

集成材の接着はく離が曲げ強度に及ぼす影響と補修効果*

柳川靖夫・成瀬達哉

集成材の接着はく離が曲げ強度に及ぼす影響を調べるため、6プライスギ集成材の厚さ方向中央接着層に、厚さが0.1mmで幅15mm、25mm、35mm、および45mmのテフロンシートを全長にわたり挿入し、接着はく離を含む集成材を作製した。これらの曲げ試験を行った結果、曲げヤング係数および縦振動法による動的ヤング係数は、テフロンシート幅、すなわち接着はく離の幅が広がっても低下しなかった。ラミナの動的ヤング係数を基に計算した集成材の曲げヤング係数と、実測したヤング係数は接着はく離の幅にかかわらず概ね一致した。これに対し、集成材の曲げ強度は接着はく離の幅が大きくなると低下し、コントロールと比較して45mm幅では平均値は23%低かった。また、接着層に沿った水平せん断による破壊も発生した。次に、接着はく離を補修した効果を調べるため、スギ6プライ集成材の厚さ方向中央または曲げ試験時の引張側最外接着層を、全長にわたり幅1.8mm、深さ50mm切削し、切削溝にエポキシ樹脂を充填した。比較のため、同じ位置の接着層に幅50mmのテフロンシートを挿入した集成材も作製した。これらの曲げ試験を行った結果、補修した集成材は接着はく離を含む集成材より高い曲げ強度を示したものの、靱性は接着はく離を含まない集成材に及ばなかった。

1. はじめに

既存建築物は様々の環境下に暴露されるため、集成材でも割れや接着はく離（以下はく離とする）が発生する恐れがある。製材における割れは、割れ以外の部分では木材繊維が連続しているため応力は伝達するとされていることから¹⁾、製材の日本農林規格（以下JASとする）では、割れは一定範囲まで許容されている。また、小野等は、背割り柱およびスリット加工を行った梁材の曲げ試験を行い、荷重の方向によっては背割りやスリット加工は製材の曲げ強度に大きな影響を及ぼさないことを報告している²⁾。一方、集成材では接着層において木材繊維が分断されており、ラミナ間での応力伝達は接着剤を介してなされる。したがって、接着層におけるはく離は集成材の強度に悪影響を及ぼす恐れがあり、集成材のJASでは、接合の隙間は原則無いこと、または樹脂充填等により補修されていることと規定されている。そのため、供用中の集成材にはく離が生じた場合、それが強度性能に及ぼす影響を把握し、可能であれば補修を行うことが望ましいと考えられる。

集成材のはく離が強度に及ぼす影響については、報告が散見される^{3,4)}。平松等は集成材の端部にはく離を含む試験体を作製し、主としてせん断強度に及ぼす影響等を調べ、補修効果についても報告している⁴⁾。端部におけるはく離は、部材接合強度を考慮した場合に重要であるものの、はく離は部材全長にわたり発生することもある。そのような場合の集成材の強度性能変化を明らかにし、補修効果を明らかにする必要がある。そこで本研究では、スギ集成材の全長にわたり発生したはく離が集成材の曲げ性能に及ぼす影響を調べ、こ

れを補修した効果を検証した。

2. 材料および方法

2種類の実験（実験Aおよび実験B）を実施した。表1に、作製した試験体の概略を示す。

2.1 実験A はく離の規模と曲げ強度性能

気乾のスギラミナ90枚を幅108mm、厚さ23mm、長さ3000mmに調整し、縦振動法によりヤング係数を測定した。これらを、ヤング係数の分布がほぼ等しくなるよう、6枚を1組として15組に区分した。断面構成は、両外層にヤング係数が高いラミナを配置し、内層は順次低いラミナを配置した。積層接着直前に、ラミナの両面を切削して厚さ20mmに調整した。はく離を含む集成材の作製方法は図1に示すとおりで、厚さ0.1mmのテフロンシートを集成材の厚さ方向の中央接着層（以下中央接着層とする）に、全長にわたり挿入した。テフロンシートの幅は、15mm、25mm、35mm、および45mmとした。以下、試験体表記はD15、D25、D35、およびD45とする。また、テフロンシートを挿入しない集成材（以下Control-Aとする）も作製した。接着剤にはフェノール・レゾルシノール樹脂接着剤（アイカ工業（株）PR-10 / PRH-10、以下PRF接着剤とする）を使用し、主剤と硬化剤との混合比は100 : 15とした。接着剤は片面に300g / m²塗布し、圧縮圧力は0.7MPaとして20℃以上の環境下で24時間圧縮した。解圧後、断面を105 × 120mmに調整し、曲げ試験に供した。作製体数は、各条件とも3体ずつとした。

2.2 実験B はく離の補修効果

気乾のスギラミナ90枚を幅108mm、厚さ23mm、長

表1 作製した試験体

実験A			実験B			
試験体名	はく離の位置 ¹⁾	はく離幅 ²⁾ (mm)	試験体名	はく離の位置 ¹⁾	はく離幅 ²⁾ (mm)	補修の有無
Control-A	-	0	Control-B	-	0	無
D15	中央	15	CD-C	中央	50	無
D25	中央	25	TD-C	引張側外層	50	無
D35	中央	35	CD-R	中央	50	有
D45	中央	45	TD-R	引張側外層	50	有

注:n=3。¹⁾:中央:厚さ方向の中央接着層、引張側外層;曲げ試験時の引張側最外接着層。²⁾:木口断面における接着はく離の幅。

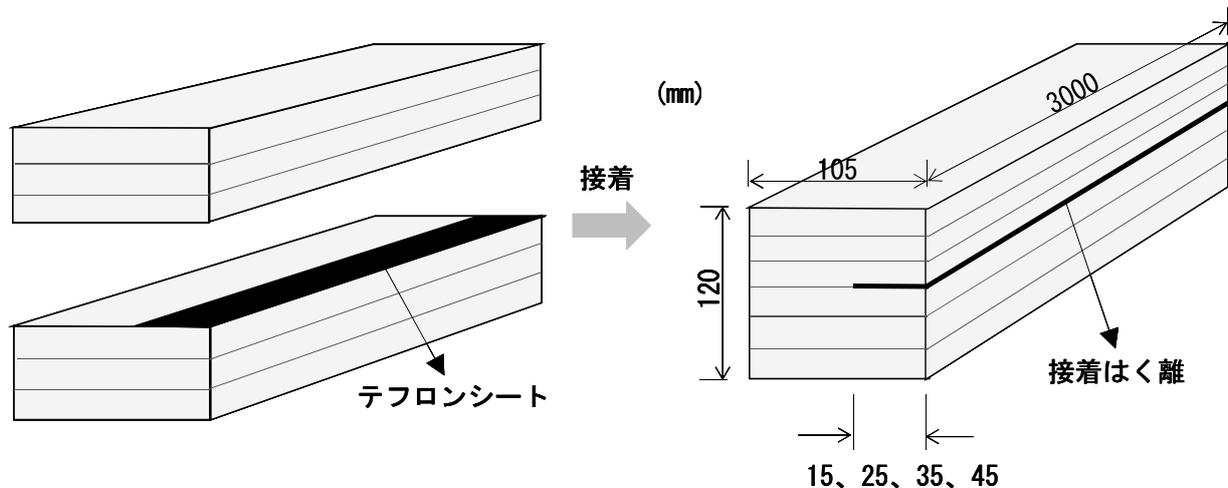


図1 接着はく離を含む集成材の作製

さ 3000mm に調整し、縦振動法によりヤング係数を測定した後、実験Aと同様にして6枚を1組とした15組に区分し、ラミナを組み合わせた。図2に、集成材の補修方法を示す。実験Aと同手法で幅105mm、厚さ120mmの6プライ集成材を作製し、図2(a)に示すとおり、これの中央接着層、または図2(b)に示すとおり片側の最外層の接着層を、丸鋸を使用して全長にわたり切削した。切削溝の幅は1.8mm、深さは50mmとした。切削直後、切削溝にエポキシ樹脂(コニシ株式会社製E-207D)を充填した。主剤と硬化剤との混合比は100:50とし、調製後直ちにシリンジを使用して注入した。なお、以下中央接着層を補修した試験体は「中央部補修」とし、最外の接着層を補修した試験体は「外層部補修」とする。また、比較のため、実験Aと同じ手法で中央接着層または片側の最外接着層に幅50mm、厚さ0.1mmのテフロンシートを挿入した集成材を作製するとともに、はく離を含まない集成材(以下Control-Bとする)も作製した。作製体数は、各条件とも3体ずつとした。

2.3 曲げ試験

作製した集成材は、図3に示すとおり3等分4点荷

重により曲げ試験を行った。実験Bの外層部補修では、引張側外層にはく離を含む接着層もしくは補修した接着層が位置するよう荷重を加えた。スパン中央のたわみ(以下中央たわみとする)を変位計((株)東京測器製DP-500E)で測定し、曲げヤング係数および曲げ比例限度応力を求めた。試験終了後、試験片を集成材両端より1個ずつ採取して全乾法により含水率を測定し、平均値をもって試験体の含水率とした。

3. 結果と考察

3.1 実験A はく離の規模と曲げ強度性能

表2に、実験Aの曲げ試験の結果を示す。また、各試験体の中央たわみ-曲げ応力曲線を、図4(a)~(e)に示す。

試験体の木口断面での接着層幅に占める接着はく離の幅の比率(以下はく離率とする)は、表2に示すとおりである。各はく離率において、密度平均値、動的ヤング係数平均値、および曲げヤング係数の測定値(以下MOE測定値とする)の平均値はほぼ同じで、集成材の性状に大きな差は無かったものと考えられる。

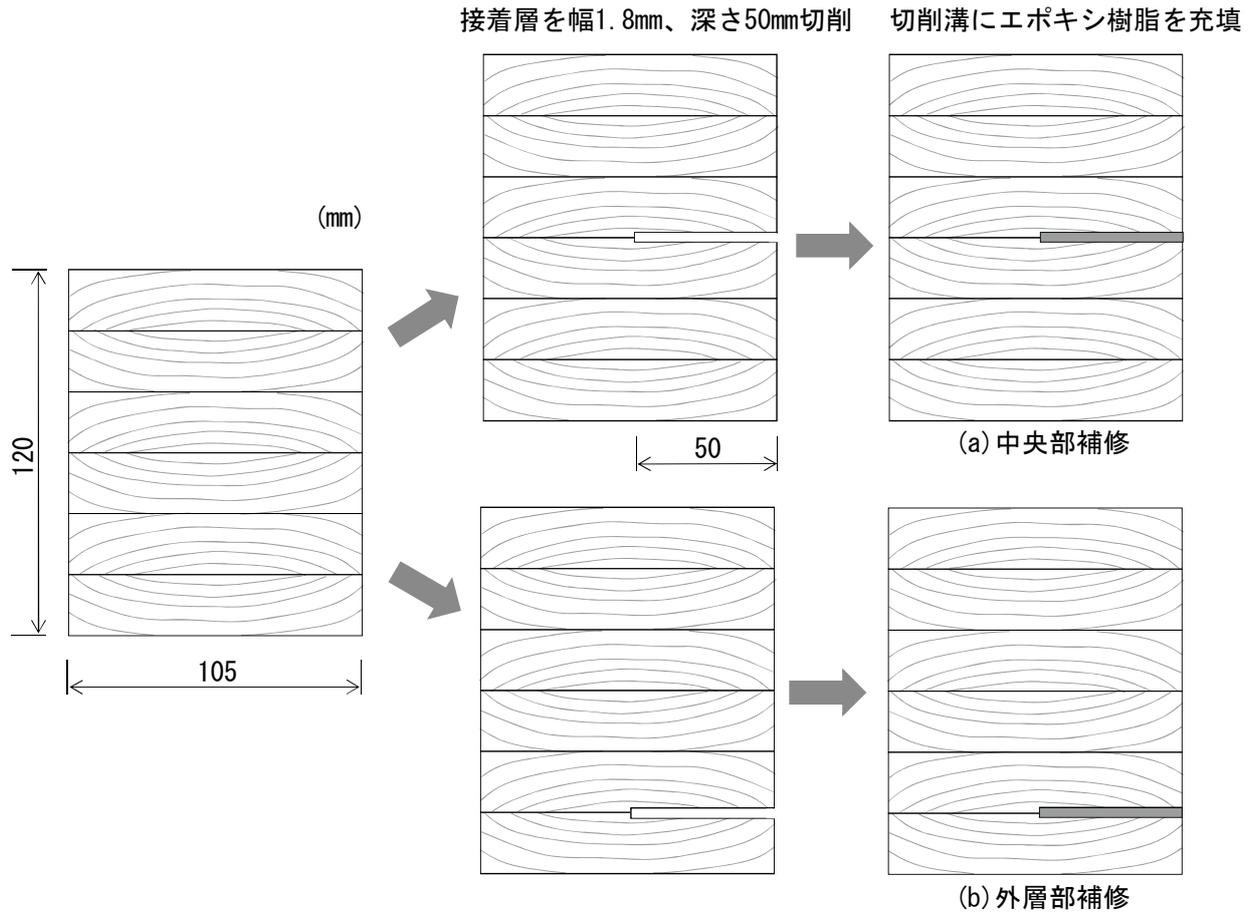


図2 接着はく離を補修した試験体の作製

注：中央部補修：厚さ方向中央部の接着層を補修した試験体。
 外層部補修：曲げ試験時の引張側外層の接着層を補修した試験体。

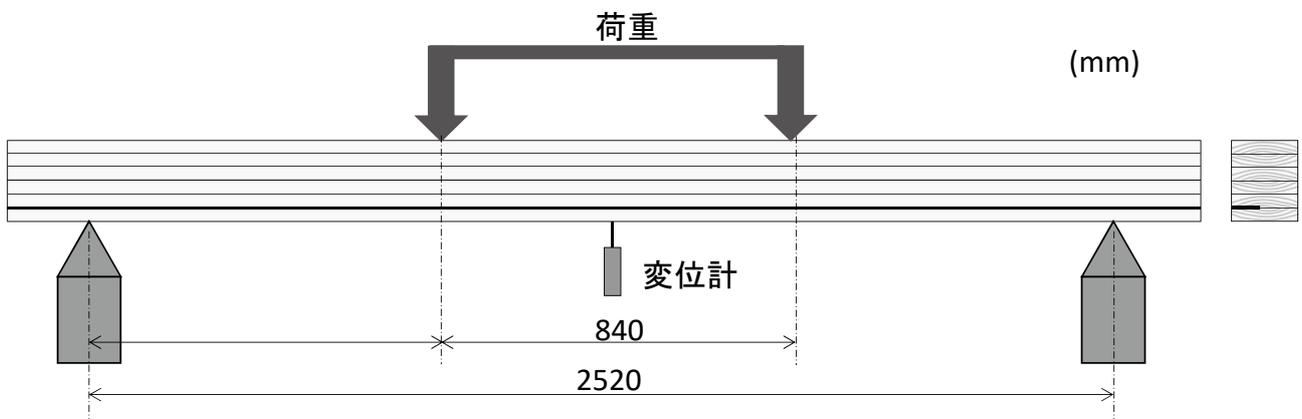


図3 曲げ試験の方法

注：引張側最外接着層にはく離を含む試験体。

3.1.1 曲げヤング係数

MOE 測定値の平均値は、はく離率が大きくなるに伴い漸減した。しかし、これは試験体間のバラツキに起因するとも考えられるため、MOE 測定値と曲げヤング係数の計算値（以下 MOE 計算値とする）との比較を行った。すなわち、ラミナの動的ヤング係数を基に等価断面法により MOE 計算値を求め、MOE 測定値を MOE 計算値で除した値を求めた。結果は表 2 に示すとおりで、MOE 測定値と MOE 計算値との比は 0.99 ～ 1.02 であり、両者はほぼ同じであった。はく離率の大きい D35 および D45 でも 0.99 であったことから、曲げヤング係数については、はく離の影響はほぼ無かったと考えられる。

3.1.2 曲げ強度

曲げ強度では低下が認められ、Control-A からの変化率を、平均値を用いて算出すると D15 ～ D35 は -0.10 ～ -0.13 であり、D45 では -0.22 であった。D45 では、図 4 (e) に示すとおり D45-1 の曲げ強度が低かった。D45-1 では、引張側最外層ラミナに存在した節での引張破壊、および中央接着層でのせん断破壊が発生しており、この内節が破壊の主原因と考えられる。この理由として、D35 では 1 試験体 (D35-2) で、D45 では 2 試験体 (D45-2 および D45-3) で、それぞれ中央接着層においてせん断破壊が発生して荷重が低下したものの、図 4 (d) および図 4 (e) に示すとおり、Control-A

と比較して曲げ強度は低くはなかったことが挙げられる。

最大曲げたわみの平均値は表 2 に示すとおりで、はく離を含む集成材は Control-A よりも小さかった。

Control-A の最大たわみは、図 4 (a) に示すとおり 60mm を下回ることにはなかったのに対し、はく離を含む集成材では、最大曲げたわみが 60mm 未満であった試験体が出現した。このように、はく離を含む集成材では最大曲げたわみが低下する傾向が認められた。

以上の結果より、一定規模以下のはく離であるならば、集成材の曲げ強度を大きく損なうことはないものと考えられる。また、曲げ強度は引張側最外層ラミナの品質の影響が大きいため、はく離が常に破壊の原因となるとは考え難い。しかし、はく離幅が大きい集成材では、中央接着層でのせん断破壊が見られたことから、荷重条件によっては曲げ強度が低下することも考えられる。

3.2 実験 B はく離の補修効果

表 3 に、実験 B の曲げ試験の結果を示す。また、各試験体の中央たわみー曲げ応力曲線を図 5 (a) ～ (e) に示す。

3.2.1 曲げヤング係数

表 3 に示すとおり、Control-B での MOE 測定値と MOE 計算値との比は 0.99 とほぼ一致していたのに対し、

表 2 実験 A の結果

項目	単位	Control-A	D15	D25	D35	D45
密度	平均値 (g/cm ³)	0.43	0.42	0.43	0.42	0.42
動的ヤング係数 ¹⁾	平均値 (kN/mm ²)	9.9	9.9	10.0	9.9	9.9
MOE測定値	平均値 (kN/mm ²)	10.5	10.5	10.5	10.3	10.1
	標準偏差	0.3	0.1	0.2	0.2	0.2
	変動係数	0.03	0.01	0.02	0.02	0.02
MOE計算値	平均値 (kN/mm ²)	10.6	10.5	10.3	10.4	10.3
測定値/計算値		1.00	1.00	1.02	0.99	0.99
曲げ比例限度	平均値 (N/mm ²)	38.0	40.6	36.5	33.7	31.9
	標準偏差	4.2	4.6	3.6	2.2	8.2
	変動係数	0.11	0.11	0.10	0.07	0.26
曲げ比例限度比 ²⁾		-	1.07	0.96	0.89	0.84
曲げ強度	平均値 (N/mm ²)	60.8	54.4	54.8	52.8	47.3
	標準偏差	4.0	2.6	5.5	2.4	10.7
	変動係数	0.07	0.05	0.10	0.05	0.23
曲げ強度比 ²⁾		-	0.89	0.90	0.87	0.78
最大曲げたわみ	(mm)	74	64	63	63	59
最大曲げたわみ比 ²⁾		-	0.87	0.86	0.86	0.80
せん断破壊発生数 ³⁾		0	0	0	1	2
含水率	平均値 (%)	13.9	14.1	14.2	14.1	12.9

注: n=3。Control-A～D45: 表 1 を参照。¹⁾: 縦振動法で測定。²⁾: Control-A を基準として算出。³⁾: 厚さ方向の中央接着層でせん断破壊した試験体数。

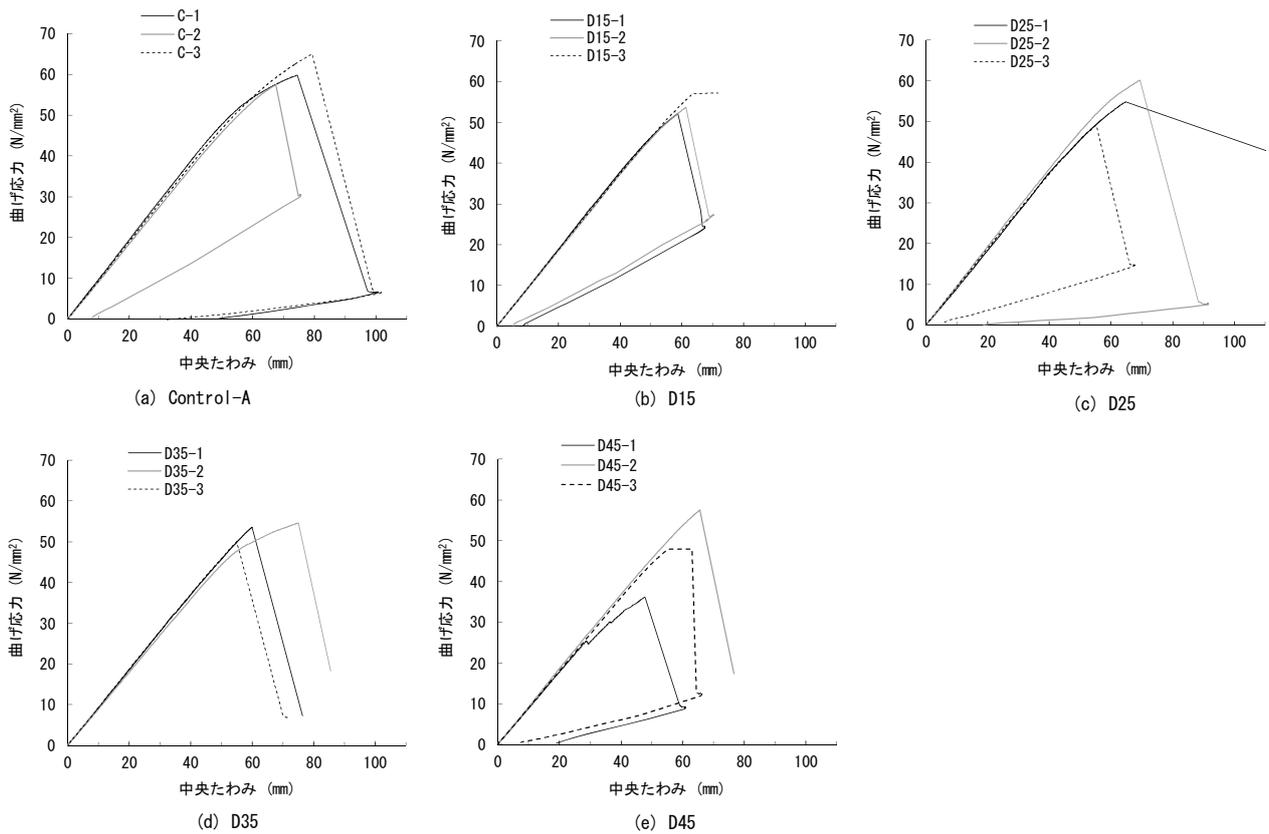


図4 実験Aの各試験体の中央たわみー曲げ応力曲線

注:Control-A、D15、D25、D35、D45:表1を参照。D35-2、D45-2、およびD45-3は、はく離を含む接着層でせん断で破壊。

表3 実験Bの結果

項目	単位	Control-B	CD-C	CD-R	TD-C	TD-R
密度	平均値 (g/cm ³)	0.43	0.43	0.41	0.41	0.42
動的ヤング係数 ¹⁾	平均値 (kN/mm ²)	11.5	11.4	11.4	11.2	11.4
MOE測定値	平均値 (kN/mm ²)	12.2	12.1	12.2	11.6	12.0
	標準偏差	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4
	変動係数	0.01	0.02	0.02	0.03	0.04
MOE計算値	平均値 (kN/mm ²)	12.3	12.5	12.2	12.3	12.4
測定値/計算値		0.99	0.97	1.01	0.95	0.97
曲げ比例限度	平均値 (N/mm ²)	51.0	49.5	36.3	48.3	51.7
	標準偏差	1.3	7.5	16.6	2.1	2.6
	変動係数	0.02	0.15	0.46	0.04	0.05
曲げ比例限度比 ²⁾		-	0.97	0.71	0.95	1.01
曲げ強度	平均値 (N/mm ²)	70.1	55.1	64.6	62.2	69.2
	標準偏差	1.1	6.7	6.3	0.3	6.5
	変動係数	0.02	0.12	0.10	0.01	0.09
曲げ強度比 ²⁾		-	0.79	0.92	0.89	0.99
最大曲げたわみ	(mm)	119	55	73	84	102
最大曲げたわみ比 ²⁾		-	0.46	0.62	0.70	0.85
せん断破壊発生数		0	3	1	0	0
含水率	平均値 (%)	16.1	16.1	15.6	15.5	15.7

注:n=3。Control-B~TD-R:表1を参照。¹⁾:縦振動法で測定。²⁾:Control-Bを基準として算出。

³⁾:はく離を含む接着層でせん断破壊した試験体数。

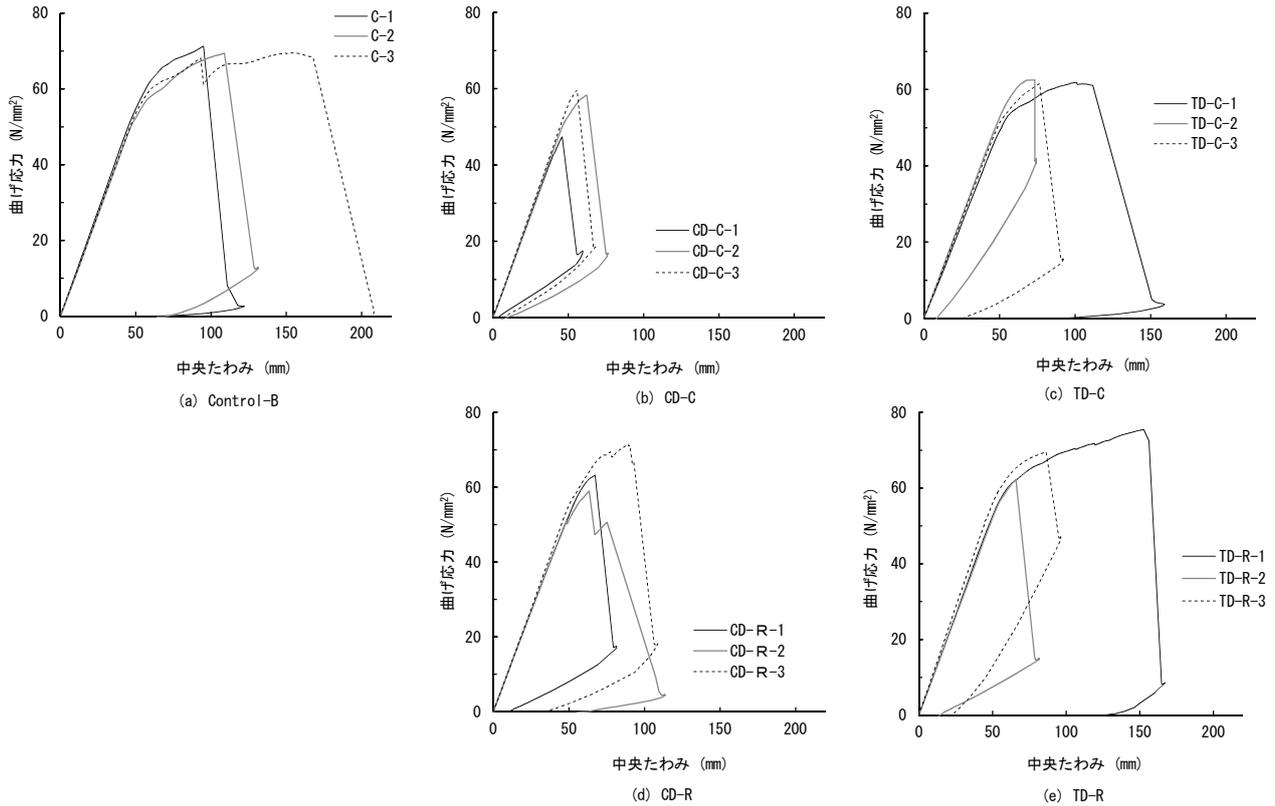


図5 実験Bの各試験体の中央たわみー曲げ応力曲線

注：Control-B、CD-C、TD-C、CD-R、TD-R：表1を参照。

はく離を含む集成材では低く、CD-Cは0.97でありTD-Cは0.95であった。一方、はく離を補修したCD-Rでは1.01であり、同じくTD-Rでは0.97であった。このように、補修により曲げヤング係数の回復が認められた。しかし、外層部補修のTD-Rでは補修効果は顕著ではなかった。

3.2.2 曲げ強度

表3に示すとおり、Control-Bを基準として算出した曲げ強度比は、中央接着層にはく離を含むCD-Cが0.79と最も低かった。CD-Cは、すべての試験体で同接着層に沿ったせん断破壊が発生した。

中央部補修のCD-Rでは曲げ強度の向上が認められ、曲げ強度比は0.92であった。しかし、図5に示すとおり、Control-BではC-3が粘り強い破壊形態を示したのに対し、補修したCD-Rではこのような試験体は出現しなかった。これをControl-Bを基準とした最大曲げたわみ比で比較すると、CD-Cが0.46であったのに対し、CD-Rでは0.62であり、補修による増加は顕著ではなかった。また、CD-R-1では中央接着層に沿ったせん断破壊が発生して荷重が低下した。以上の結果より、最大せん断応力が生じる厚さ方向中央付近に接着はく離を含む集成材では、補修により曲げ強度は向上するものの、はく離が存在した影響はなお残るもの

と考えられる。

一方、引張側外層にはく離を含むTD-Cでは、曲げ強度比は0.89でControl-Bよりも低かったものの、曲げ強度の低下はCD-Rよりも小さかった。図6に、TD-Cの破壊形態を示す。TD-Cの破壊は引張側最外層ラミナで発生しており、TD-C-2およびTD-C-3では、はく離を含む接着層から最外層ラミナの一部がはがれる破壊が発生した。このような破壊形態は、TD-Cの曲げ強度比が低かった原因であると推測される。

補修したTD-Rの曲げ強度比は0.99であり、Control-Bとほぼ同等の曲げ強度であった。

また、図5(e)に示すとおり、TD-R-1は粘り強い破壊形態を示した。最大曲げたわみ比で比較すると、TD-Cが0.70であったのに対し、TD-Rは0.85であり、Control-Bには及ばなかったもののCD-Rよりも靱性は大きかった。したがって、せん断応力の小さい外層部の補修は、中央部よりも効果が大きいものと考えられる。

実験Bでは、各集成材の外層ラミナはほぼ無欠点であった。そのため、Control-Bの各試験体は粘り強い破壊形態を示したため、補修したCD-RやTD-Rの靱性はControl-Bには及ばなかった。しかし、曲げ強度に関しては一定の補修効果が認められた。製品では外

層ラミナに有節ラミナや縦つぎラミナが使用されることも多く、それら集成材の靱性は、外層に無欠点ラミナを使用した集成材よりも小さいと考えられる。したがって、供用中の建築物に使用されている集成材に発生したはく離の補修方法として、本研究で実施した手法は有効であると考えられる。

4. 結論

集成材の接着はく離が曲げ強度性能に及ぼす影響調べ、接着はく離の補修効果について検討した。集成材の厚さ方向の中央接着層に接着はく離を作製し、接着はく離の規模と曲げ強度性能との関係を調べた結果、集成材幅方向の半分近い規模のはく離であっても、曲げヤング係数には影響が認められなかった。曲げ強度は、はく離が存在すると低下する傾向が認められた。

次に、接着はく離の補修効果を調べるため、厚さ方向の中央接着層および曲げ試験時の引張側最外接着層に接着はく離を含む集成材を作製し、接着はく離にエポキシ樹脂充填して補修し曲げ強度性能を調べた。接着はく離の規模は、集成材の幅の約半分とした。引張側最外接着層にはく離を含む集成材の曲げヤング係数および曲げ強度は低下し、補修により回復したものの無はく離の集成材には及ばなかった。厚さ方向中央接着層にはく離を含む集成材では、曲げヤング係数の

低下はわずかであったものの曲げ強度は低下した。補修により、曲げヤング係数は無はく離集成材と同等まで回復し、曲げ強度も向上した。しかし、靱性は無はく離集成材に及ばなかった。

引用文献

- 1) National Forest Products Association : WOOD CONSTRUCTION, 65(1986)
- 2) 小野広治, 杉本英明, 久保 健, 成瀬達哉, 中田欣作 : スギ製材品のスリットおよび背割り処理による曲げ性能への影響. 奈良県森林技術センター研究報告. 33, 79-82 (2004)
- 3) 原田直希, 野本浩平, 大橋好光 : 日本建築学会 学術講演梗概集 C-1, 93-94 (2006)
- 4) 平松 靖, 清水庸介, 中島正夫, 宮林正幸, 宮武 敦, 新藤健太, 黒木 亮 : 日本建築学会 学術講演梗概集 C-1, 31-32 (2009)
(2019年3月27日 受理)

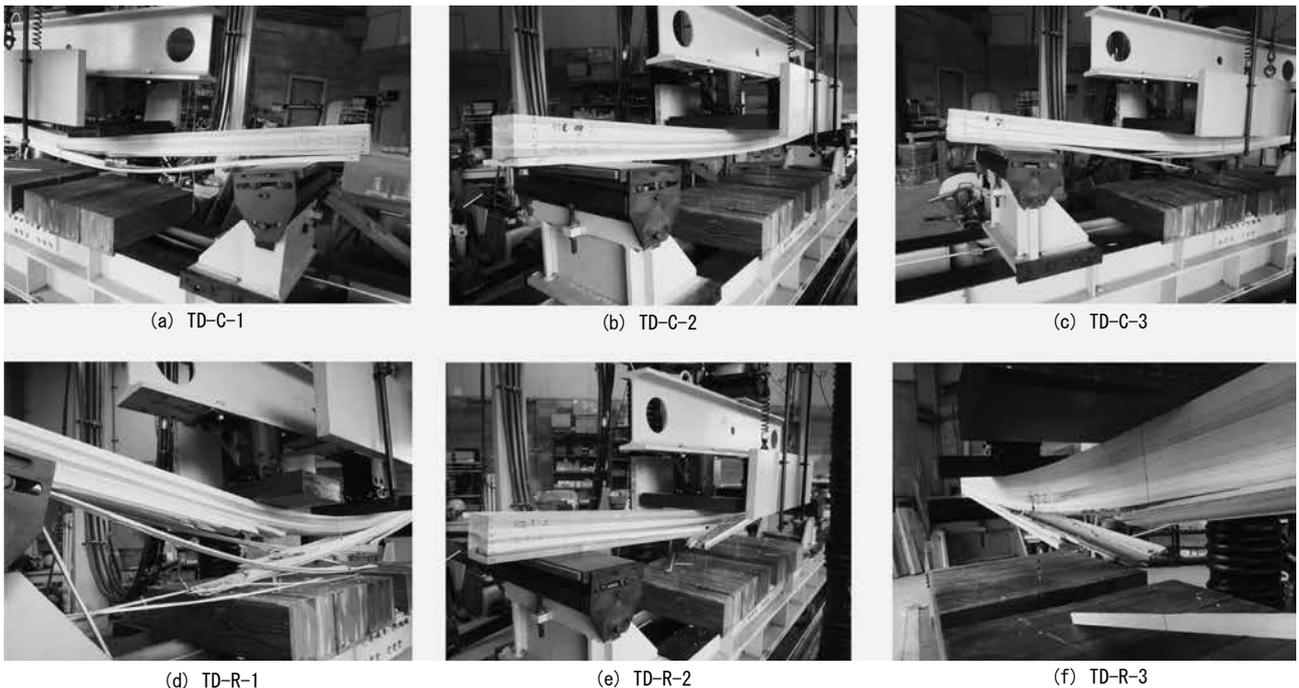


図6 実験Bの曲げ試験での破壊形態
注：TD-C、TD-R：表1を参照。

