

論文 集成材と RC 部の接合条件の異なる合成梁の曲げ性能

横田 淳至*1・松井 智哉*2・田口 孝*3

要旨: 筆者らは、木質材料の有効利用等の観点から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。本研究では、その合成梁部材に対して基本的な構造性能を把握する目的で 4 点曲げ実験を行った。その結果、内蔵する集成材とコンクリートの一体性を高めるために取り付けしたコーチボルトおよび集成材とコンクリート間の付着性能といった各材料間の応力伝達特性が、合成梁の復元力特性に影響を及ぼすことが認められた。また、その合成梁の曲げ耐力は、集成材強度に木質構造設計規準に示された基準特性値を用いることで、一般化累加強度理論に基づいた計算により概ね評価できることを示した。

キーワード: 木質ハイブリッド構造, 集成材, 合成梁, 4 点曲げ実験, 曲げ耐力, 接合条件

1. はじめに

近年、建築分野において、木質材料の有効利用が望まれている。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、公共および民間を含む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。加えて、環境負荷の低い建築技術や国産木材の安定供給および流通の促進が求められている。

そこで筆者らは、図-1 に示す、新しい構造システムとして、集成材を内蔵した RC 造の木質ハイブリッド構造である、Reinforced Concrete Engineering Wood Composite 構造(以下、RCW 造)を提案してきた^{1),2)}。RCW 造は、芯材となる集成材を RC で被覆した構造である。

筆者らは、文献 1)において RC 梁と 2 体の提案した RCW 造の合成梁(以下、RCW 梁)の 4 点曲げ実験を実施した。その結果、RCW 梁は RC 梁に比べて初期剛性は低下するが、高い曲げ耐力を有することを示した。また、RCW 梁の曲げ耐力は一般化累加強度理論に準じた計算により概ね評価できることを示した。文献 2)では、RC 梁と 4 体の RCW 梁の実験を実施した。その結果、集成材とコンクリートの一体性を高めるために集成材に取り付けたコーチボルト(以下、CB)の有無、本数によって剛性および最大耐力時の変形量に影響を及ぼすことが確認された。一方、RCW 梁は、載荷前から RC 部の側面の軸方向にひび割れが生じることが課題として確認された。

提案した RCW 造の諸性能は、基礎実験の段階にあり、限られた試験体のみの実験での検討・考察であるとともに、集成材の材種や表面処理など、まだ多数の検討課題が存在する。本研究は、いくつかの課題のうち、集成材と RC 部の接合条件が構造性能に及ぼす影響を把握することを目的とする。

2. 実験概要

2.1 概要

本実験では、集成材と RC 部の接合条件が RCW 梁の復元力特性に及ぼす影響を把握するために、接合条件を実験変数として 4 点曲げ実験を実施した。

さらに、本論では本実験と共通する変数を持つ既往実験²⁾の試験体(試験体 No.2-2, No.2-4)の情報および結果を併せて示し、比較・考察を行う。

2.2 試験体概要

表-1 に試験体の一覧、図-2 に試験体形状を示す。試験体は、実大のおよそ 1/2~1/3 スケールを想定し、全試験体とも、梁せい 300mm、梁幅 200mm とした。試験体変数は、「RCW 梁試験体において、集成材とコンクリートの一体化を高めるための CB の有無」および「集成材とコンクリートの付着の有無」として、計 4 体の試験体を用いた。全ての集成材表面は平滑であり、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る。集成材とコンクリート間の付着は、集成材にボ

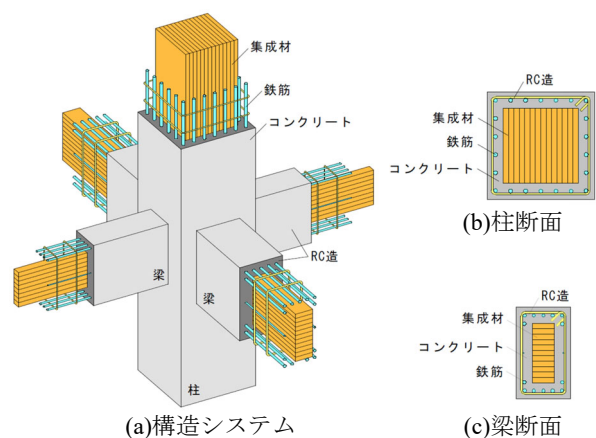


図-1 提案した木質ハイブリッド構造

*1 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学課程 (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)

表-1 試験体一覧

試験体 No.		3-1	3-2	3-3	3-4
概要		RCW 梁	RCW+CB 梁	RCW 梁 (付着無)	RCW+CB 梁 (付着無)
既往試験体 No.		2-2	2-4		
RC 部	梁幅 B [mm]	200			
	梁せい m/Qd [mm]	300			
	スパン L [mm]	600			
	主筋	4-D10 (SD295)			
	引張鉄筋比 ρ_t [%]	0.518			
	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/Qd	2.2			
	幅 b [mm]	100			
コーチ ボルト (CB)	せい h [mm]	180			
	軸部径 d [mm]	-	6	-	6
	長さ L_c [mm]	-	75	-	75
	突出長さ	-	10	-	10
	本数 (せん断スパン内) n [本]	-	26 @50 ダブル	-	26 @50 ダブル

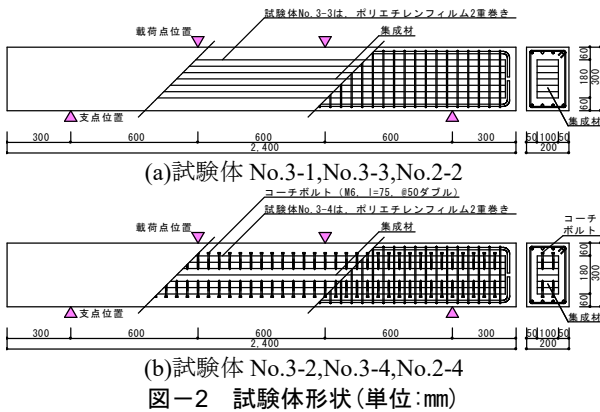


表-2 材料特性(コンクリート)

種類	圧縮強度 [N/mm ²]	割裂強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	材齢 [days]
普通	24.6	2.5	24.3	28

表-3 材料特性(鉄筋)

規格	降伏点 [N/mm ²]	引張強さ [N/mm ²]	ヤング係数 [N/mm ²]	降伏歪 [μ]	使用箇所
D4-SD295A	363.8	512.6	177.1	2054.6	あばら筋
D10-SD295	343.5	484.0	182.4	1883.1	主筋

表-4 材料特性(集成材)

材種	規格	繊維方向(圧縮)		繊維方向(曲げ)	
		強さ [N/mm ²]	ヤング 係数 [kN/mm ²]	強さ [N/mm ²]	ヤング 係数 [kN/mm ²]
カラマツ	同一等級 E95-F315	44.4	12.3	59.2	10.9

ポリエチレンフィルムを2重で巻くことで除去, すなわち付着無とした。一方, 集成材にフィルムを巻かず, 付着を強制的に除去していないものを付着有とした。

2.3 使用材料

表-2, 表-3, 表-4 に試験体で使用したコンクリート, 鉄筋および集成材の材料特性を示す。集成材の材料特性は, 文献 3) の I 構造用木材の強度試験法の 7 章, 9 章を参考に求めた。

2.4 加力概要

図-3 に本実験の加力方法を示す。加力サイクルは, 表-2 から表-4 の材料強度を基に, RC 梁として計算した曲げ降伏時荷重(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。

2.5 計測概要

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 点の載荷点に設置した変位計の平均値から 2 点の支点に設置した変位計の平均値を差し引いた値とした。図-3 に変位計の設置位置を示す。また, コンクリート, 鉄筋, 集成材の主要な箇所にはひずみゲージを貼り付け, ひずみを計測した。

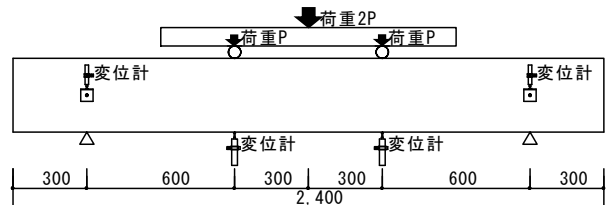


図-3 加力方法および変位計設置位置(単位:mm)

2.6 試験体耐力

表-5 に試験体の耐力算定結果を示す。文献 4) に準拠してひび割れ耐力 P_c , 降伏耐力 P_y を算出した。また, 文献 5) を参考に一般化累加強度理論に準拠して曲げ耐力 P_u 平均値, 文献 6) を参考に単純累加強度として終局せん断耐力 Q_{su} を算出した。曲げ耐力の算出にあたっては, コンクリート, 鉄筋, 集成材は剛塑性材料と仮定し, 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, 矩形断面の塑性断面係数と断面係数の比より, 強度低減係数 $w \gamma_u = 2/3$ を乗じた。なお, ここの材料強度は, 表-2 から表-4 の値を用いた。また, RC 造部分と集成材の上下境界面に発生するせん断耐力 q は, 式(1), (2)によって求めた。

$$\tau = QS/lb \quad (1)$$

$$q = \tau \times bL = QS/L \quad (2)$$

ここで、

τ : 境界面に発生するせん断応力 [kN/mm²]

q : 境界面に発生するせん断力 [kN]

Q : 梁に発生するせん断力×(b/B) [kN]

S : 集成材幅 b 分の境界面より外側の RC 部の断面一次モーメント [mm³]

I : 集成材幅 b 分 RC 造部, 集成材部を合わせた断面二次モーメント [mm⁴]

b : 集成材の幅 [mm]

B : 梁幅 [mm]

L : スパン長 [mm]

コーチボルトのせん断耐力は、集成材側で決定されると仮定し、文献 7) の第 6 章接合部の設計に準拠し、破壊形式を考慮した支圧耐力 q_B を算出して用いた。ここで、木材の支圧強度にはカラマツの基準支圧強度 η を用いた。境界面に発生するせん断力に対する CB の支圧耐力の比は、付着や摩擦の影響を無視すると 0.60 となっている。

3. 実験結果

3.1 実験結果

表-6 に実験結果の一覧、図-4 に荷重-変位関係を示す。全試験体は最大荷重に達すると同時に、集成材の破損によって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。試験体の変数ごとの比較については 4.3 節に後述する。

3.2 試験体損傷状況

図-5 に各試験体の損傷状況を示す。

(1) 載荷前

試験体 No.3-1, No.3-2 については、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。一方、集

成材とコンクリート間の付着を除去した試験体 No.3-3, No.3-4 については、そのひび割れが観測されなかった。この結果のみでは断定できないが、結果の違いは集成材の表面処理にあると考えられる。試験体 No.3-3, No.3-4 の集成材には造膜系塗料に加え、ポリエチレンフィルムを二重で巻きつけたことから、コンクリートの水分を吸収することを完全に防止することができたと思われる。一方、試験体 No.3-1, No.3-2 は、集成材に造膜系塗料を塗布していたが、吸水を完全に防ぐことができずに集成材が膨張したことで、試験体にひび割れが生じた可能性が考えられる。

(2) 載荷後

全試験体ともに載荷点の間に曲げひび割れが多く発生し、載荷点と支点の間ではせん断ひび割れが確認された。さらに、試験体 No.3-3 を除き、梁の上部において圧壊が確認された。これは、実験時の最大荷重が大きいことに加え、圧縮領域のコンクリート断面が RC 梁に比べ小さいことが原因として考えられる。なお、試験体 4 体の 4/4P_y サイクル時の残留曲げひび割れ幅は、0.00~0.04mm であった。

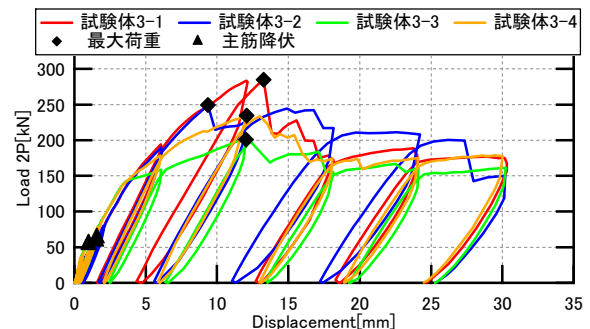


図-4 荷重-変位関係

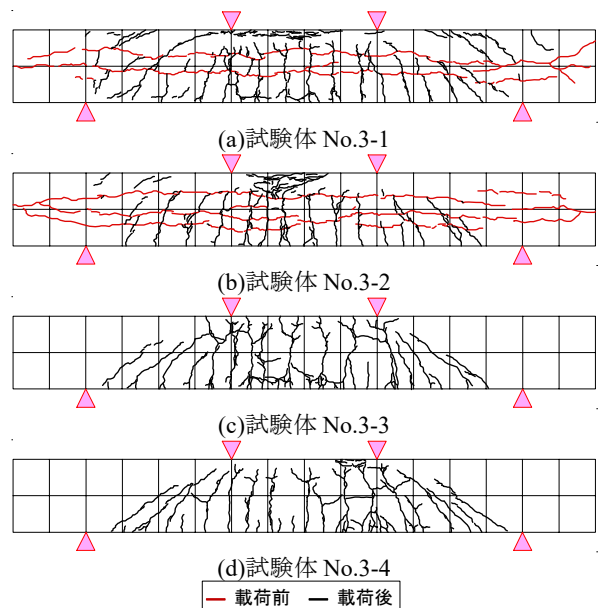


図-5 試験体損傷状況

表-5 耐力算定結果

試験体 No.		3-1	3-2	3-3	3-4
ひび割れ耐力	P_e [kN]	13.9			
降伏耐力	P_y [kN]	39.2			
曲げ耐力	$P_{U平均値}$ [kN]	142.2			
終局せん断耐力	Q_{eu} [kN]	155.2			
せん断余裕度	-	1.09			
発生せん断力(境界面)	q [kN]	136.5			
ボルトの支圧耐力	q_B [kN]	-	3.2	-	3.2
有効ボルト本数	n [本]	-	26	-	26
安全率	$n \cdot q_B / q$	-	0.60	-	0.60

表-6 実験結果一覧

試験体	最大荷重		初期ひび割れ		主筋降伏	
	荷重 2P [kN]	変位 δ [mm]	荷重 2P [kN]	変位 δ [mm]	荷重 2P [kN]	変位 δ [mm]
No. 3-1	284.7	13.3	28.9	0.6	58.3	1.5
No. 3-2	249.3	9.4	18.9	0.3	62.7	1.6
No. 3-3	200.9	12.0	39.8	0.5	54.4	1.0
No. 3-4	234.6	12.1	36.0	0.4	53.4	1.0

3.3 集成材損傷状況

図-6 に载荷後の各試験体の集成材の破損状況を示す。全試験体ともに内蔵した集成材の下端から中央にかけて、明確な曲げ破壊が確認された。特に、試験体 No.3-2, No.3-3 においては、集成材最下層にある節の位置を起点として破壊が発生していた。また、試験体 No.3-2, No.3-4 においては、CB の支圧により集成材が一部変形している箇所も確認された。

3.4 荷重-変位関係

図-7 に試験体変数ごとで比較した荷重 $2P$ と変位 δ の関係を示す。なお、ここでは実験時の荷重 $2P$ を 4.5 節にて後述する計算耐力 $2P_{u \text{ 下限値}}$ 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を包絡線で表した。

図-7(a) より、既往実験²⁾と本実験の RCW 梁と RCW+CB 梁試験体を比較した場合、CB の無い試験体 No.2-2, No.3-1 は復元力特性がそれぞれ異なっているが、

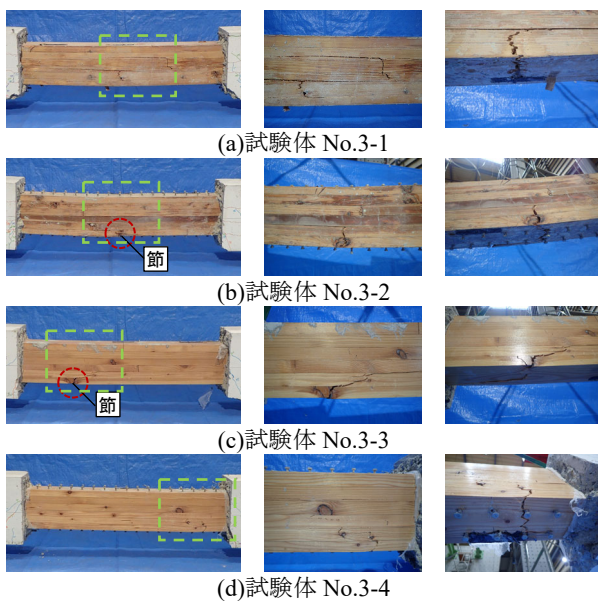


図-6 集成材損傷状況

CB の有る試験体 No.2-4, No.3-2 は同様な復元力特性を示している。このことから CB の有無が復元力特性に与える影響が大きいことが分かる。これは、CB によって集成材とコンクリートの一体性が高まり、安定した応力伝達特性が得られるためだと推察される。

図-7(b) より、CB の有無のそれぞれで、付着の有無を比較した場合、CB の有無に関係なく、付着の無い試験体 No.3-3 と No.3-4 では 0.006rad を超えた辺りから剛性が低下する傾向が見られる。特に、CB の無い試験体 No.3-3 は、その傾向が顕著である。このことから付着の有無が復元力特性に与える影響は大きいことが分かる。ただし、CB を有することで、その影響は小さくなっている。

図-7(c) より、付着の有無のそれぞれで、CB の有無を比較した場合、付着の有る試験体では剛性などに違いは見られないが、CB の有る試験体 No.3-2 の方が低い荷重で集成材の破断が発生した。文献 1), 2) において CB の有無を変数とした実験では、剛性および最大耐力時の変形量は異なるが、最大耐力自体の差は小さかったのに対し、試験体 No.3-1 と No.3-2 の耐力の比較では 13%ほど差が存在する。よって、これは集成材の曲げ耐力のパラツキによるものと考えられる。一方、付着が無い試験体では、CB の有る試験体 No.3-4 の方が高い剛性および耐力を示した。これは、CB による集成材とコンクリートの一体性に起因するものと推察される。

以上より、CB および付着による一体性が、集成材とコンクリート間の応力伝達特性が復元力特性に影響を及ぼすことが認められた。また、付着の除去により、载荷前のひび割れの発生を抑制できるが、剛性の低下が確認された。3.2 節に示したようにひび割れの発生には他の要因も考えられるため更なる検討が必要である。

3.5 RCW 梁の耐力

表-7 に実験時の最大荷重 $2P_{max}$ と 3.6 節における計算耐力 $2P_{u \text{ 平均値}}$ との比較を示す。その結果、全試験体にお

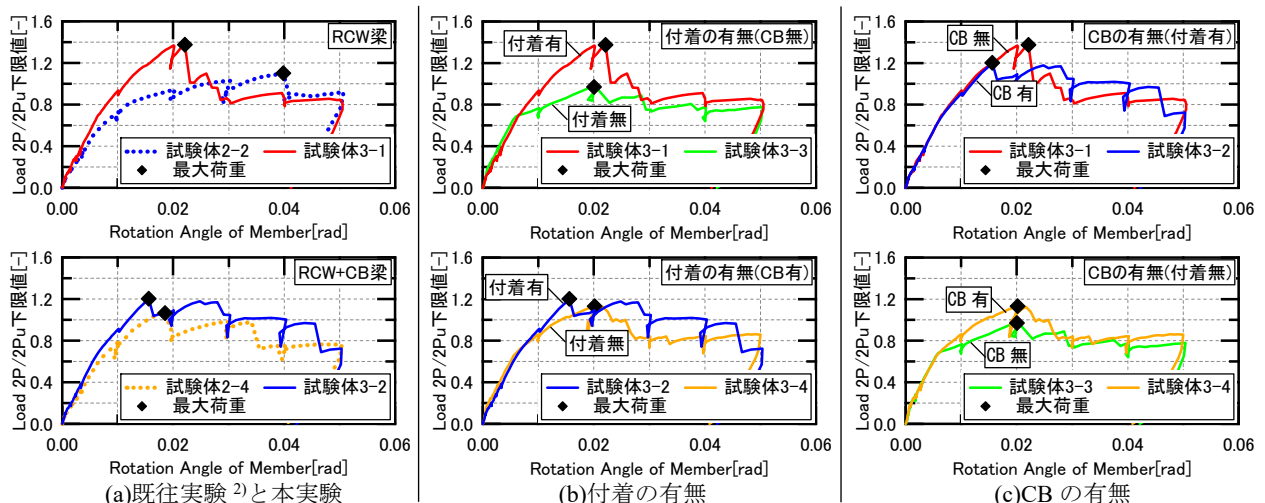


図-7 荷重-変位関係(包絡線)

表-7 実験値と各計算耐力との比較

試験体 No.	最大荷重 $2P_{max}$ [kN]	計算耐力 $2P_{U平均値}$ [kN]	$2P_{max}$ / $2P_{U平均値}$	計算耐力 $2P_{U下限値}$ [kN]	$2P_{max}$ / $2P_{U下限値}$	計算耐力 $2P_{U基準値}$ [kN]	$2P_{max}$ / $2P_{U基準値}$
3-1	284.7	284.3	1.00	207.2	1.37	215.6	1.32
3-2	249.3	284.3	0.88	207.2	1.20	215.6	1.16
3-3	200.9	284.3	0.71	207.2	0.97	215.6	0.93
3-4	234.6	284.3	0.83	207.2	1.13	215.6	1.09
2-2	287.7	297.9	0.97	261.5	1.10	229.7	1.25
2-4	278.6	297.9	0.94	261.5	1.07	229.7	1.21

表-8 集成材の曲げ強度

基準値 (木質構造設計規準)		曲げ試験結果		平均値 (表-4 採用値)		下限値 ($TL_{75\%,1-5\%}$)	
曲げ強さ [N/mm ²]	曲げ ヤング係数 [kN/mm ²]	曲げ強さ [N/mm ²]	曲げ ヤング係数 [kN/mm ²]	曲げ強さ [N/mm ²]	曲げ ヤング係数 [kN/mm ²]	曲げ強さ [N/mm ²]	曲げ ヤング係数 [kN/mm ²]
31.5	9.5	58.23	9.90	59.2	10.9	標準偏差 σ	
		35.97	11.14			13.07	0.84
		57.65	10.36			平均強度 μ	
		73.67	10.44			59.2	10.9
		60.35	11.56			$\mu - 2.336\sigma$	
		69.19	12.14			28.7	9.0

いて実験時の最大荷重が計算耐力を下回る結果となった。この要因として、集成材のバラツキと平面保持の関係が考えられる。

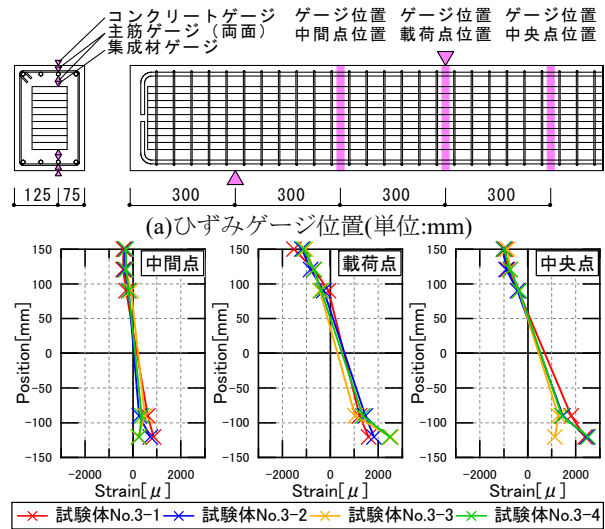
集成材のバラツキに関しては、4.3 節で述べたように集成材の節が欠点になり、耐力が低くなっていると思われる。また、表-8 の曲げ試験結果に示すように、節などの欠点により材料特性としての曲げ強度にバラツキがあることも確認できる。

平面保持の関係に関しては、図-8 に示すひずみ分布を用いて検討する。なお、引張側のコンクリートのひずみ値は、ひび割れの発生位置により大きな差異が生じるため検討から除外することとする。試験体 No.3-1, No.3-2 は、全ての位置において、ひずみ分布が概ね直線的分布であり、平面保持の関係が伺える。一方、試験体 No.3-3, No.3-4 は、中間点では引張側の主筋のひずみは集成材の 1/2 程度と小さく、荷点では引張側の主筋のひずみが極端に大きくなっており直線的分布から逸脱していることが確認できる。このことから、集成材とコンクリート間の付着を除去している試験体 No.3-3, No.3-4 は平面保持の関係が成立していないものと推察される。この情報のみでは程度を計ることはできないが、断面の平面が保持されていないことが強度低下に少なからず影響を及ぼしていると考えられる。

以上のことから、試験体 No.3-2, No.3-3, No.3-4 は No.3-1 に比べ、計算強度を下回ったと推察される。

3.6 耐力算定法の検討

文献 1), 2)において、RCW 梁の曲げ耐力は、一般化累加強度理論に基づいた計算によって概ね評価できることを示した。しかし、前節において集成材のバラツキにより、試験体によっては過大評価してしまう可能性のある



(b) $4/4 P_u$ サイクルにおける最大荷重時のひずみ分布
図-8 ひずみ分布

ことが分かった。そこで、表-4 に示した曲げ強度の算出値を見直し、表-8 に新たな曲げ強度の算出値を示す。基準値は、木質構造設計規準 7) に示されている集成材の基準特性値である。平均値(表-4 採用値)は、一般的に用いられる方法と同様に試験片全数(6 体)の曲げ試験結果(曲げ強さ)を平均した値である。下限値は、バラツキを考慮するために文献 3), 8) に示されている「順位統計の考え方を用いて信頼水準の 75% の 95% 下側許容限界値」として、試験片全数(6 体)の曲げ試験結果を用いて、式(3)より求めた下限強度である。(既往実験 2)の曲げ強度も同様の手法で算出。)

$$TL_{75\%,1-5\%} = \mu - K\sigma \quad (3)$$

ここで、

$TL_{75\%,1-5\%}$: 材料強度(下限強度)

μ : 平均強度

K : 信頼限界係数(ここでは, 2.336)

σ : 標準偏差

表-7 に表-8 の各値を用い, 一般化累加強度理論に基づいて算出した計算耐力および実験時の最大荷重との比較を示す。また, 図-9 に曲げモーメント M と軸力 N の相関関係を示す。結果として, CB および付着を無くした試験体 No.3-3 を除き, 最大荷重 $2P_{max}$ が計算耐力 $2P_u$ 基準値および $2P_u$ 下限値を上回り, 十分安全側の評価ができていることが確認された。ここで, 集成材強度の下限値は, 基準値と概ね一致しているため, RCW 梁の曲げ耐力は集成材強度を木質構造設計規準⁷⁾に示された基準強度を用い, 一般化累加強度理論に基づくことで算定可能であると考えられる。

3.7 初期剛性

表-9 に完全合成梁と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。初期剛性 k_c は, 式(4)より算出した。なお, 材料特性は表-2, 表-3 の値, 表-8 の下限値を用いた。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)。

$$k_c = \frac{12E_c I_e}{5L^3} \quad (4)$$

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 [mm⁴]

L : スパン(支点位置から載荷点までの距離) [mm]

計算値 k_c と実験値 k_t を比較すると, 集成材とコンクリートの付着がある試験体 No.3-1, No.3-2 は, 計算値の49%程度, 集成材とコンクリートの付着を除去した試験体 No.3-3, No.3-4 は計算値の58%程度であった。全試験体とも実験値は, 計算値を下回ったが, 付着のある試験体の方が計算値と実験値の差異が大きくなる傾向にあることが確認された。これは, 4.2 節で示したように, 載荷前の段階でコンクリートの両側面に梁軸方向に沿ったひび割れが生じていたため, 初期剛性が低下したものと考えられる。ただし, CB の有る試験体 No.3-2, No.3-4 は CB の無い試験体 No.3-1, No.3-3 に比べ初期剛性が高いことが確認された。したがって, CB が集成材とコンクリートの一体性に寄与していると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- ・コーチボルト無しの試験体では, コーチボルト有りの試験体と比べて早い段階で剛性が低下する試験体や最大荷重時の変形が異なるなどの違いが見られ, 集成材とコンクリート間の接合状況によって復元力特性が大きく異なる。

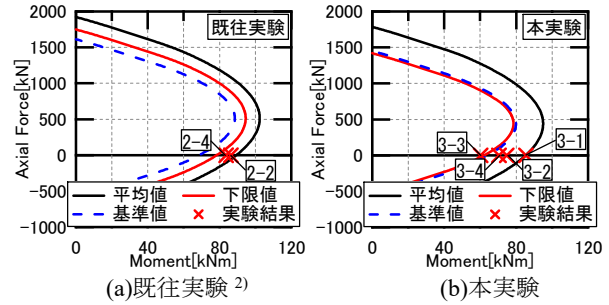


図-9 M-N曲線

表-9 初期剛性

試験体名	計算値 k_c [kN/mm]	実験値 k_t [kN/mm]	k_t/k_c [-]
No. 3-1	128.9	62.4	0.48
No. 3-2		65.1	0.50
No. 3-3		69.8	0.54
No. 3-4		79.4	0.62

- ・集成材とコンクリート間の付着の有無による比較では, コーチボルトの有無に関係なく, 付着の無い試験体では早い段階から剛性が低下する傾向が見られる。
- ・既往実験からの課題である RCW 梁の載荷前に生じるひび割れ発生抑制には, 更なる検討が必要である。
- ・RCW 梁の曲げ耐力は, 集成材強度に木質構造設計規準に示される基準値を用いることで, 一般化累加強度理論により概ね評価可能である。
- ・実験により RCW 梁の曲げ性能を確認することができた。ただし, 集成材の吸水の影響など多数の検討課題が存在することから, 今後の課題として進める。

参考文献

- 1) 田口孝, 松井智哉, Enkhuvshin 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) 日本住宅・木材技術センター : 構造用木材の強度実験マニュアル, 2011.3
- 4) 日本建築学会 : 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018.12
- 5) 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, 2014.1
- 6) 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
- 7) 日本建築学会 : 木質構造設計規準・同解説, 2006.12
- 8) 日本住宅・木材技術センター : 木造軸組工法住宅の許容応力度設計, 2017.3