

論文 木質壁(LVL)を用いた RC 骨組の耐震補強工法に関する実験的研究

福原 武史^{*1}・栗原 嵩明^{*2}・石川 裕次^{*3}・宇佐美 徹^{*4}

要旨：木質系材料である構造用 LVL (Laminated Veneer Lumber, 単板積層材) を、エポキシ樹脂系接着剤を用いて RC 骨組の構面内に接着接合して耐震壁とする工法の耐震補強効果を検証した。まず、LVL の面内せん断試験及び LVL の接着せん断試験を実施し、コンクリートの接着せん断強度以上を發揮することを確認した。次いで、LVL を耐震壁として用いて補強した RC 骨組の試験体の構造実験を実施し、無開口および設備開口タイプの補強効果を確認した。補強試験体はいずれも接着接合部のコンクリート側のせん断すべり破壊に至った。また無開口と設備開口タイプの耐力比は、梁下の接着接合部の面積比をやや上回る結果であった。
キーワード：RC 骨組, 耐震補強, 木質壁, LVL, 接着接合, エポキシ樹脂系接着剤

1. はじめに

近年では、環境配慮や林業再生のため、学校の木質化等による木質材料の利用の促進が望まれている。また、木質材料はコンクリートや鉄と比べて軽量であるため、揚重機などの利用や搬入動線に制約条件が多い耐震補強工事に適している。このため、木質材料を用いた耐震補強工法は、特に施工上の制約条件が多く耐震化がなされていない建物の耐震化に有効と考えられる。

一方、RC 骨組の耐震補強では比較的小さい変形レベルで補強効果を發揮する必要があるため、補強部材に木質材料を用いる場合には、以下の課題が挙げられる。

- (1)木質材料の剛性がコンクリートや鉄の剛性よりも小さく補強効率が悪い
- (2)微小変形レベルにおいて接合部分にずれが生じないように木質耐震壁と既存 RC 躯体を一体的に接合することが難しい。

このため、耐震要素(RC 壁, 鉄骨ブレース等)を RC 骨組に接合する耐震補強工法は広く用いられているものの、木質系材料の面材を用いた補強工法に関する研究例は少ない¹⁾²⁾と考えられる。

本研究では、木質材料を耐震補強に効果的に活用するために、図-1 に示すように、LVL (Laminated Veneer Lumber, 単板積層材, 図-2 参照) をエポキシ樹脂系接着剤によって LVL の板同士および RC 骨組み接着接合する耐震補強工法を提案し、検討を行った。

本論では、材料試験および要素試験結果から、本工法にて利用される構造用 LVL のせん断特性および接着せん断強度を検討した上で、構造用 LVL を RC 骨組の構面内に接着接合する耐震補強工法の補強効果を検証するため、構造実験を実施した。以下に、その結果を示す。

2. 材料試験および要素試験

2.1 LVL 板のせん断特性

LVL を面材として利用する際には、面内せん断強度およびせん断弾性係数が重要と考えられる。しかし、LVL の品質を決める日本農林規格(JAS)³⁾において、せん断弾性係数は管理項目外で既往のデータが乏しい。このため、材料試験を実施し、せん断弾性係数を確認した。また、LVL のせん断強度についても、データを収集した。

表-1 には実験に用いた LVL の特性を示す。用いた LVL の樹種はカラマツで、単板の層構成は繊維方向 4 層、繊維直交方向 2 層である。LVL のせん断試験は、図-3 に示すように合板の JAS 試験方法 (面内せん断試験)⁴⁾ を準用して実施した。試験体は 12mm の LVL に対し繊維方向の異なる試験体を (繊維方向毎の積層数が異なる異

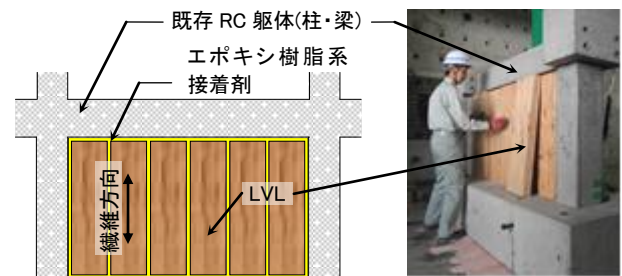


図-1 本工法の概要

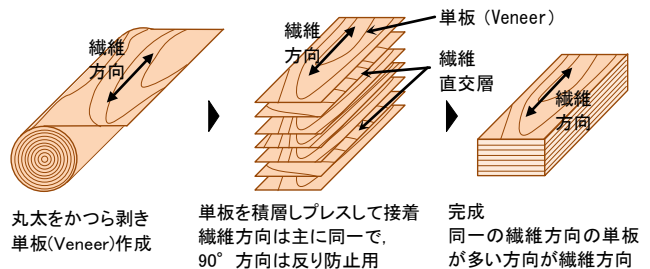


図-2 LVL (単板積層材) とは

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 構造部 RC 構造グループ 主任研究員 工博 (正会員)
 *2 (株)竹中工務店 技術研究所 構造部 架構システムグループ 研究員 工修
 *3 (株)竹中工務店 技術研究所 構造部 RC 構造グループ グループ長 博士 (工学) (正会員)
 *4 (株)竹中工務店 技術研究所 構造部 架構システムグループ グループ長 博士 (工学)

方性材料のため)、各種類3体ずつ計6体とした。なお、一般的なサイズの構造用LVLは合板よりも板厚が厚く、本試験の実施が困難であることから、ここでは実大の約1/3スケールを模した12mm厚のLVLを用いている。

表-2に試験結果を示す。また、表中には曲げヤング係数についても併せて記した。せん断弾性係数は、0.71~0.75kN/mm²であり、曲げヤング係数との比(G/E)は1/10.3~1/11.5であった。なお、せん断弾性係数の算定におけるせん断ひずみには、LVL表面中央(表裏)に貼りつけたロゼットゲージによる値を用いた。木質構造設計規準⁵⁾では、基準せん断弾性係数は基準ヤング係数の1/15と示されているが、本実験結果はこれよりも大きい結果であった。また、LVLの単板は基本的に同一繊維方向に積層(積層後の主な繊維方向を繊維方向と称す)し、直交層単板は主にその防止に用いられる異方性材料であるが、表より分かるように繊維方向による差はせん断弾性係数では11%、せん断強度では4%程度であり、せん断特性に関しては異方性が小さい結果であった。

2.2 LVL 同士の接着せん断強度

本工法では分割されたLVLをエポキシ樹脂系接着剤で接着接合して1枚の耐震壁とすることから、その接着せん断強度を把握する必要がある。しかしながら、LVL小口面のエポキシ樹脂系接着剤の接着強度はデータが少ないため、図-4に示す押し抜きせん断実験により確認した。試験体はLVLの繊維方向が異なる2種類で各3体とし、エポキシ樹脂系接着剤(引張せん断接着強さの品質規格値が10N/mm²以上)を用いて接着した。実験結果を表-3に示す。LVL同士の接着強度は、表-2に示すLVLのせん断強度以上であり、LVL同士を一体化できることが確認された。なお、LVLのせん断強度よりもLVLの接着せん断強度が大きいのは、接着剤の吸い込みにより、接着面付近のLVLが補強されたためと考えられる。

2.3 コンクリートの接着せん断強度

エポキシ樹脂系接着剤(2.2節と同じ引張せん断接着強さの品質規格値)によるコンクリートの接着せん断性能に関しては、既往の研究⁶⁾にて一面せん断試験が実施され、その接着せん断強度が報告されている。図-5にその実験結果を示す。実験では、コンクリートの凝集破壊(コンクリート側のせん断すべり破壊)により耐力が決定した。この破壊モードは、コンクリートの接着引張強度試験によるコンクリート側の引張破壊と同様な破壊モードと考えられるため、コンクリートの引張強度式に基づいた式(1)による接着せん断強度式が提案されている。

$$\tau_{ja} = 0.38\sqrt{\sigma_B} \quad (1)$$

ここで、 τ_{ja} は接着せん断強度、 σ_B はコンクリート圧縮強度

以上の試験結果より、LVLの面内せん断強度およびLVLの接着せん断強度はコンクリートの接着せん断強度以上を発揮することが確認された。

表-1 試験体に用いたLVLの特性(JAS区分)

曲げヤング係数区分*/等級*	90E/特級
水平せん断強度区分*	55V-47H

*12mm厚試験体は規格外(特注品)のため、相当値扱い

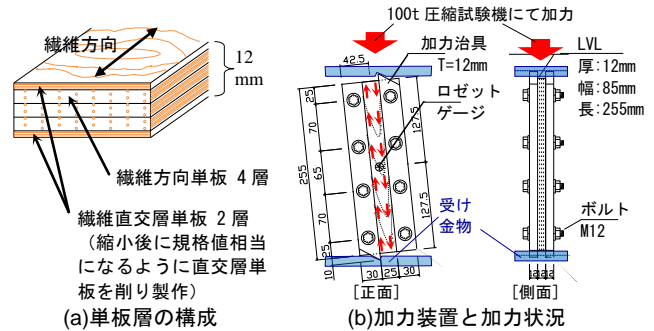


図-3 LVLの面内せん断試験

表-2 LVL(12mm)面内せん断試験結果

加力方向	τ_l		G_l		E_l	G_l/E_l
	実験	平均	実験	平均		
繊維方向 に対して 0°	6.6	5.6	0.73	0.75	10.3	1/ 10.3
	5.8		0.75			
	4.3		0.78			
繊維方向 に対して 90°	5.3	5.2	0.71	0.72		1/ 11.5
	5.5		0.73			
	4.9		0.73			

τ_l : 面内せん断強度(N/mm²), G_l : 面内せん断弾性係数(kN/mm²)
 E_l : 曲げヤング係数(kN/mm²) *ゲージ断線により未計測

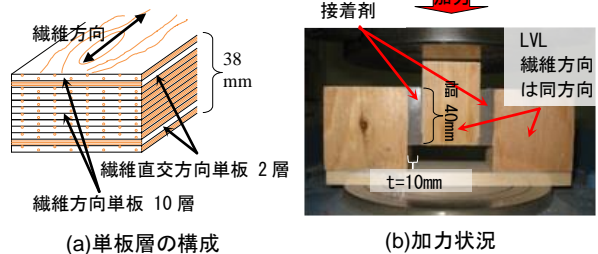


図-4 LVLとLVLの接着せん断試験

表-3 LVLの接着せん断試験結果

繊維方向 (接着面に対して)	接着面 厚さ×幅 (mm)	接着せん断 強度* (N/mm ²)	破壊 状況
0°	38×40	8.7	LVL母材破壊
90°		7.7	接着剤凝集破壊

*3体の平均値とした

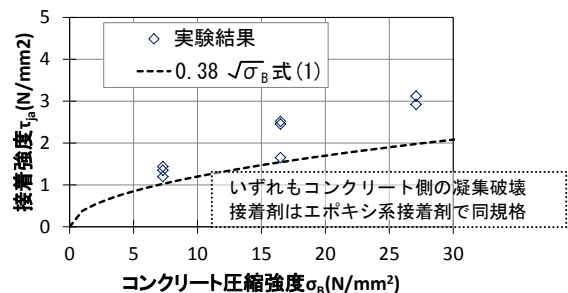


図-5 コンクリートの接着せん断試験結果⁶⁾

3. 構造実験

3.1 試験体

図-6 に試験体の形状および断面詳細を、表-4 に試験体一覧を示す。試験体は計3体で、いずれの試験体も約1/3縮小モデルとした。試験体 No.1 は無補強の基準試験体とした。試験体 No.2 は RC 柱梁骨組に LVL を取り付けて補強するタイプで、基本的な補強効果を確認する。LVL は試験体と同様の縮尺を意図し、厚みを1/3縮小の12mm (実大38mmを想定。3枚重ねて実大38mm相当を

計画。LVL 製作上の制約により実大より薄い、その差は5.2%である。)とし、厚み方向に3枚重ねとした。なお、厚み方向に並べた LVL 同士は接着せず、四周の木口面のみを接着し、接着層の厚さは5mmとした。試験体 No.3 は試験体 No.2 に設備開口を意図した小さい開口を設けた。なお、試験体 No.3 に用いた LVL の板厚は実大スケールの38mmとし、厚み方向に LVL を重ねていない。

試験体に用いた鋼材の機械的性質は表-5 に示すとおりである。接着接合に使用したエポキシ樹脂系接着剤は2.2節と同製品を用いた。補強に用いた LVL のうち、12mm の LVL は2.1節と同じものである。また、38mm の LVL は、面内方向の性能について表-1 と同等であることを確認して用いた。

3.2 加力方法

図-7 に加力装置図、図-8 に加力サイクルを示す。加力は、一定軸力下における水平力の正負繰り

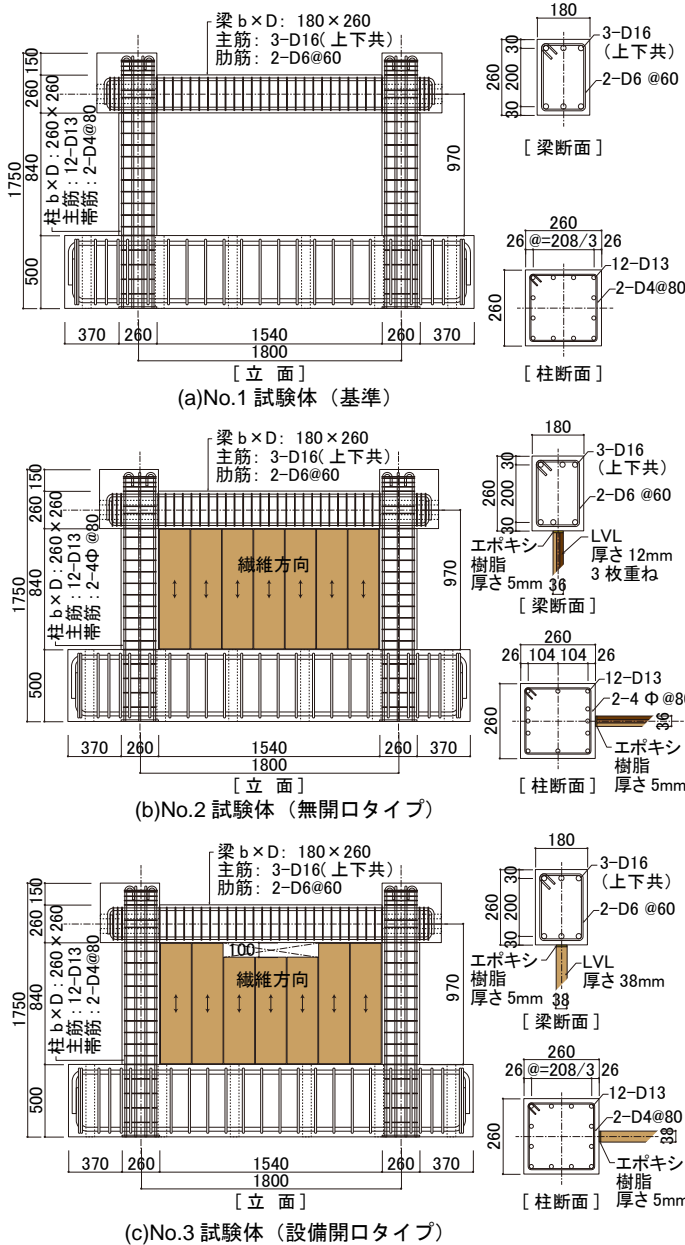


図-6 試験体の形状および断面詳細

表-4 試験体一覧

試験体	特徴	軸力比 $n=N/Bc \cdot Dc \cdot \sigma_B$	コンクリート	LVL	
			σ_B (N/mm ²)	分割	規格
No.1	基準 (無補強)	0.20	21.8	-	-
No.2	無開口		24.4	3層-7分割	90E-55V-47H
No.3	設備開口		23.3	1層-7分割	90E-55V-47H

N: 圧縮軸力(柱1本当たり), Bc・Dc: 柱断面積, σ_B : コンクリート圧縮強度

表-5 鋼材の機械的性質

種類	部位	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
$\phi 4$ *1	帯筋	522	592
D4 *2		361	536
D6-1 *1	あばら筋	433	546
D6-2 *2		376	545
D13	柱主筋	351	489
D16	梁主筋	357	532

*1: 試験体 No.2 に使用 *2: 試験体 No.1,3 に使用

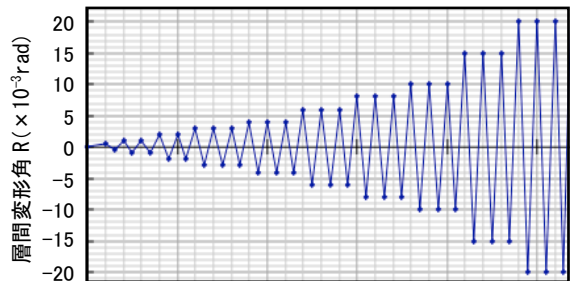


図-7 加力プログラム

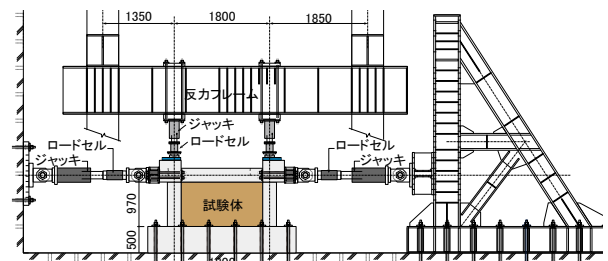


図-8 加力装置

返し載荷とし、層間変形角 R による変位制御とした。

3.3 実験結果

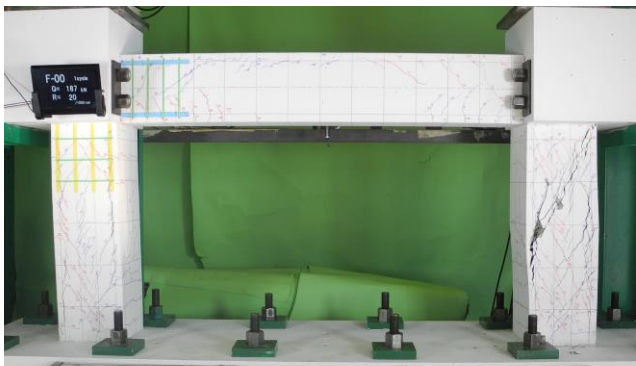
3.3.1 破壊状況

写真-1 には試験体の最終破壊状況を、図-9 には荷重-変形関係を示す。RC 柱梁の破壊状況は No.1~3 の試験体いずれも類似しており、層間変形角 $R = 1.0 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で RC 柱の柱頭・柱脚および RC 梁に曲げひび割れが生じ、最終的には $R = 15 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に柱に顕著なせん断ひび割れが生じた後に耐力が低下した。また、いずれの試験体も柱主筋に沿った付着ひび割れも確認されており、No.2 試験体については特に顕著に確認された。なお、RC 部分に関しては補強の有無にかかわらず損傷状況は類似していたことから、補強後の RC 骨組も補強前

の独立した柱に近い挙動を示していたと考えられる。

補強部分に関しては、No.2 および No.3 試験体いずれも $R = 2.5 \times 10^{-3} \text{rad}$ より柱および梁に LVL の接着接合面に沿ったコンクリートにひび割れが発生し、 $R = 4.0 \sim 6.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ で梁下接着接合面のひび割れが正負貫通した。その後、梁下の接着接合面のせん断すべりが目視でも観察され、最終的に $R = 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ で LVL は柱に押されて圧縮破壊が観察された。なお、試験体 No.3 (設備開口) の開口隅部には、 $R = 3.0 \sim 4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時に局所応力により LVL 接着部に沿って若干のひび割れが発生したが、その後 $R = 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ までほとんど進行しなかった。

写真-2 には、加力終了後に試験体 No.2 (無開口) の隅部の LVL を切り出した、RC 骨組と LVL の接合面を併



(a)No1 基準 (補強無し)

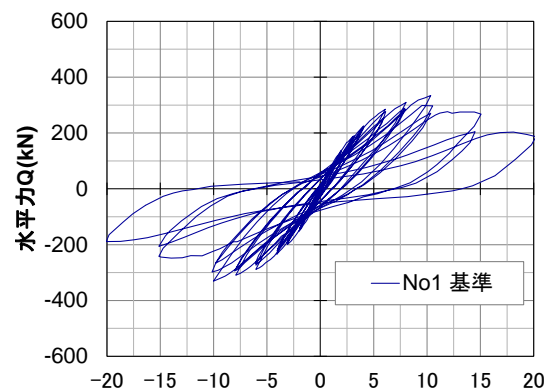


(b)No2 無開口

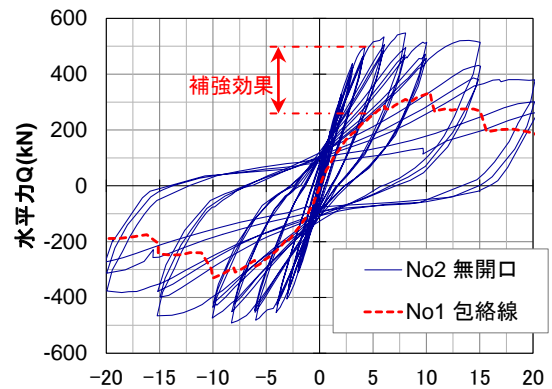


(c)No3 設備開口

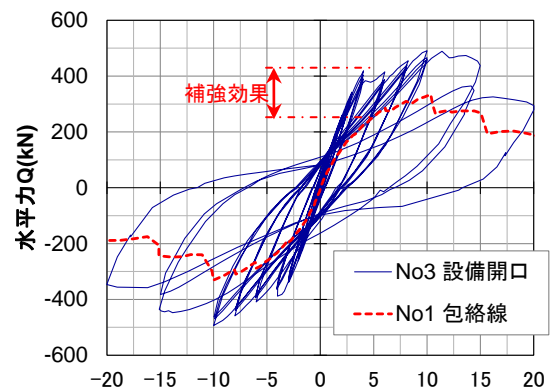
写真-1 試験体破壊状況 ($R = 20 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時)



層間変形角 $R(\times 10^{-3} \text{rad})$



層間変形角 $R(\times 10^{-3} \text{rad})$



層間変形角 $R(\times 10^{-3} \text{rad})$

図-9 荷重-変形関係

せて示す。この接合面を確認したところ、梁側、柱側いずれもエポキシ樹脂系接着剤と LVL の間の接着は健全であり、コンクリートの凝集破壊であった。また、この破壊面のコンクリート表面には凹凸が生じており、梁下側ではこの凹凸が削られた跡が観察されたことから、接着接合面のひび割れ発生後は特に梁下において凹凸によるシアーキーの効果やせん断摩擦によりせん断応力が伝達されていたと考えられる。

3.3.2 補強効果の検討

図-10 には、基準試験体 No.1 の実験結果との耐力の差分より得られた補強効果をせん断応力度で示す。なお、試験体 No.3 は高さ位置で LVL のせん断断面積が異なるが、ここでは高さ中央位置におけるせん断断面積で除した。また、壁部材はせん断変形が卓越するため、2.1 節の材料試験結果で得られたせん断応力度-せん断歪関係のうち、せん断歪を層間変形角と読み替えたものを図中に併せて示した。図より、いずれの試験体も材料試験よりも高い剛性が確認され、 $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時のせん断強度は材料試験結果に比べて試験体 No.2 で 1.6 倍、試験体 No.3 で 1.1 倍発揮している。これは、LVL が RC 骨組の変形を拘束している効果と考えられる。また、最大強度は LVL の材料試験結果よりも低いことに加え、3.3.1 項での試験体状況と併せて考えると、補強効果は 2 章で想定した通り、LVL のせん断強度ではなく、コンクリート側の接着接合部のせん断破壊で決定したと考えられる。なお、試験体 No.3 の $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ 時のせん断強度は試験体 No.2 の 0.69 倍であり、接着面積の比率の 0.57 に近く、補強効果は梁下の接着面積に比例する結果であった。

3.3.3 接合部すべり量

図-11 には、層間変形角と梁下の接着接合面のすべり量の関係を示す。図より、 $R=4.0 \times 10^{-3} \text{rad}$ まではほとんどずれが生じておらず、RC 架構と LVL は一体的に挙動している。その後は、正加力時（接合面に引張力がかかると考えられる方向）ではすべりが生じており、接着接合部がすべり始めたと考えられる。ただし、図-10 から分かるように、その後も補強効果がある程度確認されているが、これは接着接合部のコンクリートの骨材のかみ合わせ（シアーキー）の効果や、LVL が柱梁枠により抑えられるせん断摩擦に応力伝達メカニズムが徐々に移行したためと考えられる。

3.3.4 薄板を用いた場合の面外変形

図-12 に LVL の中央で計測した面外変位を示す。面外変位を計測点までの高さで除すと、最大の層間変形角 $R=20 \times 10^{-3} \text{rad}$ でも 0.18% と小さく、幅厚比（内法高さ h_0 /LVL 厚さ t ）70 の厚みであっても明確な座屈現象は確認されなかった。

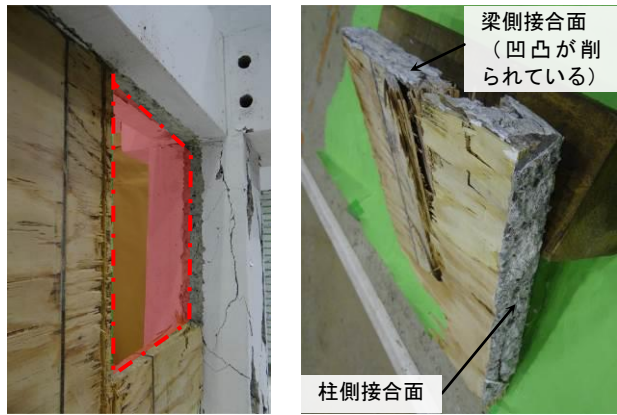


写真-2 接着接合面の状況

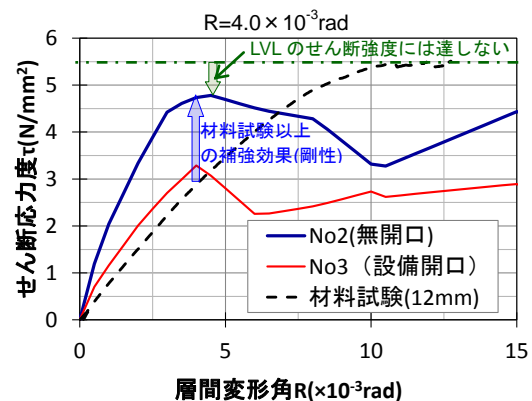


図-10 差分より得られた補強効果

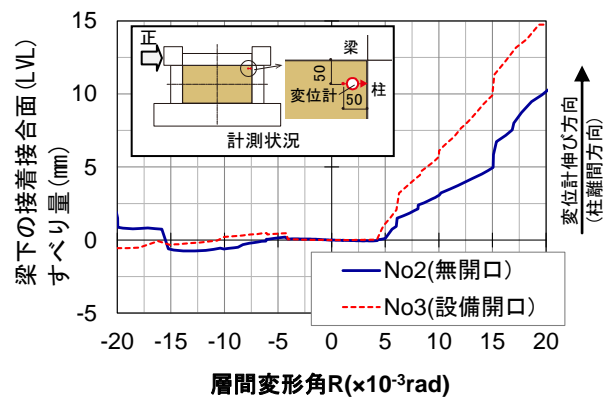


図-11 梁下の接着接合面すべり量

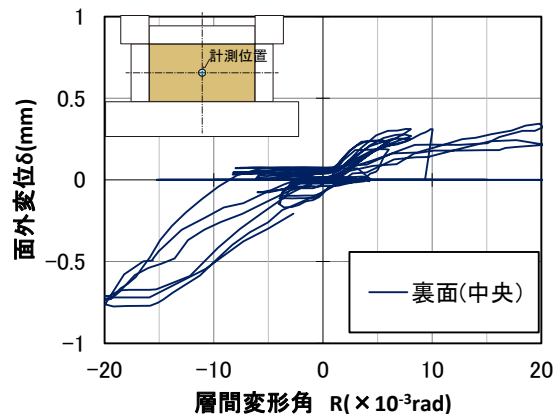


図-12 LVL の面外変形(No.2 試験体, 12mmLVL)

3.3.5 等価粘性減衰定数

図-13には、各試験体の2サイクル目の等価粘性減衰定数を示す。図よりわかるように、LVLで補強された試験体 No2 および No3 はいずれも RC 骨組試験体 No1 と同等の履歴減衰性能を有することが確認できる。

3.4 補強後の耐力の評価

表-4 に部材耐力の計算結果を、表-5 に架構全体の計算耐力および実験結果を示す。なお、補強設計において、RC 耐震壁の耐力を累加する際の一般的な変形レベルである $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad (靱性指標 $F=1.0$ 相当) 時の耐力を実験結果として示した。

$$Q_{cal} = 2 \cdot Q_{cu} + Q_{ja} \quad (2)$$

ここで、 Q_{cu} は柱曲げ耐力時せん断力 Q_{cmu} 、柱せん断耐力 Q_{csu} および柱付着耐力時のせん断力 Q'_{csu} のうち最も小さい値で、本試験体はいずれも Q_{csu} で決定する。 Q_{ja} は式(1)に接着接合部 (梁下) の接着面積を乗じて得た。なお、No3 試験体については、接着されていない箇所を接着面積から除いて算定し、表-6 および表-7 中の()内に無開口とした場合の計算値を参考値として示した。

表より分かるように、いずれの試験体も計算結果は実験値を安全側に評価できることが確認された。また、設備開口のある試験体 No3 は、接着面積欠損分を考慮して耐力を計算することで、無開口の補強と同程度の安全率で評価可能であった。

4. まとめ

構造用 LVL を RC 骨組の構面内に接着接合する耐震補強工法の補強効果を検証するため、材料試験、要素試験および構造実験を実施し、以下のことが明らかになった。

- (1) LVL 同士の接着せん断強度、LVL のせん断強度、接着接合部のコンクリートかぶり部分の接着せん断強度の順に、本補強の接合部強度が高い。
- (2) 本補強では、材料試験で得られた LVL のせん断弾性係数より期待される以上の剛性の向上が確認された。
- (3) 既往の評価式⁶⁾を用いることで、LVL 補強試験体の耐力はいずれも安全側に評価される。
- (4) 本実験程度の LVL 厚みであれば面外座屈などの薄板による構造性能への影響は小さい結果であった。
- (5) 設備開口がある試験体の補強耐力は無開口の試験体の補強耐力と比較して補強効果は低いが、耐力比は概ね梁下の接着接合部の面積比をやや上回っていた。

参考文献

- 1) 澤木理恵ほか：LVL 耐震補強壁のせん断実験，日本建築学会大会梗概集，C-2，pp.681-682，2002年8月
- 2) 栗原嵩明，福原武史，須賀順子，大野正人，楠寿博，石川裕次：構造用 LVL を耐震壁として用いた RC 架

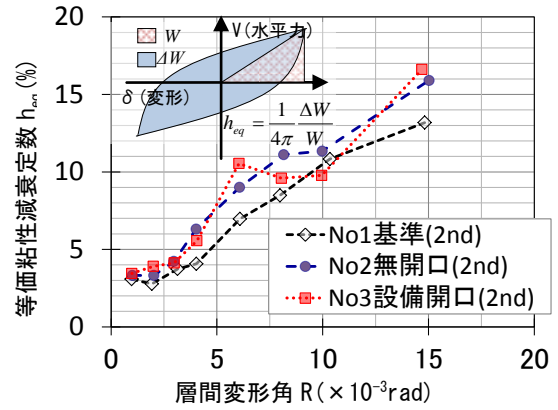


図-13 等価粘性減衰定数 (2 サイクル目)

表-6 部材および接着接合部の計算耐力

試験体	$2 \cdot Q_{cmu}$ (kN)	$2 \cdot Q_{csu}$ (kN)	$2 \cdot Q'_{csu}$ (kN)	Q_{ja} (kN)
No.1	326	208	272	-
No.2	388	237	259	104
No.3	336	215	283	61.3(107)

Q_{cmu} : 柱終局曲げ耐力⁷⁾時の柱せん断力

Q_{csu} , Q'_{csu} : 柱終局せん断耐力⁷⁾および付着せん断耐力⁸⁾

Q_{ja} : 接着せん断耐力⁶⁾

表-7 実験結果と計算耐力との比較

試験体	Q_{exp_R4}	Q_{cal}	Q_{exp}/Q_{cal}
No.1	230	208	1.11
No.2	476	341	1.40
No.3	403	276(322)	1.46(1.25)

Q_{exp_R4} : 架構全体の実験耐力 ($R=4.0 \times 10^{-3}$ rad 時)，正負平均

Q_{cal} : 架構全体の計算耐力

- 構の耐震補強の構造性能に関する研究 その1～2，日本建築学会大会梗概集，pp.155-158，2014年
- 3) 日本農林規格協会：単板積層材の日本農林規格，2013年
 - 4) 日本農林規格協会：合板の日本農林規格，2008年
 - 5) 日本建築学会：木質構造設計規準・同解説，2006年
 - 6) 宮内靖昌，福原武史，毛井崇博：低強度コンクリート RC 部材の耐震補強性能に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1015-1020，2009年7月
 - 7) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準同解説，2001
 - 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999

「謝辞」

本研究の一部は林野庁助成事業 (平成 25 年度補正 林野庁委託事業 CLT 等新製品・新技術利用促進事業) の一環として実施されたものです。京都大学生存圏研究所の五十田博教授をはじめ、関係者各位に厚く御礼申し上げます。

また、試験体の製作にあたってはコニシ (株)，およびボンドエンジニアリング (株) よりご協力をいただきました。ここに謝意を表します。