

単板積層材 (LVL) の材質改良技術に関する研究

—木材とガラスクロスとの接着性および複合LVLの試作—

本多 琢己・佐野 正明

Improvement of Laminated Veneer Lumber (LVL) Performance

—Adhesion Properties of Wood Glassfiber Adhesive Bond
and Production of Glassfiber Reinforced LVL—

Takumi HONDA and Masaaki SANO

要 約

木材やガラスクロスとの接着耐久性を、せん断接着力および破壊靱性値の変動から検討した。ガラスクロスどうしの接着の場合、塗布量を3割程度多めにする方が良い結果が得られた。

LVLをクロスで複合化したとき、クロスへ浸透の良い接着剤で作製すると優れた特性が現れるのを見出した。クロスによる補強は、LVLの高靱化に極めて有効であることを明かにした。

1. 緒 言

単板積層材 (LVL) は、強度の分散の少ない軸材料として信頼性が高い。しかしながら、単板の裏割れのため、LVLの割裂強度¹⁾は素材に比べてかなり劣り、また、厚さ方向に釘を打ち込んだとき割れ²⁾を生じやすい。その影響はLVLの厚さが薄くなるほど大きくなる。したがって、LVLをパネルの枠材など断面寸法の比較的小さい部材として利用する際には、何らかの方法で材質を改良する必要がある。

ところで、木材と他材料を複合化すると優れた性能を付与できる可能性がある。既往の研究では鉄³⁾、アルミニウム⁴⁾、ガラス繊維⁵⁾、炭素繊維⁶⁾の使用例が報告されている。ここでは、ガラスクロスを用い、これを6プライLVLの接着層に挿入、複合したLVLを作製した。既に木材/ガラスクロス系の接着強さは検討⁶⁾されているが、この接着系ではさらに層間剥離による破壊も考慮する必要がある。本報は、接着系に破壊力学を適用してひずみエネルギー解放率を求め、せん断接着強さと比較することによって接着性能を多角的に検討した。

また、複合LVLは、パネルの枠材のような使い方を想定したとき、適度な曲げ剛性を備え、割裂性に優れる必要がある。そこで、複合LVLの曲げ強度試験や破壊じん性試験を行い、複合化が力学的性質に及ぼす影響をクロスの挿入枚数や位置との関わりで検討した。

2. 実験方法

2-1 材 料

被着材はアカマツ (*Pinus densiflora s.et Z.*) で、気乾比重0.47、含水率12%、平均年輪幅4.1mm程度であった。繊維材料には、日本板ガラス (株) 製のマイクログラスYEA5001

(綾織, アラミノシラン処理) を用いた。その厚さは0.48mm、縦方向の引張り強度は2.65KN/25mm、横方向の引張り強度が2.02KN/25mmであった。また、接着剤は、木材接着に汎用されている構造用接着剤で、フェノール・レゾルシノール共縮合樹脂 (以下PRFと略) 接着剤および水性高分子-イソシアネート系樹脂 (以下APIと略) 接着剤の2種類を用いた。

2-2 接着試験

接着剤の塗布量は、木材どうしの接着 (以下W/Wシリーズと記す) では、300g/m²、木材とガラスクロスとの接着 (以下W/Gシリーズと記す) では、200、300、400g/m²の3水準、また、ガラスクロスどうしの接着 (以下G/Gシリーズと記す) では、300、400、500g/m²の3水準とした。圧縮条件は、圧縮圧が0.98MPa、室温で24時間硬化させた。3週間以上養生の後、常態試験 (normal) および促進劣化試験に供した。後者の処理条件は、冷水浸漬処理 (cold water) として、20℃の水中に24時間浸漬後、60℃で24時間乾燥、また、煮沸処理 (boiling water) として、沸騰水中に5時間浸漬後、20℃の水中に1時間浸漬し、さらに60℃で24時間乾燥を行った。

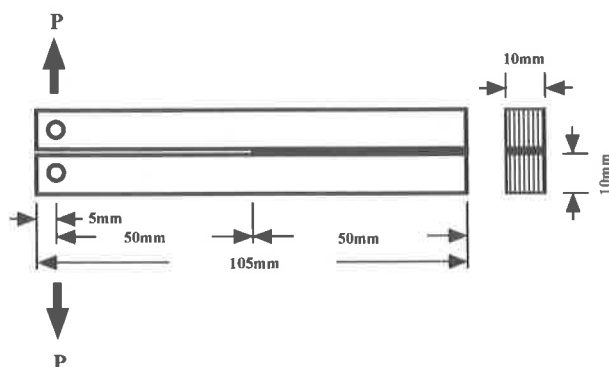


Fig.1 Sample geometry of double-cantilever beam.

引張りせん断接着強さ σ の測定は、JIS K 6851に準拠して行った。また、接着層に関するより多くの知見を得るために、二重片持ち梁 (DCB) の接着層がopening modeによって破壊されるときエネルギー解放率 G_{Ic} (破壊じん性)^{7,8)}を求めた。試片の形状はFig.1のごとくで、接着面を柀目面にし、スペーサーを挿入することで非接着層を得た。

2-3 LVLの製造およびその性能試験

厚さ2mm, および厚さ3mmのアカマツロータリー単板を用いて数タイプの6プライLVLを試作した, これらの層構成と基礎材質をTable 1に示す。積層の際には, 単板の繊維方向とガラスクロス縦方向を一致させた。ここで, 接着剤の塗布量は, 単板間および単板とガラスクロス間で300g/m², ガラスクロス間で400g/m²である。圧縮条件は, 圧縮圧0.98MPa, 室温下で24時間硬化させた。

LVLは曲げ荷重を負担するように使われることが多い, ここでは, 曲げ性能で力学的性質を代表させた。曲げ試験は, 積層方向と平行方向について, スパンを厚さの16倍とし中央集中荷重方式で行った。

割傷に抵抗する性質としてモードIの応力拡大係数 K_{Ic} を実験的に求めた⁹⁾。試験片は, Fig.2に示すような形状, 寸法のCT試験片である。初期クラックを単板の繊維方向と平行に導入し, 最終的に剃刀の刃によって仕上げた。

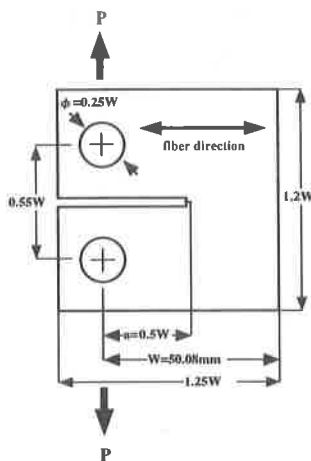


Fig.2. Dimensions of specimen for compact tension method.

Table 1 Constructions and physical properties of tested specimens.

Types of specimens	Adhesives	Thicknesses (mm)		Specific gravities (g/cm ³)		Vf (%)		Constructions
		t=2	t=3	t=2	t=3	t=2	t=3	
Control	PRF	12.14	17.66	0.58	0.52	0.0	0.0	V-V-V-V-V-V
	API	12.05	17.43	0.60	0.50	0.0	0.0	"
A	PRF	12.94	18.74	0.68	0.59	7.4	5.1	V-G-V-V-V-V-G-V
	API	12.81	18.84	0.68	0.62	7.5	5.1	"
B	PRF	13.92	19.63	0.76	0.70	13.8	9.8	V-G-G-V-V-V-V-G-G-V
	API	13.94	19.59	0.75	0.69	13.8	9.8	"
C	PRF	13.67	19.47	0.80	0.67	14.0	9.9	V-G-V-G-V-V-G-V-G-V
	API	13.83	19.58	0.76	0.65	13.9	9.8	"

Legend: V:Veneer, G:Glass cloth, -:Glueline, Vf:Volume fraction of glass cloth, t:Thickness of veneer.

3. 結果および考察

3-1 接着剤の塗布量の検討

Fig.3はPRF接着剤接着剤の塗布量が各接着シリーズにおける σ の接着耐久性に及ぼす影響を示す。また、同様にAPI接着剤の結果をFig.4に示す。両接着剤の σ は、いずれの接着シリーズにおいても促進劣化処理後に減少し、処理の影響が認められる。これは被着材の膨潤・収縮に伴って接着層に発生した内部応力が、接着性能を低下させたためと考えられる。

接着耐久性に及ぼす塗布量の影響は、塗布量の少ない場合に顕著であり、接着強さの残存率は、PRF接着剤接着剤 (塗布量200g/m², 冷水浸漬処理) のW/Gシリーズで85%, API接着剤 (塗布量200g/m², 煮沸処理) のW/Gシリーズで82%, API接着剤 (塗布量300g/m², 冷水浸漬処理) のG/Gシリーズで88%程度であった。

Fig.5はPRF接着剤の塗布量が各接着シリーズにおける G_{Ic} の接着耐久性に及ぼす影響を示す。いずれの接着シリーズでも促進劣化処理後の G_{Ic} はむしろ大きく増加している。ここでは、限界荷重の変化も考慮すると、被着材の影響よりもむしろ煮沸や乾燥によって接着層の強化が生じたと考えられる方が妥当である。先のFig.3に示した σ の変動においては、主に被着材の膨潤・収縮応力の影響が支配的であり、一方、Fig.5の G_{Ic} の変動には接着層の変化が忠実に反映しているものと推察される。

塗布量の影響が顕著なのはG/Gシリーズの煮沸処理の場合で、塗布量の増加と共に G_{Ic} が減少した。高谷らの報告¹⁰⁾によれば、 G_{Ic} は接着層の弾性率と密接な関係にあり、接着層がフレキシビリティに富む領域では G_{Ic} が大きい。本研究で供試したPRF接着剤接着剤は、ガラスクロスへの浸透性が良いものの、その硬化物は硬く脆い。このため、浸透量の増加に伴って接着層がフレキシビリティを失い、 G_{Ic} の低下をきたすものと考えられる。

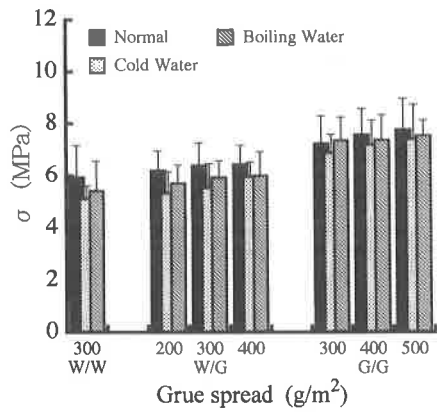


Fig.3 Relationship between adhesive strength σ of phnole-formaldehyde adhesive bonds and grue spread.

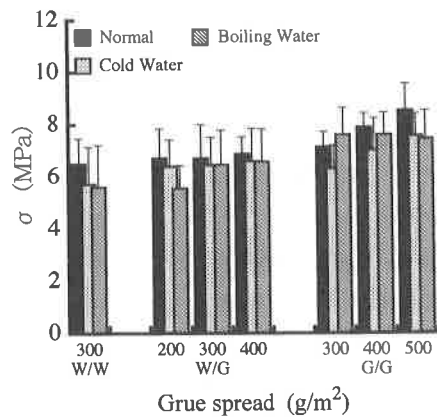


Fig.4 Relationship between adhesive strength σ of aqueous polymer isocyanate adhesive bonds and grue spread.

Fig.6はAPI接着剤の塗布量が各接着シリーズの G_{Ic} の接着耐久性に及ぼす影響を示す。ここではAPI接着剤の G_{Ic} が前述のPRF接着剤の値に比べて約2倍にも達している。既往の報告¹¹⁾¹²⁾¹³⁾にも同様の傾向が見い出せる。これは、ゆるやかに架橋されたAPI接着剤の分子が可動性に富むため、外力による変形に接着層が追従できるためと想像される。

促進劣化処理でW/Gシリーズが G_{Ic} を大きく失うのは塗布量が $200g/m^2$ の場合であるが、塗布量が $300g/m^2$ 、 $400g/m^2$ に増

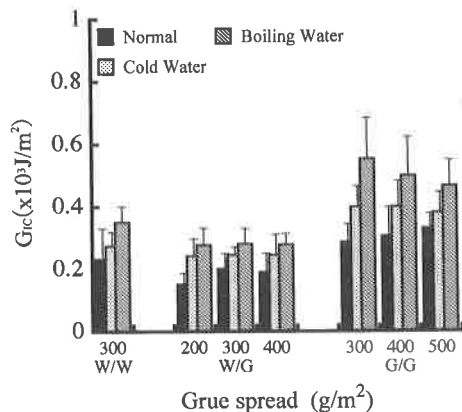


Fig.5 Relationship between fracture toughness G_{Ic} of phnole-formaldehyde adhesive bonds and grue spread.

加すると G_{Ic} は各処理に対して安定してくる。一方、G/Gシリーズの場合、塗布量に関わらず促進劣化処理によって G_{Ic} が減少する。

従来のせん断による接着試験では接着剤の大小関係が判然としなかったが、 G_{Ic} の測定によって各接着剤ごとの特徴を良く表わすことができた。

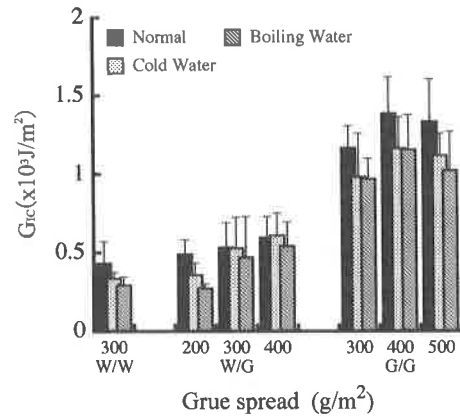


Fig.6 Relationship between fracture toughness G_{Ic} of aqueous polymer isocyanate adhesive bonds and grue spread.

3-2 LVLの曲げ性能

ガラスクロスシートの体積率 V_f とLVLの曲げヤング係数MOE及び曲げ破壊強さMORの関係を、それぞれFig.7、Fig.8に示す。曲げ試験の結果、接着剤の種類によって異なる破壊形態が観察された。PRF接着剤においては、すべての試験体で引張り側の最外層から破壊が発生した。ところが、API接着剤の試験体は、コントロールを除き、単板の裏割れ面が相い接する中央の接着層から水平せん断破壊した。API接着剤の粘度はやや高く、ガラスクロス中へあまり浸透しなかった。そのため、ガラスクロスの強度が十分に発揮されなかった可能性がある。よって、以下では、正常に曲げ破壊したPRF接着剤の結果について考察を進めることとし、API接着剤に関しては結果の図示にとどめた。

MOEは、2mm単板で構成された試験体の場合、 V_f の割合にかかわらずほぼ一定の値を示したが、3mm単板で構成された試験体の場合、 V_f の増加と共に大きく改善され、TypeBで最大1.4倍に達した。このような単板厚さに関する補強効果の相違は、単板の品質に原因している。すなわち、2mm単板で構成された試験体は単板の裏割れが軽微なため、単板の強度とガラスクロスのそれが近く、補強効果が明確に現れなかったものとする。また、ガラスクロスの挿入位置がMOEに及ぼす影響について V_f が同じ割合のTypeBとTypeCで検討したところ、表層近くにガラスクロスが挿入されたTypeBの方が単板厚さに関わらずやや大きな値を示した。

単板厚さごとの V_f とMORの関係は、MOEの場合とはほぼ同様であった。最大の補強効果は、3mm単板で構成された

TypeBで得られ、コントロールに対して1.4倍に改善された。また、ガラスクロスは挿入位置がMORに及ぼす影響はMOEの場合とは反対で、TypeCのようにガラスクロス分散させて挿入した方が効果的であった。

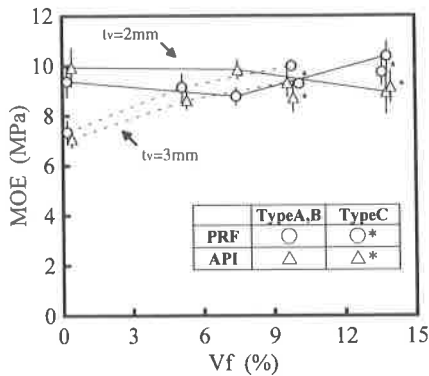


Fig.7 Influence of volume fraction V_f of croth on flexural modulus of elasticity MOE of glassfiber reinforced LVL.

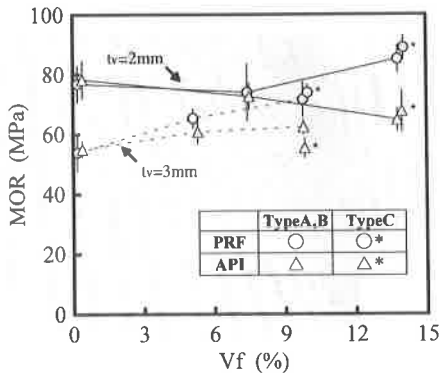


Fig.8 Influence of volume fraction V_f of croth on flexural modulus of rupture MOR of glassfiber reinforced LVL.

3-3 LVLの破壊じん性

実験では、クラックの進展方向(単板の繊維方向)が初期クラックの方向と一致しているのを確認した。Fig.9に示すように、単板厚さを考慮せずとも応力拡大係数 K_{Ic} は体積率 V_f に対してほぼ直線関係にある。コントロールの K_{Ic} は木材素材程度の約 $0.3\text{Mpa}\cdot\text{m}^{1/2}$ と小さかったものの、 V_f の増加に

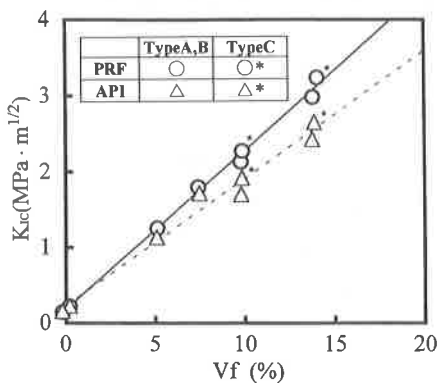


Fig.9 Influence of volume fraction V_f of croth on fracture toughness K_{Ic} of glassfiber reinforced LVL.

比例して K_{Ic} が著しく増加し、わずか数%程度の V_f で $MDF^{(4)}$ に匹敵するじん性が得られた。破壊がガラスクロスの繊維を切断するように進行する様子が観察された。これらのことからガラスクロスの繊維は、クラックの進展を抑制するように働いているものと考えられる。また、接着剤に関してはRF接着剤がAPI接着剤よりも、挿入位置に関してはガラスクロス分散させたTypeCがTypeBよりも、それぞれ K_{Ic} が大きかった。

LVLのじん性を高めるためには、ガラスクロスによる補強が極めて有効であることが示された。

4 結 言

木材とガラスクロスおよびガラスクロスどうしの接着耐久性に及ぼす接着剤塗布量の影響を明かにした。破壊じん性試験の導入により、従来のせん断力による接着力試験に比べて、接着性能の判定に多角的な評価ができた。

この結果をもとに決定された接着条件で、6プライLVLの接着層にガラスクロスを入り、複合したLVLを作製した。この複合LVLにいくつかの優れた特性が見い出された。曲げ性能は、単板の品質や体積率によって様々であるが、最大で1.4倍程度に改善された。

注目すべきは、体積率の増加に伴う K_{Ic} の著しい増加である。クロスによる補強は、LVLの高靱化に極めて有効であることが明らかとなった。

なお、クロスの強度を十分に発揮させるためには、浸透性の良い接着剤の選択が必要と考える。

参考文献

- 1) R.M.Echols,R.A.Currier:For.Prod.J., 23, 45 (1973)
- 2) 有馬孝礼, 大熊幹章:木材工業, 28, 254 (1973)
- 3) Hoyle,Robert J.JR.:For.Prod.J., 25, 17 (1975)
- 4) R.Mark:ibid., 11, 477 (1961)
- 5) S.D.Frank:ibid., 31, 26 (1981)
- 6) R.E.Rowlands,et al.:Wood Fiber Sci., 18, 39 (1986)
- 7) 佐々木光,P.F.Walsh:材料, 26, 453-459 (1977)
- 8) 高谷政広, 浜田良三, 佐々木光:木材学会誌, 30, 124-129 (1984)
- 9) 白鳥正樹, 三好俊郎, 松下久雄:共著 数値破壊力学, 実教出版株式会社, 218-225 (1980)
- 10) 高谷政広, 浜田良三, 佐々木光:木材学会誌,30, 130-138 (1984)
- 11) 鈴木正治, A.P.Schniewind:同上, 30, 60-67 (1984)
- 12) 岩崎徹, 鈴木正治:木材学会誌, 35, 696-702 (1989)
- 13) 本多琢己:第43回日本木材学会大会研究発表要旨集, p287 (1993)
- 14) 佐藤清:木材学会誌, 34, 955-958 (1988)