

フェノール樹脂含浸強化 LVL の破壊靱性

本多 琢 己

Fracture toughness of phenolic resin impregnated
compressed laminated veneer lumber

Takumi HONDA

Summary : Rotary-cut veneers of akamatsu were impregnated with low-molecular weight phenolic resin and pressed into compressed laminated veneer lumber (LVL). The effects of phenolic resin concentration and compression rate on fracture toughness of the compressed LVL were investigated. Mode I critical stress intensity factors K_{Ic} is evaluated using CT specimens

Following results were obtained: The K_{Ic} values of the compressed LVL increased with increasing compression rate. The compressed LVL made from the veneer with high phenolic resin concentration is excellent in fracture toughness, even if compression rate is equal. When veneers impregnated with phenolic resin were compressed into LVL, fracture toughness is improved best. 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.

要旨 : 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、破壊靱性に及ぼすフェノール樹脂含浸率および圧縮率の影響を調べた結果、以下のことが明らかとなった。

1. 破壊靱性は圧縮率の増加に対してほぼ直線的に増大することが認められた。また、圧縮率が同じ場合、高濃度のフェノール樹脂水溶液に漬浸した単板を用いて作製した方が破壊靱性に優れている。
2. 単板に対する樹脂含浸処理だけでは破壊靱性の改良がほとんど期待できないことから、さらに圧密化も併せて行う必要がある。
3. フェノール樹脂水溶液濃度が低い含浸処理（樹脂含浸率が低い）では、破壊靱性は低いが破壊は安定しており、荷重の急激な低下がおこらずにねばり強い破壊過程をたどる。一方、フェノール樹脂水溶液濃度が高い含浸処理（樹脂含浸率が高い）では、破壊靱性そのものは高いが、急激な破面の進展がみられ、不安定な破壊過程をたどる。

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²⁾に影響を及ぼす。これまで針葉樹 LVL における繊維方向の低靱性の改良を目的に、LVL の表面・接着層にガラスファイバークロスを積層・挿入したガラスファイバークロス強化 LVL の試作を行ってきた²⁾³⁾。その際には、単板の亀裂先端への応力集中を分散し、かつ亀裂の進展を抑制することにより強靱化を図ることに主眼を置いた。この方法によれば、破壊靱性値の値を常法によ

り作製した LVL に対して数倍大きくすることが可能であった。また、ガラスファイバークロス強化 LVL の破壊靱性値はガラスファイバークロスの複合位置ならびに単板の亀裂進展方向に対する挿入角度の影響を受けることが明らかとなった。一方、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、圧縮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る⁴⁾。樹脂含浸率や圧縮率などの条件にもよるが、その比重は 0.5 から 1.3 程度に達する。一般的に木材の破壊靱性値は主に比重に依存する。このため、フェノール樹脂含浸強化 LVL においては、圧縮成型による高密度化に伴う破壊靱性値の増大

が期待される。

本研究では、針葉樹 LVL において比重を高めることにより破壊靱性をどのくらい改良できるのかを調べた。フェノール樹脂による単板の含浸処理に加え、熱圧縮する際に横方向に圧縮変形を与えて圧密化を行い、樹脂含浸率および圧縮率が LVL のモード I 破壊靱性に及ぼす影響を検討した。さらに、応力-開口変位線図、破壊面の目視観察結果などを考察し、破壊靱性の発現メカニズムについて総合的に検討した。

2 実験

2.1 フェノール樹脂含浸強化 LVL 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% および 50% (固形分) に調整したフェノール樹脂 (PX-341、アイカ工業株式会社) 水溶液中に 1 週間浸漬し、フェノール樹脂含浸単板を得た。次式から含浸率を算出した。

含浸率 (WPG) %

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

含浸率はフェノール樹脂溶液の濃度の低い順にそれぞれ 30.9%、40.3%、53.5%、64.8% および 75.1% であった。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、

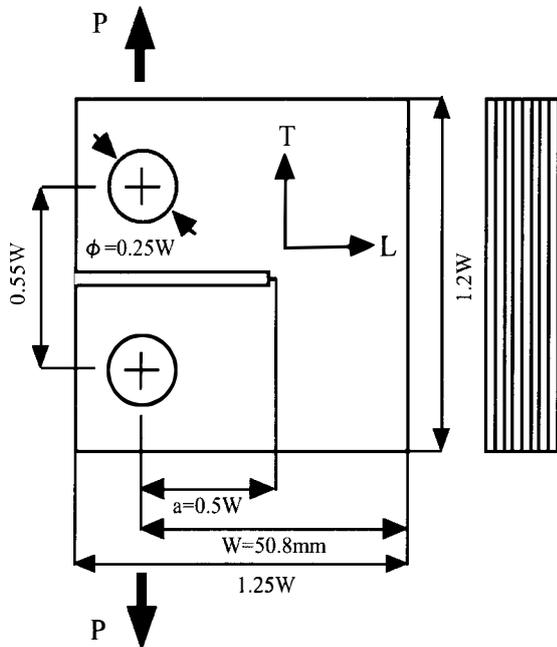


Fig.1 破壊靱性測定用の試験片の形状と寸法

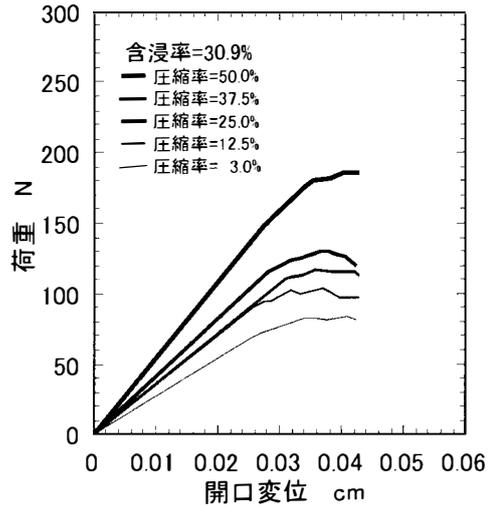


Fig.2 破壊靱性試験における荷重-開口変位曲線 (含浸率=30.9%)

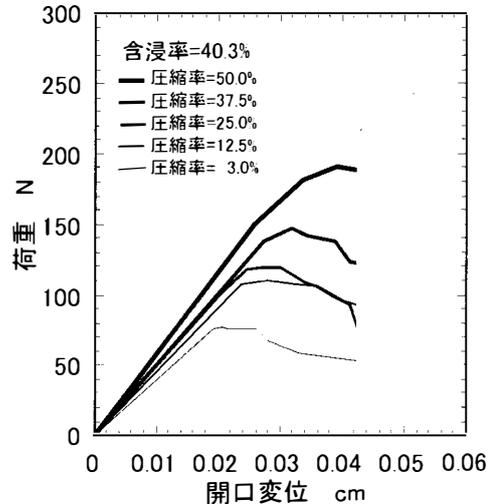


Fig.3 破壊靱性試験における荷重-開口変位曲線 (含浸率=40.3%)

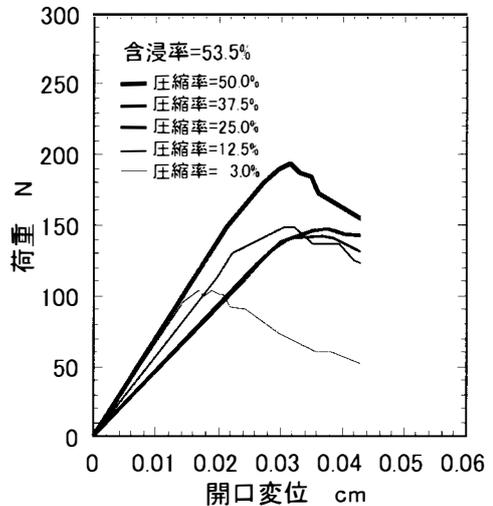


Fig.4 破壊靱性試験における荷重-開口変位曲線 (含浸率=53.5%)

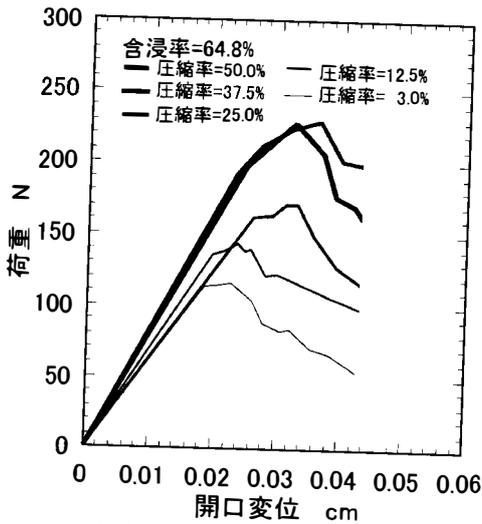


Fig.5 破壊靱性試験における荷重-開口変位曲線(含浸率=64.8%)

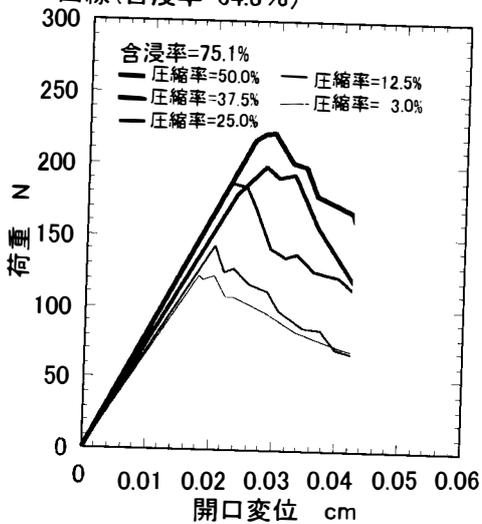


Fig.6 破壊靱性試験における荷重-開口変位曲線(含浸率=30.9%)

厚さ 15.5 mm (圧縮率=3%)、14 mm (圧縮率=12.5%)、12 mm (圧縮率=25%)、10 mm (圧縮率=37.5%) および 8 mm (圧縮率=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)。

2.2 破壊靱性試験

Fig.1 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。初期き裂は単板の繊維方向と平行になるように導入した。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接線方向に負荷した。荷重-開口変位曲線(ナイフェッジにおけるクリップゲージ開口変位(COD))から PQ 法によりき裂進展開始時の荷重 P_Q を決定し、応力拡大係数 (K_{Ic}) を算出⁵⁾した。

3 結果及び考察

3.1 フェノール樹脂含浸強化LVLの破壊靱性試験におけるP-COD曲線

破壊靱性試験における典型的な P-COD (荷重-開口変位) 曲線を WPG (含浸率) の低い方から順にそれぞれ Fig. 2 ~ Fig. 6 に示す。これらの図の特徴的な点は次のごとくである。(1) 圧縮率が高い場合の曲線の立ち上がりは低い場合のそれよりも急な傾斜を持っている。(2) WPG が 30.9% および 40.3% の場合、ピークが小刻みで不明瞭となり、P-COD 図は全体としてなだらかに見える。また、破面の進行と共に COD の増加が著しいが、荷重の急激な低下はおこらず、ねばり強い破壊過程をたどる。(3) WPG が 53.5% 以上の場合、最大荷重が高く、P-COD 図はシャープなピークを示す。また、急激な破面の進展がみられ、不安定な破壊過程をたどる。

Table.1 破壊靱性試験における破壊開始時の平均開口変位

含浸率	平均開口変位 COD_{av} (cm $\times 10^{-2}$)				
	圧縮率=3.0%	圧縮率=12.5%	圧縮率=25.0%	圧縮率=37.5%	圧縮率=50.0%
30.9%	2.42	2.52	2.66	3.38	3.36
40.3%	1.95	2.23	2.58	3.01	3.04
53.5%	1.63	2.45	3.06	3.35	2.67
64.8%	1.84	2.02	2.34	2.59	2.89
75.1%	2.02	2.03	2.56	2.77	2.87

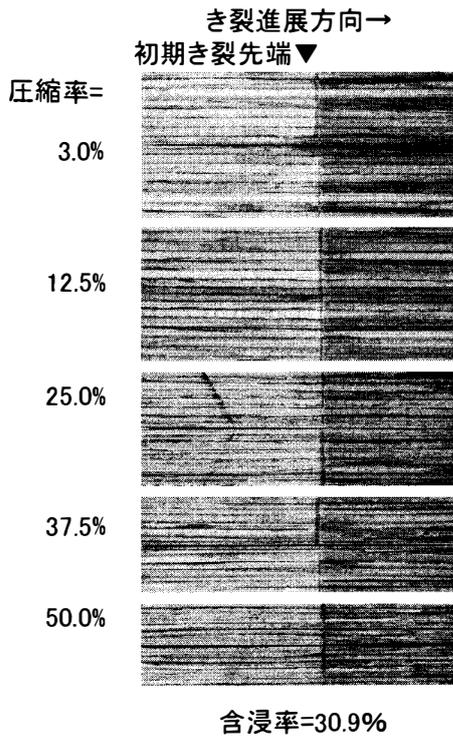


Fig.7 破壊靱性試験後の破面
(含浸率=30.9%)

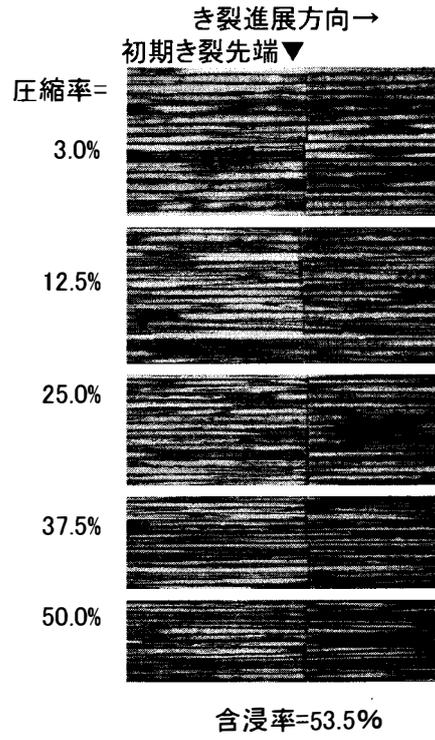


Fig.9 破壊靱性試験後の破面
(含浸率=53.5%)

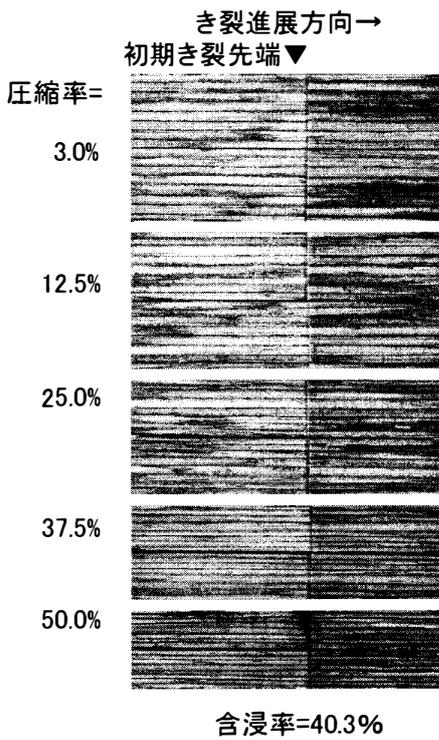


Fig.8 破壊靱性試験後の破面
(含浸率=40.3%)

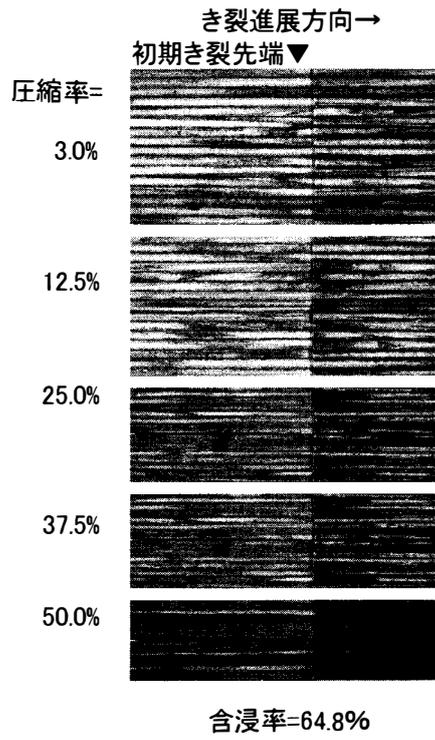


Fig.10 破壊靱性試験後の破面
(含浸率=64.8%)

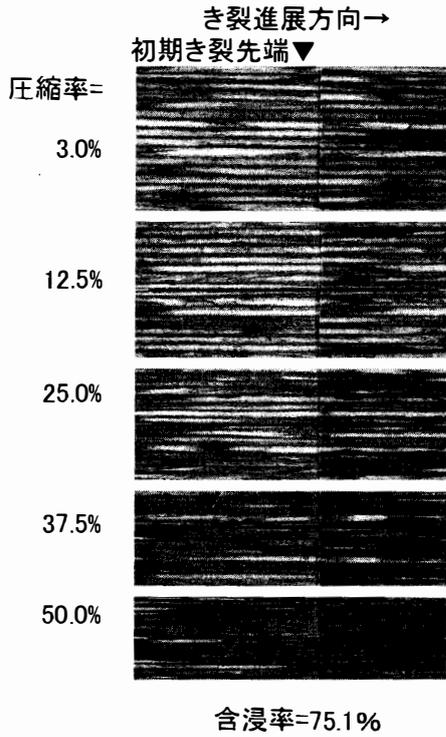


Fig.11 破壊靱性試験後の破面 (含浸率=75.1%)

(4) K_{Ic} を計算するとき用いる荷重 P_Q は、初期段階における線形域の勾配より 5% 低い勾配の直線と P-COD 曲線の交点における荷重 P_s に等しい。

破壊靱性試験における破壊開始時の開口変位の平均値 (COD_{av}) を Table. 1 に示す。WPG が 53.5% の場合を除いて、圧縮率が高い試験体ほど COD_{av} が大きくなる傾向を示す。

Table. 2 応力拡大係数の回帰直線における傾き

含浸率	SLc ¹⁾ (Mpa·m ^{1/2})	圧縮率	SLw ²⁾ (Mpa·m ^{1/2})
30.9%	1.14	3.0%	0.38
40.3%	1.40	12.5%	0.39
53.5%	1.38	25.0%	0.70
64.8%	1.61	37.5%	0.93
75.1%	1.84	50.0%	0.94

1) 応力拡大係数に対する圧縮率の回帰直線の傾き。
2) 応力拡大係数に対する含浸率の回帰直線の傾き。

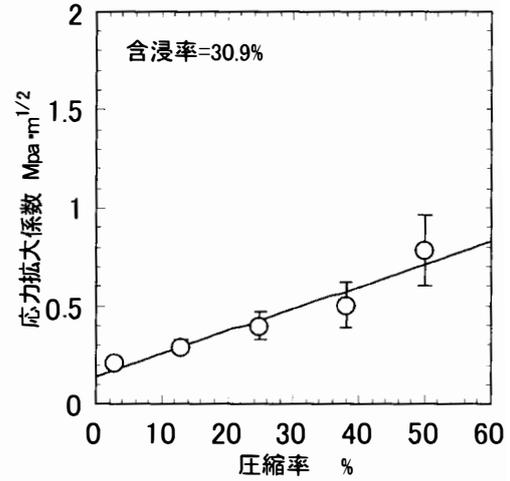


Fig.12 モード I 応力拡大係数と圧縮率の関係 (含浸率=30.9%)

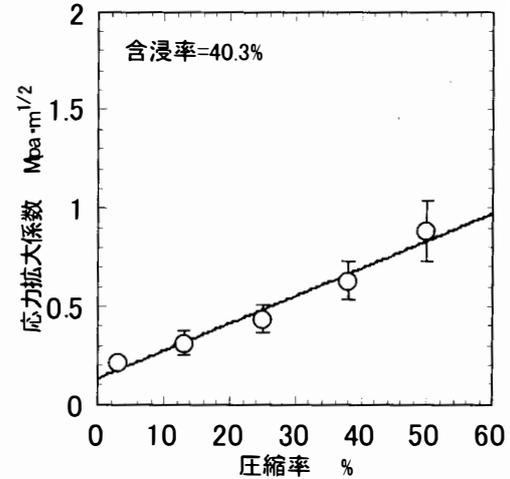


Fig.13 モード I 応力拡大係数と圧縮率の関係 (含浸率=40.3%)

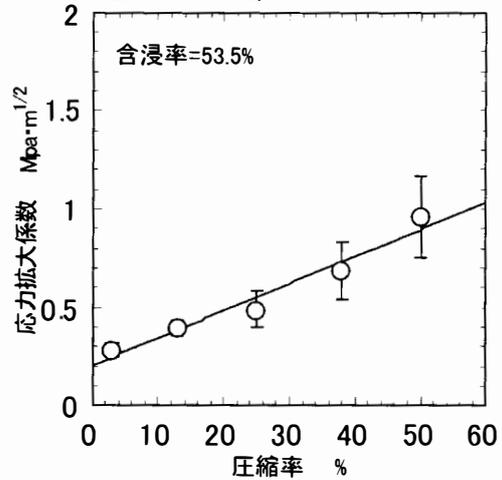


Fig.14 モード I 応力拡大係数と圧縮率の関係 (含浸率=53.5%)

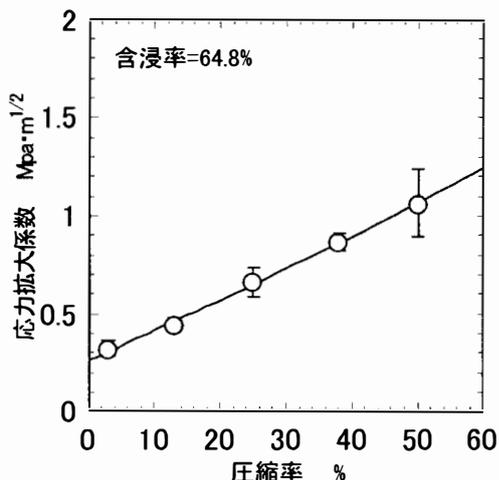


Fig.15 モード I 応力拡大係数と圧縮率の関係 (含浸率=64.8%)

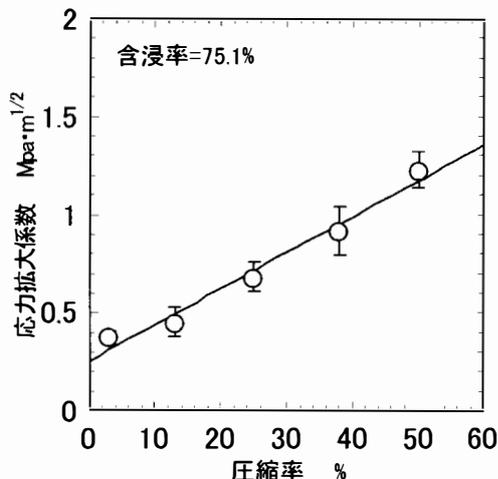


Fig.16 モード I 応力拡大係数と圧縮率の関係 (含浸率=75.1%)

3.2 フェノール樹脂含浸強化 LVL の破壊靱性試験後の破面観察

破壊靱性試験後のマクロ破面の一例を WPG (含浸率) の低い方から順にそれぞれ Fig. 7～Fig. 11 に示す。初期き裂の先端から破壊が進展し、破面は負荷方向にほぼ垂直 (L 方向) となる。WPG が低い場合は、き裂が進展して繊維に沿った剥離を起こす。その時、繊維の引き抜きを伴うため破面には凹凸があり、やや毛羽立っているように見える。このように WPG の低いフェノール樹脂含浸強化 LVL の材質は一般的な針葉樹 LVL のそれに近いと考えられる。一方、WPG が 53.5% 以上の場合、破面はプラスチック様を呈している。

3.3 フェノール樹脂含浸強化 LVL の K_{Ic} に及ぼす圧縮率の影響

K_{Ic} (応力拡大係数) と圧縮率の関係を WPG (含浸率) の低い方から順にそれぞれ Fig. 12～Fig. 16 に示す。フェノール樹脂含浸強化 LVL の K_{Ic} は WPG に関わらず圧縮率が高いほど大きい。また、圧縮率が同じ試験体でも K_{Ic} は WPG が高いほど大きい。フェノール・レゾルシノール樹脂接着剤を用いて常法により作製した 8 Ply LVL の K_{Ic} が $0.3 \text{ Mpa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 程度であることを考慮すれば、 K_{Ic} を改良するには樹脂の含浸だけでは不十分であり、さらに圧密化も行う必要がある。

Fig. 12～Fig. 16 から明らかなように K_{Ic} と圧縮率の関係はほぼ直線関係 ($R_y^2 = 0.93 \sim 0.99$) になる。 K_{Ic} に対する圧縮率の一次回帰直線を WPG ごとに求め、その回帰直線の傾き (SLc) を Table. 2 に示す。SLc は圧縮率に対する K_{Ic} の増分と同じである。SLc は WPG の増加に従って大きくなる傾向を示す。一方、 K_{Ic} と WPG の関係もほぼ直線関係 ($R_y^2 = 0.94 \sim 0.99$) になる。 K_{Ic} に対する WPG の一次回帰直線を圧縮率ごとに求め、その回帰直線の傾き (SLw) を Table. 2 に示す。SLw は WPG に対する K_{Ic} の増分と同じである。SLw は圧縮率の増加に従って大きくなる傾向を示す。

フェノール樹脂含浸強化 LVL の破壊靱性に及ぼす成型時の圧縮率の影響について以下のように整理した。アカマツ材のような中比重の木材では、細胞壁の剥離に関わる靱性は細胞壁の割れに基づく靱性よりも低いと考えられる。そのため、き裂の進展は主に細胞壁の剥離に支配され、き裂の伝播は細胞壁の割れだけでなく細胞壁の剥離を伴うものと推定される。ここでアカマツ材を R 方向に圧縮すると、細胞内腔が減少し圧縮方向における単位面積当たりの細胞壁量が増加するため比重が高くなる。比重は圧縮率の増加に比例して高くなることから、単純に考えれば比重に依存する K_{Ic} もその分だけ増加するはずである。ところが、高圧縮率 (圧縮率が 25.0% 以上) で成型する場合には、細胞壁が塑性降伏により不均一破壊を起こし、その分だけ細胞壁の割れに基づく靱性が低下するため、 K_{Ic} にも少なからぬ影響を及ぼすものと考えられる。しかし、試験体の WPG が高いほど、木材中でフェノール樹脂が可塑剤としてより効果的に機能するようになり、圧縮成型する際でも細胞壁などの損傷が少なくなる。また、裏割れ部分へのフェノール樹脂の充填量も増加するため単板の補強効果も高くなる。こ

のことから、WPGが高くかつ圧縮率の高い試験体において K_{ic} が著しく向上するのは、厚さ方向(R方向)の単位面積当たりの細胞壁量の増加ならびに細胞壁の剥離に関わる靱性および細胞壁の割れに基づく靱性の向上に加え、細胞内腔中のフェノール樹脂硬化物の靱性の寄与によるためと考えられる。

これに対して、低圧縮率(圧縮率が12.5%以下)で成型する場合には、試験体の厚さ方向における単位面積当たりの細胞壁量はそれほど増加しないため、圧縮すること自体の K_{ic} に対する改良効果は小さい。しかし、WPGの増加に伴い細胞内腔、細胞壁および細胞間層には、より多くのフェノール樹脂が充填されるようになる。その結果、細胞壁の割れに基づく靱性と細胞壁の剥離に関わる靱性は、相互の大小関係を保ちながら増加し、さらにそこへ細胞内腔中のフェノール樹脂硬化物の靱性も加算されることになる。それゆえ圧縮率の低い試験体の K_{ic} の値は主としてフェノール樹脂硬化物の靱性に依存し、その度合いはWPGの増加に伴って高くなるのではなかろうか。

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、破壊靱性に及ぼすフェノール樹脂含浸量および圧縮率の影響を明らかにした。

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: 山梨県森林総合研究所研究報告, 26, 43-48 (2006)
- 5) 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).