

CFRPで補強したH形断面長柱の 交番載荷による実験研究

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

¹正会員 ものづくり大学教授 技能工芸学部建設学科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)

E-mail: ohgaki@iot.ac.jp (Corresponding Author)

²学生会員 ものづくり大学大学院 ものづくり学研究科 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333番地)

E-mail: b02012193@iot.ac.jp

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

(研究当時, (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部)

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

⁴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

⁵正会員 名古屋工業大学特任教授 工学部 (〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: miyashita.takeshi@nitech.ac.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

日本の道路橋は建設後 50 年以上経過しているものが数多く供用されている。1996 年の道路橋示方書の以前の基準で設計された橋梁の主構造部材の多くは、耐震性能不足の状態にある。そのため、既存のトラス橋の斜材等部材の一部は大規模地震時に全体座屈や局部座屈が発生する可能性がある。従来、これらの耐震補強には高力ボルトによる当て板補強が一般的であったが、鋼材に比べて高強度、高弾性、軽量、腐食しない等の理由から CFRP を用いた補強方法が注目されている。本研究では、H 形断面のトラス橋斜材を想定した長柱供試体に CFRP シートや CFRP 成形材の貼付けを行い、圧縮と引張荷重の交番載荷実験を行った。本研究はその耐荷力やエネルギー吸収性能を明らかにするものである。

Key Words: truss bridge, seismic reinforcement, CFRP, overall buckling, local buckling

1. はじめに

日本の道路橋は高度経済成長期に数多く建設されており、建設後 50 年以上経過している橋梁が供用され続けている。また、兵庫県南部地震以降の道路橋示方書改定により¹⁾、修正震度法²⁾に代わり新たな耐震設計法が規定化された。具体的には、建設当時の修正震度法の代わりに動的応答解析を用いた断面設計が新たな耐震設計法として基準化されている。そのため、1996年の道路橋示方書¹⁾の以前の基準で設計された橋梁の主構造部材の多

くは、耐震性能不足の状態にある²⁾。特に、支間長が比較的大きいトラス橋では、桁端部付近の下弦材や支間中央部の斜材は、死荷重や活荷重等の常時荷重に対して断面の応力余裕があり、最低板厚で設計されている場合が多くある。その中でも常時荷重に対して引張荷重を受ける部材として設計された斜材は薄肉でスレンダーなH形断面である。そのため、現在の耐震設計基準で動的応答解析を行うと局部座屈や全体座屈が生じることとなり、耐震性能が不十分という判定になる。

従来、これらの部材補強には高力ボルトによる鋼板の

当て板が一般的に用いられている。この工法はボルト孔による母材の断面欠損を伴うため、孔引きによる補強量の著しい増加等の不合理がある。また、添接板が細長く大きなものとなるため、架設やボルト締結に機材や特殊技能を必要とするなど、施工上の課題がある。これらの課題を解決できる可能性がある工法として、鋼材に比べて高強度、高弾性、軽量、腐食しないという利点がある炭素繊維強化ポリマー（以下、CFRP と記す）を用いた補強工法が基準化されてきている³⁴⁾。CFRP シートによる補強工法を用いることで、母材のボルト孔による断面欠損が発生せず、また施工時に重機を必要としないため現地工事が容易である。

近年、CFRP による鋼構造物の補修・補強は、各種研究成果により適用箇所が拡大している⁵⁾¹⁰⁾。初めて本格的に適用されたのは、CFRP プレートによる鋼トラス橋の横桁補強である³⁾。研究分野では、材料の非線形性を考慮した場合の解析手法を提案しており、FEM 解析結果との比較により、その精度を検証している⁶⁾。その成果を用いて、CFRP シートによる鋼トラス橋格点部のガセットプレートの腐食部補修工法を提案し、実験および FEM 解析により、その補強効果と耐荷性能を確認した⁷⁾。また、トラス橋の矩形断面下弦材を対象に溶接部腐食に関する CFRP シート補修による座屈強度向上効果を確認している⁸⁾。さらに、CFRP シートで補強した H 形断面はりによる正負交番曲げ実験および FEM 解析を行い、CFRP シートによる耐震補強効果を確認している⁹⁾¹⁰⁾。

表-1 供試体一覧

CASE	供試体	細長比 パラメータ λ	幅厚比 パラメータ R		CFRP シート数 (鉛直/水平)		交番 載荷 回数
			腹板	フランジ	腹板	フランジ	
0	全面降伏	138	0.62	0.68	無補強		1
1	全面局部座屈	138	0.95	1.04	無補強		1
2	フランジ補強	127	0.95	0.61	-	6/6	1
3	全面補強	138	0.55	0.61	3/3	6/6	1
4	全面補強	138	0.55	0.61	3/3	6/6	3
5	CFRP 成形材*	0.95	0.64	-	2/2	6/3	1

*) CASE5 は腹板を CFRP シートで、フランジを L 形の CFRP 成形材で補強した。

トラス橋斜材等は大規模地震時に全体座屈や局部座屈する可能性があるが、このような CFRP を用いた補強工法が適用できれば、鋼板当て板による補強よりも合理的な耐震補強対策となると考えられる。著者らはこれまで、CFRP シートによるトラス橋の合理的な耐震対策方法を構築することを目的として、H 形断面斜材を想定した短柱供試体を用いて、局部座屈に関する CFRP による各種補強効果確認実験を実施した¹¹⁾¹²⁾。また、H 形断面長柱供試体を対象に、CFRP シートをフランジと腹板の全面に貼付けを行い、単調圧縮載荷実験により全体座屈と局部座屈の連成座屈強度を確認する実験を行った¹³⁾。この結果より、CFRP シートによる補強の耐荷性能や連成座屈変形挙動等を確認し、有用性を見出している。

本研究では、H 形断面長柱供試体を対象に、地震時を想定した圧縮と引張荷重を作用させる交番載荷実験を行い、CFRP による補強効果やエネルギー吸収性能を確認した。

2. 実験概要

(1) 実験供試体

実橋の約 1/3 程度の寸法の H 形断面を有する長柱実験供試体を用いて、圧縮と引張荷重を受ける交番載荷実験を行った。本実験では両端に専用のピン支承を設置して、その回転方向を定めている。実橋において耐震補強が必要な引張斜材の幅厚比パラメータと細長比パラメータを参考として、実験供試体の寸法を図-1 のように定めた。既設トラス橋の支間中央付近の引張部材として設計される斜材は、板厚が薄く幅厚比パラメータ R は CASE1 に示すように約 1.0 付近のものが多く、また、細長比パラメータ λ は約 1.3~1.4 付近のものが存在している。

CASE0 は試験体端部を除き鋼板厚 4.5mm で構成し、CASE1~5 は鋼板厚 3mm で構成している。CASE0 は道路橋示方書の局部座屈による応力の低減がない範囲の幅厚比パラメータは $R < 0.7$ であり、鋼材降伏まで局部座屈が生じにくいことから、表-1 では全面降伏と記載している。一方、CASE1 は道路橋示方書の局部座屈による応力低減がある範囲の幅厚比パラメータとしており、フランジ

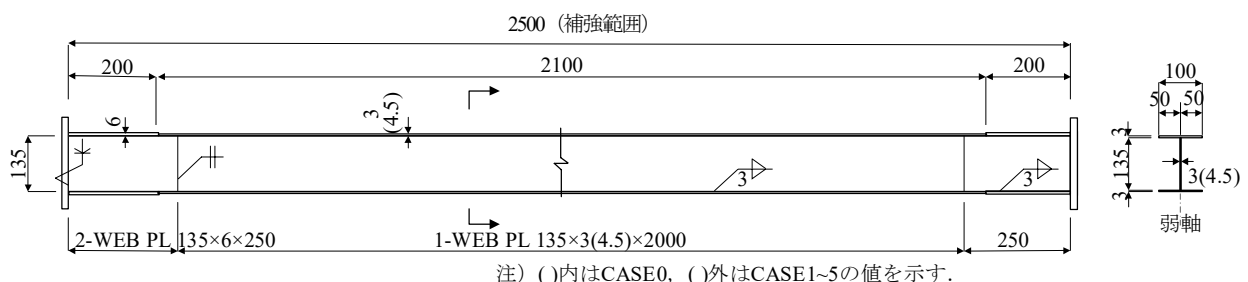


図-1 実験供試体

は $R_f=1.04$ 、および腹板は $R_w=0.95$ であり、鋼材降伏前に局部座屈が生じやすいことから、全面局部座屈と記載している。実験供試体長さは $L=2,500\text{mm}$ として、表-1に示すように、無補強における弱軸回りの細長比パラメータ λ はいずれも1.38である。

本実験において、CASE2~5はCASE1と同じ全面局部座屈供試体に対してCFRPによる補強を行っており、CFRPによるフランジ補強およびフランジと腹板の両方補強等を比較することとする。実験供試体断面のCFRPによる補強構造を図-2に示す。補強範囲は、供試体の鋼材を増厚しているエンドプレート直近までとしており、端部での破壊が生じないようにしている。

ここで、圧縮荷重を受けるH形断面短柱部材の実験結果¹¹⁾¹³⁾から、軸方向シートのみ貼付けでは局部座屈に対する補強効果が小さいことから、H形断面長柱部材の補強方法としては、鉛直方向と水平方向のCFRPシートの積層数を同じとした。また、フランジのみに貼付ける場合と、フランジと腹板の両方に貼付ける場合を、供試体パラメータとした。

補強量は道路橋示方書の局部座屈による応力低減がない範囲となるように、フランジと腹板の幅厚比パラメータがそれぞれ $R_f < 0.7$ および $R_w < 0.7$ となるように決定した。すなわち、CASE0の全面降伏供試体を目標基準として、CASE1の全面局部座屈供試体と同じ断面を補強対象とし、交番载荷でその差異を確認することとした。なお、表-1の交番载荷に記載している数値は、図-3に示すように、降伏変位 δ_y の倍数で制御して $1\delta_y$ から順次 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ と変位量を大きくしていく際の繰返し回数である。CASE3とCASE4は同じ仕様の供試体であるが、図-3に示す通り、CASE3は1回の繰返しサイクル、CASE4は3回の繰返しサイクルで载荷した。1回の繰返しサイクルを基本とすることで、補強量の差による変位のタイミングを確認しやすくすることとした。ただし、3回サイクルを行った場合に著しい耐荷力低下の影響がないことを確認しておくこととした。

さらに、図-2(b)に示すCASE5はH形断面部材の弱軸回りの断面2次モーメントを大きくして細長比パラメータを低下させるため、L形のCFRP成形材を用いた補強を行なった。

(2) 材料特性

本実験で使用した材料の諸元を表-2に示す。鋼材の鋼種はSS400である。一般的に補修施工によく使用されている高弾性CFRPシートではなく、より伸びがあり破断や座屈圧壊が生じにくい中弾性CFRPシートを用いた。中弾性CFRPシートの方が高弾性CFRPシートに比べて、弾性係数は低いものの引張強度が高いため、繰返し荷重下で発生する鋼材の弾塑性座屈に対する補強効果が期待

できる⁹⁾。

また、CFRPシートをエポキシ樹脂のみで鋼材に貼付けを行った場合、鋼材の座屈等の変形が生じた際にCFRPシートと鋼材の層間にはく離が発生しやすくなってしまい、補強効果を十分に発揮できない。そのため、補強を行ったすべての供試体に対して、鋼部材とCFRPの間にはく離抑制効果のあるポリウレアパテ（以下、パテ材と記す）を挿入した¹⁴⁾¹⁷⁾。

CFRPシートの補強後の供試体については、表-1に示す細長比や幅厚比パラメータの計算が必要となる。そのため、CFRP補強後の鋼換算板厚を t として、式(1)を用いて求めた。

$$t = t_s + C_n \times (E_c/E_s) \times t_c \times n \quad (1)$$

ここで、 t_s は鋼材の板厚、 E_s は鋼材の弾性係数、 E_c は

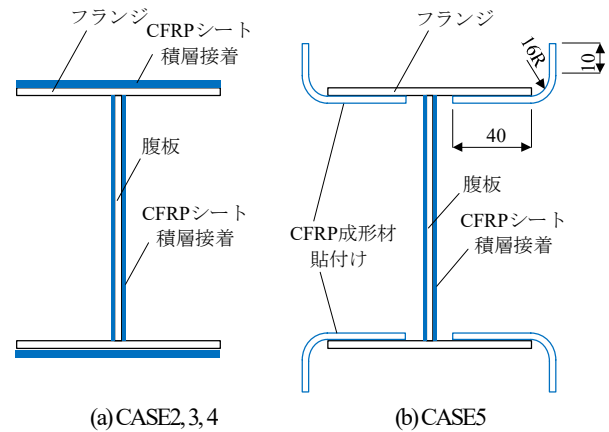


図-2 CFRP補強断面

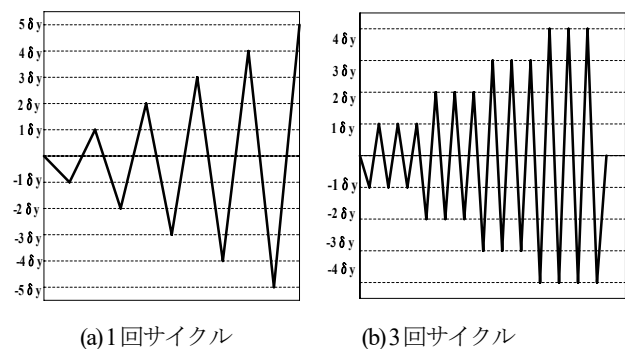


図-3 交番载荷方法

表-2 材料諸元

使用材料	鋼材(SS400)		中弾性 CFRPシート	エポキシ 樹脂	パテ材
	3mm	4.5mm			
弾性係数(N/mm ²)	2.05×10 ⁵	2.05×10 ⁵	4.27×10 ⁵	2,488	72
降伏点(N/mm ²)	327	313	-	-	-
引張強度(N/mm ²)	471	457	3,925	73	11
設計厚さ(mm)	3.2	4.5	0.165	0.5	0.8
伸び(%)	35	36	-	-	-

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⁾であり、鋼材と CFRP が弾性合成することを見込んでいる。

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 12) 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。

(3) CFRP の貼付け

本実験では、CASE 2, 3, 4 および CASE5 の腹板に、CFRP シートをハンドレイアップ法により貼付けた。供試体表面の貼付けを行う箇所の錆や汚れ等をグラインダーにより研削後、脱脂を行い樹脂の付着を良くするためのウレタンプライマーを塗布した。プライマー乾燥後パテ材の塗布を行うが、塗布量を均一にするために、使用重量を計測して、施工厚さを平均 0.8mm になるよう管理した。

CFRP シートを貼付ける際には、含浸させるエポキシ樹脂を塗布した後、CFRP シートを供試体軸方向（以下、鉛直方向と記す）に貼付け、さらに含浸樹脂の上塗りを行い、ローラーで含浸を行った。次に部材軸直角方向（以下、水平方向と記す）に CFRP シートを同様に施工する。この作業を表-1 に示した CFRP シート数まで繰返して積層接着を行った。

また、図-2(b)に示すように CASE5 は腹板に CFRP シートを貼付けている。一方、フランジは L 形の CFRP 成形材を以下の手順で事前に製作する。R 部を有する L 形の鋼板を準備し、その上に離形フィルムを載せ、上述と同様に CFRP シートを含浸樹脂により積層する。積層後に離形フィルムと鋼板を載せて万力で余分な含浸樹脂を絞り出す。硬化後に端部をカットして CFRP 成形材を製作した。最後にフランジ下面にパテ材を施工して、この CFRP 成形材をエポキシ樹脂により貼付けた。

(4) 荷重方法

荷重方法として図-4 で示すように、3,000kN 万能試験機の両端にピン支承を設置しており、その回転方向は、トラス橋斜材が全体座屈を生じやすい方向を考慮して、H 形断面の弱軸回りとしている。両端をピン支承で支持しているので、有効座屈長はその間隔である 2900mm としており、表-1 の細長比パラメータを算出している。また、圧縮荷重と引張荷重を交互に図-3 に示し

た要領で交番荷重実験を行った。

図-5 に計測位置図を示す。フランジや腹板のひずみ、および中央部の面外変位を計測している。また、供試体中央部基準長さ 1700mm 間をワイヤー式変位計により鉛直変位を計測している。エンドプレート間の寸法を基準にすると、端部付近の増厚部分でひずみが減少する影響も考える必要がある。また、全体座屈変形が部材中央部付近で生じやすいこと等を勘案して、この基準寸法は板厚を減少させている部分をほぼカバーできる寸法として決定した。降伏変位 δ_y は、以下の式より求める。

$$\delta_y = \sigma_y \times L / E \quad (2)$$

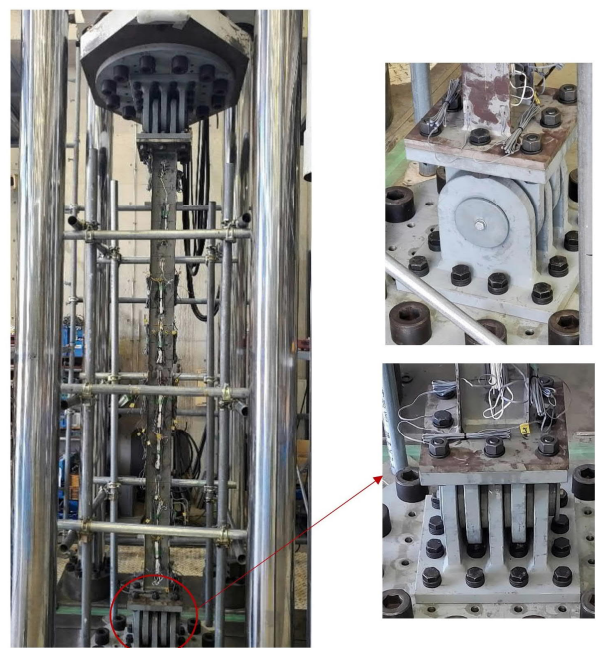
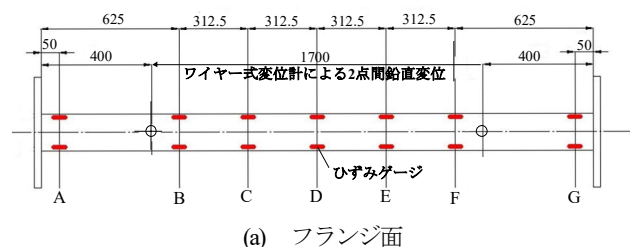
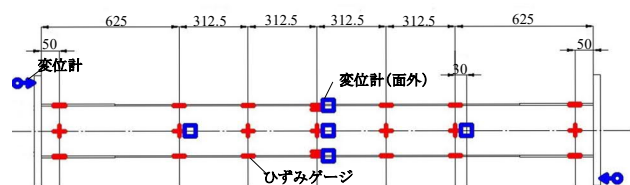


図-4 交番荷重実験状況



(a) フランジ面



(b) 腹板面

図-5 計測位置図

ここに、 σ_y ：鋼材の降伏点、 L ：対象とした供試体中央部基準長さ、 E ：鋼材の弾性係数である。

全塑性軸力 P_y は、以下の式より求める。

$$P_y = A \times \sigma_y \quad (3)$$

ここに、 A ：鋼材の断面積である。

本研究における実験実施やデータ整理は、補強前の供試体中央部の鋼部材断面に対するこれらの値を用いており、供試体の補強量に応じた変更は行っていない。交番载荷では、この降伏変位 δ_y を用いて図-3に示す通りに制御している。

3. 実験結果

(1) 荷重と変形の関係

交番载荷実験による荷重変位曲線を図-6に、圧縮側と引張側の最大荷重を表-3にまとめて示す。また、示す。同図で縦軸は荷重であり、プラスが引張、マイナスが圧縮を意味する。また横軸は供試体中央部基準長さに対する変位を断面の4隅でワイヤー式変位計を用いて計測しており、基準長さに対する降伏変位 δ_y で無次元化した値である。同図中に最大圧縮荷重 C_u と最大引張荷重 T_u の発生時点を示している。

また、表-4に交番载荷段階における破壊状況を示す。

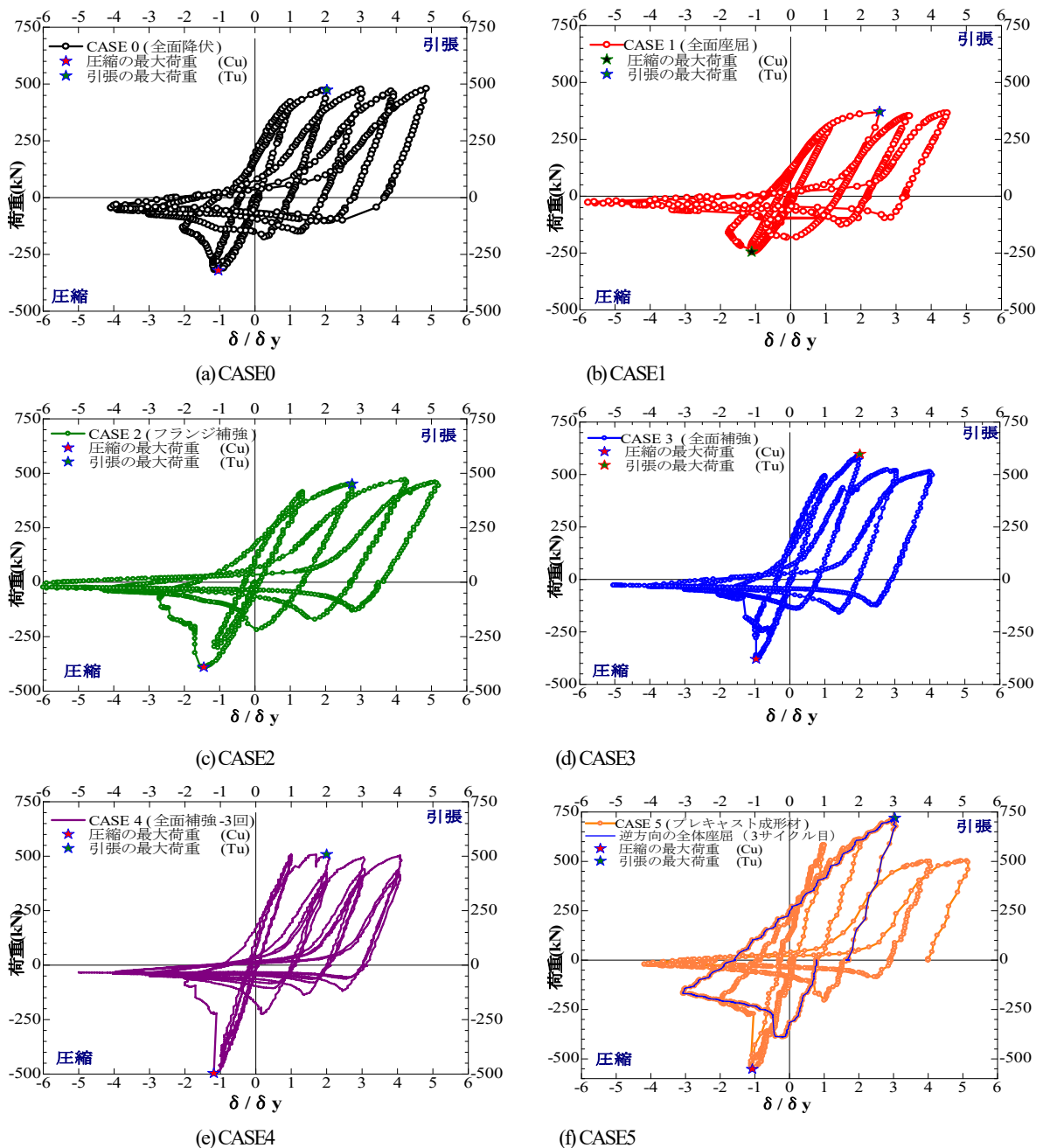


図-6 荷重と鉛直変位の関係

交番荷重は圧縮から始めており、すべての実験供試体は全体座屈先行後に最大圧縮荷重 C_u で局部座屈が発生した。表中の耐力計算値は、鋼材断面に CFRP シート補強を鋼材換算した断面に対して細長比パラメータを算出し、道路橋示方書の柱の全体座屈耐力式により算出している。実験結果における最大荷重は、この耐力計算値より 2 倍程度以上あることがわかる。これは、試験体の端部のピン支承支持しているものの、全体座屈が進行して面外変形が進行するまで、この部分の動きが十分ではなかったことが考えられる。また、この耐力計算値は多くの実験値の下限値を捉えて設定されたものである。このように差異が生じて不自然ではない。さらに、軸方向の圧縮荷重が加えられると、供試体の中央で塑性ヒンジが形成され、供試体の圧縮抵抗は徐々に減少し、供試体の横変形が増加するにつれて圧縮荷重が減少した。実験において、変位制御を行っているものの、装置の関係でマニュアル制御しているため、全体座屈や局部座屈が生じた際には、変位の急増が避けられない状況であったので、耐力低下状況は確認できている。荷重を引張に逆転後、供試体はまっすぐに戻り、無補強の CASE0, 1 の引張荷重は、鋼材の全塑性軸力 P_y まで増加した。

補強した供試体 CASE2~5 は CASE1 の P_y より大きい値まで最大荷重 T_u が上昇していることがわかる。この最大荷重を超えると塑性伸びが発生する。再び圧縮で荷重をかけると、バウシinger 効果により小さな荷重で塑性化が起り、前回の座屈からの残留横変形の影響もうけて局部座屈荷重が低下する。軸方向の変位に関して、供試体は引張荷重で塑性伸びを受けており、次の圧縮荷重で十分縮む前に供試体中央部付近に生じる局部座屈部分が塑性ヒンジとなり、圧縮抵抗荷重が減少して面外変形が拡大する。そのため、引張荷重による塑性伸びは圧縮荷重では回復しないと考えられる。供試体が引張荷重で戻されると、引張荷重は前の荷重サイクルで到達した変形を超えて供試体が引き伸ばされる。大きな引張伸び変位で、ひずみ硬化が発生し、最大引張荷重 T_u が P_y を超える

るものと考えられる。

(2) 最大荷重の比較

図-6 に示した各実験供試体の荷重変位曲線を比較するために、各荷重サイクルのピーク包絡線を図-7(a) に示した。同図(b) は $2\delta_y$ までを拡大したものである。同図から、フランジのみに CFRP シートを施工した CASE2 では、無補強の CASE0 と比較すると、最大圧縮荷重が 25% 増加することが確認できる。また、これらの場合の最大圧縮荷重がフランジの局部座屈の影響により $1\delta_y$ 付近で急激に低下している。フランジの局部座屈変形により CFRP シートの一部が破断が発生している。しかしながら、その後に引張荷重サイクルにおいて、最大荷重 T_u の低下がほとんど見られないことを確認した。この現象は、CFRP シートの破断が部分的であり、引張力に対してはフランジ全体の CFRP 接着による補強効果が失われていないことが理由であると考えられる。

また、全面補強を施工した CASE3 では、無補強の CASE0 と比べて、最大引張荷重と圧縮荷重がそれぞれ約 25% と 20% 増加することが確認できる。しかし、CASE2 と同様に、CASE3 でも座屈により $1\delta_y$ 付近で急激

表-3 実験結果一覧

CASE	耐力力 計算値 kN	最大荷重 kN		CASE0 との比		CASE1 との比		全塑性軸力 との比 P_u/P_y	
		圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張
0	-176	-320	480	1.00	1.00	1.31	1.27	0.65	0.97
1	-123	-244	377	0.76	0.80	1.00	1.00	0.70	1.08
2	-165	-399	471	1.25	0.98	1.64	1.25	1.14	1.35
3	-163	-380	598	1.20	1.25	1.56	1.59	1.09	1.71
4	-163	-496	509	1.55	1.06	2.03	1.35	1.42	1.45
5	-226	-551	720	1.72	1.50	2.26	1.91	1.57	2.05

注) 表中の耐力力計算値は、CFRP シート補強を見込んで、道路橋示方書の全体座屈耐力式により算出した。

表-4 交番荷重段階における最大荷重と破壊状況

(単位: kN)

供試体	$1\delta_y$		$2\delta_y$		$3\delta_y$		$4\delta_y$		$5\delta_y$		破壊状況
	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	圧縮	引張	
CASE0	↑	↑	-320●★	480☆	↓	→	↓	→	↓	→	全体座屈先行後に局部座屈が発生
CASE1	-244●★	↑	↓	↑☆	↓	377	↓	→	↓	→	
CASE2	↑	↑☆	-399●▲★	↑	↓	471	↓	→	↓	→	
CASE3	-380●★	↑	↓▲	↑☆	↓	598	↓	→	↓	→	
CASE4	↑	↑	-496●▲★	509☆	↓	↓	↓	→	↓	→	
CASE5	↑	↑	-551●▲★	↑☆	↓◎	720	↓	↓	↓	↓	

注) 表中、●印は全体座屈発生時を、★印は柱中央付近での局部座屈発生時を、☆印は柱中央付近での鋼材降伏発生時を、▲は CFRP の破断時を示す。また、◎印はこれまでと異なった面外方向の全体座屈発生時を示す。また、↑印は強度上昇段階を、→印は強度があまり変化がない段階を、↓印は強度低下段階を示す。

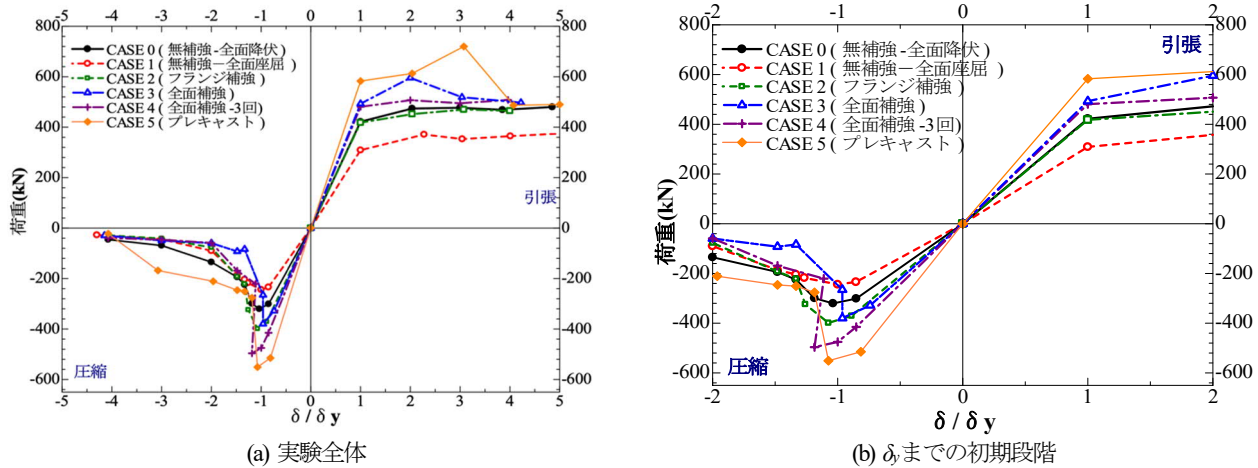


図-7 荷重と変位のピーク包絡線

に荷重が低下し、供試体の中央部でシートが破断した。

表-3から、CFRP補強したCASE2~4は補強前のCASE1に比べて、最大圧縮荷重は1.5倍以上、引張荷重は1.2倍以上になることが確認できた。全面降伏のCASE0に比べて、最大圧縮荷重は1.2倍以上、引張荷重は同程度以上になることが確認できた。

実験供試体の鋼材断面の全塑性軸力 P_y と比較した結果、無補強の供試体CASE0, CASE1の全塑性軸力との比は、引張荷重比は0.97~1.08であり、圧縮荷重比で0.65~0.70であった。CASE0は局部座屈しにくい断面であるが、圧縮荷重は全体座屈の影響を受けることが窺える。補強した供試体CASE2~4の全塑性軸力との比は、圧縮荷重で1.10以上であり、引張荷重は1.35以上に増加していることがわかる。このことから補強効果が確認できたといえる。

最後に、プレキャストCFRP成形材をフランジに貼付けたCASE5では、無補強のCASE0と比べて最大引張荷重比は1.72で、圧縮荷重比が1.50に増加することが確認できる。また、フランジの座屈変形により成形材の片方のみの破断が生じて、図-6(f)に示す通り引張荷重が $3\delta_y$ まで低下せず逆に上昇することを確認した。しかし、 $3\delta_y$ の圧縮荷重載荷時に全体座屈の変形方向が逆になり、成形材のすべてが破断し、次のサイクルの引張荷重載荷時に最大荷重 T_u の低下が生じているものの、大きな補強効果が確認できた。

(3) 荷重-ひずみの関係

交番載荷実験から得られた荷重-ひずみ関係を図-8に示す。ここでは、全面降伏を想定した供試体CASE0は比較対象から外しており、鋼材の板厚が同じ供試体についてのグラフを掲載した。また、CASE4は交番載荷を各段階で3サイクル行っているケースであり、載荷条件が異なっているので除外している。

図-5に示した各計測断面A-Gにおいて塑性ひずみゲージで計測された軸方向ひずみであり、各計測断面で平均化している。供試体のA,G断面はフランジおよび腹板とも鋼材の板厚が6mmであり、B-F断面は両者とも鋼材の板厚が3mmで構成している。そのため、図中には、A,G断面とB-F断面それぞれの弾性計算値を1点鎖線で示す。また、図中の破線は鋼材あるいは補強後の鋼換算の降伏ひずみと降伏荷重を示す。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。各CASEの左のグラフは全断面の $3\delta_y$ までの繰返し載荷のひずみを示している。また、右のグラフは、視認性を向上させるため、供試体の上端付近A断面と中央部D断面の結果を抽出したものである。

全体的な傾向として、端部付近のA,D断面では、鋼材の板厚が大きく連続的にCFRPで補強していることから、 $3\delta_y$ まで計算値と一致した弾性挙動を示している。無補強のCASE1については、荷重の繰返しに応じて、残留ひずみが大きく累積し、接線剛性も低下している。

CFRPシート補強を行ったCASE2,3については、荷重の繰返しに対して、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、補強後のひずみ計算値と実験結果は $1\delta_y$ までよく一致しており、 $1\delta_y$ 以降から徐々に非線形性が現れ、剛性低下することがわかる。

CFRP成形材で補強したCASE5については、 $1\delta_y$ において計算値より剛性が小さい結果となった。これは、CFRP成形材断面に対して40mm程度しか接着しておらず、せん断遅れの影響を受けて断面全体が合成挙動に対して有効ではないことが考えられる。

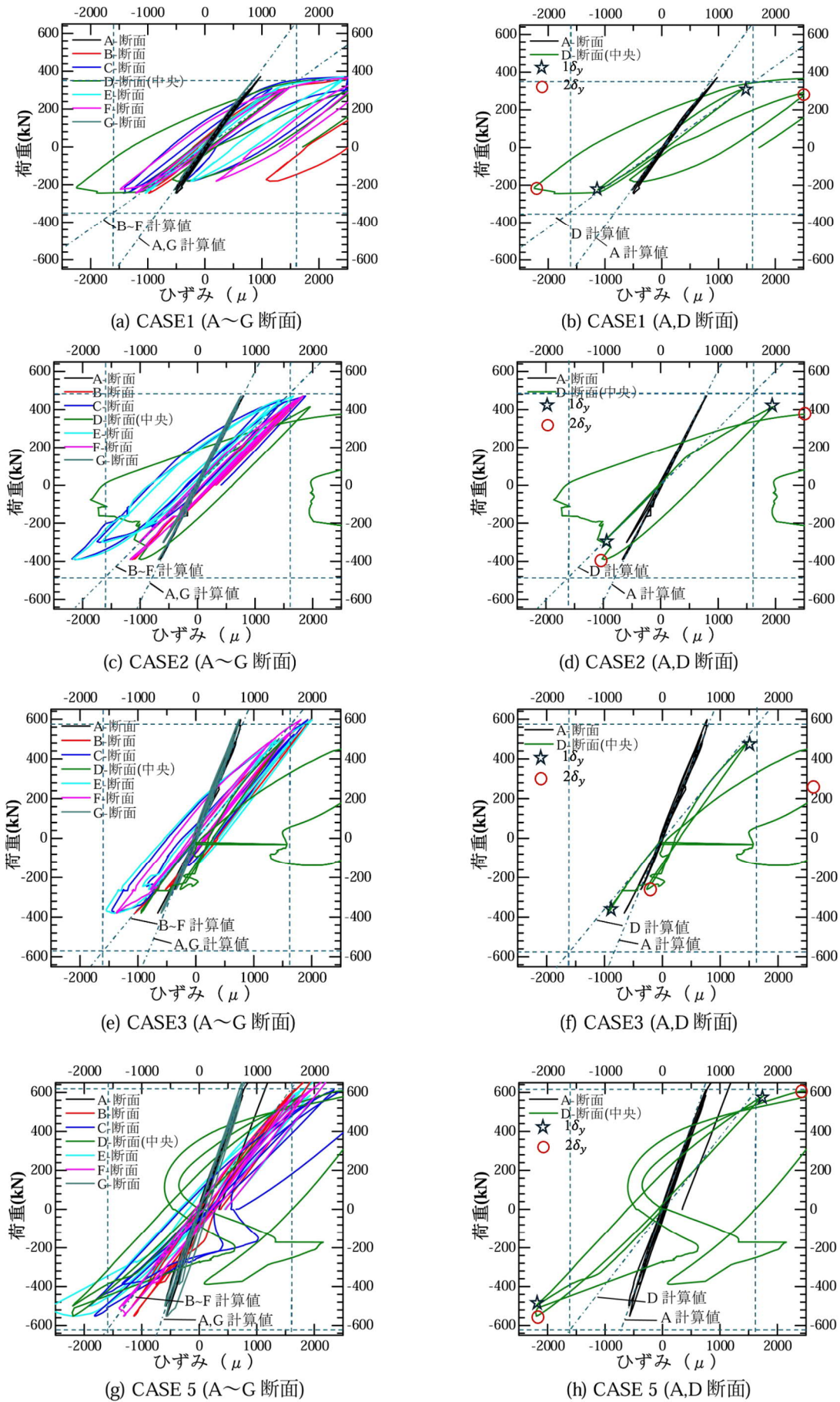


図-8 荷重-軸方向平均ひずみ関係

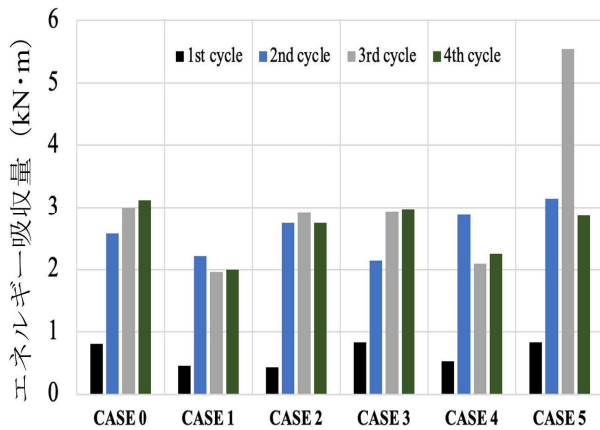


図-9 エネルギー吸収量

(4) エネルギー吸収量の比較

各実験供試体のエネルギー吸収量を図-9に、累積エネルギー吸収量を図-10に示す。ここで、各サイクルごとのエネルギー吸収量は、図-5に示した荷重変位関係のグラフにおける履歴曲線に囲まれた面積を積分して計算したものである。また、各サイクルのエネルギー吸収量を合計して累積エネルギー吸収量を求めている。ここで、CASE4は3回サイクルの繰返し载荷を行っているが、エネルギー吸収量の計算においては、各サイクル最初の履歴から算出している。同図から、補強した供試体CASE2~5はCASE1と比べ、降伏前のエネルギー吸収量に大きな差はないが、2サイクル以降のエネルギー吸収量は20%前後の増加がみられる。補強したCASE2~4でも座屈してしまうとCFRPシートが破断し、鋼材のみの断面と近くなるが、CASE2~4共に座屈が発生した後でも最大引張荷重が得られている。CASE2~4はCASE1と比べてエネルギー吸収効果が高く、CASE0と同程度まで確保できることがわかった。また、3回ずつ繰返し载荷を行ったCASE4と、1回ずつ繰返しのCASE3とを比較すると、繰返し回数の増加に伴いエネルギー吸収量はやや低下するが、CASE1よりも大きなエネルギー吸収量は確保される。このことから、繰返し回数が増加したとしても、エネルギー吸収量の急減がただちに生じるとは考えにくいといえる。

また、CASE2とCASE3のエネルギー吸収量に差が無いことから、CFRPシートによるフランジ補強のみでも、その効果が高いことが窺える。これは、圧縮耐力やエネルギーの吸収量の変化において、いずれのケースも破壊の起点が中立軸から離れた箇所であるフランジの先端であるためと考えられる。そのため、引張荷重に対してはフランジのCFRPシート補強効果の減少は見られなかったことが考えられる。

CASE5については3サイクルまでほとんど破壊が

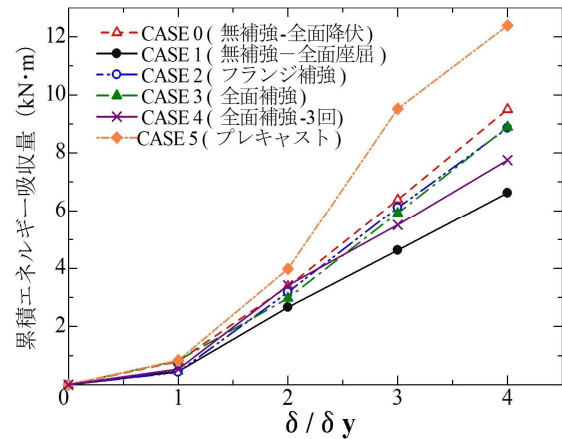


図-10 累積エネルギー吸収量

生じなかったため、圧縮側の耐力が維持され、エネルギー吸収量もCASE1の2倍程度確保できた。これは、CASE5の補強は弱軸回りの曲げ剛性を大きくすることができたためである。また、3サイクル目の圧縮载荷で生じた破壊の起点が、中立軸から離れたフランジの先端のCFRP成形材部分であるためと考える。CASE5は腹板も補強しているため厳密にはフランジ補強のみではないがフランジの成形材が腹板よりも当然補強効果が高い。このようなCASE5の結果をフランジ補強の有効性という観点で確認すると、3サイクルまで完全な破壊が生じておらずエネルギー吸収量もCASE1の2倍程度であることから、フランジ補強によって効率的に補強効果を確保できることが推察される。

(4) 破壊状況

载荷後の供試体の破壊状況を図-11に示す。すべてのケースで終局破壊モードとしては、全体座屈先行後に P - δ モーメントが大きくなり、中央部付近で局部座屈が生じている。無補強のCASE0,1供試体では、曲率内側のフランジで局部座屈が発生していることがわかる。図では分かりにくいですが、腹板の一部においても局部座屈が確認された。一方、CFRPで補強した供試体CASE2~4では、曲率内側フランジで局部座屈が発生するのは同じであり、曲率外側フランジの補強したCFRPが破断していることがわかる。この際に、腹板を補強したCFRPシートの破壊は生じておらず、局部変形の拘束効果が見られたものと考えられる。

圧縮载荷時のフランジの局部座屈変形により、同図に示すようなCFRPシートの破断が生じている。ただし、上述の通り引張荷重が低下しないことを確認しており、圧縮载荷で破壊が進行してもCFRPによる引張に対する補強効果は維持されることがわかった。これは、CFRPシートの破断箇所付近の鋼材は局部的に塑性化するもの

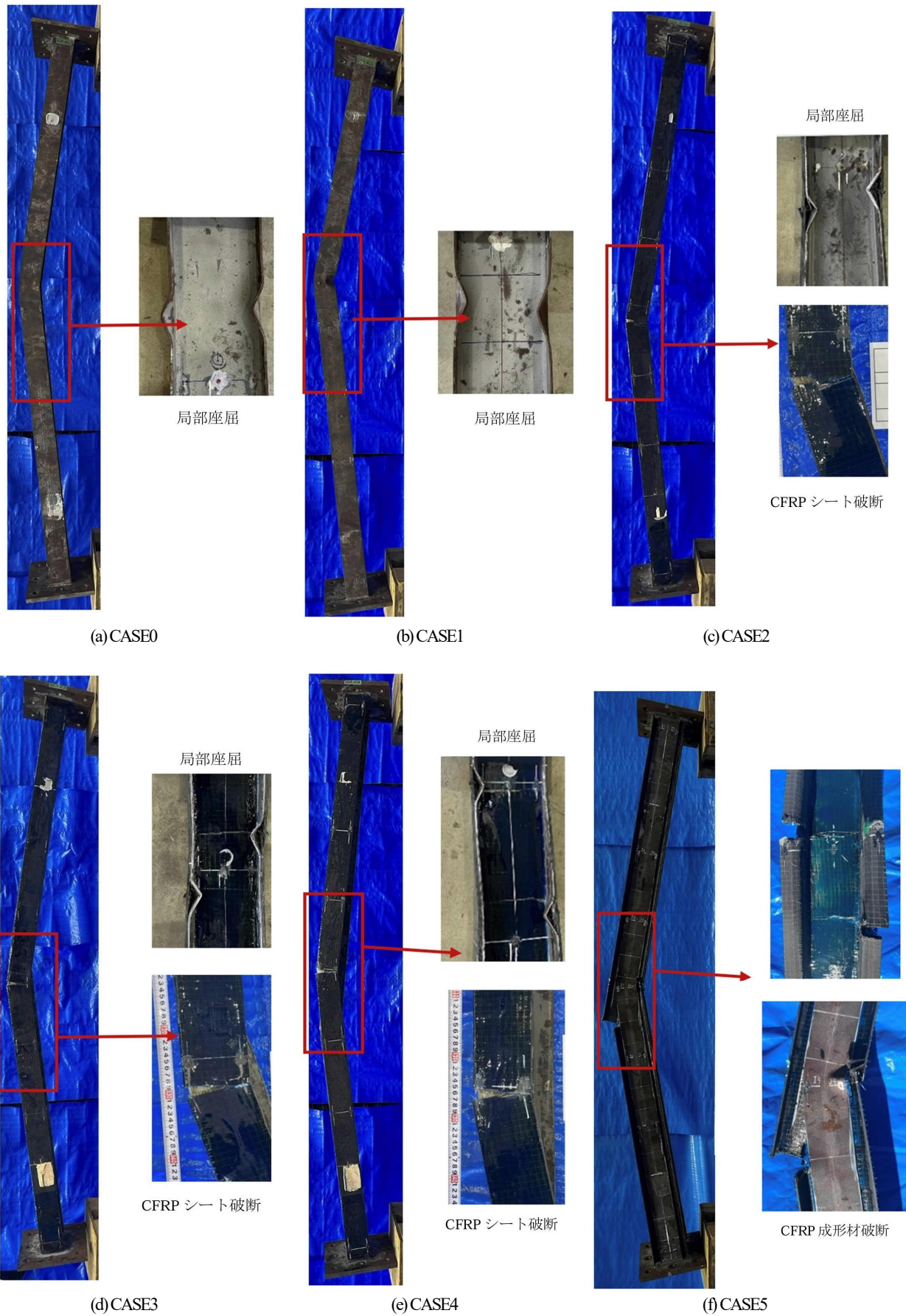


図-11 破壊状況

の、部材全体としては炭素繊維シートの補強効果が失われていることによることが考えられる。

4. まとめ

トラス橋の H 形断面斜材を対象に、CFRP による補強を行い、圧縮と引張荷重の交番載荷実験を行い、その変形挙動やエネルギー吸収量を調査した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) CFRP シート補強した CASE2~4 は補強前の CASE1 に比べて、最大圧縮荷重は 1.5 倍以上、引張荷重は 1.2 倍以上になることが確認できた。全面降伏の CASE0 に比べて、最大圧縮荷重は 1.2 倍以上、引張荷重は同程度以上になることが確認できた。
- (2) 補強した供試体 CASE2-4 の全塑性軸力 P_y との比は、圧縮荷重で 1.1 倍以上であり、引張荷重は 1.35 倍以上に増加していることがわかる。エネルギー吸収量も CASE0 と同程度確保できるとがわかった。以上のことから、トラス橋斜材の耐震補強において、フランジを CFRP シートで補強する効果が高いと考えられる
- (3) CFRP シート補強の CASE2,3 については、ひずみの計算値と実験結果は $1\delta_y$ までよく一致しており、その後徐々に非線形性が現れ、剛性低下する。
- (4) L 形の CFRP 成形材でフランジ補強した CASE5 では、弱軸回りの曲げ剛性を向上させているため、圧縮と引張荷重共に 1.5 倍以上の終局強度が得られた。また、累積エネルギー吸収量も CASE1 の 2 倍程度確保できた。本文で紹介した L 形の CFRP 成形材による補強工法は、より高い耐震性能を求める際には、有効な手段であると考えられる。
- (5) 全供試体共に全体座屈先行後に供試体中央部に局部座屈が発生した。その座屈部の曲率外側で CFRP シートが破断する。以降のサイクルの圧縮荷重に対する補強効果は無補強と同程度であるが、引張側の補強効果は維持される。

本研究では、H 形断面長柱にハンドレイアップにより CFRP シート補強すれば、局部座屈を抑えられエネルギー吸収量が向上することが示された。また、CASE5 のような L 形の CFRP 成形材を製作して適用し、その効果がさらに高くなることが確認できた。このような成形材形状については種々考えられるので、製作、施工上の観点から、より合理的な形状の検討を進めたい。

今回の実験研究では、全体座屈強度の低い弱軸回りに着目している。強軸回りの性能については、フランジ面の CFRP 補強が有効であると考えられるが、これらのデータ

も蓄積したい。また、パラメータ解析や耐震設計方法のマニュアル化については、今後検討する予定である。

謝辞：本実験およびデータ整理において、研究当時ものつくり大学学生の風見優羽氏、廣田雅人氏、長岡技術科学大学大学院生の池田一喜氏らの方々に協力いただきました。感謝致します。

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) 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. [NERI (Nippon Expressway Research Institute): *Design and Installation Manual for Upgrading of Steel Structures with the Use of Carbon Fiber Sheets*, Tokyo: NERI, 2013.]
- 4) 土木学会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），複合構造シリーズ 09，2018. [JSCE (Japan Society of Civil Engineers): *Guidelines for Repair and Strengthening of Structures Using Externally Bonded FRP*, Composite Structure Series 09, 2018.]
- 5) 坂野昌弘，鈴木博之，谷口望，石川敏之：CFRP 板で補強された下路トラス橋横桁下フランジの健全性調査，土木学会年次学術講演会，Vol. 77, I-287, 2022. [Sakano, M., Suzuki, H., Taniguchi, N. and Ishikawa, T.: Health check of floor beam flanges reinforced by CFRP plates, *Proceedings of Annual Conference of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 77, I-287, 2022.]
- 6) Pham, N. V. and Miyashita, T.: Nonlinear stress analysis for CFRP-sheet-bonded steel plates under uniaxial tensile loading, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 8(1), pp. 127-143, 2020.
- 7) 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(6), 04021068, 2021.
- 8) 秀熊佑哉，宮下剛，高森敦也，奥山雄介，大垣賀津雄，長谷俊彦，原田拓也：溶接近傍に腐食損傷を有する溶接箱型断面柱の圧縮耐荷力とその FRP 接着補修に関する研究，土木学会論文集，Vol. 79, No. 5, 2023. [Hidekuma, Y., Miyashita, T., Takamori, A., Okuyama, Y., Ohgaki, K., Nagatani, T. and Harada, T.: Compressive load carrying capacity of welded box type cross-section column with corroded damage and its FRP adhesive repair, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, No. 5, 2023.]
- 9) 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(4), 04022004, 2022.

- 10) 下前照, 大垣賀津雄, Ngoc Vinh PHAM, 酒造敏廣, 秀熊佑哉: 鋼構造板厚変化部の CFRP 補強に関する基礎的実験と解析, 土木学会, 第 8 回 FRP 複合構造・橋梁シンポジウム, 2020. [Shimomae, T., Ohgaki, K., Pham, N. V., Miki, T. and Hidekuma, Y.: Fundamental study on strengthening method using CFRP for steel members with varying thickness, *The 8th Symposium on FRP Hybrid Structures and Bridges*, pp. 151-157, 2020.]
- 11) 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, 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, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 79, No. 14, 2023.]
- 12) 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力に関する実験研究, 鋼構造論文集, 第 30 巻, 第 117 号, pp. 27-41, 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, JSSC*, Vol. 30, No. 117, pp. 27-41, 2023.]
- 13) 櫻井俊太, 大垣賀津雄, 宮下剛, 服部雅史, 後藤源太, 秀熊佑哉, PHAM Ngoc Vinh: CFRP シートで補強された連成座屈領域の H 形断面部材に対する座屈実験, 土木学会論文集, Vol. 80, No. 14, 23-14007, 2024. [Sakurai, S., Ohgaki, K., Miyashita, T., Hattori, M., Goto, G., Hidekuma, Y. and Pham, N. V.: Buckling tests on H-section members in coupled Buckling area reinforced by CFRP sheets, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 80, No. 14, 2023.]
- 14) 奥山雄介, 宮下剛, 緒方辰男, 藤野和雄, 大垣賀津雄, 秀熊佑哉, 堀本歴, 長井正嗣: 鋼桁腹板の合理的な補修・補強方法の確立に向けた FRP 接着鋼板の一軸圧縮試験, 構造工学論文集, Vol. 57A, pp. 735-746, 2011. [Okuyama, Y., Miyashita, T., Ogata, T., Fujino, K., Ohgaki, K., Hidekuma, Y., Horimoto, W. and Nagai, M.: Uniaxial compression test of steel plate bonded FRP sheet for rational repair and reinforcement of web in steel girder bridge, *Journal of Structural Engineering*, A, Vol. 57A, pp. 735-746, 2011.]
- 15) 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, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE))*, Vol. 71, Issue 5, pp. II_23-II_38, 2015.]
- 16) 若林大, 宮下剛, 奥山雄介, 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桁補修設計法の提案, 土木学会論文集 F4, Vol. 71, No. 1, pp. 44-63, 2015. [Wakabayashi, D., Miyashita, T., Okuyama, Y., Hidekuma, Y., Kobayashi, A., Koide, N., Horimoto, W. and Nagai, M.: Repair method for steel girder by bonding carbon fiber sheet using high elongation elastic putty, *Transaction of the Japan Society of Civil Engineers, Ser. F4 (Construction and Management)*, Vol. 71, Issue 1, pp. 44-63, 2015.]
- 17) 西野晶弘, 秀熊佑哉, 宮下剛, 奥山雄介, 大垣賀津雄, 小森篤也: ポリウレアパテの弾性係数の違いが CFRP 接着鋼板の応力伝達に与える影響, 土木学会第 7 回 FRP 複合構造・橋梁に関するシンポジウム, 2018. [Nishino, A., Hidekuma, Y., Miyashita, T., Okuyama, Y., Ohgaki, K. and Komori, A.: Effect of elastic modulus of poly-urea putty of CFRP bonded steel plate on stress transfer, *The 7th Symposium on FRP Hybrid Structures and Bridges*, pp. 177-183, 2018.]

(Received December 5, 2024)

(Accepted March 19, 2025)

EXPERIMENTAL STUDY ON CYCLIC LOADING OF H SHAPED STEEL SLENDER COLUMNS RETROFITTED USING CFRP

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

Adding stiffening steel plates with high strength bolts is generally used to reinforce the load-bearing capacity of steel truss bridges. However, this method causes the cross-section of the steel member to be reduced due to the bolt holes, which increases the amount of reinforcement required. A reinforcement method using carbon fiber reinforced polymer (CFRP), which is stronger, more elastic, lighter, and less corrosive than steel, has been proposed as a potential solution to these problems. If a reinforcement method using CFRP could be applied, it would be a more rational method than reinforcement using steel plates.

In this study, mainly for seismic reinforcement, CFRP sheets were attached to long column specimens that imitated the H-section diagonal members of steel truss bridges to examine the reinforcement effect through cyclic behavior under compression and tension loading tests.