促進劣化試験および屋外曝露試験で評価した 木材保存剤処理集成材の接着耐久性 (第2報)[†]

屋外曝露試験で評価した接着耐久性および促進劣化試験との関係^{*1}

柳川靖夫^{*2}, 増田勝則^{*2}

Evaluation of Bonding Durability for Wood Preservative Treated Glulam by Accelerated Aging Test and Outdoor Exposure Test II.[†] Bonding durability evaluated by outdoor exposure test and correlation to accelerated aging test^{*1}

Yasuo YANAGAWA^{*2} and Katsunori MASUDA^{*2}

In order to investigate the bonding durability of sugi glulams treated with five wood preservatives (ACQ, E-NCU, CUAZ2, E-NZN, AAC), block shear form specimens were exposed outdoors. We studied relationships between wood preservative, or specimen width, or specimen density, or adhesive resin and bonding durability, respectively, and we discussed the difference between results obtained from outdoor exposure and accelerated aging. We also attempted to correlate the results obtained at accelerated-aging with those at outdoor exposure. It was suggested that outdoor exposure testing was superior to accelerated aging for evaluating the influence of wood preservatives on bonding durability. Investigation of the relationships between specimen width or density, or adhesive resins and bonding durability suggested that the deteriorating mechanism of outdoor exposure was milder than that of accelerated aging, and the influence of specimen width, specimen density, and adhesive resins on bonding durability was less than observed with accelerated aging. Results of wood failure ratio were almost the same as those of accelerated aging, and results of deep wood failure ratio, defined as failed wood portion which could not confirm an adhesive layer, did not show a remarkable increase and differed from the results obtained at accelerated aging. This suggested that deterioration of wood at outdoor exposure was slight. We analyzed the results of outdoor exposure and accelerated aging by adopting three methods, and correlated number of accelerated aging cycles to exposure duration based on a linear regression equation. As a result, in the case of the analysis with cycle number and duration transformed into common logarithms, the calculated exposure duration corresponding to cycle number was nearest the values calculated from experimental values.

Keywords: bonding durability, glulam, outdoor exposure, sugi, wood preservative.

ラミナを木材保存剤 (ACQ, E-NCU, CUAZ2, E-NZN, AAC) で処理して作製した集成材の屋外環境下での接着耐久性を, ブロックせん断試験片を使用して調べた。屋外曝露試験の劣化条件は促進劣化試験よりも緩やかであることを示唆する結果が得られ, 屋外曝露試験においては,

[†] Report I: This journal 57, 211-222 (2011).

^{*1} Received October 1, 2010; accepted February 14, 2011. 本報の一部は第60回日本木材学会大会 (2010年3月, 宮崎) において発表した。

^{*2} 奈良県森林技術センター Nara Forest Research Institute, Takatori 635-0133, Japan

試験片の幅や密度, あるいは接着剤の種類が接着耐久性に及ぼす影響は促進劣化試験より小さかった。木部破断率は促進劣化試験とはほぼ同じ結果が得られ, 接着層が確認できない部分を「深木部破断」とした深木部破断率は, 促進劣化試験とは異なり顕著な増加を示さず木材の劣化が軽微であったことが示唆された。3種類の解析手法により, 1次回帰式を基に促進劣化試験での各処理回数に対応する屋外曝露試験での曝露月数をそれぞれ算出した結果, 処理回数もしくは曝露月数を常用対数として計算した場合, 実測値を直接対応させて求めた処理回数に対応する曝露月数に最も近い数値を示した。

1. 緒 言

集成材を屋外環境下で長期間使用する場合, 可能であるならラミナを木材保存剤(以下薬剤とする)で処理した後に集成材を製造することが望ましい。屋外使用を想定した集成材ではレゾルシノール樹脂接着剤等が使用され, 薬剤によっては接着耐久性に悪影響を及ぼすことが指摘されていることから¹⁻³⁾, 薬剤が集成材の接着耐久性に及ぼす影響を前もって把握する必要がある。そのため, 促進劣化試験による集成材の接着耐久性の評価が実施されているものの^{4, 5)}, 促進劣化試験と屋外曝露試験では劣化条件が異なることが問題である。したがって, 屋外曝露試験で集成材の接着耐久性を評価することも重要であると考えられる。集成材の接着耐久性を屋外曝露試験で調べた結果が報告^{6, 7)}されているものの, これらでは積層接着の後に薬剤を加圧注入した集成材を使用しており, また試験期間が20年にも達している。このように, 長期の試験期間を要することが集成材の屋外曝露試験の最大の問題であると考えられる。宮崎等⁸⁾はこの対策として, 2種類の薬剤でラミナを処理して製造した5プライ集成材から採取した, 幅10 mm および25 mm の小試験片(以下「ブロックせん断試験片」とする)を最長24ヶ月間の屋外曝露試験に供し, 比較的短期間の曝露で屋外における集成材の接着耐久性を評価することを試みている。本研究では, この評価方法を促進劣化試験と対比させてさらに詳しく調べるため, 5種類の薬剤でラミナを処理して集成材を製造し, 幅10 mm および25 mm のブロックせん断試験片を採取して屋外曝露試験に供した。また, 薬剤と接着耐久性との関係のみならず, 試験片の寸法(幅), 試験片密度, およびレゾルシノール樹脂接着剤におけるレゾルシノール含有量と接着耐久性との関係についてそれぞれ検討を加えるとともに, これらの結果を第1報⁹⁾で得られた促進劣化試験の結果と対比させて考察した。また, 既に提唱されている接着耐久性の評価手法¹⁰⁾を集成材に適用することを試みた。本報では, 3種類の解析方法を屋外曝露試験および促進劣化試

験の結果に適用し, これより得られた回帰式を基に促進劣化試験における各処理回数に対応する曝露月数をそれぞれ算出し, 実測値を基として算出した処理回数に対応する曝露月数と比較して検討を加えた。

2. 実 験

作製した5プライのスギ(*Cryptomeria Japonica* D. Don)集成材の種類および製造方法は第1報⁹⁾と同じであり, 試験条件は以下のとおりである。

- ① 密度区分2種類 高密度(0.42~0.44 g/cm³)・低密度(0.34~0.38 g/cm³)
- ② 薬剤条件6種類 ACQ, E-NCU, CUAZ2, E-NZN, AAC, 無処理(以下Controlとする)
- ③ 接着剤2種類 フェノール-レゾルシノール樹脂接着剤(以下PRFとする)・レゾルシノール樹脂接着剤(以下RFとする)

ここで, ACQは銅・第4級アンモニウム化合物系, E-NCUはナフテン酸銅(乳剤), CUAZ2は銅・アゾール化合物系, E-NZNはナフテン酸亜鉛(乳剤), AACは第4級アンモニウム化合物系である。作製した集成材の寸法はいずれも幅110 mm, 厚さ110 mm, 長さ3000 mmであり, これらから幅10 mm(以下「10 mm 幅」とする)もしくは25 mm(以下「25 mm 幅」とする)のブロックせん断型試験片を採取した。したがって, これらの試験条件を組み合わせると, 試験条件は(密度)2×(薬剤)6×(接着剤)2×(試験片幅)2で計48種類であった。なお, 以下に試験条件について言及する場合は, 特に記述しない限り密度条件を考慮しないこととし, 高密度と低密度とを合わせた24の試験条件の結果とする。

ブロックせん断試験片の採取数は, 各試験条件においてそれぞれ60個ずつとした。これら試験片を, 500×1000 mm の金網の上に番線を使用して固定した。試験片の固定に際し木口面は垂直とし, 各接着層を水平面として固定した。この金網を, Fig. 1に示すとおり曝露台の上, 地上より約1 m の位置に固定した。なお, 各試験片の木口面は東西方向に向けて曝露を行った。曝露台は南面が開けた場所に設置し, 日当たりおよび風通しも良好で, 地面は雑

Fig. 1. Outdoor exposure of block shear form specimens.

草で覆われており春～夏には約2ヶ月周期で草刈りが行われた。北面は平屋のRC製実験棟で、曝露台との間は5m以上離れていた。また、曝露台は木材を組んだ枠材で、試験片を固定した金網の枠部分は径5mmの丸鋼であり、曝露台の枠上に金網の周辺部分を載せて曝露を行ったことから金網上の水はけはきわめて良好であり、水分の滞留は発生し難い状態であった。曝露開始は2005年8月6日であり、曝露期間は、2, 6, 12, 18, および24ヶ月とし、24ヶ月曝露は2007年8月5日に終了した。なお、各試験条件の各曝露期間における試験片数は12個ずつであった。試験片は5プライであったことから、各試験条件における全試験片の測定数、すなわち接着層数は48であった。したがって、密度区分を行った場合の測定数は各24個ずつであり、以下「全試験片」と記す場合は48接着層の測定結果を表すものとする。

所定の期間曝露した後に取り込んだ試験片は、2ヶ月以上20℃65% RHの雰囲気中に静置し、試験片の重量が変動しないことを確認した後に、東京衡機製造所製アムスラー型材料試験機を使用して9.8 kN/分以下の加重速度でせん断試験を行った。せん断強度を算出し木部破断率を測定するとともに、第1報と同様木部破断した部分で接着層が確認できない部分を「深木部破断」と規定し¹¹⁾、深木部破断率を算出した。また、破壊した試験片の含水率を測定した。

3. 結果と考察

3.1 せん断強度

3.1.1 薬剤とせん断強度との関係

Fig. 2に25 mm幅の屋外曝露試験の結果を、Fig. 3には10 mm幅の結果を示す。各値は全試験片の平

Fig. 2. Shear strength of block-shear-form specimens with 25 mm width after outdoor exposure.

Notes: All are averaged values.

Legends: ^{a)}: PRF: Phenol-resorcinol resin adhesive (phenol: resorcinol=1:3), RF: resorcinol resin adhesive. ACQ: Ammonical copper quaternary, E-NCU: Emulsion type copper naphthanate, CUAZ2: copper azole, E-NZN: Emulsion type zinc naphthanate, AAC: alkyl ammonium compound. —: Limit value of sugi specified in JAS for glulam.

均値である。

25 mm幅では、PRFおよびRFとも銅系の3薬剤でのせん断強度の低下が他の薬剤よりも大きく、曝露2ヶ月で既にこの傾向が認められた。中でも、接着剤がRFで薬剤がACQ（以下「RF・ACQ」等

Fig. 3. Shear strength of block-shear-form specimens with 10 mm width after outdoor exposure.

Note: See Fig. 2.

Legend: ^{a)}: See Fig. 2.

とする)では低下が顕著であった。10 mm 幅では、RF・ACQの初期強度が他より低かったため、その差が曝露24ヶ月後でもそのまま保持されているとも読み取れる。しかし、E-NCUとACQとの差に注目すると、曝露前よりも曝露後の方がその差は大きくなっていることから、10 mm 幅でもRF・ACQの組合せは屋外曝露においてせん断強度の低下が大きいと言える。

次に、薬剤間のせん断強度の差を詳しく調べるため、第1報⁹⁾と同様に、まずせん断強度の分布の適合性を、正規、2Pワイブル、3Pワイブル、および

対数正規の各分布について調べたところ¹²⁾、いずれの条件とも各分布に対しての適合度が低かった。そこで、各薬剤間でのせん断強度の差を接着剤別、試験片幅別、および曝露月数別に、ノンパラメトリック法であるクラスカル・ウォリス検定(以下KW法とする)により調べた結果、すべての条件で5%以下の水準で有意な差が認められたため、次に、それぞれの条件において、すべての薬剤の組合せに関してSteel-Dwass法(以下SD法とする)により多重比較を行った。25 mm 幅の結果をTable 1に示す。なお、表中には対として比較した薬剤の組合せ、すなわちFactor1とFactor2の薬剤について、全試験片の平均値の大小を比較した結果を不等号で示した。

各曝露月数において差が生じた組合せの数を調べると、曝露期間の影響が小さいことが分かる。PRFについて、2ヶ月→6ヶ月→12ヶ月→18ヶ月→24ヶ月と比較すると、5%水準以下で有意な差が認められた組合せの数は、9→10→11→9→10、であり、同様にRFでは、8→11→11→10→11であった。一方、屋外曝露試験におけるせん断強度の変化を促進劣化試験の結果と比較すると、減圧加圧繰り返し処理(以下C-VPとする)が比較的類似した結果を示した。例えば、C-VPの2回処理でのせん断強度は曝露2ヶ月のせん断強度に、5回処理は6ヶ月に、10回処理は18ヶ月に、20回処理は24ヶ月にそれぞれ近似した値を示した。そこで、薬剤間で有意な差が認められた組合せの数に関して、両試験の間で相異を検討した。C-VPの25 mm 幅では、処理2回で差が認められた組合せはPRFおよびRFとも8組であり、屋外曝露試験の曝露2ヶ月で得られた結果と近似していた。しかし、処理5～20回、および曝露6～24ヶ月でそれぞれ比較すると、C-VPで差が認められた組合せは6～9組で、屋外曝露試験では9～11組であり、屋外曝露試験においてより多くの組合せで薬剤間の差が認められた。このように、せん断強度の低下が同程度であっても、薬剤間で差が認められた組合せ数に差が生じたのは、屋外曝露試験および促進劣化試験における試験片の劣化状態がそれぞれ異なっていたためであると推測される。すなわち、促進劣化試験では第1報⁹⁾で示したとおり木材および接着層でそれぞれ劣化が発生してせん断強度が低下したものと考えられる。これに対し屋外曝露試験では、木材腐朽等は目視で確認できなかったことから木材の劣化は軽微であったと推測され、したがってせん断強度が低下した原因は主として接着層の劣化であると思われる。

10 mm 幅における薬剤間のKW検定において、

Table 1. Results of Steel-Dwass test for 25 mm width specimens about outdoor exposed specimens.

Adhesive resin ^{a)}		PRF						RF					
Factor1	Factor2	Exposure duration											
		0	2	6	12	18	24	0	2	6	12	18	24
Control ^{b)}	ACQ	—	>**	>**	>**	>**	>**	—	>**	>**	>**	>**	>**
	E-NCU	—	>**	>**	>**	>**	—	—	—	—	>**	—	—
	CUAZ2	—	>**	>**	>**	>**	>**	—	>*	>**	>**	>**	>*
	E-NZN	—	>*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	AAC	—	—	—	>*	—	—	—	—	—	—	—	>*
ACQ	E-NCU	—	—	—	—	—	<*	—	<**	<**	<**	<**	<**
	CUAZ2	<*	—	—	—	—	—	<*	<**	<**	<**	<**	<**
	E-NZN	—	<**	<**	<**	<**	<**	—	<**	<**	<**	<**	<**
	AAC	—	<**	<**	<**	<**	<**	—	<**	<**	<**	<**	<**
E-NCU	CUAZ2	—	>*	>*	>*	—	>**	—	—	>**	—	—	—
	E-NZN	—	—	<**	<**	<**	<**	—	—	—	<*	<**	<**
	AAC	—	—	<**	<**	<**	<**	—	—	<**	<**	<**	<**
CUAZ2	E-NZN	—	<**	<**	<**	<**	<**	<**	—	<**	<**	<**	<**
	AAC	<**	<**	<**	<**	<**	<**	—	<**	<**	<**	<**	<**
E-NZN	AAC	—	—	—	—	—	—	—	<*	<*	—	—	—

Note: Comparisons were conducted between Factor1 and Factor2.

Legends : a), b) : See Fig. 2. *: Significant at 5% level, **: significant at 1% level, — : non-significant. Inequality signs reveal the comparison of averaged values of all specimens between Factor1 and Factor2.

薬剤間で有意な差が生じた組合せ数を曝露月順に見ると、PRFでは7→7→7→9→8であり、RFでは9→9→12→11→12であった。PRFおよびRFとも、25 mm幅よりも長い曝露月数で差が認められた組合せ数が最大となった。これは、第1報と同様に10 mm幅での劣化は25 mm幅よりも緩やかであったためであると考えられる。

一方、25 mm幅と同様に、屋外曝露試験での10 mm幅のせん断強度はC-VPと類似した結果を示したことから、有意な差が認められた組合せ数について両者を比較した。C-VPの処理2回→5回→10回→20回に対し、PRFで差が認められた組合せ数は7→1→4→11であり、またRFでは7→6→9→10であった。以上のとおり、10 mm幅も25 mm幅と同様、屋外曝露試験ではC-VPよりも薬剤間で差が生じた組合せ数が多く、しかもバラツキが小さかった。これらの結果を総合すると、せん断強度に及ぼす薬剤の影響を調べる試験としては、屋外曝露試験は促進劣化試験よりも感度が高く、また、試験片の幅にかかわらず差を検出できる試験であることが示唆された。

なお、せん断試験後の試験片含水率は11～12%であった。

3.1.2 試験片の幅とせん断強度との関係

接着剤別、薬剤別、曝露月数別に、25 mm幅および10 mm幅の全試験片の間でMann-WhitneyのU検定（以下U検定とする）を行った結果をTable

2に示す。表中には有意水準とともに、全試験片のせん断強度平均値を比較した場合、いずれがより大きな値であるかを示した。

促進劣化試験では、試験体幅とせん断強度との関係について検討した結果、当初は25 mm幅>10 mm幅であった全試験片のせん断強度平均値は、一部を除き試験後は10 mm幅>25 mm幅となり、促進劣化試験の種類にかかわらず、5回処理以後はすべての組合せにおいて1%以下の水準で有意な差が認められたことを第1報で報告した。屋外曝露試験では、Table 2に示すとおり曝露前のせん断強度平均値を比較すると、25 mm幅>10 mm幅であり、屋外曝露後に有意な差が認められた組合せでは、すべて10 mm幅>25 mm幅であり、促進劣化試験と同様に順位が変化した。しかし、促進劣化試験とは異なる結果も得られ、例えばPRFの曝露2ヶ月では10 mm幅と25 mm幅との間に有意な差が生じた薬剤条件は認められなかった。また、ControlおよびNZNでは全曝露期間について有意な差が認められず、それ以外の薬剤で10 mm幅>25 mm幅の差が認められた組合せでも、有意水準はすべてが1%以下ではなく5%以下であった場合も存在し、これらのことはRFでも同様であった。

これらの理由は3.1.1で記した試験片の劣化状態の差に加えて、促進劣化試験と屋外曝露試験とでは劣化メカニズムが異なっていたことが考えられる。すなわち、促進劣化試験においては、強制的に短時間

Table 2. Results for Mann-Whitney test between specimens width about outdoor exposed specimens.

Adhesive resin ^{a)}	Exposure month	Wood preservatives ^{b)}					
		Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC
PRF	0	25**	25**	25**	25**	25**	25**
	2	—	—	—	—	—	—
	6	—	10*	10**	10**	—	10*
	12	—	10**	10**	10**	—	10*
	18	—	10**	10**	10*	—	—
	24	—	10**	10*	10**	—	10**
RF	0	25**	25**	25**	25**	25**	25**
	2	—	—	—	10*	—	10**
	6	—	10**	—	10**	—	10*
	12	—	10**	—	10**	—	10**
	18	—	—	—	10**	10**	10**
	24	—	10*	—	10**	—	10*

Legends : ^{a), b)} : See Fig. 2. 10, 25 : Results of comparison of averaged values between 10 mm width and 25 mm width, and figures reveal the higher one. *, **, — : See Table 1.

で試験片を膨潤・収縮させたため、接着層や木材には大きなストレスが作用したと思われる。一方、屋外曝露試験では試験片の寸法が変化する回数は促進劣化よりも多かったと考えられるもののその変化量は小さく、また、急速に膨潤・収縮することがなかったため、接着層や木材には大きなストレスが作用しなかったものと推測される。そのため接着層や木材の劣化、すなわちせん断強度の低下に及ぼす試験片寸法の影響が相対的に小さくなり、曝露後に一部の条件でのみせん断強度が10 mm 幅>25 mm 幅となったものと推測される。

一方、Control では PRF および RF とも曝露後のせん断強度は10 mm 幅と25 mm 幅との間で差が認

められていないことから、薬剤の存在が試験片寸法とせん断強度の係に影響を及ぼしていることも推察される。しかし、この理由は明らかではない。

3.1.3 試験片密度とせん断強度

Table 3 に、試験片の幅別、接着剤別、薬剤条件別に低密度と高密度との間で *U* 検定を行った結果を示す。

当初のせん断強度平均値を比較すると、多くの条件で高密度>低密度であり 5 % 以下の水準で有意な差が認められた。屋外曝露後には Control や銅系の一部薬剤で密度間の有意な差が消滅する傾向が認められ、これは第 1 報の促進劣化試験とほぼ同じ結果であった。これに対し、促進劣化試験で得られた結

Table 3. Comparison between low density and high density specimens about outdoor exposed specimens.

Adhesive resin ^{a)}		PRF						RF					
Width	Cyles number	Wood preservatives ^{b)}											
		Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC	Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC
25 mm	0	H**	H**	H**	H**	H	H**	H**	H**	H**	H**	H**	H**
	2	H	H	H	H	H	H**	H	H*	H	L	H**	H**
	6	L	H	H	L	H**	H**	H	H*	H*	H	H**	H**
	12	L	H	H	L	H	H**	H	H**	L	L	H**	H**
	18	L	H	L	L	H	H**	L	H*	L	H	H*	H*
	24	L	H	H	—	H	H**	L	H	—	H	H**	H
10 mm	0	H	—	H**	H	H**	H**	H**	H*	H**	L	H**	H**
	2	H	—	H**	L	H**	H**	H**	H	H**	L	H**	H**
	6	H	H	H**	L	H**	H**	H**	H*	H	—	H**	H*
	12	H	—	H**	L	H**	H**	H	H	H	H	H**	H*
	18	L	H	H**	L	H**	H**	H	H	H	H	H**	H
	24	L	H**	H**	L	H**	H**	H	H	L	L	H**	H*

Legends : ^{a), b)} : See Fig. 2. H, L : Results of comparison of averaged shear strength between high density and low density specimens, and reveal higher one, and “—” reveal equality. * : Significant at 5% level results for Mann-Whitney test, ** : significant at 1% level.

果との相異点は以下のとおりである。C-VPのRF・CUAZ2では、10 mm幅および25 mm幅において、低密度>高密度、の有意な差が認められ、またPRF・ControlおよびPRF・ACQの一部でも同様の差が認められたのに対し、屋外曝露試験では、すべての条件においてこのような差は生じなかった。これは、3.1.2で記したとおり、屋外曝露試験と促進劣化試験との劣化メカニズムの相異に起因するものと思われる。せん断強度平均値の低下のみを考慮するなら、先に記したとおり屋外曝露試験はC-VPと類似した曲線を示す。一方、同じ程度のせん断強度まで低下する場合であっても、屋外曝露での劣化条件は促進劣化試験よりも緩やかであると推測される。すなわち、低密度>高密度となる原因は、繰り返しの膨潤・収縮で接着層や木材に作用するストレスの大きさに起因するものと推測され、屋外曝露試験において接着層や木材に作用したストレスは促進劣化試験よりも小さかったため、試験片密度がせん断強度の低下に及ぼす影響が相対的に低下したものと推測される。

3.1.4 接着剤の種類とせん断強度

屋外曝露試験での各曝露月数において、薬剤条件別および試験片の幅別に、全試験片のせん断強度について接着剤間でU検定を実施した結果をTable 4に示す。

25 mm幅では、Control, ACQおよびNZNで、PRF>RFの有意な差が認められた。10 mm幅では、ACQおよびE-NCUでPRF>RFの有意な差が認められ、Controlでは曝露12ヶ月まではPRF>RFであり、曝露18ヶ月以降はRF>PRFであった。促

進劣化試験では、当初に認められたPRF>RFの有意な差が処理回数の増加とともに消滅する傾向があったのに対し、屋外曝露試験では、当初に存在した有意な差が消滅しない傾向が見られた。

この差については、先に記したと同様、屋外曝露試験と促進劣化試験との劣化条件の差によるものと推測される。すなわち、より緩やかに劣化が進行する屋外曝露試験では、試験前に存在する接着剤の種類に基づくせん断強度の差が消滅しにくいものと思われる。

3.2 木部破断率

木部破断率の結果をTable 5に示す。

促進劣化試験と同様にE-NZNの木部破断率が低かったのに加え、銅系の3薬剤では曝露月数とともに木部破断率が低下した。この銅系薬剤の低下は、Fig. 3に示すとおりせん断強度も低下していることから、いずれも接着剤と木材との界面の劣化が原因であるものと推測される。一方、E-NZNについては、Fig. 2に示すとおりせん断強度はいずれの曝露月数でもControlに近い値を示し、銅系の3薬剤よりも高い値を示したことから、促進劣化試験の結果と同様、E-NZNに関しては木部破断率とせん断強度とは必ずしも関連していないと考えられる。

PRFの促進劣化試験における木部破断率は、C-BおよびC-VPとも試験片の幅にかかわらず、平均値では90%前後の値を示した。これに対し屋外曝露試験では、平均値は低下したものの顕著な低下ではなく、最も低い値を示したACQ・25 mm幅でも平均値で80%以上であった。

Table 4. Results for Mann-Whitney test between adhesive resins about outdoor exposed specimens.

Width	Cycles number	Wood preservatives ^{a)}					
		Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC
25 mm	0	PRF ^{**b)}	PRF*	—	PRF*	PRF**	—
	2	—	PRF**	—	—	PRF**	—
	6	PRF**	PRF**	—	—	PRF*	—
	12	PRF**	PRF**	—	—	PRF**	—
	18	PRF**	PRF**	—	—	PRF**	—
	24	PRF*	PRF**	PRF**	—	—	—
10 mm	0	PRF*	PRF**	PRF**	—	—	—
	2	PRF**	PRF**	—	—	—	—
	6	PRF**	PRF**	PRF**	—	—	—
	12	PRF**	PRF**	PRF**	—	—	—
	18	RF**	PRF**	PRF**	—	—	—
	24	RF**	PRF**	PRF**	—	—	—

Notes: Mann-Whitney test were conducted between adhesives of PRF and RF.

Legend: ^{a), b)}: See Fig. 2. ***: See Table 1. PRF, RF: Results of comparison for averaged shear strength of all specimens between PRF and RF, and reveal higher one.

Table 5. Wood failure ratio after outdoor exposure.

Adhesive resin ^{a)}		PRF						RF					
Width	Exposure duration (month)	Wood preservatives ^{b)}											
		Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC	Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC
25 mm	0	90	86	93	88	91	81	95	83	92	85	84	88
	2	94	86	94	91	94	82	99	95	93	94	81	97
	6	93	87	95	85	95	81	97	90	92	94	80	95
	12	93	82	94	85	94	88	97	75	85	83	75	93
	18	95	76	90	83	93	89	95	68	79	74	70	93
	24	98	79	90	83	94	90	95	69	73	62	71	93
10 mm	0	96	88	93	94	93	88	99	97	97	96	94	95
	2	95	89	93	92	92	89	99	96	95	95	97	97
	6	97	89	93	89	93	86	99	94	90	94	95	97
	12	95	85	91	82	88	87	96	78	83	82	90	95
	18	96	85	94	88	93	87	99	83	87	84	91	95
	24	95	83	90	81	94	88	99	75	81	74	90	96

Note: All values are averaged % values of all adhesive-layers and $n = 48$.

Legend: ^{a), b)}: See Fig. 2.

3.3 深木部破断率

深木部破断率の結果を Table 6 に示す。

促進劣化試験では、2 回処理においてすべての薬剤で顕著な増加が見られたのに対し、屋外曝露試験では、曝露月数により数値は変動しているものの全曝露期間を通して考慮した場合、深木部破断率は増加または減少に関して明確な傾向は示さなかった。RF・10 mm 幅、PRF・10 mm 幅、および PRF・25 mm 幅でも同じ結果が得られていることから、これは木材の劣化の差を反映した結果であると思われる。すなわち、屋外曝露試験における劣化条件は緩やかなものであり、24ヶ月の屋外曝露でも、木材の劣化はさほど進行していなかったと推測される。し

たがって、屋外曝露におけるせん断強度の低下は主として接着層の劣化に起因すると思われる。促進劣化試験におけるせん断強度の低下は、木材の劣化と接着層の劣化とが複雑に作用しているものと推測されることから、主として接着層の劣化を調べる手法として、屋外曝露試験は信頼性の高い手法と思われる。ただし、屋外曝露では、場合によっては木材の生物劣化等が発生することが予想される。本研究での曝露地は日当たりや水はけが良好であり、試験片の周囲も水はけが良好であったため、曝露24ヶ月でも木材の生物劣化は軽微であったものと思われる。また、小試験片を使用したため試験片の変形が小さく、割れ等もほとんど発生しなかったことも生物劣

Table 6. Deep wood failure ratio after outdoor exposure.

Adhesive resin ^{a)}		PRF						RF					
Width	Exposure duration (month)	Wood preservatives ^{b)}											
		Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC	Control	ACQ	E-NCU	CUAZ2	E-NZN	AAC
25 mm	0	50	61	57	73	65	54	47	51	57	55	50	45
	2	44	53	58	56	66	41	40	40	54	37	51	32
	6	43	37	52	48	68	42	42	29	45	26	48	35
	12	58	55	51	56	72	58	56	43	45	48	47	38
	18	57	43	45	51	67	56	53	34	36	36	41	42
	24	65	46	46	53	66	61	61	37	38	35	43	49
10 mm	0	46	42	38	46	55	38	37	45	43	39	35	38
	2	49	50	40	55	50	39	42	38	39	34	34	44
	6	47	35	30	41	45	38	33	30	31	24	33	41
	12	60	55	48	49	61	61	46	34	41	36	46	56
	18	51	40	31	41	56	51	44	30	29	27	40	48
	24	61	35	32	46	61	60	52	30	33	25	46	55

Note: All values are averaged % values of all adhesive-layers and $n = 48$.

Legend: ^{a), b)}: See Fig. 2.

化が進行しなかったことに寄与したものと考えられる。屋外曝露試験ではこれらの事項に留意し、試験地、試験片やその設置方法、および曝露期間を設定する必要があると思われる。

3.4 屋外曝露試験と促進劣化試験との関係

屋外曝露試験と促進劣化試験との関連付けに関する研究は、合板等を中心に行われてきた¹³⁻¹⁵⁾。それらでは、促進劣化試験の結果を基として処理回数と接着強度との関係式を求め、これと屋外曝露試験の結果とを関連付け、促進劣化試験の任意の段階に対応する曝露期間を求めようとする手法が主として検討されている。関係式として以下の4式が提唱されている¹⁰⁾。

- (1) $S_t = S_0 - k \cdot t$
- (2) $S_t = S_0 - k \cdot \log(t)$
- (3) $S_t = S_0 - k \cdot t^{1/2}$
- (4) $\log(S_t) = \log(S_0) - k \cdot t$

ここで、 S_t は繰り返しサイクル数 t 回もしくは曝露期間 t 月におけるせん断強度、 S_0 は初期せん断強度、 k は劣化速度定数、である。

本研究では、まず上記4式中の(2)～(4)式を促進劣化試験および屋外曝露試験の結果に当てはめ、 S_t と $\log(t)$ 、 S_t と $t^{1/2}$ 、および $\log(S_t)$ と t との相関図を得た。さらにこれらの相関図に対し一次の近似式(以下「低減式」とする)をそれぞれ当てはめた。次に、促進劣化試験で得られた各低減式を使用し、促進劣化試験における処理2, 5, 10, および20回でのせん断強度をそれぞれ算出した。次に、この算出したせん断強度(S_t)を屋外曝露試験で得た対応する低減式に代入し、各処理回数に対応する曝露期間(t)を算出した(以下「算出曝露月数」とする)。すなわち、(2)、(3)、および(4)の各式別に、促進劣化試験および屋外曝露試験から得た低減式を対応させて計算を行った。

以上の3手法とは別に、促進劣化試験と屋外曝露試験とを直接対応させることも可能である。そこで、促進劣化試験の各処理回数に対応する屋外曝露試験での曝露月数(以下「直接曝露月数」とする)を、実験結果より算出することを試みた。なお、計算はせん断強度の残存率を基として行うこととし、まずそれぞれ試験前のせん断強度を100%として残存率を算出した。次に、促進劣化試験の各処理回数におけるせん断強度残存率を屋外曝露試験と対比させ、一致した場合は当該曝露月数を直接曝露月数とし、一致しない場合は次式により算出した。

$$\text{直接曝露月数} = \{(ES1 - AS) \times (EM2 - EM1) / (ES1 - ES2)\} + EM1$$

AS：促進劣化試験でのせん断強度残存率。

ES1：屋外曝露試験における、AS以上でかつ最もASに近いせん断強度残存率。

ES2：屋外曝露試験における、AS以下でかつ最もASに近いせん断強度残存率。

EM1, EM2：それぞれES1およびES2での曝露月数。

なお、直接曝露月数の算出はEM2が24ヶ月以下の場合でのみ行ったため、促進劣化試験でより低いせん断強度残存率を示した25 mm幅はほとんどの場合計算より除外され、主として10 mm幅について計算を行った。促進劣化試験および屋外曝露試験のせん断強度残存率はほとんどが一致しなかったことから、直接曝露月数はそのほとんどが算出値ではあるものの、実験結果を直接対応させた結果であり、回帰式を基として対比させた3手法の妥当性を検証する指標として有用であると思われる。

Control, E-NCU, およびAACについて、Fig. 4にPRFでのC-Bと屋外曝露とを対応させた結果を、Fig. 5には、RFでC-VPと屋外曝露試験とを対応させた結果を示す。なお、Fig. 4でのE-NCUは、処理20回でのせん断強度が曝露24ヶ月のせん断強度を下回ったため、煮沸繰り返し処理10回までの結果を示した。

煮沸繰り返し処理では、(2)式($S_t = S_0 - k \cdot t^{1/2}$)を使用して促進劣化試験と屋外曝露試験とを対応させた研究¹¹⁾が報告されているが、直接曝露月数を予測する式として、Fig. 4に示すとおり(2)～(4)のいずれの式を基としても大きな差は無いと思われる。その中でもせん断強度を常用対数で変換した(4)式を基とした低減式を使用した場合、比較的適合していると思われる。また、C-VPも同様に(4)式による算出曝露月数が直接曝露月数に近い値を示した。

直接曝露月数は、先述したとおり参考値として取り扱うのが妥当であると思われる。しかし、本研究の結果は、小試験片を使用することにより、集成材においても比較的短期間の中に促進劣化試験と屋外曝露試験とを対応させて接着耐久性を評価できる可能性を示唆している。その際、やはり実大材における部位別の接着耐久性も無視できない課題であると考えられ、本研究をより活用できる資料とするには、本研究の結果と実大集成材の屋外曝露試験の結果とを照合して確認する必要があると思われる。そのため、著者等は実大集成材の屋外曝露試験も実施しており、今後、本研究の結果と実大集成材の屋外曝露試験で得た結果とを対応させることを予定している。

Fig. 4. Correlation between cycles number of cyclic boiling test and exposure duration. (PRF/10 mm width)

Legends: ^{a)}: See Fig. 2. S_t : Shear strength, S_0 : initial shear strength, t : cycles number or exposure duration. $\circ$: Calculated value by applying equation $S_t = S_0 \cdot k \log(t)$, $\triangle$: Calculated value by applying equation $S_t = S_0 \cdot k t^{1/2}$, $\square$: Calculated value by applying equation $\log(S_t) = \log(S_0) - kt$, $\bullet$: Calculated exposure duration based on accelerated aging test.

Fig. 5. Correlation between cycles number of cyclic vacuum pressure test and exposure duration. (RF/10 mm width)

Legend: See Fig. 4.

結 論

5種類の木材保存剤と2種類の接着剤とを組み合わせ、これらから幅10 mmもしくは25 mmのブロックせん断試験を採取し、最長24ヶ月間の屋外曝露試験に供した。薬剤がせん断強度に及ぼす影響を調べる手法として、屋外曝露試験は促進劣化試験よりも優れていると考えられ、せん断強度の低下が少ない曝露2ヶ月でも差を検出することができた。試験片の幅、密度および接着剤の種類とせん断強度との関係については、屋外曝露試験と促進劣化試験における劣化条件の違いを示唆する結果が得られた。屋外曝露試験で試験片に発生する膨潤・収縮は、その頻度は促進劣化試験よりも多いと考えられるもののその程度は小さく、この差が試験結果に反映しているものと考えられた。木部破断率は促進劣化試験と同様の結果を示したのに対し、接着層が確認できない部分を「深木部破断」とした深木部破断率は、促進劣化試験と異なる結果が得られ、屋外曝露試験では木材の劣化が軽微であることが示唆された。促進劣化試験および屋外曝露試験で得られた結果を関連付けるため、3種類の関係式を当てはめて解析を行い促進劣化試験の各処理回数に対応する屋外曝露月数を計算した。また、実測値を基に比例計算を行い、同様に促進劣化試験の各処理回数に対応する屋外曝露月数を求め、先の計算値と比較した。その結果、いずれの関係式を使用した場合でも関係式からの計算値と実測値からの計算値は大きく異ならず、その中でもせん断強度を常用対数に変換した関係式を使用した場合、両者は近似した値を示し、促進劣化試験の結果から屋外における接着耐久性を予測できることが示唆された。

文 献

- 1) Vick, C. B., De Groot, R. C., Youngquist, J.: *Forest Prod. J.* **40**(2), 16-22 (1990).
- 2) 和田 博, 高橋真紀子, 藪岡貞治: 奈良県林試木材加工資料 **28**, 30-36 (1999).
- 3) 宮崎淳子, 中野隆人, 平林 靖, 岸野正典: 木材学会誌 **45**, 34-41 (1999).
- 4) 鈴木広明, 松田雄一, 青山賢一, 今村正輝: 農林水産消費安全技術センター調査研究報告第20号, 77-94 (1996).
- 5) 和田 博, 高橋真紀子, 藪岡貞治: 奈良県林試木材加工資料 **28**, 30-36 (1999).
- 6) Selbo M. L.: *Forest Prod. J.* **14**(8), 361-365 (1964).
- 7) 宮武 敦, 藤井 毅, 森屋和美, 林 知行: <http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kouho/seika/1997/1997-contents.html>. Accessed September 9, 2010 (1997).
- 8) 宮崎祐子, 和田 博, 満金香織: 奈良県森林技術センター研究報告 **34**, 97-102 (2005).
- 9) 柳川靖夫, 増田勝則: 木材学会誌 **57**, 211-222 (2011).
- 10) 往西弘次: “日本木材学会研究分科会報告書 木材の科学と利用技術 1. 接着耐久性”, 日本木材学会編, 日本木材学会, 東京, 1989, pp. 51-58.
- 11) Winandy, J. E., River, B. H.: *Forest Prod. J.* **36**(1), 27-32 (1986).
- 12) 堀江和美: “木材強度データの確率・統計手法”, 堀江和美編, 木質構造研究所, 砂川, 1997, p. 4-1.
- 13) Northcott, P. L., Colbeck, H. G. M.: *Forest Prod. J.* **10**(8), 403-408 (1960).
- 14) 堀岡邦典: 木材学会誌 **17**, 315-325 (1971).