

国土技術開発賞 二〇周年記念大賞受賞

伝統構法による大規模木造天守の復元技術

戦後日本初の木造四層天守の復元 ～大洲城～

第7回（平成17年）国土技術開発賞 最優秀賞受賞（第1回ものづくり日本大賞受賞）

〔受賞者〕 株式会社安藤・間

〔本稿執筆〕 建築事業本部 生産技術統括部 技術部

技術本部 技術研究所 建築研究第一部

技術本部

なかむら かずお
中村 一男まつうら つねひさ にし まさてる かとう たかし
松浦 恒久 西 正晃 加藤 貴司かさ ひろよし
笠 博義

「国土技術開発賞 二〇周年記念大賞」は、国土技術開発賞創設20周年を記念し、第1回～第19回に表彰した技術の中から、特に優れ今後の建設技術開発分野の模範となる技術を表彰したものです。厳正な審査の結果、国土技術開発賞 二〇周年記念大賞8件、国土技術開発賞 二〇周年記念創意開発大賞8件が表彰されました。

詳しくは、<http://www.jice.or.jp/review/awards>をご覧ください。

以下に、国土技術開発賞 二〇周年記念大賞を受賞した「伝統構法による大規模木造天守の復元技術」を紹介します。

1. はじめに

平成16年に竣工した愛媛県の大洲城天守は、伝統構法による木造四層四階建てで、戦後に復元された木造天守の中で最高の高さ（19.15m）を誇っている。建設当時は建築基準法大改正の施行後であり、4階建ての純木造建築の構造検討事例がなかったため、（株）増田建築構造事務所が土壁や柱-梁接合部の構造特性を盛り込んだ構造解析モデルを開発し、そのモデルを用いて大洲城天守の構造安全性を確認することによって、戦後日本初の木造四層天守の復元を実現した（写真-1）。



写真-1 復元された大洲城天守

大洲城天守と多聞櫓の復元以前から、当社は白石城天守（三階櫓）や熊本城 未申櫓^{ひつじさる}の復元工事などで、城郭建築における伝統構法の技術を培ってきた。その技術を糧に建てられた大洲城天守は「戦後で初めて四層四階建てで復元された木造の天守」として今も高く評価されている。大洲城天守の竣工後は、同天守において行った常時微動測定と人力加振実験による構造解析モデルの検証、東日本大震災で被害を受けた白石城の土壁修復技術の開発、木造橋である伊勢神宮宇治大橋の耐震性評価など、建設後の検証・修復技術開発にも力を注いできた。加えて、石垣の補強技術や石垣の安定性解析技術など、城郭建築物の基礎である石垣の解析・調査・保全技術を、延岡城や名古屋城などの石垣の維持管理に応用している。

国土技術開発賞が創設 20 周年を迎えた今年度、同賞の「二〇周年記念大賞」を受賞したこれらの技術を紹介する。

2. 伝統構法による構造実験

(1) 仕口部の構造実験

伝統構法には、貫、脚固め、繋ぎ梁や土壁などの構造要素があり、貫や繋ぎ梁は、木材のめり込みを利用した一種のモーメント抵抗接合である。これらの構造要素は構造性能が明確になっていない点もある。このことより、評定申請時に建築基準法第 3 条第 1 項第 4 号適用工事の許可条件として、木造仕口部の強度試験を実施し、その仕口の回転剛性を確認することが条件として付与された。

このような背景に基づいて仕口部の構造実験を実施し、伝統木造構法による貫や繋ぎ梁による柱梁接合部の回転剛性(モーメントと回転角の関係)を実験的に確認した。

試験体は、実物の 1/2 縮小模型とし、柱は 135 mm × 135 mm、梁は 240 φ、貫は 30 mm × 90 mm の断面の木材を使用した。写真-2 に示すように、試験体の形状は柱と繋ぎ梁で構成される T 字形試験体、柱と貫で構成される十字形試験体の 2 種類とし、T 字形試験体 6 体、十字形試験体 4 体の計 10 体とした。実験のパラメータは接合方法とし、主な柱と梁の仕口は長ほぞ差し鼻栓打ち・込栓打ちの 2 種類で、柱と貫の仕口は通し貫としている。柱は地元松と木曽松、梁は木曽松である。

実験結果の評価は、既往の研究¹⁾を基に、図-1 に一例を示すように仕口タイプ別にモーメント伝達機構を仮定して行った。具体的には、仕口部に生じるモーメントは、主に接合部の回転変形によって生じるほぞや胴づき面のめり込み圧縮力とそれに伴う摩擦せん断力で伝達されると考え、回転角と発生する応力の関係から接合部の回転剛性・強度算定式を導いた。



写真-2 試験体概要

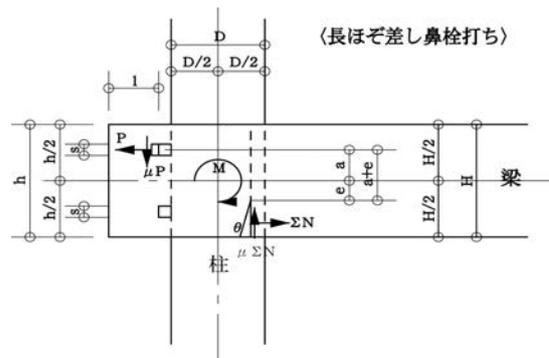


図-1 仕口のモーメント伝達機構の例¹⁾

(2) 塗り土壁の構造実験

大洲城天守に先立ち、白石城の復元（平成 7 年竣工）における構造設計では、地震時の水平力に対して貫構造の木造部分だけでなく、土壁部分でも抵抗させる耐震設計が行われた。当時は土壁部分が負担できる水平力に関する知見が少なく、構造評定を取得する際の課題となった。そこで、写真-3 のように実際の土壁を模擬した試験体を用いてせん断加力実験を行い、土壁のせん断強度を定量的に評価した。試験体の塗り土には、4 寸スサ入り土、2 寸スサ入り土および 2 寸スサ入り土

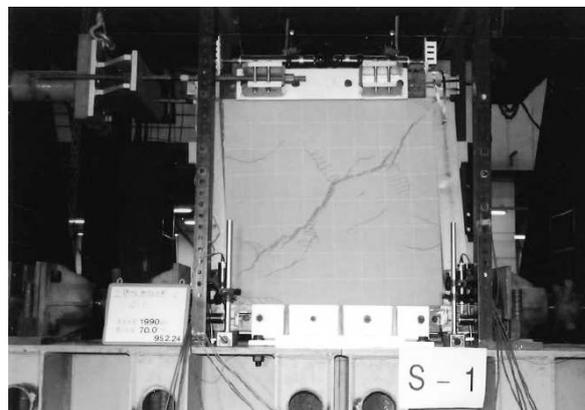


写真-3 塗り土壁のせん断実験状況

に砂を加えた仕上げ土を用いて片面3層構造とした。実験の結果、土壁には地震時に設計上必要とされる以上のせん断強度が期待できることが明らかとなった²⁾。

大洲城の設計においても、上述の実験結果から土壁のせん断剛性を評価して構造解析を行うことにより、土壁の剛性と耐力を考慮した設計を行うことができた。

3. 伝統構法による天守の振動特性の確認

伝統木造構法は長い歴史による実績がある反面、鉄筋コンクリート造や鉄骨造などの近代構法に比べ、耐震工学的な性能の解明が置き去りにされてきた。地震の多いわが国で、伝統木造構法による天守の振動特性を確認することは重要であると考え、大洲城と白石城において常時微動測定と人力加振実験を実施した³⁾。

常時微動とは、地盤に常時生じている0.1～数百マイクロン程度の微小な揺れであり、これによって励起される建物の揺れを測定・分析することで、建物の固有振動数(建物の揺れやすい振動数)や振動モード(立体的、平面的な揺れ方)などの基本的な振動特性を把握することが可能となる。

写真-4、図-2に、大洲城において減衰性能を把握するために行った人力加振実験の様子を示す。建物が共振するタイミングに合わせて建物の揺れを増幅させ、加振停止後の振動(自由振動)を測定し、自由振動が小さくなる傾向から建物の減衰定数の値を把握した。人力加振実験の結果、木造天守の減衰定数は2～3%程度と推定された³⁾。

白石城は2011年の東日本大震災で被災したため、震災前と震災後さらに補修後の常時微動を測定している⁴⁾。図-3には、震災前後の振動モードを比較した結果を示す。この図から、震災前には土壁の剛性が効いてロッキング(回転)の生じる振動モード形を示していたが、震災後はロッキングが減少し、せん断型のモード形となり、かつ3層部の変形が大きい傾向を示し、震災後の目視



写真-4 人力加振実験の様子

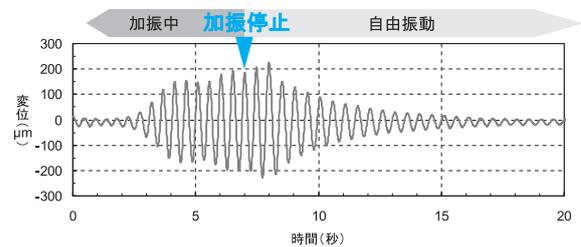


図-2 測定波形

調査結果による被害程度とも対応することがわかった。これは、震災による土壁の被害により壁の剛性が低下し、木軸組によるせん断型の挙動を示すように変化したためと考えられる。震災により壁の剛性は低下したが、このことは逆に、地震時に土壁がエネルギーを吸収して損傷することで、現代技術でいういわば制震要素的な働きをしたと考えられ、非常に興味深いデータが得られた。

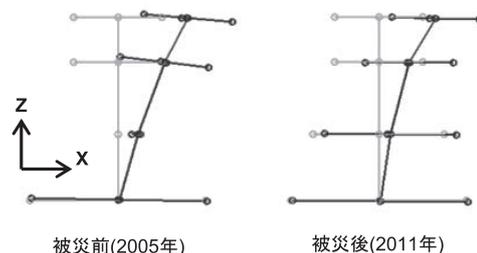


図-3 震災前後の振動モード形(短辺方向)

また、震災前、震災後、補修後の常時微動測定結果を利用して、天守の各層の剛性を評価し、震災前と比較して検討した⁴⁾。その結果を図-4に示す。この図から、震災後の剛性は、震災前に比べて被害程度の大きい短辺方向の3層部では

33%程度まで低下し、その他の層では50～60%程度の低下であったものが、補修工事後には50～75%程度まで回復したことがわかる。しかし、震災前の状態には完全に回復していないことから、塗り土壁の内外表面からの補修のみでは不十分であることがわかった。こうしたことから、4.(1)で述べる土壁の内部まで補修できる補修材や補修方法の開発に着手することとなった。

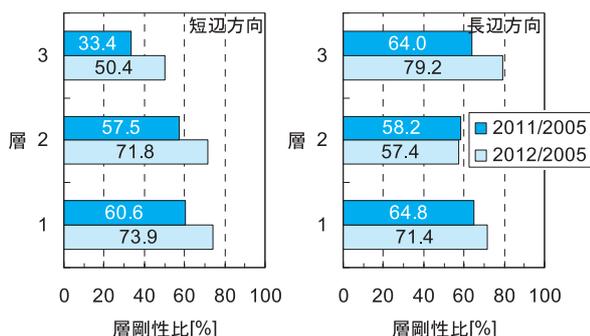


図4 震災前（2005年）に対する震災後（2011年）、補修後（2012年）の層剛性比

4. 今後の展開

(1) 土壁の新しい補修技術の開発

前述したように、白石城の天守の剛性は震災前の状態には完全に回復していないことから、土壁の両面外からの補修だけでなく、土壁の内部まで補修可能な補修方法の開発が期待された。そこで、土壁の損傷の程度に応じてその内部にまで注入可能な補修材と注入方法を開発し（写真-5）、



写真-5 損傷させた塗り土壁の注入補修

その効果を実験で確認した。注入補修した土壁試験体の初期せん断剛性は、損傷前と同程度まで回復できることが確認できた⁵⁾。今後は、せん断耐力も回復できる補修方法の開発を進めていくことを考えている。

(2) 石垣の耐震性・安定性評価技術の開発

我が国の城郭は石垣上に構築されているものが多い。この石垣は、城郭全体を形成する地盤の一部であると同時に、天守などの建築物の基礎という機能を持っている。こうした石垣は、空石積みと呼ばれる漆喰等の接着剤を用いない技法で積み重ねられており、築石、裏栗石、地盤の三つの要素から構成されている。また、外観上は勾配が上部ほど急になる「反り」や、平面的に中央部が端部より内側に位置する「輪取り」と呼ばれる立体的な曲面構造を呈している場合が少なくない。このような構造は世界でも類を見ないもので、日本の石垣の大きな特徴となっているが、構造上の安定性、特に耐震性についての研究事例は少なく、石垣の耐震性評価技術は確立していないのが実情である。

一方で、大洲城天守の復元においては石垣上端部が古写真をもとに正確に積み直され、白石城天守復元においては野面積みの石垣も同時に復元された。これらの事例が示すように、天守の復元においては石垣もその対象となることが多く、石垣自体の安定性評価技術についても必要性が高い。

以上のような背景を受けて、石垣の安定性に関する検討を進め、平成20年には大型振動台による実物大伝統的の石垣の振動実験を世界で初めて成功させ（写真-6）、地震時の石垣の変形メカニズムについての基本的な特性を確認した⁶⁾。さらに、同時に進めてきた個別要素法（DEM）による石垣の安定性評価技術により、石垣の地震時の挙動を数値解析で再現・予測する技術も開発した⁷⁾。こうした成果は、平成24年に竣工した高松城天守台石垣における枠工による補強効果の確認に適用されるなど、着実に展開され成果を上げるに至っている。



写真－6 実物大伝統的の石垣モデル振動実験の状況

5. おわりに

大規模木造建築物の構造性能評価に関する研究開発は、他の構造物に比べて多いと言えないのが実情である。当社は今後も、伝統構法における構造性能の検証を積極的に行い、文化財・歴史的建造物の修復や復元に貢献できることを願っている。

最後に、当該技術開発において構造解析モデルを開発いただいた株式会社増田建築構造事務所の増田一真氏をはじめ、ご指導いただいた白石市、大洲市、株式会社三宿工房、竹林舎建築研究所有限公司、株式会社前川建築研究室、有限会社建築文化研究所の皆様感謝申し上げます。

【参考文献】

- 1) 稲山, 他: 木材のめりこみに関する実験的研究 (その1～4) 日本建築学会大会学術講演梗概集 C, 1991.
- 2) 長, 他: 塗り土壁のせん断耐力に関する実験的研究 (その1, 2) 日本建築学会学術講演梗概集 C-1, 1995.7.
- 3) 境, 他: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 (その1, 2) 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2006.
- 4) 加藤, 他: 伝統構法による大規模木造天守の常時微動測定 (その4) 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, 2013.
- 5) 東條, 他: 塗り土壁の補修技術に関する実験的研究 (その1, 2) 日本建築学会大会梗概集, 構造Ⅲ, 2016.8.
- 6) 山本, 他: 実物大モデルを用いた城郭石垣の地震時挙動の検討, 土木学会論文集 C, Vol.66, No.1, 2010.1.
- 7) 野間, 他: 城郭石垣の地震時変形予測と安定性評価に関する研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.69, No.4, 2013.