

建築物の LCM における維持保全と保存的活用ストラテジー

DB11037 岡健太郎

1. はじめに

建築物は竣工後経過した長い年月の間に日光や天候変化、ホコリ、植物などの外部因子によって、材料の形而下の性質も変化する。劣化や汚れ、深みや年功など、同じ形而下の変化であってもどのように形容されるかは、材料の種類及び対象建築物の遺産性や文化性等の形而上の性質と、建築物に関わる人々の情報の認識・理解に依存していると考えられる。その情報は、遺産的価値を有する建築物の保存的活用手法を構築する際に特に大きな鍵を握る¹⁾。本研究で評価対象となる盛岡銀行旧本店はミュージアムとして活用される予定である故、法隆寺五重塔などを筆頭とした見学者の内部立入を考慮しない建築物と比較して、より高レベルな安全性能の付加が必要となる。その場合、現状の性能不足分を現代技術で補填する場合があります、まずは創建時の構法が持つ安全性能を分析しなければならない。

加えて、2011 年の東日本大震災では東京の九段会館をはじめ、多くの建築物で天井板崩落事故が発生した。古い建築物に至っては、その一件で建築物の解体が決定される事例もあるため、「使いながら保存」を行う建築物では重要な懸案事項として認識すべきである。また、歴史性やオーセンティシティ、安全性・経済性の両立は簡単なことではなく、ある要素を優先すると他要素は犠牲になってしまう事例が多いことが現状である²⁾。故に、まずは相手の特性を把握し、適切な処置を施すことが急務である。そこで本研究では、図 1 に示すようなプロセスのうち、漆喰仕上げ部位の中でも建築物の印象を特に司り、かつ安全性の重要度が高い部位である木摺漆喰工法の天井板へスポットをあて、物理的性能の実験的評価を行う。

2. 実験概要

2.1 評価対象と評価項目

表 1 に評価対象物の概要を示す。目下、岩手県盛岡市仲の橋において盛岡銀行旧本店の改修工事が行われている。工事にあたり、現地建物の健全度評価のため切断・採取された木摺漆喰天井板（1m 四方、2 枚、以下、実構造部材）を用いて、材料特性と断面構成を非破壊と微破壊の双方から分析する。加えて、要素試験体を作製した上で漆喰調合の差異による各部位の応力特性（引張強度、剪断強度、曲げ強度）の変化を評価し、各要素の差異が破壊強度、破壊機構へおよぼす影響を比較する。

2.2 実構造試験体の非破壊試験（研究 3）

まず非破壊試験では、実構造部材の断面分析と機械インピーダンス法による打撃試験を行った。断面分析においては、実構造試験体にもともと存在する切断面を利用し、計 2 枚を層状構造及び木摺り形状の観点で目視による評価を行った。木摺天

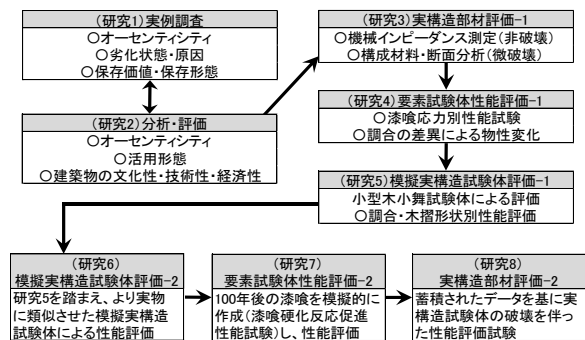


図 1 研究全体フロー

表 1 本研究における評価対象建築物³⁾（研究 3）

名称	盛岡銀行旧本店本館	
所在地	盛岡市仲ノ橋1丁目2-20	
設計	辰野金吾 葛西萬司	
竣工	明治44(1911)	
構造	木骨レンガ造	
調査箇所	内部木摺漆喰天井板	
現状および今後	耐震補強及び用途変更 運用中に一部改修されるも、改修工事にあたり創建当時の姿へ復原予定	

井板を筆頭とした湿式塗り天井は、目下普及している乾式のパネル天井板と異なり、木小舞と漆喰の固着性及び漆喰自体が持つ強度が連動することで実現される性能（以下、構造的連続性）が重要であると考えられる。湿式天井板における仕上げ材の局所的な強度低下は、天井全体の構造的連続性に影響し、応力集中などによって一部崩落、または全崩落のトリガーとなる可能性がある故、漆喰強度の均一化を図り、天井板の自重を均等に分散しなければならない。そこで評価に際し、構造的連続性に影響を及ぼす要素としてアンカー係数という考え方を導入し、式(1)で評価した。また打撃試験では、JIS A 1155 を参考にした上で、機械インピーダンス（以下、HLD）を式(2)で評価した。評価にあたって、試験体表面をスクエア状に 50×50 マスに分割し、各マスの中央部分をインパクトで 2 回ずつ打撃、その平均値を求めた後、測定面全体の相対的な強度分布を算出した。

$$HLD = V/V_0 \times 1000 \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 V ：インパクトの反発速度、 V_0 ：インパクトの打撃速度

$$\text{アンカー係数} = D/T \dots\dots\dots(2)$$

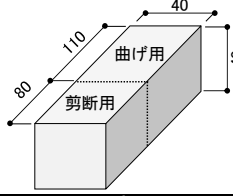
ただし、 D ：木摺り板の間隔、 T ：木摺り板の厚さ（ $5 \leq T \leq 20\text{mm}$ ）

2.3 要素試験体による性能評価の概要（研究 4）

表 2 に要素試験体の諸元を示す。本研究における試験体の保管及び作成は、気温 20℃・湿度 60% を目指した実験室にて行い、養生期間は 24 日間設ける。要素試験体は剪断・曲げ・引

張試験用の角柱試験体を作製した。図2に示すように、木小舞一漆喰間の応力伝達は、付着・引張・剪断・曲げの4応力へ分解する必要がある。まずAの付着力は木摺り漆喰界面で生じる応力を評価するが、漆喰と木材の応力伝達を正確に把握するため、一般的な木小舞に打ち付けられる尺トンボを本研究で用いる試験体では省略した。また、Bの引張応力は居室方向の荷重を木小舞へ伝達する際に発生するもの、Cの剪断力は居室方向の引張荷重をアンカー部分で支持する際に発生するものをそれぞれ評価する。最後にDの曲げ応力は、引張ないし剪断強度を

表2 要素試験体諸元

水消石灰比	すさ含有率	砂含有率	識別記号
水/消石灰	すさ/体積	砂/体積	水すさ砂の順で5桁で示す
75,90% (質量比)	0%,2%,4% (体積比)	産地:大井川 0%,20%,40% (体積比)	75000,75020,75040,75200, 75400,75220,90200,90400, 90440,90700,90713,90726, 90739
引張・剪断・曲げ・収縮試験用角柱要素試験体			
寸法:W40×H40×D190(mm)			
測定時は試験種別毎のサイズに切断、収縮試験ではそのまま用いる			
			
気硬性材料である漆喰は、形状が変化しないレベルで早期に脱型する必要がある。型枠はクランプで組み立ててし軽作業で脱型可能な仕様とした。			

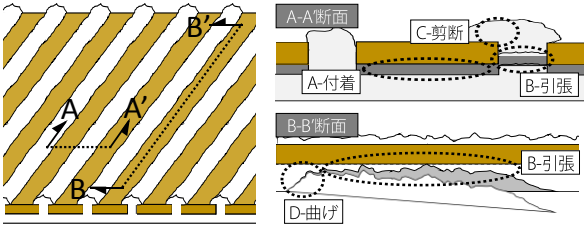


図2 実構造部材断面詳細図(研究4)

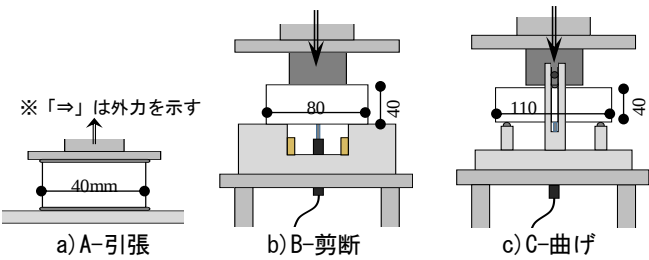


図3 試験体による性能評価(研究4,5)

表3 小型木小舞試験体の性能評価概要

漆喰調査	75000, 75200, 85200, 85220, 90200, 90400, 90440
アンカー係数	0.4~1.05 アンカー係数は t/d (木摺り板厚さ/板間隔)で示す
小型木小舞(木材)データ	木摺りと堰板はW45×D13×L1800, 根太はW30×H40×L900の杉荒材を切り出して作製
幅はアンカー係数により変動	180~230(内寸)
領域境界でカット	10~13
アンカー直上引張強度	40
木摺り板直上付着強度	45
居室側	
懐側	

超過する荷重によって漆喰が破壊される際のクラック進展に抵抗する力として評価する。以上の4応力を評価するため、各要素に適合させた要素試験体を作成し、図3に示すように破壊試験を行った。なお測定の際に、角柱試験体は試験種別ごとのサイズに切断処理を施して測定を行うため、養生中の水分蒸発によるひび割れ、及び切断処理による歩留り、及び測定データの信頼性を考慮して1種類の調査につき5基以上の型枠へ漆喰を打設した上で、硬化後には目視検査のもと健全な試験体を3本以上抽出して測定に用いた。測定の際には、圧縮試験機とデータロガーの測定値をリンクさせて記録した。

加えて、測定データを基に応力変位曲線と破壊エネルギーを算出し、調査の差異による漆喰の相対的な性能変化を分析した。また、90700, 90713, 90726, 90739試験体は打設直後にゲージプラグを揺動せぬよう埋め込んだ後、80℃の定温乾燥機にて脱水を行いながら1時間毎にゲージプラグ間距離を測定し、砂含有率ごとの収縮率を比較した。

2.4 実構造試験体の微破壊試験(研究3)

目下、木摺り漆喰工法の性能評価に関する情報は不足しており、木小舞形状・漆喰調査ごとの性能評価データを蓄積することが急務である。そのため、本研究を木摺り漆喰工法における基礎的研究とし、貴重なサンプルである実構造部材の破壊を伴う試験は軽微なものにとどめた。評価では、実構造部材2枚のアンカー部分から約1cm³の微小試験片をそれぞれ4つ以上採取し、かさ密度と真密度を算出した。また、同様に要素試験体からも微小試験片を採取し、砂含有率毎の密度を算出したのち、実構造試験体の密度との照合による調査の推定を試みた。

2.5 小型木小舞試験体の破壊試験(研究5)

表3に小型木小舞試験体の性能試験概要を示す。試験体の保管及び作成は気温20℃・湿度60%を目指した実験室にて行い、養生期間は24日間設けた後、アンカー係数や調査ごとの性能を評価する。本試験は天井板の性能評価であるため、型枠を上部から垂下することで、施工・養生環境を模擬させた。また、付着強度引張試験の際には40×40mmの引張試験用アタッチメントを試験体表面に装着して行うため、硬化後の試験体をアタッチメントのサイズに合わせて漆喰層のみ切断した。

加えて、既存の部材を生かして補強を行うことで、オーセンシティと安全性の両者を確保できる可能性が高まる。本研究では木摺り漆喰工法の補強手段として、木摺り漆喰界面に浸透性アクリル樹脂を注入する方法を用いて検討を行った。樹脂注入は天井裏より木摺り板に5~10φの穴を掘削して行うことを想定しているので、本試験でも同様の方法で注入した。

3. 実験結果

3.1 実構造試験体の非破壊試験(研究3)

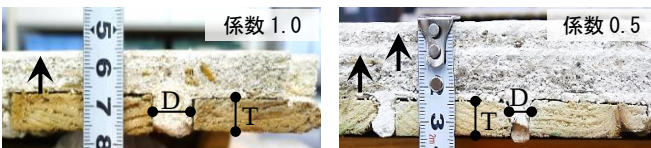
さて図4に示すように、同一の建築物から採取した部材でありながら、実構造部材の断面構造には差異が認められた。一方の天井板では2回に渡って仕上げを行った形跡(ダブル仕上げ)があり、経年や汚損などの事由によって、既存の仕上げ面へ対

して重ね塗りをを行った可能性がある。木摺りにおいては下地用漆喰が侵入する隙間が殆どないアンカー係数0の部位も認められ、漆喰層の大破片剥落が憂慮される状態となっていた。もう一方の天井板は仕上げ層が一面のみ(シングル仕上げ)であり、アンカー係数が1.0を超える部位も多くみられた。

一方で打撃試験を行った結果を図5に示す。シングル仕上げにおいて、木摺り方向と平行に顕著な強度低下が認められ、ダブル仕上げと比較しても低強度側にピークがある上、ばらつきが大きくなっていた。このことから漆喰の破損確率が高いと言えるが、顕著な強度低下部分をトリガーとして漆喰が粉体状に剥落する可能性が高く、人的被害に達する可能性は低いと考えられる。一方で、ダブル仕上げは漆喰層の強度が高い故に剛性が高いとみられ、加えてアンカー係数も小さいので、アンカーが切断された際には漆喰層が大破片となって落下することが懸念され、被害が拡大する可能性が高いと言える。このように、天井板強度評価の際には仕上げ層表面だけでなく、断面を評価する必要があると言える。

a) 実構造2部材の断面構造の捉え方

シングル仕上げ				ダブル仕上げ			
層	厚さ	構成材料	分析	層	厚さ	構成材料	分析
仕上層	0.5	色漆喰(ページュ)	人の目に触れる部分	仕上層(2代目)	1~3	色漆喰(ページュ)	人の目に触れる部分
平滑化層	1~2	すさ含有率高め	上塗り漆喰の塗布前に不陸を修正する層	定着層	4~5	純漆喰	はつた下層との再定着を図る層
尺トンボ固着層	6~8	砂・すさ含有率高め	木摺りに打ち付けた尺トンボを固定する層	仕上層(1代目)	2	生漆喰	1代目の仕上層か重ね塗りに際し研りあり
アンカー層(下地層)	3~4	すさ含有率高め(生漆喰)	木摺りの隙間に漆喰を押し入れ、アンカーを形成する層	尺トンボ固着層	8~10	砂・すさ含有率高め	木摺りに打ち付けた尺トンボを固定する層
木摺り板	7~9	杉板	湿式天井材の下地層	アンカー層(下地層)	2~3	すさ含有率高め(生漆喰)	木摺りの隙間に漆喰を押し入れ、アンカーを形成する層
				木摺り板	5~9	杉板	湿式天井材の下地層



b) シングル仕上げ c) ダブル仕上げ

図4 実構造部材の断面構造分析

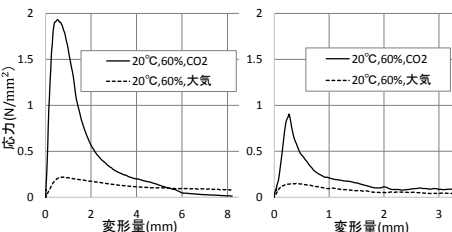


図6 CO₂濃度による比較(剪断・曲げ)

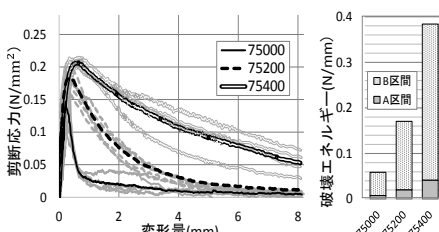


図7 すさ含有率と剪断強度

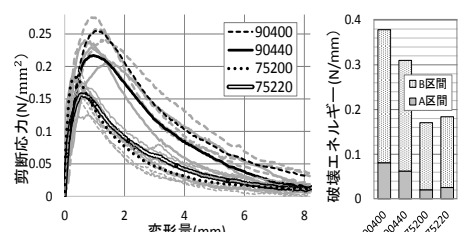


図8 砂含有率と剪断強度(すさ有)

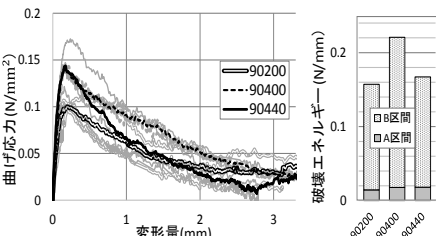


図9 すさ及び砂含有率別の曲げ強度

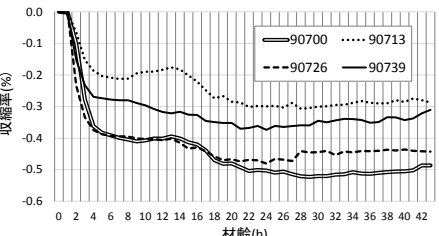


図10 砂含有率別の漆喰乾燥収縮試験

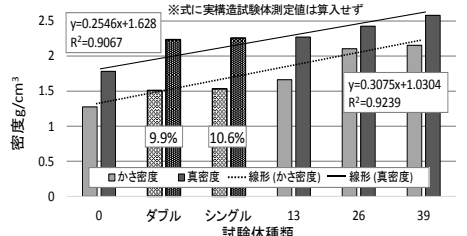
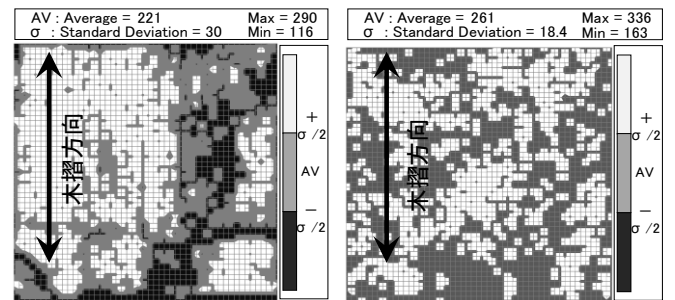


図11 実構造試験体と要素試験体の密度

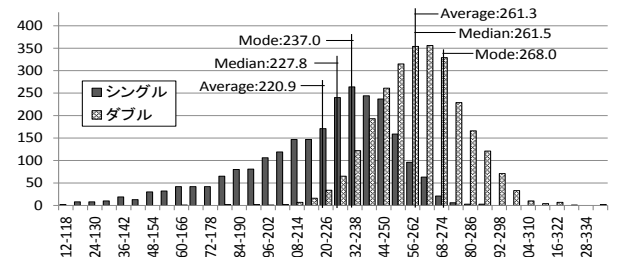
3.2 要素試験体による破壊試験(研究4)

本研究では材齢24日の漆喰を評価に用いているが、気硬性材料である漆喰の特性上、硬化の速度・及び反応が停止する材齢は周辺環境(CO₂濃度)によって大きく異なることが考えられる。図6に示すように、CO₂濃度5%環境下で14日間の促進養生(大気中の約4.8年間に相当)を行った漆喰は、恒温恒湿室で同日数養生されたものと比較して大幅な強度増進が起きており、どの水準まで硬化が進行するかは現時点で把握できていない。故に、本研究は漆喰調合の差異による強度及び性能変化を相対的に比較する基礎的研究と位置づけ、試験を行った。

さて、同一調合の角柱試験体複数本における各実測値を灰色線、その平均値を黒色線で示しており、破壊エネルギーは平均値より求めた各波形の降伏変位を境界としてA・B区間に2分割して算出した。まず図7に示すように75400試験体では、75000と比較して平均40.3%の応力向上がみられた。また、すさが2%増加する毎に破壊エネルギーも202~294%向上しており、引張応力を負担する繊維状粉体の効果が認められた。ま



a) HLD測定値分布(シングル) b) HLD測定値分布(ダブル)



c) 各実構造部材のHLD値度数分布

図5 各実構造部材における非破壊試験(研究3)

た、図 8 に示すように、同一すさ量の試験体であっても砂含有によって最大応力・破壊エネルギーの低下がみられ、脆性的な傾向を発現させることが認められた。一方で曲げ強度では図 9 に示すように、90400 試験体が 90200 よりも最大応力が 40%大きい他、90440 試験体は 90400 と比較して破壊エネルギー B 区間が 27%減少しており、調査による強度変化は剪断応力と類似した傾向を示した。

一方で乾燥収縮試験では図 10 に示すように、砂含有率毎の顕著な相関関係は認められないが、90700 と比較して 90713 試験体は最大 41%の乾燥収縮抑制が確認されているので、砂含有による漆喰の形状安定性向上およびクラック防止に期待できる。今後は、最大応力への影響に留意しながら乾燥収縮を抑制し、漆喰全体の性能向上を図れる砂含有率を検証する必要がある。

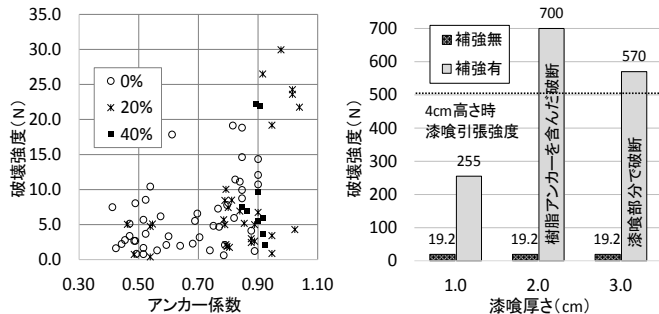
3.3 実構造試験体の微破壊試験（研究 3）

図 11 に実構造試験体と要素試験体の密度比較を示す。漆喰のかさ密度・真密度は砂含有率と高い相関を示すことが認められた。また、要素試験体データより算出した密度と砂含有率の関係式に、実構造部材アンカー部分の密度を代入した算出した結果、両者ともに砂含有率は約 10%であることが判明し、既存漆喰の調査推定に利用できることが推測される。また、両部材の密度は 98%以上合致しており、断面構造に大きな差異があるものの、アンカー部分の調査は類似していると推測される。両者における木摺りの寸法精度が大きく異なるので、異なる年代に施工されたものと考えられるが、砂含有率の合致率から勘案すると、漆喰調査の定石が早期段階から確立されていたとも捉えることができる。

3.4 小型木小舞試験体の破壊試験（研究 5）

図 12-a に小型木小舞試験体の破壊試験結果を示す。調査を問わず、破壊強度とアンカー係数の相関が認められた上、特にアンカー計数 0.9 以上では、砂含有率 20%漆喰の破壊強度が 0%の漆喰よりも高くなる傾向を示している。これは 3.2 における漆喰乾燥収縮試験結果より、砂の含有によって漆喰の形状安定性が向上し、特にアンカー部分の漆喰と木小舞の密着が高い水準で保持されていたことが考えられる。しかし、砂含有率 40%では全体的に強度の低下がみられた。漆喰の収縮抑制こそ効果的に働くと考えられる一方で、アンカー部分に存在する砂の比率が上昇し、すさや結合材が排除されてしまうためとみられる。つまり、砂含有による漆喰強度の低下と形状安定性の向上が適切にバランスする調査の策定が肝要であると言える。また、漆喰-木摺り界面の付着力は本研究の評価結果では限りなくゼロに近く、天井板強度に対する寄与率は相当に低いと判断された。

図 12-b に漆喰厚さ別の補強試験結果を示す。引張強度を測定した結果、漆喰-木摺り界面における破壊強度は飛躍的に上昇し、ほとんどは界面で剥離せずに漆喰部分で破断した。故に界面部分の強度を算出できてはいないものの、各試験体に用いられている漆喰の引張強度を上回することは確認された。また漆喰層に厚みがある場合（2cm, 3cm）は掘削穴を漆喰層まで貫入させることで、漆喰と木摺りを貫通させる形で樹脂の硬化体を



a) 木小舞形状・調査と破壊強度

b) 漆喰厚さ別補強効果

図 12 小型木小舞試験体の破壊試験結果

形成させることが出来る。これが木摺りと漆喰層を連結するアンカーの役目を持つと考えられる。しかし、掘削穴が漆喰層を貫通して仕上げ面側にまで及んだり、掘削穴によってクラックが発生すると、浸出した樹脂によって仕上げ面を汚損する可能性がある。さらに掘削時にも振動などによって漆喰のクラック発生及び剥落のリスクが常に存在するので、掘削深さと方法に関しては十分な検討が必要である。

4. まとめ

- 1) 遺産的価値を持つ建造物を部材レベルで検証することで、精度の高い健全度の評価と、それによる的確なメンテナンスが期待でき、長期的な運用の実現に寄与する可能性がある。
- 2) 木摺り漆喰工法は、打撃検査や微小試験片の分析によって、強度分布や材料組成などから性能予測ができる可能性がある。
- 3) 漆喰調査における砂の含有は、漆喰自体の強度に寄与する傾向は低いものの、乾燥収縮は抑制されており、天井板全体の性能面向上には期待できる。
- 4) 木摺り漆喰天井板の支持力をほとんど期待できない木摺り-漆喰界面に浸透性アクリル樹脂を注入した結果、強度が飛躍的に増大した。この技術は既存建築物における天井板剥落被害抑制手法として多いに期待できる。

参考文献

- 1) 岡健太郎, 田村雅紀: 建築物の LCM における維持保全と保存活用ストラテジー, 日本建築学会関東支部研究報告集, Vol.84, pp.253-256(2014.2)
- 2) 岡健太郎, 田村雅紀: 構造物の災害対応を含めた LCM 戦略. コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.14, pp.295-302(2014.10)
- 3) 株式会社トータルメディア開発研究所, 凸版印刷株式会社. 岩手銀行旧中ノ橋支店赤レンガ公開活用事業-展示検討資料. 2014.6, pp.25

謝辞

本研究は工学院大学建築学部、後藤治教授および(株)樹、丸山紘明氏との共同研究であり、貴重なご助言を賜りました。また、研究の実施に際して、RCCS 代表の野口貴文氏、文化財保存計画協会の津村泰範氏、文化財建造物保存技術協会の津和佑子氏、本多産業(株)本多克也氏、後輩の栗島千佳氏、渡邊桃子氏、および関係各位に多大な協力を賜りました。あらためて感謝申し上げます。

なお本研究は H26 年度工学院大学 UDM 研究, H26 年度科研費(基盤 B 26282069 歴史的建造物を維持するための植物性資材確保 代表山本博一)の一部であり、深謝の意を表します。