

令和 6 年 6 月 14 日現在

機関番号：34416

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20468

研究課題名（和文）慶長伏見地震における社寺建築の被害・復旧についての学際的考察

研究課題名（英文）test

研究代表者

西川 英佑（Nishikawa, Eisuke）

関西大学・環境都市工学部・助教

研究者番号：60964806

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、慶長伏見地震（1596年）の直後に行われた法隆寺境内建物の慶長修理における貫補強を考察した。資料調査・現地調査・数値解析を行い、この補強が効率よく施工でき、高い補強効果を持つ方法であったことを明らかにした。また、補強前後の状況を再現した法隆寺東院廻廊の縮小模型を作成し、載荷実験・振動実験を行い、廻廊は地震時に平面的に中央が凸になる振動モードと中央と両端が逆位相となる振動モードで揺れる傾向があり、貫補強は特に前者の固有振動数を上昇させ、耐震性能の向上に寄与することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、文化財建造物の歴史地震の直後に行われた構造補強を考察した。当該補強の設計方法や施工方法を明らかにしつつ、その補強効果を構造計算や模型実験を行うことで定量的に評価した。これまで、文化財建造物の建設後に行われた構造補強は当初の姿を損なう変更とみなされ低く評価されることが多かったが、本研究ではこれを建築構造学の観点から見直すことで、今後の地震対策に有用な知見を提供するとともに、当時の災害対応として積極的に評価することができた。災害国日本における文化財建造物保護に新しい視点を提供できたと考えられる。

研究成果の概要（英文）：This study examines the reinforcement in the repair of buildings in the Horyu-ji, which was carried out after the Keicho Fushimi Earthquake in 1596. This reinforcement added a lot of Nuki (beams that pierced the columns they connected). As a result of data investigation, field survey, and numerical analysis, they were revealed that the construction productivity and reinforcement effect were very high. In addition, a reduced-scale model of the Kairo (Corridor) of To-in (East Temple) of Horyu-ji was used to reproduce the conditions before and after the reinforcement, and loading and vibration tests were conducted. The results showed that the corridor may have two vibration modes during an earthquake: the first one, in which the center is convex in the plane, and the second one, in which the center and both ends are in opposite direction. The reinforcement was found to be highly effective in increasing the natural frequency of the first mode.

研究分野：建築保存工学

キーワード：法隆寺 慶長修理 貫補強 地震対策 耐震補強 補強効果 歴史地震

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震（1995年）で多くの文化財建造物が被災して以降、その耐震対策が本格的に始まり、東北地方太平洋沖地震（2011年）や熊本地震（2016年）でも文化財建造物の被害が発生したことで対策の必要性の認識は高まり、現在も全国の文化財建造物で対策が実施されている。

文化財建造物の耐震対策においては、一般建築とは異なる構造特性を持ち、未解明な部分が多いため、耐震性能を適切に評価することや、過剰な補強等によって文化財の価値を損なわないような配慮が必要となる。このために構造実験や数値解析など、建築構造学の観点からの様々な検討が行われるが、その成果はあくまで耐震対策にのみ活かされるのが一般的である。一方で、文化財建造物には建設から長い期間を経ており、過去に地震被害を経験したものが多く存在する。過去の地震被害やその後の復旧は災害国の経験として対策検討のための有用な知見となるが、これまでは建築史的な観点から歴史の一部として調査されることのみが多く、過去に行われた構造補強も当初の姿を改変してしまったものとして低く評価されることが多い。

過去の地震被害やその後の復旧の実態を明らかにするためには、建築史的な考察と建築構造学的な考察を一体的に行うことが有効と考えるが、現状としては前者を建築史学の研究者や保存修理技術者、後者を建築構造学の研究者や構造設計者が行い、両者が互いの考察を積極的に理解し、融合した成果を挙げる事例が見られていない。過去の地震被害やその後の復旧を学際的に考察し、文化財建造物の耐震対策を含む保護全般の検討に活かし、さらには我が国の建築技術史に新たな知見を提供する手法の確立が必要である。

2. 研究の目的

本研究では、過去の地震被害やその後の復旧を学際的に考察し、文化財建造物の耐震対策や価値評価に有用な知見を提供する手法の確立を目的とし、関西圏に甚大な被害を与えた慶長伏見地震（1596年）を対象に、法隆寺において地震直後の慶長修理で行われた貫による補強に着目し建築構造学的及び建築史的な考察を行う。補強内容を分析し、当時の人々がどのように対応したかを明らかにし、この補強が科学的にみたときにどの程度、耐震性能向上に寄与したかを検証する。

3. 研究の方法

(1) 法隆寺の境内で慶長修理が行われた建物のうち、境内の中でも中心となり、構造的に不安定な要素を持っている建物8棟を調査対象として選定し(図1) 貫補強に関する調査を行う(図2)。主に修理工事報告書の調査記録や図面・写真から貫の位置や寸法などを読み取り、不足する情報は現地調査を行い補う。建築史的な観点から、補強貫の寸法や設置位置を特定し、貫の寸法や量の決定方法、施工方法について考察を行う。また、建築構造学観点から、貫補強前後の各建物の耐震診断を行い、耐震性能の増加率を求める。

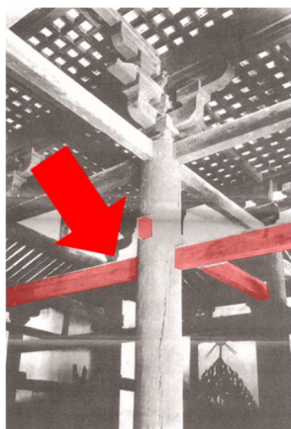


図1 慶長修理の補強貫(大講堂)

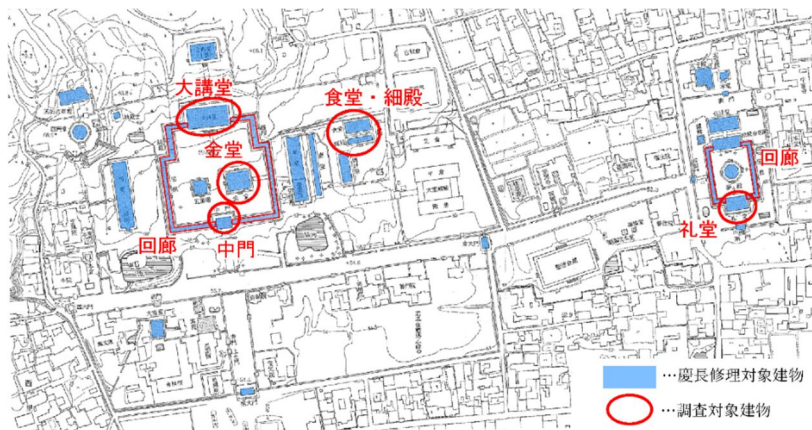
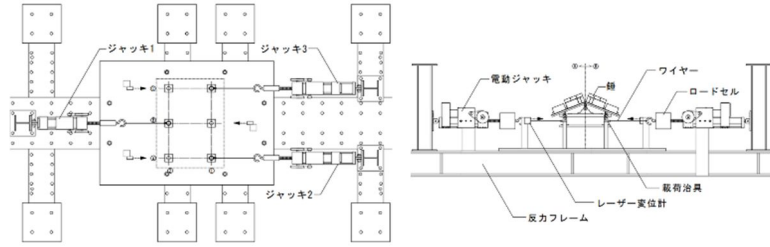


図2 法隆寺境内の慶長修理対象建物と調査対象建物

(2) 上記の調査対象の一つである法隆寺東院廻廊(図3)について、1/11スケールの全体架構模型(図4)と全体架構模型の長手部分2スパンを切り出し再現した基本架構模型(図5)の2種類の試験体を作成した。建築構造学観点から、静的載荷実験(図6)及び振動実験(図7)を実施し、廻廊の耐震性能の基本特性を把握するとともに、補強貫の有無や屋根面の補強の有無を変えて実験を行い比較することで、補強に伴う振動特性の変化についても考察する。



図3 法隆寺東院廻廊



(a) 平面図

(b) 立面図

図6 静的荷重実験セットアップ状況(基本架構模型)



図4 全体架構模型



図5 基本架構模型

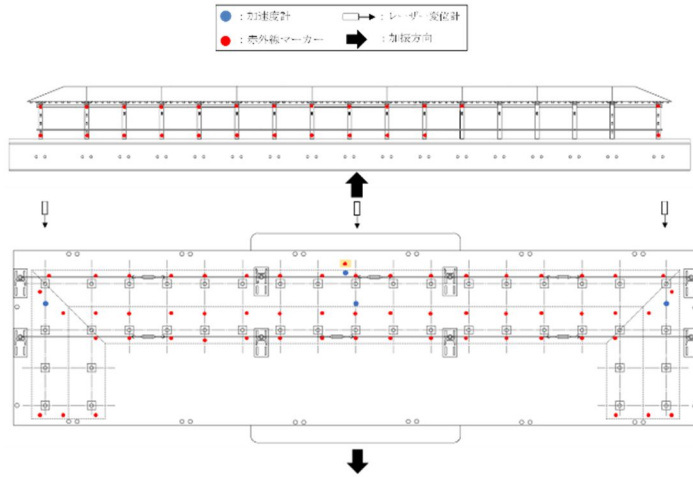
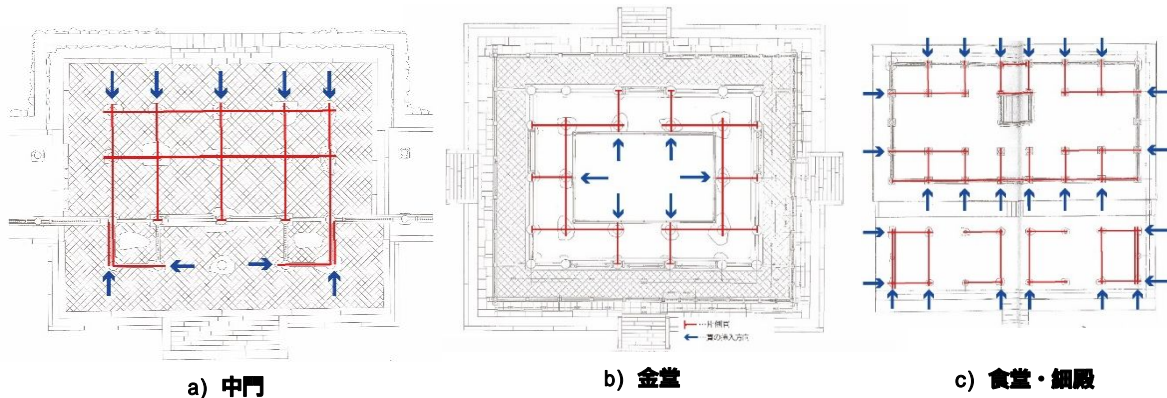


図7 振動実験セットアップ状況(全体架構模型)

4. 研究成果

(1) 調査対象建物の補強貫の連続するスパン数や配置、端部の仕口などを確認することで挿入方法を明らかにしたところ(図8)、1スパンの補強貫は全体の約6割と多く、そのほとんどが側周りの柱に建物の外側から挿入されたものと推定される。以上より、慶長修理期の貫補強は建物を解体しない状態で効率良く施工できる補強方法であったと評価できた。また、貫幅と柱径及び貫成と貫幅の比率や貫量と軒面積の比率を各建物で比較したところ(図9,10)、柱間が狭いものに対しては貫成を低くした可能性や耐震要素の少ない建物では貫量を多くした可能性を明らかにした。

次に、補強前の耐震要素は主に柱傾斜復元力と土壁の復元力、補強後はこれらに貫の復元力が加わると考え、耐震要素の復元力の和から求めた各建物の復元力および復元力を建物重量で除したベースシア係数を求め、補強前後で比較したところ(図11,12)、各建物の補強効果を定量的に評価することができ、補強貫の効果は変形が増大するに連れて大きくなることも明らかにした。



a) 中門

b) 金堂

c) 食堂・細殿

図8 補強貫の設置位置と挿入方向

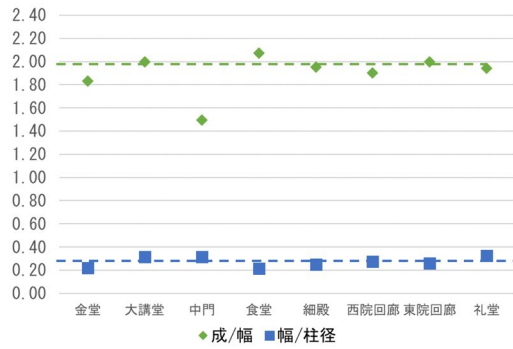


図9 貫幅/柱径及び貫成/貫幅

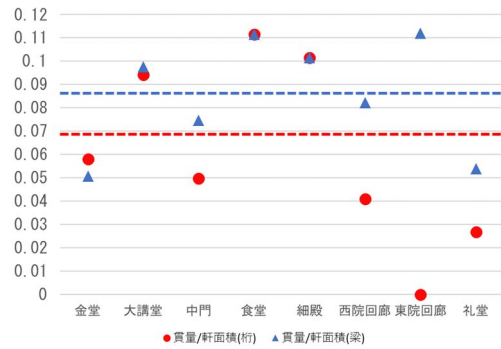


図10 質量/軒面積

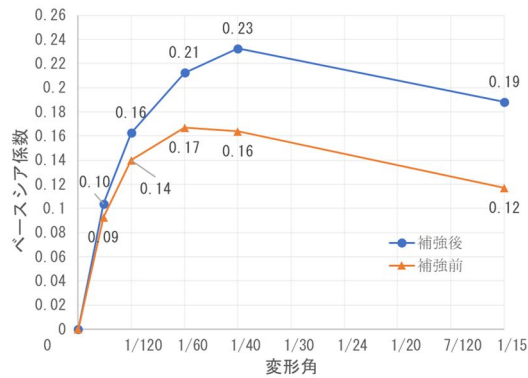


図11 補強前後のベースシア係数(金堂・桁行方向)

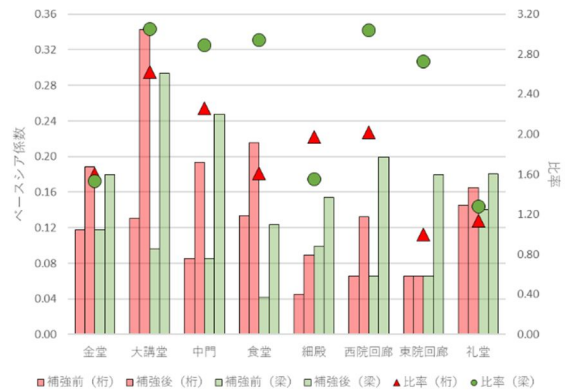


図12 変形角 1/15 時のベースシア係数の比較

(2)基本架構模型に対して、静的載荷試験を行って軸部および屋根面の復元力特性を確認するとともに、自由振動実験を行って減衰定数を確認した。この結果をもとに力学モデルを用いて全体架構模型の1~3次までの固有振動数および振動モードを予測した(図13,14)。次に全体架構模型に対してホワイトノイズ試験を行い応答倍率を求めた(図15)。基本架構模型の試験結果に基づく予測と比較することで、1次および3次の固有振動数を特定した。

さらに3段階の加速度振幅において振動数を変化させて加振を行うことで、共振時の振動数及び振動モードを特定した(図16)。変形増大に伴う剛性低下によって固有振動数は低くなり(表2)地震時の応答を検討する上で1次だけでなく3次も注意が必要であることが分かった。また、軸部の貫補強は1次、屋根面の補強は3次の固有振動数に与える影響が大きく、どちらも補強により固有振動数が増大することを明らかにした。加振状態から自由振動させる実験も行ったところ、基本架構模型に比べ高い減衰性能を持つことが分かり(表3)この要因が屋根面のエネルギー吸収である可能性を指摘した。

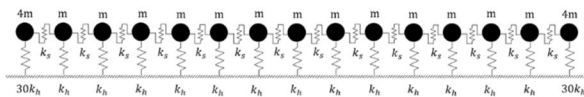


図13 全体架構模型の力学モデル

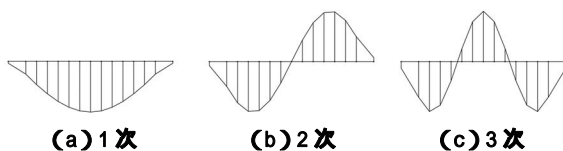


図14 推定振動モード

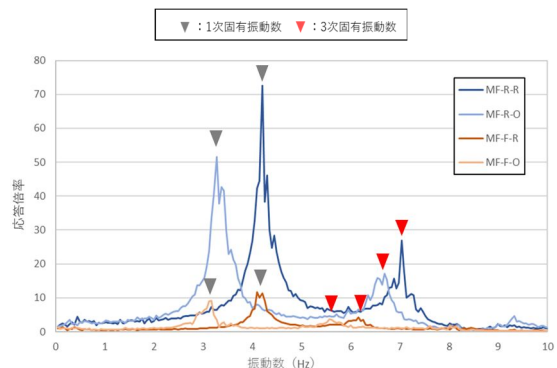


図15 加速度応答倍率

表1 試験体名称

①	架構形式	BF	Basic Frame	基本架構
		MF	Multi Frames	全体架構
②	屋根面の仕様	R	Rigid floor	剛床
		F	Flexible floor	非剛床
③	補強貫の有無	R	Reinforced condition	補強貫有り
		O	Original condition	補強貫無し

表2 大変形時の固有振動数

固有振動数 (Hz)	全体架構						基本架構
	1次			3次			
	25gal	50gal	75gal	25gal	50gal	75gal	
MF-R-R	3.3(1.0)	2.8(0.8)	2.5(0.8)	6.1(1.8)	5.8(1.7)	5.9(1.8)	2.2
MF-R-O	2.4(0.7)	1.7(0.5)		6.0(1.8)	5.5(1.7)		1.7
MF-F-R	2.9(0.9)			6.4(1.9)			2.4
MF-F-O	1.7(0.5)			5.8(1.7)			1.7

：各試験体における最大振幅時の固有振動数 ()は実大スケールでの固有振動数

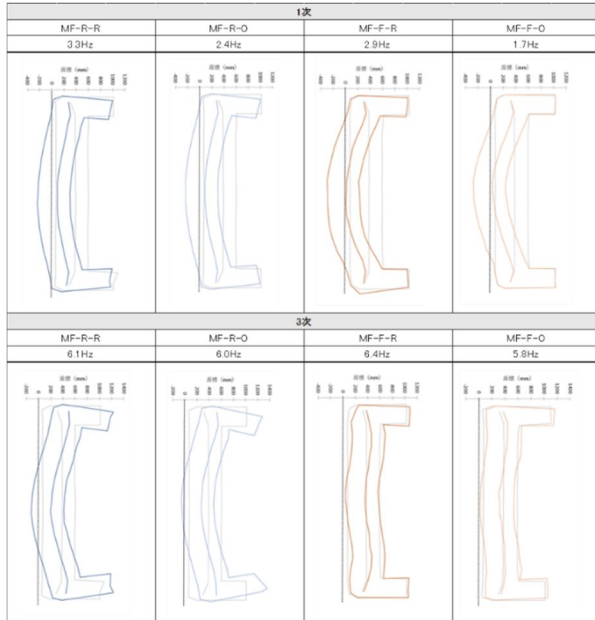


図16 各次の振動モード

以上をまとめると、

- ・慶長伏見地震（1596）の直後に行われた法隆寺境内建物の慶長修理における貫補強を考察し、この補強が効率よく施工でき、高い補強効果を持つ方法であったことを明らかにした。
- ・補強前後の状況を再現した法隆寺東院廻廊の縮小模型を作成し、載荷実験・振動実験を行い、廻廊は地震時に平面的に中央が凸になる1次振動モードと中央と両端が逆位相となる3次振動モードで揺れる傾向があり、貫補強は特に前者の固有振動数を上昇させ、耐震性能の向上に寄与することを明らかにした。

<引用文献>

李 正夫「片桐且元と慶長の修理」1976年 4月

六大寺大観 第一巻、第五巻

修理工事報告書

法隆寺国宝保存事業部「法隆寺食堂及細殿修理工事報告」1936年

法隆寺国宝保存事業部「法隆寺東院礼堂及び東院鐘楼修理工事報告」1937年

法隆寺国宝保存工事報告書「法隆寺大講堂修理工事報告」1947年

法隆寺国宝保存委員会「法隆寺金堂修理工事報告書」1956年

奈良県教育委員会「国宝法隆寺廻廊他五棟修理工事報告書」1983年

法隆寺国宝保存事務所「国宝建造物法隆寺夢殿及東院廻廊修理工事報告書」2004年

奈良県教育委員会「国宝法隆寺中門ほか二棟修理工事報告書」2019年

坂静雄「金堂構造の安定度判定に関する研究（第十報）」1944年

重要文化財（建造物）耐震基礎診断実施要領

日本建築学会「木造構造接合部設計マニュアル

表3 減衰定数

減衰定数	全体架構						基本架構
	1次			3次			
	25gal	50gal	75gal	25gal	50gal	75gal	
MF-R-R	17.0%	17.8%	17.2%	10.9%	8.8%	5.7%	6.3%
MF-R-O	12.5%	19.1%		9.2%	8.7%		4.7%
MF-F-R	9.1%			5.3%			5.8%
MF-F-O	14.5%			6.0%			5.2%

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 松田昂大、宮本慎宏、西川英佑、榎井健
2. 発表標題 回廊の耐震性能に関する実験的研究 その1 縮小模型を用いた振動実験
3. 学会等名 日本建築学会全国大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 宮本慎宏、松田昂大、西川英佑、榎井健
2. 発表標題 回廊の耐震性能に関する実験的研究 その2 立体フレームモデルを用いた固有値解析結果
3. 学会等名 日本建築学会全国大会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------