

論文 内蔵集成材の表面塗料が異なる RC 合成梁の曲げ性能

横田 淳至*1・松井 智哉*2・田口 孝*3・伊藤 花恋*4

要旨: 筆者らは、新しい木質ハイブリッド構造部材として RC 造に集成材を内蔵した RCW 造を提案してきた。既往の実験で用いた RCW 梁試験体では、脱型後にコンクリートの両側面に軸方向のひび割れが生じ、初期剛性の低下などが課題として挙げられた。この要因として、内蔵した集成材がコンクリート中の水分を吸収し、膨張していることが推察された。そこで、集成材の表面塗料を実験変数として各種実験を実施した。その結果、表面塗料が異なることで吸水による集成材の膨張量や脱型後に生じるひび割れの状況に変化が生じることが認められた。ただし、RCW 梁の初期剛性の向上およびひび割れ発生の原因解明までには至らなかった。

キーワード: 木質ハイブリッド構造, 集成材, RC 合成梁, 4 点曲げ実験, 吸水実験, 表面塗料

1. はじめに

我が国では、令和 3 年の改正法「脱炭素社会の実現に資する等のための建築物等における木材の利用の促進に関する法律」により、一般の建築物において可能な限り木材を利用することが打ち出されたように、木質材料の有効利用が望まれている。そこで筆者らは、新しい木質ハイブリッド構造部材として RC 造に集成材を内蔵した Reinforced Concrete Engineering Wood Composite 構造(以下、RCW 造)を提案し、RCW 造の合成梁(以下、RCW 梁)の曲げ性能について検討を行ってきた^{1)~3)}。

これまでの検討によって、RCW 梁は RC 梁に比べて高い曲げ耐力を有すること¹⁾、集成材にコーチボルトを取り付けることにより RCW 梁の剛性および最大耐力時の変形量に影響を及ぼすこと²⁾が確認された。また、RCW 梁の曲げ耐力は、集成材強度に木質構造設計規準⁴⁾に示される基準値を用いた一般化累加強度理論により概ね評価可能であることを示した³⁾。一方で、これまでの RCW 梁試験体は、内蔵集成材にコンクリートからの水分の吸収を防ぐ目的で、造膜系塗料を塗布していたが、コンクリートの両側面において図-1 に示すような軸方向のひび割れが脱型後に生じることが明らかとなった。こうした現象によって断面二次モーメントが減少することによる初期剛性の低下などが課題として発生した。ひび割れの原因として、塗料が有効に作用せず集成材が水分を吸水することで、体積が膨張した影響などが考えられた。

そこで本研究では、集成材の表面に施した塗料の違いを試験体変数として、脱型後に生じるひび割れの要因を解明するために RCW 梁試験体の製作時における各構成材料のひずみ挙動を確認・把握するとともに、表面塗料の違いが曲げ性能に及ぼす影響を確認するために構造実験(4 点曲げ実験)を実施した。

2. 予備実験(集成材の吸水実験)

2.1 概要

文献 3)では、集成材に造膜系塗料を塗布した試験体 No.3-2 と集成材にポリエチレンフィルムを巻きつけた試験体 No.3-4 を用いて曲げ実験を実施した。脱型後に試験体の状況を確認すると、試験体 No.3-4 では図-1 に示すようなひび割れは生じなかった。そこで、集成材の状況を確認するため、曲げ実験終了後に RC 部を切り取った。その状況を図-2 に示す。試験体 No.3-2 は、集成材とコンクリートを完全に分離させた試験体 No.3-4 の集成材よりも色が濃くなっていたことから、集成材が水分を吸水し、膨張していた可能性が考えられた。そこで、この現象を確認するため、予備実験として各種表面処理を施した集成材の吸水実験を実施した。本予備実験は、塗装が施された試験片を、直射日光や風雨の影響が及ばない屋内に準備され、常温の水道水で満たされた水槽内に、試験片の全面が入水するよう静置させた。そして、試験片の上下面、側面、小口面のひずみ量の変化を計測した。

表-1 に試験片の概要、図-3 に試験片の形状とひずみゲージの貼付位置を示す。試験片は、「無塗布の試験片 NPW」、「従来^{1)~3)}使用していた塗料 A(水性造膜系)を塗布した試験片 P1W」、「別の塗料 B(ウレタン系)を塗布した試験片 P2W」の計 3 片である。なお、塗料は 3 層塗りとし、各塗料(製品)の仕様で定められた量を塗布した。

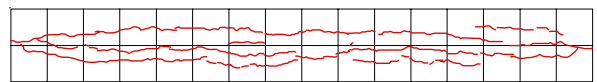


図-1 ひび割れ発生状況の例(既往試験体 No. 3-2³⁾)



(a) No. 3-2(造膜系塗料) (b) No. 3-4(フィルム巻き)

図-2 集成材の状況の例(既往試験体³⁾)

*1 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学専攻 (学生会員)

*2 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 准教授 博士(工学) (正会員)

*3 矢作建設工業(株) エンジニアリングセンター 主席研究員・部長 博士(工学) (正会員)

*4 矢作建設工業(株) エンジニアリングセンター 研究員 (非会員)

2.2 実験結果

図-4 に試験片の各ひずみ値の推移を示す。ひずみ値は、各々、上下、表裏2枚の平均の値である。試験片 NPW は、各面とも入水後から急激にひずみが増加した。また、上下面、側面、小口面の順にひずみは大きくなった。試験片 P1W は、各面とも入水後から徐々にひずみが増加した。その値は約 3 週間まで最大+4000 μ に達した。その後、計測ができなくなった。また、上下面、小口面、側面の順にひずみは大きい。試験片 P2W も各面とも入水後から徐々にひずみが増加した。一方、その値はどの面でも約 1 ヶ月間で+500 μ 程度であり、試験片 P1W の 1/8 程度に減少した。また、上下面、小口面、側面の順にひずみは大きくなった。

これらのことから、従来^{1)~3)}使用していた塗料 A を集成材に塗布していたとしても、コンクリートの硬化中に集成材が周囲の水分を吸収し、膨張している可能性が確認された。一方、塗料 B を塗布した場合には膨張量が小さくなることが確認された。よって、集成材に塗布する塗料を変更することで、集成材が周りの水分を吸収し膨張する現象を低減でき、構造実験の試験体に生じる脱型後のひび割れを抑制できる可能性が示唆された。

表-1 試験片一覧

試験片名	NPW	P1W	P2W
概要	無塗布	従来塗料塗布	新塗料塗布
使用集成材	カラマツ、同一等級、E95-F315(構造実験と同様)		
使用塗料名		塗料 A	塗料 B
塗料種類		水性造膜系	ウレタン系

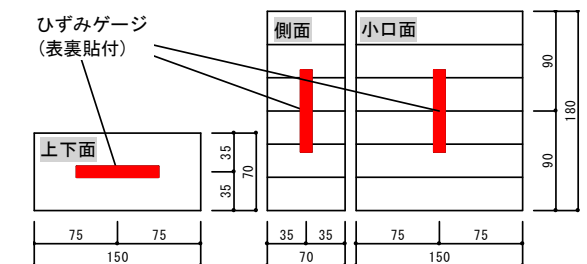


図-3 試験片形状、ひずみゲージ貼付位置(単位:mm)

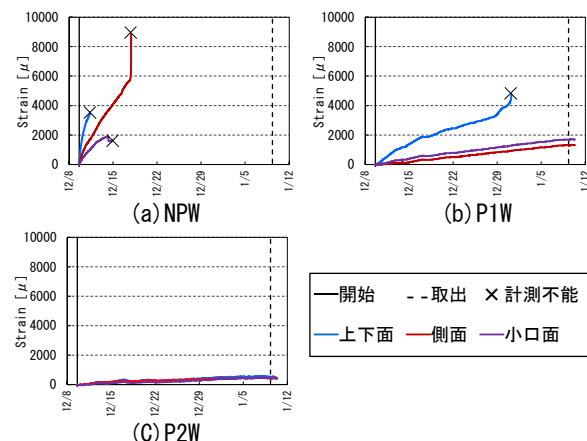


図-4 ひずみ値の推移

3. 構造実験(梁の4点曲げ実験)

3.1 試験体概要

表-2 に試験体の諸元、表-3 に試験体の一覧および使用材料の力学的特性を示す。試験体は、図-5 に示すように実大の 1/2~1/3 スケールである。実験変数は、集成材の表面に施した塗料の違いである。試験体 No.4-1 は、従来^{1)~3)}使用していた塗料 A を、試験体 No.4-2 は、予備実験で使用した塗料 B を集成材に塗布した試験体である。さらに、塗料 A、B に比べて、より高い水分の浸透防止性能があると期待したエポキシ樹脂系およびコーラル系の塗料を用いて、試験体 No.5-1、No.5-2、No.5-3 を製作した。なお、全ての集成材表面は平滑であり、塗料は 3 層塗り で各塗料の仕様で定められた量を塗布した。

表-2 試験体諸元

全試験体共通				
概要				RCW 梁
RC 部	梁幅	B	[mm]	200
	梁せい	D	[mm]	300
	スパン	L	[mm]	600
	主筋	-	-	4-D10 (SD295)
	引張鉄筋比	ρ_t	[%]	0.520
	あばら筋	-	-	2-D4@50 (SD295A)
	あばら筋比	ρ_w	[%]	0.281
集成材	せん断スパン比	M/Gd	-	2.2
	幅	b	[mm]	100
	せい	h	[mm]	180
コーチボルト	軸部径	d_b	[mm]	6
	長さ	L_b	[mm]	75
	突出長さ	-	[mm]	10
	総本数、ピッチ	-	[本]	180、@50 ダブル

表-3 試験体一覧および使用材料の力学的特性

試験体 No.		4-1	4-2	5-1	5-2	5-3
集成材 表面処理	塗料塗布	塗料名 A	B	C	D	E
	塗料種類	水性 造膜系	ウレタン系	エポキシ 樹脂系	コーラル 系	コーラル 系
コンクリート	種類	普通				
	圧縮強度 [N/mm ²]	28.0		28.6		
	割裂強度 [N/mm ²]	2.4		2.7		
	ヤング係数 [kN/mm ²]	21.9		22.2		
材齢 [days]	35					
鉄筋	規格	D10-SD295				
	降伏点 [N/mm ²]	334.9		375.6		
	引張強度 [N/mm ²]	465.0		494.1		
	ヤング係数 [N/mm ²]	183.8		178.3		
	降伏歪 [μ]	1822		2107		
	規格	D4-SD295A				
集木質構造 成設計規準 材基準強度 ⁴⁾	規格・材種	同一等級 E95-F315・カラマツ				
	曲げ強度 [N/mm ²]	31.5				
	曲げヤング係数 [kN/mm ²]	9.5				
	せん断強度 [N/mm ²]	3.6				

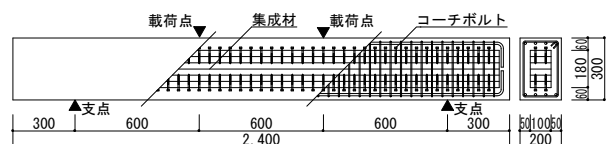


図-5 試験体形状(全試験体共通, 単位:mm)

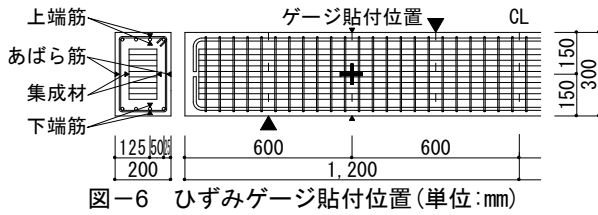


図-6 ひずみゲージ貼付位置(単位:mm)

3.2 試験体製作時の各材料の温度とひずみ

1章で示した脱型後のひび割れ発生の要因を明らかにするため、試験体製作過程におけるコンクリート打設時から型枠の脱型後までの外気温、コンクリート温度、鉄筋ひずみ、集成材の材軸方向およびせい方向のひずみの計測を行った。図-6にひずみゲージの貼付位置を示す。図-7に計測結果を示す。なお、各ひずみ値は対になる2枚のひずみゲージの平均値である。

外気温は、試験体 No.4-1, No.4-2 は冬期、試験体 No.5-1~No.5-3 は夏期に製作したため、それぞれ異なる。

コンクリートの温度は、試験体 No.4-1, No.4-2 では打設時に 9.8~10.5℃だったものが約 15 時間後に最大で 17.6℃まで上昇、試験体 No.5-1~No.5-3 では打設時に 31.2~31.9℃だったものが約 11 時間後に最大で 41.1℃まで上昇し、その後は外気温と同様な推移を示した。

主筋のひずみは、上端筋ではコンクリート打設後に上昇したのちに、減少し、その後緩やかに上昇している。下端筋も同様に、コンクリート打設後に上昇したのちに、減少しているが、その後は上端筋ほどの変化は見られなかった。脱型後は全試験体とも上端筋、下端筋ともに減少したが、その程度は下端筋よりも上端筋の方が大きい結果となった。上端筋と下端筋の履歴が異なっている要因は、上端筋は近接する試験体の型枠が左右の2面に対し、下端筋は3面となることからその拘束効果が大きいことに加え、試験体の上面が外気と接しているため上端筋の方が温度変化の影響を受けやすいためと考えられる。また、下端筋に関しては脱型後も型枠の床板に接しており、1面が拘束されたままになっていることからひずみ値の変化は緩やかであると考えられる。

あばら筋のひずみは、全試験体とも打設後から徐々に上昇した。脱型後のひび割れが最も著しかった試験体 No.4-1 では脱型時で 1400 μ 程度に達した。試験体 No.4-2, No.5-1, No.5-2 は、試験体 No.4-1, No.5-3 とは異なり、脱型後ひずみが増加する履歴を示した。

集成材の材軸方向のひずみは、試験体 No.4-2 を除き、脱型時までに -80~-200 μ 程度まで低下した。一方、試験体 No.4-2 は、一旦は低下したもののその後、100 μ 程度まで上昇した。

集成材のせい方向のひずみは、試験体 No.4-1 では脱型時までに 1500 μ 程度に達し、試験体 No.4-2 では変化が見られなかった。一方で、試験体 No.5-1, No.5-2 では脱

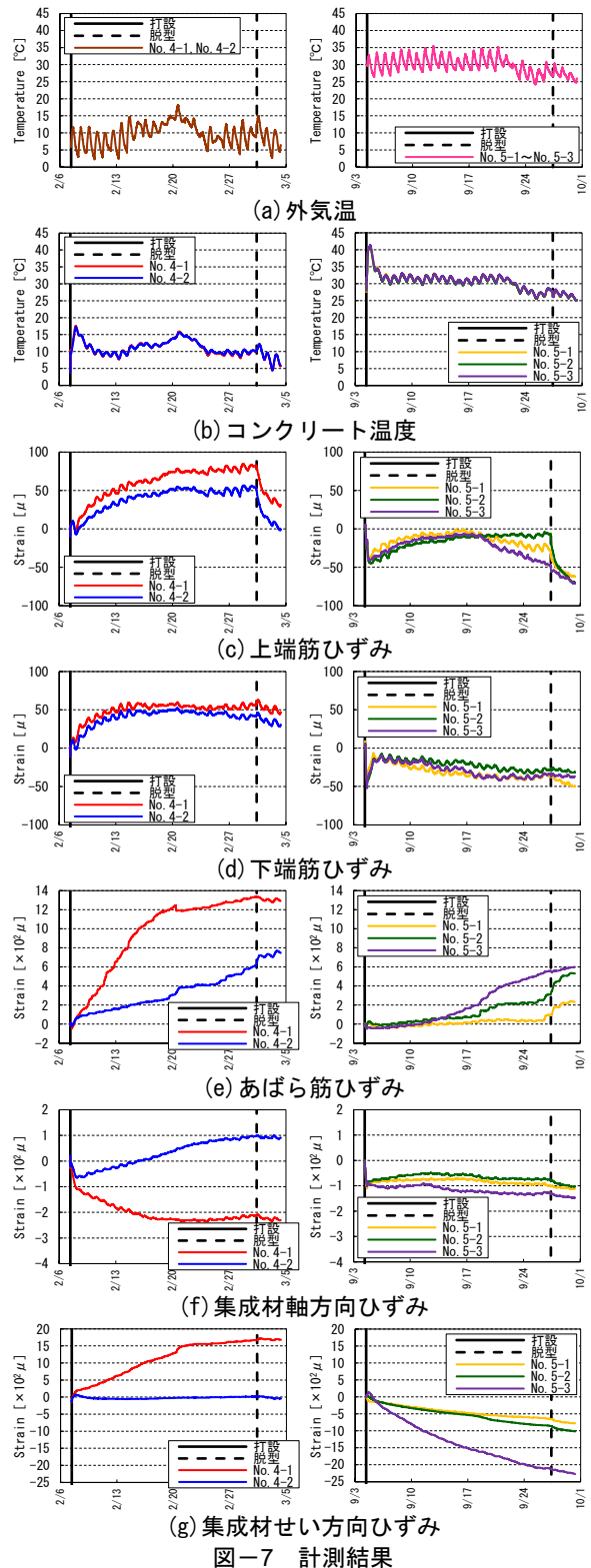


図-7 計測結果

型時までに -500 μ 程度、No.5-3 では -2000 μ 程度に達しており、試験体 No.4-1, No.4-2 とは全く異なる推移を示している。試験体 No.4-1, No.4-2 は 2 節で示した集成材の吸水実験における側面のひずみの推移と概ね対応する結果を示した。試験体 No.5-1~No.5-3 については、集成材が水分を吸収していたのであればひずみは増加するはずであるが、集成材がせい方向に減少する結果となった。

一方で、あばら筋のひずみは上昇している。これらの要因については、集成材のひずみ計測位置において集成材を構成するラミナが節などの影響を受けてバラツキが生じている等が考えられるが、さらに分析が必要である。ただし、集成材に塗布する塗料が異なることによって、内蔵した集成材のひずみ量、すなわち膨張収縮量が異なり、脱型後のひび割れに影響を与えることが示唆された。

3.3 構造実験の加力・計測概要

図-8 に加力方法および変位計の設置位置を示す。加力は4点曲げとし、加力スパンは600mmとした。加力サイクルは、後述する3.4節にて示す曲げ降伏耐力 P_y を基準とする荷重制御とし、 $1/4P_y$, $2/4P_y$, $3/4P_y$, $4/4P_y$ を1サイクルずつ加えた。その後は変位制御とし、部材角で $1/100$, $1/50$, $1/33$, $1/25$, $1/20$ まで1サイクルずつ加える漸増荷重とした。実験における荷重 $2P$ は試験装置のロードセルの値とし、変形 δ は2点の荷重点に設置した変位計の平均値から2点の支点到に設置した変位計の平均値を差し引いた値とした。

3.4 試験体耐力

表-4 に試験体の耐力算定結果を示す。曲げひび割れ耐力 P_c 、曲げ降伏耐力 P_y は、RC梁として文献5)に準拠して算出した。曲げ耐力 P_u は、RCW梁として文献3), 6)を参考に一般化累加強度理論に準拠して、終局せん断耐力 Q_{su} は、文献7)を参考に単純累加強度として算出した。曲げ耐力の算出にあたっては、コンクリートの圧縮強度には強度低減係数 $c \gamma_u=0.85$ 、集成材の曲げ強度には強度低減係数 $w \gamma_u=2/3$ を乗じた。なお、ここでの材料強度は、表-3の値を用いた。

4. 実験結果

4.1 試験体損傷状況

図-9 に試験体の損傷状況を示す。図中の赤線は脱型後～加力前に観察されたひび割れ、黒線は実験(加力)時に観察されたひび割れである。

(1)脱型後(～加力前)の損傷

試験体 No.4-1 のひび割れは、脱型直後から確認された。図-1 で示した同条件の既往の試験体で発生したひび割れと同様にコンクリートの両側面において軸方向のひび割れが生じていた。ひび割れ幅は、 $0.2\sim 0.4\text{mm}$ 程度であった。試験体 No.4-2 のひび割れは、脱型後1～2日後に確認された。両側面において軸方向のひび割れが生じていたが、既往の試験体と比較すると生じたひび割れの本数が少なく、長さも短かった。試験体 No.5-1 のひび割れは、脱型から2週間後程度に生じた。両側面において軸方向のひび割れが生じていたが、試験体5体のうち生じたひび割れの本数は最も少なかった。ひび割れ幅は、最大で 0.04mm 程度であった。試験体 No.5-2 のひび割れは、

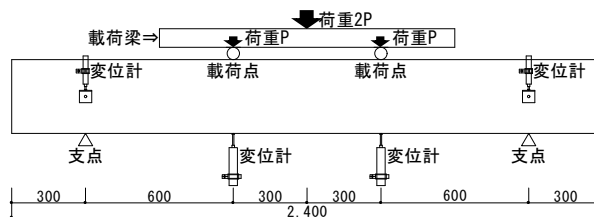


図-8 加力方法および変位計設置位置 (単位:mm)

表-4 耐力算定結果

試験体 No.		4-1	4-2	5-1	5-2	5-3
曲げひび割れ耐力	$2P_c$ [kN]	29.6			29.9	
曲げ降伏耐力	$2P_y$ [kN]	76.5			85.8	
曲げ耐力	$2P_u$ [kN]	219.1			229.6	
終局せん断耐力	$2Q_{su}$ [kN]	232.0			233.2	

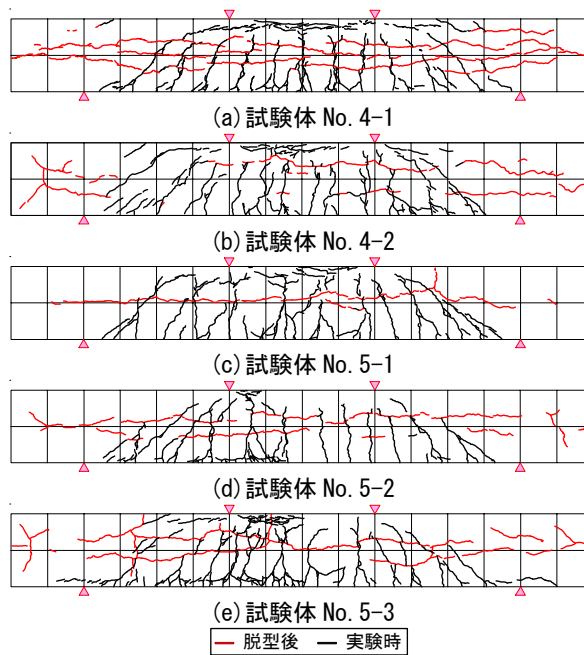


図-9 試験体損傷状況

脱型から2週間後程度に生じた。両側面において軸方向のひび割れが生じていたが、既往の試験体と比較すると生じたひび割れの本数は少なかった。ひび割れ幅は、最大で 0.04mm 程度であった。試験体 No.5-3 のひび割れは、脱型直後から生じた。既往の試験体で発生したひび割れと同様のひび割れが生じていた。ひび割れ幅は、最大で 0.4mm 程度であった。

この結果より、脱型後に生じるひび割れの程度は集成材に塗布する塗料によって異なるものと考えられる。本実験の範囲内においては、試験体 No.5-1 に塗布した塗料Cがひび割れを抑制するという点では、最も有効であると考えられる。ただし、脱型後のひび割れを生じなくさせるまでには至らなかった。

(2)実験時の損傷

実験時のひび割れの状況を見ると、全試験体ともに荷重点の間に曲げひび割れが発生し、荷重点と支点的の間ではせん断ひび割れが確認された。加えて、大変形時には梁の上部において圧壊が確認された。なお、試験体5体

の $4/4P_y$ サイクル時(曲げ降伏耐力時)の残留曲げひび割れ幅は、最大で 0.06mm であった。

4.2 荷重-変位関係

図-10 に荷重-変位関係を示す。なお、試験体 No.4-1, No.4-2 と試験体 No.5-1~No.5-3 では使用材料の力学的特性が異なるため、ここでは実験時の荷重 $2P$ を表-4 に示す曲げ耐力 $2P_u$ で除した値と、変位 δ を載荷スパン 600mm で除した部材角の関係で表した。また実験時の最大荷重 $2P_{max}$ と曲げ耐力 $2P_u$ の関係を表-5 に示す。

全試験体とも最大荷重に達すると同時に、集成材の破断音とともに荷重が急激に低下した。その後の荷重の低下は小さく安定した挙動を示した。各試験体の最大荷重は、計算耐力比が高い順に、試験体 No.4-2 が 1.29, 試験体 No.5-1 が 1.21, 試験体 No.4-1 が 1.12, 試験体 No.5-3 が 1.07, 試験体 No.5-2 が 0.93 となった。また、最大荷重は部材角 0.015~0.027 の範囲で発生した。ここで、実験時の最大荷重は計算耐力の 0.93~1.29 倍(平均 1.12 倍)となり、曲げ耐力の計算値 P_u は、概ね安全側に評価できていると考えられる。

全試験体とも部材角 0.006rad を超えた辺りから剛性が低下する傾向が見られた。しかし、試験体 No.4-2 のみ他の試験体と比較すると剛性が高い結果となった。なお、初期剛性については 4.3 節にて後述する。

実験結果における最大耐力や最大耐力時の変形の差異、剛性の差異については、文献3)でも報告したように、集成材の強度のバラツキによる影響が大きいと考えられる。このバラツキに関して、図-11 に集成材の材料試験(文献1)~3)および本実験での標本 42 片)から得られた曲げ強度の分布を示す。なお、材料試験に用いた試験片は RCW 梁の曲げ実験で用いる試験体の内蔵集成材と同一ロットから製作した。その結果、集成材の曲げ強度は、基準強度を上回っているものの、標準偏差は 12.32N/mm² であり、バラツキが大きいことが確認できる。こうした結果に加え、全試験体とも集成材の破断時に最大荷重に達したことから、大変形時においては、集成材の曲げ強度に起因する影響が極めて大きく、表面塗料による影響は明確にできないと考えられる。

4.3 初期剛性

表-6 に平面保持を仮定して計算した初期剛性 k_c および実験による初期剛性 k_t との比較を示す。また、図-12 に $1/4P_y$ サイクル時の荷重-変位関係と初期剛性 k_c の関係を示す。なお、せん断剛性は無視している。初期剛性 k_c は、式(1)より算出した。材料特性は表-3 の値を用いた。初期剛性 k_t は、 $1/4P_y$ サイクル時の剛性が低下する前の点から算出した(割線剛性)。ただし、試験体 No.4-2 に関しては原点がずれている結果が得られたことから、そのずれ量を考慮して計算した。

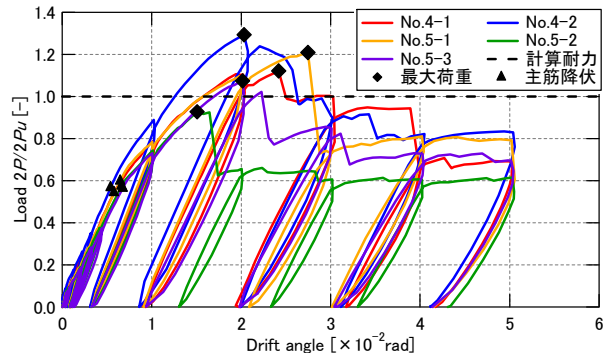


図-10 荷重-変位関係

表-5 最大曲げ耐力の計算値と実験値

試験体 No.	計算値 $2P_u$ [kN]	実験値 $2P_{max}$ [kN]	実験値/計算値
4-1	219.1	245.6	1.12
4-2		283.3	1.29
5-1	229.6	277.6	1.21
5-2		212.8	0.93
5-3		246.5	1.07

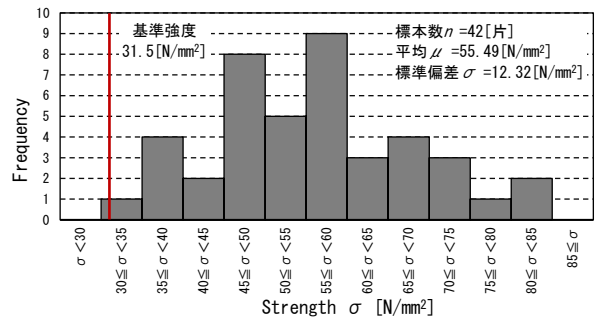


図-11 集成材の曲げ強度の分布

表-6 初期剛性の計算値と実験値

試験体 No.	計算値 k_c [kN/mm]	実験値 k_t [kN/mm]	実験値/計算値
4-1	118.8	57.1	0.48
4-2		57.0	0.48
5-1	119.6	67.5	0.56
5-2		62.2	0.52
5-3		55.2	0.46

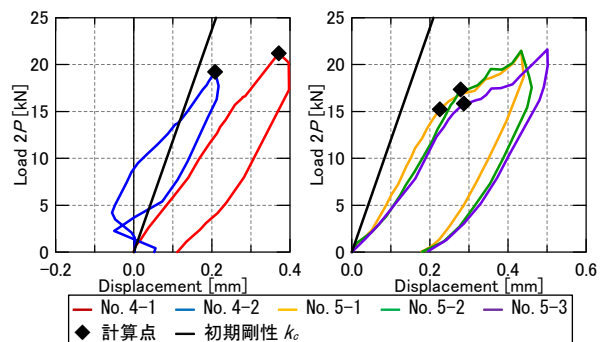


図-12 $1/4P_y$ サイクル時の荷重-変位関係と初期剛性

$$k_c = \frac{12E_c I_e}{5L^3} \quad (1)$$

ここで、 E_c : コンクリートのヤング係数[kN/mm²], I_e : 等価断面二次モーメント(集成材, 鉄筋を考慮)[mm⁴], L : スパン(支点位置から載荷点までの距離)[mm]である。

計算値 k_c と実験値 k_t を比較すると、全試験体とも計算値の 50%程度であり、実験値は計算値を下回る結果となった。脱型後に生じたひび割れが最も軽微であった試験体 No.5-1 が最も近く、計算値の 56%であった。

4.1 節で述べたように、集成材の表面処理の違いが脱型後に生じるひび割れに影響を与えていることは確認されたが、本実験の範囲内においては初期剛性に明確な影響を与えるまでには至らなかったと考える。

4.4 集成材状況

図-13に実験後にRC部を研り取った後の集成材の状況を示す。

全ての集成材は、下端から中央にかけて破断が見られ、明確な曲げ破壊が確認された。図-13の右の写真に示すように、集成材の素地が確認できる試験体 No.4-1, No.4-2 では、集成材最下層にある節を起点とした破断形式が確認された。

表面状態を見ると、全試験体とも集成材表面にはコンクリートが残っており、両者は付着していた可能性があるが、表面塗料の違いによる明確な差は確認できず、その影響は不明である。また、試験体 No.4-1 と試験体 No.4-2 の集成材の色を比較すると、試験体 No.4-1 の方が濃く(黒く)なっていた。2章で述べた予備実験の結果も考慮すると、試験体 No.4-1 の集成材は水分を吸収したように思われる。試験体 No.5-1, No.5-2, No.5-3 で用いた塗料は不透明であるため、集成材が水分を吸収しているかの有無による色の変化は不明であるが、試験体 No.5-1, No.5-2 については、4.1 節で示したように脱型後のひび割れを試験体 No.4-2 と同程度またはそれ以上に軽減できていることから、集成材の吸水状況は試験体 No.4-2 と同程度もしくは、それ以下と思われる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・吸水実験によって、各種塗料を集成材に塗布した場合でも、集成材が吸水、膨張する可能性のあることが確認された。
- ・試験体製作時における内部の挙動を確認することで、これまでの課題であった脱型後のひび割れ発生に関する知見は得られたが、発生の原因の解明には至らなかった。
- ・集成材に塗布する塗料を変更しても脱型後のひび割れ発生を防ぐことができなかったが、使用する塗料によってその程度は異なることが確認された。
- ・試験体の最大耐力は、集成材の曲げ強度に大きく影響されることから、本実験においては集成材の表面塗料の違いによる曲げ性能への影響は確認されなかった。
- ・本実験において、表面塗料の違いにより脱型後のひび

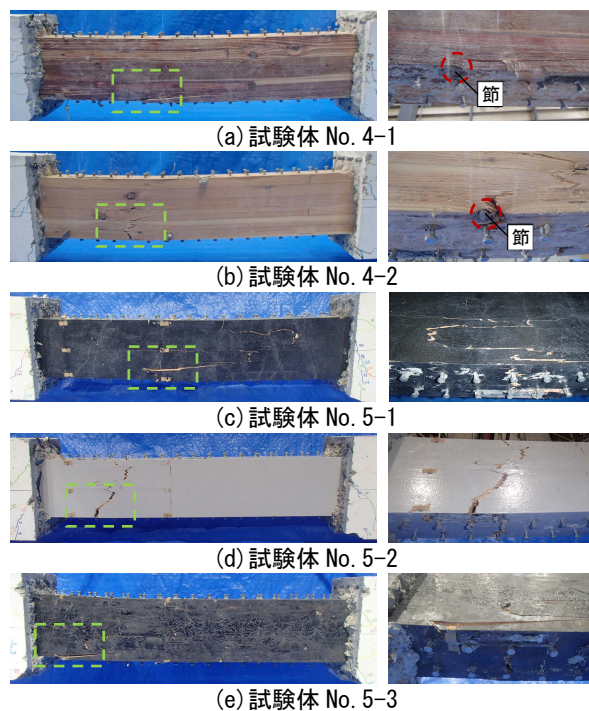


図-13 集成材状況

割れが軽減した試験体であっても、曲げによる初期剛性への明確な影響を把握するまでには至らなかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、豊橋技術科学大学 学部生の橋本篤氏には、多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田口孝, 松井智哉, Enkhtuvshin Serchinnyamgyal, Erdenebayar Ariunbilig: 集成材を内蔵した RC ハイブリッド梁のフィージビリティスタディ, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.2, pp.703-708, 2023.7
- 2) 横田淳至, 松井智哉, 田口孝: 集成材を内蔵した RC 合成梁の曲げ実験, 第 15 回 複合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, pp.266-275, 2023.11
- 3) 横田淳至, 松井智哉, 田口孝: 集成材と RC 部の接合条件の異なる合成梁の曲げ性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.2, pp.613-618, 2024.6
- 4) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2006
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018
- 6) 日本建築学会: 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2014
- 7) 藤井稔己, 都祭弘幸: 集成材を芯材としたハイブリッド RC 梁の曲げせん断特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会術講演梗概集, 構造IV, pp.273-274, 2022.9