

木質ボードの面内寸法安定性 (第3報)[†]釘着および接着による線膨張の抑制^{*1}関野 登^{*2}, 末松充彦^{*3}

In-Plane Dimensional Stability of

Wood-Based Panel Products III.[†]Constraint of linear expansion by nail joints
with or without bonding^{*1}Noboru SEKINO^{*2} and Atsuhiko SUEMATSU^{*3}

The effects of mechanical constraint by nail joints with or without bonding on linear expansion (LE) were investigated for four types of commercial wood-based panels, namely, medium density fiberboard (MDF), particleboard (PB), oriented strandboard (OSB), and lauan plywood (PW). Small size specimens jointed to lumber were made and measured for panel LE along the lumber under humidity cycling from 33 to 95% relative humidity at 20°C. The main results obtained are as follows: 1) The effects of nail joints without bonding on LE constraint were rather small; about ten percent reduction at most for PW and OSB, and thirty percent at most for PB and MDF when compared to free panel expansion. 2) The above small contribution of nail joints could be explained by the panel being laterally compressed by the nail, thus resulting in gaps at the nail fastening as the panel moves; the gaps calculated from the results of shrinkage load and compression tests agreed well with panel LE. 3) Nail joints with bonding showed much effect on LE constraint; about twenty-five, fifty and sixty percent reduction for PW, OSB and PB/MDF, respectively, when compared to free panel expansion. 4) LE of panels nail jointed with bonding was in the order of OSB < PW ≪ PB ≅ MDF, which agreed with swelling stresses experimentally obtained for matched panel samples.

Keywords: dimensional stability, linear expansion, wood-based panel, nail joint.

4種類の市販木質ボード、すなわちMDF、パーティクルボード(PB)、OSB、および南洋材合板(PW)を製材品の受け材と接合し、釘または釘接着併用接合による線膨張(LE)の抑制効果を調べた。得られた主な知見を要約すると、1) 釘接合による抑制効果は小さく、無拘束に対してPW、OSBで最大1割、PB、MDFで最大3割のLE低減にとどまった。2) 釘接合では、釘側面のボードへのめり込みがLE抑制の程度に大きく関わる事が、めり込み量の推定により確認された。3) 釘接着併用接合による抑制効果は大きく、無拘束に対してPWで2~3割、OSBで約5割、PBとMDFで約6割のLE低減をもたらした。4) 各ボードの面内膨潤力を測定した結果、その序列は釘接着併用接合されたボードのLEの序列と一致し、抑制の程度は面内膨潤力に深く関ることが確認された。

[†] Report II: *Mokuzai Kogyo (Wood Industry)* 54(1), 14-19 (1999).

^{*1} Received December 13, 1999; accepted March 22, 2000.

本研究の一部は、第48回日本木材学会大会(1998年4月、静岡)で発表した。

^{*2} 岩手大学農学部 Faculty of Agriculture, Iwate University, Iwate 020-8550

^{*3} 職業能力開発大学校 Dept. of Architecture & Industrial Design, The Polytechnic University, Sagami-hara 229

1. 緒 言

木質ボードの建築用途の拡大につれ、面内寸法安定性が問題視されている¹⁻³⁾。前報^{4,5)}では、数種の市販木質ボードについて、吸湿および各種促進吸水処理で生じる線膨張率 (LE) を調べ、①吸湿 LE の特徴、②吸湿試験と促進試験との対応、③実用環境下での面内寸法変化などを検討した。ただし、③に関しては、数種の周囲温湿度変化を想定し、水分平衡した時の LE を得たに過ぎない。各種の用途で生じる寸法変化を推定するには、釘や接着接合による機械的な拘束の影響や吸脱湿応答などを明らかにする必要がある。

ところで、機械的拘束下でのボードの LE の発現は、現実には極めて複雑な現象と言える。なぜなら、

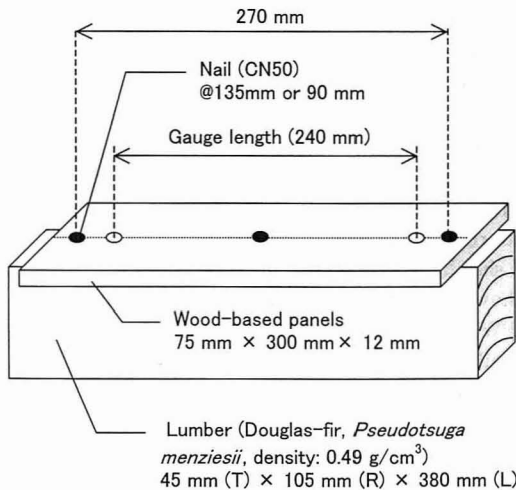


Fig. 1. A joint specimen measured for a panel linear expansion. Panels were jointed to lumber by nail with or without bonding (urethane base resin for construction, spread: 300 g/m²).

単にボードとそれに接する部材との接合条件のみならず、部材の種類や断面寸法および部材同士の接合など、様々な因子の影響を受けるためである。しかし現状では、その基礎となる接合条件と LE の関係さえ十分に把握されてはいない。そこで本報では、基礎データ収集を目的として、Fig. 1 に示すような接合試験体を作製し、釘または釘接着併用接合による LE 抑制効果を調べた。また、ボード長さ方向の膨潤力、釘側面のボードへのめり込み挙動などを調べ、LE 抑制のメカニズムを考察した。

2. 実 験

2.1 供試材料および接合試験体

Table 1 に示す 4 種類の市販木質ボード (前報^{4,5)} と同一ロット、合板は構造用 1 級) から、幅 75 mm × 長さ 300 mm の試験片を多数採取した。ただし、長さ方向は、合板 (PW) と OSB では表層の繊維配向方向に一致させ、パーティクルボード (PB) と MDF では抄造方向に一致させた。これらの試験片を、以下の 4 条件で製材品の受け材に接合した (Fig. 1 参照)。

略号	接合条件
N@135	釘接合 (CN50, 3 本, 間隔135 mm)
N@90	釘接合 (CN50, 4 本, 間隔90 mm)
BN@135	釘接着併用 (N@135+接着剤)
BN@90	釘接着併用 (N@90+接着剤)

ただし、釘 (CN50; 長さ50.8 mm, 径2.87 mm, 頭部径6.76 mm) はハンマーで打ち、その際、ボードには径 2 mm の誘導穴を設けた。接着剤にはウレタン系構造用現場接着剤 (日本ポリウレタン工業, 商品名「ウッドロック」) を使用した。塗布量は 300 g/m² で、接合面全体に塗布した。圧縮力は、現場接着の実態に合わせて釘による圧着のみとした。試験片および受け材は、接合前に 20°C, 相対湿度 (以下, RH と記す) 62% で約 1 か月間養生された。

Table 1. Characteristics of commercial wood-based panels measured for linear expansion.

Panel types ^{a)}	Symbols	Adhesives	Density (g/cm ³)	Notes
Plywood	PW	MUF ^{b)}	0.62	Tropical wood plywood (lauan), 5-ply (1.8+3.4+1.8+3.4+1.8 mm).
Oriented strand board	OSB	PF ^{c)}	0.71	Aspen (<i>Populus tremuloides</i>), powdered resin: 2%.
Particleboard	PB	UMF ^{d)}	0.80	Three-layer construction with fine particles at faces and coarse particles at core, resin content: 13% (face), 8% (core).
Medium density fiberboard	MDF	MUF	0.70	—

^{a)} Nominal thickness of panels: 12 mm (9.5 mm for OSB).

^{b)} Melamine-urea-formaldehyde resin, ^{c)} Phenol-formaldehyde resin, ^{d)} Urea-melamine-formaldehyde resin.

2.2 LE 測定方法

接合試験体に加え、ボード単体および受け材単体のLEを測定した。LE算出に必要な長さは、試験体に埋め込んだ二つの標点の間隔(240 mm)とし、既報⁴⁾の測定器(1/100 mm精度)を用いて測定した。なお、測定値読み取りの再現性を考慮した場合、この標点間距離に対するLE測定精度は、 $\pm 0.005\%$ である¹⁴⁾。標点には外径9 mm、内径6 mmの鬼目ナットを用いた。埋め込み位置は、接合試験体およびボード単体ではボード幅方向の中央とし、受け材単体では接合面に対応する板目面幅方向の中央とした。

試験体を62%→95%→62%→33%→62%RHの順に、20°Cで4週間づつ調湿し、初期62%RH調湿終了時の長さを基準として、各RH調湿終了時のLEを算出した。なお、62%RHの調湿は恒温恒湿室内で、33%および95%RHの調湿は飽和塩水溶液(それぞれMgCl₂, KNO₃)を用いたデシケータ中で行った。また、95%→62%RHの脱湿過程および33%→62%RHの吸湿過程では、湿度変化後1, 2, 4, 7, 14, 21日目に長さ重量を測定し、LEおよび含水率の経時変化を調べた。なお、試験体数は、接合試験体で1条件5体、ボード単体で各5体、受け材で5体とし、測定値はその平均値で評価した。

2.3 部分圧縮試験および収縮による釘側面荷重の測定

受け材に釘接合されたボードが膨潤収縮する際、釘側面がボードにめり込むとLEは抑制され難くなる。本研究では、めり込み量推定の基礎資料を得るため、二種類の測定を行った。一つは、Fig. 2に示す装置と条件による部分圧縮試験である。ボード両面に接触させた厚さ5 mmの鋼材で釘側面を加力し、変位(クロスヘッド移動量)一荷重曲線を得た。含水状態は、20°C62%RHおよび95%RHに平衡する2水準とした。試験体数は1条件10体で、変位一荷重曲線はその平均値で評価した。もう一つは、Fig. 3

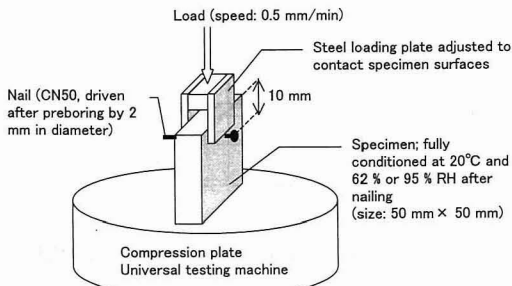


Fig. 2. Schematic showing compression test by a nail.

に示す装置と条件による釘側面荷重の測定である。20°C95%RHで4週間以上養生された試験体を20°C62%RHに暴露し、収縮により生じる釘側面荷重を12時間測定した。ただし、試験体と治具の隙間を排除するため、予め9.8 Nの引張荷重を与えた。試験体数は1条件5体で、測定値はそれらの平均値で評価した。また、同寸法のダミー試験体を用いて重量変化と全乾重量を測定し、脱湿による含水率変化を調べた。

2.4 膨潤力の測定

Fig. 4に示す装置を用いて、吸湿によるボード長さ方向の膨潤力を測定した。測定条件は以下の通りである。養生：20°C33%RH、試験時の暴露温湿度；

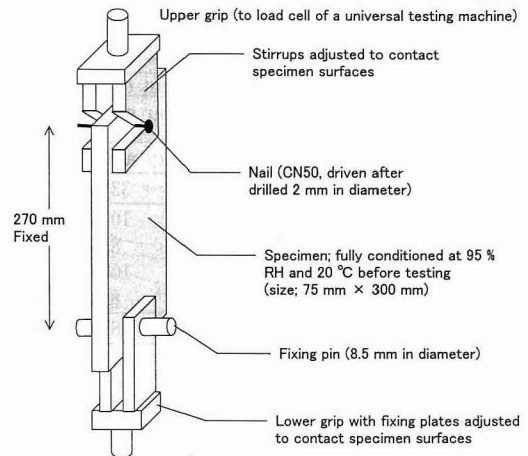


Fig. 3. Schematic showing panel shrinkage load test. Load was recorded for 12 hours after exposure at 62% RH and 20°C.

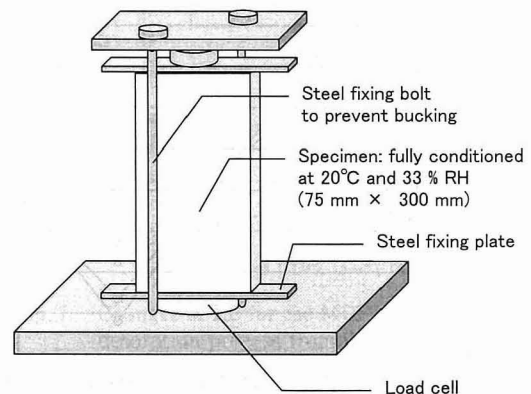


Fig. 4. Schematic showing panel swelling load test. Load was recorded for 12 hours after exposure at 62% RH and 20°C.

20°C62%RH, 測定時間: 暴露後12時間。ただし, 良好な接触面を確保するため, 予め9.8 Nの圧縮荷重を与えた。試験体数は1条件5体で, 測定値はそれらの平均値で評価した。また, 同寸法のダミー試験体を用いて重量変化と全乾重量を測定し, 吸湿による含水率変化を調べた。

3. 結果および考察

3.1 LE抑制効果

はじめに, 吸脱湿に伴う試験体の含水率変化に着目する。Table 2は, ボード単体および受け材単体の含水率変化を示している。なお, 接合試験体に関しても, それぞれの部材含水率はTable 2の値とほぼ同等であることが重量測定により確認されている。いま, 最初の吸湿ステップである95%RHの含水率を見ると, ボードでは平衡含水率⁶⁾にほぼ達したの

Table 2. Changes in moisture content of the panels and lumber tested for linear expansion.

Symbols	Relative humidity at 20°C				
	62% → 95%	95% → 62%	62% → 33%	33% → 62%	
PW	10.1	17.8	13.2	10.5	12.3
OSB	8.2	16.6	11.9	8.6	11.0
PB	11.3	15.6	12.9	10.0	12.4
MDF	9.1	14.0	11.2	8.8	10.6
Lumber	11.1	15.5	11.4	8.0	10.2

(Unit: %)

に対し, 受け材では平衡含水率(約24%⁷⁾)に比べてかなり低くなった。すなわち, 各ステップ4週間の調湿は, 材積の大きな受け材と小さなボードに対して, 量的にも質的にも異なる含水率変化を与えたことが分かる。ただし, 本研究では, 受け材内部の水分分布については言及せずに, 材全体の平均含水率のみに着目した。

吸脱湿に伴うLEの変化をFig. 5に示す。ただし, 図を見易くするため, 釘間隔については@135のみを図示した。また, Table 3には, 吸脱湿サイクル全体でのLE (Fig. 5の振幅, ΔLE と記す)について, ボード単体およびそれに対する各接合条件での相対値を一覧にした。

まず, Fig. 5において, ボード単体の ΔLE , すなわち, ΔLE_p に着目する。その序列はOSB < PW < MDF < PBであり, 後2者は前2者の約3倍の値となった。MDFやPBの寸法安定性の低さが指摘できる。しかし, 受け材に接着接合されたMDFやPBでは, ΔLE がPW単体やOSB単体と同等まで抑制されている。接合条件によるLE抑制の差異は, Table 3上段の指標で示される。釘接合による ΔLE の低下は, PWとOSBで1割程度であり, PBとMDFで最大3割となった。一方, 接着剤が併用されると, PWで約3割, OSBで約5割の低下, PBとMDFでは更に大きく約6割の低下となった。

LE抑制の程度は, 接合の良し悪しのみならず, 受

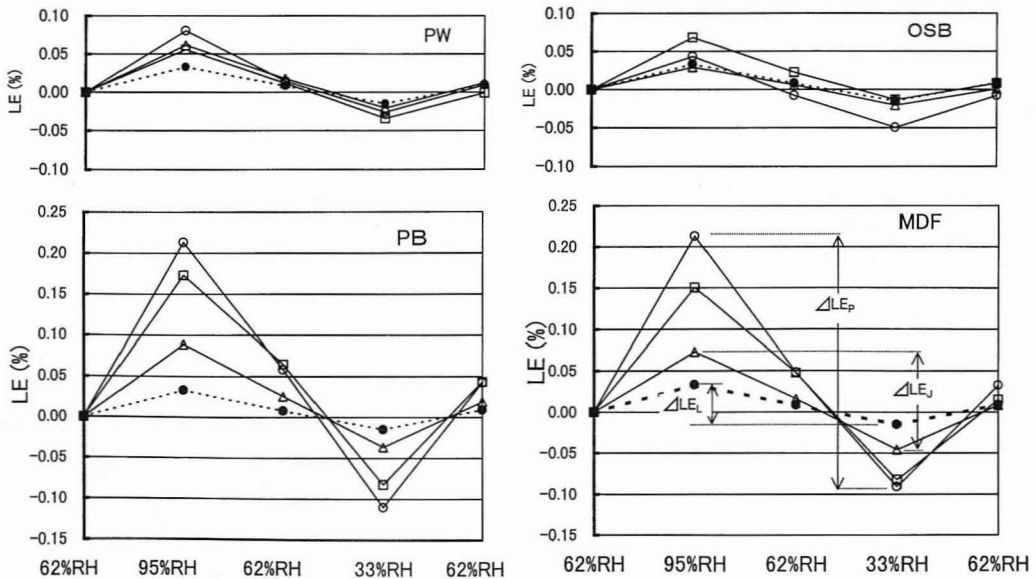


Fig. 5. Comparison of changes in LE among panel types and joint types.

Legend: ○: Control panel, □: N@135, △: BN@135, ●: Lumber.

Note: Constraint index, $\alpha = (\Delta LE_p - \Delta LE_j) / (\Delta LE_p - \Delta LE_i) \times 100$ (%).

Table 3. Effects of nail joints or bonding on the linear expansion of panels. The entire LEs over the humidity cycle (amplitudes, ΔLE , shown in Fig. 5) are compared among panel types and joint types.

Joint types	Panel types			
	PW	OSB	PB	MDF
—Indices where the relevant control sample equals 100—				
N@135	84	88	79	77
N@90	105	98	87	71
BN@135	77	54	39	39
BN@90	72	44	43	35
ΔLE of the control samples (ΔLE_p , %) ^{a)}	0.107	0.092	0.323	0.304
—Indices of constraints, α (% , cf. Fig. 5)—				
N@135	29	25	25	28
N@90	-9	4	15	34
BN@135	42	96	72	72
BN@90	50	117	67	77

^{a)} ΔLE of the control lumber (ΔLE_L): 0.048%.

け材の線膨張にも依存する。そこで、Fig. 5の脚注に示す式により、抑制効果 α を定義した。受け材に接合されたとき、ボードのLEがボード単体と同等であれば α は0%、受け材単体と同等まで抑制されれば α は100%となる。算出した α をTable 3下段に示すが、釘接合による抑制効果は概ね30%以下となった。また、ボード全体で見ると釘間隔による差異は不明瞭であった。一方、接着剤併用の場合、PWでは40-50%と低い値であるが、PBやMDFでは70-80%、OSBでは100%に近い値を示した。ただし、LEの測定精度から見ると、寸法変化が小さい場合には、 α の値に相当の誤差を伴うと考えられる。たとえば、算出式の分母分子それぞれに測定精度である $\pm 0.005\%$ の誤差を仮定した場合、PBとMDFでは表示値 $\pm 3\%$ 程度であるが、PWとOSBでは表示値 $\pm 20\%$ 程度となる。したがって、Table 3に示す抑制効果 α は、あくまで概略の目安と見るべきであろう。

その他、Fig. 5から分かる事項として、LEのヒステリシスが挙げられる。すなわち、ほとんどの試験体で半周期目のLEが0%に戻らない。その主因は、Table 2から読み取れる水分ヒステリシスにあると言える。

3.2 LEの経時変化

Fig. 6は、ボード単体で得られた脱湿過程(95%→62%RH)の含水率変化および含水率-LE関係を示している。含水率変化は、脱湿開始後約4日間(OSBでは約7日間)で変化全体の約8割に達しており、脱湿応答の速さが伺える。LEの経時変化も同様な傾向にあり、結果として両者の間に直線関係が認められた。なお、OSBではLEが負の値まで移行した。

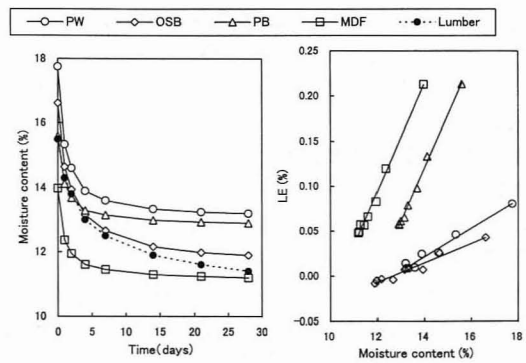


Fig. 6. Changes in moisture content and relationships between moisture content and LE under the desorption process from 95% to 62%RH.

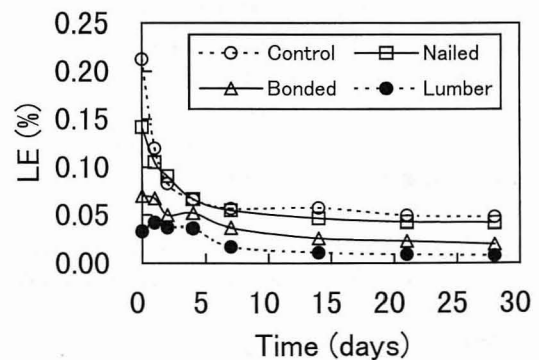


Fig. 7. Changes of LE for the MDF panels under the desorption process from 95% to 62% RH.

すなわち、脱湿過程終了後の長さは初期62%RHに比べて短くなった。このような現象は他の報告^{4,9,10)}でも認められており、厚さのスプリングバックによ

ってポアソン効果が作用するためと考えられている。実測の結果、当該 OSB では初期62%RH 基準で約7%の厚さ膨潤が残存していた（他のボードでは1%程度）。一方、データの記載は省くが、吸湿過程（33%→62%RH）においても Fig. 6 と同様な含水率の変化傾向および含水率と LE の直線性が認められた。

次に、LE の経時変化の差異を、ボード単体と接合試験体で比較する。一例として、MDF の脱湿過程（95%→62%RH）の結果を Fig. 7 に示す。ただし、接合試験体の値は、釘間隔@90 と @135 の間で有意差が認められなかったため、それらの平均値をプロットした。脱湿初期の LE 変化を見ると、拘束下のボードは単体に比べて小さく、特に接着併用接合においてそれは顕著であった。同様な傾向は、他のボードにおいても認められた。この原因は、以下のように推察できる。すなわち、LE が抑制されたボードには圧縮応力が内在する⁸⁾。脱湿初期の水分変化は圧縮応力の消滅として作用し、寸法変化は応力消滅後に現れると考えられる。

3.3 LE 抑制メカニズム

3.3.1 釘着

釘接合による LE 抑制効果が小さい原因として、膨潤収縮する際に釘側面がボードにめり込むことが考えられる。ここでは、収縮による釘側面荷重および部分圧縮試験による変位-荷重曲線を用い、LE 測定条件とした4週間の調湿で生じるめり込み量を以下の手順で推定した。

まず、脱湿4週間後の釘側面荷重を Fig. 8(初期荷重は控除してある) に示す二種類の結果から推定した。すなわち、脱湿時間と釘側面荷重の関係に対数近似を適用して脱湿4週間後の荷重 (N_t) を外挿により求めた。また、含水率変化と釘側面荷重の関係に直線近似を適用し、Table 2 に示す含水率（半サイクル目の62%RH）に達したときの荷重 (N_{mc}) を外挿により求めた。Table 4 に両推定値を示すが、

それらは近接した値となった。ここでは、その平均値を用いる。次に、この推定荷重に対するめり込み量を、Fig. 9 に示す変位-荷重曲線から読み取った。含水状態により2つのめり込み量が読み取れるが、

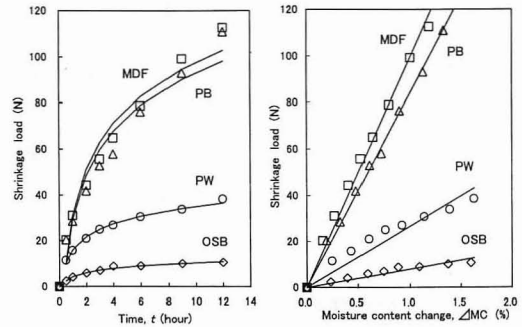


Fig. 8. Shrinkage load behavior of the panels exposed to 62% from 95% RH at 20°C.

Notes: PW: $y = 8.62 \ln(t) + 15.9$ ($r = 0.99$), $y = 26.3 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.94$)
 OSB: $y = 2.64 \ln(t) + 4.3$ ($r = 0.99$), $y = 7.82 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.94$)
 PB: $y = 27.8 \ln(t) + 29.0$ ($r = 0.96$), $y = 83.4 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)
 MDF: $y = 28.9 \ln(t) + 30.9$ ($r = 0.98$), $y = 98.5 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)

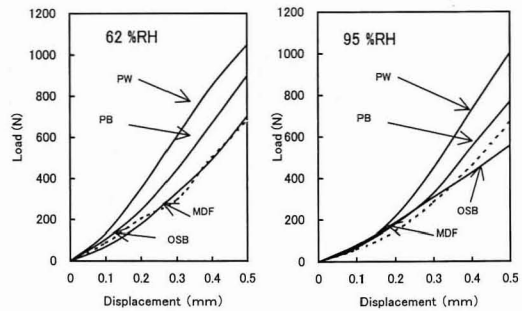


Fig. 9. Load-displacement relationships in compression test by a nail.

Table 4. Comparison between linear expansion of panels nail jointed to lumber and compression displacement (D_c) calculated by shrinkage load and compression tests.

Panel types	Load (N)			D_c (mm)	$\Delta L/2^{(c)}$ (mm)
	$N_t^{a)}$	$N_{mc}^{b)}$	Mean		
PW	70	77	74	0.08	0.03
OSB	22	31	26	0.04	0.04
PB	211	187	199	0.19	0.17
MDF	220	215	218	0.23	0.14

a), b) Shrinkage loads at four-week exposure calculated by regression equations of load-t and load- Δmc relations shown in Figure 8.

c) Half of the linear expansion observed at the first exposure step (62%RH → 95%RH).

ここでは便宜的にその平均値 (D_c) を得た。 D_c は、PB や MDF で約0.2 mm, PW や OSB では、それらの約1/3~1/5となった。

次に、上記の推定めり込み量を、接着試験体におけるボードと受け材の長さ変化の差 (ΔL) と比較する。接合条件 N@135は、中央の釘を境として左右対称であり、ボードの各サイドはそれぞれ1本の釘で拘束されているため、単純な比較が行い易い。また、吸脱湿サイクルの第2ステップ以降では、既存のめり込みによる隙間がボードの長さ変化に影響するであろう。このような理由から、比較対象を N@135の第1ステップとし、 ΔL を算出して、その1/2の値(片側相当分)を Table 4 に示した。 $\Delta L/2$ と D_c を比べると、PW と MDF で差が大きいものの、総体的には比較的一致していると判断できる。ただし、正確な推定を行うには、含水状態とめり込み量の関係の扱い方や、釘の曲げ変形などを検討する必要があるであろう。いずれにしても、上記の結果から、釘側面のボードへのめり込みが LE 抑制の程度に大きく関わる事が確認できる。

3.3.2 接着

合板は面内寸法安定性に優れた材料であるが、その理由は、繊維直角方向の膨潤収縮が接着層を介して直交配向する単板により効率良く抑制されるためである。このような層間拘束作用は、表内層で小片形状や密度が異なる三層パーティクルボードについても認められており、面方向の圧縮応力と引張応力が厚さ方向に分布し平衡を保つことが指摘されている¹¹⁻¹³⁾。本実験の試験体においても、接着併用接合された場合は、ボードと受け材の間でこのような応力バランスが存在し、結果として釘接合に比べて顕著な LE 抑制効果を示したものと解釈できる。ただし、接合試験体はボード単体のような対称構造をもたず、かつ、受け材がボードに対して著しく大きな材積をもつなどの理由から、応力分布の状態はボード単体の場合とかなり異なるであろう。

上述の応力バランスの観点から、接着接合下での LE は、大きな面内膨潤力をもつボードほど大きくなると考えられる。なぜなら、接着および受け材の仕様は全てのボードで共通のためである。このことを測定結果から確認してみる。Fig. 10 は、33%→62%RH の吸湿で生じた膨潤力(初期荷重は控除してある)の経時変化および含水率-膨潤力関係を示す。測定時間内での膨潤力の序列は、OSB<PW<PB<MDF となった。いま、吸湿4週間後の膨潤力を釘側面荷重と同様に二つの方法で推定し、その平均値を求めると、OSB は136 N (85, 187), PW は

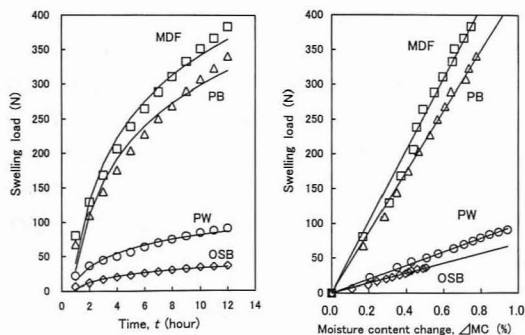


Fig. 10. Swelling load behavior of the panels exposed to 62% from 33% RH at 20°C.

Notes: PW: $y = 28.5 \ln(t) + 15.0$ ($r = 0.99$), $y = 97.7 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)
 OSB: $y = 12.6 \ln(t) + 3.4$ ($r = 0.99$), $y = 70.2 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)
 PB: $y = 117 \ln(t) + 29.7$ ($r = 0.98$), $y = 437 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)
 MDF: $y = 131 \ln(t) + 40.2$ ($r = 0.98$), $y = 514 \cdot \Delta mc$ ($r = 0.99$)

191 N (201, 181), PB は876 N (789, 964), MDF は915 N (891, 940) となった。ただし、カッコ内はそれぞれ、経時変化および含水率からの推定値である。4週間後の膨潤力は、序列は実測12時間のそれと変わらないが、PB と MDF は、ほぼ同程度の値と見なせる。一方、接着併用接合された試験体が33%→62%RH の吸湿で生じる LE を Fig. 5 から読み取ると、OSB は0.019%, PW は0.033%, PB は0.055%, MDF は0.052%となる。すなわち、その序列は吸湿4週間後の膨潤力の序列と一致すると判断でき、接着接合による LE 抑制はボードの膨潤力に深く関ることが確認できる。

4. 結 言

数種の市販ボードを釘または釘接着併用で受け材(製材品)に接合し、LE 抑制効果およびそのメカニズムを検討した。釘接合による抑制効果は小さく、無拘束に対して PW, OSB で1割程度、PB と MDF で最大3割の LE 低減にとどまった。また、釘接合においては、釘側面のボードへのめり込みが LE 抑制の程度に大きく関わる事が、めり込み量の推定により確認された。一方、釘接着併用接合による LE 抑制効果は大きく、無拘束に対して PW で2~3割、OSB で約5割、PB と MDF で約6割の LE 低減をもたらした。また、ボードの面内膨潤力の序列は、接着併用接合されたボードの LE の序列と一致し、抑制の程度は面内膨潤力に深く関ることが確認された。

上述のLE抑制効果は、受け材直上という極めて限定された条件で得られたものであり、実用環境下での面内寸法変化を推定するには2次元的なLE測定が必要となる。現在、本研究で得られた知見を基に、受け材の仕様や配置を考慮した大型試験体による面内寸法測定を進めている。これらのデータが整備されれば、施工方法の改善による面内寸法安定性確保が期待できよう。

謝 辞

本研究は、木質ボード懇話会に設置された「LEプロジェクト」の一部として行われた。試料提供にご協力頂いた日本繊維板工業会ならびに各社に謝意を表します。

文 献

- 1) 池山道高, 高谷政広, 浜田良三: 第42回日本木材学会大会研究発表要旨集, 名古屋, 1992, p. 539.
- 2) 須藤哲也, 辻本吉寛, 大羽伸和, 作野友康: 木材工業 **51**, 64-68 (1996).
- 3) 宮本康太, 鈴木滋彦: 木材工業 **52**, 342-347 (1997).
- 4) 関野 登, 末松充彦, 安井悦也: 木材工業 **53**, 408-412 (1998).
- 5) 末松充彦, 関野 登: 木材工業 **54**, 14-19 (1999).
- 6) 関野 登, 末松充彦, 高麗秀昭, 安井悦也: 木材学会誌 **45**, 237-243 (1999).
- 7) 林業試験場監修: “木材工業ハンドブック”, 丸善, 1982, p. 96.
- 8) Lang, E., Loferski, J.: *Forest Prod. J.* **45**(4), 67-71 (1995).
- 9) 関野 登, 末松充彦, 藤元嘉安, 木谷良明, 王潜: 木材学会誌 **46**, 334-341 (2000).
- 10) Suzuki, S., Miyamoto, K.: *J. Wood Sci.* **44**, 444-450 (1998).
- 11) 又木義博, 村上英人, 村瀬安英, 河辺純一: 木材学会誌 **24**, 190-195 (1978).
- 12) Suchsland, O., Xu, D.: *Forest Prod. J.* **42**(5), 25-27 (1992).
- 13) 藤元嘉安, 森園眞子, 稲益 正, 又木義博: 九大演報 No. 73, 43-60 (1995).
- 14) 財団法人日本住宅・木材技術センター編: 「先進木質建築資材性能評価事業報告書」, 1996, pp. 33-47.