

文化財煉瓦建築物における 仕上げ材の追従性評価手法の提案

馬場明生 (感性デザイン工学科)

河原利江 (感性デザイン工学科)

森田和宏 (感性デザイン工学専攻 2002 年度修了生)

川手 洋 (感性デザイン工学専攻 2003 年度修了生)

法光俊吾 (感性デザイン工学専攻)

A Method for Evaluating Critical Differential Movements of Finishings Bonded on Cultural Heritage Brick Buildings

Akio BABA (Department of Perceptual Design and Engineering)

Rie KAWAHARA (Department of Perceptual Design and Engineering)

Kazuhiro MORITA (2002 Graduate student of Division of Perceptual Design and Engineering)

Hiroshi KAWATE (2003 Graduate student of Division of Perceptual Design and Engineering)

Shungo HOKO (Division of Perceptual Design and Engineering)

The problem that the finishings of brick buildings specified to be a cultural property exfoliates in recent years has arisen. In repair of cultural heritage brick buildings, the present condition is that only selection of simplistic repair material is performed. In this report, the simulation examination object reproducing the state where lime cement mortar finish which is a general wet finish method of structure was given in the outer wall of brick buildings, and the state where mortar finish which is a general wet finish method of structure was given in the inner wall was produced, and the flattery nature examination was performed.

Key Words: *brick, clay masonry, lime cement mortar finishings, lime plaster finishings, differential movements*

1. はじめに

近年、煉瓦造建築物の保存のための補修の増加に伴い長期保存のための明確な基準が必要とされているが、わが国において煉瓦造建築物の長期保存判定基準は確立されていない。また、本報告で扱う煉瓦造建築物の仕上げにおいて、文化財に指定されている煉瓦造建築物の仕上げ材が剥離するという問題が生じている。しかし、文化財煉瓦建築物を仕上げを含めて現状のまま長期保存するための補修材の選定に関する手法は確立されていない。こ

れまでは、文化財煉瓦造建築物の補修において、短絡的な補修材の選定しか行われていないのが現状である。補修材の選定によっては、建築物の美観や性状を損なうものもある。そういった点においても補修材の選定は重要である。

また、ここで扱う煉瓦組積体は煉瓦造建築物の力学的性状の評価試験に一般的にもちいられているものであり、煉瓦造は国際的に最も普及している構法の一つである。煉瓦造建築物の長期保存は国際的に共通した問題とな

っている。

本報告では、煉瓦造建築物の外壁において一般的な湿式仕上げ構法である石灰セメントモルタル仕上げを施した状態と、内壁において一般的な湿式仕上げ構法である漆喰仕上げを施した状態を再現したシミュレーション試験体を作製し、組積体に圧縮加力によって軸歪を生じさせる方法による追従性試験を行った。本試験はそれぞれの仕上げの剥離箇所を補修することを想定している。また、複合試験体に補修材を含浸または注入接着し、各補修材が追従性能に与える影響について検討した。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

2.1.1 石灰セメントモルタル仕上げ試験体概要

図1に試験体の概観を示す。これは60×100×100mmの安芸津産煉瓦を3段積みしたもので、目地幅を15mmとり210×100×100mmの組積体とした。この組積体の対となる2つの側面に150×100×15mmの石灰セメントモルタル平板を5種類（エポキシ樹脂2種類，セメントスラリー2種類，ポリシロキサン）の接着剤をモルタル平板と躯体の間に注入接着させたものと、石灰セメントモルタル平板と同一調合による一層塗り石灰セメントモルタル仕上げを施したものと計6種類の試験体を作製した。以後、この一層塗り石灰セメントモルタル仕上げのものを無処理と呼ぶ。

ここで使用する石灰セメントモルタル平板の製作は型枠に下地から上塗りまでを一定の調合、厚さで塗り付けて製作した。下塗り（下

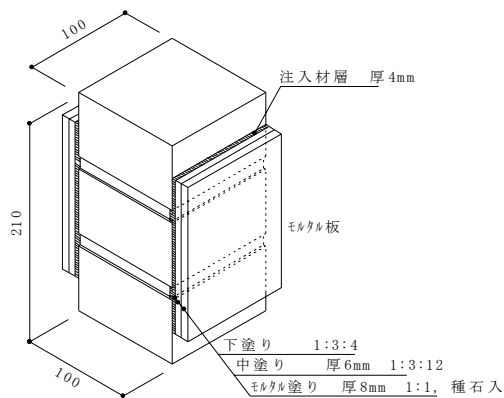


図1 石灰セメントモルタル試験体概観

擦り)は1度鏝で擦る程度とし、材料の容積比はセメント：石灰：砂を1：3：4の割合で配合したものをを使用した。中塗りは厚さ6mmとし、容積比をセメント：石灰：砂を1：3：12の割合で配合したものをを使用した。石灰セメントモルタル平板の上塗りは厚さ8mmとし、種石を入れてセメント：砂の容積比を1：1としたものをを使用した。上塗り後は十分な養生をした後、脱型をした。使用材料は表1に示す。仕上げ材の接着方法は組積体の対となる両面に、石灰セメントモルタル平板を4mmの隙間で固定し、両側面と下方の3方をシーリング材にてシールして補修剤の漏れを防止した。そして、4mm厚の隙間に補修剤を流し込んだ。養生期間1日後、補修材が凝固したのを確認して、不要となったシール材を剥がした。養生後と補修剤注入直後の質量を計測して注入量の計量を行った。補修剤の注入量を表2に示す。

2.1.2 漆喰仕上げ試験体概要

図2に試験体の概観を示す。煉瓦躯体は、石灰セメントモルタル仕上げで使用したものと同様のものを使用した。この煉瓦組積体の2面に100×144×12mmの漆喰塗りを施し、6種類の補修材を仕上げ材表面に塗布したものと補修材を塗布しない無処理のもの1種類の

表1 使用材料

練り混ぜ水	練り混ぜ水
セメント	U社製 普通ポルトランドセメント
石灰	T社製 塩焼消石灰
細骨材	豊浦珪砂
エポキシ樹脂A	K社製 低粘度形エポキシ樹脂
エポキシ樹脂B	T社製 低粘度注入エポキシ樹脂
セメントスラリーA	G社製 ポリマーセメント系
セメントスラリーB	セメント系
ポリシロキサン	有機珪素ポリマー系

表2 補修剤の注入量

補修剤	注入量 (cc)
エポキシ樹脂A	143.8
エポキシ樹脂B	164.5
セメントスラリーA	219.5
セメントスラリーB	251.5
ポリシロキサン	167.1

計 7 種類を漆喰塗りの複合試験体とした。これを含浸によって接着強度を確保する補修工法をモデル化した試験体とした。また、同一寸法の漆喰平板を 2 種類の補修材を用いて張り付けしたものを漆喰張りの複合試験体とした。これを注入によって接着強度を確保する補修工法の試験体とした。

表 3 に漆喰仕上げ材の使用材料を示す。漆喰仕上げ材の各層の厚さは、下塗り 2mm、斑直し 6mm、中塗り 3mm とし、上塗りには塗らずに施工した。各層の調合は、JASS15 の塗厚 12mm の天井・ひさし A の調合に準拠した。

漆喰塗り仕上げにおいて、漆喰仕上げ材表面に補修材を追いかけで 5 回刷毛にて塗布した。補修材として珪酸ナトリウム、多孔性水ガラス、アクリル系樹脂、珪酸リチウム、ポリシロキサンおよび水ガラス系硬化材の 6 種類を使用した。また、塗布の前後の刷毛と容器の質量を計測して塗布量を求めた。

漆喰平板の張り付けにおいて、漆喰平板の四隅に 10×10×4mm ののり付きバックアップ材を張り付け、煉瓦組積体の 2 面に設置した。次に、煉瓦組積体と仕上げ材との間隙の両側面と下方の 3 方を補修材の漏れを防止のためにシーリング材にてシールし、補修材を 4mm 厚の間隙に注入した。補修材としてポリマーセメント系スラリーとポリシロキサンの 2 種類を用いた。スラリーの注入では、煉瓦試験体の隙間に片側で 20cc、両側合わせて 40cc の水で煉瓦によるドライアウトを防止するために水湿した。その後、A 材（灰色粉末）と B 材（乳白色液状）を重量比 9:1 で調合したものを同質量の 1/4 の水で溶いたものを使用した。ポリシロキサンの注入では、主

剤、硬化剤とも重量比で 1:1 を調合したものをを使用した。注入後、養生期間を 1 日とり、接着剤が凝固したのを確認して、不要となったシール材を剥がした。また、シール養生後と接着剤注入直後の質量を計測して注入量を求めた。表 4 に補修材の塗布量および注入量を示す。なお、複合試験体の上下部 33mm を非接着部とした。

2.2 試験方法

追従性能試験は、一般的にコンクリート下地に仕上げ材を施して、コンクリート部分にのみ軸方向圧縮歪を生じさせて、コンクリート下地の変形に対する仕上げ材の追従性能から接着一体性を評価する方法である。評価方法として、仕上げ材の表面歪と躯体の非接着部の歪を用いて仕上げ材表面歪が急激に減少するところを剥離ポイントとする方法が採用されている¹²⁾。これは、コンクリート躯体のように躯体の材質が同一と考えられる構工法のように適用でき、煉瓦組積体のように煉瓦と目地モルタルといった異なる材質から構成される構工法には適用し難い。そこで、煉瓦と目地モルタルとのプリズム試験体の圧縮歪と仕上げ材表面歪とを測定し、この 2 つの歪で評価する方法を採用した。この方法により材質が均一でない試験体においても基準化された評価が可能となる。

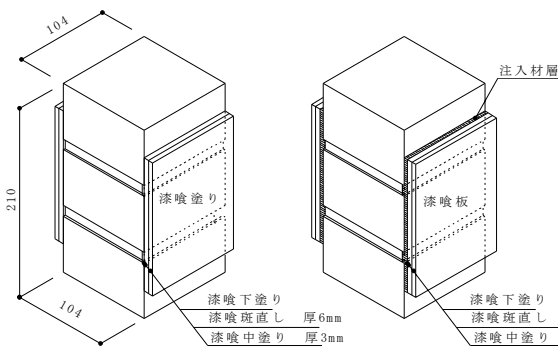
図 3 にゲージ張り付け位置について示す。試験前日までに漆喰と煉瓦組積体の材軸方向歪を測定できるように漆喰仕上げ材表面にゲ

表 3 漆喰の使用材料

漆喰	塩焼消石灰 (T 社製)
のり	日高産銀杏草
砂	豊浦珪砂

表 4 補修材料の塗布量および注入量

補修材料		塗布量・注入量 (g)
塗り	珪酸ナトリウム (原液 2 倍水溶液)	7.9
	多孔性水ガラス (揮発性)	7.3
	アクリル系樹脂 (質量比、トルエン：樹脂=1：1)	9.3
	珪酸リチウム	11.2
	ポリシロキサン	18.8
注入	水ガラス系硬化材	7.6
	ポリマーセメント系スラリー	271.2
	ポリシロキサン	215



①漆喰塗り工法 ②漆喰板張り工法
図 2 漆喰試験体概観図

ージを張った（ゲージ長さ 10mm）。また、上下段の煉瓦の中心位置にコマを張り付けパイ型変位計を設置した（測定長さ 150mm）。実験は 100t アムスラを用いて複合試験体の上下面を単調圧縮载荷した。試験体の载荷面を不陸調整のため石膏キャッピングした。

3. 追従性評価方法の提案

3.1 躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪の関係

図 4 に躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪との関係を示す。比例限界点は躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪が比例関係にある弾性範囲の限界点を示す。この点から仕上げ材が部分的に剥離し始めていることを示している。また、剥離臨界点は仕上げ材と躯体との界面における剥離が、ある残存接着面積まで進行したことを示している。 θ の角度が大きいほど残りの接着している面積が急激に減少する。 $\theta \leq 90^\circ$ の場合にはほぼ全面が一気に剥離したことを示している。逆に、 $\theta > 90^\circ$ の場合には θ の値が小さいほど徐々に残りの接着していた面積が減少していることが言える。

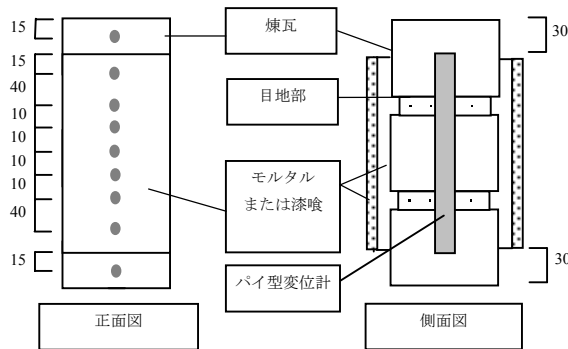


図 3 ゲージおよびパイ型変位計測定

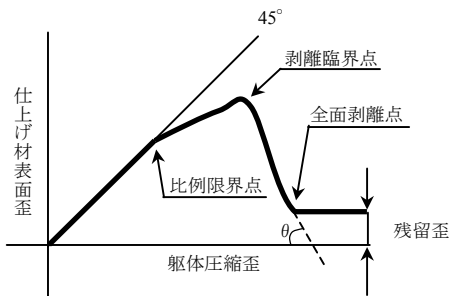


図 4 躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪との

3.2 破壊プロセス

弾性精密解³⁾と比較するために(1)式に示すように、 ϵ_f を ϵ_c で割ることによって基準化した軸方向応力度を σ_0 とする。仕上げ材表面の中央部の応力度を σ とすると(2)式となる。(1)、(2)式より(3)式となり、弾性精密解と同様の評価が可能となる。仕上げ材端部を除く部分において、 ϵ_f / ϵ_c の値が 1.0 のときは仕上げ材の完全接着を意味する。しかし、仕上げ材のヤング係数が大きい場合や仕上げ材の厚さが大きい場合には完全接着していてもその値は 1.0 よりも幾分か小さくなる。また、仕上げ材端部からの距離(X)を端部から中央部までの距離(L/2)で割ることで基準化する。これにより無次元での評価が可能となる。この方法で破壊プロセスを検討する。なお、 ϵ_f は仕上げ材の表面歪、 ϵ_c は躯体の歪、Eは仕上げ材のヤング係数、 $\Delta \epsilon$ は仕上げ材表面と躯体との界面に生じる相対ムーブメント、Lは仕上げ材長さである。

$$\sigma_0 = \epsilon_f / \epsilon_c \quad (1)$$

$$\sigma = E \cdot \Delta \epsilon \cdot \sigma_0 \quad (2)$$

$$\sigma / E \cdot \Delta \epsilon = \epsilon_f / \epsilon_c \quad (3)$$

4. 試験結果及び考察

4.1 躯体圧縮歪と仕上げ材表面ひずみとの関係

4.1.1 石灰セメントモルタル仕上げ

図 5 に躯体圧縮歪と仕上げ材表面ひずみとの関係を示す。ここでは圧縮歪を正とした。また、仕上げ材下端部を零とし、下端部からの距離ごとにグラフ化した。基本となる無処理（石灰セメントモルタル塗り）では、仕上げ材の中央部付近において最も高い圧縮歪を観測することができた。仕上げ材の端部では载荷始めから負の値が大きくなってきている。このことより仕上げ材の端部は圧縮を受けているのではなく、引張力が働いていることがわかる。この図より無処理は躯体圧縮歪 898 μ （躯体圧縮応力 5.7MPa）付近で仕上げ材表面歪が急激に低下していることより、ここが剥離限界点であると考えられる。ここで、最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 64.5mm で最大圧縮歪 122 μ であった。次に石灰セメントモルタル平板をエポキシ樹脂Aにより注入接着させた試験

体では、躯体圧縮歪 488 μ （躯体圧縮応力 3.3MPa）付近で仕上げ材表面歪が低下し始めている、ここが剥離限界点と考えられる。ここで最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 75mm で最大圧縮歪 49 μ であった。次に石灰セメントモルタル平板をエポキシ樹脂Bにより注入接着させた試験体では、煉瓦躯体圧縮歪 764 μ （躯体圧縮応力 5.1MPa）付近で仕上げ材が剥離限界点に達したと考えられる。ここで最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 75mm で最大圧縮歪 140 μ であった。次に石灰セメントモルタル平板をセメントスラリーAにより注入接着させた試験体では、煉瓦躯体圧縮歪 703 μ （躯体圧縮応力 4.5MPa）付近で仕上げ材表面歪が低下し始めている、ここが剥離限界点だと考えられる。ここでは最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 75mm で最大圧縮歪 179 μ であった。次に石灰セメントモルタル平板をセメントスラリーBにより注入接着させた試験体では、煉瓦躯体圧縮歪 344 μ （躯体圧縮応力 3.2MPa）付近で仕上げ材表面歪が低下し始めている、ここが剥離限界点であると考

えられる。ここでは最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 85.5mm で最大圧縮歪 45（躯体圧縮応力 4.4MPa）付近で仕上げ材表面歪がなだらか μ であった。次に石灰セメントモルタル平板をポリシロキサンにより注入接着させた試験体では、煉瓦躯体圧縮歪 572 μ に低下し始めている、ここが剥離限界点であると考えられる。他の接着剤とは異なり、ほぼ歪が観測されていないことがわかる。ここでは最も高い圧縮歪を示しているのが仕上げ材表面下端部からの距離 75mm で最大圧縮歪 20 μ であった。これらのグラフよりセメントスラリーAが最も高い仕上げ材表面歪を観測したことがわかる。これはセメントスラリーAが躯体との接着性が高いことを示している。

4.1.2 漆喰仕上げ

図 6 に各種試験体の躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪の関係を示す。仕上げ材の距離は上端部を 0 として下端部が 144mm となる。無処理の試験体を基準としてみると仕上げ材表面歪の減少は端部から始まり徐々に中央部に伝播していった。これと同様の傾向を示したもの

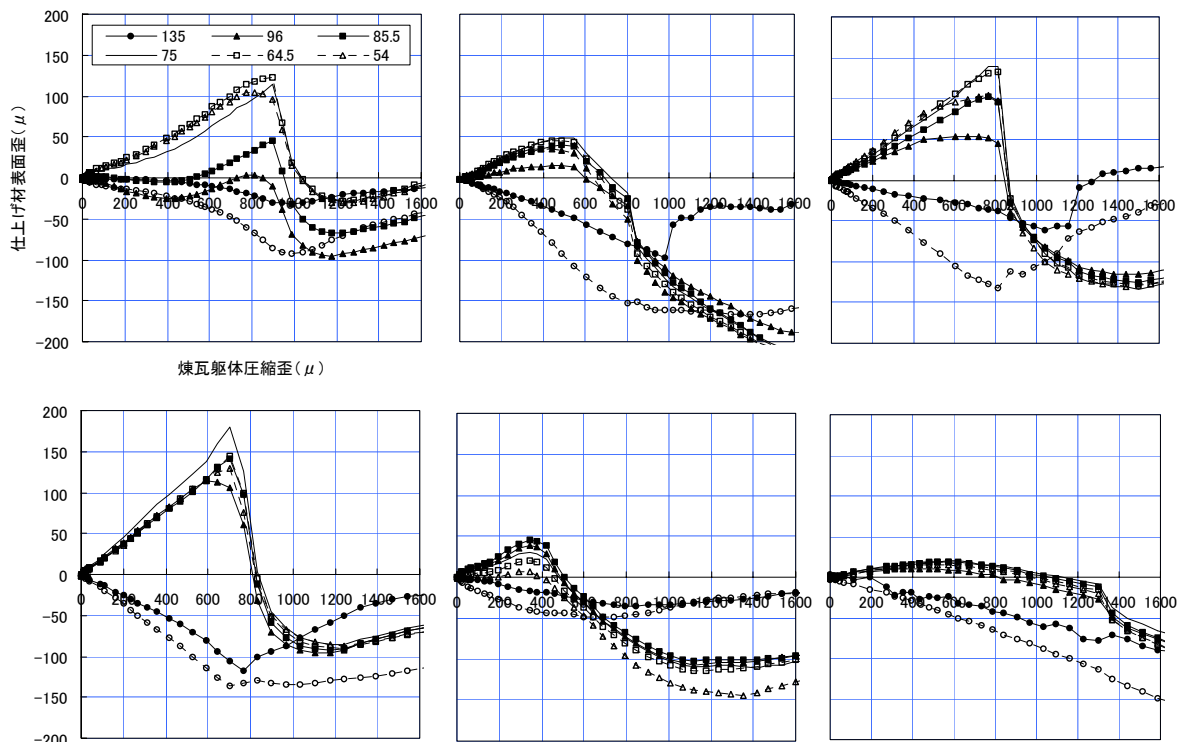


図 5 石灰セメントモルタル仕上げ材表面歪と躯体圧縮歪との関係

は珪酸ナトリウム、多孔性水ガラス、ポリシロキサン(張り)、水ガラス系硬化材およびスラリーであった。

アクリル系樹脂も無処理と同じ傾向を示したが、端部の値が変わらないことから、試験前に既に一部剥離していたものと考えられる。

珪酸リチウムやポリシロキサン(注入)では端部は先に剥離するものの中央部ではほぼ同時に仕上げ材歪が減少している。

珪酸ナトリウムと多孔性水ガラスは弾性範囲内の勾配が 45° より大きい値を示しており、このことから荷重開始からすぐに剥離が始まり、乾燥収縮などの潜在歪が仕上げ材の部分的な剥離により緩和されてより収縮側に出たものと考えられる。

4.2 破壊プロセスの検討

4.2.1 石灰セメントモルタル仕上げ

図 7 に仕上げ材表面歪と測定位置との関係を示す。仕上げ材上端部を零とし中央部までの距離と、躯体圧縮歪 200μ ごとの仕上げ材表

面歪との関係を示している。ここでは、 x 軸に ϵ_f / ϵ_m をとり、 y 軸に仕上げ材表面の距離である X を $L/2$ で割ることによって弾性精密解[3]と比較することができる。 ϵ_f / ϵ_m の値が 1.0 となる場合に躯体と仕上げ層との完全接着を表している。ただし、仕上げ層の弾性係数が極度に高い場合や仕上げ層の厚さが大きい場合 1.0 より小さくなる。今回、6 種類の試験体はどれも仕上げ材である石灰セメントモルタルが高い弾性係数のため 1.0 よりはるかに小さい値となっている。 ϵ_f / ϵ_m の値が最も観測できた接着剤はセメントスラリー A であった。それと対比的に最も観測されなかったものがポリシロキサンであった。躯体である組積体および仕上げ材である石灰セメントモルタル平板はどれも同じ弾性係数であると考えればポリシロキサンが最も追従性が高いと判断できる。ポリシロキサンは弾力性伸縮性にすぐれていれば、接着層で仕上げ層に伝わる応力を緩和していると考えられるためである。そのため、仕上げ材表面では

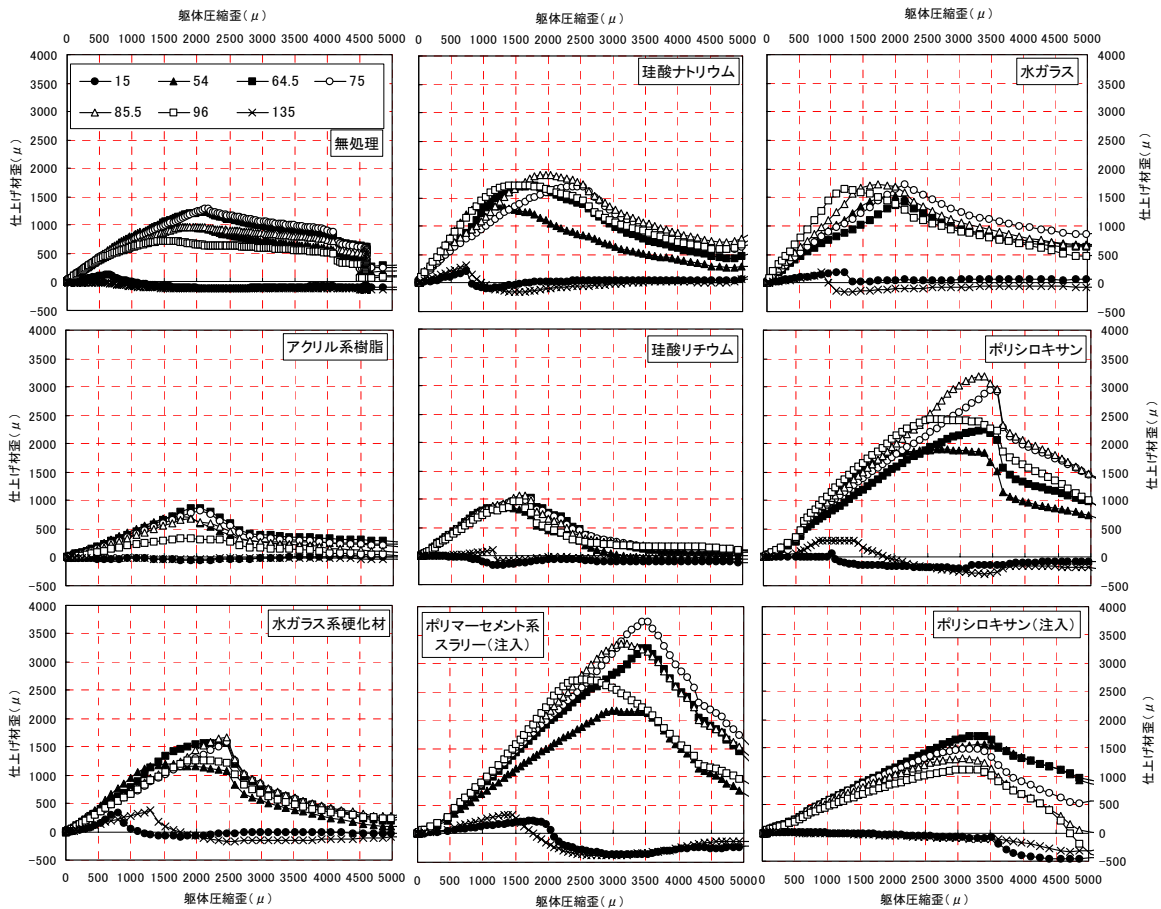


図 6 漆喰仕上げ躯体圧縮歪と仕上げ材表面歪との関係

あまり歪が観測されない結果となった。また、ポリシロキサン以外の試験体のグラフでは仕上げ材表面歪があるピークを境に急激に低下するといった傾向がみられるがポリシロキサンにおいてはピークを超えた後もなだらかに減少していることがわかる。これは仕上げ材が急激に剥離することの防止に役立つことがわかる。エポキシ樹脂A, B, セメントスラリーA, Bにおいては、ある躯体圧縮歪を境に急激に低下していることがわかる。これは、仕上げ材が脆性的に剥離していることである。

どの試験体にも共通して言えることは、端部の歪はほとんど観測できず引張力がかかっていることが確認できた。端部では始めに引張力がかかり、躯体圧縮歪が増加していくとともに引張力が緩和されていっているのがわかる。

4.2.2 漆喰仕上げ

図8に仕上げ材表面歪と測定位置との関係を示す。無処理では概ね仕上げ層端部では $\varepsilon_f/\varepsilon_m=0$ 、中心部では1.0となる。詳細に述べると、 ε_m が 500μ までは端部仕上げ層が煉瓦に接着していたがそれ以降は目地より端部側が剥離

した。仕上げ材中心は初期状態(200μ)で十分に接着しており載荷に伴い徐々に剥離していった。

珪酸ナトリウムと多孔性水ガラスでは、初期状態で中央煉瓦部の $\varepsilon_f/\varepsilon_m$ の値が1.0以上を示している。これは載荷開始から剥離が始まって仕上げ材歪が潜在歪により収縮側に出ているためである。

アクリル系樹脂、珪酸リチウムおよびポリシロキサン(注入)の3種類の補修材について、どの仕上げ材も $\varepsilon_f/\varepsilon_m$ の値が1.0よりも大幅に小さく、特に端部側では $\varepsilon_f/\varepsilon_m=0$ となっており、試験前の段階で十分に接着されていないことが考えられる。

水ガラス系硬化材とポリシロキサン(張り)について、端部側は初期状態から剥離が進んでおり、仕上げ材中心は剥離臨界点に至るまで接着破壊しなかった。また、ポリシロキサンの $X/L/2=0.86$ の位置では、試験前の段階で既に欠陥が生じていたことが言える。

最後に、スラリーにおいて端部側は 1500μ まで剥離しなかった。中心部においては剥離臨界点になるまで、すなわち、 3500μ になるまで剥離を生じなかったことが言える。

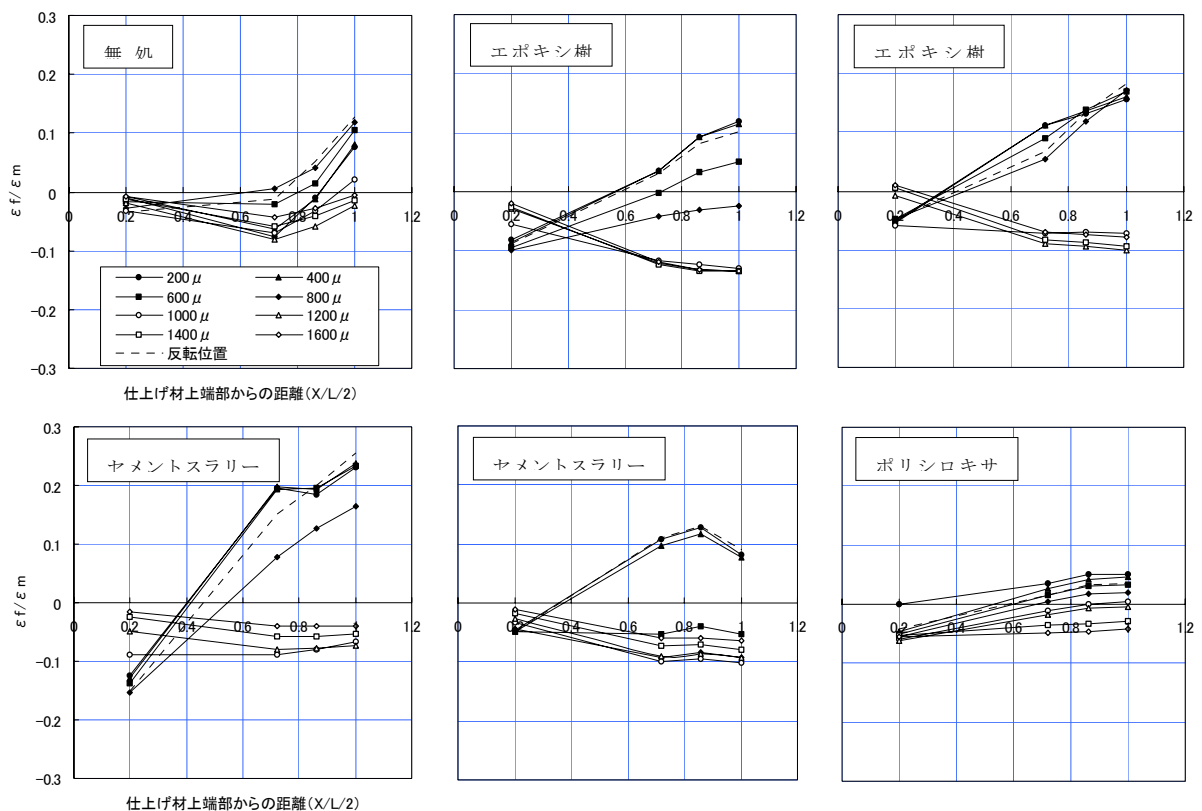


図7 石灰セメントモルタル仕上げ材表面歪と測定位置との関係

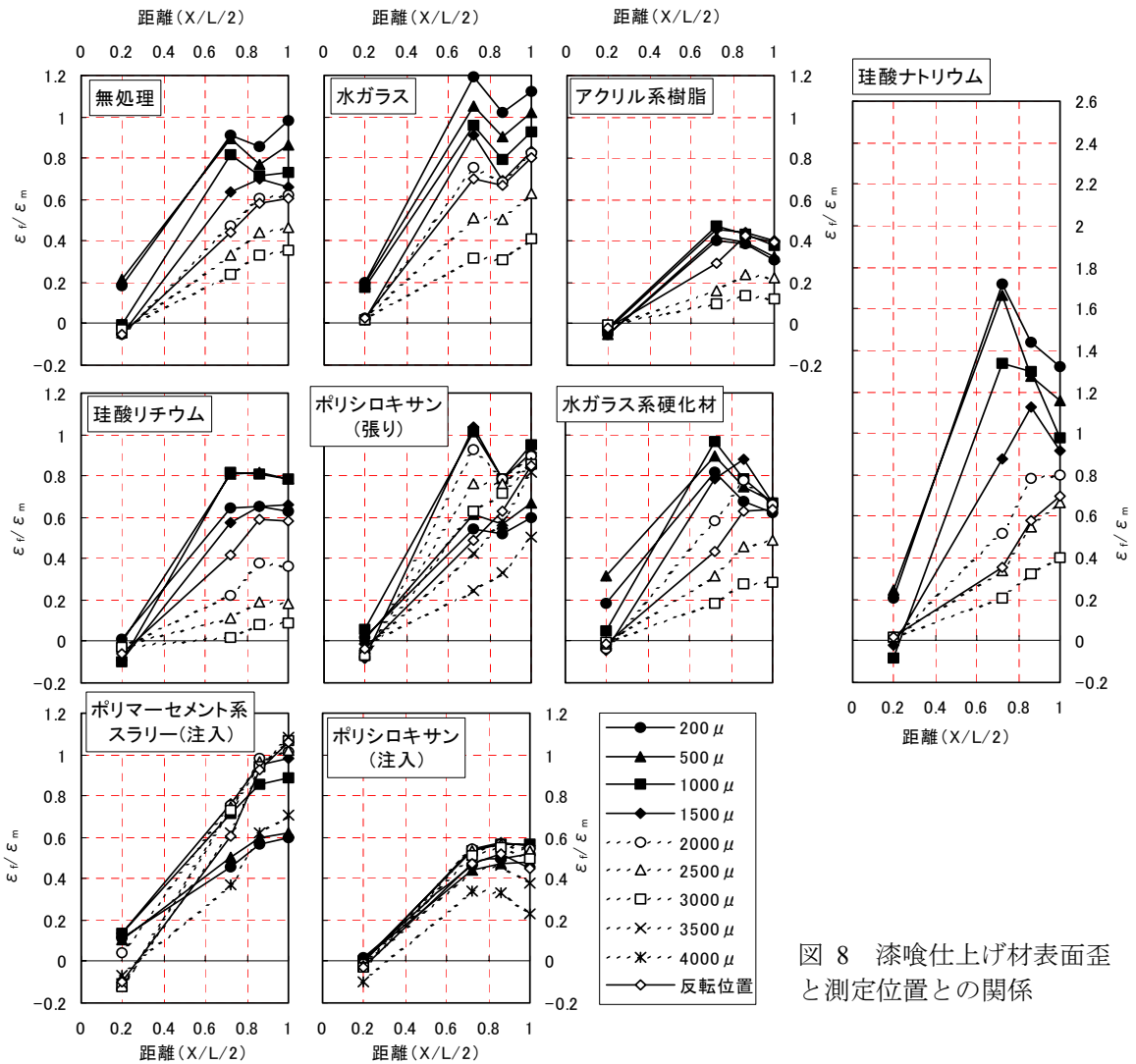


図 8 漆喰仕上げ材表面歪と測定位置との関係

5. まとめ

本研究では、煉瓦組積体における石灰セメントモルタル仕上げと漆喰仕上げの様々な補修材の違いによる変化を報告してきた。本研究は文化財煉瓦建築物長期保存判定基準のための一部分でしかなく、ここで述べる結論は試験体作製後から短い期間で実験に至ったため、この接着剤の美観性・耐久性の問題については包含していないことを述べておく。

- (1) 仕上げ材の中央部歪の剥離臨界点とともに躯体歪に対する仕上げ材歪の比を用いることにより追従性能の評価ができる。
- (2) コンクリート躯体の追従性試験と同様に煉瓦組積体においても、補修工法の剥離メカニズムを考慮して追従性評価ができることを確認できた。
- (3) 石灰セメント仕上げにおいて、セメント

スラリーAが最も高い ϵ_f / ϵ_m を示しており仕上げ層と躯体とを一体化させる高い接着性を持つことを示している。

- (4) 漆喰仕上げにおいて、追従性能が良かった補修材は、ポリマーセメント系スラリーであったと言える。

[参考文献]

- 1) 名知博司, 小野正: 外装タイル張り仕上げの剥離防止設計に関する研究, その2 軸ひずみ追従性に及ぼす各種タイル要因の影響, 日本建築学会学術講演梗概集, p169~170, 2002
- 2) 渡部嗣道, 馬場明生他: コンクリートに接着されたセメントモルタル仕上げ材の変形追従性能に関する実験的研究, 日本建築学会技術報告集第16号, p5~8, 2002
- 3) 馬場明生, 平石久廣: 仕上げ材料のひびわれ・はく離応力の弾性解析, 日本建築学会関東支部研究報告集, 1980 (平成16年8月26日受理)