

(37) 集成材を内蔵したRC合成梁の曲げ実験

横田 淳至¹・松井 智哉²・田口 孝³

¹豊橋技術科学大学 建築・都市システム学系 学部生（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: yokota.atsushi.fz@tut.jp

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）
（〒441-8580 愛知県豊橋市天伯町雲雀ヶ丘 1-1）
E-mail: matsui.tomoya.tx@tut.jp

³矢作建設工業株式会社 エンジニアリングセンター 主席研究員・部長 博士（工学）
（〒480-1342 愛知県長久手市茨ヶ廻間 1533-74）
E-mail: t-taguchi@yahoo.co.jp

筆者らは、木質材料の有効利用などの観点から新しい木質ハイブリッド構造部材として RC 造に集成材を内蔵させた RCW 造を提案してきた。本研究では、その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。試験体の変数は、集成材の有無、集成材に取付けるコーチボルトの有無と本数、集成材の幅とした。結果、RCW 梁は RC 梁と比較して、初期剛性は低下するが、より高い曲げ耐力に達することを確認した。さらに、コーチボルト有の RCW 梁はコーチボルト無の RCW 梁と比較して、より小さい変位域で最大耐力に達しており、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確認された。また、曲げ耐力は一般累加強度理論に基づいた計算及び曲げ解析により概ね評価できることを示した。

Key Words: reinforced concrete, laminated wood, composite beam, bending test, bending analysis

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。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 年には同法律が「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」へと改正され、我が国の方針として、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、集成材を内蔵させた RC 造の新しい木質ハイブリッド構造である、Reinforced Concrete Engineering Wood Composite 構造(以下、RCW 造と呼ぶ)を提案してきた¹⁾。RCW 造は、従来の SRC 造の鉄骨部に集成材を用い、周囲を RC 造で囲うように配置したイメージである。文献 2), 3) では、本提案と同様に芯材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行われ、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、これらは限られた数の試験体への構造性能に関する実験・検討のみであり、まだまだ不明な点が多いのが現状である。そこで本研究では、RCW 梁の性能評価手法の構築に向けて、基本的な構造性能を把握することを目的とする。

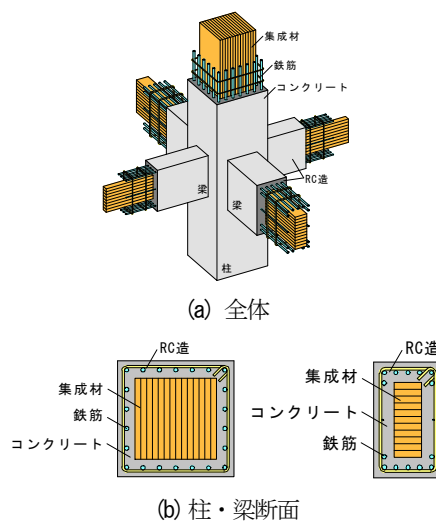


図-1 提案する木質ハイブリッド構造

2. 実験概要

(1) 概要

本実験では、RCW 造の梁部材を対象とし、基本的構造性能を把握することを目的に4点曲げ実験を行った。主に、RC造の梁との違い、およびRCW造の梁の曲げ性能(特に曲げ耐力、曲げ変形状等)を把握することを目的とする。

(2) 試験体概要

表-1に試験体の仕様一覧、図-2に試験体形状および寸法を示す。試験体寸法は実物のおよそ1/2~1/3スケールを想定し、梁幅200mm、梁せい300mmとした。試験体パラメータは以下の5つを設定した。試験体No.2-1は、一般的なRC造の梁であるRC梁とした。試験体No.2-2は、試験体No.2-1に幅100mm、せい180mmの集成材を

内蔵したRCW造の合成梁であるRCW梁とした。試験体No.2-3は、試験体No.2-2の集成材部にコーチボルト(CB)を取り付けコンクリートとの一体性を高めたRCW+CB梁とした。試験体No.2-4は、試験体No.2-3より集成材に取り付けるCBの本数を増やしたRCW+CB梁とした。試験体No.2-5は、試験体No.2-4の集成材幅を60mmに変更したRCW+CB梁とした。なお、集成材の表面は平滑であり、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。

(3) 使用材料

表-2から表-4に試験体に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示す。なお、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。

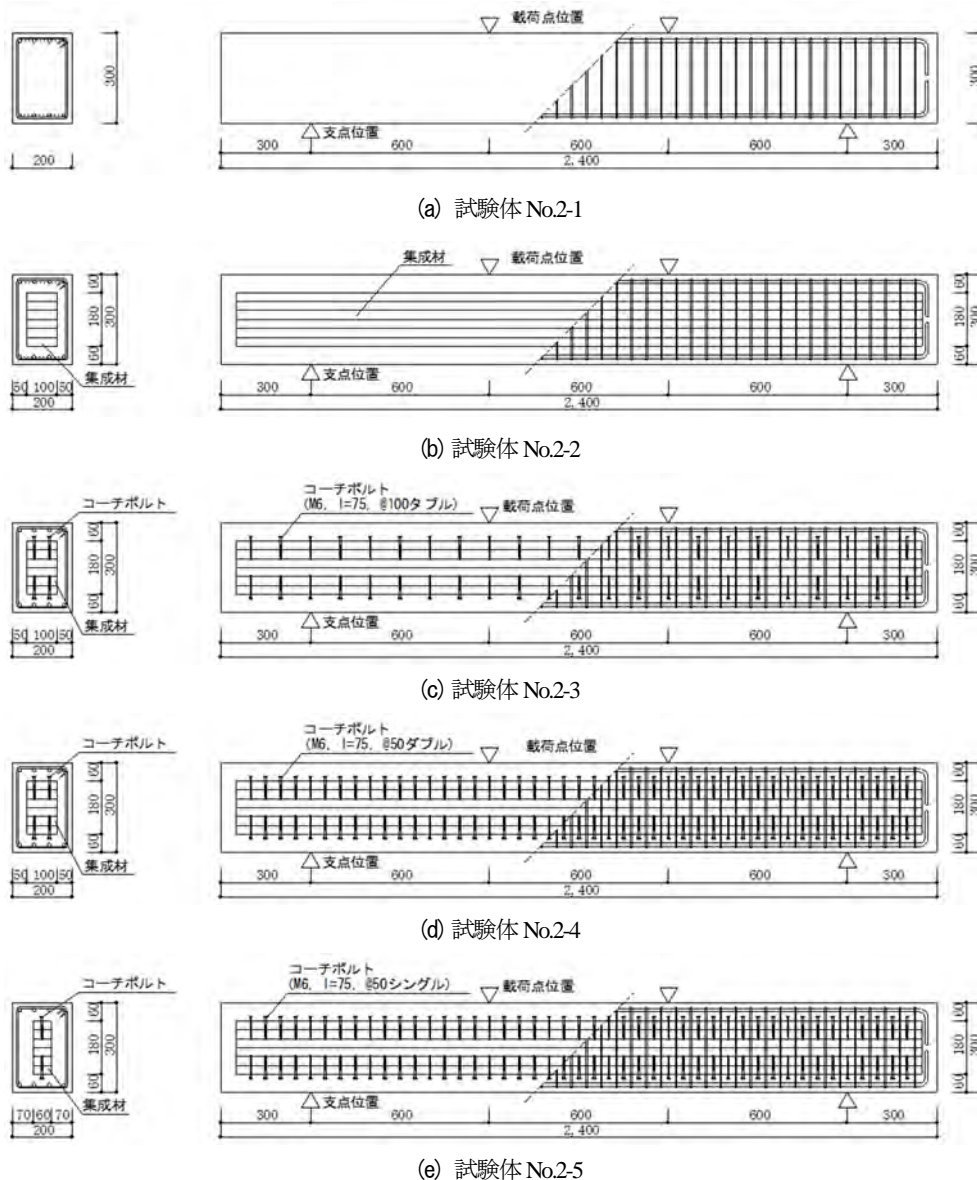


図-2 試験体形状

(4) 載荷方法

図-3 に加力方法を示す。4 点曲げ実験とし、支点間距離は1800mm、加力スパンは600mmとした。加力サイクルは、材料試験結果を用いて計算した試験体No.2-1(一般的な RC 梁)の降伏曲げモーメント時荷重 P_y を基準とする荷重制御とし、 $1/4P_y$, $2/4P_y$, $3/4P_y$, $4/4P_y$ の4段階の荷重を1サイクルずつ加えた。その後は部材角による変位制御とし、 $1/100(6mm)$, $1/50(12mm)$, $1/33(18mm)$, $1/25(24mm)$, $1/20(30mm)$ まで1サイクルずつ加える漸増載荷とした(計9サイクル)。

(5) 測定方法

本実験における荷重 $2P$ は載荷装置のロードセルの値を、部材変形 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、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、それぞれの箇所のひずみを計測した。

表-1 試験体仕様一覧

試験体名	No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.2-4	No.2-5
概要	RC 梁	RCW 梁	RCW 梁+CB	RCW 梁+CB	RCW 梁+CB
コンクリート強度 F_c [N/mm ²]			30		
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 [%]	-	-	0.518	-	-
あばら筋	-	-	2-D4@50(SD295A)	-	-
あばら筋比 ρ_w [%]	-	-	0.281	-	-
せん断スパン比 M/Qd	-	-	2.2	-	-
基準曲げ強度 F_b [N/mm ²]	-	-	31.2	-	-
幅 b [mm]	-	-	100	-	60
せい h [mm]	-	-	180	-	-
呼び径	-	-	-	M6	-
軸径 d [mm]	-	-	-	6	-
長さ L_c [mm]	-	-	-	75	-
突出長さ	-	-	-	10	-
本数 n [本]	-	-	92	180	90

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 [day]
普通コンクリート	28.7	2.8	25.7	47

表-3 材料試験結果 (鉄筋)

鉄筋	規格	降伏点 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	ヤング係数 [kN/mm ²]	降伏歪 [μ]	使用箇所
D4	SD295A	355	498	156	2266	あばら筋
D10	SD295	375	518	188	1996	主筋

表-4 材料試験結果 (集成材)

材種	規格	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	45.9	12.1	57.0	11.8

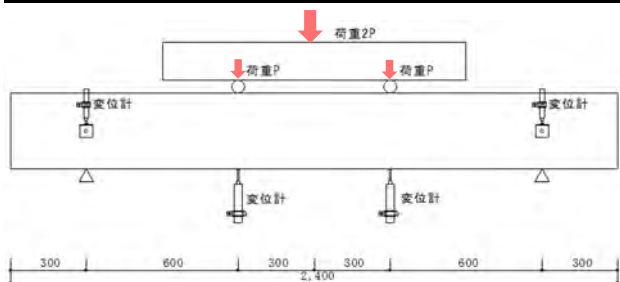


図-3 加力方法

(6) 試験体耐力

表-5 に試験体の耐力算出結果を示す。なお、本計算は表-2 から表-4 の材料試験結果を用いて算出した。

文献 5) に準拠し、全試験体の曲げひび割れモーメント M_c 、降伏曲げモーメント M_y 、および試験体 No.2-1 の終局曲げモーメント M_u を算出した。文献 6) を参考に一般累加強度理論に準拠して、試験体 No.2-2, No.2-3, No.2-4, No.2-5 の終局曲げモーメント M_u を算出した。なお、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 $c \gamma_c = 0.85$ 、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 $w \gamma_w = 2/3$ を乗じた。また、曲げひび割れモーメント時荷重 P_c 、降伏曲げモーメント時荷重 P_y 、終局曲げモーメント時荷重 P_u もそれぞれ算出した。文献 3) 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。

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。

$$\tau = QS/Ib \tag{1}$$

$$q = \tau \times bL = QSL/I \tag{2}$$

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]

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 7) 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。

表-5 試験体計算耐力

試験体名	No.2-1	No.2-2	No.2-3	No.2-4	No.2-5
曲げひび割れモーメント	M_c [kNm]	9.0			
曲げひび割れモーメント時荷重	P_c [kN]	15.0			
降伏曲げモーメント	M_y [kNm]	25.7			
降伏曲げモーメント時荷重	P_y [kN]	42.8			
終局曲げモーメント	M_u [kNm]	26.4	89.4	71.5	
終局曲げモーメント時荷重	P_u [kN]	44.1	149.0	119.2	
終局せん断耐力	Q_{su} [kN]	210.7	334.3	284.8	
せん断余裕度	- [-]	2.24	1.12	1.2	
境界面に発生するせん断力	q [kN]	143			
ボルトの支圧耐力	q_B [kN]	3.2			
有効ボルト本数	n [本]	-	14	26	13
安全率	$n \cdot q_B/q$	-	0.31	0.58	0.60

3. 実験結果

(1) 荷重－変位関係

表-6 に実験結果一覧，図-4 に各試験体の鉛直荷重 $2P$ と鉛直変位 δ の関係を示す。

a) RC 梁と RCW 梁

表-6 より，RCW 梁の最大荷重は RC 梁のおよそ 2.1 倍であり，RCW 梁の方が高い耐力を示すことを確認した。図-4 より変形性状は，RC 梁である試験体 No.2-1 は主筋降伏以降，徐々に荷重が増加しながら大変形域(30mm 程度)まで安定した挙動を示した。一方，RCW 梁である試験体 No.2-2 は，変位 24mm 程度で，集成材にコーチボルトを取り付けた試験体 No.2-3，No.2-4，No.2-5 は変位 10～15mm 程度で最大荷重に達し，集成材が破壊する音とともに荷重が急激に低下した。その後は荷重の低下は小さく安定した挙動を示した。また，試験体 No.2-3，No.2-4，No.2-5 の鉛直荷重－変位関係は，図-5(a) より，類似した挙動を示すことを確認した。RCW 梁の最大耐力は，RC 梁より小さい変位域で最大耐力に達し，内蔵した集成材が最大荷重および変形性状に影響を与えることが認められた。

b) コーチボルトの有無による影響

図-5(b) より，試験体 No.2-2(コーチボルト無)と試験体 No.2-3(コーチボルト有)の最大荷重に差は確認されなかった。試験体 No.2-3 の最大荷重時の変位は，試験体 No.2-2 より 9mm 程度小さくなることを確認された。コーチボルトの取り付けによる影響が認められた。

c) コーチボルトの本数による影響

図-5(c) より，試験体 No.2-3(取付間隔 100mm)の最大荷重は，試験体 No.2-4(取付間隔 50mm)より 3.7%程度高いことを確認した。試験体 No.2-3 の最大荷重時の変位は，試験体 No.2-4 より 3.5mm 程度大きいことを確認した。コーチボルトの取り付け間隔の違いによる明確な影響は認められなかった。

d) 集成材の幅による影響

図-5(d) より，試験体 No.2-4(集成材幅 100mm)の最大荷重は，試験体 No.2-5(集成材幅 50mm)より 1.3%程度高いことを確認した。試験体 No.2-4 の最大荷重時の変位は，試験体 No.2-5 より 2.7mm 程度小さいことを確認した。集成材の幅の違いによる明確な影響は認められなかった。

表-6 実験結果一覧

試験体名	計算耐力		最大荷重		初期ひび割れ		鉄筋降伏		最大荷重 / 計算耐力
	2P _u [kN]	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.2-1	88.2	133.6	30.5	43.9	0.5	96.9	2.6	1.51	
No.2-2	298.0	287.7	23.9	22.0	0.3	144.0	3.8	0.97	
No.2-3	298.0	289.0	14.6	16.6	0.2	140.3	3.6	0.97	
No.2-4	298.0	278.6	11.1	16.4	0.2	127.1	3.1	0.93	
No.2-5	238.4	275.1	13.8	30.6	0.4	126.2	3.2	1.15	

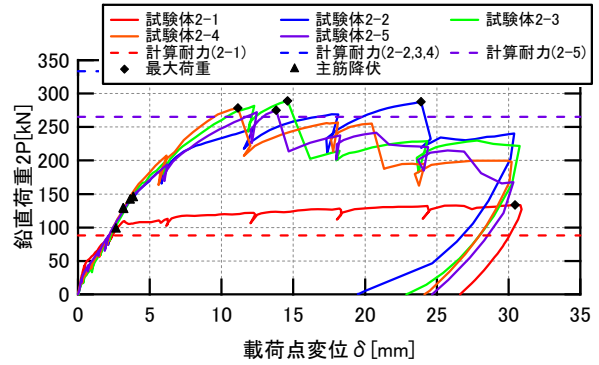
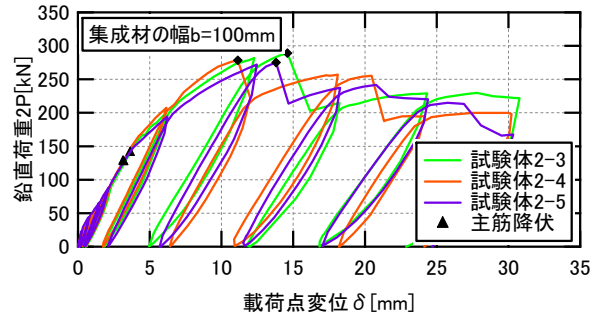
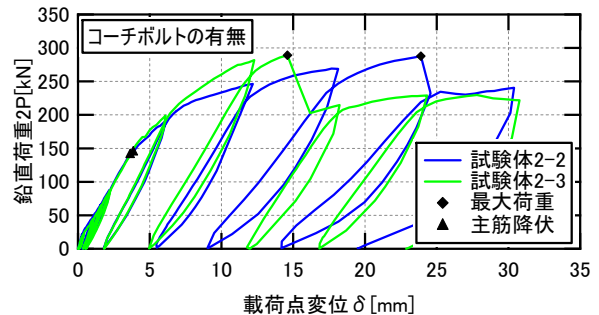


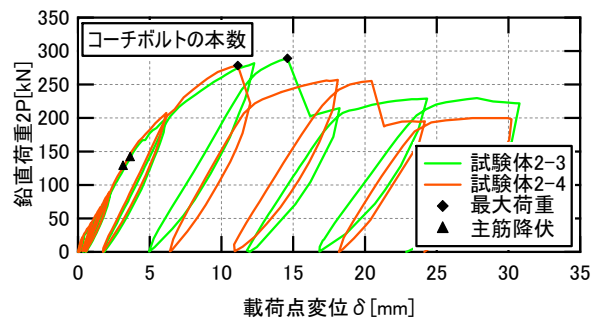
図-4 荷重－変位関係(包絡線)



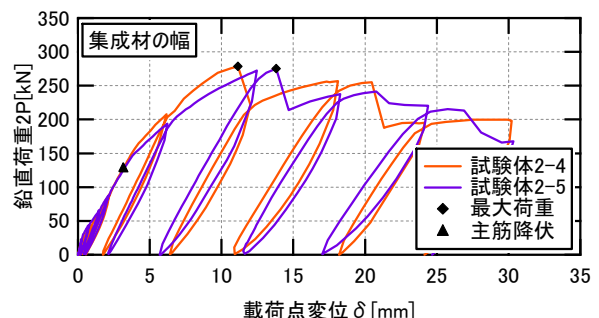
(a) 同一断面のRCW 梁



(b) コーチボルトの有無



(c) コーチボルトの本数



(d) 集成材の幅

図-5 荷重－変位関係の比較

表-7 初期剛性の比較

試験体名	計算値 k_c [kN/mm]	実験値 k_t [kN/mm]	k_t/k_c [-]
No.2-1	144.7	108.4	0.75
No.2-2	137.1	76.2	0.56
No.2-3		70.9	0.52
No.2-4		86.2	0.63
No.2-5	140.2	95.0	0.68

e) 初期ひび割れ

表-6 より, 同一断面の RCW 梁の試験体 No.2-2, No.2-3, No.2-4 の初期ひび割れ発生荷重は, RC 梁のおよそ 0.4 倍であった. また, 集成材の断面が小さい RCW 梁の試験体 No.2-5 の初期ひび割れ発生荷重は, RC 梁のおよそ 0.7 倍であった. これは, 荷重前の試験体に生じていたひび割れなどによって RCW 梁の初期剛性が低いためであると考える.

(2) 初期剛性

表-7 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(3)より算出した. なお, 材料特性は表-2から表-4の値を用いた. 初期剛性 k_t は, 1 サイクル(1/4Py)時の剛性が低下する前の点から算出した.

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

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 : 支点位置から荷重点までの距離 [mm]

計算による初期剛性 k_c は RC 梁の試験体 No.2-1 と比べて, RCW 梁の試験体 No.2-2, No.2-3, No.2-4 では 95%, 試験体 No.2-5 では 97%に減少する結果となる. 実験による初期剛性 k_t においても, 同一断面の RCW 梁の試験体 No.2-2, No.2-3, No.2-4 の初期剛性は, RC 梁の 72%程度, 集成材断面が小さい RCW 梁の試験体 No.2-5 の初期剛性は, RC 梁の 88%に減少した. これは, 集成材のヤング係数がコンクリートの半分以下と低いであるためだと考える. ただし, 集成材を内蔵することによる初期剛性の低下の程度は, 実験の方が大きいことが確認された. 一方, 計算値と実験値を比較すると, RC 梁は計算値の 75%, RCW 梁は計算値の 52~68%であり, RCW 梁の方が, 差が大きくなる結果となった. これは, 集成材を内蔵したことにより, 荷重前の試験体に軸方向のひび割れが多く発生していたためだと考える.

(3) ひずみ分布

図-6 に各試験体の初期のサイクル(1~4 サイクル)における最大荷重時のひずみ分布を示す. 1 サイクル目では

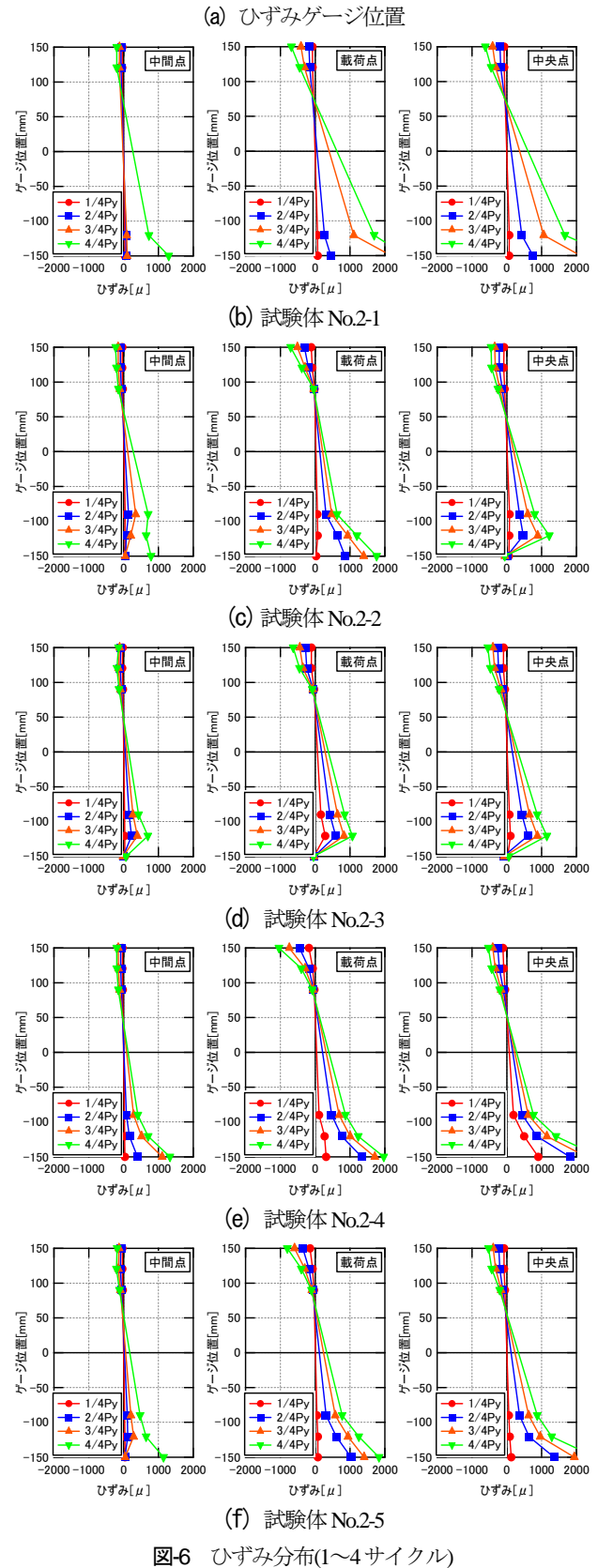
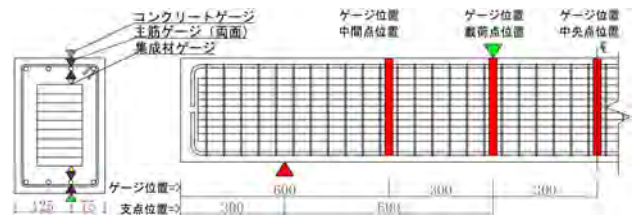


図-6 ひずみ分布(1~4 サイクル)

試験体 No.2-4 を除き、全ての位置においてひずみ分布が直線的分布であることが確認され、平面保持の関係が伺える。一方、試験体 No.2-4 は中央点位置において、引張側の鉄筋およびコンクリートのひずみが大きくなっている。これは、1 サイクル目の最大荷重時において、引張側のコンクリートにひび割れが生じたためだと考える。

1 サイクル目以降は全ての試験体において、引張側のコンクリートのひずみが大きく変動し、直線的分布から逸脱している箇所も確認された。これも同様に、引張側のコンクリートにひび割れが生じた影響であると考えられる。しかし、引張側のコンクリートのひずみを除けば、全ての試験体において4 サイクル目まで概ね直線的分布であり、平面保持の関係が成り立っていると考える。

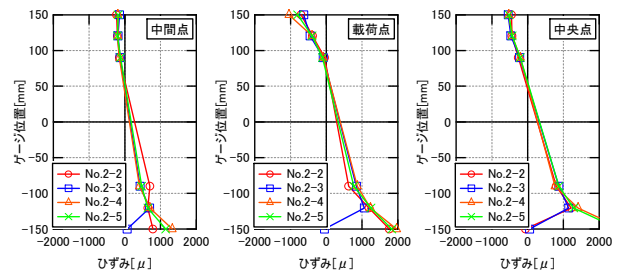
図-7 に RCW 梁の 4 サイクル目(4/4P_y)におけるひずみ分布と大変形時(変位 10mm 付近)におけるひずみ分布の比較を示す。先に述べた通り、4 サイクル目までは全ての試験体において、平面保持の関係が成り立っていると考える。一方、大変形時では、ひずみが直線的分布ではなくなっており、平面保持の関係が成り立たなくなっている可能性がある。特に、試験体 No.2-2 は中間点位置の引張領域において、集成材のひずみが鉄筋のひずみに比べて大きくなっている。また、試験体 No.2-4, No.2-5 は中央点位置の引張領域において、鉄筋のひずみが集成材のひずみに比べて大きくなっており、4 サイクル目の時と比べるとひずみにずれが生じていることが確認できる。

(4) 試験体のひび割れ状況

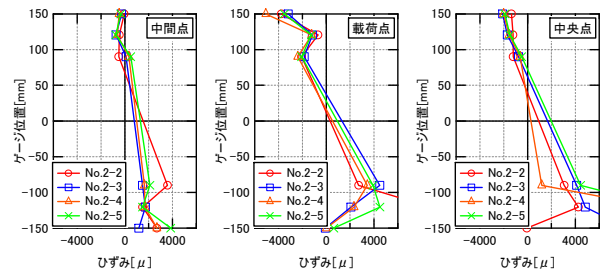
図-8 に各試験体の実験終了時の損傷の状況を示す。全試験体ともに荷重点の間に曲げひび割れが発生し、進展したことが確認された。特に、RCW 梁の試験体では、広範囲で多くの曲げひび割れが観測された。また、RCW 梁では荷重点と支点の間でせん断ひび割れが確認された。さらに、梁の上部において圧壊が確認された。これは、実験時の最大荷重が大きかったことに加え、圧縮領域のコンクリート断面が RC 梁に比べ小さいことが原因として考えられる。なお、RCW 梁の 4 サイクル目(4/4P_y)の残留曲げひび割れ幅は、0.04~0.06mm であった。

(5) RCW 梁の曲げ耐力(一般累加強度理論)

図-9 に累加強度の軸力と曲げモーメントの相関関係を示す。表-6 に示すように計算耐力に対する最大荷重の比は、RC 梁である試験体 No.2-1 が 1.51 倍、RCW 梁である試験体 No.2-2, No.2-3, No.2-4, No.2-5 がそれぞれ 0.97 倍, 0.97 倍, 0.93 倍, 1.15 倍となった。計算耐力の 93~115% 程度の耐力が得られているため、RCW 梁の曲げ耐力は一般累加強度理論により概ね評価できることが確認された。ただし、梁断面によって評価精度が異なるため今後更なる検討が必要である。



(a) 4 サイクル目(4/4P_y)



(b) 大変形時(変位 10mm 付近)

図-7 ひずみ分布の比較



(a) 試験体 No.2-1



(b) 試験体 No.2-2



(c) 試験体 No.2-3

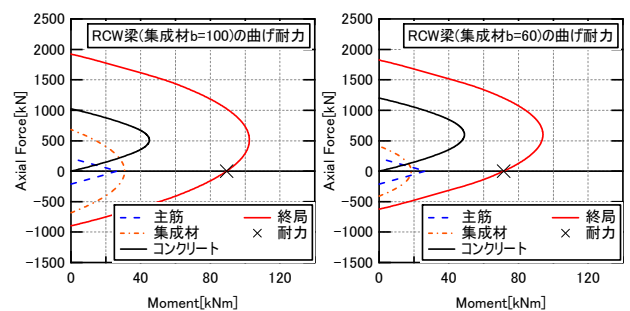


(d) 試験体 No.2-4



(e) 試験体 No.2-5

図-8 損傷状況



(a) 集成材幅 100mm

(b) 集成材幅 60mm

図-9 軸力と曲げモーメントの相関関係

4. 曲げ解析

(1) 概要

RCW 梁を対象とした曲げ解析を行い、実験結果との比較および解析モデル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の下、解析断面として図-9に示すように試験体断面を30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、あばら筋より外側のカバーコンクリート部分とあばら筋に囲まれたコアコンクリートの材料特性は異なるものとした。図-10にコンクリート要素の応力-ひずみ関係を示す。コアコンクリート要素には、拘束効果が強

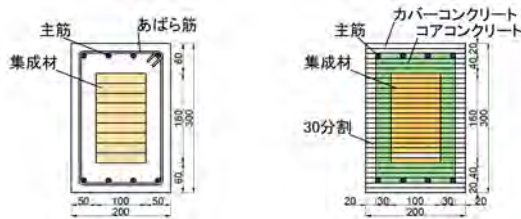


図-9 解析モデル

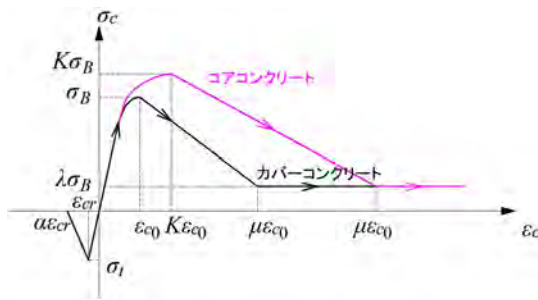


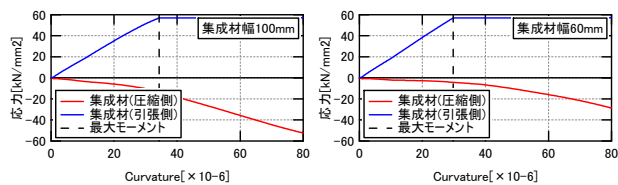
図-10 解析モデル(コンクリート要素)

表-8 入力データ(コンクリート要素)

入力データ	カバーコンクリート	コアコンクリート
最大応力時ひずみ	ϵ_{c0}	0.002
上昇係数	K	1.00 / 1.09
応力低減係数	λ	0.2
終局ひずみ係数	μ	4.0 / 10.0
終局ひずみ係数(引張)	α	2.0

表-9 解析結果

試験体名	主筋降伏時モーメント		最大荷重時モーメント		実験値 / 解析値	計算値 / 解析値	
	実験値 [kNm]	解析値 [kNm]	計算値 [kNm]	実験値 [kNm]			解析値 [kNm]
No.2-2	43.20			86.31	91.37	0.94	0.98
No.2-3	42.09	50.00	89.40	86.70	91.37	0.95	
No.2-4	38.13			83.58		0.91	
No.2-5	37.86	41.85	71.52	82.53	71.69	1.15	



(a) 集成材幅 100mm

(b) 集成材幅 60mm

図-11 集成材の発生応力

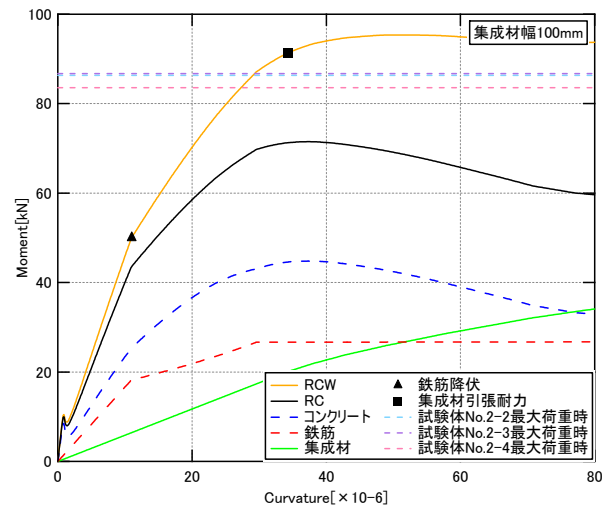
度および軟化勾配に及ぼす影響を考慮するために、修正 Kent-Park モデル⁸⁾を採用し、用いた係数等を表-8に示す。鉄筋要素、集成材要素にはバイリニアモデルを採用した。なお、材料特性は表-2から表-4の値を用いた。

(2) 解析結果

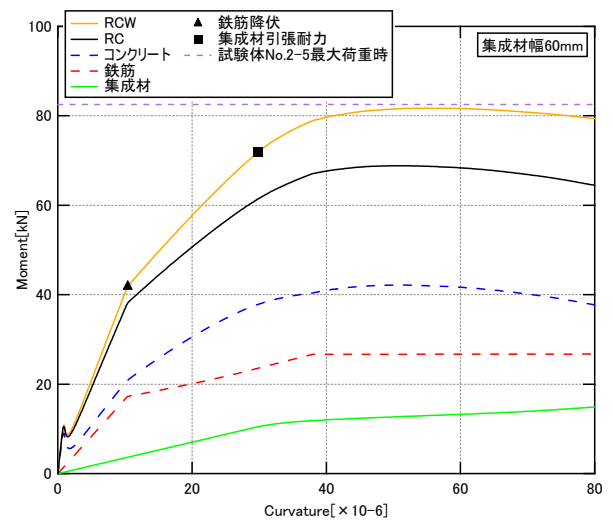
表-9に解析結果を示す。なお、解析結果における最大荷重時曲げモーメントは、図-11に示すように集成材が曲げ強度(引張耐力)に達した時と定義した。この結果、計算値と解析値は概ね一致した。また、最大荷重時モーメントにおける解析値に対する実験値の比は、No.2-2, No.2-3, No.2-4, No.2-5 がそれぞれ 0.94 倍, 0.95 倍, 0.91 倍, 1.15 倍となり、解析値の 91~115%程度の耐力が得られた。さらに、解析による主筋降伏時のモーメントは実験結果と概ね対応している。

a) 曲げモーメント-曲率関係

図-12に曲げモーメントと曲率の関係を示す。集成材の幅が100mmの試験体では、曲げ耐力時にはRC部分は



(a) 集成材幅 100mm



(b) 集成材幅 60mm

図-12 曲げモーメント-曲率関係

最大モーメントを示しており、その後モーメントは低下している。またそれに伴い、集成材部分のモーメントは増加している。集成材の幅が 60mm の試験体では、曲げ耐力時には RC 部分のモーメントは上昇域に位置しており、その後の低下も小さい。また、集成材部分のモーメントに増加はみられない。集成材の断面量の違いに伴い、負担モーメントに差異がみられることが確認できた。

b) 解析によるモーメントの負担割合

図-13 に各材料が負担するモーメントの割合の推移を示す。各材料が負担するモーメントの割合の推移は、集成材が引張耐力に達するまでは、集成材の幅によらず類似した挙動を示した。集成材の引張耐力以降は、集成材の幅が 100mm の場合はコンクリートの負担割合が低下し、集成材の負担割合が上昇、集成材の幅が 60mm の場合はコンクリートおよび集成材の負担割合はともに概ね一定であった。また、集成材の幅 100mm と集成材の幅 60mm を比較すると、コンクリートの負担割合は、同程度であるが、集成材の幅が 100mm の場合は集成材の負担割合が大きく、鉄筋の負担割合が小さい。一方、集成材の幅が 60mm の場合は集成材の負担割合が小さく、鉄筋の負担割合が大きくなっており、集成材の断面量の違いが現れている。

c) 実験値と解析値によるモーメントの負担割合の比較

ここでは、各材料が負担するモーメントの実験値と解析値の整合性について確認しておく。比較対象は主筋降伏時とした。実験によるモーメントは図-14 に示す応力

分布(集中荷重)を仮定し、実験時のひずみの値およびヤング係数(表-2 から表-4)を用いて算出した。コンクリートの応力-ひずみ関係は曲げ解析と同様に式(3)を用い、モーメント M_C を式(4)から(6)により求めた。鉄筋は上端筋および下端筋の圧縮力および引張力を考慮し、モーメント M_S を式(7)から(13)により求めた。集成材は図に示すように直線の応力分布とし(主筋降伏時に集成材は降伏していない)、モーメント M_W を式(14)から(20)により求めた。

$$\sigma_c = f_c \left[\frac{2\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c0}} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$C_c = \sigma_c \times X_{nc} b_c / 2 \quad (5)$$

$$M_C = C_c \times y_c \quad (6)$$

ここで、 σ_c : コンクリートの圧縮応力度 [kN/mm²]

f_c : 圧縮強度 [kN/mm²]

ε_c : コンクリートの圧縮ひずみ [-]

ε_{c0} : 非拘束コンクリートの最大応力時ひずみ

(ここでは、0.002) [-]

C_c : コンクリートの圧縮応力 [kN]

X_{nc} : コンクリートの圧縮縁から中立軸までの距離(ε_c と ε_{sc} から算出) [mm]

b_c : 応力を受けるコンクリート断面の幅 [mm]

M_C : コンクリートのモーメント [kNm]

y_c : 図心距離 [m]

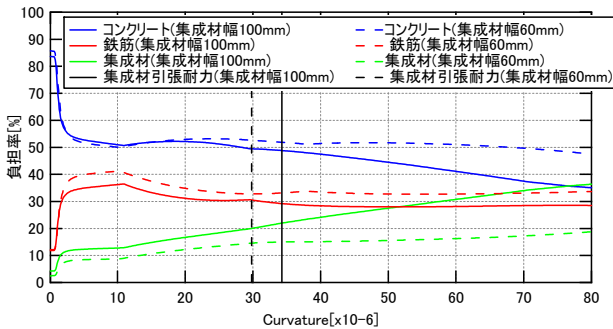


図-13 モーメントの負担割合の推移

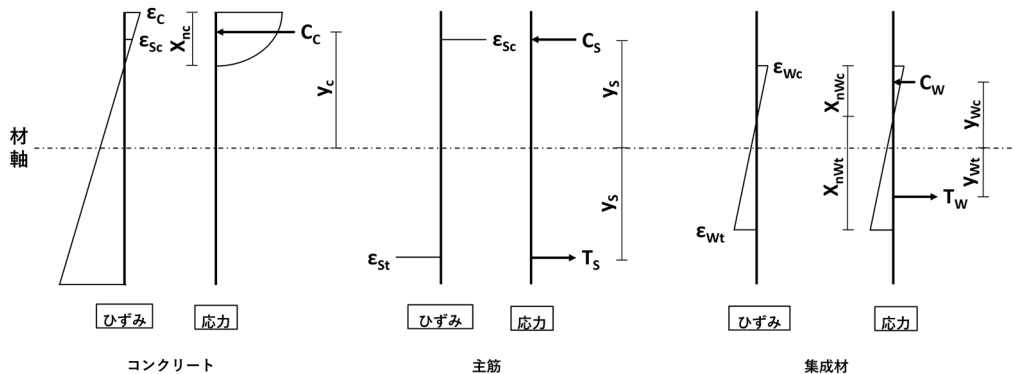


図-14 各材料のひずみ分布と応力分布

$$\sigma_{Sc} = E_S \varepsilon_{Sc} \quad (7)$$

$$C_S = \sigma_{Sc} a_c \quad (8)$$

$$M_{Sc} = C_S \times y_S \quad (9)$$

$$\sigma_{St} = E_S \varepsilon_{St} \quad (10)$$

$$T_S = \sigma_{St} a_t \quad (11)$$

$$M_{St} = T_S \times y_S \quad (12)$$

$$M_S = M_{Sc} + M_{St} \quad (13)$$

ここで, σ_{Sc}, σ_{St} : 主筋の圧縮, 引張応力度 [kN/mm²]
 E_S : 主筋のヤング係数 [kN/mm²]
 $\varepsilon_{Sc}, \varepsilon_{St}$: 主筋の圧縮, 引張ひずみ [-]
 C_S, T_S : 主筋の圧縮, 引張応力 [kN]
 a_c, a_t : 圧縮, 引張鉄筋の断面積 [mm²]
 M_{Sc}, M_{St} : モーメント(圧縮, 引張) [kNm]
 y_S : 図心距離 [m]
 M_S : 主筋のモーメント [kNm]

$$\sigma_{Wc} = E_W \varepsilon_{Wc} \quad (14)$$

$$C_W = \sigma_{Wc} \times X_{nWc} b_W / 2 \quad (15)$$

$$M_{Wc} = C_W \times y_{Wc} \quad (16)$$

$$\sigma_{Wt} = E_W \varepsilon_{Wt} \quad (17)$$

$$T_W = \sigma_{Wt} \times X_{nWt} b_W / 2 \quad (18)$$

$$M_{Wt} = T_W \times y_{Wt} \quad (19)$$

$$M_W = M_{Wc} + M_{Wt} \quad (20)$$

ここで, σ_{Wc}, σ_{Wt} : 集成材の圧縮, 引張応力度[kN/mm²]
 E_W : 集成材のヤング係数 [kN/mm²]
 $\varepsilon_{Wc}, \varepsilon_{Wt}$: 集成材の圧縮, 引張ひずみ [-]
 C_W, T_W : 集成材の圧縮応力 [kN]
 X_{nWc}, X_{nWt} : 集成材の圧縮縁, 引張縁から
 中立軸までの距離 [mm]
 b_W : 応力を受ける集成材断面の幅 [mm]
 M_{Wc}, M_{Wt} : モーメント(圧縮, 引張) [kNm]
 y_{Wc}, y_{Wt} : 図心距離(圧縮, 引張) [m]
 M_W : 集成材のモーメント [kNm]

ここで, 試験機のロードセルによる荷重から求めた試験体のモーメント M_e (外力)と先に説明したひずみから求めた試験体のモーメント M_i (内力)が一致しているか確認する. ひずみから求めた試験体のモーメント M_i はコンクリート, 主筋, 集成材のモーメント(M_C, M_S, M_W)を足し合わせるにより算出した.

表-10 より, 主筋降伏時のひずみから求めたモーメント M_e は, 荷重から求めたモーメント M_y の 82~94%であり, おおよそ近い値を示していることから, 外力と内力が概ね一致していることを確認した.

主筋降伏時において外力と内力が概ね一致したことから, 実験によるモーメントの負担割合と解析によるモーメントの負担割合を比較した. 表-11 に比較結果を示す. 解析は, 鉄筋が負担するモーメントを過小評価する傾向にあることが確認できる. しかし, いずれの材料も解析による負担モーメントは, 実験値の±2割以内の値が得られている. この結果, 本解析手法によりモーメントの負担割合も概ね模擬できていることが確認できた.

表-10 外力と内力との比較

主筋降伏時	荷重による実験値		ひずみによる実験値 M_e (内力)[kNm]				M_e/M_y
	M_e (外力)[kNm]		M_C	M_S	M_W	M_e	
No.2-2	43.20		15.27	16.03	4.15	35.46	0.82
No.2-3	42.09		18.45	16.28	4.68	39.41	0.94
No.2-4	38.13		14.69	15.04	4.06	33.79	0.89
No.2-5	37.86		16.68	16.53	2.37	35.58	0.94

表-11 主筋降伏時の実験値と解析値による負担率の比較

試験体名	実験値[%]			解析値[%]			解析値/実験値		
	コンクリート	鉄筋	集成材	コンクリート	鉄筋	集成材	コンクリート	鉄筋	集成材
No.2-2	43.1	45.2	11.7				1.18	0.81	1.10
No.2-3	46.8	41.3	11.9	50.7	36.4	12.9	1.08	0.88	1.09
No.2-4	43.5	44.5	12.0				1.17	0.82	1.07
No.2-5	46.9	46.5	6.7	50.0	41.3	8.7	1.07	0.89	1.31

(3) 考察

RCW 梁の曲げ耐力は, 曲げ解析により概ね評価できることを示した. ただし, 集成材の断面寸法によって解析による評価精度が異なる. 集成材の断面が大きい試験体では解析値に対する実験値の比率は 0.95 前後とやや過大評価する傾向にあり, 断面が小さい試験体では, 1.15 と若干過小評価する傾向にある. したがって, モデル化手法やこの現象について, さらなる検討が必要と考える.

5. まとめ

本論では, RCW 造の概要を示すとともに, RCW 造の梁部材を対象として, 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. 以下に得られた知見を示す.

- RCW 梁は RC 梁と比較し, 高い曲げ耐力を示す.
- RCW 梁は, 最大荷重に達した後, 急激に荷重が低下するがその後は安定した挙動を示す.
- コーチボルトを取り付けていない RCW 梁は, 早い段階で剛性が低下し, 大きい変位域で最大荷重に達する. 一方, コーチボルトを取り付けた RCW 梁は, 小さい変位域で最大荷重に達する.
- RCW 梁は RC 梁と比較し, 初期剛性が低い. ただし, 加力前に発生している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 梁の断面のひずみ分布は, 鉄筋が降伏する前の範囲では概ね直線的分布であり, 平面保持の関係が成り立っている.
- RCW 梁は RC 梁と比較し, 多くの曲げひび割れが観測された. また, 大変形時にせん断ひび割れと圧縮側のコンクリートに圧壊が確認された.
- RCW 梁の実験における曲げ耐力は, 計算耐力および解析値の 91~115%程度の耐力が得られているため一般累加強度理論および曲げ解析により概ね評価できる.
- 実験により, 提案した RCW 造の梁部材は実現の可能性を示すことができた. ただし, 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る.

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概要集, 第17回, E-12-6, pp.1-10, 2022.12
- 2) 藤井稔己, 都祭弘幸: 集成材を芯材としたハイブリッド RC 柱の圧縮特性に関する実験的研究(その 1~その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp.199-202, 2021.9
- 3) 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
- 4) 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, pp.8-17, 2011.3.
- 5) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2018.12.
- 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, 2014.1
- 7) 日本建築学会: 木質構造設計規準・同解説, 2006.12
- 8) 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, 1982.4

(Received August 25, 2023)

BENDING TEST OF COMPOSITE RC BEAMS ENCASED GLUED LAMINATED TIMBER

Atsushi YOKOTA, Tomoya MATSUI and Takashi TAGUCHI

The authors have proposed a new wood hybrid structural member, RCW, which incorporates glued laminated timber into RC construction, from the viewpoint of effective utilization of wood materials. In this study, four-point bending tests were conducted on the beam members in order to understand their basic structural performance. The variables of the specimens were the presence or absence of glued laminated timber, the presence and number of coachbolts attached to the glued laminated timber, and the width of the glued laminated timber. The results showed that the RCW beams reached a higher bending capacity than the RC beams, although the initial stiffness of the RCW beams was lower. Furthermore, the maximum bearing capacity of the RCW beams with coachbolts was reached in a smaller displacement range than that of the RCW beams without coachbolts, confirming that the stress transfer characteristics between the laminated timber and concrete affect the resilience characteristics. It was confirmed that the stress transfer characteristics between the glued laminated timber and the concrete had an influence on the resilience characteristics. It was also shown that the bending capacity could be generally evaluated by calculation and bending analysis based on the general theory of cumulative strength.