

炭素繊維プレートによって接着補剛された合成梁の載荷実験

玉井 宏章*, 高松 隆夫*, 三好 行則**, 服部 明生***, 小澤 吉幸***

(平成20年10月31日受理)

Loading Tests of Composite Beams Stiffened by Bonding CFRP Plates

Hiroyuki TAMAI, Takao TAKAMATSU, Yukinori MIYOSHI, Akeo HATTORI
and Yoshiyuki OZAWA

(Received Oct. 31, 2008)

Abstract

We proposed the rehabilitation technique for secondary steel beam by means of bonding CFRP plates. T shaped-composite beam specimens, which were bonded CFRP plate at lower flange of beam, were made as an application of the rehabilitation.

Cyclic and monotonic loading tests were performed on these rehabilitated specimens to clarify the stiffness enhancement of the rehabilitation. From these results, following conclusion and remarks were made.

- 1) Composite beams stiffness increased by 10% with bonding CFRP plates.
- 2) Bonding CFRP plate cases no brittle fracture at lower flange of beam.

Keywords: carbon fiber reinforced plate, adhesive, composite beams, beam-to-column connection

1. はじめに

これまでに、炭素繊維プレートによって接着補強した鋼小梁の3点曲げ試験を行って補強効果を検討してきた。

鋼梁耐力は、圧縮側フランジの局部座屈によって決定され、接着補強時による梁耐力の上昇はあまり期待できなかった。しかしながら、実際の建物では、スラブが上に取り付き、フランジ局部座屈耐力は上昇するため、接着補強効果は十分に期待できると考えられる。また、完全合成梁では、スラブによりある程度剛性が期待できると考えられるが、繰返し載荷時には低下すると考えられ、どの程度曲げ剛性を補剛すべきかの知見もあまりない。更に、旧式の建物では、梁と柱は旧スカラップをもつ溶接接合となっているが、炭素プレートで補剛したことで、靱性が落ちないこ

とを確認する必要もある。

そこで、本研究では、スラブの合成効果(耐力と剛性)によって、鋼梁の炭素プレートによる接着補剛効果が向上することや、接着工法の施工手順における問題点の確認等を行う。具体的な研究目的は、以下の4点にある。

- 1) 炭素繊維プレート接着による合成梁の曲げ剛性の向上度を調べる。
- 2) 炭素繊維プレート接着による合成梁のスラブの圧壊防止程度を調べる。
- 3) 繰返し載荷時に、梁下端スカラップ近傍に炭素繊維プレートが悪影響しないことを調べる。
- 4) 梁を下向きから接着施工する場合の問題点を抽出する。

* 広島工業大学工学部建築工学科

** 広島工業大学大学院工学系研究科建設工学専攻

*** 東レ建設株

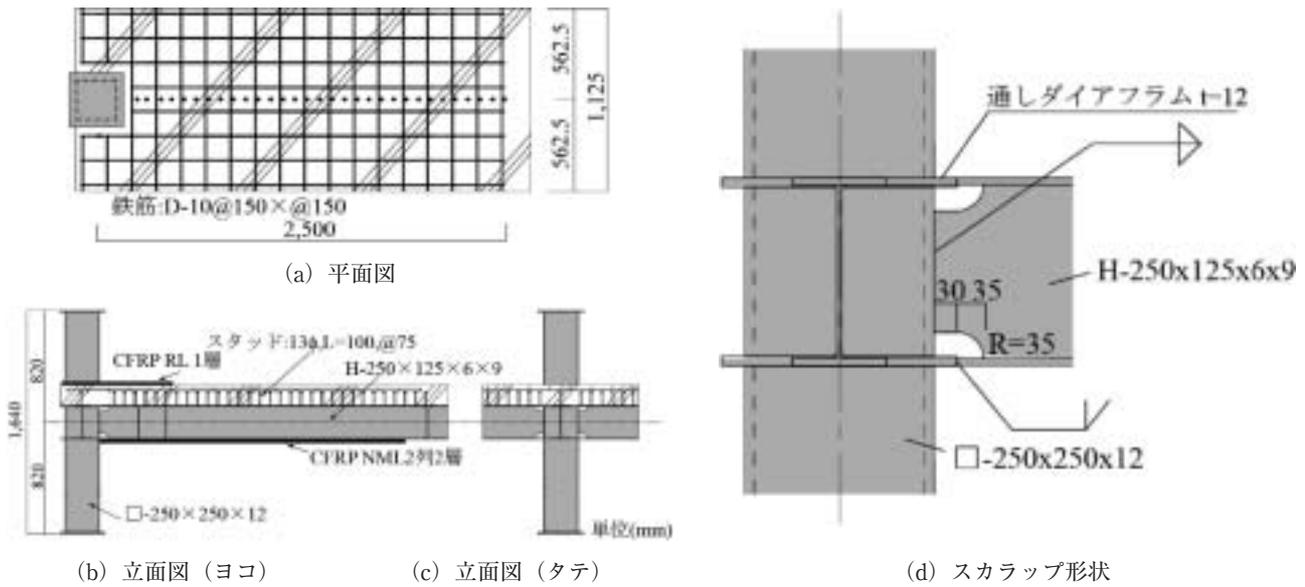


図1 試験体の概要

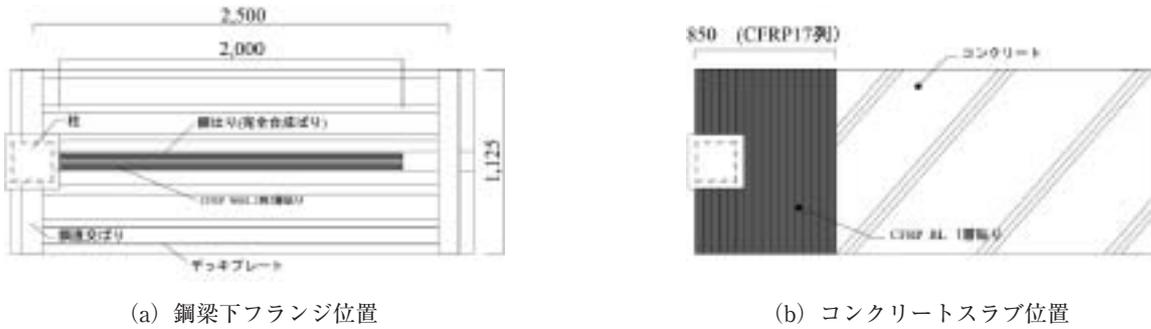


図2 炭素繊維貼付け図

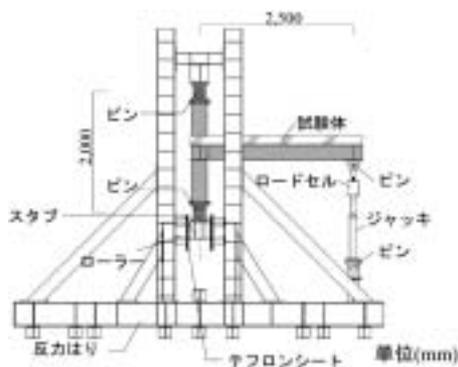


図3 加力装置の概要

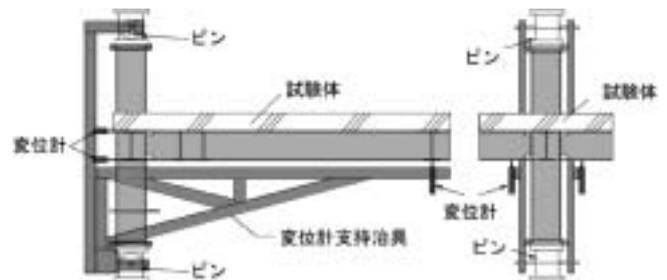


図4 変位計測道具の概要

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で用いた合成梁試験体を図1に、素材試験結果を表1に、それぞれ示す。試験体は、床スラブのデッキプレートを捨て型枠としたト字形の完全合成梁と、下フランジに炭素繊維プレートを接着補剛したものである。通しダイアフラム形式(板厚12mm)の角形鋼管柱(STKR400,

□-250x12)に、H形鋼梁(SS400, H-250x125x69)を工場溶接し、ダイアフラムと梁フランジ溶接部には、旧スカラップ(半円形R=35)を取っている。梁上フランジ上部には、スタッドコネクタ(φ13, L=100, 1列配置ピッチ75mm)を一列溶植している。この溶接ピッチは、「各種合成構造設計指針・同解説¹⁾」より、完全合成梁となるように算定している。床スラブは、スラブ厚100mm(最小厚さ100, 最大厚さ150)、幅は、設計指針¹⁾の有効幅の1,125mmとし、コンクリートは普通コンクリートとした。スラブ筋は、異型鋼鉄筋(D10, @150)を用いており、

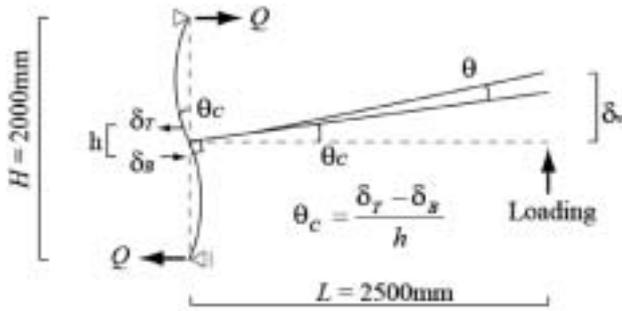


図5 計測諸量の概要

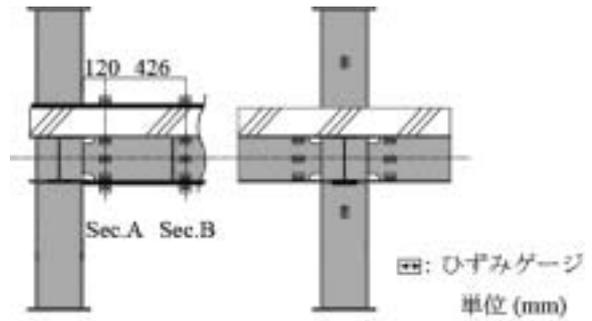


図6 ひずみゲージ貼付位置

表1 素材試験結果

(a) 鋼材

部位	鋼種	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (%)
柱	STKR400	389	429	30
梁(フランジ)	SS400	326	429	31
梁(ウェブ)	SS400	331	429	23

(b) 中弾性型炭素繊維プレート

炭素繊維プレート	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	破断ひずみ (%)
CFRP NML	295.7	-	2169	0.71

(c) コンクリート

床スラブコンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)
普通コンクリート (材齢28日)	26.5

(d) 接着剤

接着剤	ヤング係数 (kN/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	圧縮降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	引張せん断付着強度 (N/mm ²)	衝撃強度 (kJ/m ²)	備考
E258	2.28	55.8	59.0	34.8	25.5	4.20	鋼はりとCFRP
WS	5.00	58.0	85.0	22.0	15.0	1.90	スラブとCFRP
	JIS K7208	JIS K7203	JIS K7208	JIS K7113	JIS K6850	JIS K7111	

端部には定着処理はしていない。尚、合成梁が正曲げ終局曲げモーメントに達した場合に、柱や接合部パネルに塑性化が生じないように、柱板厚は十分に大きく (t=12mm) 設定している。

図2に炭素繊維プレートの貼付け位置を示す。(a)に示すように、鋼梁下フランジに幅50mmの中弾性型炭素繊維プレート(NML, 厚さ2mm)を2列2層に接着し、合成梁の補剛を行った。更に、(b)に示すように、角形鋼管周辺のコンクリートスラブに、通常型炭素繊維プレート(RL, 厚さ2mm)を1層接着し、正曲げ時の床コンクリートの圧壊防止処理を行った。それぞれの接着には、炭素繊維プレートと鋼、およびコンクリートとの接着に適した常温2液硬化エポキシ樹脂のE258、およびWSを用いた。接着面相互をサンドペーパー #180で目粗しし、接着層厚1mmで、常温20℃以上で7日間以上養生した。

試験体は、炭素繊維プレートで補剛した合成梁試験体(NML2試験体)と、補剛していない合成梁試験体(N試

験体)の2体を用意した。表1には、各柱・梁鋼材、炭素繊維プレート、床スラブコンクリート及び接着剤の素材試験結果を示す。

2.2 荷重方法と計測方法

○加力装置

加力装置の概要を図3に示す。

試験体の柱上下にピンを設置し、更に柱下端ピンにはテフロンシートで挟んで水平移動を拘束したスタブが取り付けられている。これにより、柱上下端はそれぞれピン支持とローラー支持となっている。合成梁先端に鉛直下方よりピンを介して複胴式の油圧ジャッキが取り付けられている。

○計測方法

変位計測治具の概要を図4に、計測諸量の概要を図5に、ひずみゲージの貼付位置を図6に示す。

変位の計測は、合成梁先端の鉛直変位、 δ_v 、接合部上下ダイヤフラム位置の水平変位、(δ_r , δ_s)、について行い、次式により、層間変位、 R 、と合成梁変形角、 θ 、を

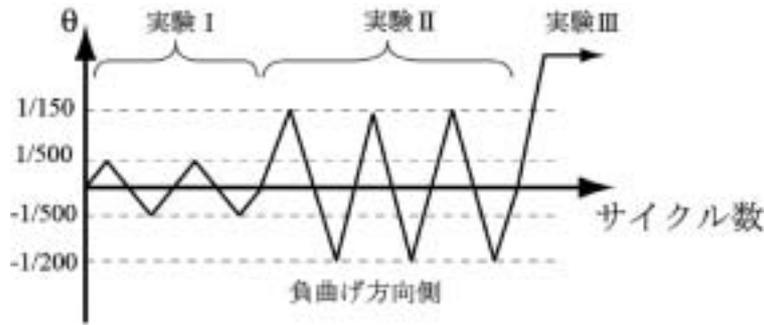


図7 荷重プログラム

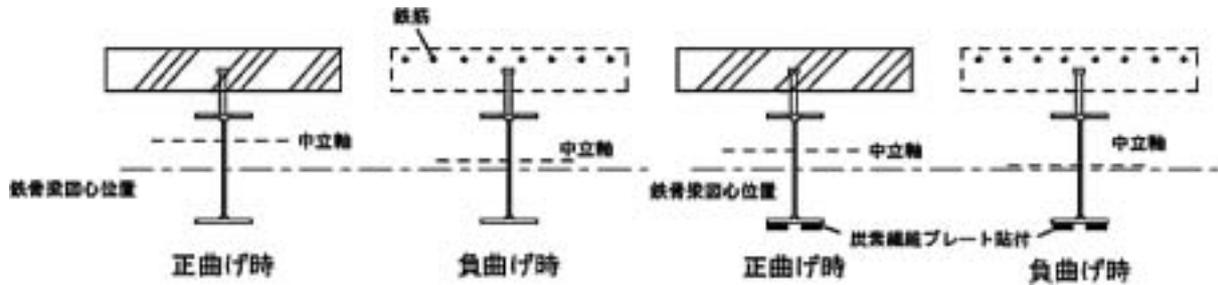


図8 曲げ剛性評価のモデル

表2 各試験体の合成梁の計算値

N試験体				NML2試験体		鉄骨架構モデル	
Mp^+	Mp^-	EI^+	EI^-	EI_{S+C}^+	EI_{S+C}^-	EI_{S+C}	EI_S
($kN \cdot m$)	($kN \cdot m$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)
222.5	127.1	3.47×10^{10}	1.35×10^{10}	4.35×10^{10}	1.62×10^{10}	9.66×10^9	7.98×10^9

求めた。

$$R = \frac{\delta_p}{L} \dots \dots \dots (1.a)$$

$$\theta = R - \frac{\delta_T - \delta_B}{h} \dots \dots \dots (1.b)$$

ここに、L：合成梁の長さ (2,500mm)

h：上下ダイアフラムに設置した変位計の間隔 (238mm)

荷重の計測は、油圧ジャッキ先端のロードセルから鉛直荷重、Pを計測し、次式により層せん断力、Q、を求めた。

$$Q = \frac{L}{H} \cdot P \dots \dots \dots (2)$$

図6に示す試験体上柱2ヵ所のひずみゲージ値からの曲率変化からも、せん断力、Qを求めたが、両者はほぼ同一であった。本報告では、(2)式の値を層せん断力として採用する。

ひずみの計測位置を図6に示す。合成梁端から120mm, 546mmの位置の断面各所にひずみゲージを貼付し、炭素繊維プレート、鋼梁の材軸方向ひずみを計測して、中立軸位置の変化を観察した。

2.3 荷重プログラムと試験シリーズ

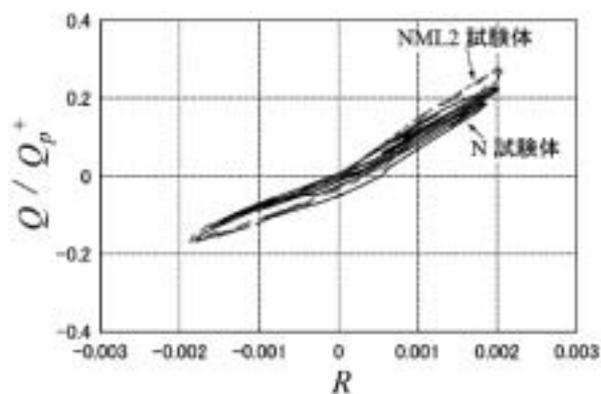
加力制御は、合成梁先端変位制御とし、荷重反転は、(1.b)式の合成梁変形角、 θ で判定した。荷重プログラムを図7に示す。

NML2試験体およびN試験体について、合成梁変形角、 θ の片振幅を1/500radを2サイクル荷重するケース(実験I)、 θ の正負の片振幅を+1/150rad、-1/200radとして3回繰返し荷重するケース(実験II)、及び、その後、単調で1/30radまで荷重するケース(実験III)を連続して行う。

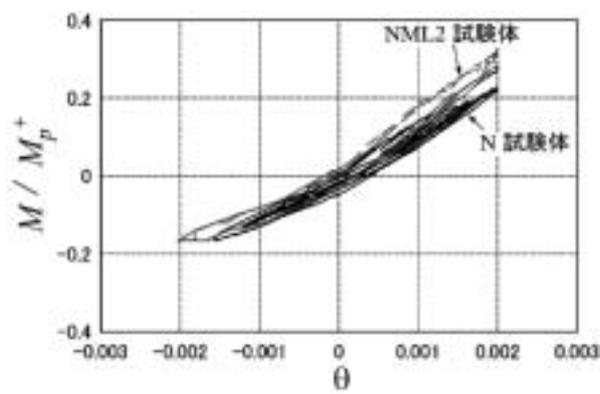
2.4 剛性評価

文献1および文献2にしたがって、合成梁と炭素繊維プレートによって補剛した合成梁について正曲げ負曲げ時の曲げ剛性と、合成梁について正曲げ負曲げ時の全塑性モーメントを算定した。曲げ剛性の評価モデルを図8に示す。

合成梁については、文献1を参考に、完全合成梁とし、鋼材とコンクリートスラブのヤング係数比、nを15と仮定し、正曲げ曲げ剛性については、コンクリートスラブを鋼材の等価断面に置換し、負曲げの剛性は、スラブの鉄筋

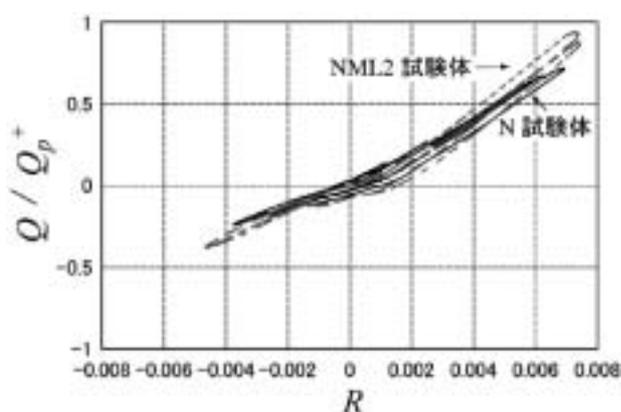


(a) 層せん断力, Q/Q_p^+ -層間変形角, R 関係

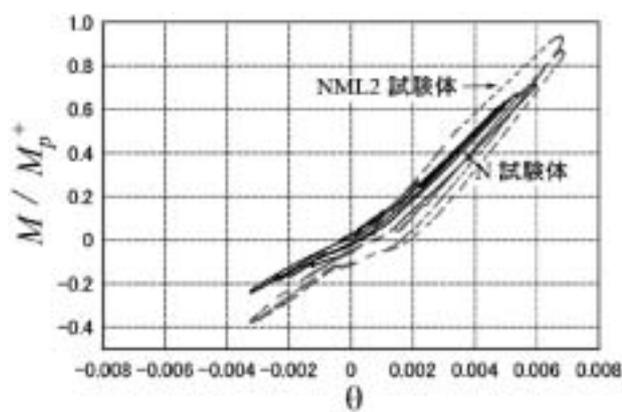


(b) 梁端曲げモーメント, M/M_p^+ -合成梁変形角, θ 関係

図9 実験Iの結果



(a) 層せん断力, Q/Q_p^+ -層間変形角, R 関係



(b) 梁端曲げモーメント, M/M_p^+ -合成梁変形角, θ 関係

図10 実験IIの結果

表3 各試験体の実験値

N試験体			NML2試験体		
M_p^+	EI^+	EI^-	M_p^+	EI^+	EI^-
($kN \cdot m$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot m$)	($kN \cdot mm^2$)	($kN \cdot mm^2$)
278	3.30×10^{10}	1.74×10^{10}	290	3.70×10^{10}	1.9×10^{10}

(かぶり 40mm) のみが抵抗するとして算定した。

炭素繊維プレートは、断面剛・平面保持の仮定が成立するとして、その剛性を加算した。

表2には、N試験体合成梁の正・負曲げ時における全塑性モーメント (M_p^+ , M_p^-)、曲げ剛性 (EI^+ , EI^-)、NML2試験体合成梁の正・負曲げ時における曲げ剛性 (EI_{s+c}^+ , EI_{s+c}^-)、およびコンクリートスラブを無視した曲げ剛性 (EI_{s+c}) と、参考のため、鉄骨のみの曲げ剛性, EI_s を示す。

以降の実験データには、この剛性を併せ示しており、荷重の基準量として、N試験体の正曲げ時の崩壊層せん断力, Q_p^+ を用いて整理する。

$$Q_p^+ = \frac{M_p^+}{H} \dots \dots \dots (3)$$

3. 実験結果とその考察

実験Iの結果を図9に、実験IIの結果を図10, 11に、実験IIIの結果を図12, 13および写真1に、各試験体の実験値を表3に、それぞれ示す。

図9, 10, 12には、各試験体について、N試験体の合成梁の正曲げ時における崩壊層せん断力で無次元化した層せん断力, Q/Q_p^+ と層間変形角, R との関係と、N試験体の合成梁の正曲げ時における全塑性モーメントで無次元化した梁端曲げモーメント, M/M_p^+ と合成梁変形角, θ との関係を示す。

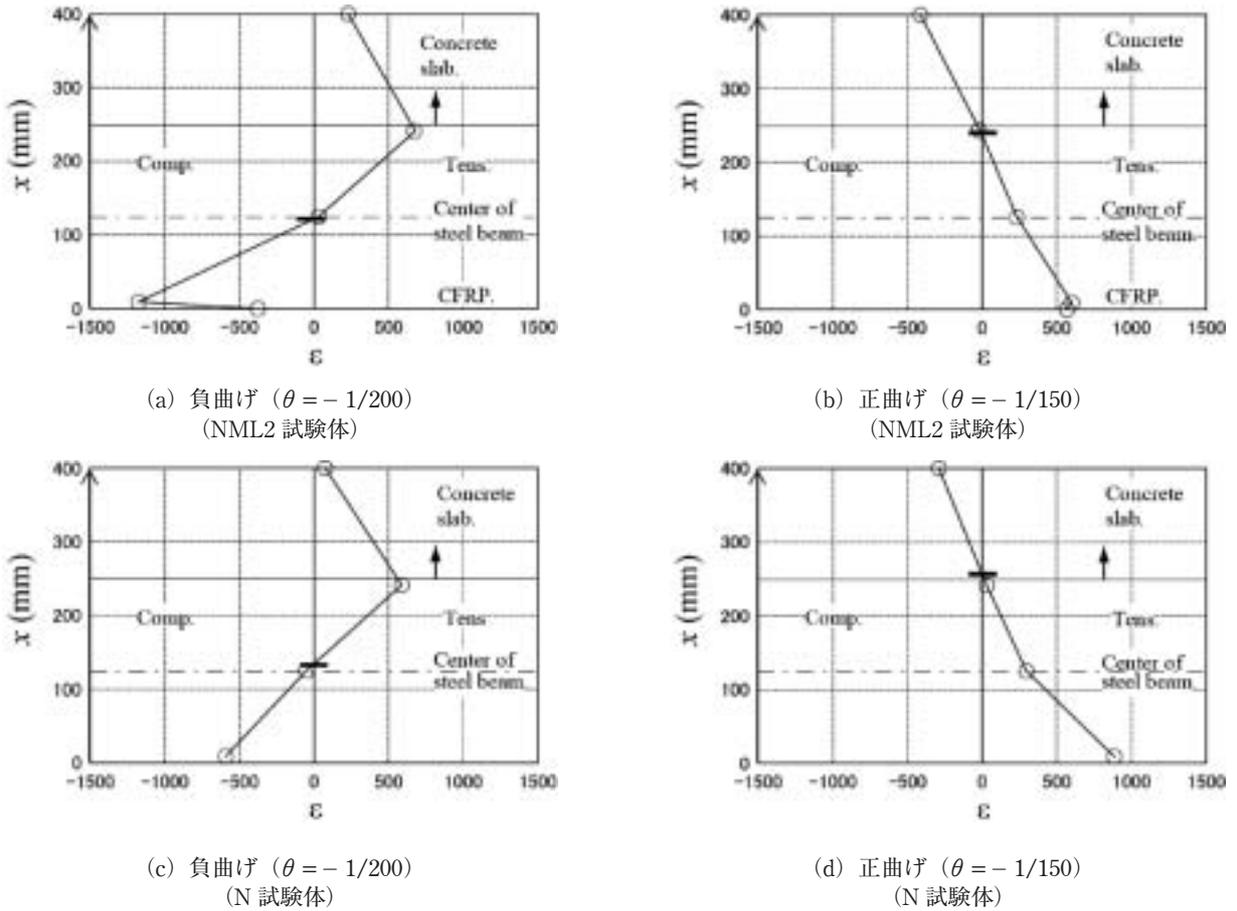


図 11 断面のひずみ分布 (実験 II)

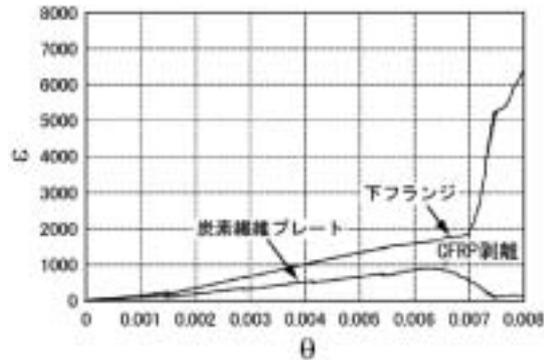
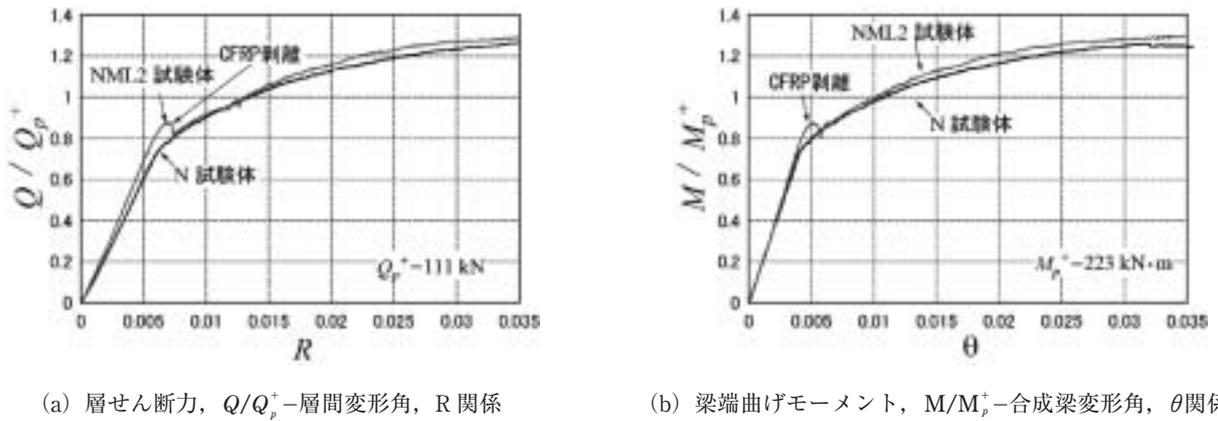


図 12 実験 III の結果

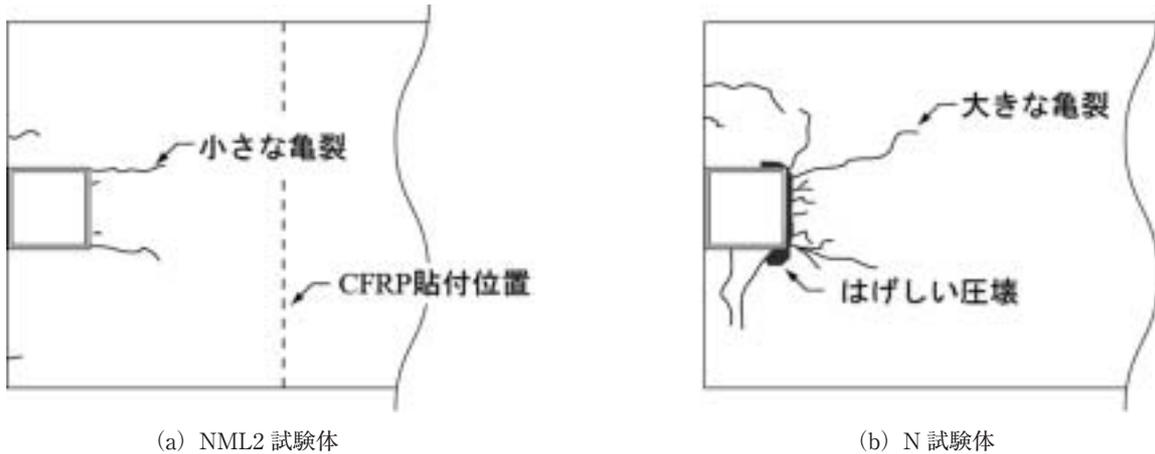
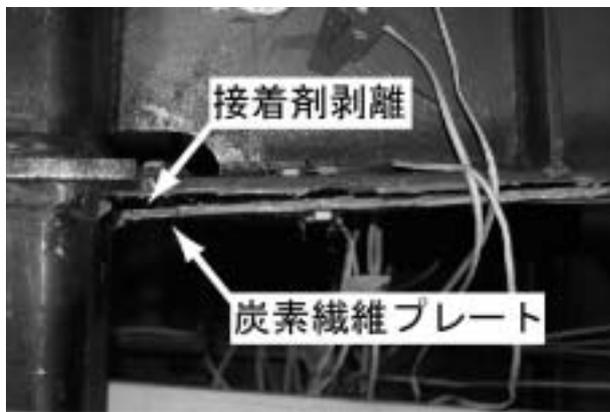


図 13 単調荷重試験後のコンクリートスラブ圧壊状況



(a) NML2 試験体



(b) N 試験体

写真 1 単調荷重試験後の下フランジ梁端の損傷状況

図 11 には、実験Ⅱにおける負曲げ時 ($\theta = -1/300$) および正曲げ時 ($\theta = 1/200$) における A 断面のひずみ分布と中立軸位置を各試験体について示す。

図 13、写真 1 には、実験Ⅲ終了後の各試験体のコンクリートスラブの亀裂状況とスカラップ近傍の下フランジの損傷状況を示す。

これらの図より、以下のことがわかる。

○初期剛性について

図 9、10、表 3 より、NML2 試験体の合成梁の初期剛性は、N 試験体に較べて、10%程度上昇している。また、NML2 試験体の層剛性は、N 試験体に較べて、15%程度上昇している。

図 11 より、正曲げ時の NML2 試験体の中立軸位置は、N 試験体の中立軸位置よりも下方向に移動している。また、負曲げ時においては、NML2 試験体の中立軸は、N 試験体の中立軸とほぼ同一である。

したがって、炭素繊維プレートを接着することで、正曲げ時の剛性が 10%～15% 上昇する。また、炭素繊維の接着補強効果により、正曲げ時には、中立軸が下方向に移動

する。

○最大耐力について

図 12 より、NML2 試験体および N 試験体は、層間変形角 $1/30\text{rad}$ 付近で、コンクリートの破壊によって最大耐力に達した。

最大耐力は、NML2 試験体は、N 試験体に較べて、5%程度上昇している。

したがって、炭素繊維プレートを接着しても、最大耐力の上昇はわずかである。

○塑性変形能力と破壊性状について

実験Ⅲにおいて、NML2 試験体は、鋼材の降伏後、炭素繊維プレートの直ひずみが 1000μ に達すると部分的に剥離し、剥離後は、N 試験体と同様の荷重-変位関係を示す。しかしながら、梁端の炭素繊維プレート剥離後も、剥離していない部分の炭素繊維プレートの接着補強効果により、N 試験体より、剛性・耐力が高くなっている。

また、写真 1 より、単調荷重試験終了後のスカラップの形状は、両試験体を比較した場合、変化がなく、CFRP が梁下端に悪影響を及ぼしていない。

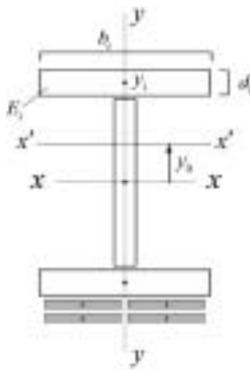


図 A-1 複合材の断面

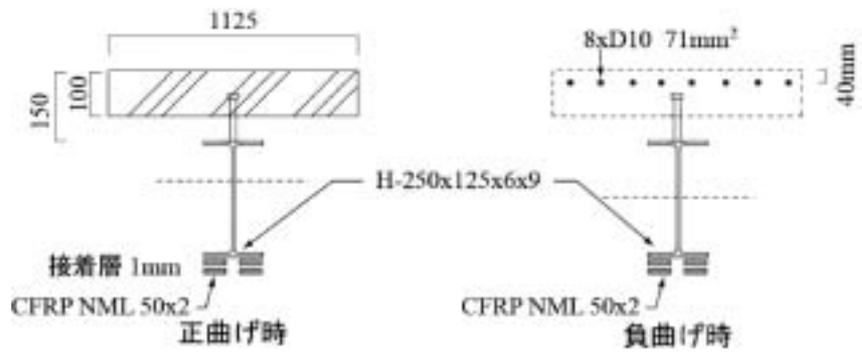


図 A-2 正・負曲げ時の有効な断面

表 A-1 NML2 試験体の曲げ剛性

	正曲げ時				鉄筋	負曲げ時			
	b_i	d_i	y_i	E_i		b_i	d_i	y_i	E_i
スラブ	1125	100	225	$E_s/15$					
上フランジ	250	9	120.5	E_s	8x71 mm ²	235	E_s		
ウェブ	6	232	0	E_s	上フランジ	250	9	120.5	
下フランジ	250	9	-120.5	E_s	ウェブ	6	232	0	
CFRP1枚目	50x2	2	-127.0	$1.44E_s$	下フランジ	250	9	-120.5	
CFRP2枚目	50x2	2	-130.0	$1.44E_s$	CFRP1枚目	50x2	2	-127.0	
					CFRP2枚目	50x2	2	-130.0	
曲げ剛性	$EI^+ = 4.35 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{mm}^2$				曲げ剛性	$EI^- = 1.62 \times 10^{10} \text{ kN} \cdot \text{mm}^2$			

NML2 試験体および N 試験体ともに、コンクリートの破壊時に最大耐力に達する。図 13 より、コンクリートスラブの破壊状況は、N 試験体は、コンクリート・柱接触面に激しい圧壊が見られるほか、隅角部より斜め方向に大きい亀裂が生じている。しかしながら、NML2 試験体は、コンクリート・柱接触面は圧壊しているものの N 試験体ほど激しくない。また、隅角部からの亀裂も斜め方向ではなく、ほぼ垂直方向に小さい亀裂が生じている。

4. まとめ

完全合成梁の下フランジに、炭素繊維プレートを 2 層接着する補剛を行った T 字形試験体を作製し、正負交番繰返しおよび単調荷試験を行い、合成梁の曲げ剛性の向上度を調査した。得られた知見は、以下のように要約できる。

- 1) 合成梁の下フランジに中弾性型炭素繊維プレートを 2 列 2 層接着する補剛によって、合成梁の正曲げ時の曲げ剛性は 2 割上昇する。
- 2) コンクリートスラブと柱との近傍に炭素繊維プレートを接着しても正曲げ時の圧壊をそれほど抑制しない。
- 3) 炭素繊維プレートを貼ることによって、梁下端の変形性能に悪影響を及ぼすことはない。

付録

○複合材の断面性能

矩形要素からなる複合部材断面を考える。矩形要素は、

幅、厚さ、図心位置とヤング係数を、 b_i 、 d_i 、 y_i と E_i で表されるものとする。

任意の剛性を持つ断面の中立軸位置、 y_0 は次式で求まる。

$$y_0 = \frac{\int_A E \cdot y \cdot ds}{\int_A E \cdot ds} \dots\dots\dots (A.1)$$

ここに、 A ：断面の領域、 ds は面積素である。

n 個の矩形要素で断面が構成されているとすれば、

$$\int_A E \cdot y \cdot ds = \sum_i^n E_i \times b_i \times d_i \times y_i$$

$$\int_A E \cdot ds = \sum_i^n E_i \times b_i \times d_i$$

であるので

$$y_0 = \frac{\sum_i^n E_i \times b_i \times d_i \times y_i}{\sum_i^n E_i \times b_i \times d_i} \dots\dots\dots (A.2)$$

中立軸位置と矩形要素の図心との距離が h_i 、矩形要素の図心回りの断面 2 次モーメントと断面積が I_i と A_i とすると、公式より、中立軸位置回りの断面 2 次モーメント、 I は、次式で与えられる。

$$I = I_i + A_i \times h_i^2 \dots\dots\dots (A.3)$$

よって、複合部材断面の中立軸回りの曲げ剛性、 EI_y は、次式で得られる。

$$E \cdot I = \sum_i^n E_i \left\{ \frac{b_i \times d_i^3}{12} + b_i \cdot d_i \times (y_i - y_0)^2 \right\} \dots\dots\dots (A.4)$$

上式を用いて合成梁の曲げ剛性を略算してみる。合成梁では剛性の寄与が正曲げ時と負曲げ時で図 A-2 の様に異なる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・解説，1985.2.
- 2) 東レ建設㈱：S-ラミネート工法－CFRP帯板接着による鋼梁の補強工法－設計・施工マニュアル（案）第2版，2007.