ー研究（Original Article）ー

カラマツ 3 層パネルを用いた大壁耐力壁の開発

野田康信，戸田正彦，藤原拓哉，古田直之 [*1]，緑川倍生 [*2]

Development of sheathed shear walls with three-layer cross-laminated panel of Japanese larch

Yasunobu NODA, Masahiko TODA, Takuya FUJIWARA, Naoyuki FURUTA and Masuo MIDORIKAWA

Shear walls sheathed with 30-mm-thick three-layer cross-laminated panels of Japanese larch (*Larix kaempferi*) on the outside of the frame with the concept that the inside internal part between columns be available for free space were developed. The shear wall multiplier evaluated by racking tests of full-scale shear walls nailed with CN75 at 200 mm pitch ranged from 2.6-3.0. The influence of connecting members nailed on the outside of the frame for shear force transmission from panel to panel was the same as if nailed on the inside. The ultimate strength of panels with a tongue and groove joint was superior to that of those without the joint.

Key words: cross-laminated timber, shear multiplier, nail joint, racking test
クロスラミナパネル，壁倍率，くぎ接合部，面内せん断試験

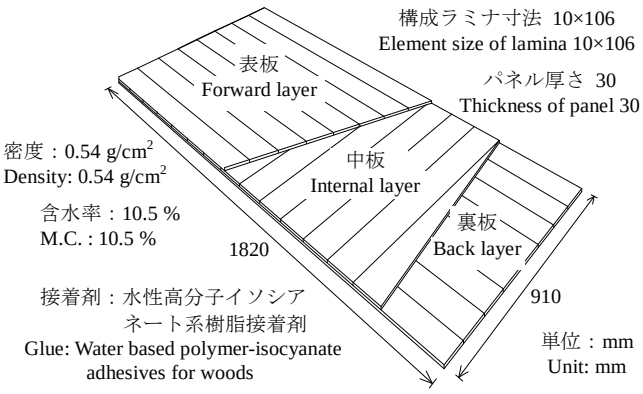
外壁柱間を居住空間の一部として活用することをコンセプトとして，屋内側の面材を省略し，柱間隔 1820 mm で間柱等をも省略した大壁の耐力壁の開発を厚さ 30 mm のカラマツ 3 層パネルを用いて行った。くぎの留めつけ間隔を 200 mm とした実大耐力壁の面内せん断試験から得られた壁倍率は 2.6 ～ 3.0 倍であった。3 層パネル間のせん断力の伝達要素となる継ぎ受材を屋外側に設けた場合においても，屋内側に設けた場合と差が無いものと考えられた。終局耐力においては，面材に実のある方が有利であった。

1. はじめに

3 層パネルは，挽き板を幅はぎして大判にした板 3 枚を重ね合わせて接着したパネルで，表裏板に対して中板を直交させることを特徴とした面材料であり，クロスラミネーティッドティンバー（CLT）[1] に類する木質材料である。小径材を有効活用できるこの 3 層パネルは，北海道においてはカラマツやトドマツの間伐材を原料に，厚さ 30 mm 前後のものが生産されているが，造作用途に限定されてきた。

24，28 mm 厚さの厚物の構造用合板が，火打梁や床根太を省略する床組仕様 [2] として普及し，さらには耐力壁用面材 [3] へと用途が拡大している昨今において，3 層パネルもまた，同様の構造用途への展開が期待される。

本研究では，**第 1 図**に示すカラマツ 3 層パネルを用いた大壁仕様の耐力壁の壁倍率の国土交通大臣認定取得を目指し，3 層パネルのくぎ一面せん断試験，3 層パネルの面内せん断試験，および実大耐力壁の



第 1 図　3 層パネルの仕様
Fig. 1. Specifications of three-layer cross-laminated panel.

面内せん断試験を実施し，さらには3層パネルの水による劣化に関する検討を行った。

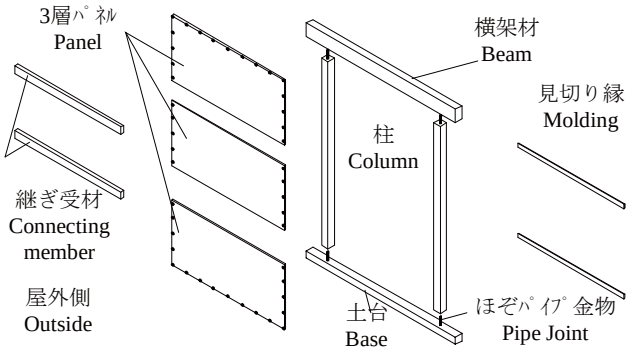
なお，本研究は平成22年度「北海道森林整備加速化・林業再生事業」（林野庁）の助成を受けて実施した。

2. 試験体および試験方法

2.1 耐力壁の基本構成

耐力壁の基本構成を**第2図**に示す。躯体の屋外側に3層パネルを横貼りで留めつけ，屋内側でパネルの表板が現しとなるものとし，屋内側の柱と横架材に囲まれた空間は居住空間の一部として活用することを想定した。柱間隔は1820 mmで，間柱や継手間柱，胴つなぎを省略した。上下3層パネル間のせん断力の伝達は胴つなぎに代わるものとして，屋外側に継ぎ受材を設けた。この継ぎ受材は断熱材を外貼とすることで，その枠材を兼ねるものとした。継ぎ受材のくぎの留めつけは屋内側からとなるため，くぎ頭を隠すための見切り縁を設けた。なお，3層パネル間のせん断力の伝達方法には，だぼや金物等を埋め込む方法が考えられるが，大臣認定においては，面材の四周を同一の接合具で留め付けることが基本であることに配慮して，くぎ接合を選択した。

柱脚金物は屋内側に金物が露出しない，柱部材内に埋め込むほぞパイプ方式のものを想定した。

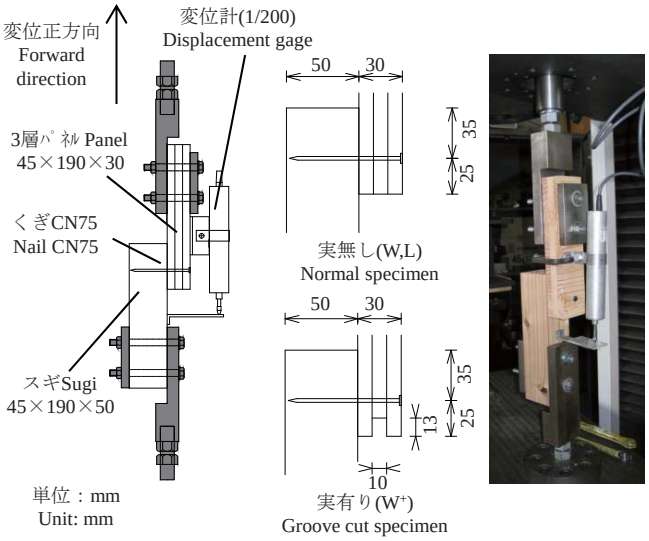


第2図　耐力壁の基本構成（手前が屋外側）
Fig. 2. Basic concept for the developed shear wall.
(Shown from the outside).

2.2.3 層パネルのくぎ一面せん断試験

耐力壁の性能を決定するくぎ1本あたりのせん断特性を把握するために，くぎ一面せん断試験を実施した。試験は3層パネルの表板繊維方向に対して直交方向（W）と平行方向（L）の2種類について実施し，直交方向については，雌実加工したもの（W^+）についても実施した。試験方法を**第3図**に示す。パネル寸法は長さ190 mm, 幅45 mmで，端距離25 mmで，太め丸くぎCN75（径3.76 mm，長さ75 mm）で主材に留め付けた。

主材はスギ（平均気乾密度0.40 g/cm^3）で，繊維方向は加力方向に一致させた。試験体数は各9体である。試験は万能試験機（TENSILON RTD2410）を用い，加力速度は2 mm/minで，加力は引張を正方向とした正負繰り返しとし，繰り返しスケジュールは± 0.5 mm → ± 1 mm → ± 2 mm → ±4 mm → +25 mmとした。繰り返し回数は各ステップ1回である。



第3図　くぎ一面せん断試験
Fig. 3. Configuration of shear test of nailed joint.

2.3.3 層パネルの面内せん断弾性係数

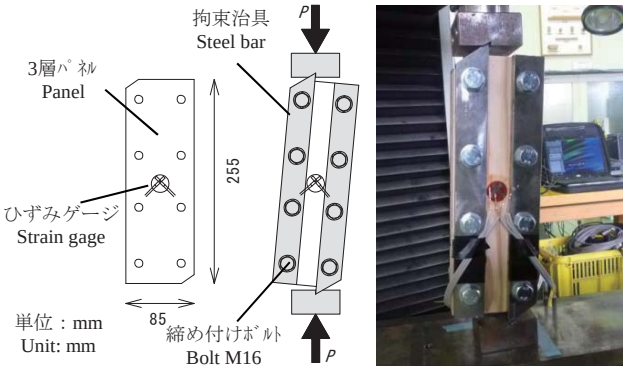
耐力壁の性能を決定する因子であるパネルの面内せん断弾性係数を把握するため，パネルの面内せん断試験を実施した。試験は合板の日本農林規格における面内せん断試験方法[4)]を採用し，3層パネルの表板繊維方向を長辺として，長さ255 mm，幅85 mmの長方形状で行った。試験体数は4体である。

試験方法および試験の模様を**第4図**に示す。試験体中央の両面において，2軸のひずみゲージを貼り付け，その荷重とひずみの関係から，(1) 式によっ

て面内せん断剛性 G を求めた。

$$G = \frac{(\Delta P / \Delta \varepsilon)}{2 \cdot t \cdot h} \qquad (1)$$

ここで，t はパネル厚さ，h はパネル長さ，ΔP は荷重たわみ曲線の直線部分における荷重の増分，$\Delta \varepsilon$ は ΔP に対応するひずみの増分である。



第 4 図　試験体および試験実施状況
Fig. 4. Configuration of shear test for panel.

2.4　実大耐力壁の面内せん断試験

実大耐力壁試験体の仕様を**第 5 図**，ならびに**第 1 表**に示す。実験では，非耐力要素である見切り縁は省略した。また，柱頭柱脚の仕様は 3 層パネルの終局破壊性状を把握することを目的として，ほぞパイプ金物よりも引抜耐力が高いホールダウン金物を用い，これを N90 くぎを 2 本打ちした短ほぞ差しによる仕口に取り付けた。

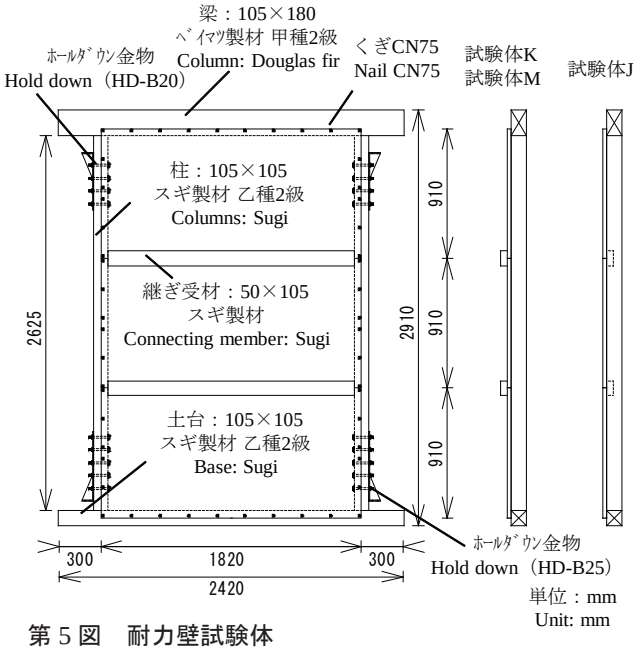
耐力壁の面内せん断試験および評価は，日本住宅・木材技術センターの定める「木造の耐力壁およびその倍率性能評価業務方法書」[5] に従い，無載荷の柱脚固定式とした。

面内せん断試験の支持・加力方法，ならびに水平・鉛直方向変位の計測位置を**第 6 図**に示す。土台材は M16 ボルトで試験装置の支持ベースに固定した。梁端部に取り付けた加力用治具で圧縮荷重を，反対側の端部に取り付けた治具に径 20 mm の鋼棒を通して引張荷重を加えた。加力は能力 200 kN の復動シリンダ（株式会社岩崎繰り返し試験機）で行い，シリンダに取り付けたロードセル（容量 200 kN）で荷重値を検出した。変位計測位置は，梁下面および土台上面における水平方向変位（δ_1 および δ_2），両側の柱材下部における鉛直方向変位（δ_3 および δ_4）の 4 点である。

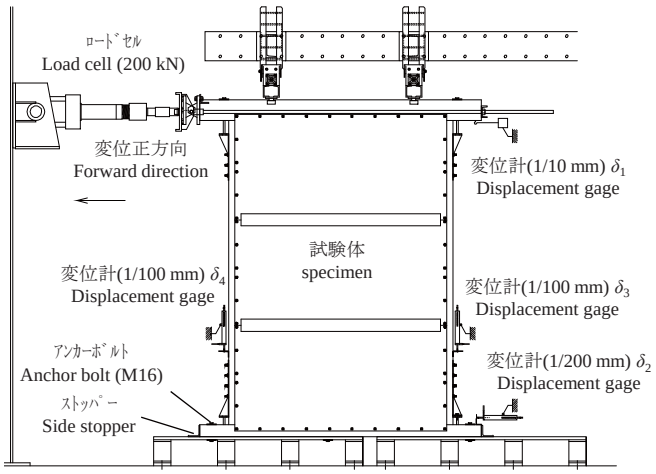
繰り返し履歴は，(2) 式による見かけのせん断

第 1 表　試験体仕様一覧
Table 1. Specifications of specimens.

試験体 Specimen	継ぎ受材位置 Position of connecting member	くぎ Nail（CN75） 間隔(mm) Pitch(mm)	くぎ Nail（CN75） 端距離(mm) End margin (mm)	実の有無 Tongue and groove joint of panel	試験体数 Number of Specimen
J	屋内側 Inside	200	22.5	なし None	1
K	屋外側 Outside	200	20	なし None	1
M	屋外側 Outside	200	20	あり Exist	2



第 5 図　耐力壁試験体
Fig. 5. Shear wall specimens.



第 6 図　耐力壁の面内せん断試験方法
Fig. 6. Configuration of wall racking test.

変形角 γ が 1/450，1/300，1/200，1/150，1/100，1/75，1/50 rad の正負変形を各 3 回とした。最大荷重に達した後は，最大荷重の 80% の荷重に低下するまで加力するか，見かけの変形角が 1/15 rad 以上に達するまで引張側に加力した。

$$\gamma = (\delta_1 - \delta_2) / H \qquad (2)$$

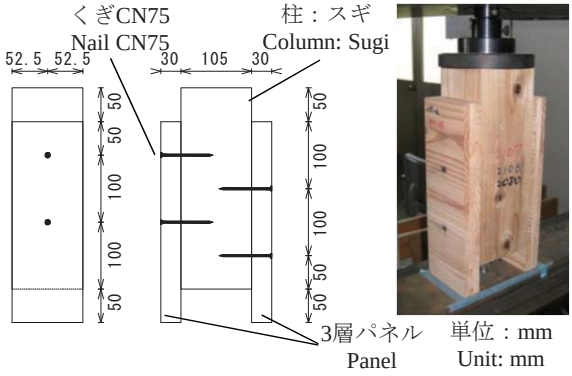
ここで，H は δ_1 と δ_2 の測定点間距離（2625 mm）である。

2.5　低減係数に関する検討

壁倍率の認定においては，低減係数 α が考慮されており [6]，実際の性能が安全側となるように現場での施工を考慮した判断がされている。このうち，耐水性および施工時の事故的な水掛かりによる影響の確認が性能評価機関から求められる [5]。この確認は，促進劣化処理による性能低下を面材のくぎ側面抵抗試験 [7]，ならびにくぎ頭貫通試験 [8] を用いて試験することが通例であり，無処理（処理 A）の強度と，耐水性の促進劣化処理（処理 B）として乾湿の繰り返し処理したもの，または，事故的な水掛りの促進劣化処理（処理 C）として浸漬気乾処理したものの強度を比較するものである。

3 層パネルはこれらの試験法が想定する厚さを超えるものであることから，厚物合板の事例 [9] に倣い，**第 7 図**に示す試験体によるくぎの一面せん断試験によって評価した。

試験体は，3 層パネルの表裏板繊維方向が加力方向に対して垂直となるようにし，3 層パネルとスギ材には隙間は設けず，くぎ頭が側材表層と平面を成すまで金づちで手打ちした。試験体数は A ～ C 処理で各 10 体の計 30 体である。



第 7 図　水による促進劣化処理試験体と強度試験方法
Fig. 7. Specimen and strength test method for accelerated deterioration caused by water.

促進劣化処理の内容を**第 2 表**に示す。試験体を組み立てる前に気乾状態で 3 層パネル（平均気乾密度 0.54 g/cm^3）およびスギ材（平均気乾密度 0.38 g/cm^3）の密度を測定し，各処理で密度の変動係数が同じとなるように組合せを決めた。

強度試験は万能試験機（TENSILON RTD2410）を用いて，圧縮荷重を加えた。加力の速度は 5 mm/min とした。

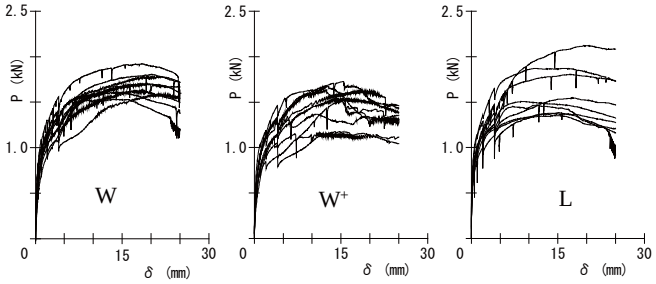
第 2 表　促進劣化処理の内容
Table 2. Contents of accelerated-deterioration treatments.

処理treatment		処理内容 process
A	無処理 Non-treatment	60ºC, RH65%の恒温恒湿に静置 Constant temperature and humidity of 20ºC, RH65%
B	乾湿繰り返し処理 Drying and wetting	20ºC水中4時間浸漬→60ºC乾燥20時間→20ºC水中4時間浸漬→60ºC乾燥20時間→室内で養生 Soaking in 20ºC water for 4 hours → Drying at 60ºC for 20 hours → Soaking in 20ºC water for 4 hours → Drying at 60ºC for 20 hours → Curing in normal room condition.
C	事故的水掛かり処理 Accidental wetting	20ºC水中72時間浸せき→室内で養生 Soaking in 20ºC water for 72 hours → Curing in normal room condition.

3.　結果

3.1.3　層パネルのくぎ一面せん断試験

くぎ一面せん断試験における荷重ーすべり曲線について正加力方向の包絡曲線を**第 8 図**に，完全弾塑性近似モデル [5] による各値を**第 3 表**に示す。試験体 W と W$^+$ の間には，最大荷重で有意水準 5% で差があったが，すべり係数には有意差は無かった。試験体 W と L では最大荷重は試験体 W の方が大きいが，すべり係数は試験体 L の方が大きかった。ここでは，雌実の影響は雄実が組み込まれた場合には小さいも



第 8 図　荷重 (P) ーすべり (δ) 曲線（正方向を包絡処理）
Fig. 8. Load (P) and slipping (δ) curve of forward direction (enveloped).

第 3 表　くぎ一面せん断試験結果
Table 3. Result of nail shear test of bilinear analysis.

	表板方向 Loading direction for surface fiber	実の有無 Tongue and groove joint of panel		K	δ_v	δ_u	ΔP_v
				N/mm	mm	mm	N
W	直交 Perpendicular	なし None	Ave.	807	2.0	24.9	1568
			C.V.	0.22	0.19	0.01	0.08
W+	直交 Perpendicular	あり Exist	Ave.	751	1.9	24.2	1345
			C.V.	0.25	0.21	0.07	0.13
L	平行 Parallel	なし None	Ave.	1217	1.2	24.9	1488
			C.V.	0.17	0.20	0.02	0.16
W，Lの平均				1012	1.5	24.9	1528

凡例）K: 初期剛性，δ_v: 降伏点変位，δ_u: 終局変位，ΔP_v：終局荷重
Legend）K:Initial stiffness, δ_v: Yield point disp., δ_u:Ultimate disp., ΔP_v : Ultimate load.

のと考え，くぎ 1 本あたりの一面せん断の数値は，試験体 W と L の平均値を採用した。

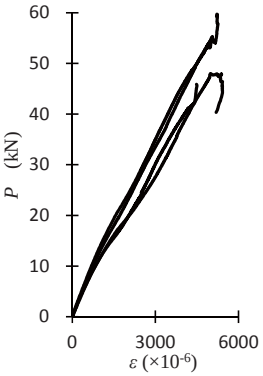
3.2.3　層パネルの面内せん断弾性係数

3 層パネルの面内せん断試験における荷重－ひずみ曲線を**第 9 図**に，試験の結果を**第 4 表**に示す。試験は終局耐力に到達する前に治具が試験機に接触し，最大荷重が計測できなかった。したがって，$\Delta P/\Delta\varepsilon$ は計測できた範囲における直線域から得た。

3.3　実大耐力壁の面内せん断試験結果

実大耐力壁の面内せん断試験の荷重変形角曲線を**第 10 図**に示す。破壊は躯体からのくぎの引き抜けが支配的で，0.05 rad 以降に荷重が顕著に低下した J，K 試験体は，面材が面外に外れたことによるもので, 実のある M 試験体が終局において有利であった。

第 4 表　パネルの面内せん断試験結果
Table 4. Result of panel shear test.



試験体 Specimen	$\Delta P/\Delta\varepsilon$ (×10^{-6}kN)	G (GPa)
1	9.235	0.594
2	10.840	0.695
3	11.295	0.724
4	9.148	0.589
Ave.	-	0.651
C.V.	-	6.9%

凡例）$\Delta P/\Delta\varepsilon$：直線域の傾き，
G：せん断弾性係数
Legend）$\Delta P/\Delta\varepsilon$: Slope of linear portion,
G: Shear modulus

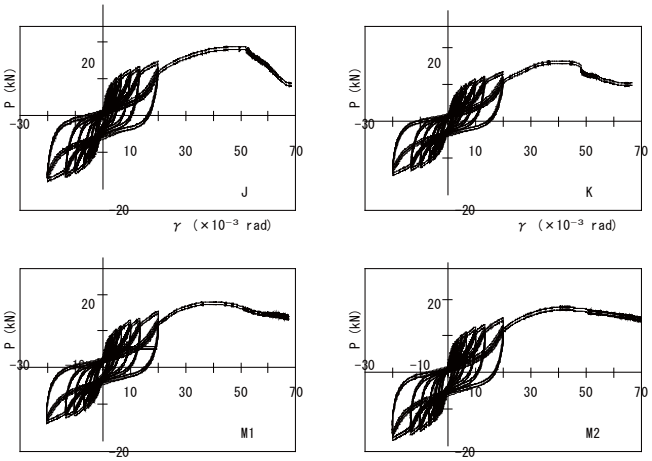
第 9 図　パネル面内せん断の試験における荷重 (P) －ひずみ (ε) 曲線
Fig. 9. Load(P) and strain(ε) curves of panel shear.

完全弾塑性近似モデル [5] による評価結果と壁倍率を**第 5 表**に示す。同表には面材張り大壁の詳細計算法 [10] に 3.1 および 3.2 で得た値を用いて，耐力壁試験体と同じくぎ配置（Cal200）の場合とくぎの留めつけ間隔を 150 mm（Cal150）した場合の壁倍率を算出して併記した。P_y を J と K で比較する範囲では継ぎ受材を屋外側に取り付けたことよる影響は無いものと考えられる。一方，Cal200 の P_y は，実験値よりも 1.5 割程度高かった。Cal150 の P_y は Cal200 と比べて 3 割高くなるものと試算された。以上より，くぎの留めつけ間隔を 150 mm として実験した場合には 壁倍率は 3.3 ～ 3.8 の範囲となるものと予想された。

第 5 表　実大耐力壁の面内せん断試験結果
Table 5. Results of racking tests.

試験体 Specimen	P_{max} (kN)	P_u (kN)	K (10^{3}kN/rad)	μ	D_s	γ_y (×10^{-3}rad)	γ_v (×10^{-3}rad)	γ_u (×10^{-3}rad)	P_y (kN)	P_u・(0.2/D_s) (kN)	2/3P_{max} (kN)	$P_{1/120rad}$ (kN)	N
J	19.68	16.88	1.79	6.16	0.30	6.14	9.43	58.08	10.99	11.37	13.12	12.10	3.0
K	17.20	14.87	1.66	5.70	0.31	5.98	8.97	51.10	9.92	9.59	11.47	10.96	2.6
M1	18.59	15.93	2.17	9.03	0.24	4.90	7.36	66.48	10.60	13.17	12.39	12.24	2.9
M2	18.69	16.38	2.04	8.32	0.25	5.10	8.02	66.67	10.41	12.95	12.46	11.93	2.9
Cal_{200}	-	-	2.95	-	-	-	-	-	12.55	15.08	-	19.70[A)]	3.5
Cal_{150}	-	-	3.76	-	-	-	-	-	16.26	19.00	-	25.06[A)]	4.5

凡例）P_{max}: 最大荷重 , P_u: 終局荷重 , K: 剛性 , μ: 塑性率 , D_s: 構造特性係数 , γ_y: 降伏変形角 , γ_v: 降伏点変形角 , γ_u: 終局変形角 , P_y: 降伏耐力 , $P_{1/120rad}$: 変形角 1/120 rad 時の荷重 , N: 壁倍率（小数点第 2 位以下切り捨て）.
A）真の変形角 1/150 rad 時
注）下線は壁倍率の算出に使用した値
Legend) P_{max}: Maximum load, P_u: Ultimate load, K: Initial stiffness, μ: ductility factor, D_s: Structural characterization factor, γ_y: Yield angle, γ_v: Yield point angle, γ_u: Ultimate angle, P_y: Yield load, $P_{1/120rad}$: Load at the deformation angle 1/120 rad, N: Shear wall multiplier (rounded down to the one decimal place).
A) at 1/150 rad.
Note）Underlined values used to calculate N..



第 10 図　耐力壁試験における荷重 (*P*) ー変形角 (*γ*) 曲線
Fig. 10. Load (*P*) and deformation angle (*γ*) curves of racking wall test.

3.4　低減係数に関する検討

劣化促進処理した場合のくぎの一面せん断試験試験結果を第 6 表に示す。処理 B，C のいずれにおいても，最大荷重の平均値は処理 A よりも高く，強度低下は確認されなかった。破壊性状は，すべて主材からのくぎの引き抜けで，釘頭の 3 層パネルへのめり込みは観察されなかったことからも，3 層パネルの劣化はくぎの一面せん断耐力に影響を及ぼさなかったものと考えられた。

第 6 表　劣化促進処理による強度への影響
Table 6. Result of accelerated-deterioration test.

	最大荷重 (kN) Maximum load (kN)			B/A	C/A
処理 Treatment	A	B	C		
平均 Average	8.51	9.89	9.12	1.16	1.07
変動係数 C.V.	4.4%	4.4%	5.4%		

処理 A,B,C は第 2 表参照。
Treatments A,B, and C are referred to Table 2.

4.　おわりに

柱間隔 1820 mm で間柱等を省略することで屋内空間を拡張することをコンセプトとして，カラマツ 3 層パネルを横張りした大壁の耐力壁の開発を行った。

実大耐力壁の面内せん断試験結果では，3 層パネル間のせん断力の伝達要素として継ぎ受材を屋外側に設けた場合と屋内側に設けた場合との間に差は無いものと考えられた。実のある仕様は実の無い仕様と比べて終局耐力で有利であることが看取された。ただし，これらの実験値は，くぎ 1 本あたりの一面せん断特性値ならびに 3 層パネルのせん断弾性係数から求めた計算値よりも低かった。くぎの留めつけ間隔を 200 mm から 150 mm と変更した場合について試算した結果，壁倍率は 3.5 ～ 4 倍の範囲となるものと予想した。

壁倍率認定に考慮される低減係数に関しては，乾湿繰り返しや事故的な水掛かりを想定した促進処理による強度低下は見られなかった。したがって，低減係数は，施工性等に関する項で低減されるのみと考える。以上の結果から，この仕様で国土交通大臣認定を受けた場合に 3.5 倍の壁倍率を得るためには，くぎの留めつけ間隔を 150 mm とすることが妥当であると考えられた。

文　　献

1）EN16351, “Timber structures - Cross laminated timber – Requirements”, European Committee for Standardization, p.10 (2011).
2）“平成 22 年改訂　木造住宅工事仕様書（全国版）”, (財) 住宅金融普及協会 , p.98(2010).
3）青木謙治 , 木材工業 vol.61, No.3, pp.99-104(2006).
4）“合板の日本農林規格”, 農林水産省告示第 1751 号 (2008).
5）“木造住宅の耐力壁及びその倍率性能評価業務方法書”, (財) 日本住宅・木材技術センター (2008).
6）“木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）”, (財) 日本住宅・木材技術センター , pp. 572-574 (2008).
7）JIS A 5404：“木質系セメント板のくぎ側面抵抗試験”, (2007) .
8）ASTM D 1037 “NAIL-HEAD PULL-THROUGH TEST”, (2008).
9）青木謙治 , 渋沢龍也 , 神谷文夫 , 谷川信江：第 56 回日本木材学会大会研究発表要旨集 , 秋田市 , 2006, CD-ROM.
10）“木造軸組工法住宅の許容応力度設計（2008 年版）”, (財) 日本住宅・木材技術センター , pp. 342-353(2008).

ー性能部　耐久・構造グループー
ー *1：技術部　生産技術グループ—
ー *2：緑川木材株式会社ー
（原稿受理：12.12.17）