

屋外暴露試験における破壊じん性を指標とした LVL の耐久性評価

本多 琢己

Evaluation of Compressed Laminated Veneer Lumber Durability using Fracture Toughness after outdoor exposure Test.

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 durability of LVL was evaluated by the fracture toughness after outdoor exposure test. The outdoor test started in November 2009 and run November 2011. The test samples were removed after 12, 24, and 36 months of exposure. Mode I critical stress intensity factors K_{Ic} is evaluated using compact tension specimens after reconditioning. The K_{Ic} of all specimens decreased with increasing cycles. The thickness swelling of specimens with resin concentration below 20% increased with increasing exposure months. On the other hand, those of specimens with resin concentration above 30% only slightly increased with increasing exposure months. In this article, the K_{Ic} retentions are defined as follows: K_{Ic} retention (%) = (K_{Ic} after exposure/ K_{Ic} for control samples) x 100. The Durability was evaluated with the half destruction period in initial value ration 50%. The exposure times at the K_{Ic} retention 50% of all specimens was more than 30 months except for the specimens compressed to 50% with 10% resin concentration.

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 を作製した。屋外暴露試験における破壊じん性の劣化を指標として、耐久性性能を評価した。屋外暴露試験は、2009年11月に開始し2011年11月まで行った。破壊じん性試験は、TL システムのモード I の場合について行い、応力拡大係数 K_{Ic} を算出した。応力拡大係数はいずれの試験体においても暴露期間の増加に伴って、圧縮率に対する差が縮小するように低下した。厚さ膨潤率は含浸率 53.5% 以上ではほとんど増加が認められなかった。これに対して、含浸率 30.9% - 圧縮率 50% では、全条件中において厚さ膨潤率が最大であった。屋外暴露試験の結果を基に暴露期間と応力拡大係数残存率との関係を求めた。応力拡大係数残存率は試験前の応力拡大係数を 100% として算出した。応力拡大係数残存率が半減、すなわち 50% となるサイクル数は、一部の試験体を除いて 30 ヶ月以上であった。

1 はじめに

フェノール樹脂を含浸した木材や LVL などは重量減少率の改善効果が大いことから、エクステリア製品への応用が期待されている¹⁾。これまで、針葉樹 LVL における繊維方向の低じん性の改良を目的に、低分子フェノール樹脂を含浸した単板を用いて、接着剤を塗布せずに（自己接着）積層・熱圧縮成型する方法によりフェノール樹脂含浸強化 LVL を開発し、その層間接着性²⁾、曲げ強度特性³⁾ および破壊じん性⁴⁾ に及ぼす製造条件の

影響などを総合的に検討してきた。このフェノール樹脂含浸強化 LVL は、樹脂を含浸し、さらに圧密化した材料であるため、屋外など厳しい環境においても変形回復の起きにくいことが望ましい。また、エクステリア用途では釘、木ネジ、ボルト等の接合部を有しており、この周辺に割れなどが発生しやすいと想定される。一般的に木質材料の耐久性の評価は、重量減少や曲げ強度低下などを劣化の指標として行われている。しかしながら、この方法では、割れが発生・進展しやすい状態であるかどうかを評価することはできないと考えられる。

これまでフェノール樹脂含浸強化 LVL に適する新し

い耐久性評価方法の開発を目的に、破壊じん性を指標とする耐久性について促進劣化試験の結果を報告⁵⁾した。

そこで本研究では、フェノール樹脂含浸強化 LVL の耐久性評価を目的に屋外暴露試験を行い、暴露による劣化を破壊じん性を指標として評価した。さらに、屋外暴露による厚さ膨潤率の増加を参考に、破壊じん性の劣化のメカニズムについて考察した。

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

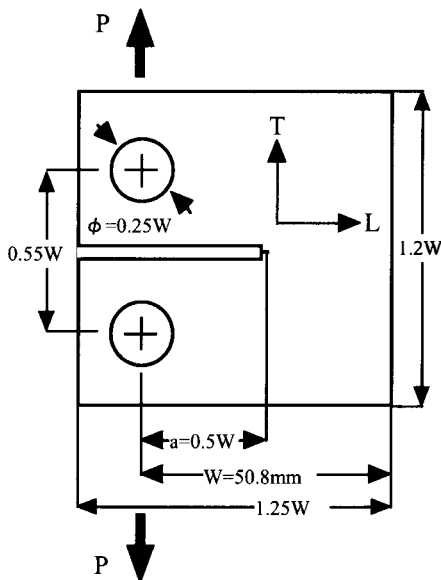


Fig. 1 コンパクトテンション試験の試験片形状

2.2 屋外暴露試験

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。切り欠きは単板の繊維方向と平行になるように導入した。試験片の荷重負荷ピン用の穴に金属製リングを通し、二つのリングを番線に掛けた。水分が停留するよう切り欠き底を水平に設置した。この番線をスチールパイプで組んだ暴露台の地上より約 1 m の位置に固定した。試験片の短辺は南北方向に向けて暴露を行った。暴露台は南面、北面ともに開けた場所に設置し、日当たりおよび風通しも良好であった。暴露開始は 2008 年 11 月であり、暴露月数は 12、24、および 36 ヶ月とした。

所定の暴露期間終了後、暴露台から取り込み 20°C 65%RH の環境下で十分調湿した。最終的に両刃カミソリで切り欠き先端のほぼ中心に約 1 mm の初期き裂を導入し、切り欠き長さを確定した。また、両長辺上において切り欠きの反対側の端部から 1 cm 内部の 2 点を結ぶ直線を基準線とし、この基準線の両端部から 1 cm 内部の 2 点を標点に定め、マイクロメーターで測定した。

2.3 破壊じん性試験

破壊じん性試験は、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 (ナイフエ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 PQ を決定し、応力拡大係数 (K_{Ic}) を算出⁶⁾した。なお、応力拡大係数の算出に当たっては処理後の厚さをを用いた。

3 結果及び考察

3.1 屋外暴露試験におけるフェノール樹脂含浸強化 LVL の厚さの変化

暴露月数の経過に伴う調湿後の厚さ膨潤率の変化を含浸率ごとに Fig. 2、Fig. 3、Fig. 4、Fig. 5 および Fig. 6 に示す。含浸率の大きさによって、暴露月数の経過に伴い厚さ膨潤率が増加する試験体とほとんど変化しない試験体に分かれる。含浸率が 53.5% 以上では厚さ膨潤率の増加がほとんど認められず、特に含浸率が 64.8% と 75.1% の試験体では、36 ヶ月経過後でも僅か 1% 程度である。36 ヶ月経過後の厚さ膨潤率は、含浸率の低い試

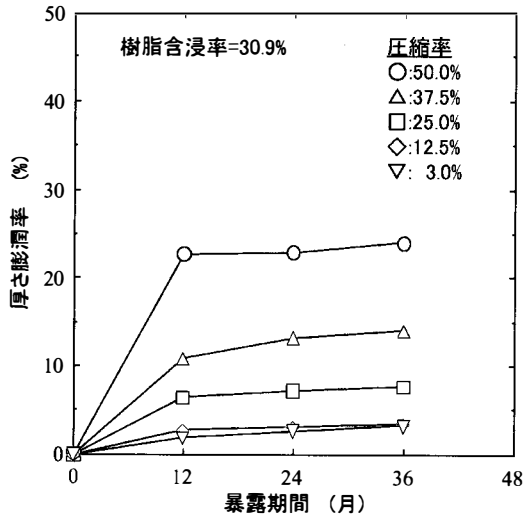


Fig. 2 屋外暴露による厚さの変化

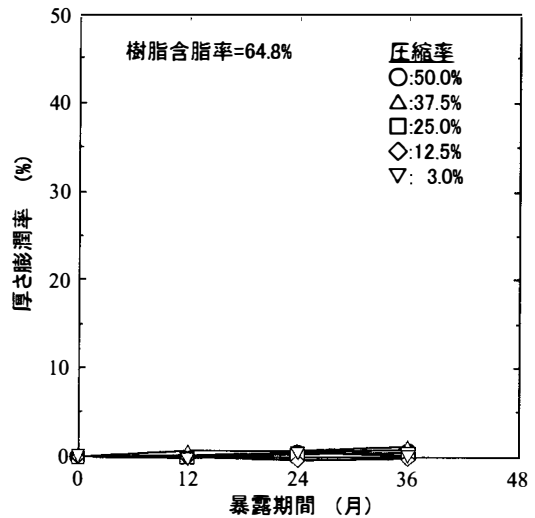


Fig. 5 屋外暴露による厚さの変化

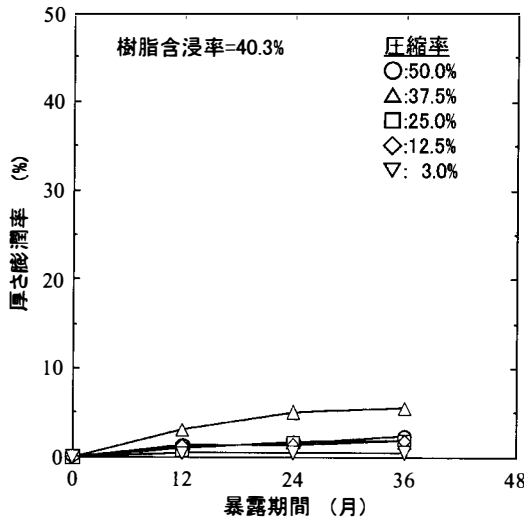


Fig. 3 屋外暴露による厚さの変化

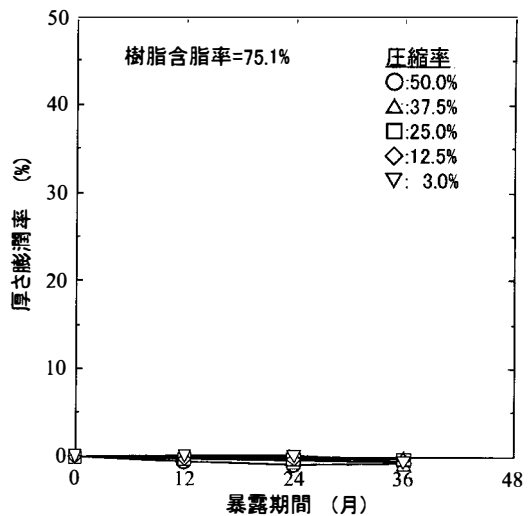


Fig. 6 屋外暴露による厚さの変化

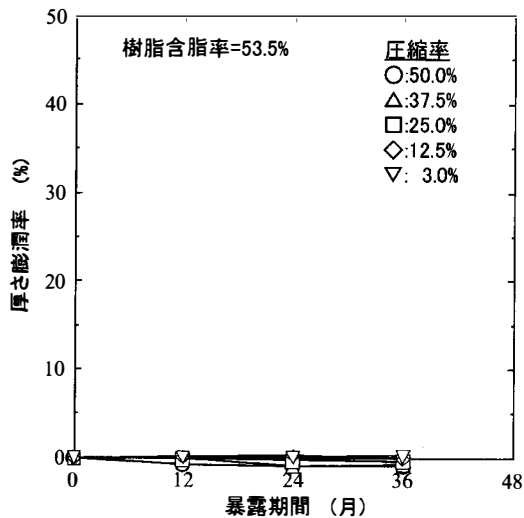


Fig. 4 屋外暴露による厚さの変化

験体ほど大きく、また同じ含浸率でも圧縮率が高い試験体ほど大きい。含浸率 30.9%、圧縮率 50%では、厚さ膨潤率が全条件中で最大となる約 24%にまで達し、著しい変形回復を示す。

なお、目視による観察では、いずれの試験体においても腐朽や単板の剥離などは確認できなかったが、含浸率 40.3%以下で木口の裏割れ幅が広がっているのを確認した。また、含浸率 53.5%以上の場合、やや表面が白化していた。

3.2 屋外暴露試験におけるフェノール樹脂含浸強化 LVL の応力拡大係数の変化

暴露月数の経過に伴う調湿後の応力拡大係数の変化を含浸率ごとに Fig. 7、Fig. 8、Fig. 9、Fig. 10 および Fig.

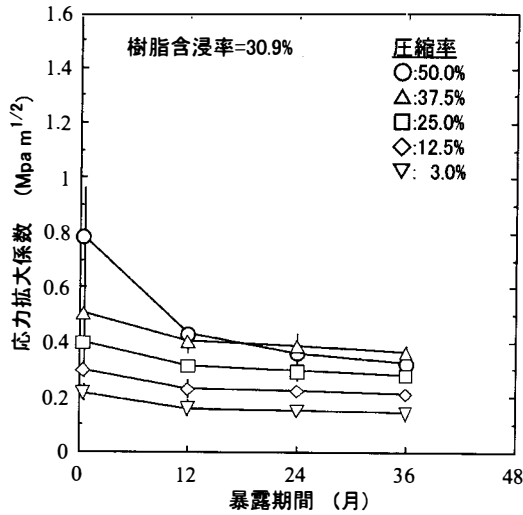


Fig. 7 屋外暴露による応力拡大係数の変化

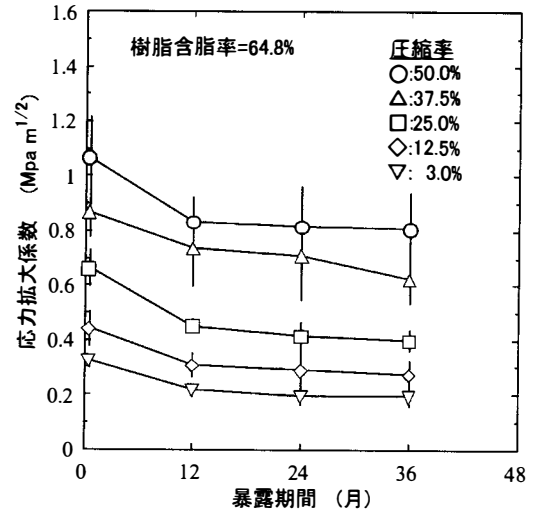


Fig. 10 屋外暴露による応力拡大係数の変化

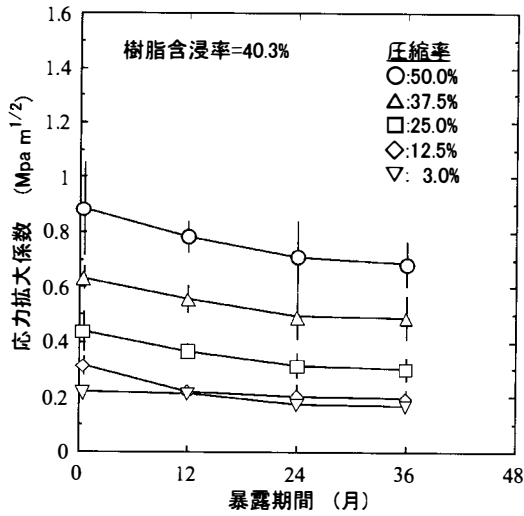


Fig. 8 屋外暴露による応力拡大係数の変化

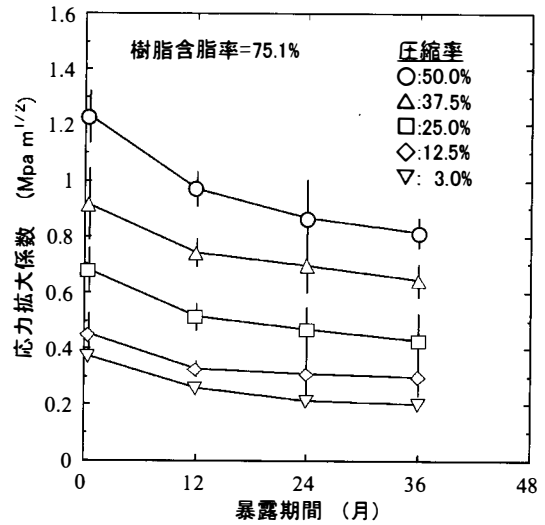


Fig. 11 屋外暴露による応力拡大係数の変化

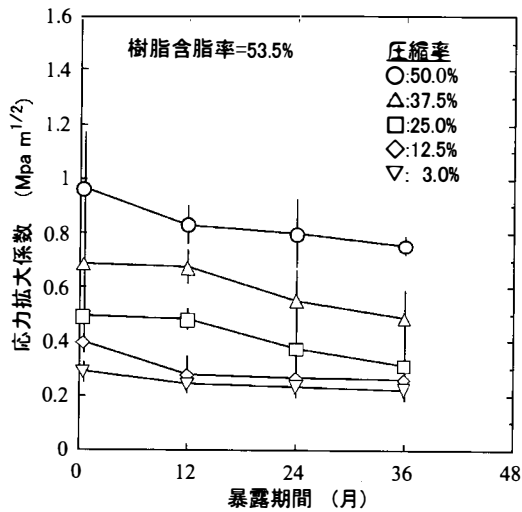


Fig. 9 屋外暴露による応力拡大係数の変化

11に示す。応力拡大係数はいずれの試験体においても暴露月数の経過に伴って、圧縮率に対する差が縮小するように低下し、その傾向は含浸率が30.9%と75.1%の試験体において顕著である。前述の厚さの変化に対応させて考察すると、含浸率が低い場合、厚さ膨潤率の増加に伴って応力拡大係数も低下している。これに対して含浸率53.5%以上の場合、厚さの変化をほとんど伴わずに応力拡大係数が低下している。このようにフェノール樹脂含浸強化LVLの応力拡大係数の劣化のメカニズムは、含浸率、圧縮率などの製造条件により異なっているものと考えられる。含浸率が低い場合、処理に伴う変形固定の回復により厚さが増加し比重が減少する。そのため、比重に比例する応力拡大係数も低下する。また、厚さ方向の膨潤・収縮の繰り返しにより細胞壁の割れや剥

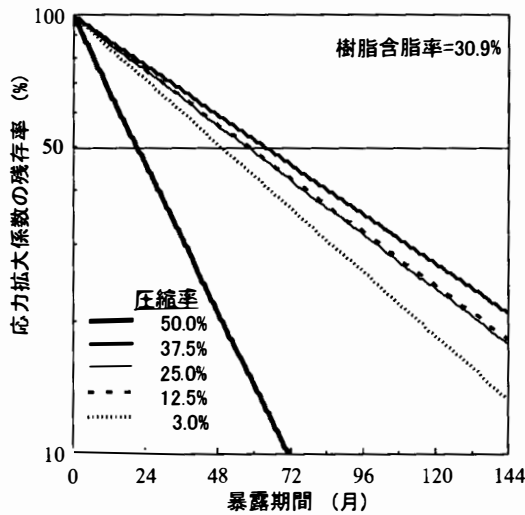


Fig. 12 屋外暴露試験による応力拡大係数の低下予測

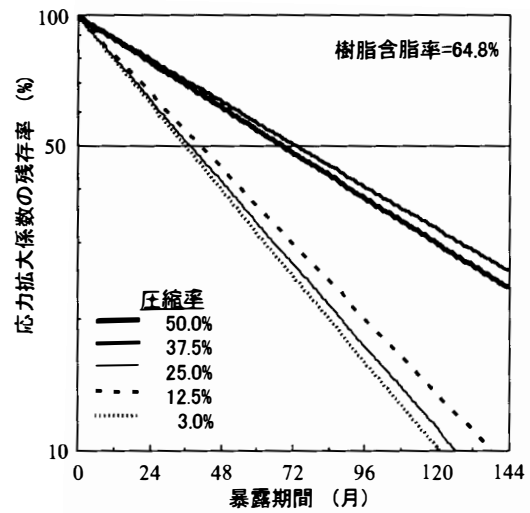


Fig. 15 屋外暴露試験による応力拡大係数の低下予測

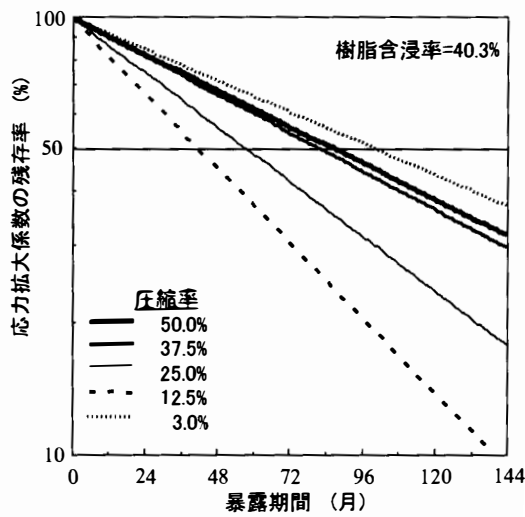


Fig. 13 屋外暴露試験による応力拡大係数の低下予測

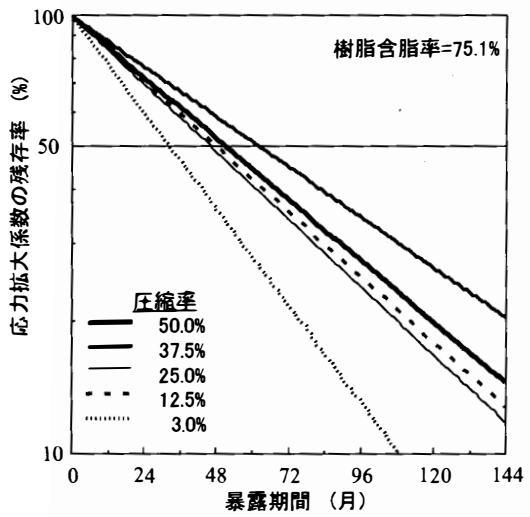


Fig. 16 屋外暴露試験による応力拡大係数の低下予測

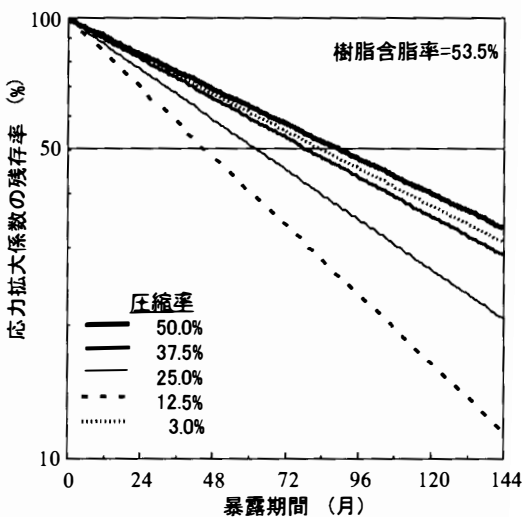


Fig. 14 屋外暴露試験による応力拡大係数の低下予測

離が生じやすくなる。それに伴って発生した内部応力は切り欠き先端への応力集中を高める。さらに、高圧縮率では、厚さ膨潤率の増加に伴って、圧縮成型する際に生ずる細胞壁の塑性降伏による不均一破壊の影響が大きくなると考えられる。

一方、含浸率53.5%以上の場合、厚さ膨潤率が極めて低いことから、屋外暴露後においても、高い応力拡大係数を発現する機構はほぼ温存されており、上述の含浸率の低い試験体と同じ原因による劣化は考えにくい。含浸率53.5%以上では、細胞内腔のフェノール樹脂のじん性も付加され、それへの依存度は含浸率の高いほど大きくなる。そのため、応力拡大係数の低下の主な原因は、屋外暴露で受ける繰返し長さ方向の膨潤・収縮に伴う内部応力の蓄積および紫外線などによるフェノール樹

Table. 1 K_{ic} 残存率が 50%となる暴露月数

	Cr(%)					
	3.0	12.5	25.0	37.5	50.0	
	30.9	49.6	58.9	58.1	64.1	21.5
	40.3	100.8	41.8	57.9	82.4	87.0
WPG(%)	53.5	85.6	45.7	63.6	80.8	91.4
	64.8	36.5	41.7	38.2	74.1	69.4
	75.1	32.7	48.6	46.7	63.0	51.8

* $Y=100-10^{-aX}$ (Y: K_{ic} 残存率, X: 屋外暴露月数)

脂の劣化であると推測した。

以下、目視により観察した破壊の状況を記すが、基本的に未処理の試験体とほぼ同じであった。破壊は初期き裂の先端から進展し、破面は負荷方向にほぼ垂直 (L 方向) となる。含浸率が低い場合、き裂が進展して繊維に沿った剥離を起こす。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。これに対し、含浸率 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 促進劣化試験による応力拡大係数残存率の予測

屋外暴露試験の結果を基に暴露月数と応力拡大係数残存率との関係を次式から求めた。応力拡大係数残存率は試験前の応力拡大係数を 100% として算出した。

$$Y=100-10^{-aX}$$

ここで、Y: 応力拡大係数残存率、X: 暴露月数、a: 定数、である。屋外暴露の経過に伴う調湿後の応力拡大係数の残存率を含浸率ごとに Fig. 12、Fig. 13、Fig. 14、Fig. 15 および Fig. 16 に示す。これらの式を使用し、屋外暴露試験における応力拡大係数残存率が半減、すなわち 50% となる暴露月数を求めた。その結果を Table.1

に示す。一部の試験体を除いて応力拡大係数残存率は 30 ヶ月以上で半減するが、含浸率 30.9%、圧縮率 50% では、極端に短く 10 ヶ月程度で半減する。含浸率が 40.3% と 53.5% の場合、応力拡大係数残存率の半減する暴露月数は、圧縮率 3.0% あるいは圧縮率 37.5% 以上で長かった。含浸率が 64.8% と 75.1% の場合、応力拡大係数残存率の半減する暴露月数は、圧縮率が高いほど長かった。

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、その耐久性評価を目的に屋外暴露試験を行い、屋外暴露による劣化を破壊じん性を指標として評価した。屋外暴露による厚さ膨潤率の増加を参考に、破壊じん性の劣化のメカニズムについて考察した。

文 献

- 1) 木質複合材料技術研究組合編: “木質複合材料研究成果報告書”, p.377-394 (1998)
- 2) 本多琢己: 山梨県森林総合研究所研究報告, 26, 49-54 (2007)
- 3) 本多琢己: 山梨県森林総合研究所研究報告, 26, 43-48 (2007)
- 4) 本多琢己: 山梨県森林総合研究所研究報告, 26, 37-44 (2008)
- 5) 本多琢己: 山梨県森林総合研究所研究報告, 31, 7-12 (2013)
- 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, 218-225 (1980).