

複層斜交重ね板壁の設計法に関する研究

(その1) 構法概要と木造建築物への適用性

複層斜交重ね板壁 木造建築物 構造耐力壁
 構造性能評価 限界耐力計算 設計法

正会員 ○松野 浩一*1
 同上 高岩 裕也*2
 同上 戸田 充*3
 同上 櫻井 暢二*4

1. 研究背景と目的

1.1 日本の木造建築を構法的に概観する

日本の木造建築史を概観するとインド、中国、朝鮮半島を経た北伝仏教と共に伝来した主に建築技術としての木造建築がある。大和～平安時代の社寺建築である。また、気候風土、生活文化に即して発展してきた日本独自の建築文化としての木造建築がある。安土桃山～江戸時代の武家屋敷、農家、町家、商家など住宅建築である。そして、明治維新後、欧米から伝えられた建築構法としての木造建築である。明治～昭和初期の迎賓館をはじめとする大規模木造、住宅など小規模木造など洋館、和館・和洋館など和と洋が混在する時代である。この様に日本の木造建築は、様々な技術、文化、構法が融合しながら建築形態、建築空間の設えが多様化し大別すると真壁造り、大壁造りごとの意匠がそれぞれ考えられてきた。

一方、日本の木造建築を構法的に概観すると伝統木造建築、近代木造建築、現代木造建築に大別することができる。何れも鉛直材の柱、横架材の梁および桁による軸組構法である。軸組の仕口、継ぎ手を嵌合式で組む伝統木造、嵌合式に金物など接合具を積極的に用いる近代木造、そしてプレカット部材を主に金物で緊結する現代木造のように分類する。そして、建築物の高さの高低、面積の大小など建築規模を縦軸に、建設年が古い、新しいなど時間軸を横軸にして、日本の木造建築を図1のように整理した。図中には今日の建築基準法を起点として捉えた既存不適格建物のゾーンを示し、文化財建物を含む歴史的木造建築物の保存・活用を視野に入れた表記になっている。

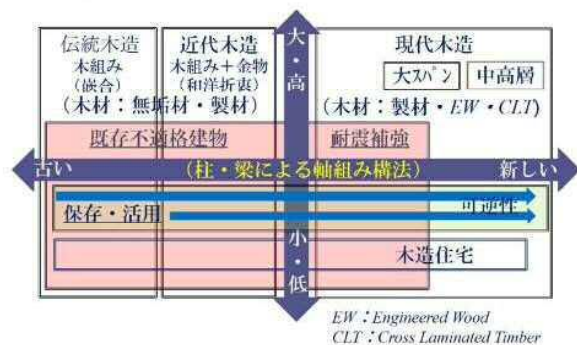


図1 日本の木造建築の構法的整理

1.2 構造耐力壁

木造建築物の主な構造耐力要素は、鉛直構面内に配置される構造耐力壁である。これらは、せん断系に分類される貫を内蔵した土塗り壁、木摺り壁、落とし込み板壁、近年になって構造用合板による面材壁、軸部材の相欠きによる面格子壁、軸力系に分類される筋交いなどが一般的に用いられている。その中で、文化財指定木造建築物など伝統木造建築には、主に貫を内蔵した土塗り壁が用いられてきた。明治時代以降、西洋木造構法により洋館、和風、洋風を折衷した和・洋館などの木造建築には、日本の伝統木造建築の設えを創出してきた真壁造りに代わり大壁造りが用いられ、筋交いを内蔵した木摺り漆喰壁が多く用いられている。その後、筋交いは住宅を中心とした今日の現代木造建築には一般的に用いられる構造耐力壁となっているが、明治時代以前では筋交いや筋交いを土塗り壁の中に入れる考え方は一般的ではなく、その起源も定かでない。

一方、今日では鋼材を利用した仕口金物、木造軸組の靱性を高めるために仕口部分に取り付ける仕口ダンパーなどが多く考案され使用されている。

この様に、木造建築物には多種多様な構造耐力壁が存在しているが、初期剛性、降伏耐力、最大耐力、靱性能など建物全体の構造性能を向上させる実用的な構造耐力壁が見当たらないのが現状である。

1.3 研究目的

歴史的、文化的、産業的な観点から今日まで原型を留めながら保存されてきた木造建築物の多くが文化財指定を受け、それらの保存・活用が進められている。これら建物の内部を含め広く公開して活用するためには耐震性能を付与することが絶対条件である。なぜならば、これら建築物が建てられた時代においても人々が地震を恐れていた事は容易に想像できる。しかし、木造構法を発展させてきたが、その一方、耐震構法はほとんど発展させることはなかった。この様な日本の木造建築物の時代的背景から、既存する文化財指定建物を含む木造建築物の耐震性能向上に資するため、筆者達は小幅板による複層斜交重ね板構法による面材壁である複層斜交重ね板壁¹⁾の実用化を進めてきた。本研究結果の概要と適用事例の紹介を本報(その1)から(その6)で報告する。なお、研究対象構造耐力壁の面内繰返しせん断力載荷実験結果の一部は既報²⁾で報告している。

2. 構法概要

2.1 構法コンセプト

複層斜交重ね板構法は、無垢材の小幅板を実鋸ぎで継ぎ、斜交に三層重ねることによって構面を構成する構法である。軸組構法では床組や屋根を構成する水平構面と壁を構成する鉛直構面から建築空間を形成する。本木造構法は、水平構面の床組、鉛直構面の壁面を構築できるものである。本構法のコンセプトは、以下の4点である。

- ① 木を無駄にしない⇒小幅板で構成する
- ② 木の強みを活かす⇒小幅板を圧縮材で計画する
- ③ 木を役割分担する⇒小幅板を斜交に重ねて使用する
- ④ 木の技術を活かす⇒小幅板を伝統技術で組み立てる

本研究では、以降、鉛直構面を構成する複層斜交重ね板壁について述べる。

2.2 構成方法

複層斜交重ね板壁の構成方法、小幅板の役割分担を図2～図4にそれぞれ示す。各層の小幅板は壁枠にビス留めする。ビス留め仕様により構造性能を、小幅板厚により壁枠幅をそれぞれ調整して多様な壁構面を設計することが可能である。

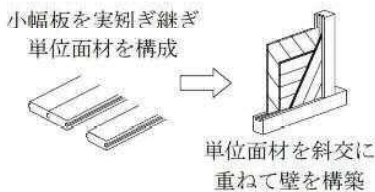


図2 複層斜交重ね板壁の構成方法(単位面材構成)

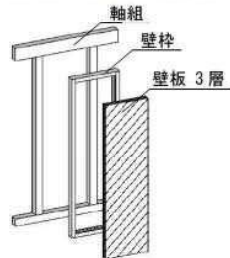


図3 複層斜交重ね板壁の構成方法(壁構面構成)



斜め板1: →方向の地震力を処理する小幅板
 横板2: 3層の単位面材を一体にして靱性能を高める小幅板
 斜め板3: ←方向の地震力を処理する小幅板

図4 小幅板の役割分担

3. 木造建築物への適用と設計法施工法

2.1で述べたように複層斜交重ね板壁は、小幅板のビス留め仕様、小幅板厚により構造性能、壁枠幅を調整できるため、建築規模、軸組部材の断面寸法に応じた設計が可能である。また、壁枠は軸組構面内に固定するため真壁造り、大壁造りそれぞれに対応できる。また、初期剛性が高く、せん断変形角 $1/120 \sim 1/90 \text{rad}$ 付近で降伏し、その後 $1/20 \sim 1/10 \text{rad}$ 付近までせん断耐力は漸増する構造性能を有しているため、構造設計法では実験値を用いて許容応力度計算、限界耐力計算により構造性能評価をすることが適切と考えられる。複層斜交重ね板壁の適用性を表1に示す。

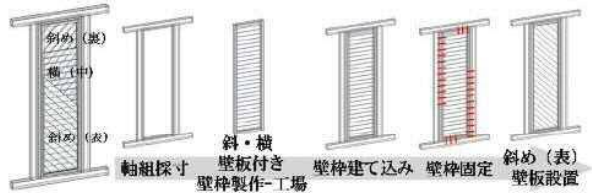
表1 複層斜交重ね板壁の適用性

工事・規模・仕様	内容等	伝統	近代	現代
① 工事種類	新築	○	○	○
	耐震補強	○	○	○
② 建築規模	住宅規模	○	○	○
	大規模	○	○	○
③ 壁の仕様	真壁造り	○	○	○
	大壁造り	○	○	○
④ 構造設計法	許容応力度計算	○	○	○
	限界耐力計算	◎	◎	◎
	保有水平耐力計算	△	△	△

4. 施工法

壁構面の寸法、現場の施工条件に対応する2通りの施工法を考案した。それらを図6に示す。

施工法:セミプレファブ構法(面材化)



施工法:現場建て込み構法

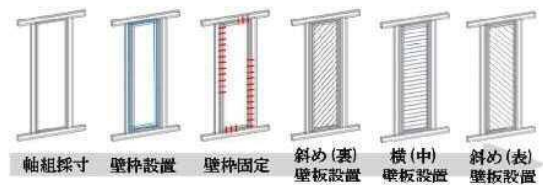


図6 複層斜交重ね板壁の施工法

5. まとめ

本報では、複層斜交重ね板壁の構法概要と木造建築物への適用性について紹介した。

参考文献

- 1) 松野浩一他: 重ね板壁構法による耐震壁に関する研究その1~14, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2010~2014年
- 2) 松野浩一他: 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2017年

*1 東洋大学理工学部建築学科教授 博士(工学)
 *2 東洋大学大学院理工学研究科建築・都市デザイン専攻 博士後期課程
 *3 ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社
 *4 株式会社能勢建築構造研究所

*1 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr. Eng.
 *2 Doctoral Student, Dept. of Arch. and Urban Design, Toyo University
 *3 JR West Japan Consultants Company
 *4 Nose Structural Engineering Inc.

複層斜交重ね板壁の設計法に関する研究

(その2) 構造性能の実験的評価

複層斜交重ね板壁 木造建築物 構造耐力壁
 構造性能評価 面内せん断実験

正会員 ○鈴木 郁弥^{*1}
 同上 戸田 充^{*2}
 同上 櫻井 暢二^{*3}
 同上 高橋 佳伸^{*4}
 同上 松野 浩一^{*5}

1. 研究目的

前報では、複層斜交重ね板壁の実用化にあたり構法概要および文化財指定建物を含む木造建築物への適用性について示した。本報では、複層斜交重ね板壁の試験体概要および実験手法、実験結果について述べる。

2. 実験方法

載荷装置は、建築基準法施工令第46条第4項表1の(八)に基づく木造軸組み耐力壁の試験方法に準じたタイロッド式を採用し、載荷にはストローク700mm押し引き油圧ジャッキを用いた。図1.1に載荷装置、写真1.1に試験体写真、表1.1に試験体諸元をそれぞれ示す。

載荷装置の油圧ジャッキ側から試験体側に正載荷、試験体側から油圧ジャッキ側に負載荷とし、正負交番繰り返し載荷を行う。目標変形角の設定は、せん断変形角が1/600, 1/300, 1/150, 1/120, 1/90, 1/60, 1/40, 1/30, 1/25, 1/20, 1/15, 1/10radの正負変形時とし、繰り返し回数は、1/600radを1回、1/10radを正方向押し切り、その他の目標変形角は各3回とした。

試験体は鉄骨造ロ字型反カフレーム上に設置した治具を介して、タイロッドとプラットローラーで試験体の浮き上がりを防止し、φ14mmのアンカーボルト2本及び2つのストッパーにより試験体の土台を拘束する。

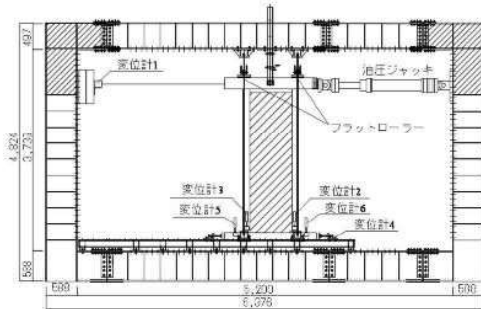


図 2.1 載荷装置



写真 2.1 試験体

表 2.1 試験体諸元

部材	種別	寸法 (mm)
柱	すぎ	120×120
梁	すぎ	120×210
土台	ひのき	120×120
板壁	すぎ	110×30

3. 試験体概要

本研究では、前報で既述した構法に基づき構築された複層斜交重ね板壁の面内繰り返しせん断力載荷実験を実施して構造性能を把握する。

主な実験パラメータは壁板のビス留めの仕様と、壁板の厚みの変動に伴う壁枠の幅である。ビス留めの仕様は構成する3層の各壁板を留めるものであり、それによって耐力をチューニングしている。また壁枠の幅の変動は補強の対象となる建築物の壁の仕様や仕上げに適用するためのものである。表2.1に試験体概要一覧、図2.1に壁枠のビス留め方法、図2.2に壁板構成図をそれぞれ示す。

表 2.1 試験体概要一覧

No.	高さ [mm]	枠幅 [mm]	長さ [mm]	壁板の ビス留め仕様	板厚[mm]		
					斜	横	斜
1	3,000	120	665	外・中・外	30	30	30
2	3,000	120	910	外・中・外	30	30	30
3	3,000	120	910	中・外	30	30	30
4	3,000	120	910	中	30	30	30
5	3,000	120	1,820	外・中・外	30	30	30
6	3,000	120	1,820	中・外	30	30	30
7	3,000	90	910	外・中・外	20	20	20
8	3,000	48	910	外・中・外	15	9	15
9	3,000	42	910	外・中・外	12	9	12
10	2,560	120	910	外・中・外	30	30	30

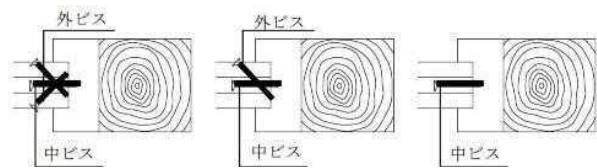


図 2.1 壁枠ビス留め方法

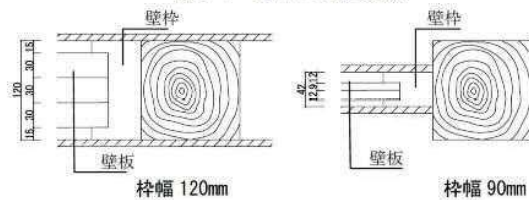


図 2.2 壁板構成図

4. 実験結果

4.1 評価方法

上記に記した実験パラメータについて、各試験体が有する初期剛性、最大耐力、靱性能、壁倍率について評価を行った。靱性能の評価に伴い、その耐力の低下を確認するため、試験体の有する最大耐力を終局時の耐力で除することで耐力低下率を算出し、塑性率と合わせて評価した。また、各仕様の減衰性能を確認するため、剛性とエネルギー吸収性能の関係性を、等価な減衰に置換し、評価を行う等価線形化法を用いた。各変形角における最大耐力 Q_{eq} とその時の変形角 Deq から等価ポテンシャルエネルギー W を与え、等価な減衰性能を求めた。(1)式、等価線形化法による等価粘性減衰係数の算出方法を示す。

$$\text{等価粘性減衰係数 } heq = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \dots (1) \text{ 式}$$

4.2 ビス留め仕様の差異による影響

ビスにより拘束する壁板の枚数が増えるほど耐力、初期剛性は顕著に向上し、壁倍率も大きな値を示した。しかし、それに伴い塑性率も上昇し、全ての壁板を拘束した試験体は、終局時に最大耐力の77%まで耐力低下を起した。これは、耐力の向上に伴い接合部が早期に損傷したためと考えられる。表 4.1 にビス留め仕様の違いによる実験結果、図 4.1 に荷重-変形角関係、図 4.2 に等価粘性減衰をそれぞれ示す。

4.3 壁枠の幅の差異による影響

壁枠の幅が大きくなるにつれ、最大耐力は向上する結果となったが、初期剛性はそれに比例した大きな変動は見られなかった。壁枠の幅が小さくなるにつれ塑性率は顕著に増加したが、等価粘性減衰に大きな変化は見られず、耐力低下は小さい結果となった。表 4.2 にビス留め仕様の違いによる実験結果、図 4.3 に荷重-変形角関係、図 4.4 に等価粘性減衰をそれぞれ示す。

4.4 構面の大きさによる影響

構面幅 1 間のもは単位長さに基づいた半間のものと比較して約 1.2 倍の最大耐力を示した。また、耐力低下も小さい値を示した。これは構面の中心に留めたビスが壁板の座屈を防止したためだと考えられる。構面の高さが小さい試験体は、大きいものと比較して最大耐力が小さな値を示し、初期剛性は大きな値を示す結果となった。これは、荷重を負担する斜め板材が少なかったことが耐力に、アスペクト比が小さくなったことが初期剛性に影響を及ぼしたことが考えられる。表 4.3 にビス留め仕様の違いによる実験結果、図 4.5 に荷重-変形角関係、図 4.6 に等価粘性減衰をそれぞれ示す。

表 4.1 ビス留め仕様の違いによる実験結果

試験体	初期剛性	最大耐力	塑性率	耐力低下率	壁倍率
	K(kN/rad)	Pmax(kN)	μ		
No.2	1460.63	31.43	2.63	0.77	5.7
No.3	617.06	19.14	2.58	1.00	3.3
No.4	213.81	11.30	1.64	1.00	1.3

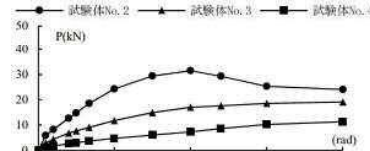


図 4.2 荷重-変形角関係

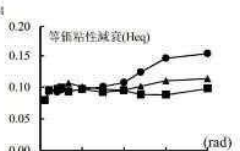


図 4.3 等価粘性減衰

表 4.2 ビス留め仕様の違いによる実験結果

試験体	初期剛性	最大耐力	塑性率	耐力低下率	壁倍率
	K(kN/rad)	Pmax(kN)	μ		
No.2	1460.63	31.43	2.63	0.77	5.7
No.7	1406.04	25.19	4.61	0.92	6.2
No.9	1212.26	15.78	6.48	1.00	4.8

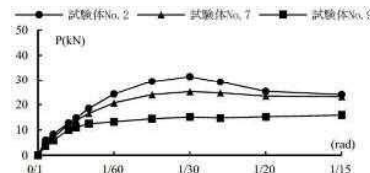


図 4.4 荷重-変形角関係

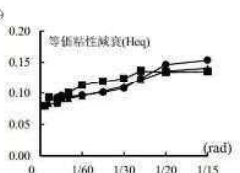


図 4.5 等価粘性減衰

表 4.3 ビス留め仕様の違いによる実験結果

試験体	初期剛性	最大耐力	塑性率	耐力低下率	壁倍率
	K(kN/rad)	Pmax(kN)	μ		
No.2	1460.63	31.43	2.63	0.77	5.7
No.5	4424.62	39.14	4.26	0.99	9.6
No.10	1751.00	26.44	3.97	0.94	7.7

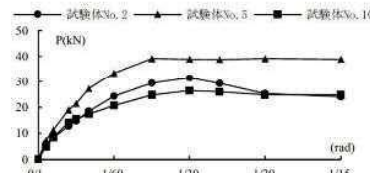


図 4.6 荷重-変形角関係

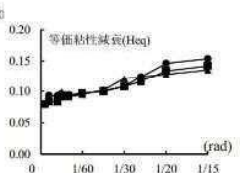


図 4.7 等価粘性減衰

5. まとめ

本報では、複層斜交重ね板壁の試験体概要および実験手法、実験結果について述べた。下記に本報のまとめを記す。

- (1) ビスによって拘束する壁板が増えるほど初期剛性、耐力は上昇したが、耐力低下が生じた。
- (2) 壁枠の幅は小さくなるにつれ、耐力は減少したが、初期剛性の変化は小さく、耐力低下は小さい。
- (3) 構面の長さは初期剛性、耐力、靱性能を向上させ、構面の高さは、耐力を減少させ、初期剛性を向上させた。

参考文献

- 1) 日本住宅・木造技術センター：木造軸組工法住宅の許容応力度設計 (2008 年版)

*1 東洋大学大学院理工学研究科建築学専攻 修士課程
 *2 ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社
 *3 株式会社能勢建築構造研究所
 *4 株式会社サンエイコー東日本
 *5 東洋大学理工学部建築学科教授 博士 (工学)

*1 Graduate School of Science and Engineering Research Course, Toyo University
 *2 JR West Japan Consultants Company
 *3 Nose Structural Engineering Inc.
 *4 Saneiko East Japan Company
 *5 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr.Eng.

複層斜交重ね板壁の設計法に関する研究

(その3) 構造モデルと設計特性値

複層斜交重ね板壁 木造建築物 構造耐力壁
 構造性能評価 復元力モデル

正会員 ○柳田 実肃*1
 同上 高岩 裕也*2
 同上 戸田 充*3
 同上 櫻井 暢二*4
 同上 松野 浩一**5

1. 研究目的

前報(その1, 2)までで、複層斜交重ね板壁の構法概要、設計法及び静的面内せん断実験概要、分析方法について述べた。

それらを踏まえて本報では、複層斜交重ね板壁の設計への適用を考慮したデータの整理および検討を行うことを目的とする。

2. 復元力特性のモデル化手法

解析プログラムはRESP F3T Ver1.2.5を用い、前報(その2)の静的面内せん断実験で得られた荷重-せん断変形角関係から、複層斜交重ね板壁の復元力特性をモデル化する。また、既存の耐力壁の構造性能と比較する為、土壁、構造用合板についてもモデル化する。

復元力特性のモデル化を行う際、除荷時の剛性、繰返し载荷による剛性の低下等を再現する為、マルチリニアスリップ型と最大点指向型、完全弾塑性のバイリニア型の加算結果により近似させる。図1に復元力モデル化概要を示す。

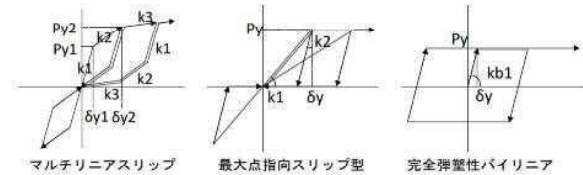


図1 複層斜交重ね板壁復元力モデル化概要

3. 復元力特性の比較

バイリニア成分の剛性 K_0 を1000kN/radで固定し、降伏荷重 Q_b 、スリップ剛性比(slip)、除荷剛性比(down)をパラメータとして複層斜交重ね板壁、構造用合板、土壁をモデル化した。図2に復元力モデルと実験値の比較を抜粋したものを示す。

土壁は複層斜交重ね板壁と比較するとバイリニア成分が小さく、また、スリップ剛性比は同等の値を示しているが、除荷剛性比が0.5となり、エネルギー吸収量が比較的小さい。

構造用合板は複層斜交重ね板壁と同程度のバイリニア成分を内包しているが、スリップ剛性比、除荷剛性比共に小さいため、複層斜交重ね板壁と比較するとエネルギー吸収量が小さい。

複層斜交重ね板壁は既存の耐力壁と同等、もしくはそれ以上のバイリニア成分を有しており、更に除荷時には高い剛性を維持したまま変形が戻るため、非常に高いエネルギー吸収量を期待できる。表1に復元力モデルパラメーター一覧を示す。

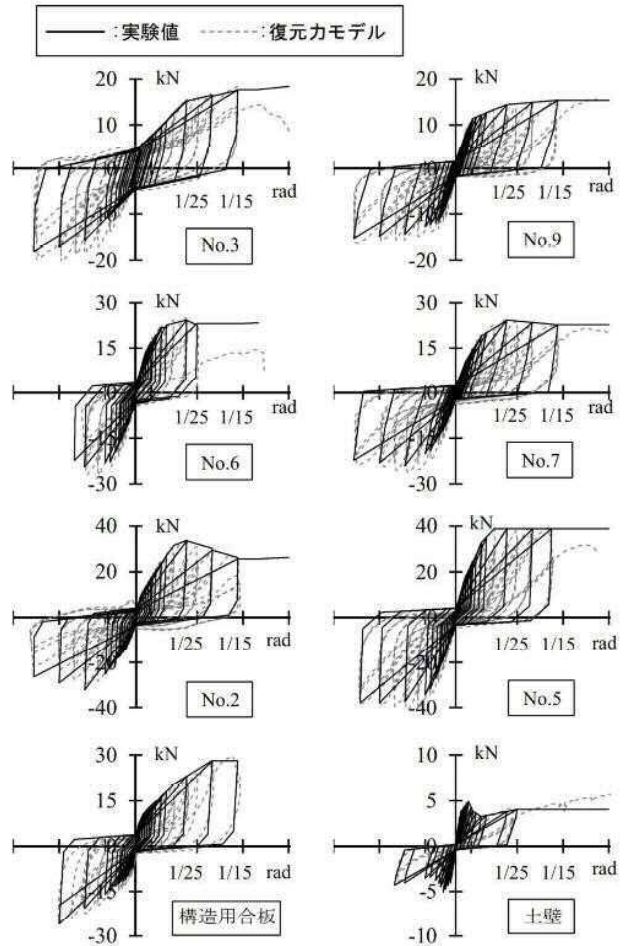


図2 復元力モデル化と実験値比較

4. 設計特性値

複層斜交重ね板壁，構造用合板，土壁の静的面内せん断実験により得た設計特性値を比較した。

比較した既存耐力壁は，構造用合板は大変形を許容できないが，高い耐力を出すことができる強度型の耐力壁として，土壁は耐力が低い，高い変形性能を有する靱性型の耐力壁として採用している。

複層斜交重ね板壁は，壁倍率換算で4～10倍の高い耐力を有しており，構造用合板と同程度の強度があることが分かる。また，最大耐力時変形角，最大耐力，終局耐力を見ると高いエネルギー吸収量を維持したまま土壁と同程度の変形性能を有していることが分かる。表1に設計特性値一覧を示す。

5. まとめ

本報では，解析プログラムを用いた復元力モデル及び静的面内せん断実験結果より，複層斜交重ね板壁の設計への適用を考慮したデータの整理及び検討を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 複層斜交重ね板壁の復元力特性はマルチリニアスリップ型と最大点指向型，完全弾塑性のバイリニア型の加算でモデル化できることを確認した。
- (2) 復元力モデルのスリップ剛性比及び，除荷剛性比を比較した結果，既存の耐力壁よりエネルギー吸収量が大きいことを確認した。
- (3) 静的面内せん断実験の結果より，設計特性値を比較した結果，強度型の既存耐力壁と同程度の耐力と，靱性型の既存耐力壁と同程度の変形性能を有することを確認した。

参考文献

- 1) 松野，牛山他：重ね板構法による耐震壁に関する研究（その1～8）日本建築学会大会学術講演梗概集，C-1，構造III

表1 設計特性値及び復元力モデルパラメーター一覧

試験体NO.	載荷方向	実験値							復元力モデル				
		降伏耐力Py (kN)	Pmax × 2/3 (kN)	$0.2P_u \sqrt{2u - 1}$ (kN)	特定変形角 1/150rad時 (kN)	終局耐力 Pu (kN)	最大耐力Pmax (kN)	最大耐力時変形角 (10 ⁻³ rad)	壁倍率	Kb (kN/rad)	Ob (kN)	slip	down
1	正	8.30	10.11	5.36	6.16	13.49	15.16	31.64	4.1	1000	2.5	0.03	5.0
	負	7.49	9.79	5.50	6.20	12.90	14.68	38.43	4.2				
2	正	15.44	20.19	11.82	12.80	25.62	30.28	31.81	6.6	1000	3.0	0.03	4.0
	負	19.01	17.95	8.76	10.32	24.46	26.92	32.08	4.9				
3	正	12.10	11.17	5.10	5.44	15.28	16.76	66.17	2.9	1000	4.0	0.08	2.5
	負	10.74	12.21	7.48	7.00	15.90	18.32	47.96	3.9				
4	正	8.44	7.17	2.69	2.20	8.82	10.76	65.65	1.2	1000	0.9	0.01	15.0
	負	5.96	6.53	2.65	2.76	8.85	9.80	68.25	1.5				
5	正	42.39	47.71	32.85	32.60	63.38	71.56	60.43	9.1	1000	7.0	0.01	4.0
	負	49.33	49.49	37.51	36.28	65.02	74.24	31.68	10.2				
6	正	25.93	30.37	19.22	25.76	39.49	45.56	33.03	5.4	1000	6.0	0.02	7.0
	負	33.26	32.67	17.88	28.24	45.01	49.00	31.69	5.0				
7	正	12.44	14.80	10.70	10.24	19.11	22.20	31.69	5.7	1000	3.5	0.15	6.0
	負	13.96	15.76	12.31	11.92	21.01	23.64	31.65	6.7				
8	正	9.83	10.45	10.71	10.24	12.31	15.68	49.80	5.5	1000	1.5	0.02	3.0
	負	11.20	11.31	11.48	11.80	14.84	16.96	33.85	6.3				
9	正	9.34	9.23	8.03	8.52	11.66	13.84	64.14	4.5	1000	1.5	0.03	1.0
	負	10.22	9.92	9.08	9.76	13.08	14.88	64.73	5.1				
10	正	15.97	20.77	15.80	14.00	26.07	31.16	32.17	7.8	1000	2.5	0.01	4.0
	負	22.65	23.81	13.79	16.48	31.85	35.72	30.87	7.7				
構造用合板	正	25.54	36.00	19.31	20.52	43.63	54.00	5.41	10.61	1000	5.0	0.01	2.0
	負	24.31	31.01	19.84	23.36	37.59	46.52	5.56	10.90				
土壁	正	5.17	5.41	7.45	7.65	5.98	8.12	8.38	2.84	1000	0.5	0.015	0.5
	負	4.88	5.84	6.28	8.23	6.79	8.76	7.17	2.68				

*1 東洋大学大学院理工学研究科建築学専攻 修士課程
 *2 東洋大学大学院理工学研究科建築・都市デザイン専攻 博士後期課程
 *3 ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社
 *4 株式会社能勢建築構造研究所
 *5 東洋大学理工学部建築学科教授 博士（工学）

*1 Graduate School of Science and Engineering Research Course, Toyo University
 *2 Doctoral Student, Dept. of Arch. and Urban Design, Toyo University
 *3 JR West Japan Consultants Company
 *4 Nose Structural Engineering Inc.
 *5 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr.Eng.

複層斜交重ね板構法による耐震壁に関する研究
 (その4) 適用事例：奈良ホテル木造本館耐震補強工事

正会員 ○戸田 充*1
 同上 櫻井 暢二*2
 同上 高岩 裕也*3
 同上 松野 浩一*4

複層斜交重ね板壁 大規模伝統木造建築物 耐震補強工事

1. 耐震補強設計概要

1.1 建築概要

当建物は明治42年(1909年)に竣工、開業した木造2階建て、延べ面積約4,600㎡の大規模伝統木造建築である。用途はホテルとして保存活用されていて、図1のようにシンメトリーを強調しつつ雁行配置された五つの棟からなる、和洋折衷様式の建築物である。

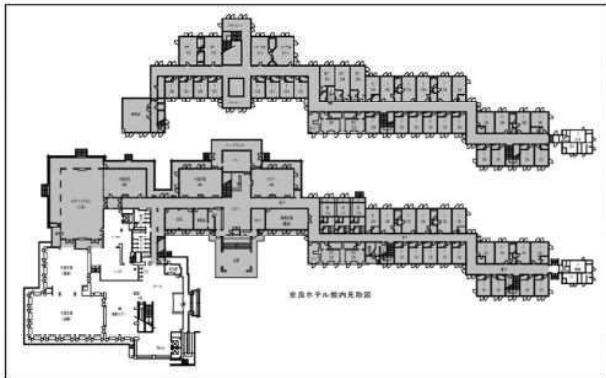


図1

1.2 設計概要

平成25年11月の耐震改修促進法の改正により、当建物である木造本館が、不特定多数の人が利用する大規模建築物に相当するという判定を受け、平成26年7月に建物調査及び耐震診断に着手した。建物調査は写真1～3に示すように小屋裏、1階天井裏、床下の構造形式、木部材及び内装調査を行い、既存建築図を復元した。



写真1

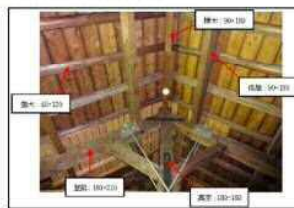


写真2



写真3

耐震診断の結果、耐震性能を確保していないと平成26年12月に判定され、引き続き、耐震補強案作成に着手した。木造軸組の耐震性を正確に把握するため、平成27年3月、2階バックヤードの一部間柱を抜き取り、写真4、5にあるように曲げ・圧縮試験を行った。実験データより既存部材の強度を確認し、補強設計に役立てた。



写真4



写真5

その後、平成28年3月に耐震補強実施設計に着手し、同年12月に第三者委員会の判定を受け、補強設計を完了した。工事着手は平成29年4月となり、工事竣工予定は平成31年度末となっている。

2. 建物の特徴

大壁仕様の木造軸組構造となっている。木造軸組の架構は135mm×135mmの柱で構築され、高い階高を垂れ壁・腰壁内に筋交いを設け構成されている。軸組部材は、ひのき、まつ、すぎが適材適所に用いられ、軸力の変動が大きい隅柱はひのき、主に鉛直荷重を負担する中柱はすぎとし木材材種を使い分けている。

3. 補強設計方針

3.1 歴史的価値

当建物は写真6、7にあるように外観の保存価値が最重要であると方針付けた。続いては内観の保存が重要と考えた。また、未来の技術者への継承のためにも、可能な限りオリジナル部材を保存できるように補強個所の減らすようにした。



写真7

Study on the wooden seismic wall which is comprised of a board with rabbet joint put diagonally each other
 (Part1) Seismic retrofitting of existing

Mitsuru Toda, Nobuji Sakurai, Yuya Takaiwa, Koichi Matsuno

写真6

3.2 補強方針

エントランス側や荒池側からの外観に配慮し、耐震補強部材を外部に設けない方針とした。写真8, 9にあるようにホール、廊下及び客室の大壁を出来るだけ撤去しないように考えた。また、建物内部にも伝統木造構法による落とし込みの根太床組や、格天井があり、補強工事による支障部分を最低限に抑えるように考えた。



写真8 :ロビー

写真9 :ダイニング

3.3 補強位置

補強方針により、床面から天井面までの大壁面のみならず補強部材を集中させるように考えた。施工に関しては、工事範囲の工区分けを行う、居ながら施工となった。重ね板構法は片側施工が可能であることから、撤去・復旧による色合わせの難易度を考慮し、客室側からの施工とし、壁面内部への補強により内観も修復可能な方法とした。

4. 補強工法の比較

当初設計では工業化製品である仕口補強金物やダンパーによる補強を考えていたが、図2, 3に示すように複層斜交重ね板壁による補強と概略比較した場合、補強箇所数が大幅に減少し、コスト面やオリジナル部材の保存という観点からも重ね板壁の採用に至った。

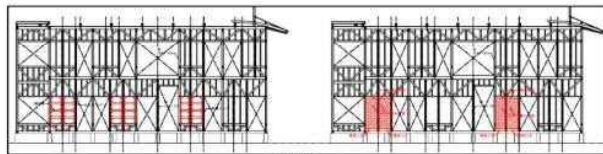


図2

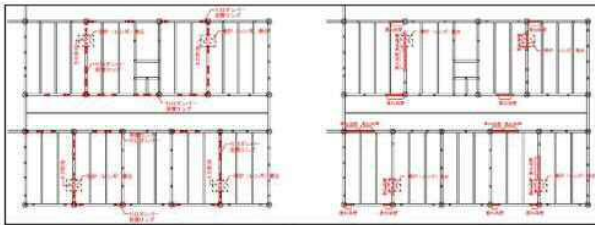


図3

また、図4に示すように重ね板壁は厚み30mmの小幅板を3層重ね、枠幅が120mmであるため、当建物の柱

サイズ135mm角にも対応可能な大きさであった。当時は実績が1件しかなく、重ね板壁の耐力データも少なかったため、構造実験を行い設計データの構築を図った。

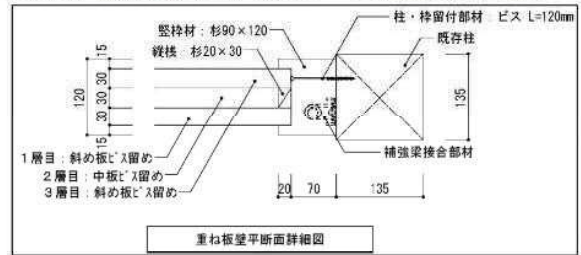
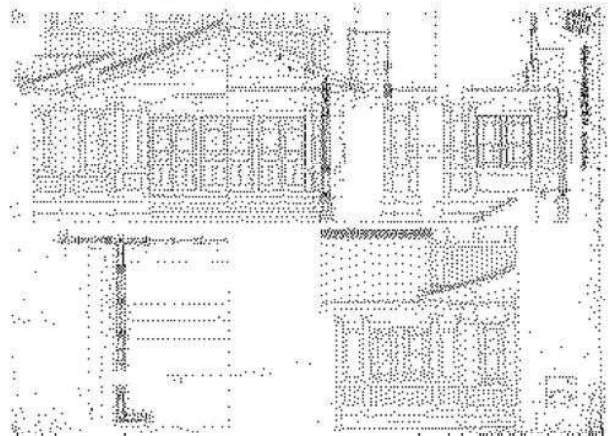


図4

また、伝統木造木造建築物の構造性能を考慮して、接着剤等使用しない、無垢な木材でビスのみで接合する構法採用出来たことは有意義であると考えます。

5. その他

エントランス、客室及び宴会場等に2階建て分のレンガ造の暖炉があり、補強保存する方法を模索したが、客室のレイアウトやコスト面から断念せざるを得なかった。しかし、エントランス及びロビー、宴会場の3ヶ所は工事着事後の抜き取り実験により、暖炉のマントルピースの高さまで、レンガ造が自立できることを確認し、現況保存できるようになった。当時の設計図の原図が調査の途中段階で発見され、構造上重要と思われる部分はひのき、その他はすぎを使用し、軸組部材では芯持ち材が芯取り材か、造作材では木表と木裏の仕様まで作図されており、当時の木造建築に対する設計技術力の高さをうかがい知る発見となった。



*1 ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社

*2 株式会社能勢建築構造研究所

*3 東洋大学大学院理工学研究科建築・都市デザイン専攻 博士課程

*4 東洋大学理工学部建築学科教授 博士(工学)

*1 JR West Japan Consultants Company

*2 Nose Structural Engineering Company

*3 Doctoral Student, Dept. of Arch. and Urban Design, Toyo University

*4 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr.Eng.

複層斜交重ね板壁の設計法に関する研究

(その5) 適応事例：旧下呂市湯屋小学校木造校舎の構造調査

複層斜交重ね板壁 木造建築物 構造耐力壁
大規模伝統木造建築物 耐震補強工事

準会員 ○松本 桃佳*1
正会員 稲岡 信義*2
同上 櫻井 暢二*3
同上 住 智治*4
同上 高岩 裕也*5
同上 松野 浩一*6

1. 研究目的

前報その2、その3では木造建築物の耐震補強を目的に開発された耐力壁である複層斜交重ね板壁の構造性能を実験的、解析的に示した。またその4では、複層斜交重ね板壁の設計・施工概要について示した。本報では、それらを踏まえて複層斜交重ね板壁法の有用性を示すため、実際の近代木造建築物を用いた、具体的な耐震設計手法について示す。

2. 建物概要と構造調査概要

対象建築物は岐阜県在中のY小学校木造校舎である。Y小学校木造校舎は、1954年(昭和29年)に建設された木造軸組構法による2階建て大規模木造建築物である。校舎はI棟とII棟に分かれており、その境界部はコンクリート構造の防火壁が設けられている。築63年を経る中、建築基準法、同施行令における耐震基準は幾度かの改正が行われ今日に至っている。下呂市は当該木造校舎の耐震診断(「湯屋小学校南校舎耐震診断業務」)を実施し、その結果、耐震強度が不足していると判定された。そこで作成された建築図面、構造図面および現地地下見調査(2017年9月29日)からまとめた建築概要を表1.1に示す。

一般的に学校施設の建築計画では、敷地の北側に校舎を配置して南側の校庭に向けて各教室を配置し、それぞれの教室の窓を大きく設けるため、建物東西方向(桁行き方向:長辺方向)の耐震強度が不足する。建物南北方向(梁間方向・短辺方向)は教室間に設けられている界壁を耐力壁で設計することで耐震強度は、桁行き方向に比べて高くなる。湯屋小学校木造校舎も上述した建築計画に沿って建設されているため、木造校舎の耐震性を推察すると下呂市の耐震診断結果は妥当と考えられるが、その耐震診断結果の詳細を確認できないため、耐震強度がどの程度不足しているのかは不明である。これまでの資料調査と下見調査から、木造校舎の耐震補強を計画する上で有効な構造的長が確認できた。そこで、建物全体を耐震補強して再利用することは十分可能であると考えられる。

ここで、耐震補強計画上有効な構造的長を以下に列挙する。

- ① 木造校舎北側に廊下が設けられているため、桁行き方向軸組架構が建物全長にわたって3構面(南側構面、教室・廊下間中構面、北側構面)設けられている。
- ② 南側、北側の2構面には随所に耐力壁が、1階2階には建物全長にわたり、腰壁が設けられている。
- ③ 外壁は下見板壁(板厚15mm)が設けられている。
- ④ 柱部材はひのき材、その断面寸法は150mm×150mm(5寸角)であるので、柱部材のせん断耐力を發揮させることが可能である。
- ⑤ 耐力壁を設ける位置にはコンクリート基礎が設けられている。建設された時代からすると鉄筋は配筋されていないと思われるが、鉛直荷重を支持してきた既存基礎構造にコンクリート増し打ちにより必要な配筋量を確保することは可能である。

表 1.1 Y小学校木造校舎

床面積	1階:678.22m ² ,2階:678.22m ² ,延べ床:1356.44m ²
建物高さ	GL~基礎上端:220mm,基礎上端~2階桁上端:4,080mm, 2階桁上端~軒:3,855mmGL~軒高さ:8,155mm
建物長さ	I棟(西側):31,850mm×9,555mm, II棟(東側):39,130mm×9,555mm
屋根	棧瓦葺
構造形式	木造軸組,2階床梁:木造トラス(斜め板張), 小屋梁:木造キングポストトラス
耐力壁	木造筋交い
基礎	コンクリート布基礎
防火構造	I,II棟間にコンクリート構造防火壁,鋼製防火扉



写真 1.1 建物外観



写真 1.2 建物内観(教室)

3. 常時微動測定

対象建築物の形状を考慮した立体的測定法により、常時微動測定を行った。これは建物全体の振動性状を大局的に把握することが可能な測定方法である。加速度計はサーボ型加速度計を採用して、縦、横、高さが65mmのアルミ製治具に取り付けた。そして、建物に設置して、水平面上直交2方向である梁間・桁行方向の振動を計測した。それらをFFTアナライザーに接続することで応答加速度波形を測定した。振動特性は測定データをパソコン上の解析プログラムを用いてデータ解析により検出した。また、測定位置は地盤をリファレンスとして、2階柱脚、2階柱頭の3つのレベルに加速度計を設置して行った。1回の測定で最大6チャンネル(3箇所)の同時測定を行い、計18回に分けて加速度計測を行った。図3.1に測定位置を示す。

梁間方向において、各フレームが同一方向に挙動する並進モードは確認できず、独立した挙動となる平面蛇行モードを確認した。図3.2に梁間方向の振動モードを示す。また、I棟とII棟の境界部で、各棟独立した挙動を確認した。これは、I棟とII棟が防火壁によって隔てられているためだと考えられる。

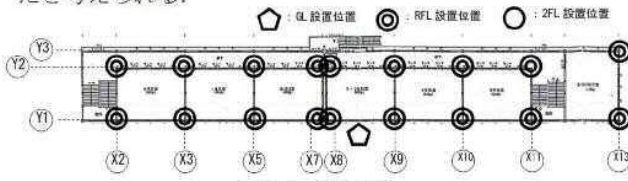


図 3.1 測定位置

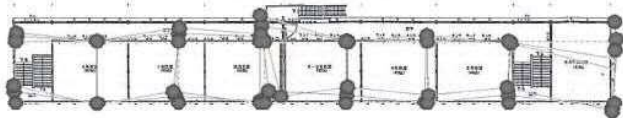


図 3.2 梁間方向の振動モード

4. 固有値解析

常時微動測定より算出した固有振動モードを再現するために、行った構造調査をもとに、有限要素法プログラムを用いて数値解析モデルの構築を行った。表4.1に数値解析モデルの諸元を示す。

表 4.1 数値解析諸元

軸組	・鉛直材、横架材ともに樹種はひのき (E90) 相当
床	・2階床面の水平剛性は、床倍率で0.5倍として評価。火打ち梁は構面に対して負担面積が小さいことから考慮しない。 ・屋根面水平剛性は床倍率で0.5倍として評価した。
耐力壁	・耐力要素は60x120または、60x150の筋かいに、木摺壁または土塗り壁 (t=90) の耐力を見込み完全弾塑性モデルで評価した。なお、筋かいの耐力は母材に対するめり込みの降伏耐力により評価した。(壁倍率 $\alpha=3.0$ 倍相当) ・仕上げ材であるモルタル、下見板の復元力も考慮。
支持条件	・1階柱脚はピン支点により境界条件を評価。
荷重	・偏心率および剛性率を算出するために、実状に合わせて評価。

数値解析モデルは、前節で述べたようにI棟とII棟が防火壁により隔てられ、独立した挙動を示しているため、二つの棟に分割し構築した。構築した数値解析モデルを用いて、固有値解析を行い、固有振動特性値解析を算出し、固有振動モードを得た。表4.2に常時微動測定と固有値解析によって算出した固有振動特性値と固有振動モードをそれぞれ示す。

5. まとめ

本報では、耐震設計の事例としてY小学校木造校舎の構造調査を行った。また、常時微動測定により平面蛇行モードを確認し、数値解析モデルを構築することで、解析的に固有振動モードを把握した。次報その6では、これを踏まえて、複層斜交重ね板構法による鉛直構面および水平構面の補強を行い、耐震補強前後の固有振動モードについて考察する。

参考文献

- (1) (有限会社大登設計, 湯屋小学校南校舎耐震診断業務湯屋小学校南校舎耐震診断業務)

表 4.2 常時微動測定および固有値解析結果

	I棟				II棟			
	常時微動測定		固有値解析		常時微動測定		固有値解析	
	振動特性	リサージュ	振動特性	リサージュ	振動特性	リサージュ	振動特性	リサージュ
mode 1	0.21 sec		0.95 sec		0.24 sec		0.87 sec	
	4.71 Hz		1.05 Hz		4.19 Hz		1.15 Hz	
mode 2	0.18 sec		1.64 sec		0.21 sec		1.5 sec	
	5.56 Hz		0.61 Hz		4.83 Hz		0.67 Hz	

*1 東洋大学理工学部建築学科

*2 株式会社鳥羽瀬社寺建築

*3 株式会社能勢建築構造研究所

*4

*5 東洋大学大学院理工学研究科建築・都市デザイン専攻 博士課程

*6 東洋大学理工学部建築学科教授 博士(工学)

*1 Under Graduate School, Department of Architecture, Toyo University

*2 Tobase shrines and temples architecture Co.

*3 Nose Structural Engineering Inc.

*4

*5 Doctoral Student, Dept. of Arch. and Urban Design, Toyo University

*6 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr.Eng.

複層斜交重ね板壁の設計法に関する研究

(その6) 適応事例：小学校木造校舎の耐震補強シミュレーション

正会員 ○高岩 裕也*1
 同上 櫻井 暢二*2
 同上 稲岡 信義*3
 同上 住 智治*4
 同上 松野 浩一*5

複層斜交重ね板壁 木造建築物 構造耐力壁
 耐震診断 耐震補強設計

1. 研究の背景と目的

1. 研究目的

その6では、その5で実施した常時微動測定結果および解析結果を踏まえて、その1からその4で示した複層斜交重ね板構法を適応した際の耐震補強シミュレーションを行う。ここで、その5の構造調査で明らかとなった結果において特に注目すべきは、梁間方向の固有振動モードが各梁間フレームにおいて独立した挙動（以下、平面蛇行モードと記す。）を示したという点である。これは、1次固有振動モードが卓越することを適応範囲としている限界耐力計算等、従来の設計法への適応といった観点における一つの課題である。そして、平面蛇行モードは、同時期に建設された中規模・大規模木造建築物にも確認¹⁾されており、その挙動メカニズムを把握することは、それらの耐震診断・耐震補強設計を行う際の喫緊の課題である。

そこで複層斜交重ね板構法による耐震補強に伴う対象建物の構造特性の変化について確認し、設計法への適応について明らかにする。ここで、梁間方向でその結果が顕著に表れたため、本報では梁間方向を対象とする。

2. 複層斜交重ね板構法の適用方法

2.1 鉛直構面の補強

鉛直構面の耐震補強に適用した複層斜交重ね板壁の仕様を表1に、復元力特性を図1にそれぞれ示す。その5で示した固有振動モードで振幅が大きくなるフレームに複層斜交重ね板壁を適宜配置した。

表1 複層斜交重ね板壁 鉛直構面仕様表

No.	壁高さ	枠幅	壁長さ	壁板のビス止め	壁板厚さ[mm]		
	[mm]	[mm]	[mm]		斜	横	斜
6	3,000	120	1,820	中・外板	30	30	30

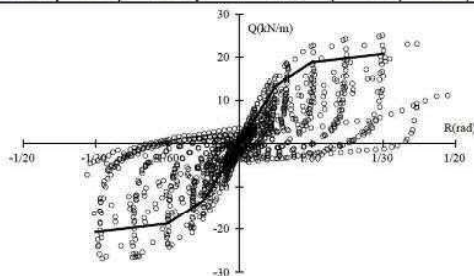


図1 複層斜交重ね板壁の復元力特性

2.2 水平構面の補強

水平構面の耐震補強に適用した複層斜交重ね板構法の床仕様を表2に、復元力特性を図2にそれぞれ示す。ここで、水平構面に適応するに伴い、床構面を構築するために軸組内で偏心して3層板が配置される仕様となっているが、その1で示した構法的特徴は踏襲している。

表2 複層斜交重ね板壁 水平構面仕様表

名称	壁高さ	壁長さ	壁板のビス止め	壁板厚さ[mm]			床倍率
	[mm]	[mm]		斜	横	斜	
E-PFTT-02	2,890	910	中・外板	30	30	30	3.0

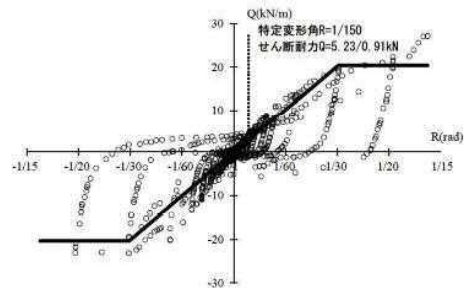


図2 複層斜交重ね板構法を用いた床の復元力特性

3. 耐震補強前後の構造特性比較

耐震補強前後の構造特性の比較は、Model.1 耐震補強前モデル（耐震診断）、Model.2 耐震補強シミュレーションモデルを用いて行う。ここで、水平構面の補強効果について確認するため、水平構面をパラメータとした固有値解析を行った。水平構面の剛性は、床倍率 α （1.0倍で特定変形角1/150rad時に1.96kN/mとなる剛性）を0.5~3.0倍まで0.5刻みで変動させた。それぞれ評価するパラメータは、剛性率、偏心率、固有振動特性値とし、Model.1からの変動率を評価した。その結果を表3に示す。

表3 偏心率・剛性率・固有振動特性値の変動率

棟	層	偏心率	剛性率	振動数	周期
I棟	2FL	0.50	0.93	1.17	0.86
	1FL	0.25			
II棟	2FL	0.83	1.09	1.51	0.66
	1FL	0.73			

また、表3に採用した固有振動数帯における固有振動モードを図3から図5にそれぞれ示す。図3に示す平面蛇行モードが顕著な耐震補強前に対して、耐震補強シミュレーションでは図5に示すように並進モードが卓越していることを確認した。

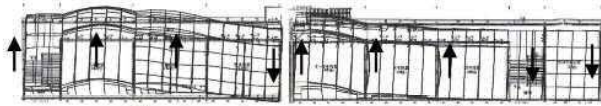


図3 Model.1 固有振動モード $\alpha=0.5$ (I)

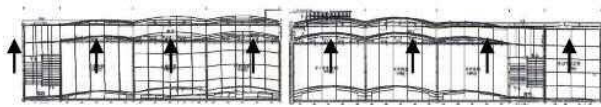


図4 Model.2 固有振動モード $\alpha=0.5$ (II)

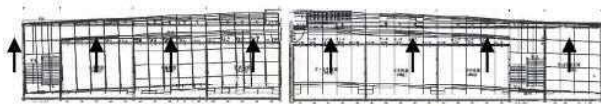


図5 Model.2 固有振動モード $\alpha=3.0$ (III)

ここで、比較的梁間フレームが桁行方向に多く連続しており、平面蛇行モードが顕著なII棟におけるMPMの変動を図6に示す。MPMは、モードの有効質量比であり、モード寄与率を示している。比較を行うために床倍率 α における $MPM_{(\alpha=x)}$ を床倍率 $\alpha=0.5$ における $MPM_{(\alpha=0.5)}$ で基準化した。Model.1のMPM並進成分は $\alpha=0.5$ から1.0に変動させた際が最も増加し、回転成分は $\alpha=1.5$ から2.0に変動させた際が最も減少した。また、Model.2のMPM並進成分は $\alpha=0.5$ から1.0に変動させた際が最も増加し、回転成分はModel.1と同様に $\alpha=1.0$ から1.5に変動させた際が最も減少した。同様の傾向として、平面蛇行モードは、床倍率 α を増加させていくにつれて並進モードが卓越する結果となったものの、MPMの並進成分の変動傾向が、各モデルにおいて異なる結果となった。これは、鉛直構面の補強に応じた水平構面の補強程度の設定が必要であることを示しており、複層斜交重ね板構法の仕様をチューニングすることで構造性能にバリエーションを設けることができるシステムが適しているといえる。

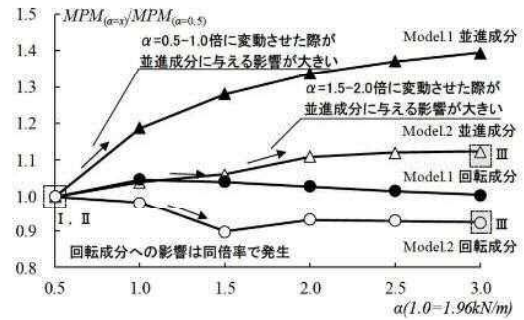


図6 MPM- α 関係

4. 結論

本報は、複層斜交重ね板構法による耐震補強に伴う対象建物の構造特性の変化について確認し、設計法への適応について明らかにした。得られた結果は以下の通りである。

- (1) 平面蛇行モードが顕著な耐震補強前に対して、常時微動測定を実施し、固有振動モードで振幅が大きくなるフレームに複層斜交重ね板壁を配置することで、耐震補強シミュレーションでは並進モードが卓越することを確認した。
- (2) 水平構面の剛性をパラメータとした数値解析により、MPMの変動傾向が、鉛直構面の補強前後で異なる結果となった。これは、鉛直構面の補強に応じた水平構面の補強程度の設定が必要であることを示している。
- (3) 限界耐力計算の適応範囲としてI次並進モードの卓越が挙げられるが、耐震補強前においては適応条件外の構造特性であったが、複層斜交重ね板構法を用いた耐震補強シミュレーションでは前述した条件を満たす結果となった。

複層斜交重ね板構法は、小幅板のビス留め仕様、小幅板厚、壁枠幅を調整することによって、構造性能にもバリエーションを設けることができる。そのため、鉛直構面・水平構面の必要補強量に応じた仕様を選択することによって建築規模、軸組部材の断面寸法に応じた設計が可能であることを示した。

今後は、その3で構築した実験結果を追跡する復元力モデルを用いた振動解析を行い、限界耐力計算によって求めた応答値との対応を確認することで、必要補強量の算定を行う予定である。

参考文献

- 1) 高岩 裕也, 松野 浩一, 他2名: 近代中規模木造建築物の振動特性と水平剛性の相関性に関する研究, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.61B, pp.229-236, 2015.3

*1 東洋大学大学院理工学研究科建築・都市デザイン専攻 博士課程
*2 株式会社能勢建築構造研究所
*3 株式会社鳥羽瀬社寺建築
*4
*5 東洋大学理工学部建築学科教授 博士(工学)

*1 Doctoral Student, Dept. of Arch. and Urban Design, Toyo University
*2 Nose Structural Engineering Inc.
*3 Tobase shrines and temples architecture Co.
*4
*5 Professor, Department of Architecture, Toyo University. Dr.Eng.