木摺漆喰天井における漆喰の喰いつきに関する研究

A STUDY ON THE ADHESION OF PLASTER IN LATH AND PLASTER CEILING

津和佑子 ——— * 1 今井琢也 ——— * 2
藤本貴之 ——— * 3 岩田昌之 ——— * 4
腰原幹雄 ——— * 5

Iuko TSUWA ——— * 1 Takuya IMAI ——— * 2
Takayuki FUJIMOTO ——— * 3 Masayuki IWATA ——— * 4
Mikio KOSHIHARA ——— * 5

キーワード：
木摺漆喰、天井、付着力、近代建築、歴史的建造物、複合材料

Keywords:
Lath and plaster, Ceiling, Adhesion, Modern Japanese style architecture, Historic buildings, Composite materials

We conducted tension and shearing tests on lath and plaster ceiling in order to reveal the structural mechanism about the adhesion of plaster to wooden laths. In addition, we developed a mechanical model and a structural design formula for lath and plaster ceiling. Through the tests, it was found that whether plaster is pushed out to the rear of wooden laths or not, has the most important influence on the adhesion of plaster. We could develop the formula to accurately evaluate the strength of lath and plaster ceiling.

1. はじめに

非構造部材である天井部材の落下被害が生じたことから一般建築における天井の落下防止措置に関して新たな基準が設けられ、吊天井などの構造性能の検証等が実施されるようになってきた。文化財建造物においても洋館等で用いられる漆喰天井の漆喰が脱落する被害が見られ、天井材落下の対策が問題になっている¹⁾。

本研究で扱う木摺漆喰天井とは木摺を下地として、木摺をある一定間隔に並べ、木摺と木摺の間に漆喰を喰い込ませて作られる天井工法の一つである。木摺の裏側にはみ出した漆喰がたれて引っかかりができることで、木摺と漆喰を一体化させていると言われている(図1)。このように漆喰と木摺が一体となることを、日本の左官職人の間では漆喰の「喰いつき」と呼んでおり、本研究でもそれにならうこととする。

漆喰が落下する被害を確認すると、漆喰が木摺との界面で剥離しているものや、木摺間の漆喰ごと抜け落ちていたものが見られる¹⁾。漆喰が脱落する際の抵抗力としては上記の漆喰の喰いつきが考えられ、その要因として木摺背部への漆喰のはみ出しによる引っ掛かりや、漆喰と木摺との付着などが挙げられる。しかし各々の要因がどのように喰いつきに作用しているかは明らかになっていない。そこで、本研究では漆喰の喰いつきの構造性能を把握することを目的とした基礎的な実験を実施する。その後、実験結果に基づき、木摺漆喰天井における漆喰の喰いつきの力学的モデルを構築し、設計への適用を念頭に置いた最大耐力の算定式を提案する。

図1 木摺漆喰天井と漆喰の喰いつき

2. 実験方法

2.1 実験概要

実験は鉛直方向とせん断方向に対する喰いつきの構造性能を把握するために、引張試験とせん断試験を実施した。引張試験については全面引張試験と部分引張試験の2種類とした。前者は試験体の全面を加力し、後者は試験体の一部を加力し、加力面の周囲の漆喰が加力面にどのように引きつられるか、その影響範囲を確認した。

2.2 試験体

試験体は表2に示すように、木摺背部への漆喰の喰いつきの形状、木摺の間隔、木摺の形状、補強材の種類をパラメータとし、10種類とした。試験体作製の工程は大きく分けて下塗り、中塗り、上塗りの3工程とした。作製方法は、喰いつきに影響する下塗りの工程のみ実際の天井と同じ施工状況をつくり上向きで施工し、中塗りとは下向きで施工した。試験体は約1m角の木摺漆喰天井面を作成

¹⁾ (公財)文化財建造物保存技術協会 博士(工学)
(〒116-0013 東京都荒川区西日暮里2-32-15)

²⁾ 東京大学大学院工学系研究科 修士課程

³⁾ ㈱オーク構造設計 修士(工学)

⁴⁾ (公財)文化財建造物保存技術協会

⁵⁾ 東京大学生産技術研究所 教授・博士(工学)

¹⁾ The Japanese Association for Conservation of Architectural Monuments, Dr. Eng.

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Engineering, The Univ. of Tokyo
³⁾ Structural Design Office OAK, M. Eng.

⁴⁾ The Japanese Association for Conservation of Architectural Monuments

⁵⁾ Prof., Institute of Industrial Science, The Univ. of Tokyo, Dr. Eng.

し、そこから 30cm 角のものを 4 体採取した。このうち 3 体は全面引張試験あるいはせん断試験に、残りの 1 体は中央 10cm 角を加力面とした部分引張試験に使用した。漆喰の塗厚は 15mm とし、下げ苅は 30cm 角の試験体に V 字型が 1 本全面に入るように配置した。ただし、部分引張試験には下げ苅を配置していない (図 2)。補強材の詳細な仕様は表 2 中に示す。No. 8, 9 に使用したネットは約 1m 角の全面に下塗りの段階で木摺に釘留めはせず伏せこんだ。ネットの種類は左官で近年よく使用される材料を用いた。

2.3 加力方法

加力方法を図 2 に示す。全面引張試験とせん断試験については、漆喰面に 30cm 角の鉄板をエポキシ樹脂系接着剤によって接着し、鉄板に加力治具を取り付け加力した。部分引張試験については 10cm 角の鉄板を 30cm 角の漆喰面の中央に接着し、鉄板中央に加力治具を取り付け加力した。引張試験では試験体を実際の天井の向きとは上下を逆に設置し加力し、せん断試験では試験体を垂直に設置し加力している。

3. 実験結果

各試験体の破壊後の様子を図 3 に、落下防止を考慮して最大耐力を図 4 に示す。実験には鉄板の接着面で剥がれて加力を終了したもの、鉄板が接着面で外れたため、鉄板を貼り直し再加力したものがある。これらの結果については表 2 に示す通り名前を区別して表記する。なお No. 3-2a, b, c, d の試験体は、加力前に木摺面から漆喰が剥離したため、加力を行っていない。

3.1 全面引張試験

図 3 (i), (ii), (iii) より全面引張試験では木摺間の下塗り部分での剥離と中塗り部分での剥離、木摺間の漆喰の抜け出しが見られた。漆喰の木摺背部への喰いつき方を変えた No. 1, No. 2, No. 3 の最大耐力を比較すると、最大耐力の平均値は No. 1 に比べ No. 2 は約 1/4 となった。このことより漆喰が木摺の背部へはみ出し、漆喰が木摺に引っかかるか否かが最大耐力に最も影響を与えるということが読み取れる。また No. 2, No. 3 を比較すると、耐力に大きな差が見られないことから、木摺間における木摺と漆喰の付着力はほとんどないことも判明した。No. 1 に対して、補強材を変更したもの (No. 7, No. 8, No. 9, No. 10) を比較すると、必ずしも補強材を変更したものの最大耐力が大きいわけではないことがわかる。木摺の形状を変えた No. 6 の最大耐力は No. 2 よりも平均して約 4 倍大きくなった。これは木摺の形を台形にしたことで、木摺間の漆喰と木摺の付着だけでなく、漆喰の木摺への引っ掛かりが生じたためと考えられる。ただし、漆喰を施工する際、台形の木摺では塗った漆喰が木摺間から垂れやすく、施工性が良いとは言えないことが課題である。

試験体の漆喰の密度は $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ であったため、30cm 角、厚さ 15mm の試験体の漆喰重量は 0.017kN である。No. 1 の最大耐力 (a, b, c の平均値 1.74kN) は、漆喰の自重の約 100 倍であった。最大耐力が最も低い No. 2 (a, b, c の平均値 0.05kN) も自重の約 3 倍の耐力を保持していた。このことより木摺漆喰天井は劣化等がなければ自重に対しては十分な耐力を有していると言える。

3.2 部分引張試験

部分引張試験では No. 2-1d, No. 3 を除くと、ほぼ加力面のみの漆喰が中塗りで剥離し、加力した 10cm 角の周囲の漆喰には大きな損傷

表 2 試験体一覧

試験体	漆喰の喰いつき	木摺間隔	木摺の形状	補強材
1	漆喰上部あり	10	長方形	下げ苅
2	漆喰上部なし	10	長方形	下げ苅
3	漆喰木摺間なし	10	長方形	下げ苅
4	木摺間隔狭い	8	長方形	下げ苅
5	木摺間隔広い	12	長方形	下げ苅
6	木摺補強台形	10	台形	下げ苅
7	下げ苅を広げて配置	10	長方形	下げ苅
8	3軸メッシュのネット	10	長方形	ビニロン繊維で3軸(1辺約10mmの正三角形)で構成したメッシュ
9	5mm角メッシュのネット	10	長方形	ガラス繊維製の5mm角メッシュ
10	下げ苅の水平に配置	10	長方形	下げ苅2本を水平に配置両端を釘留め

試験体番号は、試験体種類番号の後に-1a, -1b, -1c を全面引張試験, 2a, -2b, -2c をせん断試験, -1d, -2d を部分引張試験とする。鉄板の接着面で剥がれて加力を終了したものは末尾に*を、加力中に鉄板が接着面で外れ鉄板を貼り直し再加力したものは末尾に**をつける。

は見られなかった（図3（iv））。一方、No. 2-1d, No. 3 では加力面の周囲の漆喰も含め試験体全体が剥離した（図3（v））。これは、漆喰が 30cm 角内の木摺背部に十分にはみ出し引っ掛かりがある場合、その引っ掛かりによる引張抵抗力が 10cm 角内の漆喰中塗層の付着力よりも強いためであると考えられる。その結果、漆喰中塗層が破壊し、漆喰が剥離したと考えられる。最大耐力は、No. 2-1d, No. 3 以外は、いずれも最大耐力が約 1kN となった。

3.3 セン断試験

図3（vi）のように No. 3 を除く全ての試験体で木摺と漆喰の界面、つまり木摺間にある下塗り漆喰で破壊が生じた。

試験体の仕様ごとの最大耐力の平均値について No. 1 を基準にすると他の試験体は約 0.8 倍から約 1.2 倍の値を示している。漆喰の喰いつきの形状や木摺の形状は最大耐力に多少の影響は与えるものの、全面引張試験と比べると破壊性状も含めて大きな違いは見られなかった。

4. 力学的モデル

4.1 パネの配置

実験結果に基づき、力学的モデルを構築する。まず試験体の破壊状況より、木摺漆喰の破壊モードを引張試験では面状破壊・線状破壊・抜け出し破壊の 3 つに、せん断試験では面状破壊・線状破壊の 2 つに分類した（図5）。そしてこれらの破壊モードを組み合わせることで、すべての試験体は 4 種類の破壊性状に分類することができる（表3、表4）。また破壊形式と木摺漆喰の構造を考慮し、木摺漆喰の外力に抵抗するパネを図6のように配置した。

4.2 特性値の算出

以下の3つの仮定を行うことで、各パネの特性値（最大応力度）を算出する。

- 全ての試験体は3種類の破壊モードの組み合わせ、あるいは単一のモードで破壊している。
- 最大耐力時にその破壊モードに関与するパネは全て最大応力度をとっている。
- 面としての最大引張応力度 $a \sigma_{max}$ は全面引張試験と部分引張試験より推定可能であるが、部分引張試験は面状破壊の単一モードのみで破壊しており全面試験結果と破壊性状が異なるため、ここでは区別する。なお部分引張試験より求められたパネaの特性値を $a_1 \sigma_{max}$ 、全面引張試験より求められたものを $a_2 \sigma_{max}$ とした。

上記の仮定を踏まえ、各特性値を算出する。まず表3、表4に示すように単一のパネにより試験体の耐力が決まるものから特性値を求める。次に複数のパネにより耐力が決まるものについて、それぞれの破壊モードの面積を図5のような試験体の破壊後の写真画像から算出する。それぞれの面積に既に求めたパネの特性値を掛けて耐力を算出し、全体の耐力から差し引くことで残りのパネの耐力を求め、特性値を算出する。表5に求めた特性値の平均値を示す。ただし木摺からはみ出しによる漆喰せん断パネ e の特性値 $e \sigma_{max}$ については、はみ出しの形状が逐一変化するため、抜け出し長さあたりの抵抗力 $e Q_{max}$ も共に記す。

5. 設計への適用

5.1 引張力とせん断力に対する耐力算定式

図5 試験体の破壊モード

- a. 面としての漆喰引張パネ
b. 木摺と漆喰の付着引張パネ
c. 木摺間の線としての漆喰引張パネ
d. 木摺と漆喰の付着せん断パネ
e. 木摺からはみ出しによる漆喰せん断パネ
f. 面としての漆喰せん断パネ
g. 漆喰と木摺の付着せん断パネ
h. 木摺間の線としての漆喰せん断パネ

図6 木摺漆喰の外力に対する抵抗要素

表3 破壊モードと抵抗パネの関係（全面引張試験）

破壊モードの組み合わせ		抵抗パネ					備考
		a	b	c	d	e	
	抜け出し破壊	-	○	-	-	-	No. 3-1より No. 2-1より
線状破壊		-	○	○	○	-	-
線状破壊	+	面状破壊	○	○	○	-	-
線状破壊	+	面状破壊	+	抜け出し破壊	○	○	-

表4 破壊モードと抵抗パネの関係（せん断試験）

破壊モードの組み合わせ		抵抗パネ			備考
		f	g	h	
	抜け出し破壊	-	○	-	No. 3-2より*
線状破壊		-	○	○	-
線状破壊	+	面状破壊	○	○	-

※加力前に破壊

表5 特性値一覧

パネ名称	a		b	c	d	e		f	g	h
特性値	$a_1 \sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$a_2 \sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$b \sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$c \sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$d \tau_{\max}$ (N/mm ²)	$e Q_{\max}$ (N/mm)	$e \sigma_{\max}$ (N/mm ²)	$f \tau_{\max}$ (N/mm ²)	$g \tau_{\max}$ (N/mm ²)	$h \tau_{\max}$ (N/mm ²)
平均	0.096	0.021	0.0007	0.0587	0.0082	1.15	0.208	0.127	0.000	0.198

前章で求めた各特性値を使用して新たに木摺漆喰を施工する際に、その耐力を予測する算定式を考案する。図5で示した3つの破壊モード（面状破壊、線状破壊、抜け出し破壊）は、どのパネが最大耐力に対して支配的であるかによって図7、図8の様に分類できる。それらの分類に基づき、設計値は次の手順で求める事ができる。まずそれぞれの特性値にそれに対応する面積を掛けあわせ、試験体とそのパネで破壊した時の耐力を予測する（例えばパネbの場合、 $b \sigma_{max} \times$ 木摺の面積）。次に同じ破壊モードのうち最も高い耐力を示す特性値をそのモードの耐力とする（例えば線状破壊の場合、パネbとパネcで破壊した時の耐力のうち大きい値）。最後に各破壊モードの耐力のうち、最も低い値を試験体の設計値とする（式（1）、（2））。

引張力に対する設計値 $= \min \{A, \max \{B, C\}, \max \{B, D, E\}\}$ 式（1）

せん断力に対する設計値 $= \min \{F, \max \{G, H\}\}$ 式（2）

ただし大文字の英字は各パネの耐力を示し、（特性値）×（それに対応する面積または長さ）によって求められる。

5.2 耐力算定式の評価

考案した算定式（式（1）、（2））の妥当性を評価する。図9に

各試験体の設計値を実験値で除した検定値を示している。検定値は試験結果を算定式で求めた値で除したもので、1以下の時に安全側の設計と言える。図9よりほぼ全て試験体に関して、検定値が1以下であることから、考案した算定式で安全側に設計できることを示した。

ほぼ全ての試験体に関して検定値が1を下回り安全率が生じる理由には次の2点が考えられる。1点目は実際に試験体が破壊した時に漆喰が抵抗していた幅と、設計値を算出する際に想定していた漆喰が抵抗する幅が異なるためである。例えば全面引張試験で線状破壊の耐力がバネcで決まる時を考えてみると、設計値はバネcの特性値 σ_{max} に木摺間の漆喰の幅をかけることで求められる。しかし実際には木摺間の漆喰は周囲を引き連れて破壊するため、設計値を算出するときに想定した幅よりも実際に壊れる時の漆喰の幅は大きくなり耐力が上昇する(図10)。2点目は設計値を求める際に単一のモードのみで破壊すると想定しているためである。実際の破壊性状は図5のように、いくつかの破壊モードが混在して破壊する。しかし本算定式は最も低い耐力の破壊モードでのみ破壊する仮定しているため、実際の耐力より低く評価することになる。一方、検定値が1を上回る試験体はいくつかあるが、これは漆喰という材料自

体の構造性能にばらつきが生じるためである。今後試験体数を増やすことで解消する事ができると考えられる。

6. まとめ

木摺漆喰天井の漆喰の喰いつきに着目し、木摺漆喰天井の全面引張試験、部分引張試験、せん断試験を行った。本実験により得られた知見は以下の通りである。

- 1) 全面引張試験では木摺間の漆喰の有無や木摺の背部に漆喰がはみ出しているかどうか最大耐力に大きな影響を与える。
- 2) 部分引張試験では全面引張試験と同様に1)に示す傾向が見られた。また、ほとんどの試験体で加力面でのみ破壊が生じた。
- 3) せん断試験では木摺間の漆喰や木摺背部へのはみ出しがないNo.3を除くと、全ての試験体が同程度の最大耐力を示した。
- 4) 補強材を追加した試験体(No.7~10)では、従来の工法である試験体(No.1)と比べ、最大耐力の向上は見られなかった。
- 5) 木摺漆喰天井の喰いつきの力学的モデルを引張バネ及びせん断バネで作成し、実験結果から各バネの特性値を算出することができた。ただし特性値は試験体の仕様によって変わることが考えられ、漆喰の材料特性や経年変化などの影響については別途検討が必要である。

6) 提案した算定式(1),(2)を用いることで、今回実験した木摺漆喰天井の耐力を評価することができた。

7) 本検討では漆喰の喰いつきについて基礎的な構造性能を把握できたが、今後、実際の建物での脱落状況と併せたモデル化や既存天井の構造性能評価方法の検証を進める必要がある。

本実験を行うにあたり多大な御協力を頂いた関係者各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 岩田昌之, 津和佑子: 天井部材の構造安全性について、『文建協通信』No.121, P.34-41, 2015.7

引張破壊	最大耐力時に破壊するバネ		各モードの耐力
破壊モードⅠ 面状破壊		例えば(バネaで破壊した時の予測耐力) = (aの特性値) × (漆喰面の面積) とし、下記のように表記する $A = \sigma_{a \max} \cdot a_{\text{Area}}$	A
破壊モードⅡ 線状破壊			max [B, C]
破壊モードⅢ 抜け出し破壊			max [B, D, E]

引張力に対する設計値 $=\min[A, \max[B, C], \max[B, D, E]]$
図7 引張加力時の破壊モード別の耐力と算定式

せん断破壊	最大耐力時に破壊するバネ		各モードの耐力
破壊モードⅠ 面状破壊		例えば(バネfで破壊した時の予測耐力) = (fの特性値) × (漆喰面の面積) とし、下記のように表記する $F = \tau_{f \max} \cdot f_{\text{Area}}$	F
破壊モードⅡ 線状破壊			max [G, H]

せん断力に対する設計値 $=\min[F, \max[G, H]]$
図8 せん断加力時の破壊モード別の耐力と算定式

図9 各試験体の検定値

図10 実際に破壊する時の幅と設計値算出時の幅

[2016年10月5日原稿受理 2016年12月9日採用決定]