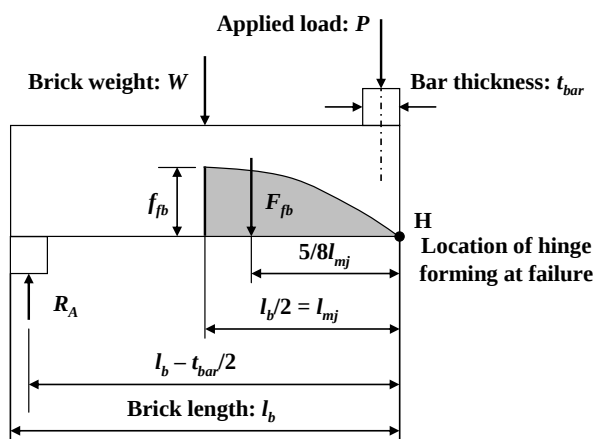


図-4 Khalafの剥離強度算定方法

ここで、 R_A ：反力、 f_{fb} ：剥離強度、 l_b ：レンガの長さ、 t_{bar} ：治具の幅、 P ：作用させた荷重、 W ：レンガの重量、 l_{mj} ：レンガと目地の付着部長さ、 w_b ：レンガの奥行き幅、 F_{fb} ：剥離強度の合力。

表-3 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/mm²)

表-3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/mm²程大きい値となった。剥離強度に差がでた原因として、接着力はセメントの水和反応の量に依存する。現行基準モルタルに比べて、石灰入りモルタルは単位体積あたりのセメントの配合質量が小さく、接着力が低くなったと考えられる。また、付着強度に関して安井ら⁸⁾は、Ca(OH)₂の析出している面積が一定の割合を超えると著しく強度が低下する傾向があることを示している。石灰入りモルタルには、配合に消石灰を加えていることため、強度が低下したと考えられる。

(3) せん断強度試験結果

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/mm²、1.66 N/mm²、2.07 N/mm²、2.53 N/mm²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できる。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/mm²、1.25 N/mm²、1.39 N/mm²、1.77 N/mm²となった。

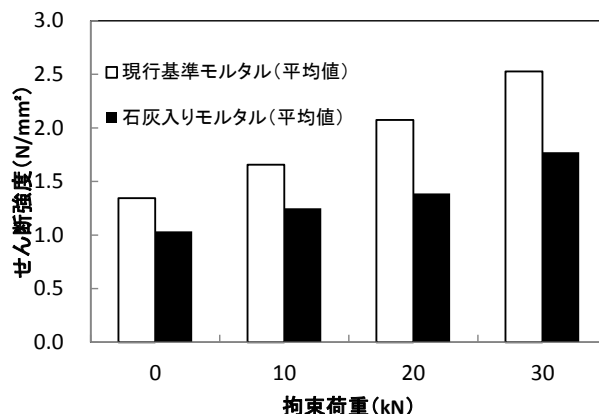


図-5 拘束荷重ごとのせん断強度の平均値

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。

配合質量比の違いに着目すると、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。せん断強度の差の一因として、目地部とレンガの境界における摩擦面の影響が考えられる。配合質量比における砂の配合量に着目して考えると、砂の配合質量比は石灰入りモルタルよりも現行基準モルタルの方が多い。そのため、レンガと目地材の境界面においての砂による設置面積の割合が多く、摩擦力が大きくなったのではないかと考えられる。

また、セメントの含有量も現行基準モルタルの方が石灰入りモルタルと比べて多いため、溶解析出過程における硬化体の生成量が多く、それらによって生じる摩擦力が大きいことが、現行基準モルタルを用いた場合のせん断強度の結果として現れたものと考えられる。

さらに、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。

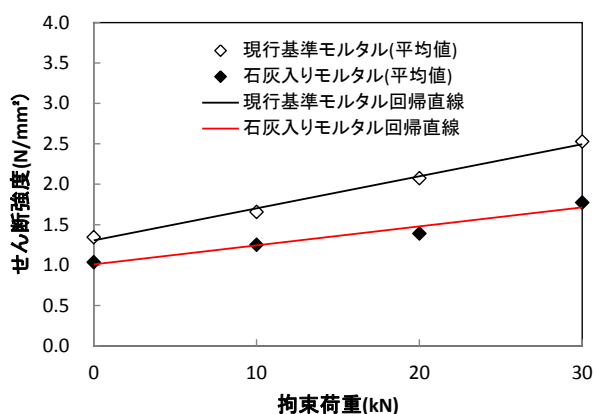


図-6 セン断強度試験における回帰分析結果

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ことが確認できる。

図-6から、それぞれの回帰直線を見てみると、現行基準モルタルの方が石灰入りモルタルよりも回帰直線の傾

きが大きく、拘束荷重を大きくするほどせん断強度の差が大きくなっている。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。

4. まとめ

本研究では、レンガ造構造物における破壊強度の把握を目的として、2種類の形状の異なる試験を用いた強度試験を行った。また、目地材の配合質量比率の違いが、破壊強度にどのように影響するかについても検討を行った。以下に、本研究によって得られた結論を示す。

- (1) 剥離強度を比較すると、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1.3倍程大きい値となった。
- (2) セン断強度においても、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よりも1.4倍ほど大きい値となった。これは、目地材における砂の配合質量比の影響により、レンガと目地材の境界面での摩擦力が大きくなるためだと考えられる。
- (3) 剥離強度と拘束荷重が0 kNの場合のせん断強度を比較してみると、いずれのモルタルを用いた場合においても、剥離強度に比べてせん断強度の方が3倍ほど大きい値となった。
- (4) セン断強度と拘束荷重の関係について、いずれの目地材を用いた場合においても、せん断強度の平均値が回帰直線のほぼ同一直線上にあり、相関性は高い。
- (5) 2種類の異なる試験結果から、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よりも水平力に対する抵抗が大きく、レンガ造構造物の補修・補強に適している。

今回の結果より、レンガ造構造物の破壊基準を見積もるためのパラメータを得られた。今後、すでに得られている他のパラメータと合わせて数値計算モデルを作成し、レンガ造構造物の破壊過程および性能改善に関して検討を行う予定である。

謝辞：本研究の実施にあたり，H24年度JSPS科研費（若手研究(B)，課題番号24700929，代表：岸祐介）の助成を受けた。実験に関しては，立命館大学理工学部環境システム工学科：岡本享久教授および立命館大学総合理工学研究機構：明石知樹研究員，学振特別研究員：大岡優研究員にご助言を頂いた。また，関東学院大学耐震構造システム研究室および立命館大学橋梁工学研究室内の学生（平成24年度）に協力を得た。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Bourzani, 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 岸祐介，北原武嗣，野阪克義，伊津野和行，尼崎省二：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，歴史都市防災論文集，Vol.5, pp.193-200, 2011.
- 6) 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.
- 7) 川上英男，脇敬一，中村いづみ：セメントモルタルのヤング係数評価ー近似複合理論による検討ー，福井大学工学部研究報告，第 43 巻，第 2 号，pp.399-408，1995.
- 8) 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.

PEELING AND SHEAR STRENGTH EVALUATION OF HISTORICAL MASONRY STRUCTURES

Yusuke KISHI, Takeshi KITAHARA, Katsuyoshi NOZAKA and Kazuyuki IZUNO

Recently, masonry structures have been focused as the industrial heritages in Japan, however, many masonry structures were already replaced due to the deterioration by aging and disasters. To conserve historical masonry structures, repairing or reinforcement is required immediately. Modeling masonry structure with precise failure mechanism and analyzing seismic responses of numerical model are necessary to evaluate the seismic performance. In this paper, peeling and shear strength of masonry specimens are described due to reveal the parameters of failure mechanism in numerical calculation. Moreover, 2 types mortar which were mixed different compound ratio were compared to confirm the effect of limestone for the strength of masonry structures.