

フェノール樹脂含浸強化 LVL の層間破壊靱性

本多 琢己

Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Phenolic Resin Impregnated Compressed Laminated Veneer Lumber

Takumi HONDA

Summary : Rotary-cut veneers of akamatu were impregnated with low-molecular weight phenolic resin and pressed into compressed laminated veneer lumber. Mode I interlaminar fracture toughness of compressed laminated veneer lumber is measured using DCB specimens. And also the effects of a wet treatment on interlaminar fracture toughness were investigated.

Following results were obtained: Fracture toughness in an air-dry state was increased with increasing phenolic resin concentration. In case of low phenolic resin concentration, fracture toughness is low, crack growth is stable and in case of high phenolic resin concentration, fracture toughness is high, crack growth is unstable. The DCBs that were dried after the cold water soaking, warm water soaking, and boiling showed larger fracture toughness values than those that were in an air-dry state. The ratio of fracture toughness after boiling/dry cycle treatment for those in an air-dry state was over 80%.

要旨 : 低分子フェノール樹脂溶液に浸漬した単板を積層し、自己接着によって熱圧成型させた強化 LVL を作製した。DCB の形状に加工された試験体についてモード I の層間破壊靱性値を測定した。常態の層間破壊靱性値に及ぼすフェノール樹脂溶液の濃度の影響が認められ、溶液濃度の増加に従ってその値は大きくなる。フェノール樹脂溶液の濃度の高い試験体においては、亀裂が急速に進展する様子が観察され、フェノール樹脂そのもの特徴が出現するようである。次に促進劣化処理前後における層間破壊靱性値の比較から単板間の接着状態を評価した。層間破壊靱性値はフェノール樹脂溶液の濃度に関わらず冷水浸漬、温水浸漬及び煮沸の各処理において増加する。また、煮沸-乾燥処理を繰返した場合においても、層間破壊靱性値は 80% 以上残存している。これらのことから、樹脂含浸単板を熱圧縮する際に形成される接着層は、高い接着信頼性を有しているものと考えられる。

1 はじめに

LVL (単板積層材) は、強度分散の少ない軸材料として高い信頼性を得ている。しかしながら、エレメントの単板には少なからず裏割れが存在するため、素材に比べて割れに係る強度はかなり低い¹⁾。

一方、裏割れが発生すれば、表面積が拡大し、浸透経路が増加することになるから、LVL に裏割れを有する単板を利用すれば、高機能化に必要な高い液体浸透性や樹脂含浸性を確保する点で有利である。さらには、樹脂含浸量の比較的多い単板を圧縮し、その内部から滲出する樹脂によって接着層を形成させることができれば、接着剤を用いることなく自己接着できる可能性がある。ま

た、通常、LVL の製造は、単板に接着剤を塗布する方法で行われるが、裏割れの深さ方向への充填や単板中への浸透に対して十分な樹脂量が確保されとは限らない。これに対して自己接着による方法によれば、圧縮率を高めることで裏割れ開口部の両端をほぼ完全に接着することができるため、荷重の負荷に際しても裏割れの開口が起りにくいと考えられる。

一方、単板間に接着剤を塗布しない本方法においては、単板の樹脂含浸量が少ない場合、連続的な接着界面が形成されにくく、部分的に弱い界面が存在すると考えられ、それが接着耐久性に影響を及ぼす可能性もある。

本研究では、フェノール樹脂含浸単板を自己接着により熱圧成型した強化 LVL について、その単板間の接着性能をモード I 破壊靱性値で評価した。フェノール樹脂

Table 1. Test conditions.

Test	Test procedures	
1 Normal test	20°C 65%RH	
2 Cold water soaking test	20°C 65%RH	→ 20°C cold water 24hr
3 Hot water soaking test	20°C 65%RH	→ 60°C hot water 24hr → 20°C cold water
4 Boil test	20°C 65%RH	→ Boiling water 6hrs → 20°C cold water
5 Boil and dry cycle test	20°C 65%RH	→ Boiling water 4hrs → 60°C 20hrs dry 1,3,5,10cycles

含浸量が層間破壊靱性値に及ぼす影響を検討した。また、冷水浸漬、温水浸漬及び煮沸繰返しなどの促進劣化処理を施し、層間破壊靱性値の変動から接着耐久性について検討した。

2 実験

2.1 試験体の作製

アカマツロータリー単板（厚さ 2 mm、MC=9.9%）を 10%、20%、30%、40%、50%（固形分）に調整した水溶性フェノール樹脂（PX-341、アイカ工業株式会社）溶液中に 1 週間含浸した。以下、濃度 10% のフェノール樹脂溶液での処理を PF 10% のように記す。次式から含浸率を算出した。

含浸率（WPG）%

$$= ((1 \text{ 週間風乾後の重量} - \text{気乾重量}) \times 100 / \text{気乾重量})$$

含浸率は PF 10% で 30.9%、PF 20% で 40.3%、PF 30% で 53.5%、PF 40% で 64.8%、PF 50% で 75.1% であった。単板構成は 10 Ply とし、裏割れ面が中心に向くように積層し、温度 140°C、圧力 1.96 Mpa で 40 min 圧縮し、厚さ 19 mm に圧縮成型した。なお、その際に中心の単板間の一部にテフロンシートを挿入することで非接着層を得た。

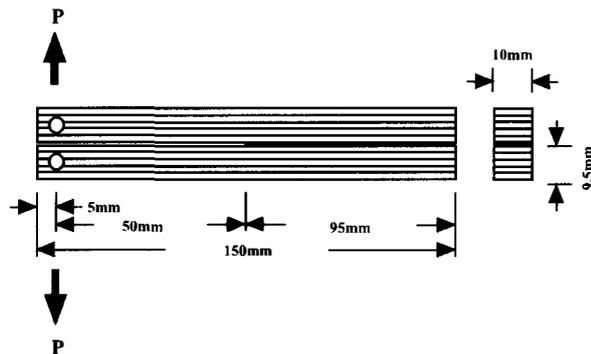


Fig. 1 Sample geometry of double-cantilever beam.

2.2 破壊靱性の測定

Fig.1 に示した全長 150 mm、非接着層 50 mm の DCB 試験体に加工し、荷重速度 1 mm/min でモード I の破壊靱性を測定した。測定は 20°C-65%RH の環境下で行った。破壊靱性 G_{IC} は次の Sasaki-Walsh の式²⁾から算出した。

$$G_{IC} = \frac{Pc \delta c}{2bh} \times \frac{3(\alpha + \beta)^2 + \gamma}{(\alpha + \beta)^3 + \alpha \gamma}$$

ここで Pc : 限界荷重、 δc : 破壊時の開口変位、 b : 試験片の幅、 h : 試験片の厚さ、 α : 非接着層長さ/試験片の厚さ、 β : オフセット定数、 γ : 片持ち梁のせん断変形によるたわみの補正值。

本来であれば異なるフェノール樹脂溶液濃度の LVL に対してそれぞれに定数 β 及び γ を検討する必要があるが、ここでは相対的な比較を行うことを目的としたので、高谷らの報告³⁾を参照し、 $\beta = 1.3$ 、 $\gamma = 5.4$ とした。

また、同じ濃度のフェノール樹脂溶液で処理した単板で構成された被着体の力学的性質は同一とみなせるため、同じ濃度のグループ内で比較する場合は、上記の点は問題にならない。

2.3 接着耐久性試験

常態試験に加え冷水浸漬、温水浸漬、煮沸および煮沸繰返しなどの処理を行い促進劣化させた。各処理条件を Table.1 に示す。

3 結果及び考察

3.1 アカマツロータリー単板に対するフェノール樹脂の含浸性

Fig.2 に含浸時間とフェノール樹脂含浸率の関係をフェノール樹脂溶液の濃度ごとに示す。

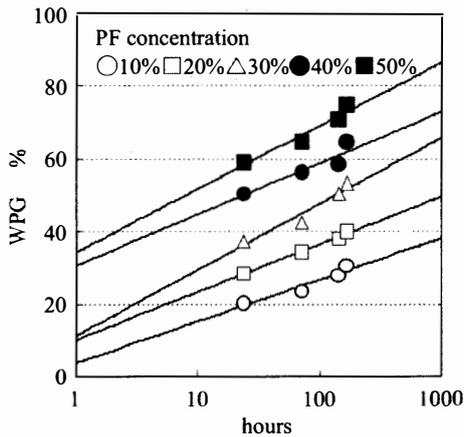


Fig. 2 WPG vs Soaking times.

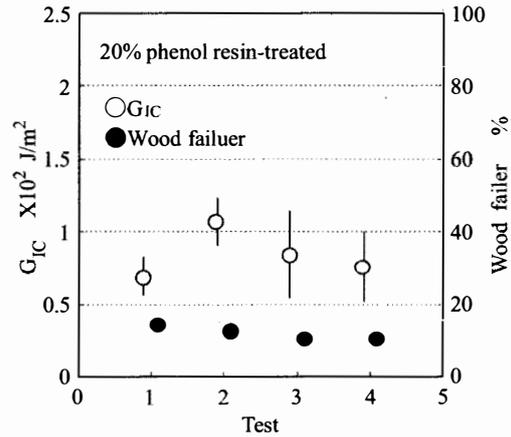


Fig. 5 G_{IC} vs Test.

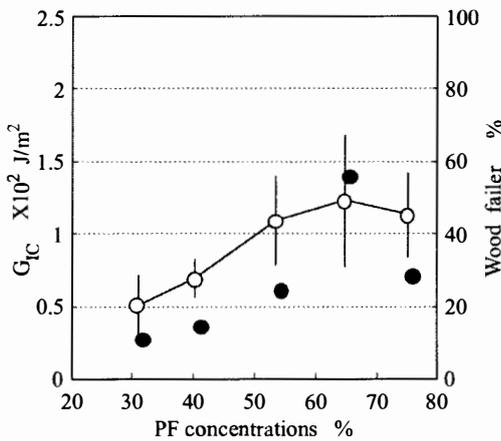


Fig. 3 G_{IC} vs PF concentrations.

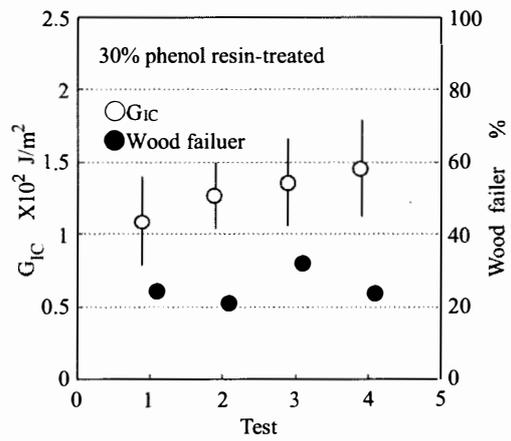


Fig. 6 G_{IC} vs Test.

3.2 フェノール樹脂含浸量と層間破壊靱性

Fig.3 にフェノール樹脂溶液の処理濃度に対するフェノール強化 LVL の常態試験における層間破壊靱性 G_{IC} と木破率を示す。 G_{IC} に及ぼす WPG の影響が認められ、 G_{IC} はフェノール樹脂溶液の濃度の増加に従って大きく

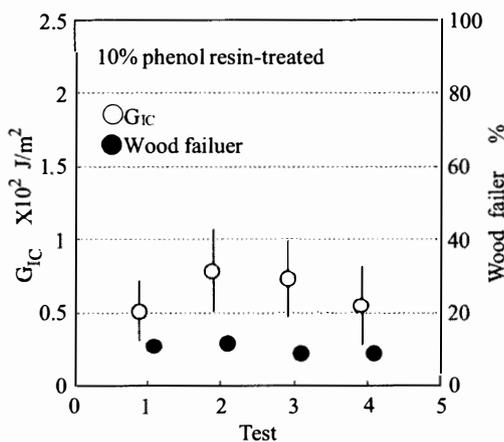


Fig. 4 G_{IC} vs Test.

なり、PF 40% で最大値を示し、PF 10% の約 2.5 倍になる。また、一般的に木破の出現はロータリー単板の部位の影響を受けるため、バラツキは大きい。

3.3 フェノール樹脂含浸量と接着耐久性

Fig.4~Fig.8 にフェノール樹脂溶液の濃度ごとに作製した DCB 試験片の Table.1 に示す冷水浸漬試験 (Test 2)、温水浸漬試験 (Test 3) および煮沸試験 (Test 4) に対する G_{IC} と木破率を示す。Fig.4 は PF 10% の場合で、木破率は減少するもののいずれの処理に対しても G_{IC} は Test 1 と同程度かそれ以上に大きい。Test 1 に対し 5% 有意水準で差が認められるのは Test 2 の冷水浸漬処理で、Test 1 の G_{IC} よりも大きい。Fig.5 が PF 20% の場合で、木破率は減少するもののいずれの処理に対しても G_{IC} は Test 1 と同程度かそれ以上に大きい。Test 1 に対し 5% 有意水準で差が認められるのは Test 2 の冷水浸漬処理で、Test 1 の G_{IC} よりも大きい。Fig.6 が PF 30% の場合で、木破率は減少するもののいずれの処理に対し

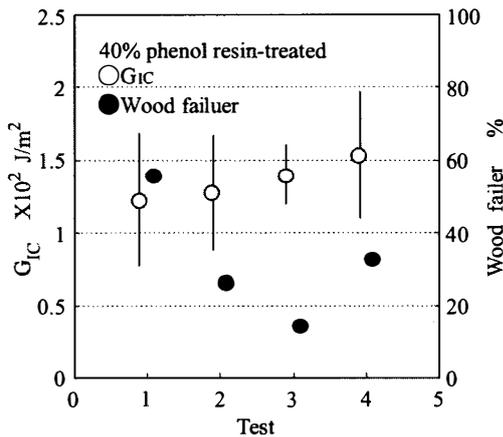


Fig. 7 G_{IC} vs Test.

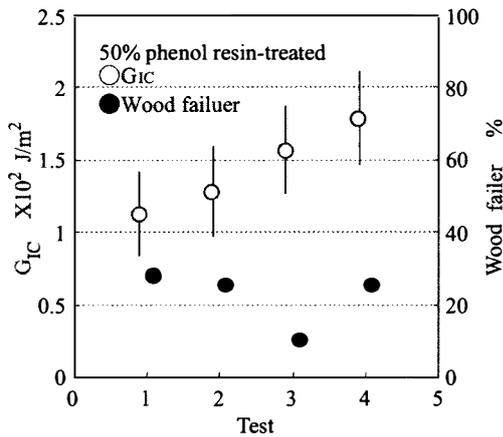


Fig. 8 G_{IC} vs Test.

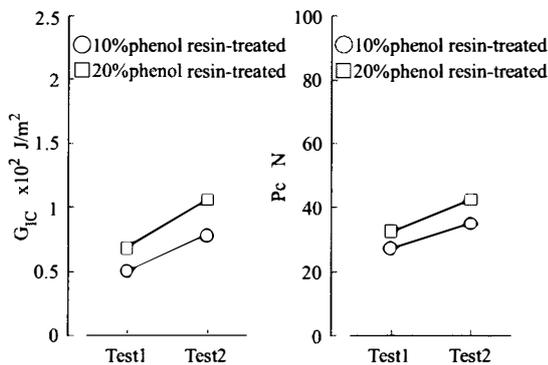


Fig. 9 G_{IC} and Pc of phenolic resin impregnated LVL in cold water soaking (test 2).

ても G_{IC} は Test 1 と同程度かそれ以上に大きい。Test 1 に対し 5% 有意水準で差が認められるのは Test 3 の温水漬浸処理および Test 4 の煮沸処理で、Test 1 の G_{IC} よりも大きい。Fig.7 が PF 40% の場合で、木破率は減少するもののいずれの処理に対しても G_{IC} は Test 1 と同程度かそれ以上に大きい。Fig.8 が PF 50% の場合で、

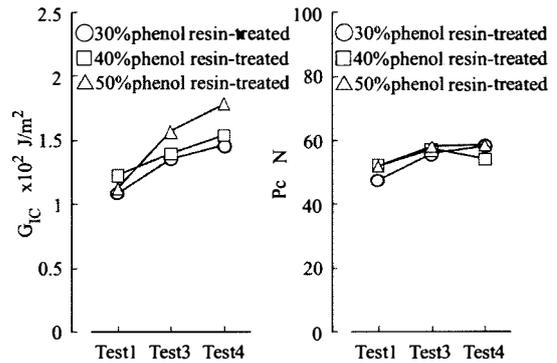


Fig. 10 G_{IC} and Pc of phenolic resin impregnated LVL in hot water soaking (test 3), boil (test 4).

木破率は減少するもののいずれの処理に対しても G_{IC} は Test 1 と同程度かそれ以上に大きい。Test 1 に対し 5% 有意水準で差が認められたのは Test 3 の温水漬浸処理および Test 4 の煮沸処理で、Test 1 の G_{IC} よりも大きい。

ここで Test 1 に対し 5% 有意水準で差が認められる処理もしくは有意差は認められないが大きく変動した処理に関して、G_{IC} の変動を限界荷重 Pc も考慮に入れながら考察する。Fig.9 が PF 10% および PF 20% の場合で、限界荷重 Pc も増加しているが冷水処理で後硬化したとは考えられず、圧縮成型過程で蓄積された接着系の内部応力が解放されたためと思われる。Fig.10 が PF 30%、PF 40% および PF 50% の場合で、限界荷重 Pc も増加しており、被着体の強化のみならず後硬化により接着層が補強されたと考えるのが妥当である。

3.4 フェノール樹脂含浸量と G_{IC} 残存率

Fig.11~Fig.15 にフェノール樹脂溶液の処理濃度ごとに作製した DCB 試験片の Table.1 に示す煮沸返し試験 (Test 5) におけるサイクル数に対する G_{IC} と木破率を示す。Fig.11 が PF 10% の場合で、Fig.12 が PF 20% の場合で、Fig.13 が PF 30% の場合で、Fig.14 が PF 40% の場合で、Fig.15 が PF 50% の場合である。フェノール樹脂溶液の各濃度に共通して、G_{IC} の値は 1 サイクル目の処理で大きくなり、その後はサイクル数の増加に対し漸減するように変動する。Fig.16 にフェノール樹脂溶液の処理濃度ごとに作製した DCB 試験片の煮沸返し 10 サイクル後の G_{IC} の残存率 (未処理の G_{IC} に対する割合) を示す。PF 10%、PF 20%、PF 30% および PF 40% の試験体において、G_{IC} は 90% 以上の極めて高い残存率を示す。一方、PF 50% の試験体でも G_{IC} は 80% 程度の残存率を示すものの、Test 1 に対し 5% の有意

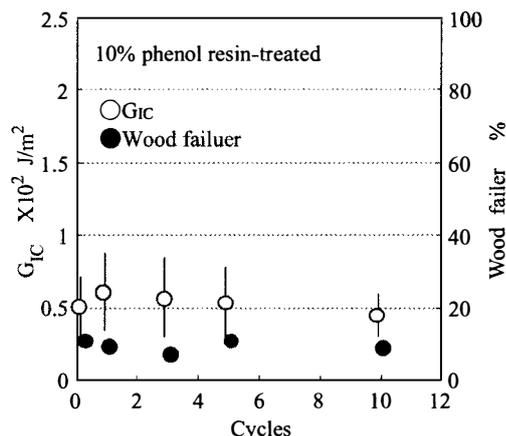


Fig. 11 G_{IC} vs cycles.

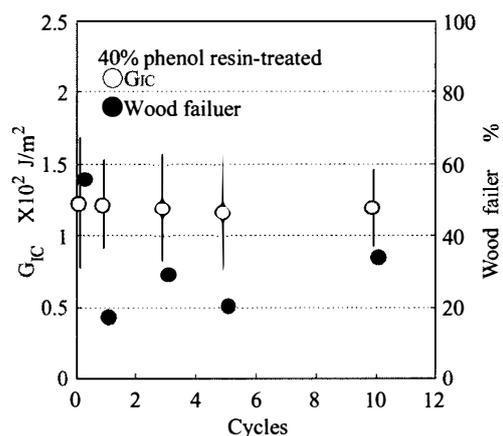


Fig. 14 G_{IC} vs cycles.

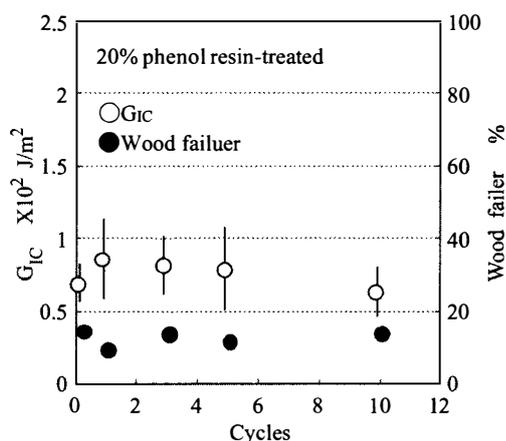


Fig. 12 G_{IC} vs cycles.

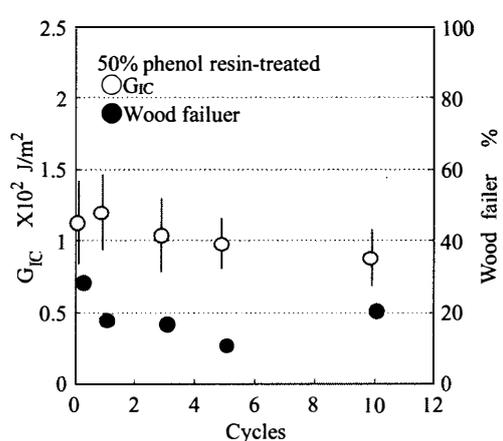


Fig. 15 G_{IC} vs cycles.

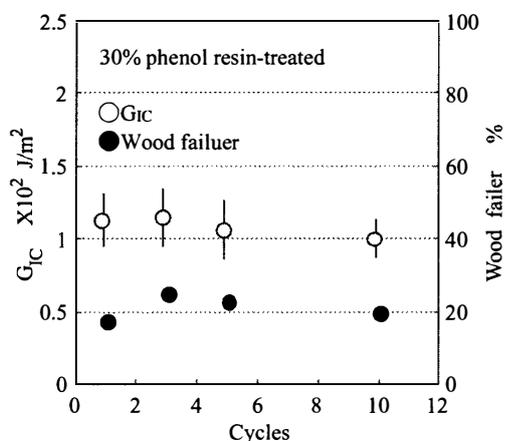


Fig. 13 G_{IC} vs cycles.

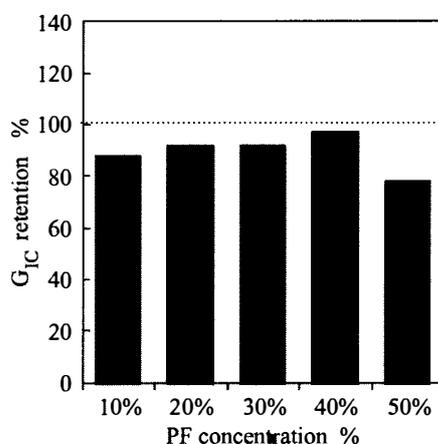


Fig. 16 G_{IC} retention after boil and dry cycle test of 10 cycles.

水準で差が認められる。PF 50%の試験体では、フェノール樹脂含浸量が80%以上にも達していることから、フェノール樹脂そのものの性質が支配的になり、熱膨張-乾

燥収縮の繰り返しに伴って生じた接着系の内部応力が、 G_{IC} を低下させたと考えられる。

PF 40%の試験体の破壊形態は、他の試験体に見られ

るような分離型の破壊とは異なる。すなわち、破壊は予亀裂の先端から開始し、亀裂の成長に伴って単板中を進展するようになり、最終的に隣接する接着層に達する。破壊面にはシアリップの部分が多く現れ、塑性変形に要する仕事が多くなる。そのため他の試験体に比べて木部破断の割合が大きく、 G_{IC} 残存率が高かったものと考えられる。

4 ま と め

フェノール樹脂含浸単板を自己接着により熱圧成型した強化LVLについて、その単板間の接着性能をモード

I破壊靱性値で評価した。フェノール樹脂含浸量が層間破壊靱性値に及ぼす影響を明らかにした。冷水浸漬、温水浸漬及び煮沸繰返しなどの促進劣化処理を施し、層間破壊靱性値の変動から接着耐久性について考察した。

引用文献

- 1) R. M. Echols, R. A. Currier : For. Prod. J, 23, 45 (1973)
- 2) 佐々木光, P. F. Walsh : 材料, 26, 453-459 (1977)
- 3) 高谷政広, 浜田良三, 佐々木光, : 木材学会誌, 30, 124-138(1984)