

単板積層板のモード I 破壊靱性

本多 琢 己

Mode I Fracture Toughness of Laminated Veneer Boards

Takumi HONDA

Summary : Rotary-cut veneers of akamatsu were impregnated with low-molecular weight phenolic resin and pressed into compressed laminated veneer Boards(LVB). Two types of compositions were applied to manufacturing LVB:

Type A. The outer layer veneer was placed at an angle of $45^\circ, 90^\circ$ to the inner layers.

Type B. The inner layer veneer was placed at an angle of $45^\circ, 90^\circ$ to the outer layers .

The effects of reinforcing insert orientations, positions and members of veneer on fracture toughness of the compressed LVB were investigated. Mode I critical stress intensity factors K_{IC} is evaluated using CT specimens.

Following results were obtained: The K_{IC} is of all the boards became greater in direct proportion as the insert orientations became greater. In case of high angle, crack growth is stable, and delamination occurs in the veneers laid in parallel to the fiber direction. Type A board had the K_{IC} values larger than those of Type B board. For the specimen with a crack perpendicular to the interface, the longer arresting time at the interface is observed for a crack propagating from the veneers layer to the wood layer.

要旨 : 本研究ではフェノール樹脂含浸強化 LVL において、一部の単板の挿入角度を変化させた試験体 (LVB) を作製し、き裂進展の抑制に対する有効性を検討した。試験片の圧縮率に関わらずに、挿入角度が大きいくほど、 K_{IC} は大きくなる。また、挿入角度 $\theta = 45^\circ$ の試験片の場合、挿入位置を分散させた方が K_{IC} は大きく、圧縮率の高い試験片ほど顕著である。 θ が $0^\circ \rightarrow 90^\circ$ の順序でせん断型の破壊に移行し、分離型の破壊を起こしにくくなる。き裂が単板と木材の境界を垂直に伝搬するときは、き裂の進展は単板部分と木材部分で別々に始まる。すなわち、 K_{IC} の低い単板部分からき裂が進展するが、抑止力が働いてき裂の停止を生ずる。き裂の進展が木材部分に達すると、試験片全体が一気に分離するように破壊する。

1 はじめに

針葉樹 LVL においては、その構成単板に存在する裏割れが繊維方向の割裂強度¹⁾や、破壊靱性値 (応力拡大係数、 K_{IC})²⁾に影響を及ぼす。これまで、針葉樹 LVL に関して、繊維方向の低靱性を補強することを目的に異なる視点から複合化を行ってきた。ガラスファイバークロス強化 LVL は、LVL の表面・接着層にガラスファイバークロスを積層・挿入した複合材料であり、単板のき裂先端における応力集中の分散並びにき裂進展の抑制に主眼が置かれている²⁾。この材料においては K_{IC} がガラ

スファイバークロスの複合位置ならびに単板のき裂進展方向に対する挿入角度の影響を受ける³⁾。もう一方のフェノール樹脂含浸強化 LVL は、低分子フェノール樹脂を含浸したアカマツロータリー単板を用い、圧密成型により自己接着 (接着剤を用いない) させた複合材料であり、密度を増加させて強靱化を図ることに主眼が置かれている⁴⁾。この材料においては K_{IC} がフェノール樹脂含浸量および圧縮率の影響を受ける^{4) 5)}。

以上のことから、針葉樹 LVL の裏割れに起因するき裂進展の抑制に対しては、ガラスクロスファイバの代わりに直交単板を挿入しても同様の効果があるものと想定される。

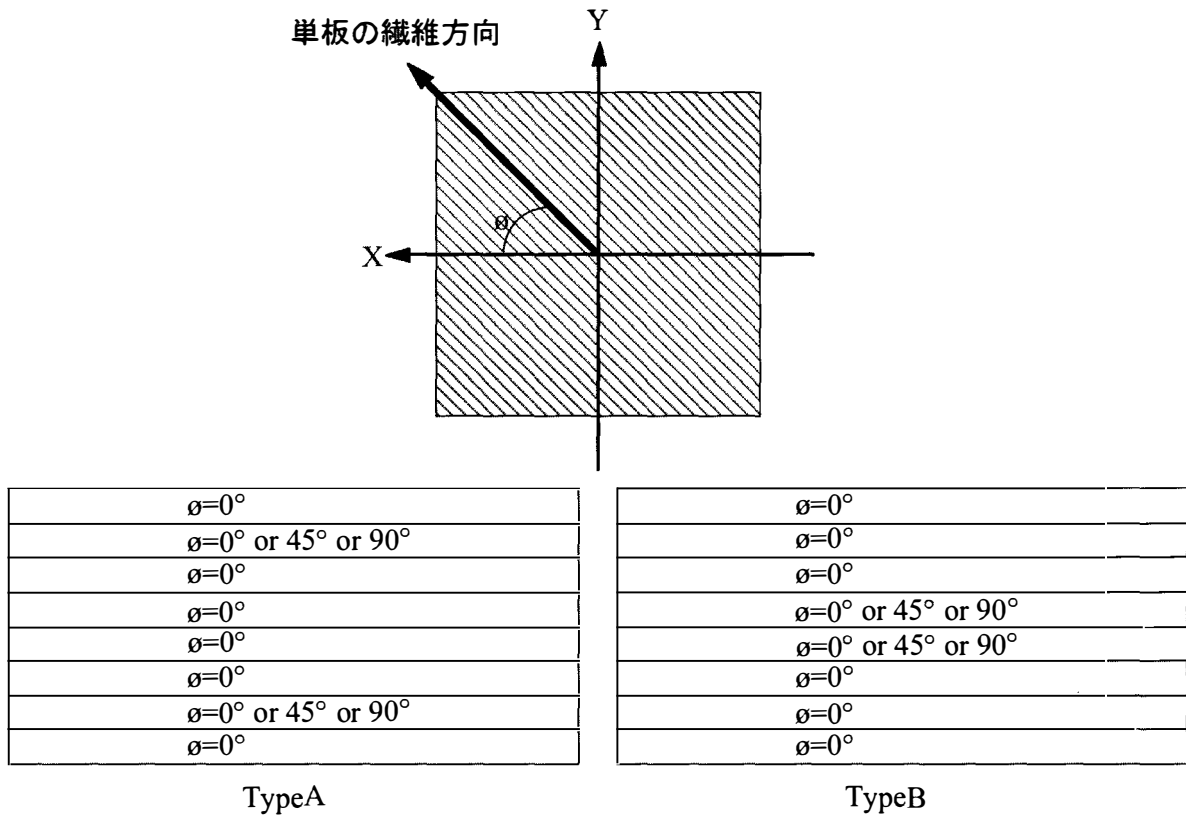


Fig.1 単板積層板の構成

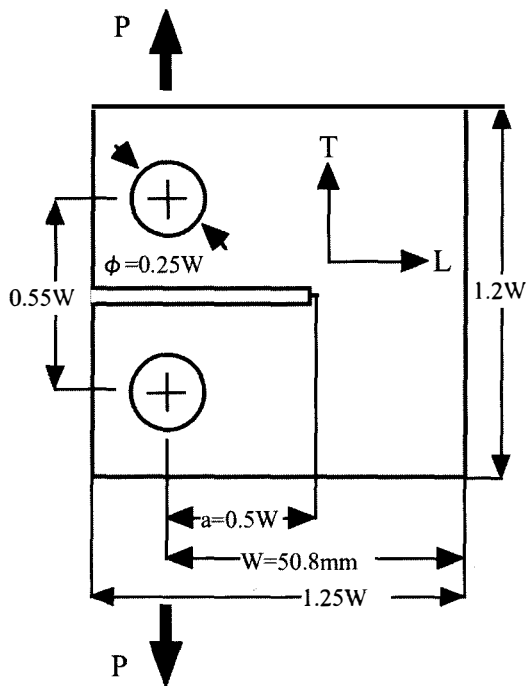


Fig.2 破壊靱性測定用の試験片の形状と寸法

そこで、本研究ではフェノール樹脂含浸強化 LVL において、一部の単板の挿入角度を変化させた試験体 (LVB) を作製し、き裂進展の抑制に対する有効性を検討した。

また、フェノール樹脂含浸強化 LVL の軽量化を図るためには、材料全体の K_{Ic} と構成基材の板厚方向における K_{Ic} 分布との関係を把握する必要がある。そこで、素材の心材に含浸単板の表面材を積層したモデル試験体を作製し、試験体全体の K_{Ic} に及ぼす心材の厚さおよび表面材の積層数の影響を検討した。

2 実 験

2.1 試験片の作製

2.1.1 フェノール樹脂含浸 LVL の作製

アカマツロータリー単板 (厚さ 2 mm、MC = 9.9%) を 30% (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。含浸率 (WPG) は 53.5% であった。なお、WPG は以下の式から算出した。

含浸率 (WPG) %

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

単板構成は 8 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 15.5 mm (圧縮率 (Cr) = 3%)、12 mm (Cr = 25%)、8 mm (Cr = 50%) に圧縮成型した。単板間には特に接着剤を塗布しなかった (自己接着)。Fig.1 に示したように挿入位置の異なる TypeA および TypeB の試験片を作製し、表面単板の繊維方向に対して単板の挿入角度 (θ) を 0°、45° および 90° に変化させた。

2.1.2 フェノール樹脂含浸単板積層木材の作製

フェノール樹脂含浸強化 LVL は厚さ方向に圧縮成型されている特性上、表層部分の密度が内部に比べより大きく、 K_{Ic} が密度に比例することを考慮すれば、厚さ方向に対し K_{Ic} の分布が生じているものと推定される。厚さ方向の K_{Ic} 分布が材料全体の K_{Ic} に影響を及ぼすと考えられるが、これまで検討されていないようである。これに関する実験データを得るため本研究では、 K_{Ic} 値の異なる材料を用いて、表層から内層へ向かうにつれて K_{Ic} 値が大きくなるように構成されたフェノール樹脂含浸単板積層木材をモデル材料として供試した。前記のフェノール樹脂含浸単板を厚さ 5 mm および 10 mm のアカマツ柱目板の両面に繊維方向が互いに平行になるように 1、2 および 3 枚積層した。同時圧縮方式とし、温度 140°C、圧力 0.98 Mpa で 40 min 間圧縮した。単板間および単板と木材の間には特に接着剤を塗布しなかった (自己接着)。

2.2 破壊靱性試験

Fig.2 に示した寸法・形状のコンパクト・テンション用試験片を 1 条件につき 10 片作製した。破壊靱性試験は、TL システムのモード I の場合について行い、クロスヘッドスピードを 1 mm/min とし、ピンロード方式により負荷した。限界荷重は Load-COD 曲線から PQ 法によって決定し、 K_{Ic} を算出⁶⁾した。なお、測定は 20°C、65%RH の恒温恒湿室中で行った。ただし、フェノール樹脂含浸単板積層木材の試験片においては、フェノール含浸単板の部分は TL モードの負荷であるのに対し、木材の部分は RL モードの負荷である。また、木材部分の年輪幅のほぼ中心に初期き裂を導入した。

3 結果及び考察

3.1 フェノール樹脂含浸 LVL の K_{Ic} に及ぼす挿入角度・位置の影響

Fig.3~Fig.5 には、フェノール樹脂含浸 LVL について、単板の挿入角度および位置を変化させた場合の K_{Ic} の結果を示す。Fig.3 は圧縮率 Cr = 3%、Fig.4 は圧縮率 Cr = 25%、また Fig.5 は圧縮率 Cr = 50% の場合である。試験片の圧縮率に関わらず挿入角度の K_{Ic} に及ぼす影響が認められ、挿入角度が大きいほど K_{Ic} は大きい。また、挿入角度 $\theta = 45^\circ$ の試験片においては圧縮率に関わらず挿入位置の K_{Ic} に及ぼす影響が認められ、挿入位置を分散させた TypeA の K_{Ic} は挿入位置を集中させた TypeB のそれよりも大きく、その差は圧縮率の高い試験片ほど顕著である。一方、挿入角度 $\theta = 0^\circ$ および 90° の試験片の場合、挿入位置の影響は認められない。Fig.6 に巨視的破面の様相を示す。 θ が 0° → 90° の順序で平面応力状態に近くなり、せん断型の破壊に移行する。これに伴い塑性変型に要する仕事が多くなり、また分離型の破壊を起こしにくくなるため、破壊靱性は増加すると考えられる。

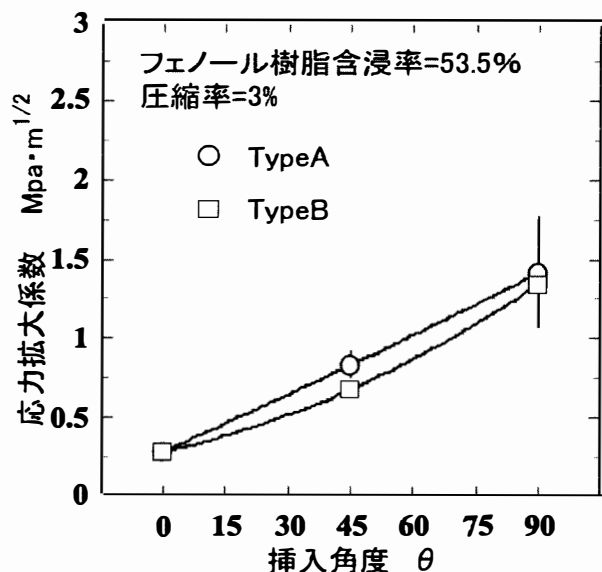


Fig.3 単板の挿入角度と応力拡大係数の関係 (圧縮率3%)

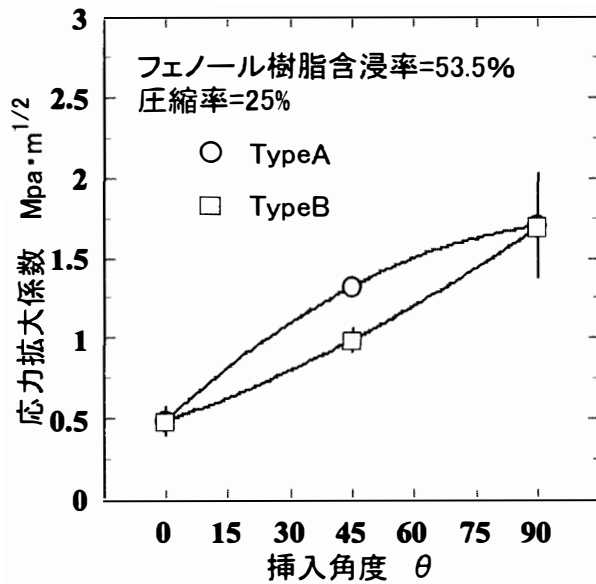


Fig.4 単板の挿入角度と応力拡大係数の関係 (圧縮率25%)

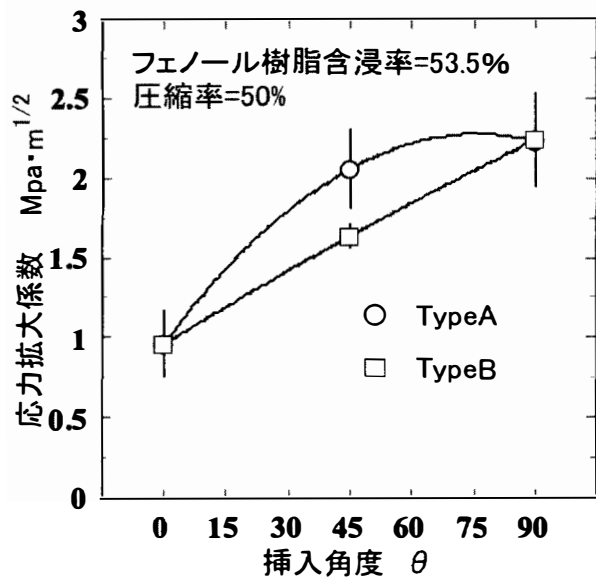


Fig.5 単板の挿入角度と応力拡大係数の関係 (圧縮率50%)

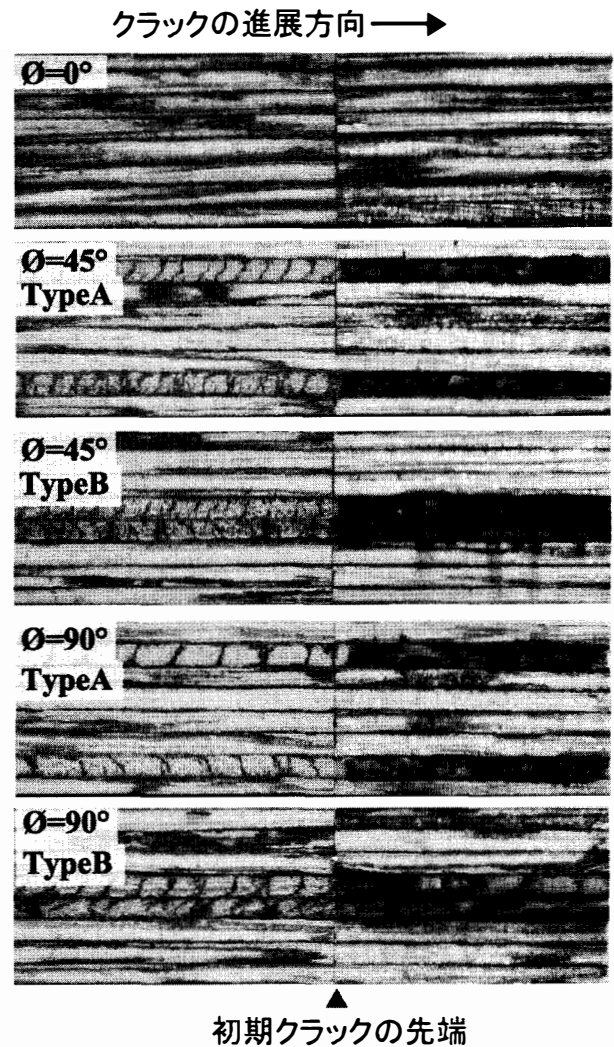


Fig.6 単板積層板の破壊靱性試験後の破面

3.2 フェノール樹脂含浸単板積層木材の K_{Ic} に及ぼす積層数の影響

フェノール樹脂含浸単板積層木材における単板積層数の増加に対する K_{Ic} の変化を Fig.7 に示す。木材の厚さが 10 mm の試験片を○印で、5 mm の試験片を□印で示した。フェノール樹脂含浸単板の K_{Ic} は木材のそれよりも小さいため、フェノール樹脂含浸単板積層木材の K_{Ic} は単板積層数の増加に伴って減少した。試験終了後の巨視的破面の一例として 10 mm 厚の板に単板 2 枚を積層した試験片を Fig.8 に示す。破断面は主応力軸にほぼ垂直であった。き裂の進展は単板部分と木材部分で別々に始まった。すなわち、 K_{Ic} の低い単板部分からき裂が進展するが、抑止力が働いてき裂の停止を生ずる。き裂の進展が木材部分に達すると、試験片全体が一気に分離

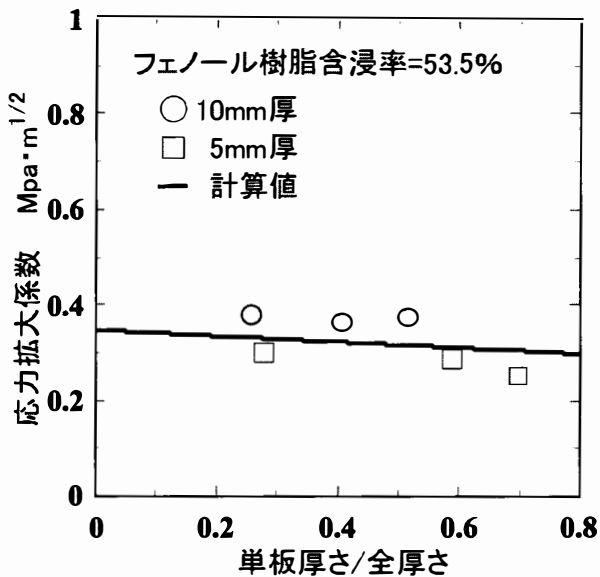


Fig.7 単板の積層割合が応力拡大係数に及ぼす影響

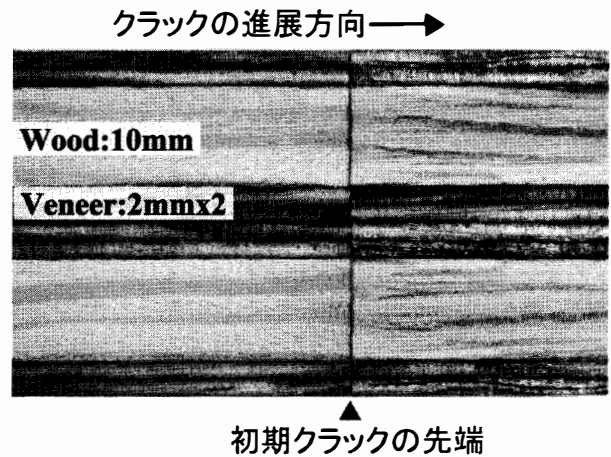


Fig.8 単板積層木材の破壊靱性試験後の破面

するように破壊する。

ここで、複合系の引張ヤング係数に関する複合則⁷⁾がフェノール樹脂含浸単板積層木材の K_{IC} にも適応できるものとして、次式による推定を試みた。

$$K_{IC} = \frac{T_v}{(T_v + T_w)} \times K_{IC,v} + \frac{T_w}{(T_v + T_w)} \times K_{IC,w}$$

ここに、 T_v ：フェノール樹脂含浸単板の厚さ

T_w ：コア木材の厚さ

$K_{IC,v}$ ：フェノール樹脂含浸単板の K_{IC}

$K_{IC,w}$ ：コア木材の K_{IC}

である。

なお、 T_w は熱圧縮に際してほとんど減少しないものと見なし、試験片全体の厚さから T_w をマイナスした値を T_v とした。また、 $K_{IC,v}$ 値では $C_r = 3\%$ の試験片の K_{IC} 値を用いた。Fig.7 に計算値を測定値とともに示す。10 mm 厚のアカマツ板を用いた試験片においては、測定値が計算値を上まわる。一方、5 mm 厚のアカマツ板を用いた試験片においては、測定値が計算値を下まわる。

材料のき裂先端では試験片厚により平面応力状態か平面ひずみ状態となるが、き裂先端で生じる厚さに対する

塑性域寸法は平面応力状態の方が平面ひずみ状態よりも大きく、しかもその塑性域の大きさが K_{IC} 値に影響を及ぼすとされている⁸⁾。また、ある材料の最小の K_{IC} は、平面ひずみ状態のときに得られるから、平面ひずみ K_{IC} が設計上重要な意味を持つ。ところが本研究の 5 mm 厚の板を用いた試験片の場合、試験片の厚さが十分に大きくなく、平面ひずみ状態となる条件を満足していなかった可能性がある。平面ひずみ状態で破壊が生じるように試験片寸法を設計することなど、 K_{IC} 値の算出に際し精度向上のため検討すべき点が残された。

4 ま と め

低分子フェノール樹脂を含浸したアカマツロータリー単板を用い自己接着（接着剤を用いない）により熱圧成型する方法で強化 LVL を作製し、単板の挿入角度および位置と破壊靱性との関係を調べ、き裂の進展を抑制する効果を検討した。また、素材の心材に含浸単板の表面材を積層したモデル試験体を作製し、試験体全体の破壊靱性に及ぼす心材の厚さおよび表面材の積層数の影響を調べた。

引用文献

- 1) R. M. Echols, R. A. Currier: For. Prod. J, 23, 45 (1973)
- 2) 本多琢己, 佐野正明: 山梨県工業技術センター研究報告, 12, 16-19 (1998)
- 3) 本多琢己, 佐野正明: 山梨県工業技術センター研究報告, 13, 24-28 (1999)
- 4) 本多琢己: 平成 15 年度山梨県森林総合研究所事業報告, 48-49 (2004)
- 5) 本多琢己: 平成 16 年度山梨県森林総合研究所事業報告, 36-37 (2004)
- 6) 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, 東京, 1980, pp. 218-225.
- 7) Nielsen, L. E.: "高分子と複合材料の力学的性質", 化学同人, 京都, 1976, p. 279.
- 8) 小林英男著: "破壊力学", 共立出版株式会社, 東京, 1993, pp. 104-107.