

木質系材料を用いた新工法の構造特性に関する研究

福留重人^{*}, 山角達也^{*}, 日高富男^{*}, 岡野 健^{**}, 中井 孝^{**}, 趙 川^{**}, 吉原秀臣^{***}, 櫻井秀文^{***}, 森 良弘^{***}

Study on Structural Characteristics of New Construction Method Using Wood-based Materials

Shigeto FUKUDOME, Tatsuya YAMAZUMI, Tomio HIDAKA, Takeshi OKANO, Takashi NAKAI,
Zhao CHUAN, Hideomi YOSHIHARA, Hidefumi SAKURAI and Yoshihiro MORI

木造建築物の低コスト化及び効率的生産・施工を図るために、接合部に木ダボ及び接着剤を用いた接合法を開発した。また、製材時に発生するスギ端材を原材料に用いて、床、屋根ならびに壁を対象としたパネル形状の構造用部材を開発した。これらの成果を活用した新工法の普及を図り、構造安全性を確保するために、スギ集成材を木ダボ及びエポキシ樹脂接着剤により接合した構造体の各種強度試験を実施した。その結果、新工法による木造建築物の構造設計に用いる諸データが明らかになった。

Keyword: スギ集成材, 木ダボ, エポキシ樹脂接着剤, 接合, 強度試験

1. 緒 言

県内には豊富なスギ資源があり蓄積量も増加しているが、輸入木材の増加や木造住宅着工戸数の減少等の影響により、その需要は低迷しており、新規市場の開拓が求められている。そのため、低コストで付加価値の高い建築部材の開発を早急に進める必要がある。そこで、鋼棒挿入接着接合法^{1)~3)}をベースにして、軸材料の断面縮小、壁・床・屋根などの構造要素（以下エレメント）の部材化、接合具として鋼棒の代わりに木ダボの採用等を試みた新工法を開発し、木造建築物の生産・施工における低コスト化及び効率化を図った⁴⁾。今後、開発した新工法を普及させるためには、建築物における安全性を確保することが重要となる。そこで、木ダボの強度試験、非破壊的手法による材質評価、床・屋根・壁エレメントの強度試験、門形フレームの構造試験等を実施して、新工法の構造性能について検証を行った^{5)~10)}。

2. 試験方法

2.1 ダボ用木材の材質試験

供試材としてイチイガシを用い、比較用としてシラカシ及びアカガシについても同様の試験を実施した。直径22~32cm、長さ2.8~4.2mの丸太6本を長さ方向に2分割した後、板材に製材して人工乾燥を行った。乾燥後、辺長32mm、長さ1~2mの角材を約250本作製し、密度、動的縦弾性係数ならびに曲げヤング係数を求めた。また、各板材から1本ずつ抽出した46本の角材について曲げ破壊試験を行

い、曲げ強さ及び曲げヤング係数を求めた。次に、繊維傾斜の引張強度に及ぼす影響を把握するために、図1に示す木取り方法で引張試験体の長軸方向とカシ板材の繊維方向が角度を有する試験体を作製して引張試験を行った。荷重方向と繊維方向が平行の場合は縦引張試験、角度をなす場合については横引張試験とし、角度ごとに30本の試験体を用いた。強度試験はJIS Z 2101「木材の試験方法」に準じて行った。

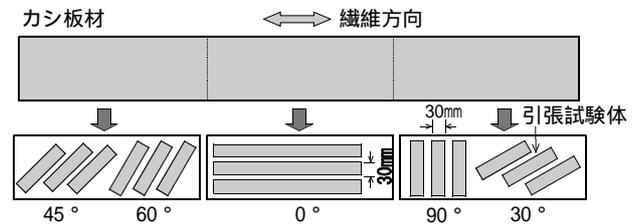


図1 引張試験体の木取り方法

2.2 木ダボ接着接合部の引抜試験

ダボ材にイチイガシ（密度 $0.76\text{g}/\text{cm}^3$ ）、母材にスギ構造用集成材(E65-F225)を用いて、エポキシ樹脂接着剤（圧縮強さ： $92.8\text{N}/\text{mm}^2$ ）により接合して試験体を作製した。実験1では、ダボの直径を30mm、埋込み長さを100mm、ダボの埋込み方向を母材の繊維方向に対して平行とし、母材の先穴径を32mm、33mm、34mmの3条件とした。実験2では、ダボの直径を30mm、母材の先穴径を34mmとし、埋込み長さを180mm、240mm、300mmの3条件で、ダボの埋込み方向を母材の繊維方向に対して平行及び直交の2条件とした。両実験とも接着剤はエポキシ樹脂接着剤を用い、接着剤注入から引抜試験までの養生期間を7日以上とした。また、試験体数は1条件当たり6体とした。引抜試験体を図2に、

* 木材工業部

** (財)日本木材総合情報センター

*** 輝北プレスウッド(株)

引抜試験方法を図3にそれぞれ示す。鋼製のジグにより母材を固定し、ダボ長軸方向に引張荷重を加えて最大荷重を測定した。

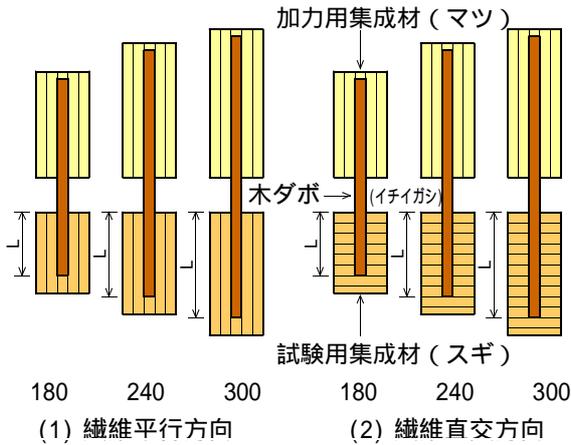


図2 木ダボ接着接合部の引抜試験体
〔数字は埋込み長さL (単位: mm)〕

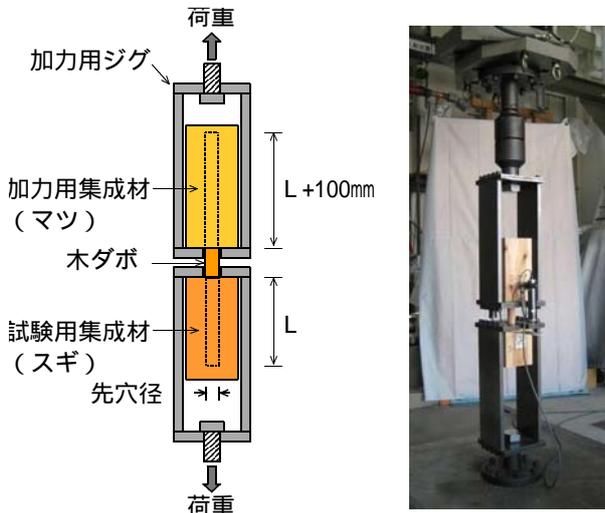


図3 木ダボ接着接合部の引抜試験方法

2.3 木ダボ接着柱梁接合部の強度試験

柱梁接合部にはダボ材としてイチイガシ (密度: 0.76g/cm³)、柱及び梁にスギ構造用集成材 (E65-F225) を用いた。ダボは各接合部に4本配置し、直径を30mm、集成材の先穴径を34mmとした。埋込み長さは、柱側を200mm、梁側を300mmとした。接着剤はエポキシ樹脂接着剤を用い、接着剤注入から強度試験までの養生期間を7日以上とした。試験体の寸法形状を図4に、柱梁都合部の木ダボ配置を図5に、試験方法を図6及び図7にそれぞれ示す。試験体数は1条件当たり3体とした。試験は正負交番繰返し加力とし、繰返し履歴は見かけの変形角が1/450, 1/300, 1/200, 1/100, 1/75, 1/50radの正負変形時において3回の繰返しで行い、1/15radに達するまで油圧ジャッキにより加力を行った。荷重及び変位の測定には、ひずみゲージ式変換器を用いた。

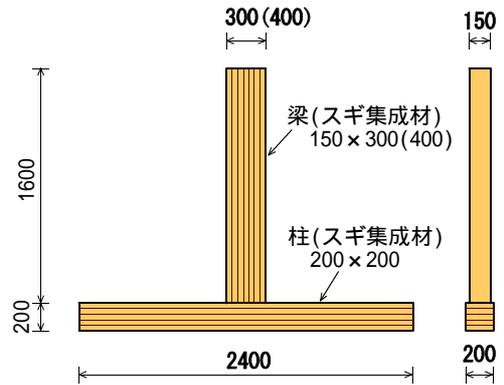


図4 柱梁接合部の強度試験体 (単位: mm)

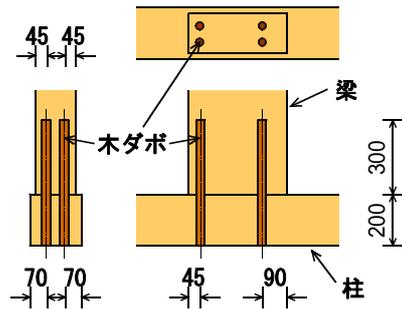


図5 接合部における木ダボの配置方法 (単位: mm)

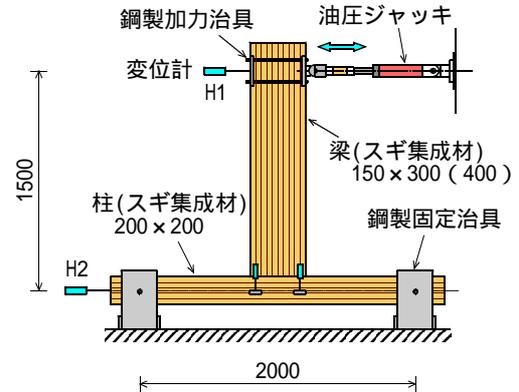


図6 柱梁接合部の強度試験方法 (単位: mm)

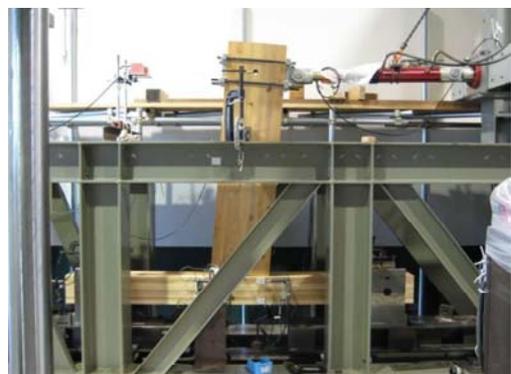


図7 柱梁接合部の強度試験状況

2.4 門形フレームの水平加力試験

スギ集成材を用いた柱及び梁を直径30mm、長さ500mmのイチイガシ製ダボ4本及びエポキシ樹脂接着剤により接合

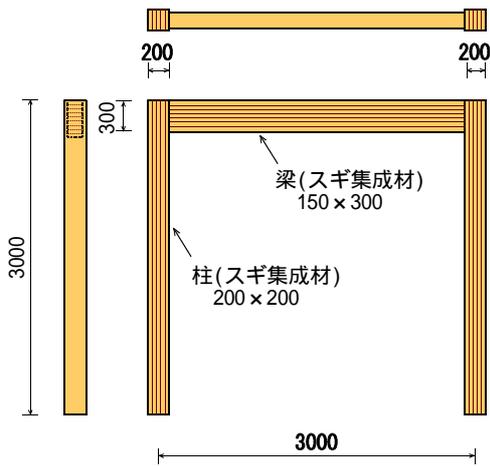
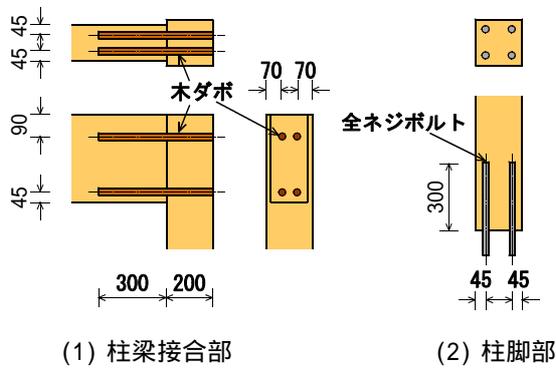


図8 門形フレーム試験体の寸法形状 (単位: mm)

した幅3 m、高さ3 mの門形フレーム試験体の水平加力試験を実施した。柱脚部には直径16mmの全ネジボルト及びエポキシ樹脂接着剤を用いた。試験体の寸法形状を図8及び図9に、試験方法を図10及び図11にそれぞれ示す。加力方法及び試験体数は2.3項と同一条件とした。

2.5 水平構面の面内せん断試験

スギ集成材を用いた梁をイチイガシ製ダボ及びエポキシ樹脂接着剤により接合した軸組に、開発した集成タイプの床・屋根エレメントを取り付けた水平構面試験体を作製した。軸組とエレメントの接合には、床構面は長さ75mm、屋根構面は100mmの木ネジを150mm間隔で使用した。試験体の寸法形状を図12に、試験方法を図13及び図14にそれぞれ示す。加力方法及び試験体数は2.3項と同一条件とした。



(1) 柱梁接合部 (2) 柱脚部
図9 接合具の配置方法 (単位: mm)

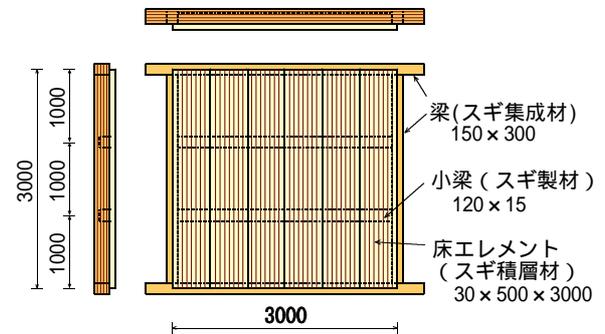


図12 水平構面試験体の寸法形状 (単位: mm)

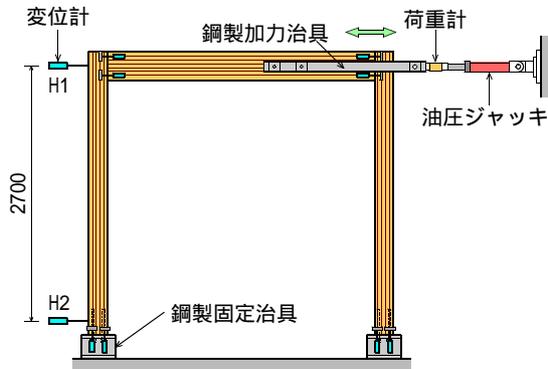


図10 門形フレームの水平加力試験方法 (単位: mm)

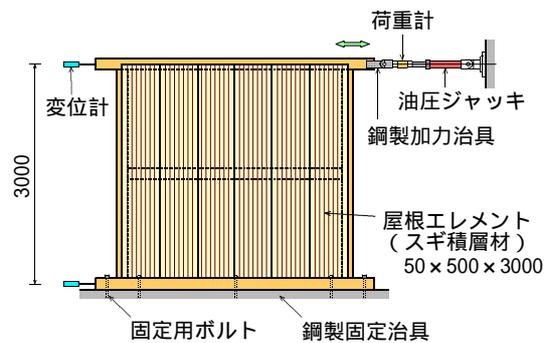


図13 水平構面の面内せん断試験方法 (単位: mm)



図11 門形フレームの水平加力試験状況



図14 水平構面の面内せん断試験状況

2.6 耐力壁の面内せん断試験

スギ集成材を用いた柱及び梁をイチイガシ製ダボ及びエポキシ樹脂接着剤により接合した軸組に、開発したラダータイプ（梯子状）の壁エレメントを取り付けた耐力壁試験体を作製した。軸組と壁エレメントの接合には、直径20mm、長さは柱側400mm、梁側300mmのイチイガシダボ及びエポキシ樹脂接着剤を用いた。試験体の寸法形状を図15に、試験方法を図16及び図17にそれぞれ示す。加力方法及び試験体数は2.3項と同一条件とした。

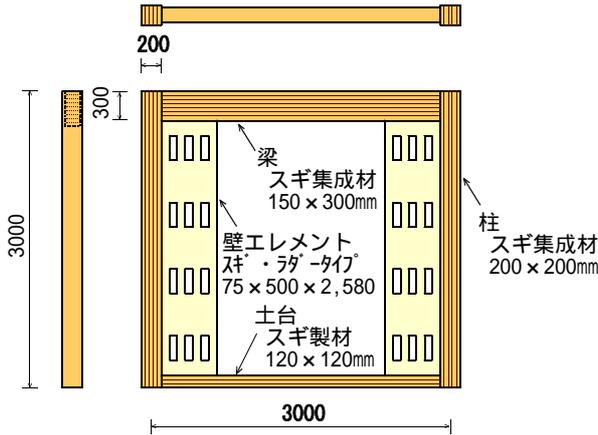


図15 耐力壁試験体の寸法形状（単位：mm）

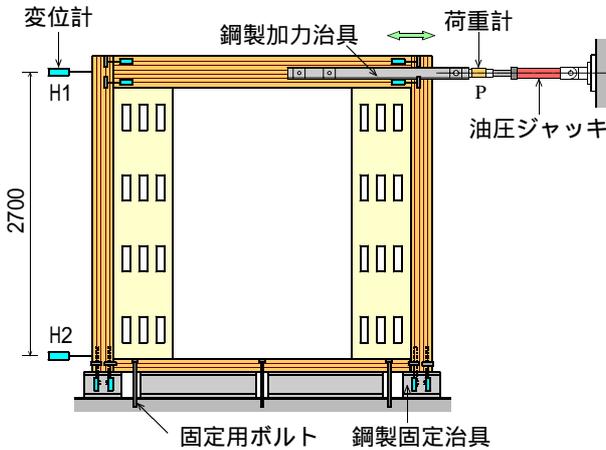


図16 耐力壁の面内せん断試験方法（単位：mm）



図17 耐力壁の面内せん断試験状況

3. 試験結果

3.1 ダボ用木材の材質

実際の製造工程におけるダボ木取り方法を想定して加工したカシ角材の材質測定結果を表1及び表2に示す。また、密度の分布を図18に、曲げヤング係数の分布を図19にそれぞれ示す。曲げ強さについては極端に低い値を示している角材が一部見られた。この原因としては、節や繊維傾斜の影響等が考えられる。このことから、非破壊的に材料選別を行う材質管理手法の重要性が示唆された。

次に、引張試験結果を表3に示す。また、引張強さと繊維傾斜の関係について図20に示す。ここで、実線は、0°及び90°における引張強さの平均値を用いてハンキンソン式により算出した計算値である。また、角度は試験体中央の平行部分における木材繊維と荷重とのなす角度である。引張強さは、15°で0°の約1/2、30°で0°の約1/5に低下しており、繊維傾斜の影響が大きいことを確認した。さらに、非破壊評価因子と強度の関係について図21～図23に示す。JIS試験法による強度試験結果と非破壊検査結果の間には、比較的高い正の相関が認められ、動的縦弾性係数及び曲げヤング係数が品質管理のパラメータとして有効であることが明らかになった。そこで、動的縦弾性係数による強度等級区分を試みたところ、表4に示す結果が得られた。

表1 カシ角材の材質測定結果(1)（平均値〔変動係数〕）

樹種	含水率 (%)	密度 (g/cm ³)	動的縦弾性係数 (kN/mm ²)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)
イチイガシ	11.1 〔0.03〕	0.76 〔0.02〕	16.33 〔0.06〕	14.84 〔0.06〕
シラカシ	10.7 〔0.02〕	0.94 〔0.06〕	19.07 〔0.10〕	16.48 〔0.10〕
アカガシ	11.0 〔0.07〕	0.94 〔0.05〕	18.70 〔0.11〕	16.43 〔0.10〕
全体	11.0 〔0.06〕	0.92 〔0.08〕	18.58 〔0.11〕	16.24 〔0.10〕

表2 カシ角材の材質測定結果(2)（平均値〔変動係数〕）

樹種	曲げ強さ (N/mm ²)	圧縮強さ (N/mm ²)	せん断強さ (N/mm ²)
イチイガシ	133.3 〔0.12〕	51.2 〔0.07〕	18.2 〔0.14〕
シラカシ	149.8 〔0.21〕	65.3 〔0.15〕	23.9 〔0.17〕
アカガシ	150.6 〔0.11〕	60.9 〔0.11〕	23.1 〔0.13〕
全体	146.1 〔0.17〕	60.0 〔0.15〕	22.1 〔0.18〕

ここで、動的縦弾性係数 15kN/mm^2 未満の試験体を除くと (E_f 15.0), 下限許容限界値は区分をしない場合 (全体) の2倍以上になり, 品質管理の有効性及びその可能性が示唆された。

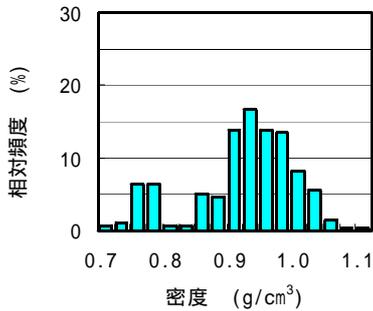


図18 密度の分布 (カシ角材)

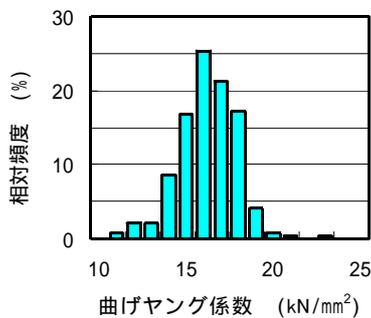


図19 曲げヤング係数の分布 (カシ角材)

表3 繊維傾斜と引張強さの関係 (イチイガシ, 平均値 [変動係数])

角度 (度)	引張強さ (N/mm ²)
0	149.3 [0.17]
30	30.4 [0.22]
45	25.2 [0.21]
60	16.7 [0.23]
90	11.0 [0.26]

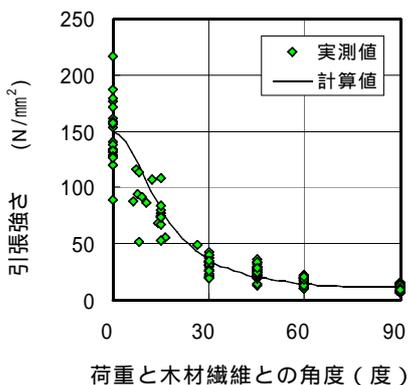


図20 繊維傾斜と引張強さの関係

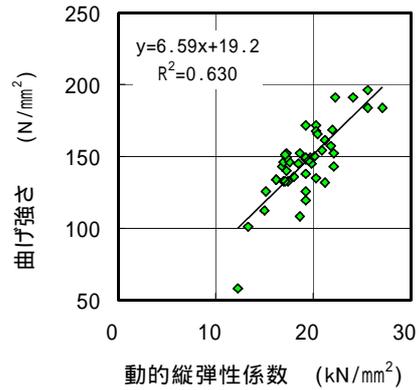


図21 非破壊パラメータと強度の関係(1)

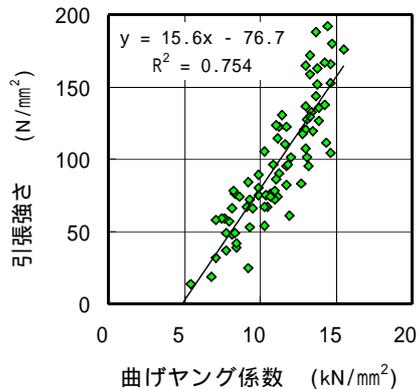


図22 非破壊パラメータと強度の関係(2)

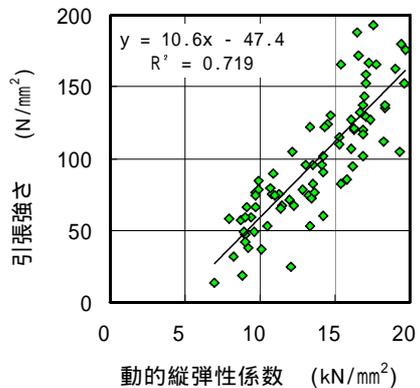


図23 非破壊パラメータと強度の関係(3)

表4 動的縦弾性係数による強度等級区分例

動的縦弾性係数 E_f 範囲 (kN/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)		比率 (%)
	平均値	下側許容限界値	
全体	97.9	20.3	100.0
E_f 12.0	110.8	37.2	76.2
E_f 15.0	120.9	47.9	56.2
E_f 17.0	128.5	52.4	36.2

3.2 木ダボ接着接合部の引抜強度

母材の先孔径と引抜最大荷重の関係を図24に示す。先孔径が大きくなると引抜最大荷重が増加する傾向が見られ、先孔径の32mmと34mmの平均値に有意差が認められた。また、破壊性状としては、母材及びダボのせん断破壊であったが、先孔径32mmの場合、接着層で剥離しているものが見られた。これらの原因としては先孔径が大きくなると、木ダボと集成材の隙間が大きくなり、接着剤が充填しやすくなることなどが考えられる。次に、木ダボの埋込み長さ

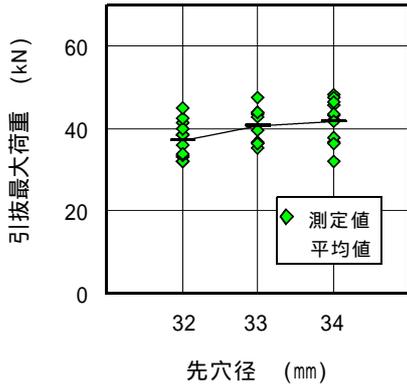


図24 母材の先孔径と引抜最大荷重の関係 (L=100mm)

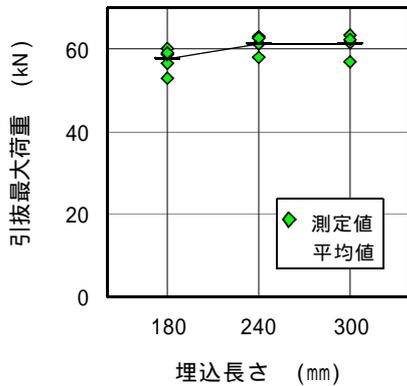


図25 木ダボの埋込み長さ

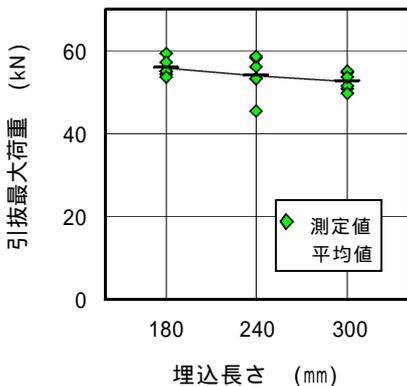


図26 木ダボの埋込み長さ

荷重の関係について、繊維平行方向を図25に、繊維直交方向を図26にそれぞれ示す。繊維平行方向にダボを埋め込んだ場合、埋込み長さ

3.3 木ダボ接着柱梁接合部のモーメント抵抗性能

T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験における荷重と見かけの変形角の関係を図27及び図28に示す。得られた荷重-変形角関係における終局側の包絡線について完全弾塑性モデルによる評価を行った。得られた各耐力値を表5～表8に示す。破壊性状としては、1/100rad以降に木ダボの引き抜け及び集成材の割裂が生じ、急激に荷重が低下した。接合に用いた木ダボは、動的縦弾性係数が15kN/mm²以上のイチイガシ材を用いたことから、比較的安定した強度性能を示したが、梁せい400mmの一部に低い値を示した試験体があった。この原因としては、木ダボに目切れを有する部分が含まれており、その影響でせん断破壊が生じたことなどが考えられる。

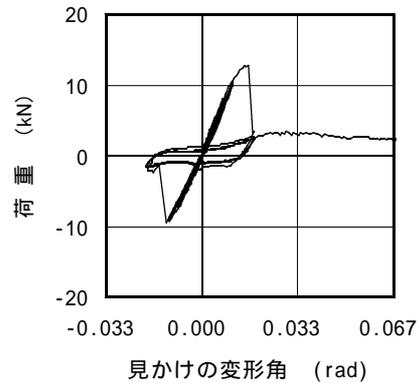


図27 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験における荷重と変形角の関係(1) (梁せい：300mm, No.2試験体)

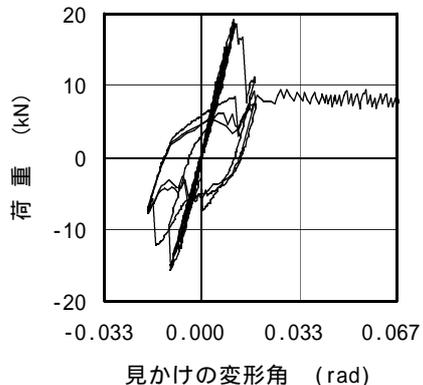


図28 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験における荷重と変形角の関係(2) (梁せい：400mm, No.2試験体)

表5 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験結果(1)
(梁せい: 300mm)

試験体	1/200rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	8.5	7.4
2	9.4	7.0
3	8.2	9.1
平均値	8.7	7.8
変動係数	0.06	0.11

表6 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験結果(2)
(梁せい: 300mm)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	12.4	13.3	0.548
2	11.6	12.7	0.587
3	11.3	11.3	0.795
平均値	11.8	12.4	0.644
変動係数	0.04	0.07	0.17

表7 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験結果(3)
(梁せい: 400mm)

試験体	1/200rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	18.3	11.2
2	18.6	10.0
3	15.7	8.9
平均値	17.5	10.0
変動係数	0.07	0.09

表8 T型柱梁接合部のモーメント抵抗試験結果(4)
(梁せい: 400mm)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	18.1	20.5	0.546
2	17.0	19.1	0.357
3	13.6	15.7	0.249
平均値	16.2	18.4	0.384
変動係数	0.12	0.11	0.32

3.4 門形フレームの水平せん断性能

スギ集成材の柱梁を木ダボ及び接着剤により接合した門形フレームの水平加力試験における荷重と見かけの変形角の関係を図29に示す。得られた荷重 - 変形角関係における終局側の包絡線について完全弾塑性モデルによる評価を行った。得られた各耐力値を表9及び表10に示す。これらの耐力値から短期基準せん断耐力を算出したところ、1/120rad時の耐力で決定し、7.1kNの数値を示した。一方、最大荷重の2/3から算出した耐力は14.3kNと短期基準せん断耐力の約2倍の数値を示しており、接合部及びフレームの剛性を高めることで、短期基準せん断耐力の向上が期待できると思われる。また、柱梁接合部の木ダボが引き抜け

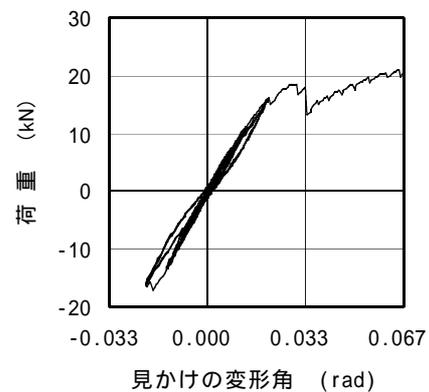


図29 門形フレームの水平加力試験における荷重と変形角の関係 (No.2試験体)

表9 門形フレームの水平加力試験結果(1)

試験体	1/120rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	8.0	9.7
2	7.4	13.5
3	6.4	9.2
平均値	7.3	10.8
変動係数	0.09	0.18

表10 門形フレームの水平加力試験結果(2)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	18.3	21.4	0.418
2	18.0	21.0	0.452
3	14.5	20.6	0.423
平均値	16.9	21.0	0.431
変動係数	0.10	0.02	0.03

て荷重が低下した後も、柱脚接合部の耐力により終局時まで荷重が上昇する変形挙動を示した。破壊性状としては木ダボの引抜及びせん断破壊、スギ集成材のせん断破壊及び割裂が見られた。

3.5 水平構面の面内せん断性能

面内せん断試験に用いたエレメントの強度性能を表11に示す。ここで、曲げヤング係数及び曲げ強さは試験体の幅寸法を用いて算出した値である。次に、エレメントを取り付けた水平構面の面内せん断試験により得られた荷重と変形角の関係を図30及び図31に示す。得られた荷重 - 変形角関係の終局側の包絡線について完全弾塑性モデルによる評価を行った。得られた各耐力値を表12～表15に示す。これらの耐力値から短期基準せん断耐力を算出したところ、

表11 エレメントの強度試験結果

用途	タイプ	厚さ (mm)	曲げヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強さ (N/mm ²)
床	集成	30	6.47	46.6
屋根	集成	50	6.12	34.4
壁	ラダー	75	4.14	18.9

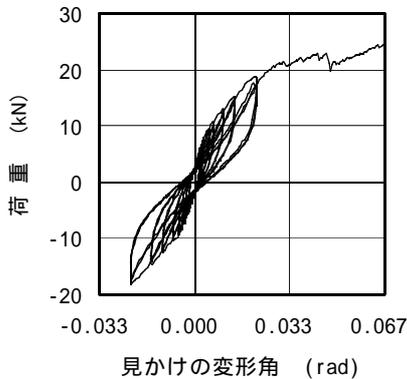


図30 床構面の面内せん断試験における荷重と変形角の関係 (No.2試験体)

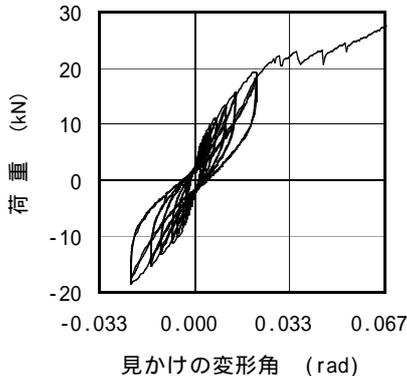


図31 屋根構面の面内せん断試験における荷重と変形角の関係 (No.2試験体)

床構面で10.8kN、屋根構面で11.0kNと同等の数値を示した。また、終局時の破壊性状としては、エレメント接合用木ネジの変形で、床・屋根エレメントの面外変形及び部材破壊は、いずれの試験体においても発生しなかった。

表12 床構面の面内せん断試験結果(1)

試験体	1/120rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	12.6	16.1
2	12.6	16.4
3	12.4	13.4
平均値	12.5	15.3
変動係数	0.01	0.09

表13 床構面の面内せん断試験結果(2)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	24.0	27.3	0.444
2	22.9	25.7	0.433
3	24.1	28.2	0.410
平均値	23.7	27.0	0.429
変動係数	0.02	0.04	0.00

表14 屋根構面の面内せん断試験結果(1)

試験体	1/120rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	13.4	17.1
2	12.4	17.9
3	12.8	16.7
平均値	12.9	17.2
変動係数	0.03	0.03

表15 屋根構面の面内せん断試験結果(2)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	23.5	27.1	0.425
2	24.7	28.5	0.453
3	24.7	27.9	0.446
平均値	24.3	27.8	0.441
変動係数	0.02	0.02	0.03

3.6 耐力壁の面内せん断性能

ラダータイプの壁エレメントを取り付けた耐力壁の面内せん断試験における荷重と変形角の関係を図32に示す。得られた荷重 - 変形角関係の終局側の包絡線について完全弾塑性モデルによる評価を行った。得られた各耐力値を表16及び表17に示す。これらの耐力値から短期基準せん断耐力を算出したところ、20.4kNと門形フレームのみの約3倍の数値を示しており、壁エレメントの効果を確認した。面内せん断試験における破壊性状としては、木ダボの引抜破時にエレメントのせん断破壊が生じて荷重が低下するが、その後、他の接合部の耐力により荷重が増加する粘り強い変形挙動が見られた。終局時付近でスギ集成材柱脚部の割裂が見られた。

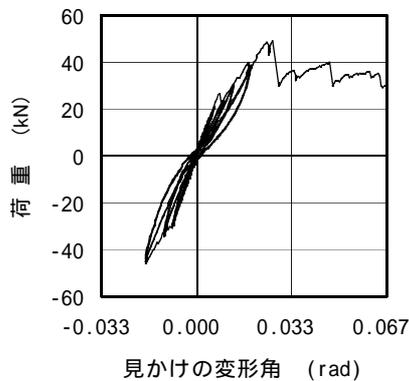


図32 耐力壁の面内せん断試験における荷重と変形角の関係 (No.2試験体)

表16 耐力壁の面内せん断試験結果(1)

試験体	1/120rad時荷重 (kN)	降伏耐力 (kN)
1	21.4	23.4
2	25.3	25.6
3	20.0	26.5
平均値	22.2	25.1
変動係数	0.10	0.05

表17 耐力壁の面内せん断試験結果(2)

試験体	終局耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	構造特性係数
1	36.7	48.9	0.353
2	36.3	48.8	0.298
3	33.6	43.5	0.350
平均値	35.6	47.1	0.334
変動係数	0.04	0.05	0.08

4. 結 言

木ダボ、接着剤ならびにスギパネルを用いた新工法によるスギ集成材構造体の強度試験を実施し、以下の成果が得られた。その結果、新工法による木造建築物の構造設計に用いる諸データが明らかになった。

- (1) ダボ用として用いるカシ材の材質を把握し、非破壊パラメータと強度の関係を明らかにすることで、品質管理手法としての有効性が示唆された。
- (2) 木ダボ接着工法による柱梁接合部及び門形フレームの短期基準せん断耐力を明らかにした。
- (3) スギパネルを取り付けた水平構面及び耐力壁の短期基準せん断耐力を明らかにし、構造部材としての性能を確認した。

本研究は農林水産省農林水産技術会議の新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「国産材活用中国向け低コスト木造住宅部材の技術開発」(中核機関：(財)日本木材総合情報センター，共同機関：輝北プレスウッド(株)，鹿児島県工業技術センター)において実施した。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会：“木質構造接合部設計マニュアル”，日本建築学会(2009) p.125-133
- 2) 小野泰，鷺海四郎，小林明，高坂清一：日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造，79-80(1992)
- 3) 鷺海四郎，小野泰，小林明，高坂清一：日本建築学会大会学術講演梗概集，C構造，81-82(1992)
- 4) (財)日本木材総合情報センター：新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業「国産材活用中国向け低コスト木造住宅部材の技術開発」成果報告書(2010)
- 5) 福留重人，山角達也，岡野健，中井孝，趙川，中村幸二郎，吉原秀臣：日本木材学会九州支部大会講演集，61-62(2008)
- 6) 福留重人，山角達也，岡野健，中井孝，趙川，櫻井秀文，吉原秀臣：日本木材学会大会研究発表要旨集，124(2009)
- 7) 福留重人，山角達也，岡野健，中井孝，趙川，櫻井秀文，吉原秀臣：日本木材加工技術協会年次大会講演要旨集，89-90(2009)
- 8) 福留重人，山角達也，岡野健，中井孝，趙川，櫻井秀文，吉原秀臣：日本木材学会九州支部大会講演集，59-60(2009)
- 9) 福留重人：Journal of Timber Engineering，23，22-27(2010)
- 10) 福留重人，山角達也，岡野健，中井孝，趙川，吉原秀臣，櫻井秀文：日本木材学会大会研究発表要旨集，127(2010)