

CFRTP ストランドによる木造建築物の耐震補強効果に関する研究

1. 序論

木造建築物の耐震補強をおこなうと、耐震補強部材によって耐力を高めることができるが、それに加えて剛性も高くなる。剛性が高まることによって、固有周期が変動する。その結果、耐震補強前には共振することが無かった周期帯の地震動との共振を起こす可能性がある。そこで、耐震補強設計では、歴史地震や敷地周辺の断層調査をおこない、その地域で起こりうる地震動のスペクトル性状を把握する必要がある。一方で、耐力は高めるが剛性を変えない耐震補強部材があれば、耐震補強前後で共振する周期帯を変化させないことが可能となる。しかし、従来の木造建築物の耐震補強部材（例えば、合板や鉄筋ブレース、筋かい）は耐力を高めると共に、剛性も高めるものである。そこで、大変形時に高耐力を有し、かつ低剛性の耐震補強部材である CFRTP ストランドによる木造建築物の耐震補強方法を開発した。炭素繊維複合材料は工学において幅広い分野で用いられている先端材料であり、建築分野においても注目 [1] されている材料である。既報では、靱性能を有する CFRTP ストランドの端部定着構造を開発 [2] [3] [4] し、その部材を用いて補強した木造軸組壁の面内せん断試験を実施し [5]、大変形時に高耐力を有し、かつ低剛性であることを示した。本研究では、実在する木造建築物を対象に CFRTP ストランドによる耐震補強工事をおこない、その耐震補強前後に常時微動測定を実施して固有振動特性の変化を把握する。そして、耐震補強前後の数値解析によって耐震補強により耐力がどの程度向上したかを確認する。それらの結果から、CFRTP ストランドによる木造建築物の耐震補強効果を明らかにすることを本研究の目的とする。

2. 対象建物の概要

2.1 建築概要

民族学博物館内に展示されている酒幕は、1920 年頃に建てられた朝鮮半島の旅人が飲食や宿泊をする施設を 1999 年に再現し展示されたものである。展示にあたり、もとの屋根を草葺きから銅板に変更している。平面形状は L 型で間取りは日本の旅籠屋のような宿泊部屋とウチニワ（炊事場）で構成されている。



図 1 対象建物外観写真（補強前）

2.2 構造概要

木造軸組構法による架構は、150mm×150mm の柱、150mm×200mm の梁、90mm×150mm の貫で構築され、壁は真壁形式の合板貼りである。軸組部材は全てまつが用いられ、柱脚は石場建てであり、小屋組は銅板葺きの和小屋で構成されている。図 2 に小屋組伏図・軸組図、表 1 に建物重量を示す。

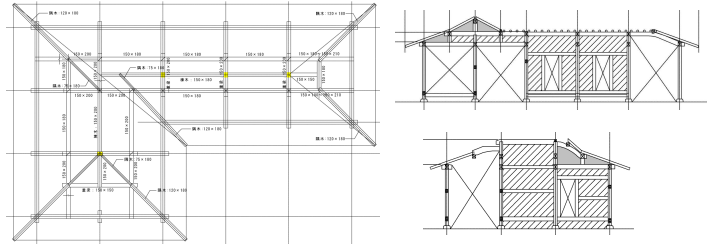


図 2 小屋組伏図・軸組図

表 1 対象建物重量

階	階高 H (m)	階重量 W (kN)	面積 A (m ²)	W/A (kN/m ²)
1	3.270	114.61	61.76	1.85

2.3 補強概要

建物の外観および内観を維持した補強が必要であった為、現状の壁内に設置可能な補強材を選定した。耐震補強材として、炭素繊維複合材料を用いた CFRTP ストランドロッドを採用し、耐震補強を行った。各フレームの構面（胴差の上下）にバランスよく配置し、建物全体がねじれる挙動がないように配慮した。耐震補強工事は、2022 年 3 月末に完了した。



図 3 対象建物外観写真（補強後）



図 4 対象建物外観写真（補強後）



図5 締め付けトルク管理

3. 常時微動測定 (補強前・補強後)

3.1 測定概要

建物の補強前・補強後を計測する。測定位置は図3に示す。測定は、3軸加速度計測器 (RS-ONE) により柱頭および地盤レベルに設置した。サンプリング周波数 100Hz で 180 秒のデータを採取した。

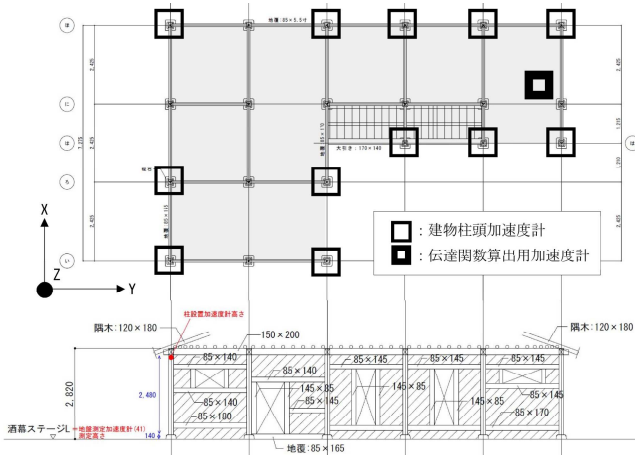


図6 測定位置

3.2 測定結果

図7～図8 (補強前) 図9～図10 (補強後) に分析結果を示す。

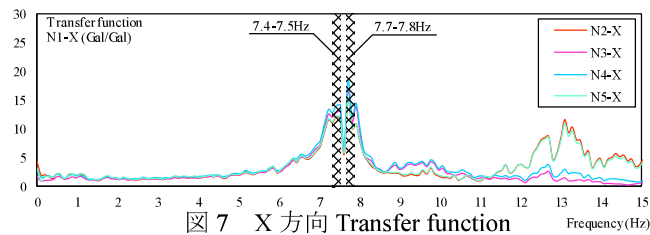


図7 X方向 Transfer function

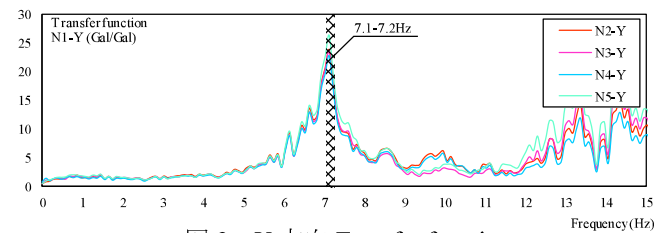


図8 Y方向 Transfer function

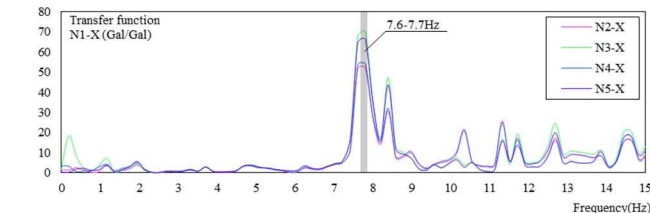


図9 X方向 Transfer function

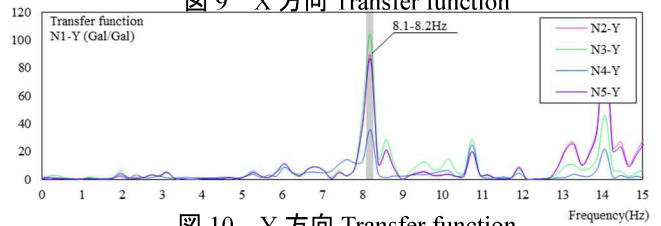


図10 Y方向 Transfer function

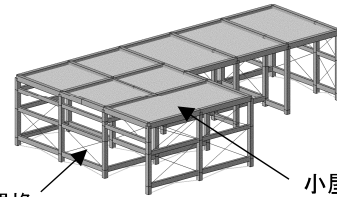
補強前は、7.4-7.5Hz 付近および 7.7-7.8Hz 付近に X 成分の固有振動モード、7.1-7.3Hz 付近に Y 方向の固有振動モードを有している。補強後は、7.6-7.7Hz 付近に X 成分の固有振動モード、8.1-8.2Hz 付近に Y 方向の固有振動モードを有している。耐震補強前後で周期帯はほぼ変化していない。

4. 剛性および耐力の推定

耐震補強前後の剛性および保有耐力を数値解析により算出し、耐震補強後の剛性の変化を比較検証した。

4.1 解析モデルの概要

解析モデルは、小屋組の寄与する軒桁レベルでの水平構面剛性を表現し、壁に配置する耐震補強材を線材ブレースに置換した。図11に解析モデルを示す。



壁: ブレース置換

小屋組: 板要素

4.2 固有値解析

耐震補強前後において固有値解析を行った。解析結果および常時微動測定結果の比較表を表2、1次モードを図12、図13に示す。

表2 固有振動数 (Hz)

	常時微動測定結果		解析結果	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
補強前	7.40	7.10	0.001	0.005
補強後	7.60	8.10	2.535	2.805

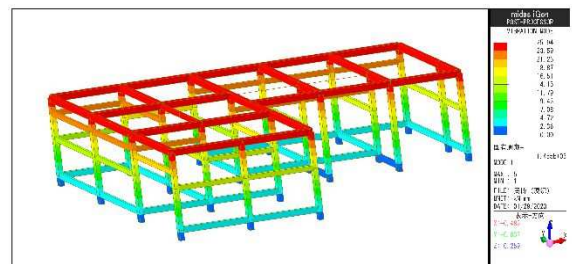


図12 1次モード図 (Y方向: 補強前)

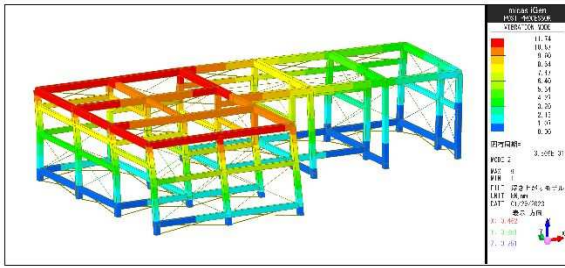


図 13 1次モード図 (Y方向: 補強後)

4.3 静的弾性解析

耐震補強前後の保有耐力を算出する為、静的弾性解析を行い、保有耐力を算出した。保有耐力は1/15rad時とした。荷重変形関係を図14, 図15, 保有耐力を表3に示す。

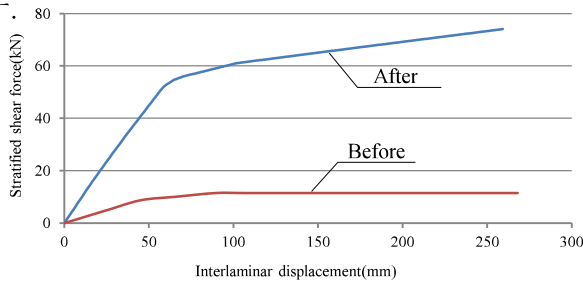


図 14 X方向 Load deformation relationship

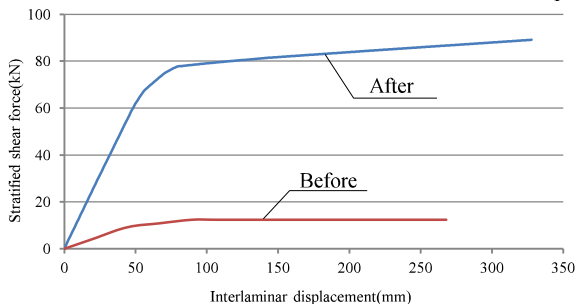


図 15 Y方向 Load deformation relationship

表 3 保有耐力

	水平剛性(kN/mm)		保有耐力 (kN)	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
補強前	0.083	0.090	11.5	12.50
補強後	0.945	1.236	70.42	78.87

解析結果より、剛性および保有耐力は大幅に大きくなっていることが分かる。しかし、常時微動測定結果では、固有振動数がほぼ同じであることより、初期剛性はほぼ変化していないと考えられる。

5 剛性の変化による建築物への影響

耐震補強部材には、高剛性部材から低剛性部材が幅広くあり、採用には建物の周期を把握し、補強後建物への剛性の変化による影響を少なくする必要がある。

5.1 剛性の異なる補強部材による耐震補強

高剛性部材による耐震補強の場合、剛性が高まることによって、固有周期が変動する。その結果、耐震補強前には共振することが無かった周期帯の地震動と共振を起こす可能性がある。

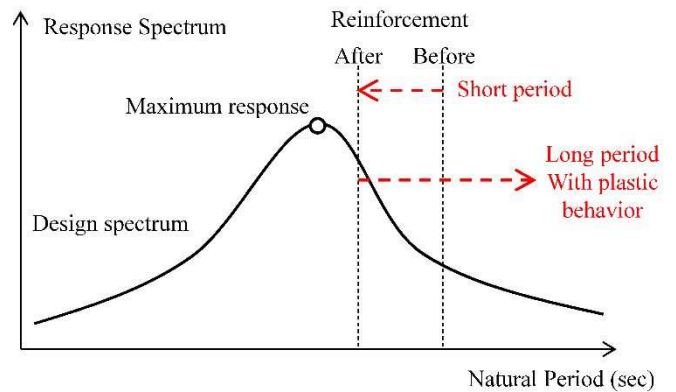


図 16 高剛性部材による耐震補強 (鋼材ブレースや合板・筋交い等)

一方、低剛性部材による耐震補強の場合、耐力は高めるが剛性を変えないことにより耐震補強前後で共振する周期帯を変化させないことが可能となる。

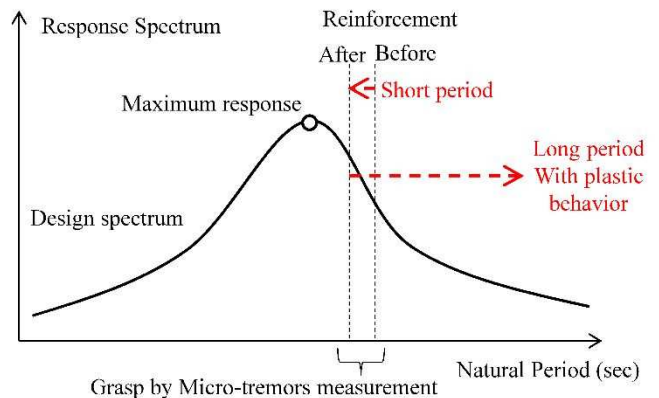
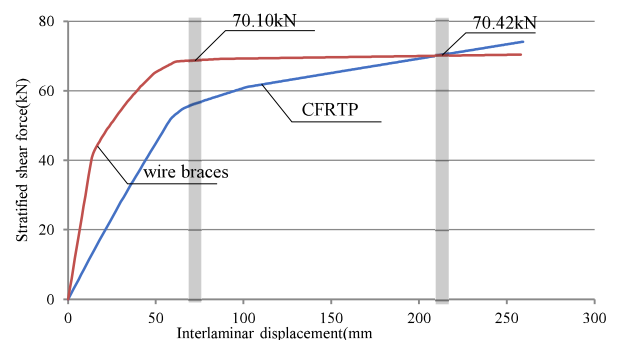


図 17 低剛性部材による耐震補強 (本研究が提案するCFRTPストランド)

5.2 異なる剛性部材を使用した耐震補強の比較

高剛性部材による耐震補強と低剛性部材による耐震補強について、補強後の固有振動数の変化を解析により比較検証を行った。高剛性部材には、剛性の高い筋交いを採用し、低剛性部材はCFRTPストランドを採用した。比較は、固有振動数および1/120rad時の水平剛性を算出した。荷重変形関係を図18, 図19, 固有振動数・剛性比較表を表4に示す。



フェールセーフとして機能するが、元々の既存建築物の周期特性に悪影響を与えない効果となることが明らかとなった。

図 18 X方向 Load deformation relationship

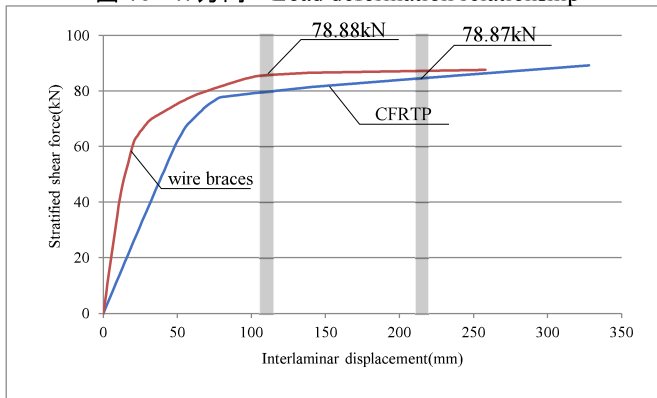


図 19 X方向 Load deformation relationship

表 4 固有振動数 (Hz) 比較表

補強材	CFRTPストランド		筋交い	
	X方向	Y方向	X方向	Y方向
水平剛性	0.945	1.236	1.963	2.403
固有振動数	2.535	2.805	2.776	3.112

高剛性補強部材による耐震補強後のモード図を図 20 に示す。

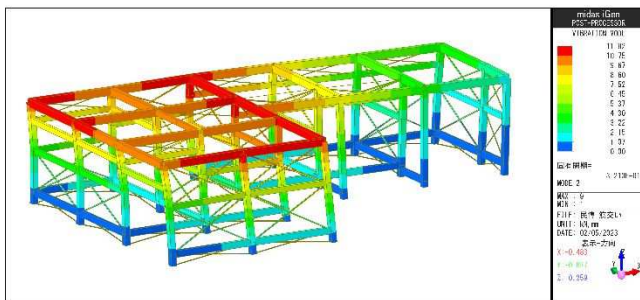


図 20 1次モード図 (Y方向: 補強後)

解析結果より、高剛性部材の固有振動数は、X方向 1.10 倍、Y方向 1.11 倍程度低剛性部材より高くなった。また、水平剛性は各方向とも 2 倍程度剛性が高くなったことが確認された。

5. 結論

常時微動測定の実測値より算出した水平剛性は、補強前と補強後ではほぼ変化していないことが確認できた。また、数値解析により、補強後の耐力が向上したことを確認できた。

補強部材を剛性の高い筋交いと剛性の低い CFRTP ストランドを採用し剛性の違いを数値解析により確認した結果、固有振動数は、保有耐力がほぼ同じの場合、筋交いを使用した方が耐震補強後の剛性が高くなることを確認できた。

今回補強部材として採用した CFRTP ストランドが高強度・低剛性部材であることが推定され、また、この補強部材により耐震補強を行った建築物は大変形時における