

広島県産ヒノキ小径木間伐材を使用した外装パネルの力学的特性

松本 慎也*1, 出張 宣明*2, 白片 良明*3, 崔 軍*4

Mechanical Properties for Exterior Panel using Small-Diameter Thinnings by Japanese Cypress 'Hinoki' Product in Hiroshima Prefecture

Shinya MATSUMOTO*1, Nobuaki DEHARI*2, Yoshiaki SHIRAKATA*3 and Jun CUI*4

Japanese cypress 'Hinoki' is the East Asia-specific softwood, in terms of durability and aroma, which is one of the excellent forest resources in our country. In the future, in order to make effective use of the domestic forest resources, it is necessary to review the production process of a variety of forest resources. Above all, effective use of thinned wood is an important assignment. In particular, in the *Chugoku* region (Hiroshima, Yamaguchi, Okayama, Shimane, and Tottori Prefecture) enhance the commercial value of thinnings of small-diameter trees, it is important that appropriate thinning to be able to implement. In this study, we consider the mechanical properties of the new residential building materials for regional identity creation by processing the small-diameter cypress trees to assembly wall (panel) that is the unused resources of mountainous areas.

Keywords: Japanese Cypress, Thinning, Exterior wood panel, Regional identity creation

1. はじめに

ヒノキは日本と台湾に分布する東アジア特有の針葉樹であり、耐久性や香りなどの点で、我が国における優れた森林資源の一つである。今後、国内の森林資源を有効に活用していくためには、様々な森林資源の生産プロセスを見直す必要があり、その中でも間伐材の有効利用は重要な課題である。特に中国地方では小径木の間伐材の商品価値を高め、適切な間伐が実施できるようにすることが重要視されている。本研究では、地方創生に向けて、中山間地の未利用な資源であるヒノキ小径木の間伐材を集成壁体（パネル）に加工して、住宅用建材として活用するための基礎的な材料の力学的特性について検討する。

屋外環境での建築材料としての耐候性を検討する目的で、90mm×90mmのヒノキの角材による集成壁体により、壁、床、天井のすべての外装面を構成した図1～図3に示すような、長さ6m、幅2.4m、高さ2.4mの直方体のログハウス試験体を建設した。

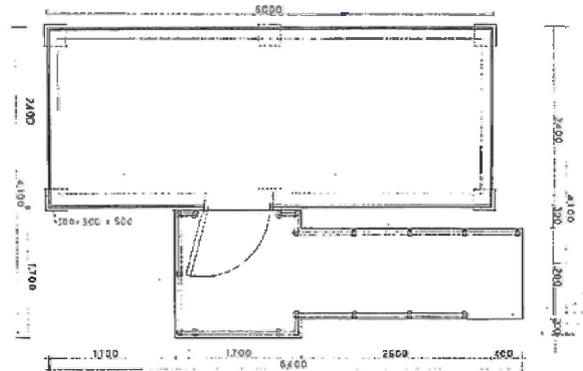


図1. ログハウス試験体・平面図

原稿受付 2016年5月7日

- *1 近畿大学工学部 建築学科 准教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)
E-mail matsumoto@hiro.kindai.ac.jp
 - *2 広島県林産資源共同組合 理事長 (〒723-0044 広島県三原市宗郷町 1-5-22)
 - *3 広島県林産資源共同組合 事務長 (〒723-0044 広島県三原市宗郷町 1-5-22)
E-mail step2789wgn@yahoo.co.jp
 - *4 近畿大学工学部 建築学科 教授 (〒739-2116 東広島市高屋うめの辺 1 番)
E-mail sai@hiro.kindai.ac.jp
- 連絡先: 松本慎也 (研究代表者)

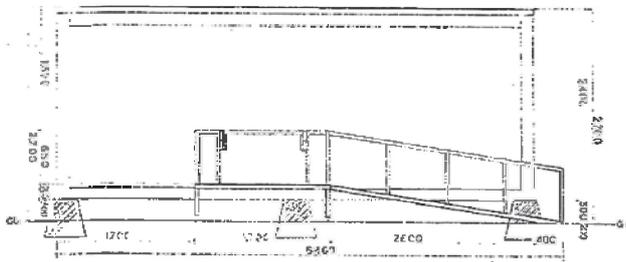


図 2. ログハウス試験体・立面図（長辺）



写真 2. パネル接着時の養生

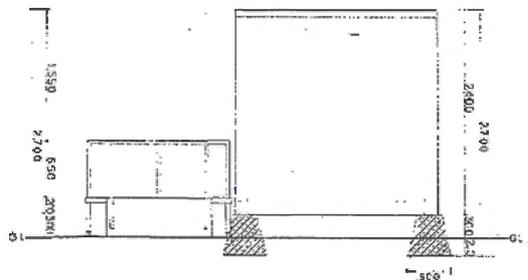


図 3. ログハウス試験体・立面図（短辺）

2. 木材接着剤

本研究では、ヒノキ角材によるパネルを作成するために、2液型の水性高分子イソシアネート系木材接着剤を用いた。作業は接着剤メーカーの製造作業マニュアルに従い、写真 1 に示すような専用圧縮装置を作成し、写真 2 に示すようなビニールシートによる養生室内において、圧縮圧力、養生温度、養生時間を確保し、接着作業を行った。接着剤の詳細な施工条件は表 1 に示す通りである。



写真 1. パネル接着面の圧縮作業

表 1. 接着剤の施工条件

種別	水性高分子イソシアネート系木材接着剤
メーカー	光洋産業株式会社
商品	KR ボンド
主剤	KR-134 (外観：白色粘稠液)
架橋剤	AX-200 (外観：暗褐色液)
配合比	主剤 (KR-134) 100 部、架橋剤 (AX-200) 15 部 (計量は重量比)
配合量/方法	約 30 分で使い切るようにハンドミキサー等により主剤及び架橋剤が充分混合するまで攪拌する
接着強さ保持時間	25℃以下の場合 60 分以内 / 25℃以上の場合 40 分以内
塗布量	接着層あたりの塗布量は 230~280g/m ² (均等に塗布する)
堆積時間	開放堆積時間は、直接外気に触れ乾燥接着の原因になるので、できるだけ短期間、温度に関係なく 1 分以内とする。閉鎖堆積時間 (塗布量 250g/m ² 時) は 10℃の場合 15 分 / 20℃の場合 10 分 / 30℃の場合 7 分 / 40℃の場合 4 分
被着材の品質	節、割れ、油汚染、樹脂部分等については、構造用集成材の製造基準に基づいて被着材を調整する。(水性高分子イソシアネート系木材接着剤は水性のため樹脂部分ではじかれることがある)
圧縮時間	1.2~1.5MPa 40 分以上
養生時間	25℃ 3 日以上 (ただし、切削加工は解圧後、24 時間経過して行う)

3. ログハウス試験体の搬入作業及び設置状況

ログハウス試験体はトラック 1 台とラフテレーンクレーン 1 台によって、計画敷地に設置した。試験体の総重量はクレーン吊上げ時に概算計測値で 4.5 トンであった。試験体の設置作業の状況を写真 3 から写真 8 に示す。作業時の天候は雨であったが、作業開始 1 時間程度で設置

作業を終了した（表 2 参照）。設置完了直後の室内の状況を写真 9 に示す。

表 2. 設置状況

設置日(天候)	2016年3月9日 (天候:雨)
設置所用重機	トラック(平ボディタイプ) 1台 ラフテレーンクレーン 1台
試験体総重量	4.5トン(吊上げ時概算計測値)
設置作業時間	1時間程度



写真 6. ハウス設置完了



写真 3. トラック及びクレーン設置状況



写真 7. スロープ設置状況



写真 4. トラックつり上げ状況



写真 8. 設置完了



写真 5. 基礎設置状況

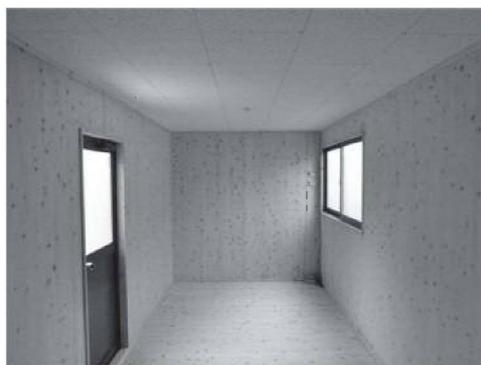


写真 9. 室内の状況

4. 使用木材の材料特性

4.1 ヤング係数の出現率

使用した木材は広島県産のヒノキの90mm角材である。乾燥方法は高温蒸気乾燥（高温蒸気乾燥：120℃高温セット後、65℃乾燥）による人工乾燥であり、これらの特性値を表3にまとめる。このヒノキ材に対して木材メーカーが所有しているヤング係数の出現率（2015年7月から12月における6337本）を図4に示す。6337本の木材におけるヤング係数の平均値は117.55t/cm²(1.15×10⁴N/mm²)であり、E110-120ランクが最も多く存在することがわかる。

表3. 木材の材料特性

産地	広島県（北広島）
樹種	ヒノキ
寸法	90mm 角材
乾燥方法	人工乾燥（高温蒸気乾燥：120℃高温セット後、65℃乾燥）

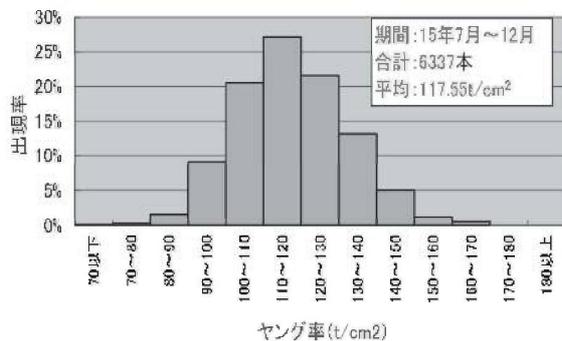


図4. 木材のヤング係数の出現率

4.2 木材の含水率計測



写真10. 木材水分計による含水率計測

試験体の用いた木材の中から、任意に抽出した1本のヒノキ角材・試験体(90mm×90mm×400mm)の中央部における含水率を計測した（計測日：2016年2月12日，計測場所：近畿大学工学部実験室内）。電気式水分計による表面の含水率は6.0%であり，高周波式水分計による内部の含水率は14.0%であり（写真10参照），十分な乾燥状態であることが確認された。

4.3 木材の強度特性

試験は日本工業規格における木材の試験方法(JIS Z 2101)に準拠して，木材の縦圧縮試験を行った。このとき，一般に試験体はできるだけ正確な板目または柁目とすることが望ましいとされるが，小径木間伐材から複数の試験片を取り，試験を実施するために，1辺の長さ(a)を30mmとした正方形の断面とし，繊維に沿った長さは1辺の長さ(a)の3倍とした直方体(30mm×30mm×90mm)の四方柁の無欠点材（節，割れ，腐れ，その他の欠点がない材）の試験体を12個作成し，圧縮試験を行った。試験体の写真を写真11に示す。加力試験に先立ち，各試験体の寸法（試験体中央部の代表寸法）質量および平均年輪幅を計測した。



写真11. 縦圧縮試験体（12体）



写真12. 圧縮試験装置

圧縮試験は近畿大学工学部構造実験棟における1000kN 万能試験機（計測レンジ100kN 設定）を用いて2016年3月12日（室内気温13.5℃，湿度38.0%）に実施した（写真12参照）。試験体1,2,3には，四側面にひずみゲージ（ゲージ長10mm）を貼り，試験体の縦圧縮ひずみ度を計測することで，圧縮荷重に対する応力度－ひずみ度の関係を求めた。それらの結果を図5～図7に示す。このとき，最大応力度 σ_{max} に対して， $0.4\sigma_{max}$ と $0.1\sigma_{max}$ におけるひずみ度と応力度の勾配から縦圧縮ヤング係数を算出した。求められた縦圧縮ヤング係数を表4に示す。試験体1～3の縦圧縮ヤング係数の平均値は， $1.29 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ であった。

表4. 縦圧縮ヤング係数

試験体	縦圧縮ヤング係数 E (N/mm ²)
1	1.37×10^4
2	1.32×10^4
3	1.19×10^4
平均	1.29×10^4

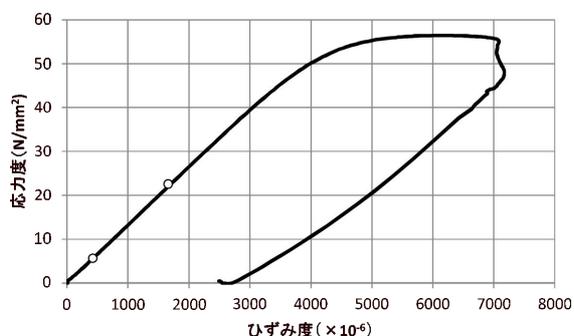


図5. 応力度－ひずみ度関係（試験体1）

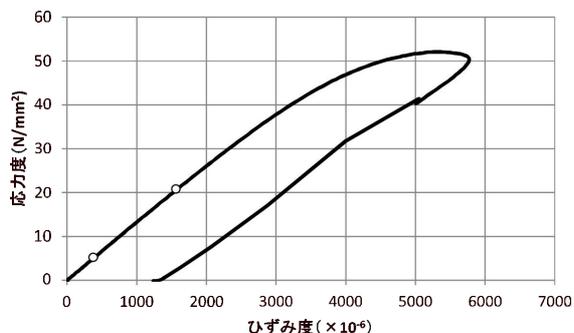


図6. 応力度－ひずみ度関係（試験体2）

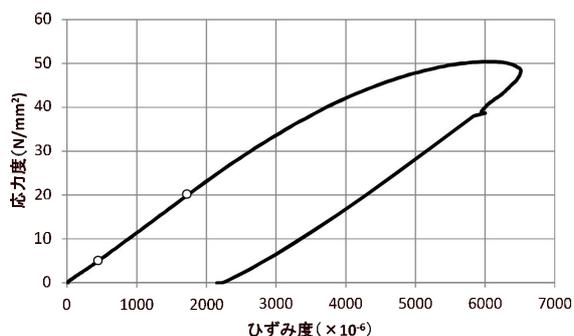


図7. 応力度－ひずみ度関係（試験体3）

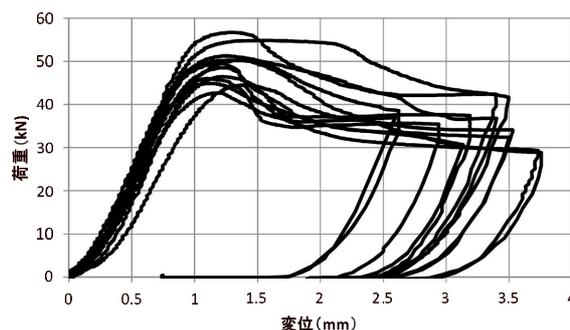


図8. 荷重－変位関係（全試験体）

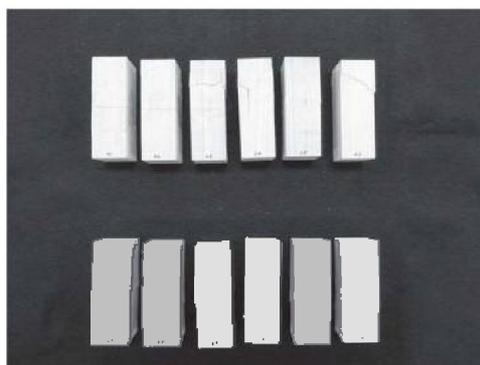


写真13. 試験体の破壊性状

全試験体の荷重－変位関係を図8に示す。また，各試験体の圧縮試験終了後の破壊性状を写真13に示す。

圧縮試験終了後に，写真14に示す電気乾燥機にて試験体を絶乾状態に達するまで105℃で72時間乾燥し，絶乾質量を計測し，加力試験実施時における試験体の含水率を次式によって求めた。表5に試験結果の一覧を示す。

$$\text{含水率 (\%)} = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100$$

ここに， W_1 ：乾燥前の質量(g)

W_2 ：絶乾質量(g)

表 5. 計測結果

番号	寸法			質量m(g)	断面積 A(mm ²)	体積 V(cm ³)	密度 (g/cm ³)	年輪幅		絶乾質量 (g)	絶乾密度 (g/cm ³)	含水率% (試験時)	圧縮強度 (N/mm ²)	
	x(mm)	y(mm)	z(mm)					計測距離 a(mm)	年輪数n					
1	29.83	29.86	89.76	39.0	890.7	79.95	0.488	37.11	17	2.2	35.1	0.439	10.0	56.4
2	29.76	29.99	89.48	39.1	892.5	79.86	0.490	37.83	17	2.2	35.3	0.442	9.7	52.1
3	29.64	29.76	89.69	34.6	882.1	79.11	0.437	31.72	12	2.6	31.7	0.401	8.4	50.4
4	29.72	29.76	89.10	33.6	884.5	78.81	0.426	28.09	14	2.0	30.6	0.388	8.9	50.8
5	30.38	30.42	89.80	37.5	924.2	82.99	0.452	35.68	9	4.0	34.8	0.419	7.2	59.3
6	29.67	29.85	89.74	38.0	885.6	79.48	0.478	37.56	16	2.3	34.6	0.435	8.9	55.9
7	29.72	29.71	89.62	38.1	883.0	79.13	0.481	36.51	16	2.3	34.9	0.441	8.4	58.0
8	30.25	30.26	89.26	39.5	915.4	81.71	0.483	30.07	9	3.3	36.2	0.443	8.4	61.9
9	29.69	29.70	89.64	33.5	881.8	79.04	0.424	30.03	14	2.1	30.6	0.387	8.7	48.4
10	29.70	29.69	89.58	38.2	881.8	78.99	0.484	36.45	19	1.9	34.6	0.438	9.4	55.0
11	29.75	29.58	90.49	39.8	880.0	79.63	0.500	38.09	18	2.1	36.2	0.455	9.0	52.3
12	29.73	29.70	90.09	33.9	883.0	79.55	0.489	36.90	18	2.1	35.5	0.446	8.7	56.9
平均	29.82	29.86	89.69	37.5	890.4	79.85	0.469	34.67	14.9	2.4	34.2	0.428	8.8	54.8

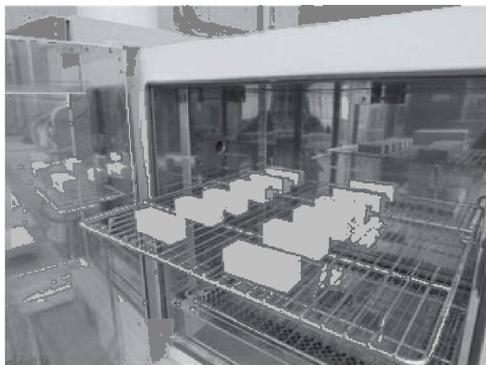


写真 14. 電気乾燥器 (105°Cで 72 時間乾燥)

図 9 に各試験体の密度 (気乾状態) の比較をグラフで示す. 図 10 に各試験体の圧縮強度の比較をグラフで示す. また, 木材の材料特性値のまとめを表 6 に示す.

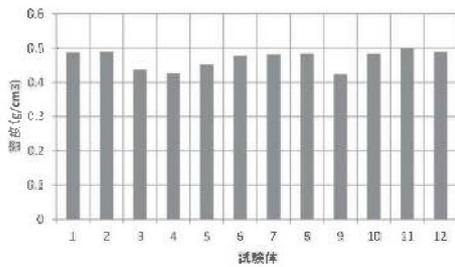


図 9. 各試験体の密度 (気乾状態) の比較

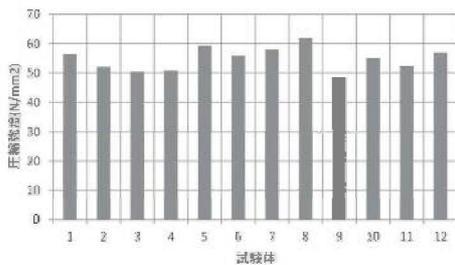


図 10. 各試験体の圧縮強度の比較

表 6. 木材の材料特性値のまとめ (試験体平均値)

樹種	ヒノキ (広島県産 : 北広島)
圧縮強度	54.8 N/mm ²
含水率 (試験時)	8.8 %
気乾密度	0.469 g/cm ³
絶乾密度	0.428 g/cm ³
平均年輪幅	2.4 mm
縦圧縮ヤング係数	1.29×10 ⁴ N/mm ² (3 試験体の平均値)

5. パネルのせん断耐力

文献(1)には, スギ CLT の曲げ及びせん断強度に関する実大実験の結果が示されている. スギ CLT とヒノキパネルの基礎的な力学特性を比較検討するために, 図 11 に示すようなヒノキパネルのせん断試験を行った.

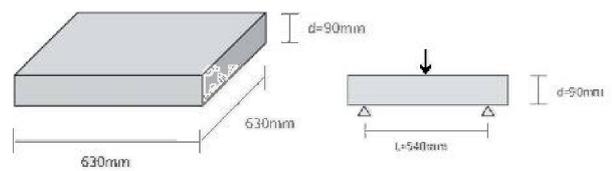


図 11. ヒノキパネルのせん断試験体

試験体は強軸試験体と弱軸試験体を各 2 体ずつとした計 4 体のせん断試験を実施した. このときの各試験体の質量及び 5 か所の計測点 (図 12 参照) で計測した含水率とその平均値を表 7 に示す. また, 各試験体のせん断試験風景を写真 15~写真 18 に示す.

表 7. 試験体一覧

試験体	種別	質量(kg)	含水率(%)					
			計測点1	計測点2	計測点3	計測点4	計測点5	平均
1	強軸	18.38	14.5	17.5	13.5	19.0	16.0	16.1
2	強軸	18.46	15.5	15.5	14.0	19.0	16.0	16.0
3	弱軸	18.42	15.5	15.0	15.0	16.0	16.5	15.6
4	弱軸	18.52	18.0	17.5	17.5	16.5	16.0	17.1

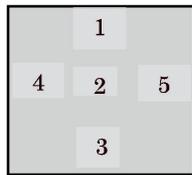


図 12. 含水率の計測点



写真 15. ヒノキパネルのせん断試験 (試験体 1)



写真 16. ヒノキパネルのせん断試験 (試験体 2)



写真 17. ヒノキパネルのせん断試験 (試験体 3)



写真 18. ヒノキパネルのせん断試験 (試験体 4)

図 13 に試験体 1, 2 (強軸) の荷重-変位関係を, 図 14 に試験体 3, 4 (弱軸) の荷重-変位関係を示す.

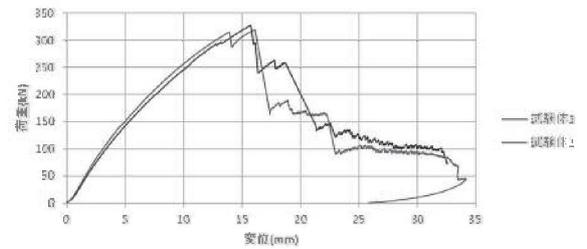


図 13. 荷重-変位関係

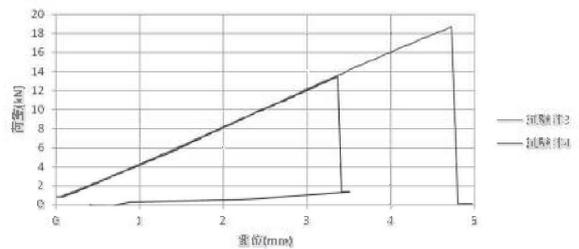


図 14. 荷重-変位関係

ヒノキパネルのせん断試験の結果一覧を表 8 に示す. また, 各試験体の終局状況を写真 19~写真 22 に示す.

表 8. ヒノキパネルのせん断試験の結果一覧

試験体	種別	最大荷重 (kN)	せん断強さ (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)
1	強軸	327.6	4.33	52.0
2	強軸	318.8	4.22	50.6
3	弱軸	13.5	0.18	2.14
4	弱軸	18.7	0.25	2.97

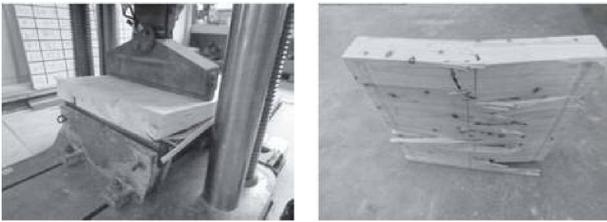


写真 19. 試験体 1 の終局状況

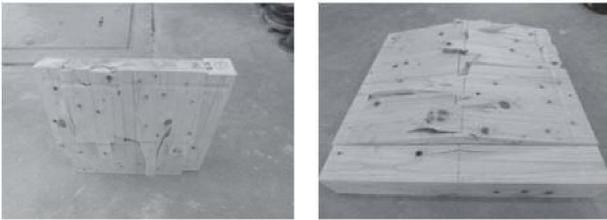


写真 20. 試験体 2 の終局状況

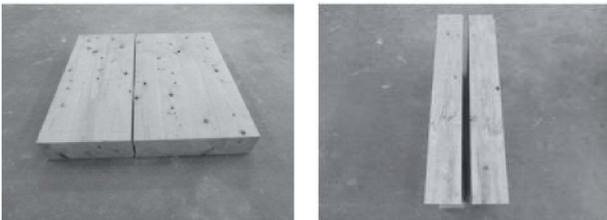


写真 21. 試験体 3 の終局状況

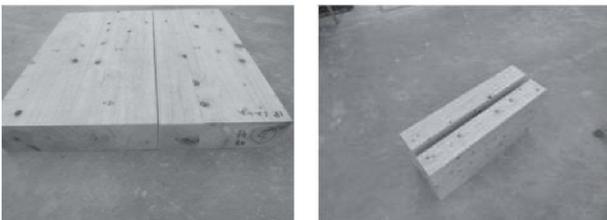


写真 22. 試験体 4 の終局状況

今回せん断試験を行った試験体のサイズに比較的近い試験結果として、文献(1)には5層5プライのスギCLT(支点長750mm, 厚さ150mm, 幅600mm)のせん断強さ(6試験体平均値)が2.43N/mm²であることが示されている。これに対し、ヒノキパネルの強軸試験体のせん断強さは4.22~4.33 N/mm², 弱軸試験体のせん断強さは0.18~0.25 N/mm²であった。これらの結果より、ヒノキパネルは強軸と弱軸の強度特性に大きな差があることが示され、強軸のせん断強さはスギCLTの約1.7倍であるが、弱軸のせん断強さは1/14倍程度であることが確認された。

6. まとめ

広島県産の小径木ヒノキ間伐材を用いて、非ホルムア

ルデヒド系接着剤による木質外装パネルを製造し、建設地まで輸送が可能なプレキャスト居住空間を構築することができた。建物としての環境評価を行った期間は限られていたが、実際の屋外環境に対する施工上の技術的な課題を明らかにすることができた。以下に今後の検討課題を示す。

- 降雨に対する長期防水性能の検証
- 屋根構造における、より適切な雨仕舞の再検討および仕上げ技術の確立
- 節、割れ、腐れ等の木材の欠点が接着剤の防水性能および耐久性能に及ぼす影響の把握(死節の補修方法)
- 火災時を想定した外装木質パネルとしての耐熱性能の把握(防火構造、準耐火構造等の検討)
- 木材の乾燥収縮に伴う干割れや材料の経年劣化の影響調査
- 長期間載荷状態を対象とした木材のクリープ変形特性の把握
- 森林資源の有効活用のための材料生産コストおよびハウス建設コストの検討と品質レベルの検討
- 鉄骨フレームの構造的な見直しによる鋼材の軽量化

中山間地域における未利用なヒノキ小径木間伐材の有効利用のため、木質外装パネル材料として活用の可能性について検討した。ヒノキは日本と台湾にのみ分布する針葉樹であり、耐久性や香りなどの点で我が国における優れた森林資源の一つと言える。今後、国内の森林資源を有効に活用していくためには、様々な森林資源の生産プロセスを見直す必要がある。中でも間伐材の有効利用は重要な課題である。特に中国地方では小径木の間伐材の商品価値を高め適切な間伐が実施できるようにすることが重要である。

謝辞

本研究は、三原市の地方創生事業である6次産業化みはらの森づくり事業(ヒノキ小径木間伐材を活用したエコハウス及び関連商品の開発)を進めている広島県林産資源協同組合の受託研究として実施したものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- (1) 林知行, 佐々木貴信, “スギCLT(直交集成板)の実大試験 曲げ及びせん断強度に及ぼす試験体幅の寸法効果”, 秋田県立大学ウェブジャーナル, Vol. 2, (2015), pp.138-143.