

論文 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

田口 孝^{*1}・松井 智哉^{*2}・Enkhtuvshin Serchinnyamgyal^{*3}・Erdenebayar Ariunbilig^{*4}

要旨：本論では、木質材料の有効利用、および部材軽量化の観点から新しい木質ハイブリッド構造として集成材を内蔵した RC 造のハイブリッド部材を提案し、その梁部材に対して基本的な構造特性、特に曲げ性能、曲げ耐力を確認するために 4 点曲げの構造実験を実施した。実験の結果、提案した木質ハイブリッド梁は RC 造の梁に比べ初期剛性は低下するものの、高い曲げ耐力を示すことが確認された。そして、その曲げ耐力は一般化累加強度理論に準拠することで、もしくは曲げ解析によって概ね評価できることを示した。その結果、提案したハイブリッド部材は実現の可能性のあることが示された。

キーワード：木質ハイブリッド部材、集成材、4 点曲げ実験、曲げ耐力、曲げ解析

1. はじめに

近年、木質材料の建築分野への有効利用が望まれている。これは、平成 22 年に「公共建築物等における木材の利用の促進に関する法律」が施行、令和 3 年にはその法律が「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」に改正され、国の方針として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の利用を目指すことが打ち出されたことに加え、近年の環境負荷の低い自然循環型材料の有効利用や、国産木材の安定供給・流通の促進といった趨勢を受けた影響である。

そこで筆者らは、新しい構造システムとして、図-1 に示すような集成材を内蔵した RC 造の新しい木質ハイブリッド構造（Reinforced Concrete Engineering Wood Composite 構造、以下、RCW 造と呼ぶ）を用いた構造システムを提案した¹⁾。RCW 造は、集成材の周りを RC 造で囲うように配置している。すなわち、従来の SRC 造の鉄骨を省略し、その代わりに集成材を用いたイメージであり、部材の軽量化も図ることができる。

文献 2)~3)では、鋼管の内部に木材を内蔵し、その隙間にグラウトを充填する合成構造部材が提案されており、一般的なコンクリート充填鋼管部材（CFT 部材）に比べて軽量化や高流動コンクリートの削減が図られている。しかし、この構造は充填鋼管部材を対象としており、今回提案する集成材を内蔵した RC 造のハイブリッド部材とは異なっている。一方、文献 4)~5)では、本論と同様な木芯に集成材を用いたハイブリッド柱・梁部材に対して実験的研究が実施されており、圧縮特性や、曲げ耐力・せん断耐力に対して検討が行われている。ただし、これらの報告は限られた条件下の限られた試験体に対しての

みの実験や検討であることから、まだまだ不明な点が多いのが現状である。

提案した RCW 造は、軸力の影響、集成材の材種、方向性、表面処理、施工方法、耐久性など多くの検討課題が存在する。そこで本論では、フィージビリティスタディとして、RCW 造の梁部材を対象として基本的な構造特性である曲げ性能、曲げ耐力を確認する目的で 4 点曲げの構造実験を実施するとともに、曲げ性能、曲げ耐力に関する検討を行い、本部材の実現の可能性について示す。

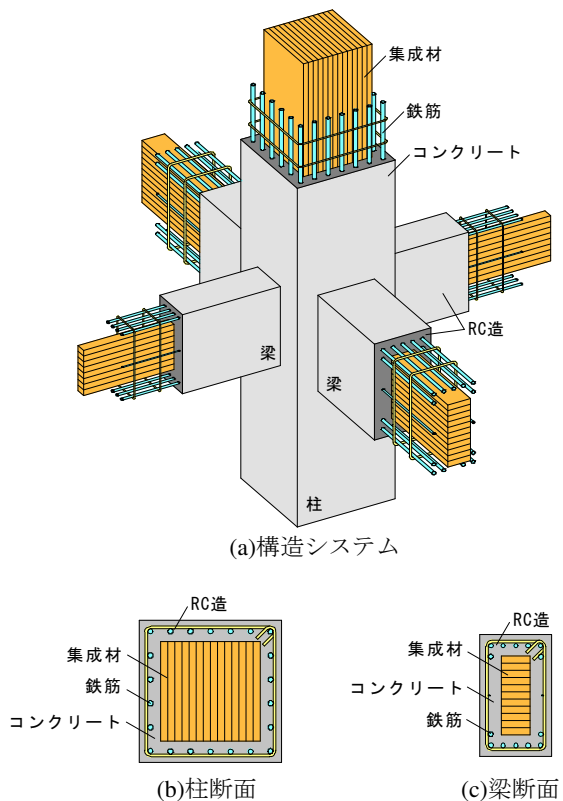


図-1 提案する木質ハイブリッド構造

^{*1} 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）

^{*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} 豊橋技術科学大学大学院 建築・都市システム学専攻 大学院生（学生会員）

^{*4} 豊橋技術科学大学 建築・都市システム学課程 大学生

2. 実験概要

2.1 概要

RCW 造の梁部材の基礎的な構造性能を把握する目的で4点曲げ実験を行い、RC 造の梁との違い、および RCW 造の梁の曲げ性能などを把握することを目的とする。

2.2 試験体概要

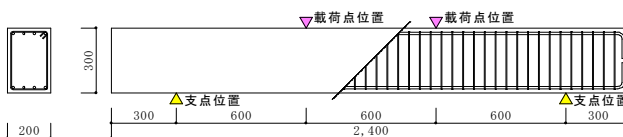
RCW 造の梁の試験体は、実物のおよそ 1/2～1/3 スケールを想定し、梁せい 300mm、梁幅 200mm とした。試験体一覧を表－1に、試験体を図－2に示す。実験パラメータとしては、一般的な RC 造の梁である RC 梁（試験体 No.1-1）、RCW 造の梁である RCW 梁（試験体 No.1-2）、集成材にコーチボルトを取り付けコンクリートとの一体性を高めた RCW 梁（試験体 No.1-3）の3体とした。集成材の表面は平滑であり、かつ、コンクリートの水分の吸収を防ぐ目的で造膜系塗料を塗布した。

2.3 使用材料

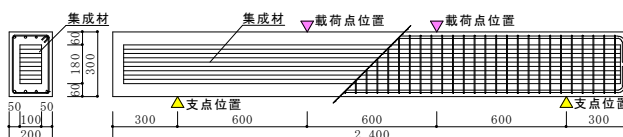
試験体で使用したコンクリート、鉄筋および集成材の材料試験結果を表－2から表－4に示す。集成材の材料特性は、文献6)のⅠ．構造用木材の強度試験法の7章、9章を参考に求めた。

表－1 試験体一覧

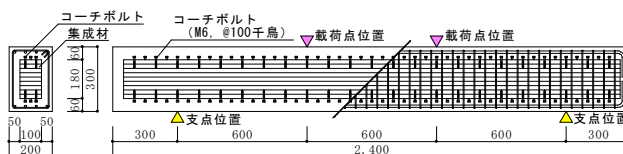
試験体名		No.1-1	No.1-2	No.1-3
概要		RC梁	RCW梁	RCW梁+ボルト
RC部	梁幅	B (mm)	200	
	梁せい	D (mm)	300	
	スパン長	L (mm)	600	
	主筋		4-D10 (SD295)	
	引張鉄筋比	ρ_t (%)	0.518	
	あばら筋		2-D4@50 (SD295A)	
	あばら筋比	ρ_w (%)	0.281	
集成材	せん断スパン比	M/Qd	2.2	
	幅	b (mm)	100	
	せい	h (mm)	180	
コーチボルト	軸部径	d (mm)	6	
	長さ	L_e (mm)	50	
	突出長さ	(mm)	10	
ボルト本数		(本)	136	



(a)試験体 No.1-1



(b)試験体 No.1-2



(c)試験体 No.1-3

図－2 試験体図

2.4 加力概要

本実験の加力装置図を図－3に示す。加力は「油圧式圧縮・曲げ試験機 前川試験機 WAC-200-B1」を用い、4点曲げ実験とした。

加力サイクルは、後述する RC 梁の降伏荷重 P_y を基準とし、 $1/4P_y$ 、 $2/4P_y$ 、 $3/4P_y$ 、 $4/4P_y$ の4段階の荷重を1サイクルずつ加え、最後に部材角で 1/20 (30mm) まで荷重を加える漸増载荷とした。

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を、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を採用した。また、鉄筋、集成材、コンクリートの主要な位置にはひずみゲージを貼付し、それぞれの箇所のひずみ値を計測した。

2.6 試験体耐力

RC 造の梁として文献7)に準拠して計算した試験体の曲げひび割れモーメント M_c (ひび割れ耐力 P_c) および曲げ降伏モーメント M_y (降伏荷重 P_y)、文献8)を参考に後述の4.1節に示す一般化累加強度理論に準拠して計算した試験体の終局曲げモーメント M_p (曲げ耐力 P_u)、および文献5)を参考に単純累加強度として求めた試験体の終局せん断耐力 Q_{su} の計算結果を表－5に示す。なお、本計

表－2 材料試験結果（コンクリート）

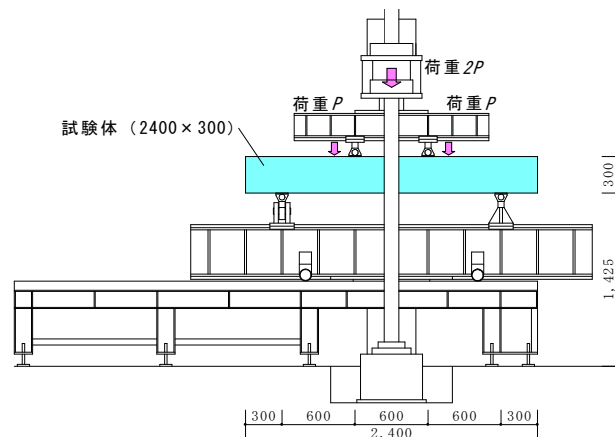
種類	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	材齢 (日)
普通コンクリート	19.2	2.2	24.0	40

表－3 材料試験結果（鉄筋）

鉄筋	規格	降伏点 (N/mm^2)	引張強さ (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	降伏歪 (μ)	使用箇所
D4	SD295A	310	490	170	1829	あばら筋
D10	SD295	348	483	182	1909	主筋

表－4 材料試験結果（集成材）

材種	規格	繊維方向		繊維方向	
		圧縮強さ (N/mm^2)	圧縮 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)
カラマツ	同一等級、E95-F315	40.9	11.4	45.4	10.6



図－3 加力装置

算では表－2から表－4の値を用いた。ただし、集成材のせん断強度のみ文献9)の基準特性値を用いた。

また、RC造部分と集成材の上下境界面に発生するせん断力 q は、以下の式によって求めている。

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

$$q = QSL/I \quad (2)$$

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 分の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)

さらに、コーチボルトのせん断耐力は、集成材側で耐力が決定されると仮定し、文献9)の第6章接合部の設計(602曲げ降伏型接合具を用いた接合)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を用いた。

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

各試験体の鉛直荷重 $2P$ と鉛直変位 δ の関係を図－4に、実験結果一覧を表－6に示す。ここでは、下向きの変位を正側として示している。

さらに図中には、表－6に示す計算耐力、RC梁の終局曲げモーメント時荷重(曲げ耐力 P_u)、RCW梁の終局曲げモーメント時荷重(曲げ耐力 P_u)を示す。併せて、鉄筋に添付したひずみゲージから応力を計算し、どれか1枚の応力が最初に降伏応力に達した点もプロットしている。ここで、鉄筋の応力は表－3の材料特性を用いて応力とひずみの関係を完全パイリニアモデルとして求めた。また、図－4(b)には目視によって観測された初期ひび割れの発生点、曲げひび割れモーメント時荷重(ひび割れ耐力 P_c)も併せて示す。

この結果、RC梁の試験体No.1-1は計算値の1.48倍、RCW梁の試験体No.1-2、No.1-3は1.09、1.15倍の結果となった。コーチボルトを取り付けた試験体No.1-3の方が、取り付けしていない試験体No.1-2より最大荷重は大きい。

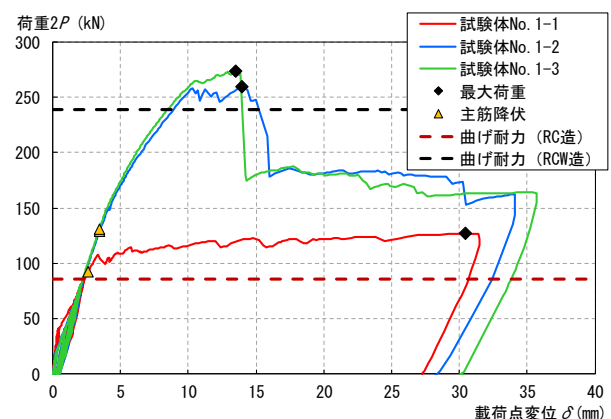
表－5 試験体耐力

試験体名		No.1-1	No.1-2	No.1-3
曲げひび割れモーメント	M_c (kN・m)	7.4	7.4	7.4
曲げひび割れモーメント時荷重	P_c (kN)	12.3	12.3	12.3
降伏曲げモーメント	M_y (kN・m)	24.0	24.0	24.0
降伏曲げモーメント時荷重	P_y (kN)	39.9	39.9	39.9
終局曲げモーメント	M_u (kN・m)	25.8	71.7	71.7
終局曲げモーメント時荷重	P_u (kN)	43.0	119.4	119.4
終局せん断耐力	Q_{su} (kN)	89.9	109.8	109.8
境界面に発生するせん断力	q (kN)		127.9	127.9
ボルトの支圧耐力	q_B (kN)			1.54
有効ボルト本数	n (本)			34
安全率	$n \cdot q_B / q$			0.41

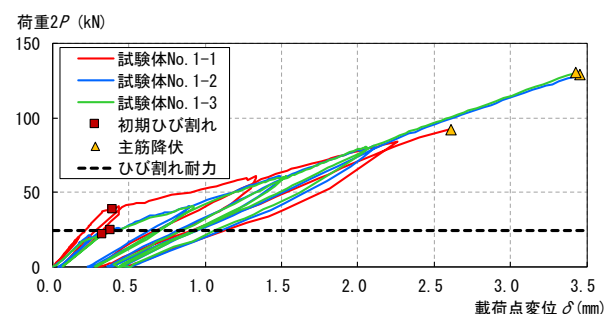
その差は小さいことから、この値のみでコーチボルトの効果が明確に表れたとは断定できない。しかしながら、RCW梁の曲げ耐力は一般化累加強度理論から求めた値で概ね表すことができると考察される。

変形性能としては、RC梁の試験体No.1-1は鉄筋の降伏以降徐々に荷重が増加しながら大変位(30mm、部材角=1/20)まで安定した挙動を示す結果が得られた。一方、RCW梁の試験体No.1-2、No.1-3は10mm～15mm(部材角=1/60～1/40程度)のあたりで最大荷重を迎え、内部の集成材の破断音とともに一旦急激に荷重は低下した。その後は一定の荷重を保ったまま大変位(30mm、部材角=1/20)まで安定した挙動を示す結果となった。

初期剛性に関しては、RC梁の試験体No.1-1に対し、RCW梁の試験体2体は低い結果となった。ただし、この2体に関しては集成材を内蔵したことで、線膨張係数が大きく異なるなどの影響によるものと考えられる部材軸方向に沿ったひび割れが、加力前の段階で発生していたことから、その影響も含まれていると考えられるため、更なる検討が必要である。



(a)全体変位



(b)微小変位領域(主筋降伏まで)

図－4 荷重－変位関係

表－6 実験結果一覧

試験体名	計算耐力 (kN)	最大荷重		主筋降伏		初期ひび割れ		最大荷重 / 計算耐力
		荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	
No.1-1	86.0	127.3	30.5	92.4	2.6	38.6	0.4	1.48
No.1-2	238.9	259.3	13.9	129.1	3.5	24.7	0.4	1.09
No.1-3	238.9	273.7	13.5	130.4	3.4	21.6	0.3	1.15

3.2 試験体のひび割れ状況

各試験体の実験終了後の状況を写真－１に示す。

この結果、全ての試験体とも載荷点▽の間（曲げモーメントが一定区間）に曲げひび割れが多く発生しており、その外側ではせん断ひび割れも観測できる。

その中で、RC 梁の試験体 No.1-1 に比べ、RCW 梁の試験体 No.1-2 と No.1-3 では、載荷点▽と支持点△の間でせん断ひび割れが多い。これは表－５に示したように、せん断余裕度が低いことが影響しているものと考察される。さらに、RCW 梁である試験体 No.1-2 と No.1-3 では、梁の上部においてコンクリートの圧壊が観測された。これは、実験時の最大荷重が大きかったことに加え、圧縮領域のコンクリートの断面積が RC 梁の試験体 No.1-1 に比べて少ないことが理由として考えられる。

一方、実験終了後に試験体 No.1-2 と No.1-3 の等曲げ区間（写真－１ (b) (c) の点線部）のコンクリートを研り取った結果、内蔵した集成材には下端から中央にかけて集成材が破断するとした明確な曲げ破壊が発生していた。

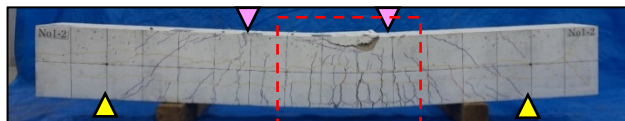
3.3 ひずみ分布

各サイクル（１～４サイクル）におけるピーク時（最大荷重時）のひずみ分布を図－５に示す。また、試験体 No.1-2 と No.1-3 に関しては、実験時の変位 10mm 時、および最大荷重時 P_{max} のひずみ分布を図－６に示す。

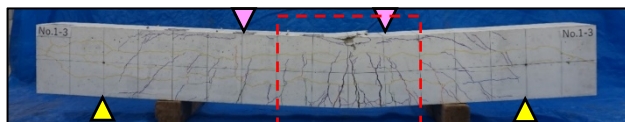
この結果、引張側のコンクリートのひずみ値を除くと、４サイクル目まで、全ての試験体とも直線的な分布となっており、平面保持の関係が成り立っていると言える。なお、引張側のコンクリートのひずみは、１～２サイクル目でコンクリートにひび割れが発生したことで、ゼロを示



(a)試験体 No.1-1



(b)試験体 No.1-2



(c)試験体 No.1-3

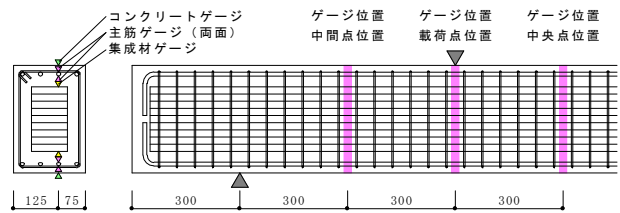


(d)試験体 No.1-2 (研り後) (e)試験体 No.1-3 (研り後)

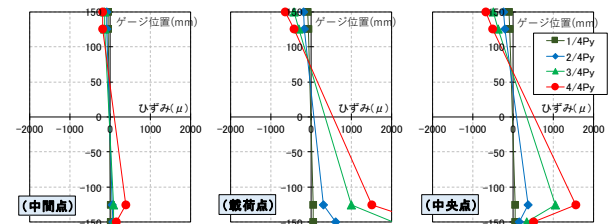
写真－１ 最終破壊状況

したり、大きな値を示したりしたものと考えられる。

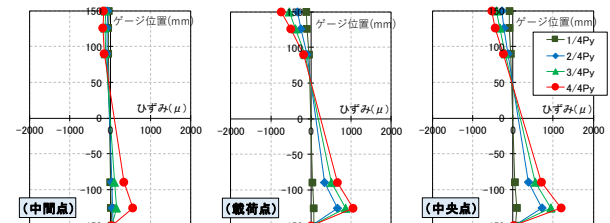
変位 10mm 時のひずみ分布では、試験体 No.1-2 と No.1-3 に大きな違いは見られない。一方、最大荷重時 P_{max} の



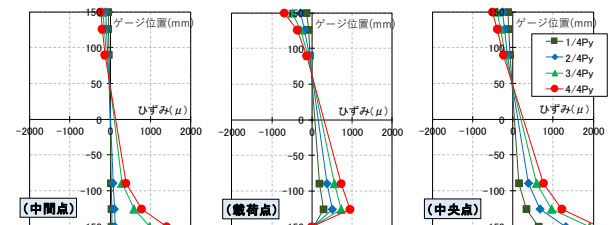
(a)ひずみゲージ位置



(b)試験体 No.1-1

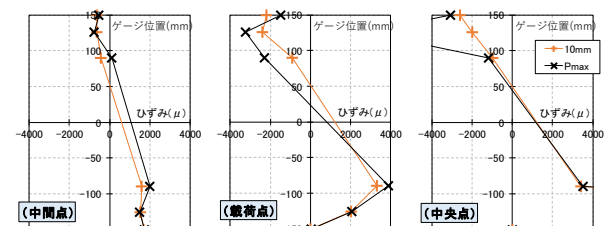


(c)試験体 No.1-2

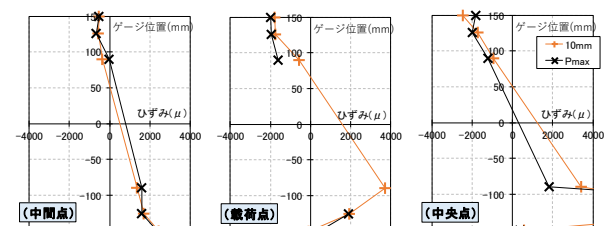


(d)試験体 No.1-3

図－５ 各サイクルのひずみ分布



(a)試験体 No.1-2



(b)試験体 No.1-3

図－６ 変位 10mm, 最大荷重時のひずみ分布

分布では、少しではあるが試験体 No.1-3 の方が直線分布に近い。ただし、その差は小さいことから、この結果からもコーチボルトに効果があったことを明確に観測することはできなかった。

3.4 初期剛性

平面保持を仮定して計算した初期剛性の計算結果と実験結果（1 サイクル目）の比較を表－7 に示す。ここで、鉄筋のヤング係数、集成材の曲げヤング係数には、表－2 から表－4 の値を用いて計算を行った。

この結果、計算結果では RC 梁が RCW 梁となることで初期剛性が 95% となった。これは、集成材のヤング係数はコンクリートのヤング係数に比べ、半分以下と低いためである。

一方、計算結果と実験結果を比較すると、RC 梁は実験値の方が 87% となり、RCW 梁は 71%, 69% となった。この結果から RCW 梁の方が差の大きな結果となった。これは、3.1 節にも示したように RCW 梁では載荷前にひび割れが発生していた影響も含まれていると考えられるため、更なる実験などの検討が必要である。

4. 曲げ耐力の評価に関する考察

4.1 RCW 梁の曲げ耐力（一般化累加強度）

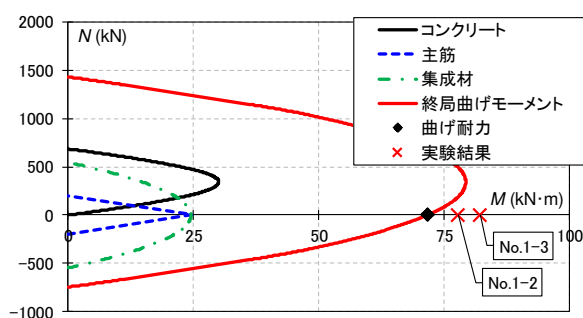
RCW 梁の曲げ耐力は、文献 8) を参考に一般化累加強度理論に準拠して算出し、コンクリート、鉄筋、集成材は剛塑性材料を仮定した。その際、コンクリートの圧縮強度には強度低減係数 $c_{yu}=0.85$ を乗じた値を用い、集成材の曲げ強さには矩形断面の塑性断面係数と断面係数の比（ $=2/3$ ）を乗じた値を用いた。これは、3.1 節に示したよ

表－7 初期剛性の計算結果と実験結果

試験体名	計算結果 (kN/m)	実験結果 (kN/m)	実験結果 ／計算結果
No.1-1	136.0	118.0	0.87
No.1-2	128.7	90.8	0.71
No.1-3		88.7	0.69

表－8 曲げ耐力の計算結果と実験結果

試験体名	計算結果		実験結果	実験結果 ／ 計算結果
	終局曲げモーメント (kN・m)	曲げ耐力 (kN)	最大荷重 (kN)	
No.1-2	71.7	119.4	129.7	1.09
No.1-3	71.7	119.4	136.9	1.15



図－7 曲げ耐力の計算結果と実験結果

うに、実験の最大荷重到達時に集成材の破断が生じたこと、図－6 から最大荷重時には集成材の引張りひずみはおよそ 4000μ となっていたことから、集成材断面の端部が「曲げ強さ」に達した段階で曲げ破断が発生すると想定したためである。試験体の曲げ耐力の計算結果を表－8 に、軸力と曲げモーメントの相関曲線を図－7 に示す。なお、本計算には表－2 から表－4 の値を用いた。

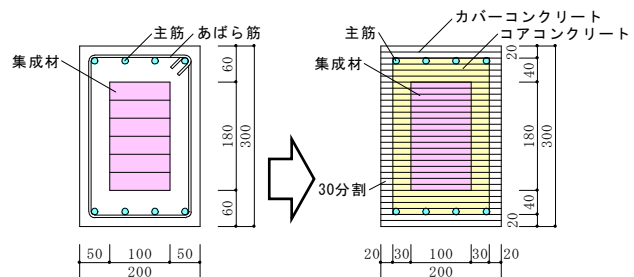
この結果、RCW 梁の曲げ耐力は一般化累加強度理論に準拠して算出した値によって、概ね評価できることが確認された。

4.2 RCW 梁の曲げ耐力（曲げ解析）

RCW 梁の試験体を対象として曲げ解析を行い、曲げ解析による曲げ耐力の評価手法、およびその妥当性について検討を行った。解析では平面保持を仮定し、解析断面として図－8 に示すような試験体断面を 30 等分割したコンクリート要素、鉄筋要素および集成材要素から構成されるものとした。なお、あばら筋より外側をカバーコンクリートと定義し、その材料特性は異なるものとした。図－9 にコンクリート要素の応力－ひずみ関係を示す。コンクリート要素には、拘束効果を加味できる修正 Kent-Park モデル¹⁰⁾を採用し、その係数等を表－9 に示す。一方、鉄筋要素、集成材要素の応力－ひずみ関係にはバイリニアモデルを採用した。なお、本モデルには表－2 から表－4 の値を用いた。

解析結果を図－10 および表－10 に示す。ここで、前 4.1 節に示した破断時期やひずみ量などの理由により、解析における最大荷重時曲げモーメント（曲げ耐力）は、図－10(c) に示すように集成材断面の端部が「曲げ強さ」に達した点と定義した。

この結果、解析による最大曲げモーメントに対する実験値の最大曲げモーメントの比は 1.08, 1.14 であり、概ね近い結果が得られた。また、主筋降伏時の曲げモーメントを比較すると 1 割程度の差異であり、こちらも比較的对応した結果が得られた。コンクリートの発生応力は圧縮強度時のひずみを若干超えて軟化応力域に入っているが、今回の RCW 梁の試験体では集成材が「曲げ強さ」に達した点を終局曲げモーメント（曲げ耐力）とすることで概ね評価できることが確認できた。



図－8 解析モデル

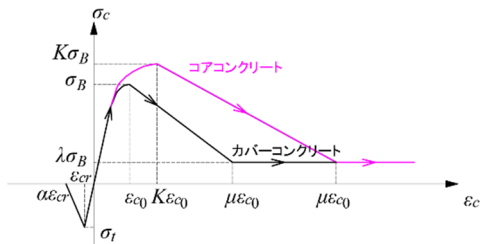
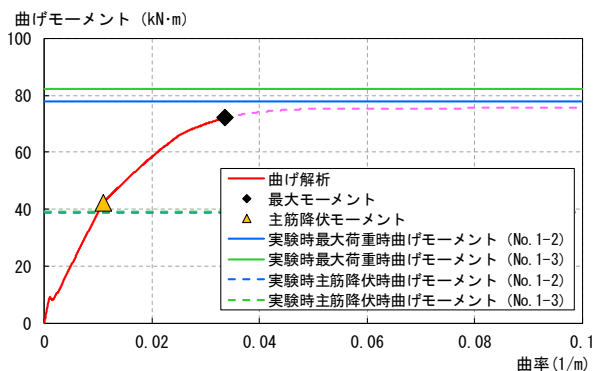


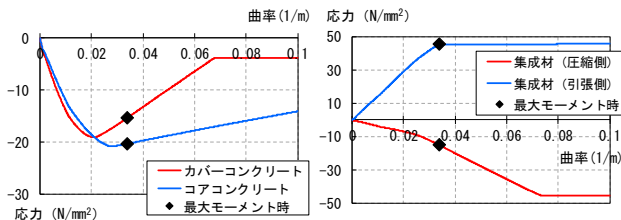
図-9 解析モデル（コンクリート要素）

表-9 コンクリート要素の解析モデルの係数

入力データ	カバーコンクリート	コアコンクリート
ε_{c0}	0.002	
K	1.00	1.09
λ	0.2	
μ	4.0	10.0
α	2.0	



(a) 曲げモーメントー曲率関係



(b) コンクリートの発生応力

(c) 集成材の発生応力

図-10 曲げ解析結果

表-10 曲げ解析結果

試験体名	主筋降伏時曲げモーメント		最大荷重時曲げモーメント		実験耐力 ／ 解析耐力
	実験 (kN·m)	解析 (kN·m)	実験 (kN·m)	解析 (kN·m)	
No.1-2	38.7	42.4	77.8	72.1	1.08
No.1-3	39.1		82.1		1.14

5. まとめ

本論では、新しい木質ハイブリッド構造（RCW 造）の概要を示すとともに、実現の可能性を検討するためにフィージビリティスタディを行なった。今回の検討において得られた知見を下記に示す。

- ・RC 造の梁に比べ、RCW 造の梁では、広い範囲で多くのひび割れが見られる。また、RCW 梁では圧縮側のコンクリートでの圧壊も確認された。
- ・RC 梁は、鉄筋の降伏以降徐々に荷重が増加しながら大変形まで安定した挙動を示す。

- ・RCW 梁では、最大荷重を示した後、一旦急激に荷重は低下を示すが、その後は一定の荷重を保ったまま大変形まで安定した挙動を示す。
- ・RC 梁より RCW 梁の方が、初期剛性の低い結果を示したが、加力前に発生したひび割れの影響も考えられることから、更なる検討が必要である。
- ・RCW 梁の断面のひずみ関係は、鉄筋が降伏する前の範囲では直線的な分布を示しており、平面保持の関係が成り立っている。
- ・RC 梁に比べ、RCW 梁の方が高い曲げ耐力を示す。
- ・RCW 梁の曲げ耐力は、一般化累加強度理論、もしくは曲げ解析によって概ね評価できる。
- ・本論での検討によって、提案した木質ハイブリッド構造の梁部材は実現の可能性のあることを示すことができた。ただし、本構造システム全体の実現に向けては、まだまだ多くの検討課題が存在することから、今後の課題として進めていく。

参考文献

- 1) 田口孝, 松井智哉: 集成材を内蔵した RC ハイブリッド梁の曲げ性能に関する実験的研究, 日本地震工学会大会梗概集, 第 17 回, E-12-6, pp.1-10, 2022.12
- 2) 柴尾海斗, 中原浩之: 木材を内蔵したグラウト充填鋼管の中心圧縮性状, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅲ, pp.1333-1334, 2019.9
- 3) 山本貴正, 中原浩之: 木材を内蔵した鋼管短柱の圧縮特性に関する基礎研究, 第 14 回復合・合成構造の活用に関するシンポジウム講演集, 日本建築学会・土木学会, pp.36.1-36.8, 2021.11
- 4) 都祭弘幸: 芯材コンクリート柱の中心圧縮特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.44, No.2, pp.679-684, 2022.7
- 5) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造Ⅳ, pp.273-274, 2022.9
- 6) 日本住宅・木材技術センター: 構造用木材の強度試験マニュアル, pp.8-17, 2011.3
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 日本建築学会: 木質構造設計基準・同解説, 2006.12
- 10) Robert Park, M. J. Nigel Priestley and Wayne D. Gill: Ductility of Square-Confined Concrete Columns, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.108, No.ST4, pp.929-950, April.1982