

歴史的建築物の木摺り漆喰天井への非破壊試験による保有耐力評価

DB18335 吉田さくら

1. はじめに

近年、建築物の長期使用や、長寿命化が進んでいる。しかし、首都直下型地震など災害に対して、過去の基準では使用環境の継続性に対応することができなくなっており、災害後の安全性に関する基準が、より高いレベルで求められている。構造部材に付加されている下地、仕上げ材は、構造的な安全性が高い基準で求められていないことがあるため、長期的な使用により劣化が生じるとともに、剥離や剥落への影響が問題視されている。

歴史的に重要な建築物に関しては、建物が長期的に維持されるために、使用されている非構造部材の耐久性も重要であると考えられる。それらの建物には、木摺り漆喰天井や内外装石材が多用されており、吹き抜け部などでは、非構造部材である漆喰天井についても、地震など外部からの力が加わることで、剥離や剥落などが起こる危険性があり、長期的に建物を使用する上で無視することはできない。

そこで本研究では、木摺り漆喰天井に着眼し、耐力評価に影響する目透かし部における漆喰引っ掛かり部の物理的特性を評価する。1930 年代に建設された歴史的建築物から採取した木摺り漆喰天井 4 枚の調査を行い、様々な物理的特性について測定を行う。測定結果から部材ごとの重量を算出し、全体の重量から漆喰部固定荷重を算出し、現在の木摺り漆喰天井の保有耐力の比から余裕度を把握する。また、採取した天井の撮影情報から、漆喰の引っ掛かり部の面積率などの画像解析を行い、非構造部材である漆喰天井について、現状の健全度評価を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体の概要

表 1 に研究対象試験体の概要を示す。本試験体は、国内に現存し、現在も重要度が極めて高い歴史的建築物から採取した木摺り漆喰天井の 4 枚のうち、3 枚が共用部の天井に使用されているもの、1 枚が居室部分にあたる会議室の天井に使用されているものとなっている。以後、実部材 1～4 とする。

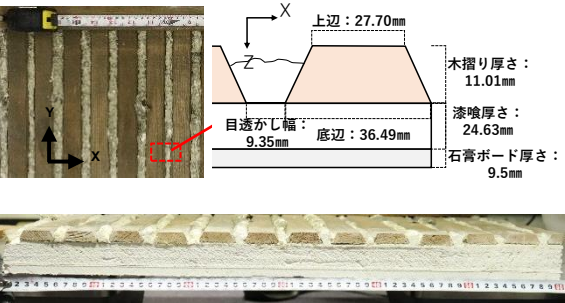
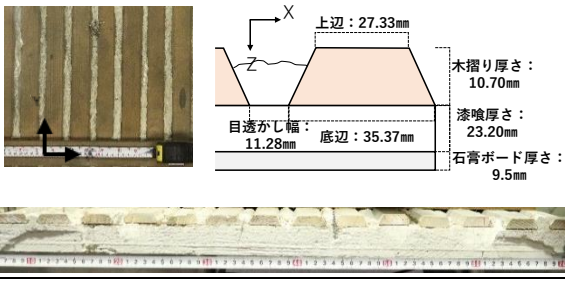
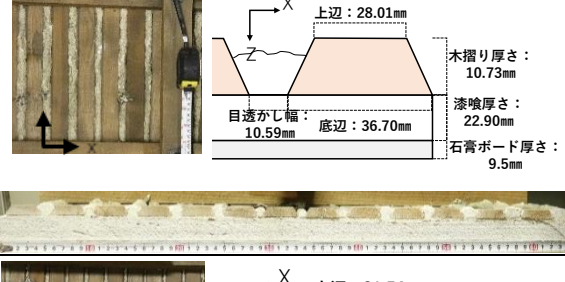
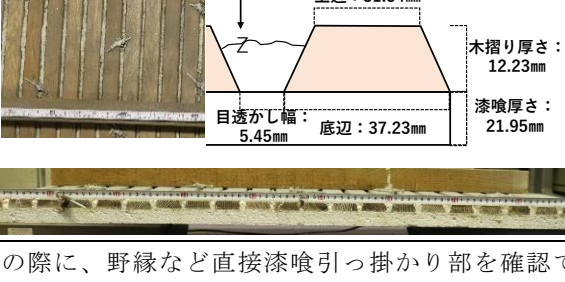
2.2 木摺り漆喰天井の実測による調査概要

歴史的建築物より採取した木摺り漆喰天井 4 枚について、実際に寸法、重量を測定し調査を行う。木摺り断面側の両端を測定し、平均値を算出した。また変動係数より、採取場所による木摺り漆喰天井の性能のばらつきを評価する。

2.3 漆喰引っ掛かり部の画像解析による評価方法

画像解析により漆喰引っ掛かり部の面積を求め、その値を用い天井板 1 枚に対する引っ掛かり部の評価を行う。表 2 に引っ掛かり部の概念図、評価方法を示す。画

表 1 研究対象試験体の概要と平均寸法（実測値）

歴史的建築物の木摺り漆喰天井採取部材（1930 年代竣工）	
実部材 1	
実部材 2	
実部材 3	
実部材 4	

像解析の際に、野縁など直接漆喰引っ掛かり部を確認できない部分は、直線として考える。

2.4 引っ掛かり部の集中度による評価方法

木摺り漆喰天井の目透かし部を木摺り長手方向に 40 マス、野縁方向に 5 マスに割りふり、これを親グリッドとする。図 1 にグリッド図を示す。1 マスの横の長さは、割り当てられた目透かし幅と同一にする。また、縦全体の長さは、野縁間の長さが 1 番狭い実部材 3 に合わせ、24cm とする。配置した親グリッドを木摺り長手方向 5 マスごとに分割し、これを子グリッドとする。今回は、親グリッドを各天井板 6 カ所作成した。決められた親グリッドごとに評価値 A を算出する。表 2 に評価値 A の概念を示す。また、評価値 A を用い、集中度 S、集中度偏差を算出する。

2.5 木摺り下地の非構造部特性評価方法

木摺り下地の非構造部特性として、目透かし部の保有耐力の余裕度を評価する。表2に評価方法を示す。目透かし部の引張強度は、新規製作の試験体の試験結果より求めた。評価対象領域内の目透かし部領域と予備試験より求めた引張強度 0.0469 (N/mm²) の積より、目透かし部の保有耐力を求める。

2.6 木摺り下地漆喰層における非構造部特性評価方法

石膏ボードがついていない実部材4に対して、エコーチップ硬さ試験機を用いて、非破壊試験を行う。

実部材4に対して、9 cmを10×10 マスの計100 マスを割り振った。本試験は、同一箇所を連続して打撃する連打法^{2) 3)}で行う。塗装の有無により、値の変化があるのか確認するために、塗装がある箇所、塗装をめくり塗装がない箇所を30 回/マス叩き、結果を比較した。表2にマス目の配置、エコーチップ硬さ試験機を示す。図6のa)に、打撃回数ごとの数値結果の変化を示す。

グラフより、塗装有無に関わらず、最初の値は塗装による表面硬度差が出ているが、その後は大きな変化もなく最終的な収束値は変わらないため、今後は塗装の有無は考えないとする。また、1～10 回目までは値の上昇が見られたがその後は、ほぼ収束したため、今後は15 回目までの測定とする。

3. 実験結果

3.1 木摺り漆喰天井の実測による調査

表1、表3に採取した木摺り漆喰天井の重量、寸法の結果を示す。また、図2に各天井の目透かし幅、木摺り厚さ、木摺り底辺長さ、木摺りのテーパ角度を示す。実部材1～3の値は、大きな違いがなかった。しかし、実部材1～3と実部材4では、目透かし部の幅が大きく異なり、漆喰の自重を支える保有耐力も異なることがわかる。建設当時は、全て手作業で行われたことから、用途や場所によってのばらつきがあることが考えられる。

3.2 漆喰引っ掛かり部の画像解析による評価結果

表4に引っ掛かり部の評価結果を示す。結果より、平均アンカー幅を求めることで、テーパ幅に対しての充足率を求めることができた。目透かし幅とは違い、充足率では、実部材1～3に比べ実部材4の方が高くなっていることがわかる。実部材4では、全体の目透かし部の存在率は小さいが、目透かし部に漆喰が十分に充填されていることになる。

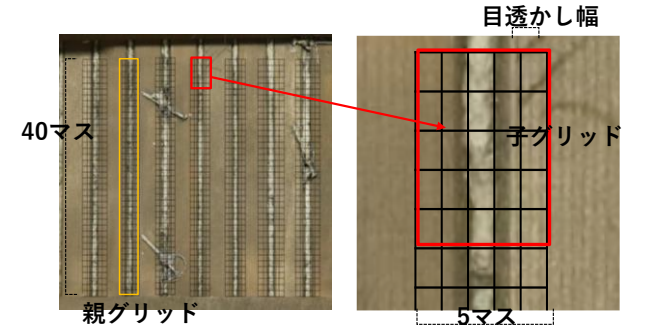


図1 目透かし部の充足率分析のグリッド図

表2 実験方法および評価方法

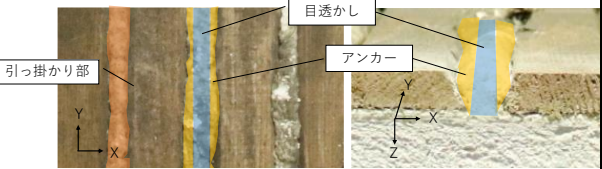
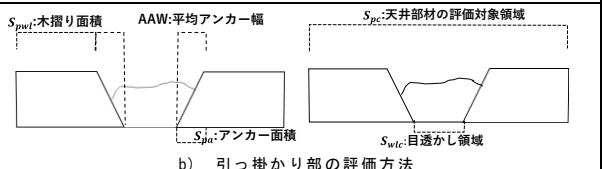
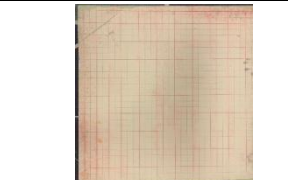
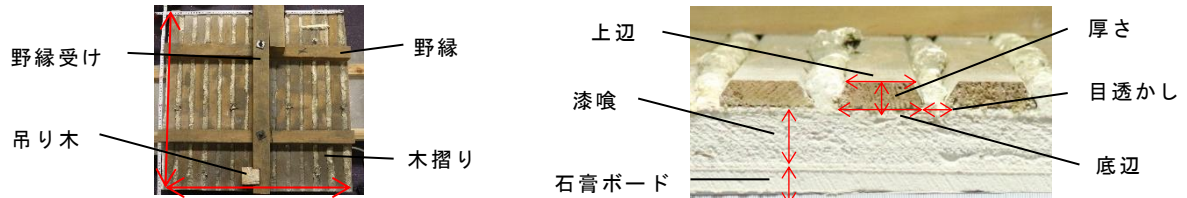
漆喰引っ掛かり部の物性値	目透かし存在率 (%) ¹⁾	天井板1枚に対しての目透かし部の面積の割合 $GR = \frac{\Sigma S_{wlc}(mm^2)}{\Sigma S_{pc}(mm^2)}$ S_{wlc} : 評価対象領域の目透かし部領域 S_{pc} : 天井部材の評価対象領域
	アンカー率 (%) ¹⁾	全体の木摺り面積の全体のアンカー部面積の割合 $AR = \frac{\Sigma S_{pa}(mm^2)}{\Sigma S_{pwl}(mm^2)}$ S_{pa} : 評価対象領域のアンカー部面積 S_{pwl} : 評価対象領域の木摺り面積
	平均アンカー幅 (mm) ¹⁾	木摺り長さ方向1辺あたりのアンカー部の平均幅 $AAW = \frac{\Sigma S_{pc}(mm^2)}{L_{wl}(mm)} \times (2n - 2) \times 10$ L_{wl} : 木摺りの長さ n : 評価対象領域の木摺り本数
	充足率 (%)	テーパ幅に対する引っ掛かり部の割合 $FR = \frac{AAW(mm)}{TW(mm)}$ TW : テーパ幅
漆喰引っ掛かり部の評価方法		
		
集中度の評価方法	評価値Aの算出 ¹⁾	子グリッド内のあるマスに対し、隣接する右マスのどちらにも漆喰が存在する場合には1とし、それ以外の場合は0として評価値Aを算出する。あるマスに対し、隣接する下マスについても同様に評価をする。1マスあたりの最大値は2、最小値は0となる。 評価値1 評価値0 
	集中度Sの算出 ¹⁾	算出した評価値を子グリッドごとに合計し、子グリッドあたりの評価値総和の最大値(接辺数)で除して求める。 $S = \frac{\Sigma A}{m(n-1)+n(m-1)}$ m : 縦マス数 n : 横マス数
	集中度偏差の算出 ¹⁾	目透かし部1列ごとの引っ掛かり部のばらつきを評価するために、子グリッドごとの集中度Sの標準偏差を親グリッドごとに算出する。
目透かし部の保有耐力	目透かし部の保有耐力 (N)	目透かし部全体での強度 目透かし部全体の面積と目透かし部漆喰の引張強度 0.0461 (N/mm ²) の積より算出される。(木摺り表面と漆喰界面の付着はないと考える。) $SHC_{ps} = \Sigma S_{wlc}(mm^2) \times 0.0469(N/mm^2)$
	漆喰に対する保有耐力の余裕度	目透かし部の保有耐力と漆喰の自重の比 漆喰の自重と目透かし部の保有耐力の除算で求められる。 $MS = \frac{SHC_{ps}(N/m^2)}{W_p(N/m^2)}$ W_p : 漆喰の自重
非破壊試験の方法	 	
	エコーチップ硬さ試験機	先端部分のテストチップを試験体表面に打ち付ける際の打撃速度と反発速度から機械インピーダンス (HLD 値) を算出する。 $HLD = \frac{V}{V_0} \times 1000$ v : インパクトの反発速度 (m/s) v_0 : インパクトの打撃速度 (m/s)

表 3 歴史的建築物からの採取天井の実測による調査結果

部位	単位	実部材 1	実部材 2	実部材 3	実部材 4
全体	質量(g)	17128.0	20063.90	22868.4	30753.9
	寸法(mm)	593×601	630×649.5	655×650.5	897×895.6
木摺下地 ()内は標準 偏差	底辺(mm)	36.49(0.04)	35.37(0.05)	36.70(0.03)	37.23(0.02)
	上辺(mm)	27.70(0.03)	27.33(0.06)	28.01(0.04)	31.54(0.02)
	厚さ(mm)	11.01(0.08)	10.70(0.06)	10.73(0.05)	12.23(0.04)
	本数(本)	12.62	13.58	13.21	20.47
目透かし	幅(mm)	9.35	11.28	10.59	5.47
	本数(本)	13.00	13.00	13.50	21.00
野縁	寸法(mm)	41.0×39.15×601.0	45.15×44.65×650.0 44.95×45.15×649.0	41.85×42.9×650.0 43.65×43.35×651.0	42.0×49.0×910.0 45.55×46.95×910.0
野縁受け	寸法(mm)		58.9×51.8×630.0	57.1×51.85×951.0 56.8×52.05×477.0	43.8×47.95×377.0
吊り木	寸法(mm)		56.7×52.5×151.0	53.4×56.2×101.9 54.3×53.4×93.5	
漆喰	厚さ(mm)	24.63	23.20	22.90	21.90
石膏ボード	厚さ(mm)	9.5	9.5	9.5	



3.3 漆喰引っ掛かり部の集中度の評価結果

図 3 に天井板ごとの引っ掛かり部において、縦、横、合計で漆喰の集中を示す。どの木摺漆喰天井においても親グリッドごとに、縦、横、合計で同様のばらつきが見られる。天井ごとに比較すると、実部材 4 の集中度が低くなっていることが分かり、目透かし幅が狭く、引っ掛かり部の漆喰も少ないことになる。そのため、漆喰引っ掛かり部の集中度が低い箇所が、目透かし部の保有耐力の計算結果に満たない可能性がある。漆喰は均一ではないことから、強度に関してもばらつきがあると考えられる。また、漆喰引っ掛かり部のばらつきが分かることで、施工のばらつきを確認することができる。

3.4 木摺り下地の非構造部特性の評価結果

表 5 に木摺り下地の目透かし部における非構造部特性の結果、図 4 に木摺漆喰天井板 1 枚に対する目透かし部の存在率、図 5 に漆喰の自重に対する保有耐力の余裕度を示す。全ての天井板において、漆喰の自重に対して、目透かし部の保有耐力は 19～31 倍であり、計算上は十分な値であると言える。しかし、天井板の採取場所の天井高が 4m 以上や、漆喰の自重が大きいこと、漆喰の強度や施工のばらつきが大きいことで、計算上の余裕度を満たしていない部位が存在する可能性がある。それらの部位が起因となり、剥離・剥落が起こる可能性がある。施工のばらつきに関しては、漆喰引っ掛かり部の集中度の評価により、確認することができる。

目透かし部の引張強度は、新規製作試験体と採取し検体の間で、漆喰物性に差がある可能性は認識している。漆喰の強度は、材令との相関があるため材令が若い方が強度は低いと考えられる。経年変化は不確定要素が多いため現段階では、新規試験体の漆喰強度と目透かし部面積で保有耐力を計算することで、不利側の検討とした。今後、現地採取天井による強度試験を行い、新規製作試験体との相関より、保有耐力算定の確度を上げる。

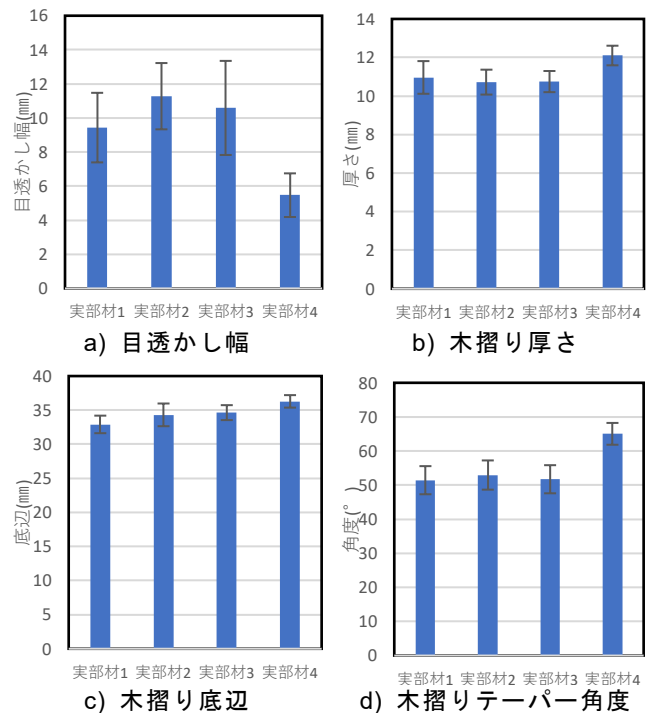


図 2 採取天井の実測による調査結果

表 4 漆喰引っ掛かり部の特性値

部位	実部材 1	実部材 2	実部材 3	実部材 4
目透かし存在率(%)	20%	23%	22%	13%
アンカー率(%)	12%	15%	18%	11%
平均アンカー幅(mm)	2.56 mm	2.74 mm	3.27 mm	2.21 mm
テーパ幅に対する充足率(%)	58%	63%	75%	78%

表 5 木摺り下地の目透かし部における非構造部特性

部位	実部材 1	実部材 2	実部材 3	実部材 4
目透かし部の保有耐力(N/㎡)	9481.12	10585.90	10306.05	5820.22
漆喰の自重(N/㎡)	370.89	331.73	371.70	310.64
漆喰の自重に対する保有耐力の余裕度	25.56	31.91	27.73	19.06

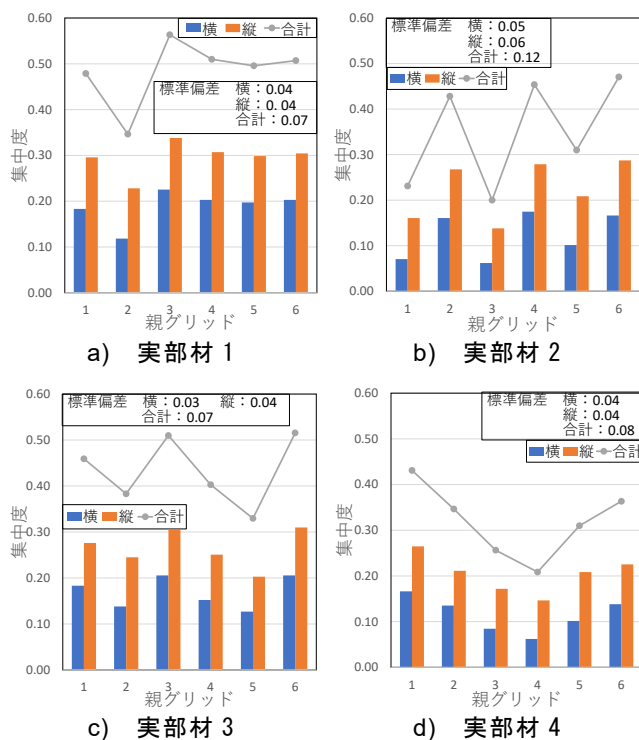


図 3 引っ掛かり部における漆喰の集中度

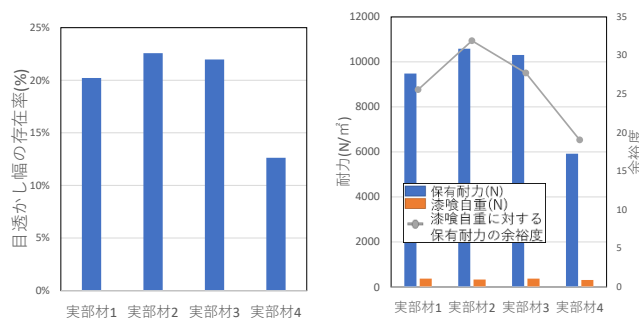


図 4 目透かし存在率

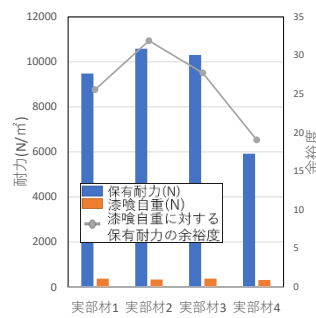
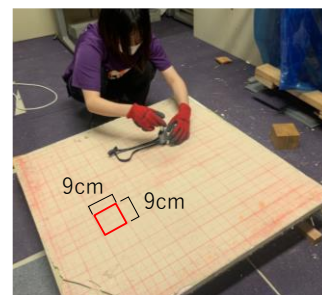
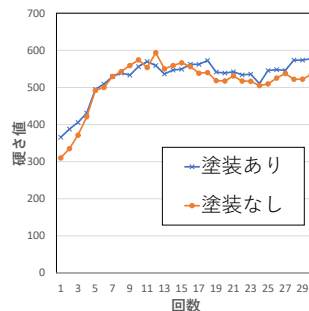


図 5 天井の保有耐力と漆喰の自重に対する余裕度

3.5 非破壊試験による木摺り下地漆喰の非構造部特性の評価結果

図 6 の c) d) に 15 回叩きにおける 1 打目と収束値の HLD 値の分布図を示す。図 6 の a) の 30 回叩きと同様に、最初の値から複数回叩くと徐々に大きくなり、その後収束する傾向が見られた。他の材料においても、連打法による同じような傾向があると報告^{2) 3)} されている。最初の一打は、表層の硬さを測ることができるが、複数回叩き圧密された部分は、内部の硬さの値であるのか確認が必要である。

歴史的に重要な建築物は、実際に引っ張ったり、破壊したりすることで、評価を行うことが不可能である。そのため、天井裏からは 3.4 の方法により、木摺り下地の物理的特性（目透かし幅、漆喰の自重）を踏まえて、目透かし部の保有耐力の想定を行う。そして、仕上げ面からは、非破壊試験により、HLD 値を求めることができる。ここでは、HLD 値による硬さ値の相関関係は今後の調査課題であるが、それらをデータベース化することで、破壊試験を行うことなく、木摺り漆喰天井の天井裏と仕上げ面から非構造部の耐力評価が可能になり、耐震性や保有性能が求められると考えられる。

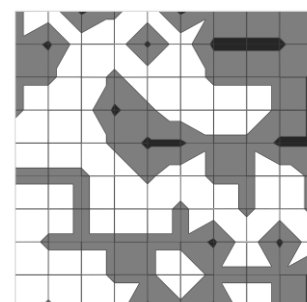
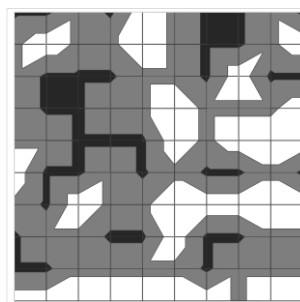


a) 30 回叩きによる平均

b) 100 マスの試験様子

Avg. + $\sigma/2$ 以上
337.5~
Avg. $\pm \sigma/2$ 以内
324.5
Avg. - $\sigma/2$ 以下
~311.5

Avg. + $\sigma/2$ 以上
597.7~
Avg. $\pm \sigma/2$ 以内
565.7
Avg. - $\sigma/2$ 以下
~533.6



c) 1 回目の HLD 値分布図

d) 収束値の HLD 値分布図

図 6 非破壊試験における漆喰層の評価結果

4. まとめ

- 1) 歴史的建築物の木摺り漆喰天井の実測値により、漆喰の自重に対する目透かし部の保有耐力の余裕度、外観観察による漆喰引っ掛かり部の集中度が明らかにされた。
- 2) 非構造部材の耐震性評価に関わる基礎的情報を定量化できた。目透かし部の漆喰が均一に配置されていないため、目透かし部の引張強度にもばらつきがあると考えられる。
- 3) 木摺り漆喰天井の天井仕上げ面である漆喰層からの衝撃弾性波速度比による非破壊評価により、漆喰部の表面硬さの変化の特性を明らかにされた。

謝辞

本研究は、当該歴史的建築物の実部材を用いた試験に際しまして、関係各位に多大なご助力を賜りました。改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 岡健太郎、田村雅紀、後藤治：歴史的建造物における既存左官天井の非破壊による健全度評価の基礎的検討、日本建築学会構造系論文集第 82 巻 第 736 号、791-799、2017 年 6 月
- 2) 青木久、松倉公憲：エコチップ硬さ試験機による青島砂岩の表面風化層の強度把握、地形、日本地形学連合 編 25(4) 2004.10 p. 371~382 2004.10
- 3) 中家渉、青木久、早川裕式、松倉公憲：連打法によるエコチップ硬さ試験機の反発値と微小窪みとの関係、筑波大学陸域環境研究センター報告、No. 10、29~36、2009