

CFRPシート補強した鋼箱形断面長柱 の単調載荷ならびに交番載荷実験

池田 一喜¹・宮下 剛²・大垣 賀津雄³・服部 雅史⁴・後藤 源太⁵・
秀熊 佑哉⁶・櫻井 俊太⁷・SYLL AMADOU SAKHIR⁸

¹正会員 大日本ダイヤコンサルタント(株) (〒101-0022 東京都千代田区神田練堀町300)

E-mail: kazu1999yosi@gmail.com

²正会員 名古屋工業大学特任教授 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: miyashita.takeshi@nitech.ac.jp (Corresponding Author)

³正会員 ものつくり大学教授 建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp

⁴正会員 中日本高速道路(株) 東京支社 (〒105-6011 東京都港区虎ノ門4-3-1)

E-mail: m.hattori.ab@c-nexco.co.jp

⁵正会員 (株) 高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)

E-mail: g.goto.aa@ri-nexco.co.jp

⁶正会員 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 (〒351-0025 埼玉県朝霞市三原5-1-10)

E-mail: hidekuma.3ae.yuya@nscm.nipponsteel.com

⁷正会員 日鉄ケミカル&マテリアル(株) コンポジット事業部 (〒351-0025 埼玉県朝霞市三原5-1-10)

E-mail: sakurai.sh.msu@nscm.nipponsteel.com

⁸正会員 東京科学大学助教 環境・社会理工学院 (〒152-8550 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail: syll.a.aa@m.titech.ac.jp

鋼橋における耐震補強は、鋼板を用いた当て板補強が一般的である。この工法はボルト孔による母材の断面欠損、死荷重の増加に伴う補強範囲の拡大、再劣化等の課題を有する。これらの課題を解決するためには、軽量で腐食の懸念がない炭素繊維（以下、CFRP）シートを補強に用いることが有効である。本研究では、鋼トラス橋の部材を対象とし、箱形断面を有する長柱供試体の単調および交番載荷実験を行い、CFRPシートによる耐震補強効果について検討した。その結果、CFRP補強は交番載荷においても耐荷力の向上が期待でき、局部座屈発生後もエネルギー吸収量が急減せずに保持されることが確認された。また、実験結果は耐荷力曲線に対して安全側となり、既往の耐荷力曲線を用いることで、CFRPによる補強効果を設計に取り込める可能性が見出された。

Key Words: steel truss bridge, column, buckling, CFRP sheet, reinforcement

1. はじめに

1995年に発生した阪神淡路大震災を機に道路橋の耐震設計基準の大幅な改定が行われた¹⁾。この改定以前は修正震度法による静的な地震応答の算出が主だったが、改定後は動的解析を用いた設計照査を行うことになった。動的解析の導入により、1995年以前の基準²⁾で建設された鋼橋の主構造部材は耐震性能不足と判定されることが多い。特にトラス橋の下弦材等は、局部座屈や全体座屈の発生が懸念され、耐震性能が不十分と判定される。こ

れは、支間長の大きいトラス橋において、常時引張荷重が作用する桁端部の下弦材や支間中央部の斜材等が許容応力度に対して余裕があり、最小断面で設計されていることによる。従来、これらの部材の耐荷力不足を補うためには鋼板による当て板補強が用いられてきた。しかし、この工法は孔引きの影響による母材の断面欠損、孔引きに伴う当て板の板厚増大や荷重の増加、耐食性の確保、運搬や施工の際に専門的な技術者や設備等を整えなければならないなどの課題を有する。

これらの課題に対して、炭素繊維（以下、CFRP）シ

表-1 実験ケースならびに供試体パラメータ

ケース	載荷方法	回転軸	CFRP 補強量 鉛直/水平	板厚 ¹⁾ t (mm)	降伏点 σ_y (N/mm ²)	細長比 パラメータ λ (—)	幅厚比 パラメータ R (—)	断面積 A (mm ²)	理論値	
									降伏荷重 P_y (kN)	降伏変位 ²⁾ δ_y (mm)
Np01	単調 載荷	X	—	4.5	313	0.85	0.62	2511	786	5.01
Np02		Y	—	4.5	313	0.84	0.62	2511	786	5.01
Ap11		X	—	3.0	327	0.87	0.95	1674	547	5.23
Ap12		Y	—	3.0	290	0.82	0.89	1674	485	4.64
Ap21		X	5/5	4.48	327	0.86	0.64	2500	817	5.23
Ap22		Y	5/5	4.48	327	0.86	0.64	2500	817	5.23
Nc01	交番 載荷	X	—	4.5	313	0.85	0.62	2511	786	2.50
Nc02		Y	—	4.5	313	0.84	0.62	2511	786	5.01
Ac11		X	—	3.0	327	0.87	0.95	1674	547	2.62
Ac12		Y	—	3.0	327	0.87	0.95	1674	547	5.23
Ac21		X	5/5	4.48	327	0.86	0.64	2500	817	5.40
Ac22		Y	5/5	4.48	290	0.81	0.60	2500	725	4.64

1) CFRP補強したケースの板厚は式(1)を考慮

2) 標点間距離は変位計の種類に応じて、計測点距離の1600mm, 3200mm, 3300mmとしている。

ートを補強材料として活用することが提案されている。CFRP は軽量であり、高弾性、高強度、耐食性といった特徴を有する。また、樹脂による接着が可能であり、母材に対し損傷を与えず、施工に大掛かりな機材も必要としない。さらに、特殊な技能を要求せず、作業空間が狭隘な箇所に対しても適用が可能である。近年では、既往の研究成果³⁾⁹⁾に基づき、CFRP による鋼構造物への補修・補強マニュアルの発刊⁹⁾や FRP 接着による構造物の補修・補強指針の整備⁷⁾が行われ、FRP 接着工法の適用範囲が拡大している⁸⁾¹³⁾。

さらに、秀熊らの既往研究^{14) 15)}では、合理的な耐震工法の構築を目的として、箱形断面や H 形断面を有する鋼部材を想定した短柱供試体を対象に、局部座屈に関する CFRP による補強効果の確認実験を実施している。本研究では、局部座屈のみならず、連成座屈を生じ得る鋼部材の CFRP 補強を目指す。具体的には、トラス橋下弦材を想定した箱形断面を有する長柱供試体に CFRP シートを用いて接着補強を行う。この供試体に対する単調載荷実験および交番載荷実験を通じて、力学的挙動を把握するとともに、全体座屈と局部座屈の連成座屈に対する補強効果ならびに繰り返し荷重下のエネルギー吸収性能等を確認する。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

本研究では、実橋梁の 1/3 程度の寸法とした箱形断面を有する長柱供試体を用いた。実験ケースは、板厚 4.5 mm、長さ 3800 mm を N シリーズ、板厚 3.0 mm、長さ 3800 mm を A シリーズとする。表-1 に実験ケースと供試体パラメータを、図-1 に各シリーズの供試体の概形を示す。

供試体の長さは、載荷試験機の制約および全体座屈が発生するように細長比パラメータ λ を 0.9 付近の値になるようにした。供試体のウェブとフランジの板厚は、幅厚比パラメータ R の限界値を 0.7 として、 $R \leq 0.7$ で局部座屈による耐荷力減少を考慮しないケース、 $R > 0.7$ で局部座屈による耐荷力減少を考慮するケースを設けた¹⁶⁾。

(2) 材料特性

本研究で使用了材料の諸元を表-2 に示す。鋼材の鋼種は SS400 である。CFRP シートには中弾性タイプを用いた。これは、補修施工等で多く用いられている高弾性タイプと比較すると、弾性係数は低いものの、引張強度に優れるため、繰り返し荷重下において補強効果が期待できることによる。また、CFRP シートを鋼部材に接着させた場合、座屈による大変形ではなく離し、補強効果を十分に発揮できない恐れがある。このため、CFRP を

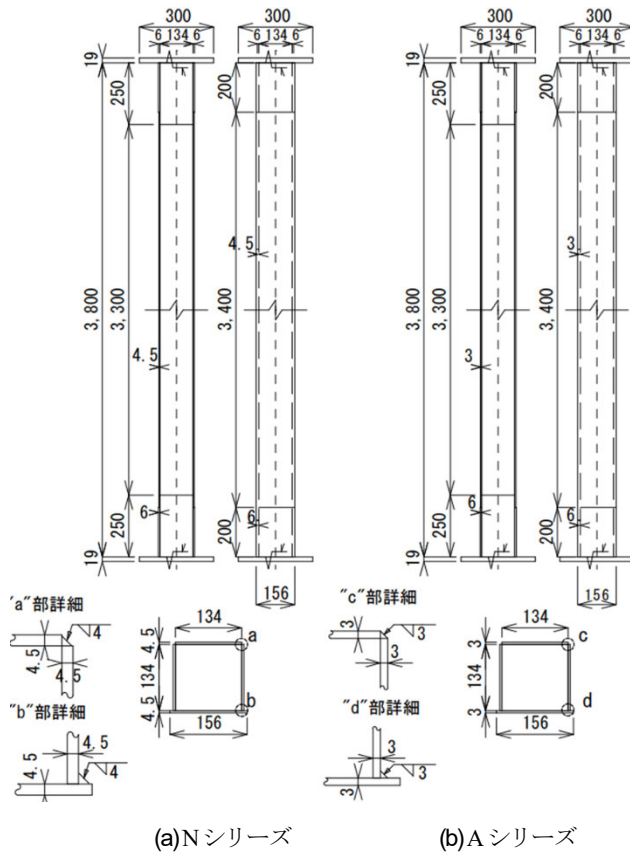


図-1 実験供試体 (単位: mm)

接着するすべての供試体において、CFRP シートと鋼材間にはく離防止の効果をもつ高伸度弾性パテ材（以下、パテ材）を塗布した⁹⁾。

(3) 供試体パラメータ

表-1 に示す供試体パラメータについて説明する。すべての供試体の支持条件は、一方向の回転を許容する両端ピン支持条件とした。図-2 に本供試体の断面図とピンの回転軸を示す。本研究で用いる供試体は実橋梁を考慮した断面であり、2 軸対称断面とはなっていない。そこで、図-2 に示す X 軸、Y 軸の 2 つの軸をピンの回転軸とした。ただし、X 軸回りの回転軸はウェブの中央であり、断面の重心とは一致していない。

CFRP シートの補強量は、補強後の板厚を t として、式(1)を用いて求めた。

$$t = t_s + C_n \times \left(\frac{E_c}{E_s} \right) \times t_c \times n \quad (1)$$

ここで、 t_s は鋼材の板厚、 E_s は鋼材の弾性係数、 E_c は CFRP シートの弾性係数、 t_c は CFRP シートの厚さ、 n は CFRP シートの積層枚数を示す。 C_n ($= 0.84$) はパテ材によるせん断遅れの影響を考慮した応力低減係数³⁾である。

幅厚比パラメータが $R > 0.7$ となる供試体では、降伏以前の局部座屈の発生を抑えるため、式(1)から補強後

表-2 材料諸元

材料	厚さ (mm)	弾性係数 (N/mm ²)	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
鋼材	4.5	2.0×10^5	313	457
	3.0		327 290 ²⁾	471 438 ²⁾
中断性CFRPシート	0.165 ¹⁾	4.27×10^5	—	3925
エポキシ樹脂	0.5 ¹⁾	2488	—	73
パテ材	0.8 ¹⁾	72	—	10

1) 設計厚さ

2) 実験ケース Ap12, Ac22

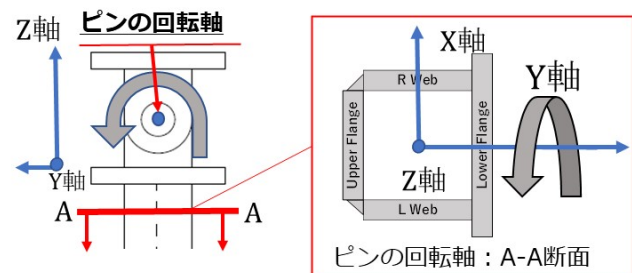


図-2 供試体断面とピンの回転軸

の幅厚比パラメータが $R \leq 0.7$ となるように鉛直（部材軸）方向に貼付する CFRP シートの枚数を決定した。また、参考文献¹⁴⁾にもとづき、局部座屈発生の抑制に効果的であることから、鉛直方向のほかに水平（部材軸直角）方向にも CFRP シートを貼付した。水平方向シートの補強枚数は、式(1)より算定した鉛直方向シートと同数としている。鉛直方向と水平方向の CFRP シートは、それぞれ交互に積層した。

(4) 施工方法

はじめに、鋼材表面の黒皮、錆をディスクグラインダーでケレンし、汚れの除去のため有機溶剤（アセトン）を用いて表面を清掃する。その後、ウレタンプライマーを塗布する。次にパテ材を塗布するが、塗布量を均一にするために使用重量を計測して施工厚が平均 0.8 mm になるよう管理する。そして、エポキシ樹脂を塗布した後に CFRP シートを貼り付け、含浸ローラーによる脱気を行い、CFRP シート面に樹脂を上塗りして含浸する。この作業を CFRP シートの積層数分だけ繰り返す。

(5) 荷重方法

図-3 に実験状況を示す。試験機には 3000 kN 万能試験機を使用した。供試体の両端は、上下端部に一方向の回転を許すピンとした治具と供試体のエンドプレートとを

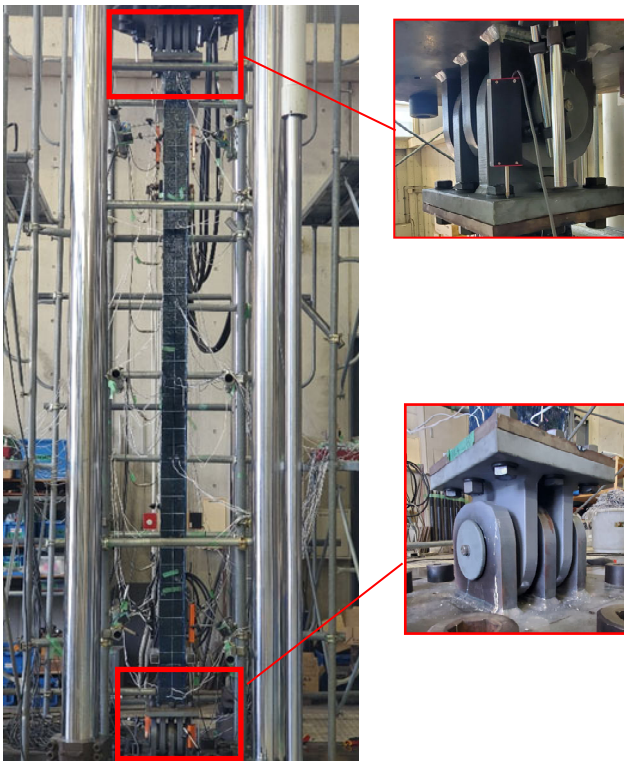


図-3 実験状況

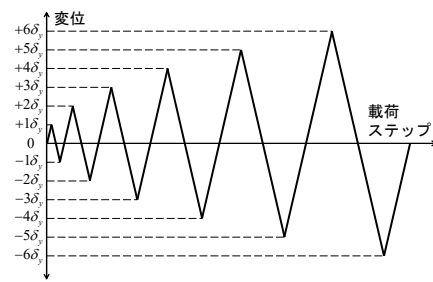


図-4 交番载荷実験の载荷パターン

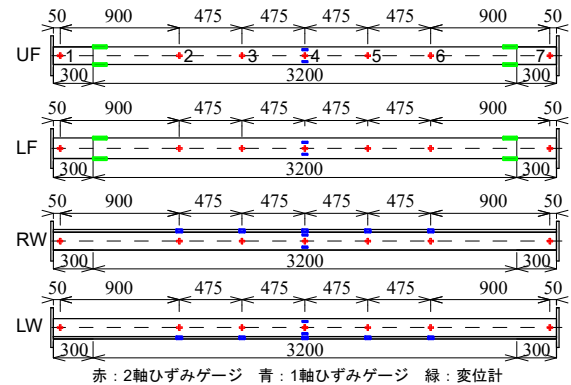


図-5 計測点位置 (単位: mm, UF の 2 軸ひずみゲージ脇の数字は計測断面の番号を示す)

ボルトで固定した。単調载荷実験では、供試体に軸方向圧縮力を単調に载荷した。交番载荷実験では、図-4 に示す载荷パターンで、引張荷重と圧縮荷重を降伏変位 δ_y にもとづいた変位制御をすることで、 $\pm 6\delta_y$ まで载荷を行った。ここで、降伏変位 δ_y は軸方向圧縮力を受ける部材の理論計算から求めたものであり、具体的な数値は表-1 に示す。

(6) 計測位置

図-5 に計測点位置を示す。箱形断面の各面に 1 軸あるいは 2 軸塑性ひずみゲージを貼り付け、構造挙動を把握することとした。変位は载荷軸方向の鉛直変位、部材面の面外変位を計測した。鉛直変位は 3200 mm の区間に、上下合計 8 箇所に変位計を設置し、相対変位を計測した。

3. 実験結果

(1) 荷重－鉛直変位関係

a) 単調载荷実験

表-3 に単調载荷実験から得られた実験結果を示す。CFRP 補強のケース (Ap21, Ap22) は、各回転軸回りの無補強時板厚 3 mm のケース (Ap11, Ap12) に対して、最大圧縮荷重が 2.02, 2.06 倍に増加した。また、CFRP 補強のケースと無補強時板厚 4.5 mm のケース (Np01,

Np02) を比較しても、CFRP 補強のケースはどれも無補強時板厚 4.5 mm のケースの最大荷重を上回っている。表-1 に示す降伏荷重 P_y と最大圧縮荷重の比は、無補強のケースが 0.73~0.88 の値であるのに対し、CFRP 補強のケースは 0.96, 1.00 と増加している。ここで、CFRP 補強のケースの降伏荷重の計算では、式(1)を用いて CFRP シートの厚さを弾性係数比で鋼換算し、母材の板厚に加えて断面積としている。これは以下で用いる初期剛性の計算でも同様である。

図-6 に単調载荷実験の荷重－鉛直変位関係を示す。ここでは、鉛直変位を降伏変位で無次元化しており、圧縮方向を負とした。ただし、荷重は圧縮方向を正とした。CFRP 補強のケースの初期剛性は、無補強時板厚 3 mm のケースに対して増加しており、無補強時板厚 4.5 mm のケースと同程度となっている。また、CFRP 補強のケースでは、最大荷重は降伏荷重に概ね到達している。最大荷重に到達した後は、荷重が急激に減少するものの、無補強時板厚 3 mm のケースと同程度の荷重を示す。最大荷重到達後は、局部座屈が発生した箇所の一部で、CFRP シートのはく離が確認され、その後、変形が急激に進展した。

b) 交番载荷実験

表-4 に交番载荷実験から得られた実験結果を示す。CFRP 補強のケース (Ac21, Ac22) は無補強時板厚 3 mm のケース (Ac11, Ac12) に対して最大圧縮荷重が

表-3 実験結果 (単調載荷実験)

ケース	回転軸	CFRP 補強量 鉛直/水平	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ λ (—)	幅厚比 パラメータ R (—)	理論値		実験値		
						降伏荷重 P_y (kN)	降伏変位 ¹⁾ δ_y (mm)	最大荷重 P_{max} (kN)	P_{max}/P_y (—)	補強効果 ²⁾ (—)
Np01	X	—	4.5	0.85	0.62	786	5.01	690	0.88	—
Np02	Y	—	4.5	0.84	0.62	786	5.01	619	0.79	—
Ap11	X	—	3.0	0.87	0.95	547	5.23	397	0.73	—
Ap12	Y	—	3.0	0.82	0.89	485	4.64	388	0.80	—
Ap21	X	5/5	4.48	0.86	0.64	817	5.23	819	1.00	2.06
Ap22	Y	5/5	4.48	0.86	0.64	817	5.23	783	0.96	2.02

1) 標点間距離は計測点距離の3200mmとした。

2) 無補強供試体 (板厚3mm) の最大荷重に対する補強供試体の最大荷重の比

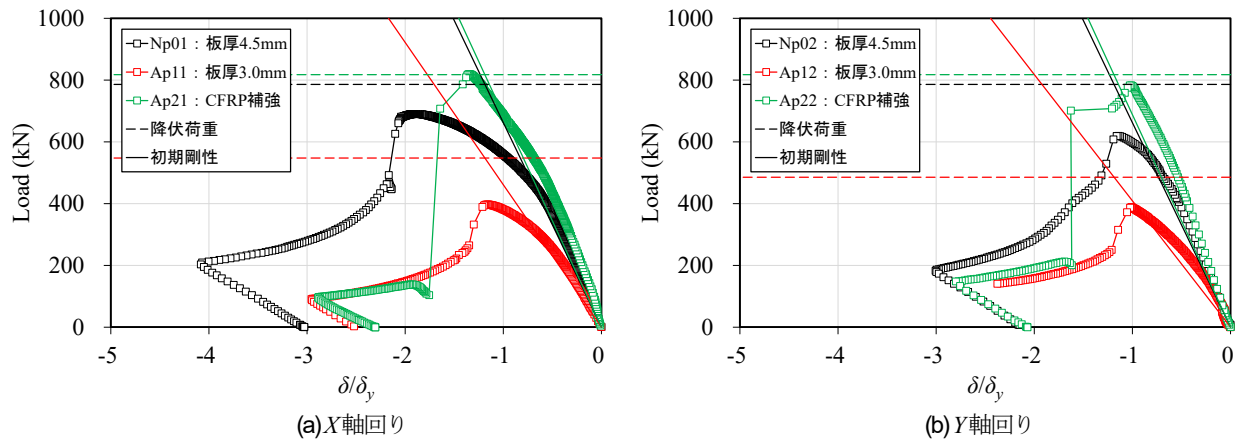


図-6 荷重—鉛直変位関係 (単調載荷実験, 荷重は圧縮方向を正)

表-4 実験結果 (交番載荷実験)

ケース	回転軸	CFRP 補強量 鉛直/水平	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ λ (—)	幅厚比 パラメータ R (—)	理論値		実験値					
						降伏荷重 P_y (kN)	降伏変位 ¹⁾ δ_y (mm)	最大荷重 (引張)		最大荷重 (圧縮)		補強効果 ²⁾	
								P_{max} (kN)	P_{max}/P_y (—)	P_{max} (kN)	P_{max}/P_y (—)	引張 (—)	圧縮 (—)
Nc01	X	—	4.5	0.85	0.62	786	2.50	801	1.02	542	0.69	—	—
Nc02	Y	—	4.5	0.84	0.62	786	5.01	767	0.98	686	0.87	—	—
Ac11	X	—	3.0	0.87	0.95	547	2.62	622	1.14	354	0.65	—	—
Ac12	Y	—	3.0	0.87	0.95	547	5.23	594	1.09	443	0.81	—	—
Ac21	X	5/5	4.48	0.86	0.64	817	5.40	1094	1.34	715	0.87	1.76	2.02
Ac22	Y	5/5	4.48	0.81	0.60	725	4.64	1149	1.59	675	0.93	1.93	1.52

1) 標点間距離は計測機器の種類に応じて、計測点距離の1600mm, 3200mm, 3300mmとした。

2) 無補強供試体 (板厚3mm) の最大荷重に対する補強供試体の最大荷重の比

1.52~2.02倍に、最大引張荷重が1.76~1.93倍に増加した。

無補強時板厚4.5mmのケース (Nc01, Nc02) とCFRP補強のケースの最大圧縮荷重を比較すると、同程度またはCFRP補強ケースが無補強時板厚4.5mmのケースを上回る結果を示した。最大引張荷重についても無補強時板厚4.5mmのケースが767kN, 801kNであるのに対して、CFRP補強のケースは1094kN, 1149kNと上回った。図-7と図-8に交番載荷実験の荷重—鉛直変位関係を示す。ここでは、図-6と同様に鉛直変位を降伏変位で無

次元化している。ただし、荷重については参考文献15)に倣い、各ケース間での荷重の大きさの相違が直接的にわかるように、正規化を行っていない。荷重の正負は、引張が正、圧縮が負である。CFRP補強のケースは、 $-2\delta_y$ において供試体中央部で局部座屈が発生し、その箇所ではCFRPシートのはく離が確認された。局部座屈の発生後は、引張荷重の載荷により、中央部でCFRPシートの破断ならびに鋼材の破断 (図中の×印の時点) が確認された。図-9に、 $5\delta_y$ 付近でNc02に生じたき裂の様子を示す

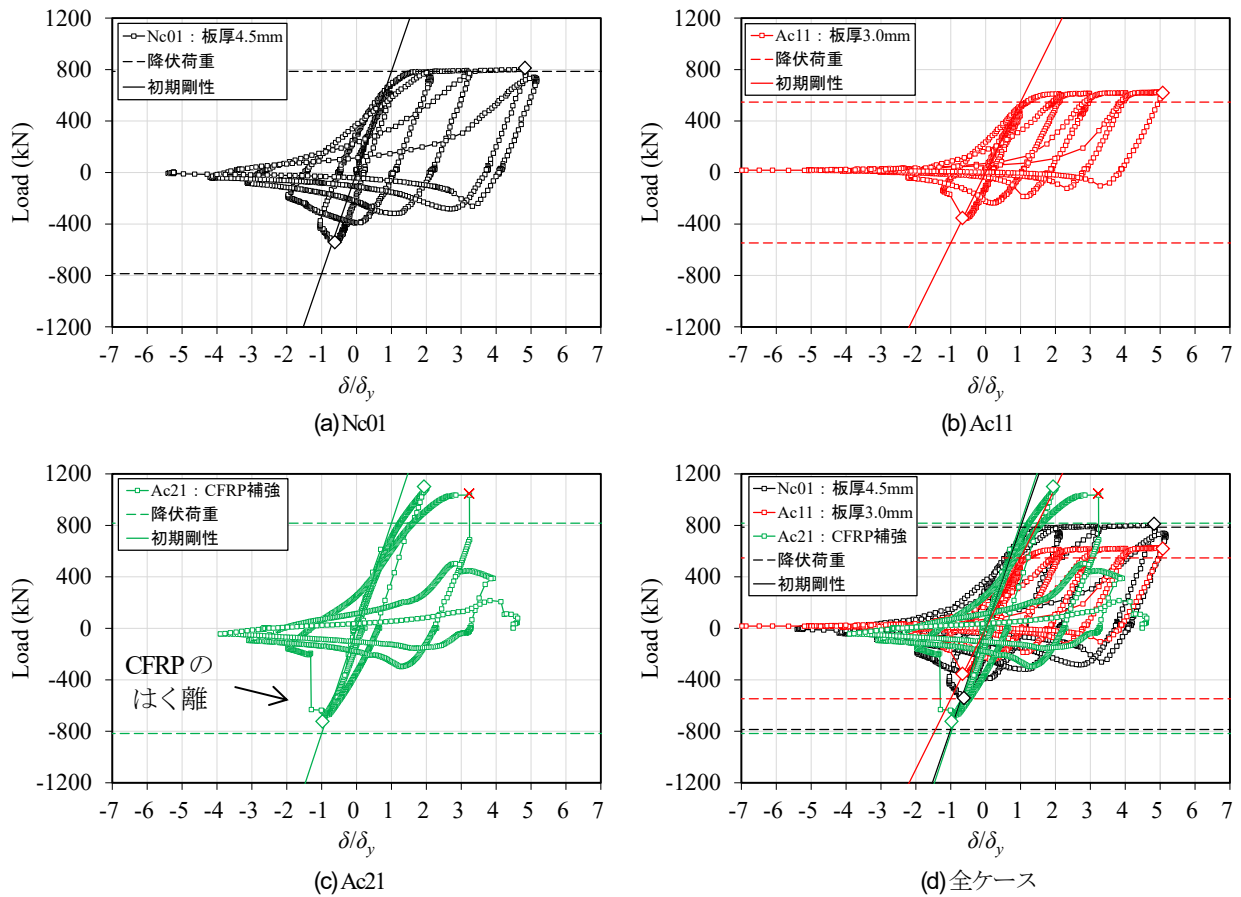


図-7 荷重—鉛直変位関係 (交番載荷実験, X軸回り, ×: 鋼材破断, ◇: 最大 or 最小荷重)

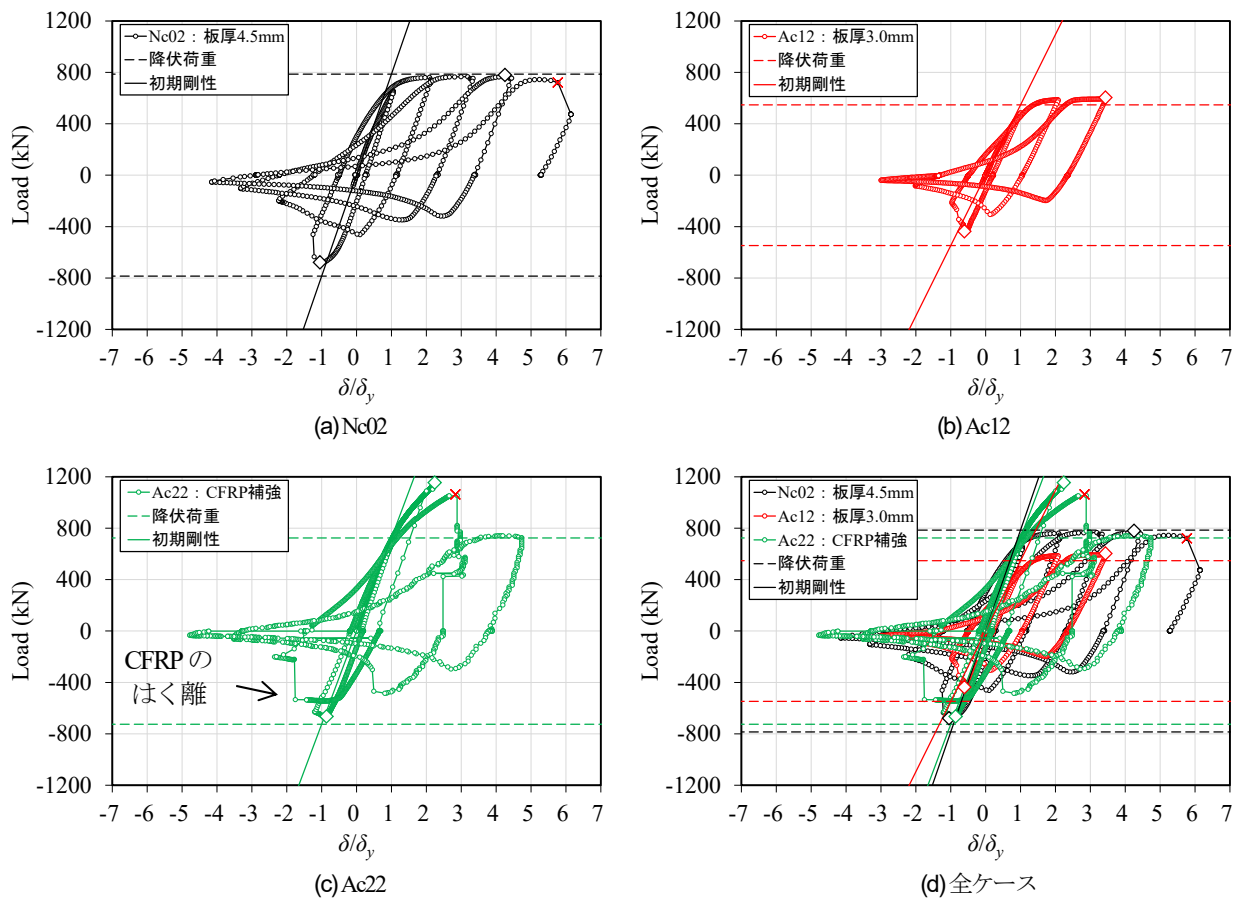


図-8 荷重—鉛直変位関係 (交番載荷実験, Y軸回り, ×: 鋼材破断, ◇: 最大 or 最小荷重)



図-10 供試体の破壊状況（単調載荷実験）

図-9 き裂発生の様子（Nc02 : $5\delta_h$ 時）

が、供試体の角溶接の溶接部が割れてき裂が進展していた。しかし、CFRP 補強のケースは $3\delta_h$ に至るまで、CFRP シートが部分的にはく離しながらも、引張荷重は無補強時板厚 3 mm のケースよりも高い値を示す。ここから、局部座屈が発生した後も引張荷重に対して、CFRP シートが補強効果を発揮することが確認される。また、回転軸の差異による影響は、単調載荷実験とともに、明確な傾向が見られなかった。これは、 X 軸回りの回転軸に対する断面重心のずれが、断面高さに対して 2 % 程度であるためと考える。

(2) 破壊状況

a) 単調載荷実験

図-10 に単調載荷実験後の供試体の破壊状況について

代表的な事例を示す。無補強時板厚 4.5 mm のケース（Np01, Np02）では、全体座屈が生じるとともに、供試体中央部で局部座屈の発生が見られ、連成座屈の様相を示した。無補強時板厚 3 mm のケースである Ap11 では、供試体上部に局部座屈が先行して発生したため、全体座屈による変形は見られなかった。一方、Ap12 では、局部座屈が供試体中央部に発生した。CFRP 補強のケース（Ap21, Ap22）では、最大荷重に到達した後、CFRP シートが破断し、その後に変形が急激に進展して供試体中央部に局部座屈の発生が確認された。CFRP シートのはく離は、局部座屈が発生した箇所でのみ確認されたものの、これ以外の箇所では CFRP シートのはく離は確認されなかった。これは、CFRP シートと鋼材間に挿入したパテ材がはく離防止効果を発揮したことによる。

b) 交番載荷実験

図-11 に交番載荷実験後の供試体の破壊状況について代表的な事例を示す。無補強時板厚 4.5 mm のケースのうち Nc02 では、 $5\delta_h$ 付近で鋼材が破断した無補強時板厚 3 mm のケース（Ac11, Ac12）では、供試体中央から離れた箇所で、圧縮荷重が $-1\delta_h$ に到達した時点で、局部座屈が発生し、その後の荷重により溶接部が開いた。これは供試体サイズを縮尺することですみ肉溶接のサイズも小さくなったことによる影響と推察する。

CFRP 補強のケース（Ac21, Ac22）では、圧縮荷重が $-2\delta_h$ に到達した時点で局部座屈が発生した。そして、続く荷重で、局部座屈が発生した箇所で CFRP シートの損傷が進展し、引張荷重が $3\delta_h$ に到達した時点で、この箇所から鋼材が破断した。ただし、CFRP シートのはく離

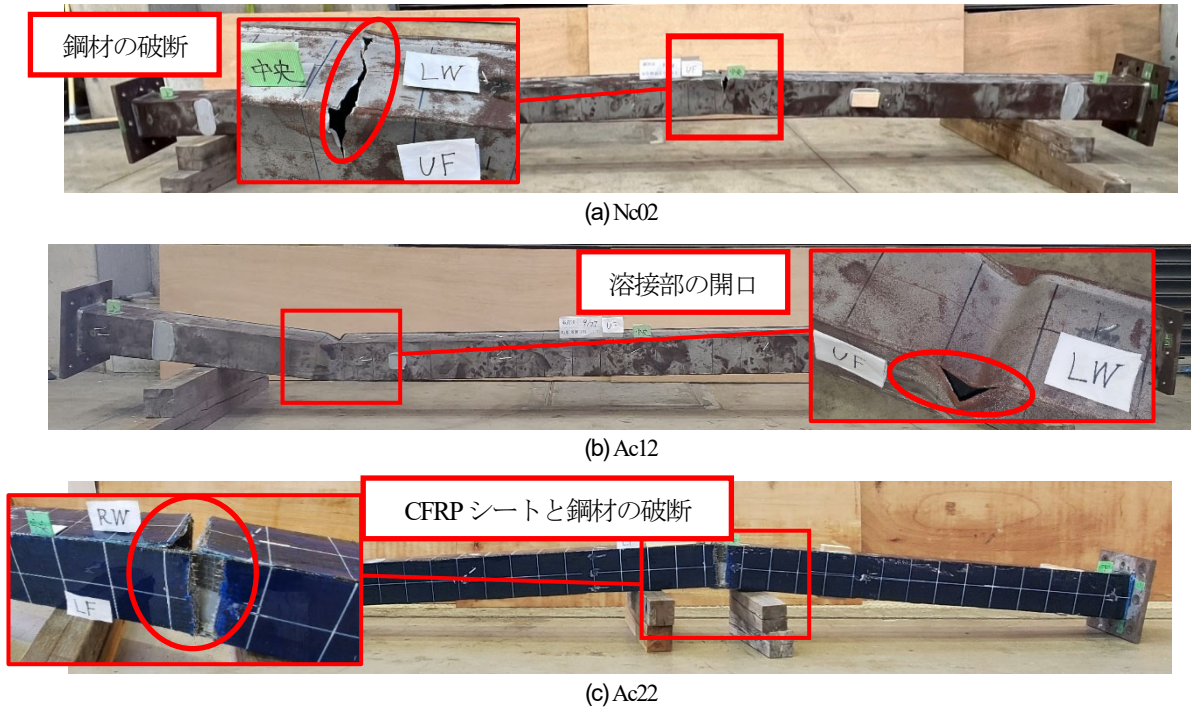


図-11 供試体の破壊状況 (交番載荷実験)

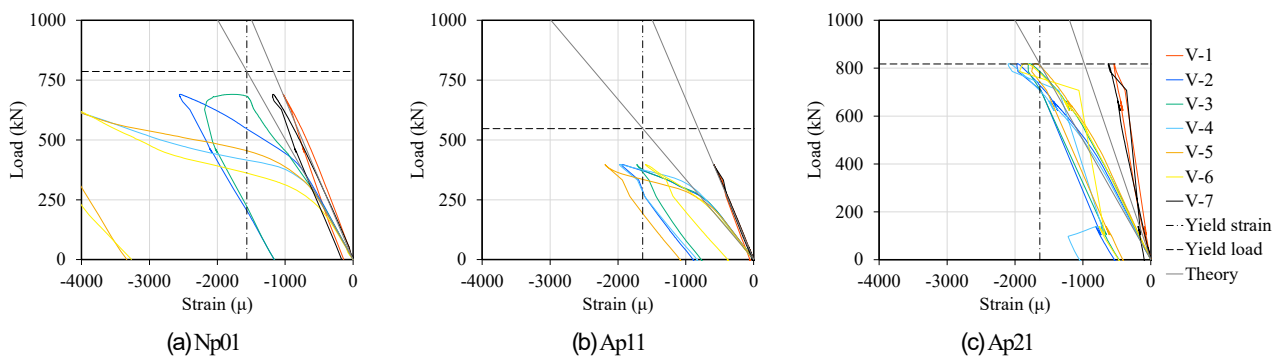


図-12 荷重一軸方向平均ひずみ関係 (単調載荷実験, 荷重は圧縮方向を正)

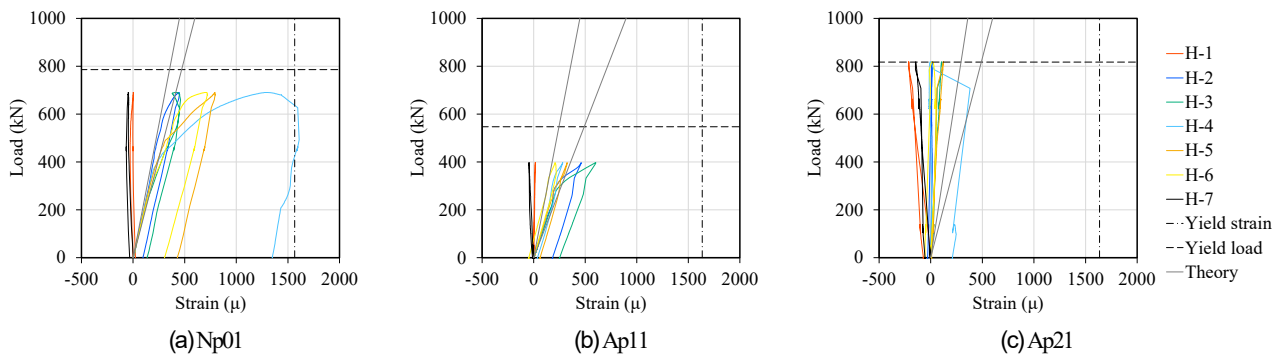


図-13 荷重一周方向平均ひずみ関係 (単調載荷実験, 荷重は圧縮方向を正)

は、単調載荷実験と同様に、局部座屈あるいは鋼材破断が発生した箇所に留まった。

(3) 荷重一ひずみ関係

a) 単調載荷実験

単調載荷実験から得られた荷重一ひずみ関係を図-12と図-13に示す。前者は各計測断面において2軸塑性ひ

ずみゲージで計測された軸方向ひずみであり、後者は周方向ひずみである。両者ともに、各計測断面の4点で計測された結果を平均化している。また、回転軸の方向に依らず、同様の傾向を示したことから、ここではX軸回りの結果を示している。計測断面は、供試体の上端から下端に向けて、1から7の数値を付しており、図中の凡例のVは軸方向をHは周方向を表す。

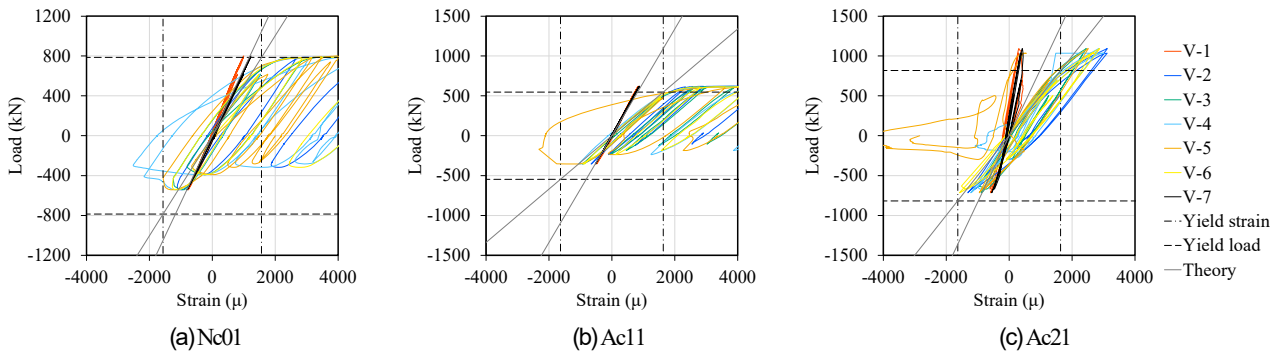


図-14 荷重一軸方向平均ひずみ関係（交番載荷実験，全計測点）

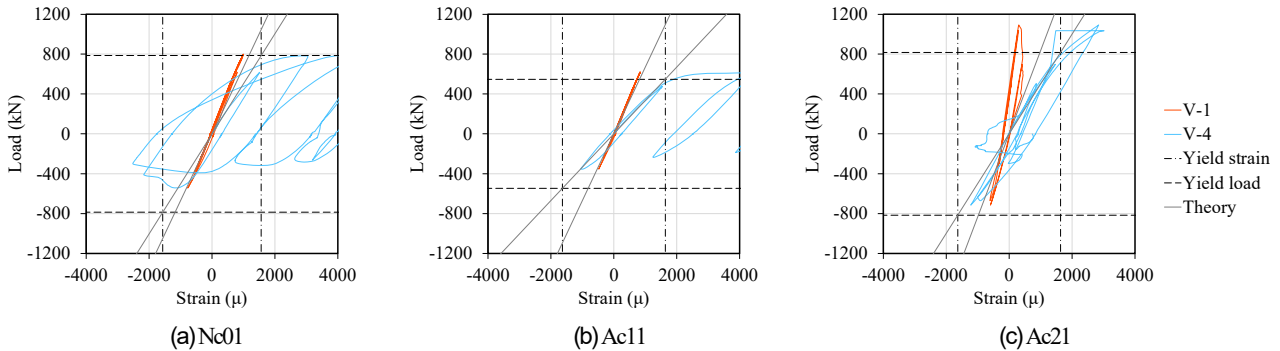


図-15 荷重一軸方向平均ひずみ関係（交番載荷実験，上端&中央）

図中の一点鎖線は鋼材の降伏ひずみを、点線は降伏荷重を示す。実線は初期剛性の理論値であり、供試体の両端から 250 mm の範囲の板厚は 6.0 mm となっていることから、これを考慮している（図-1 参照）。図-13 の初期剛性は図-12 の初期剛性に、負符号を付けて鋼材のポアソン比（= 0.3）を乗じたものである。CFRP 補強のケースの降伏荷重と初期剛性は、図-6 と同様の計算を行った。

無補強のケース（Np01, Ap11）について、軸方向平均ひずみはすべての計測点で初期剛性の理論値とよく一致している。具体的には、ひずみが荷重に対して直線性を失う 300 kN 付近の荷重で、実験値から算出した初期剛性を理論値に対する比率で評価すると、Np01 は 0.96, Ap11 は 0.92 となる。周方向平均ひずみは供試体の両端近傍の計測点（H-1, H-7）を除いて初期剛性の理論値とよく一致しており、軸方向ひずみと同様に初期剛性を評価すると Np01 は 1.07, Ap11 は 1.10 となる。また、これらのケースでは、座屈の発生により、最大荷重は降伏荷重の理論値まで到達していない。

CFRP 補強のケース（AP21）では、軸方向平均ひずみについて、供試体の両端近傍の計測点（V-1, V-7）を除いて初期剛性の理論値とよく一致している。これは供試体の両端近傍の計測点では、荷重伝達に対する CFRP シートの定着長が十分ではないのに対して、供試体の両端近傍以外の計測点では、十分な長さの定着長となっており、鋼材と CFRP シートが完全合成断面となっていることを意味する。無補強のケースと同様に初期剛性を評価

すると、V-1 と V-7 を除いて 1.10 となる。また、最大荷重も式(1)を用いて CFRP シートの厚さを弾性係数比で鋼換算し、母材の板厚に加えた断面積から計算した降伏荷重に到達している。以上より、CFRP シートの補強効果が確認されたとともに、補強設計の妥当性が検証されたと考える。ただし、図-13(c)のように、荷重に対して周方向のひずみがほとんど変化していない。周方向に接着貼付した CFRP シートの補強設計に向けては、局部座屈が発生するタイミングや面外変形による周方向の荷重分担率といった情報が必要である。しかし、今回の実験では、局部座屈が発生した箇所に、ひずみゲージが設置されなかったため、これらの情報が得られていない。これについては、数値解析による検討が有用と考えられるが、今後の課題としたい。

b) 交番載荷実験

交番載荷実験から得られた荷重一ひずみ関係を図-14～図-17 に示す。ここでも、回転軸の方向に依らず、同様の傾向を示したことから、X 軸回りの結果を示している。また、ひずみデータの処理方法は、単調載荷実験と同様である。図-15 と図-17 は、図-14 と図-16 に示す全計測点の結果のうち、グラフの視認性を向上させるため、供試体の上端付近と中央部の結果を抽出したものである。図内に示す初期剛性の理論値のうち、周方向平均ひずみについては、交番載荷であることから、荷重ならびにひずみの正負に対する理論値を示している。

全体的な傾向として、軸方向ならびに周方向平均ひずみともに、無補強のケースについては、荷重の繰り返し

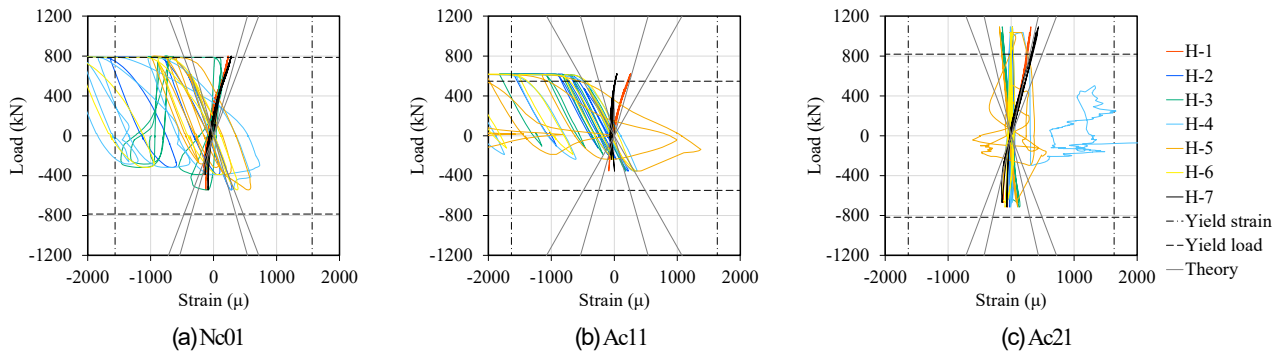


図-16 荷重一周方向平均ひずみ関係 (交番载荷実験, 全計測点)

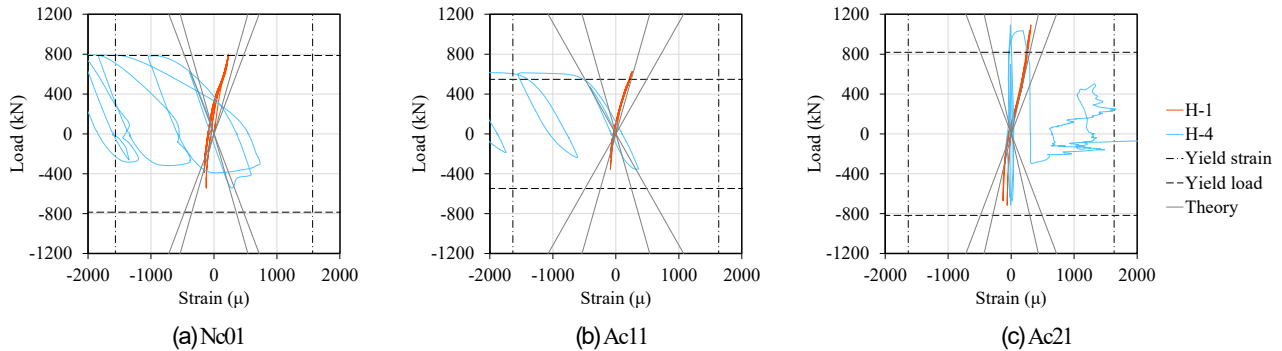


図-17 荷重一周方向平均ひずみ関係 (交番载荷実験, 上端&中央)

に応じて、残留ひずみが大きく累積し、接線剛性も低下している。一方、CFRP 補強のケースについては、図-14(c)をみると、荷重の繰り返しに対して、CFRP シートが部分的に破壊しているにもかかわらず、残留ひずみの累積は比較的小さく、接線剛性の低下も無補強のケースと比較して小さい。これは、荷重の繰り返しに対して抵抗性能を失わないといった再帰性の観点から、鋼部材の補強方法として望ましいものと考えられる。また、CFRP シートの破壊は局所的かつ脆性的であるため留意が必要であるものの、パテ材の使用といった CFRP シートの損傷進展過程を緩慢とする工夫によって、補強後の部材の塑性化も許容する補強工法の発展性を見出せたとも言える。

(4) 累積エネルギー吸収量

図-18 に交番载荷実験結果から算出した累積エネルギー吸収量を示す。エネルギー吸収量は荷重-変位関係のグラフにおいて履歴曲線に囲まれた面積から計算した。また、今回の実験では鋼材の破断や局部座屈が計測点近傍に発生したため、変位制御が困難となり、载荷ステップ $6\delta_y$ までの载荷を実施できない供試体があった。このため、累積エネルギー吸収量の評価は、すべての供試体で圧縮・引張载荷のデータが計測できた $3\delta_y$ までで行っている。

CFRP 補強のケース (Ac21, Ac22) は、 $2\delta_y$ 時の累積エネルギー吸収量が、無補強時板厚 3 mm のケース (Ac11, Ac12) よりも 28~35 %増加した。 $3\delta_y$ 時の累積エネルギー吸収量については、CFRP 補強のケースは、無補強時

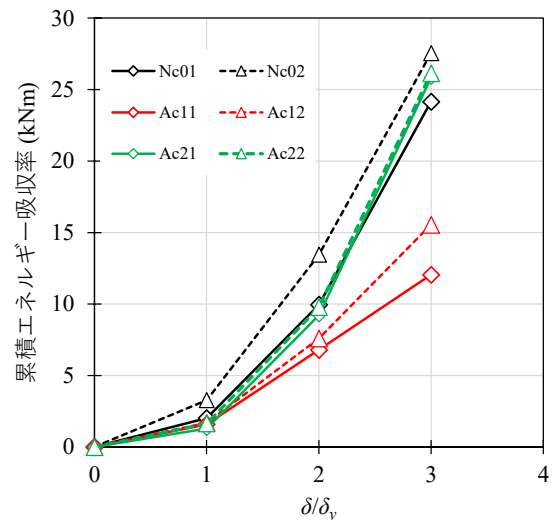


図-18 累積エネルギー吸収量

板厚 3 mm のケースよりも 68~114 %と大きく増加しており、板厚 4.5 mm のケース (Nc01, Nc02) と同程度の累積エネルギー吸収量となった。これは、局部座屈が発生して部分的に CFRP シートに損傷が生じた後も CFRP シートの補強効果が損失していないためと考える。このことは、図-7~図-8 に示す荷重-鉛直変位関係において、CFRP 補強のケースでは局部座屈が発生した後も、鋼材あるいは CFRP シートが破断するまでは引張荷重に対して補強効果を示すことからわかる。この引張荷重に対する CFRP シートの補強効果によって、累積エネルギー吸収量が増加したものと推察される。

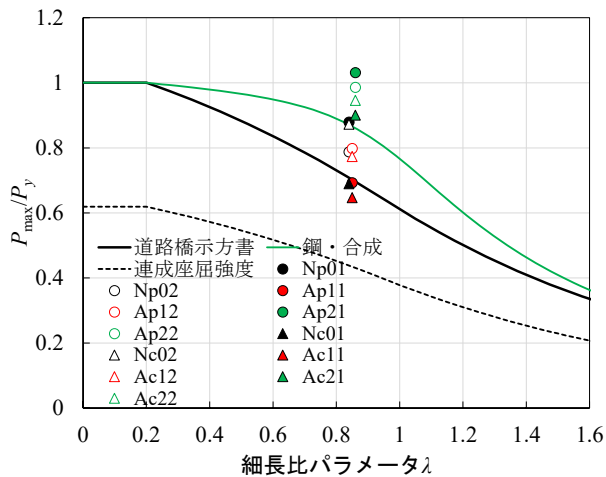


図-19 耐荷力曲線

(5) 耐荷力評価

図-19に最大荷重を耐荷力曲線上で整理した結果を示す。横軸は細長比パラメータ λ であり、縦軸は最大荷重を降伏荷重 P_y で正規化した値を示す。CFRP補強のケースについては、これまでと同様に式(1)を用いてCFRPシートの厚さを弾性係数比で鋼換算し、母材の板厚に加えて断面積としている。

耐荷力曲線として、道路橋示方書¹⁷⁾(以下、道示)および鋼・合成構造標準示方書¹⁸⁾を考慮した。道示の耐荷力曲線としては、溶接箱形断面の場合を用いている。CFRP補強のケースは、道示の耐荷力曲線に対して、平均で約39%大きい。また、無補強時のケースが、鋼・合成構造標準示方書の耐荷力曲線に対して若干危険側となるものの、CFRP補強のケースは平均で12%ほど安全側となっている。

道示の連成座屈強度式に対しては、すべての供試体が安全側であり、CFRP補強のケースは無補強時のケースよりも耐荷力が大きい。この耐荷力の増加は、CFRPシート補強によって鋼部材の座屈の発生が抑えられたためである。以上より、CFRP補強した鋼箱形断面柱の耐荷力評価は、CFRPシートを鋼換算した板厚を用いて、全体座屈に対応する耐荷力曲線を用いて評価できる可能性がある。

4. まとめ

本研究では、鋼トラス橋の耐震補強を想定して、箱形断面を有する鋼製の長柱供試体にCFRPシートの接着補強を行い、単調および交番載荷実験を実施した。以下に、本研究を通じて得られた知見を示す。

- (1) 単調載荷実験のCFRP補強のケースでは、最大荷重が無補強時板厚3mmのケースに対して約2倍に増加し、降伏荷重に対して0.96~1.00倍となった。こ

こで、降伏荷重は、CFRPシートの厚さを弾性係数比で鋼換算し、母材の板厚に加えた断面積として計算した。

- (2) 上述の計算方法は、鋼材とCFRPシートが完全合成断面を構成することを前提とする。これは単調載荷実験の荷重-ひずみ関係において、供試体の上下端部を除いて、CFRP補強のケースの初期剛性が、ひずみが荷重に対して直線性を失う300kN付近の荷重で、実験値から算出した初期剛性を理論値に対する比率で評価すると、1.10となることから妥当と言える。
- (3) 交番載荷実験のCFRP補強のケースでは、局部座屈が発生した後に、引張荷重の作用下でCFRPシートあるいは鋼材が破断した。しかし、このケースの最大圧縮荷重は、無補強時板厚3mmのケースに対して1.52~2.02倍に、最大引張荷重は1.76~1.93倍に増加した。これらの結果から、連成座屈を起こす鋼部材に対して、CFRPシートによる耐荷力の向上が確認できた。
- (4) 交番載荷実験から算出された累積エネルギー吸収量は、CFRP補強のケースについて、 $3\delta_y$ 時に、無補強時板厚4.5mmのケースと同程度となった。これは、局部座屈が発生以降も引張荷重に対してCFRPシートが補強効果を示したためである。
- (5) 実験結果と既往の耐荷力曲線の比較を行った。CFRP補強のケースの耐荷力評価では、CFRPシートを鋼換算した断面積を用いた。その結果、耐荷力曲線に対して、すべての補強ケースが安全側の評価となった。また、積公式を用いた連成座屈強度の評価では、すべてのケースで安全側の評価となった。このため、CFRPシートで補強した鋼箱形断面柱の耐荷力評価は、CFRPシートを鋼換算した板厚を用い、全体座屈に対応する耐荷力曲線で評価できる可能性がある。

今後の課題としては、周方向に接着貼付したCFRPシートの力学的な役割の明確化やその補強効果の設計への導入が挙げられる。これに向けては、周方向のCFRPシートをパラメータとした構造実験や数値解析が有効と考える。また、実橋梁の状況をふまえると、死荷重に相当する常時荷重をプレローディングした上で、CFRP補強を行い、載荷実験を行う必要もあると思われる。これについても今後の課題としたい。

謝辞： 載荷実験では、ものづくり大学・建設学科の学生諸君の多大なる協力を賜りました。ここに記して関係者各位に感謝いたします。

REFERENCES

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，1996. [Japan Road Association: *Dorokyo-shihosyo & Doukaisetsu* V Taishinsekkei-hen, 1996.]
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ 耐震設計編，1980. [Japan Road Association: *Dorokyo-shihosyo & Doukaisetsu* V Taishinsekkei-hen, 1980.]
- 3) 宮下剛，若林大，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，堀本歴，長井正嗣：高伸度弾性パテ材を用いた炭素繊維シート接着による鋼橋軸力部材の補修，土木学会論文集 A1, Vol. 71, No. 5, pp. 23-38, 2015. [Miyashita, T., Wakabayashi, D., Hidekuma, Y., Kobayashi, A., Koide, N., Horimoto, W. and Nagai, M.: Repair for axial member in steel bridge by bonding CFRP sheet through high-elongation and low elastic putty, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Vol. 71, No. 5, pp. 23-38, 2015.]
- 4) 宮下剛，長井正嗣：一軸引張を受ける多層の CFRP が積層された鋼板の応力解析，土木学会論文集 A, Vol. 66, No. 2, pp. 378-392, 2012. [Miyashita, T. and Nagai, M.: Stress analysis for steel plate with multilayered CFRP under uni-axial loading, *Doboku Gakkai Ronbunshuu A*, Vol. 66, No. 2, pp. 378-392, 2012.]
- 5) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：鋼橋桁端部腹板の腐食に対する炭素繊維シートを用いた補修・補強法の最適設計方法に関する一考察，構造工学論文集，Vol. 60A, pp. 541-553, 2014. [Okuyama, Y., Miyashita, T., Wakabayashi, D., Hidekuma, Y., Kobayashi, A., Koide, N., Horimoto, W. and Nagai, M.: A study on optimum design method of repair and reinforcement method using carbon fiber sheets for corroded web in steel girder bridge, *Journal of Structural Engineering A*, Vol. 60, pp. 541-553, 2014.]
- 6) 高速道路総合技術研究所：炭素繊維シートによる鋼構造物の補修・補強工法設計・施工マニュアル，2013. [Nippon Expressway Research Institute: *Tanso senishito niyoru kokozobutu no hosyu & hokyo sekkei & sekou manyuaru*, 2013.]
- 7) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針(案)，2018. [Japan Society of Civil Engineers: *Guidelines for Repair and Strengthening of Structures using Externally Bonded FRP*, 2018.]
- 8) Pham, N. V. and Miyashita, T.: Nonlinear stress analysis for CFRP-sheet-bonded steel plates under uniaxial tensile loading, *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 8, No. 1, pp. 127-143, 2020.
- 9) Pham, N. V., Miyashita, T., Ohgaki, K., Hidekuma, Y. and Harada, T.: Repair method and finite element analysis for corroded gusset plate connections bonded to CFRP sheets, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 147, No. 1, 04020310, 2021.
- 10) Pham, N. V., Miyashita, T., Ohgaki, K., Okuyama, Y., Hidekuma, Y. and Harada, T.: Load-carrying capacity of corroded gusset plate connection and its repair using CFRP sheets, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 147, No. 6, 04021068, 2021.
- 11) Pham, N. V., Ohgaki, K., Miki, T., Hidekuma, Y. and Sakurai, S.: Seismic retrofitting method using CFRP sheets for H-section steel beam with variable cross section, *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, Vol. 148, No. 4, 04022004, 2022.
- 12) 小林洸貴，近藤諒翼，タイ ウィサル，中村一史，松本幸大，松井孝洋，越智寛：VaRTM 成形を応用した CFRP 部材による鋼桁端部の補強に関する研究，土木学会論文集 A, Vol. 74, No. 5, pp. II_44 -II_55, 2018. [Kobayashi, K., Kondo, R., Thay, V., Nakamura, H., Matsumoto, Y., Matsui, T. and Ochi, Y.: Repair and strengthening of steel compression members using CFRP members fabricated by VaRTM technique, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers A*, Vol. 74, No. 5, pp. II_44-II_55, 2018.]
- 13) 水谷壮志，石川敏之，秀熊祐哉：CFRP スtrand シートを接着した鋼管の曲げ試験，構造工学論文集，Vol. 69A, pp. 953-962, 2023. [Mizutani, M., Ishikawa, T. and Hidekuma Y.: Bending test of steel tube bonded with CFRP strand sheet, *Journal of Structural Engineering*, Vol. 69A, pp. 953-962, 2023.]
- 14) 秀熊佑哉，宮下剛，大垣賀津雄，服部雅史，櫻井俊太，高原良太：CFRP 補強した H 形および矩形断面短柱の圧縮耐荷力に関する実験研究，鋼構造論文集，第 33 巻，第 117 号，pp. 117_27-117_41, 2023. [Hidekuma, Y., Miyashita, T., Ohgaki K., Hattori, M., Sakurai, S. and Takahara, R.: Experimental study on compressive load carrying capacity of CFRP reinforced H-shaped and rectangular-section short steel columns, *Steel Construction Engineering*, Vol. 33, No. 117, pp. 117_27-117_41, 2023.]
- 15) 大垣賀津雄，PHAM Ngoc Vinh，服部雅史，宮下剛，秀熊佑哉，櫻井俊太：CFRP シートによるトラス橋 H 形断面斜材の耐震補強に関する実験的研究，土木学会論文集，Vol. 79, No. 14, 22-14005, 2023. [Ohgaki, K., Pham, N. V., Hattori, M., Miyashita, T., Hidekuma, Y. and Sakurai, S.: Experimental study on seismic retrofitting method using CFRP sheets for truss bridge diagonal members, *Japanese Journal of JSCE*, Vol. 79, No. 14, 22-14005, 2023.]
- 16) 土木学会：座屈設計ガイドライン，鋼構造シリーズ 2，1987. [Japan Society of Civil Engineers: *Steel Structure Series 2 Guidelines for Stability Design Steel Structure*, 1987.]
- 17) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋・鋼部材編，2017. [Japan Road Association: *Dorokyo-shihosyo & Doukaisetsu* II Kokyo & Kobuzai-hen, 2017.]
- 18) 土木学会：2022 年制定 鋼・合成構造標準示方書，設計編，2022. [Japan Society of Civil Engineers: *Standard Specifications for Steel and Composite Structures*, I General Provision, II Structural Planning, III Design, 2022.]

(Received December 2, 2024)

(Accepted March 19, 2025)

MONOTONIC AND CYCLIC LOADING TESTS ON STEEL BOX SECTION LONG COLUMNS REINFORCED WITH CFRP SHEETS

Kazuyoshi IKEDA, Takeshi MIYASHITA, Kazuo OHGAKI, Masafumi HATTORI, Genta GOTO, Yuya HIDEKUMA, Shunta SAKURAI and Syll AMADOU SAKHIR

Seismic retrofitting of steel bridges typically involves the use of steel plates to strengthen the structure. This method has problems such as loss of cross-section of the base material due to bolt holes, increase in dead weight, and re-deterioration. To solve these problems, it is effective to use carbon fiber reinforced polymer (CFRP) for reinforcement, which is lightweight and does not corrode. In this study, we conducted monotonic and cyclic loading tests on long rectangular section specimens made of steel truss bridge members and verified the seismic reinforcing effect of CFRP sheets. As a result, it was confirmed that CFRP reinforcement can be expected to improve the load-carrying capacity even under cyclic loading, and that the amount of energy absorbed does not suddenly decrease even after local buckling occurs. In addition, the experimental results were on the safe side of the load-carrying curve, and it was found that it was possible to incorporate the reinforcing effect of CFRP into the design by using the existing load-carrying curve.