

炭素繊維シート接着により補強された鋼製柱の 局部座屈強度に関する基礎研究

秀熊 佑哉¹・大垣 賀津雄²・宮下 剛³

¹正会員 日鉄ケミカル&マテリアル株式会社 コンポジット事業部 社会資本材料部
(〒103-0027 東京都中央区日本橋一丁目13番1号)
E-mail:hidekuma.3ae.yuya@nsmat.nssmc.com

²正会員 ものつくり大学 建設学科 教授 (〒361-0038 埼玉県行田市前谷333)
E-mail:ohgaki@iot.ac.jp

³正会員 長岡技術科学大学 工学部 環境社会基盤工学専攻 准教授
(〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)
E-mail:mtakeshi@vos.nagaokaut.ac.jp

現在、設計活荷重や地震荷重の改定以前の橋梁に使われている鋼部材は、耐荷力が不足しているケースが見受けられる。とりわけ地震時における鋼製柱の設計には全体座屈と局部座屈の2種類を考慮する必要があり、その補強は容易ではない。一方、炭素繊維シート接着による鋼部材の補修・補強は、腐食に対する補修検討は数多くあるが、座屈に対する補強検討は十分には行われていない。そこで本研究では、3種の幅厚比パラメータを有する鋼短柱を用い、炭素繊維シートの種類、貼り付け方向、高伸度弾性パテ材の有無をパラメータとした基礎的な一軸圧縮実験を行い、各パラメータが局部座屈強度に与える影響を検討し、耐荷力の評価法に関する基礎的な考察を行った。

Key Words: Carbon fiber reinforced polymer (CFRP), steel column, local buckling, strengthening

1. はじめに

現在の道路橋における設計基準は、車両の大型化や度重なる大地震を受け、設計活荷重や地震動の見直しなど基準の変更を行ってきた^{1,2)}。それに伴い、その都度橋梁の補強工事が行われてきたが、現在でも設計活荷重や地震荷重改定前の橋梁では、鋼部材の耐荷力が不足しているケースが見受けられる。また、鋼板巻き立てなどにより耐震補強が実施された橋梁においても、腐食により巻き立て鋼板自体が減厚するなどの再劣化が発生しているケースもある³⁾。さらに、近年、劣化した床版の大規模な取替え事業が計画されており⁴⁾、取替え後の死荷重増も想定される。このように種々の荷重改定の中で、鋼柱部材の設計には全体座屈と局部座屈の2種類を考慮する必要があり、その補強は容易ではない。このような中、鋼柱部材の座屈に対する、簡易かつ経済的な補強方法が望まれている。

そこで近年では、鋼構造物の補修・補強技術として、炭素繊維シート接着工法が注目されている。図-1に示す炭素繊維シートは軽量かつ高剛性・高強度であり、樹脂

を用いて構造物の表面に接着する。そのため、施工に重機や専用機械を使用せず、ボルト孔や溶接熱など、母材に損傷を導入することなく構造物の補強が可能である。また、炭素繊維には大きく分けて高強度型、中弾性型、高弾性型と3種類あり、用途に応じて使い分けができる。さらに、近年では図-2に示すようなストランド型の炭素繊維シートも開発され、高目付化による施工性の改善も行われている。

しかし、炭素繊維シートはその剛性の高さから、貼付け端部のはく離が懸念されており^{5,6)}、腐食に対する補修検討は数多くあるが^{7,8)}、実構造物への適用は進んでいなかった。そこで著者らは、炭素繊維シートの剥離防止として、低弾性かつ高伸度な高伸度弾性パテ材(以下、ポリウレアパテ)を、鋼と炭素繊維シートの上に挿入することで、剥離することなく補修・補強可能な工法を開発し^{9,12)}、マニュアル化した¹³⁾。それにより、近年では、炭素繊維シートによる鋼部材腐食部の補修への適用が増加しており、適用事例、設計例、および設計施工指針が提示されてきている¹⁴⁾。



図-1 炭素繊維シート

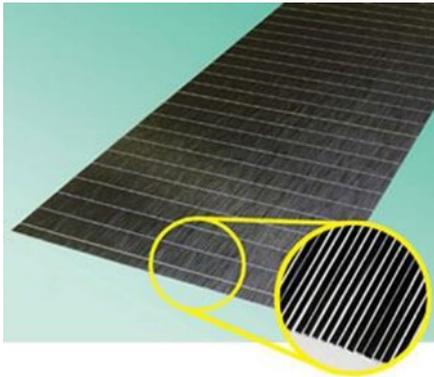


図-2 ストランド型炭素繊維シート

その一方で、座屈に対する炭素繊維シート補強の検討は、鋼製橋脚においてはいくつか研究が行われ¹⁵⁾¹⁹⁾、ガイドライン(案)が発刊されている²⁰⁾。しかし、基礎研究データ不足により、最適な炭素繊維の種類、貼付け方法などは明確に規定されていないのが実情である。そこで著者らは、炭素繊維シートによる座屈補強の一般化を目的とした基礎研究として、これまでに全体座屈する鋼長柱の炭素繊維シート補強に関する基礎検討を行ってきた²¹⁾。その結果、炭素繊維シートを剛性換算し、鋼の板厚に足し合せてオイラー座屈の式で評価することで、実験値と計算値が一致することを示してきた。

また、著者らは実構造物に多い、細長比パラメータが比較的小さく、オイラー座屈式の適用範囲を超える弾塑性座屈領域の検討も行った²²⁾。その結果、道示の耐荷力評価式にて、細長比パラメータの断面2次半径の計算の際に、補強後の板厚を、炭素繊維シートを引張剛性換算にて鋼材の板厚に足し合わせた板厚として計算することで、終局強度を安全側に評価可能であることを確認した。しかし、炭素繊維シート補強後の局部座屈強度に関する検討は十分に行われていない。

そこで本研究では、炭素繊維シート接着鋼板の局部座屈挙動を明らかにし、炭素繊維シート接着による鋼構造物の補強設計法を確立するため、3種の幅厚比パラメータを有する鋼短柱を用い、炭素繊維シートの種類、貼付け方向、剥離防止効果の確認されているポリウレアパテ²³⁾の有無をパラメータとした一軸圧縮実験を行った。ま

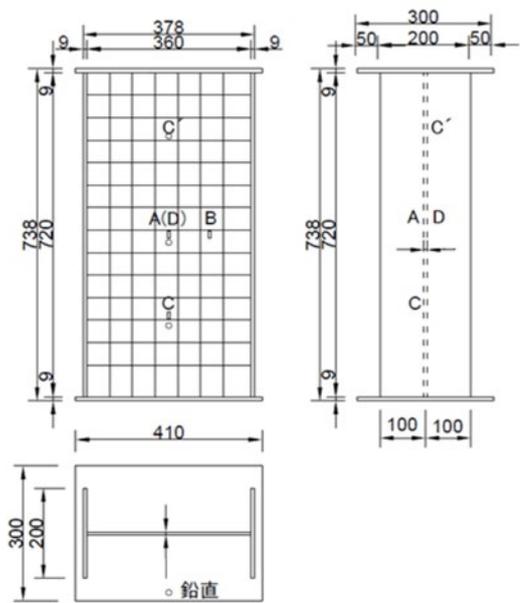


図-3 供試体図

た、補強後の耐荷力に関する基礎データを得て、最適な評価方法に関する基礎検討を行った。

2. 実験概要

(1) 供試体と材料

圧縮実験の供試体は図-3に示すようなH型断面の短柱とした。腹板の寸法は、高さ720 mm、幅360 mmで、厚さは6 mm(幅厚比パラメータ:1.22)を基本とし、比較のため、8 mm(幅厚比パラメータ:0.92)、11 mm(幅厚比パラメータ:0.65)も1体ずつ用いた。フランジはいずれのウェブ厚でも幅200 mm、厚さ9 mmとし、幅厚比パラメータは0.67($t_w=6$ mm)、0.66($t_w=8$ mm)、0.65($t_w=11$ mm)とした。

各鋼板の降伏応力は、表-1に示す通りそれぞれ297 N/mm²(6 mm)、301 N/mm²(8 mm、9 mm)、287 N/mm²(11 mm)で、炭素繊維シートの材料諸元は表-2に示す通りである。炭素繊維シートは繊維目付け300 g/m²の高弾性と中弾性の2種類と、繊維目付け600 g/m²の中弾性ストランド型シートの計3種を使用した。各接着樹脂の物性、およびシートのはく離防止で使用されるポリウレアパテの物性を表-3に示す。

また、圧縮実験のパラメータを表-4に示す。各供試体は1体で、パラメータは炭素繊維シートの種類(高弾性と中弾性、通常型とストランド型)、貼り付け方向(鉛直方向のみ、鉛直+水平方向)、ポリウレアパテの有無、フランジ補強の有無、ウェブ厚とした。

表-1 鋼材の材料諸元

鋼材質	SS400			
弾性係数 (N/mm ²)	E_s	2.00×10 ⁵		
板厚 (mm)	t_s	6	8,9	11
降伏応力 (N/mm ²)	σ_y	297	301	287

表-2 炭素繊維シートの材料諸元

シート種	高弾性シート	中弾性シート	中弾性ストランド型シート
繊維目付 (g/m ²)	300	300	600
設計厚 (mm)	0.143	0.165	0.330
施工厚 (mm)	0.656	0.678	2.346
弾性係数 (N/mm ²)	6.57×10 ⁵	4.23×10 ⁵	4.17×10 ⁵
引張強度 (N/mm ²)	2771	4102	3950
引張破断ひずみ (μ)	4218	9697	9472
圧縮破断ひずみ (μ)	2494	7198	—

※設計厚, 施工厚は1層あたりの値. 施工厚は計算値.

表-3 樹脂の材料諸元

樹脂材料	シート用 含浸・接着剤	ストランド型シート用 接着剤	ポリウレア パテ
弾性係数 (N/mm ²)	—	2716	61
引張強度 (N/mm ²)	64	—	11
圧縮強度 (N/mm ²)	—	99	—
引張せん断強度 (N/mm ²)	15.7	16.3	—
破断伸び (%)	—	—	368
硬化物比重	1.17	1.24	1.16

(2) 炭素繊維シートの積層数と施工

炭素繊維シートの積層数は、ウェブ厚 6 mm の供試体において、補強後も降伏より先に局部座屈が発生するように、式(1)および式(2)を用いて、炭素繊維シートを剛性換算して、幅厚比パラメータが 0.7 より少し大きくなる程度に補強量を決定した。その結果、高弾性シート 4 層 (R=0.75)，中弾性シート 6 層 (R=0.72)，ストランド型中弾性シート 3 層 (R=0.72) とした。

$$R = \frac{b}{t_{s+cf}} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{\pi^2 k}} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E_s}} \quad (1)$$

$$t_{s+cf} = t_s + 2 \times \frac{E_{cf}}{E_s} \times t_{cf} \times n_{cf} \quad (2)$$

ここで、

- R : 補強後の幅厚比パラメータ
- b : 鋼材の幅および炭素繊維シートの貼付け幅
- ν : 鋼材のポアソン比
- k : 座屈係数 (ウェブ : 4.0, フランジ : 0.43)
- σ_y : 鋼材の降伏応力
- E_s : 鋼材の弾性係数
- t_{s+cf} : 補強後の板厚
- t_s : 鋼材の板厚
- E_{cf} : 炭素繊維シートの弾性係数
- t_{cf} : 炭素繊維シートの 1 層当りの設計厚
- n_{cf} : 片面当りの鉛直方向の炭素繊維シートの積層数

施工は、鋼材表面をディスクサンダーにて 2 種ケレン

表-4 供試体一覧

供試体		実験パラメータ					
		ウェブ厚 t_w (mm)	炭素繊維シートの種類	貼り付け方向と積層数		ポリウレアパテ	
ケース	名称			ウェブ	フランジ		
CASE0	t6-N	6	なし	なし	なし	なし	
CASE1	t6-HM-VP		高弾性シート	鉛直 4 層	なし	あり	
CASE2	t6-HM-V					なし	
CASE3	t6-HM-VH			鉛直 4 層 水平 4 層		なし	
CASE4	t6-HM-VHP					あり	
CASE5	t6-MM-VH		中弾性シート	鉛直 6 層 水平 6 層	なし	なし	
CASE6	t6-MM-VHP					鉛直 6 層	なし
CASE7	t6-MM-VHFP						なし
CASE8	t6-MMS-VHP		中弾性ストランド型シート	鉛直 3 層 水平 3 層	なし	あり	
CASE9	t8-MM-VHP		中弾性シート	鉛直 6 層 水平 6 層		なし	
CASE10	t11-MM-VHP	なし					

表-5 圧縮実験結果一覧

供試体		全塑性軸力	ウェブ座屈荷重	終局荷重	比率(%)	
ケース	名称	① (kN)	② (kN)	③ (kN)	②/①	③/①
CASE0	t6-N	1710	959	1497	56	88
CASE1	t6-HM-VP		1379	1593	81	93
CASE2	t6-HM-V		1398	1705	82	100
CASE3	t6-HM-VH		1360	1816	80	106
CASE4	t6-HM-VHP		1080	1638	63	96
CASE5	t6-MM-VH		1458	2187	85	128
CASE6	t6-MM-VHP		1260	1858	74	109
CASE7	t6-MM-VHFP		1501	2317	88	135
CASE8	t6-MMS-VHP	2537	2568	148	150	
CASE9	t8-MM-VHP	1950	1350	2394	69	123
CASE10	t11-MM-VHP	2170	2698	2807	124	129

相当の表面処理を行った後、ポリウレアパテ有りの供試体では、ウレタンプライマーを塗布後、ポリウレアパテを塗布量 1.0 kg/m^2 (塗布厚 0.8 mm) となる様に塗布した。その後、含浸・接着用のエポキシ樹脂を1層当たり塗布量 0.6 kg/m^2 にて、所定の層数の炭素繊維シートを接着した。ストランド型の場合は、1層当たり塗布量 2.5 kg/m^2 にて所定の層数を接着した。鉛直方向と水平方向の両方に貼り付ける場合は、鉛直と水平が交互になるように貼り付けた(再外層は水平方向)。ポリウレアパテ無しの供試体では、ケレン後にエポキシプライマーを塗布した後、炭素繊維シートをエポキシ樹脂にて積層接着している。試験までの養生期間は1週間以上とした。

(3) 実験方法

各実験供試体は初期たわみを計測した後、炭素繊維シート施工する。実験は単調荷重にて座屈により荷重が低下するまで荷重を実施した。計測項目は、荷重、鉛直変位、供試体中央両面の水平変位および図-3 に示す A~D 点の鉛直方向および水平方向のひずみとした。

支持条件は、下端部はベタ置きのため固定支持、上端部はユニバーサル支承で面載荷している。載荷状況を図-4 に示す。



図-4 試験状況

3. 結果と考察

(1) 終局荷重と座屈モード

a) 終局荷重

表-5にウェブの座屈荷重、終局(最大)荷重、およびそれぞれの全塑性軸力の計算値に対する割合を示す。ウェブの局部座屈判定方法は次項に示す。また、図-5にすべてのケースの鉛直荷重と鉛直変位の関係を示す。すべての供試体において無補強と比較しウェブの座屈荷重お

よび終局荷重が向上した。また、CASE8とCASE10を除くすべての供試体において、ウェブの局部座屈が先行し、その後、フランジの局部座屈を伴いながら終局となった。CASE8とCASE10では、全塑性荷重を超えて降伏先行後にウェブの局部座屈、フランジの局部座屈はほぼ同じ荷重レベルで発生した。

ウェブ 6 mm 厚の供試体において、鉛直方向シートの剛性換算にてウェブの局部座屈先行となるように積層数を決定したが、CASE8では、降伏先行となった。CASE8のみストランド型炭素繊維シートで補強したが、施工厚が他の供試体よりも分厚くなるため、厚さの影響により面外曲げ剛性が上昇して、座屈荷重が向上したものと推察する。

b) ウェブの座屈判定

表-5に示したウェブの局部座屈の判定は、図-6に代表としてCASE0とCASE6の荷重とひずみの関係を示す通り、供試体中央の表裏のひずみゲージ(AとD)の鉛直

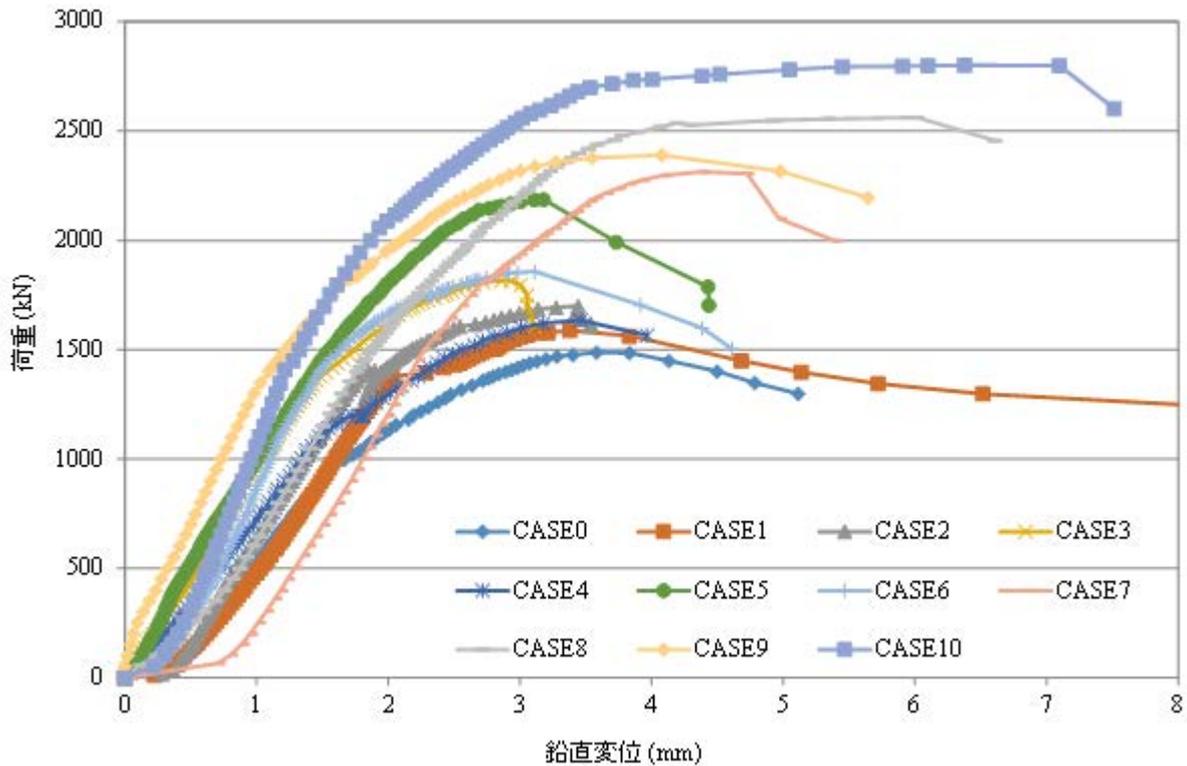


図5 荷重と鉛直変位の関係

方向の値が急激に変化した点を座屈荷重として評価している。

c) 座屈モード

無補強および、炭素繊維補強した供試体の実験後の様子を図-7に示す。無補強では、供試体の中央でウェブの局部座屈が発生するのに対し、補強後の供試体では、中央や端部付近など供試体によって局部座屈が発生する箇所にはばらつきがあった。

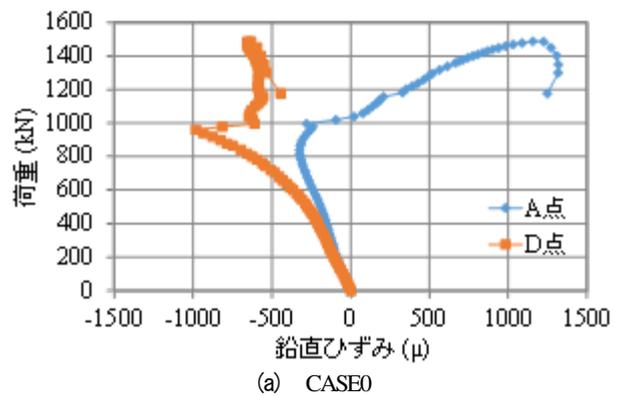
フランジの局部座屈箇所は、すべての供試体でウェブの座屈変形が大きい箇所と一致しており、ウェブがへこんでいる側に閉じ、ウェブが膨らんでいる側に開くようにねじれて座屈が発生した。また、ウェブのへこんだ側（圧縮側）では炭素繊維シート自体の繊維座屈破壊も観察された。

(2) 各パラメータの影響

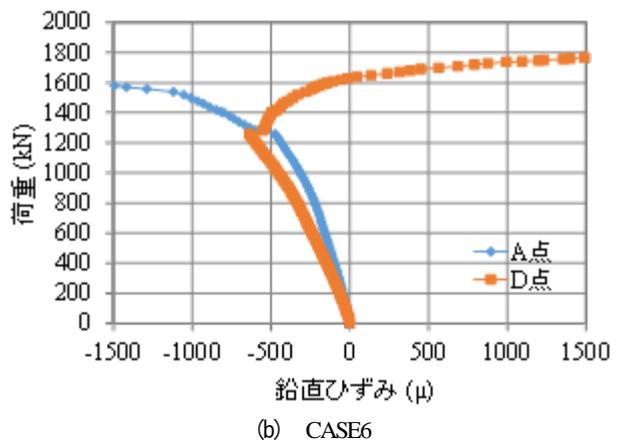
各パラメータの座屈挙動に及ぼす影響に関する考察を以下に述べる。

a) 繊維方向の影響

繊維方向が、鉛直方向のみと、鉛直方向+水平方向と異なり、他の条件が同じである CASE1 と CASE4, CASE2 と CASE3 をそれぞれ比較する。ウェブの座屈荷重を比較すると鉛直のみの方が高いが、終局荷重をみると若干ではあるが鉛直方向+水平方向の方が高く、ウェブの局部座屈に水平方向のシートは寄与していない結果となった。



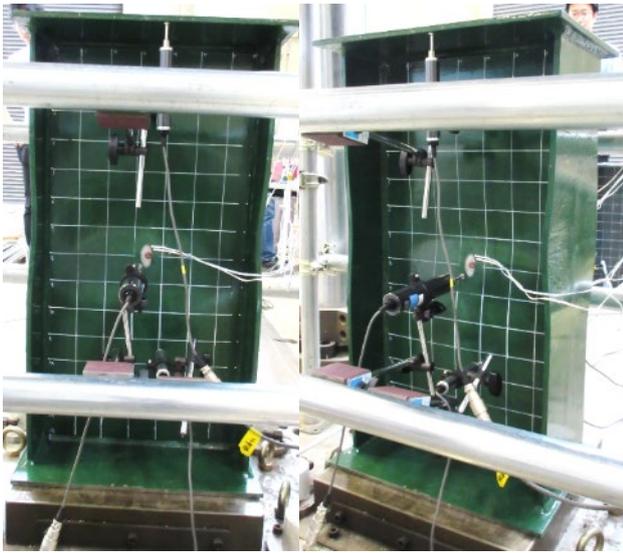
(a) CASE0



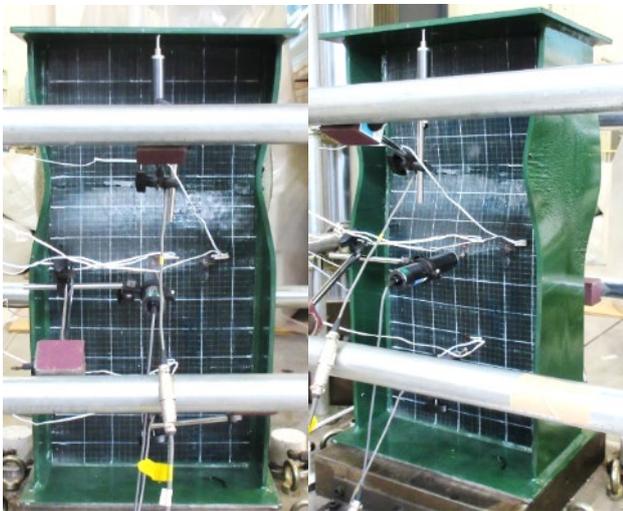
(b) CASE6

図6 荷重とひずみの関係

水平方向のシートの効果を見るために図-8にそれぞれの荷重と水平方向のひずみの関係を示す。同図より、水平方向の有無によりウェブの座屈強度に差はないものの、



(a) 無補強供試体 (正面, 斜め)



(b) シート補強供試体 (正面, 斜め)

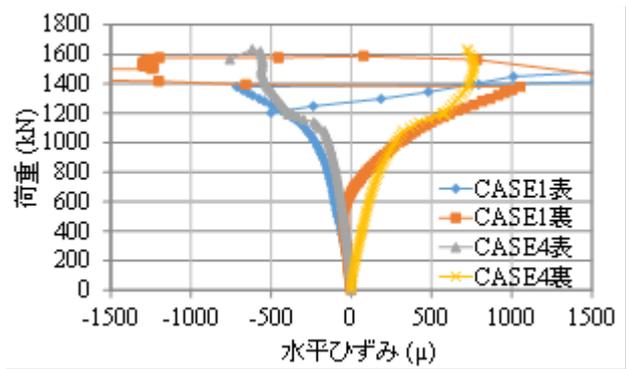
図-7 終局状況

座屈発生後のひずみ増加を抑制していることがわかる。これによりウェブの座屈強度に差はない(または小さい)ものの終局荷重が大きくなったものと考えられる。

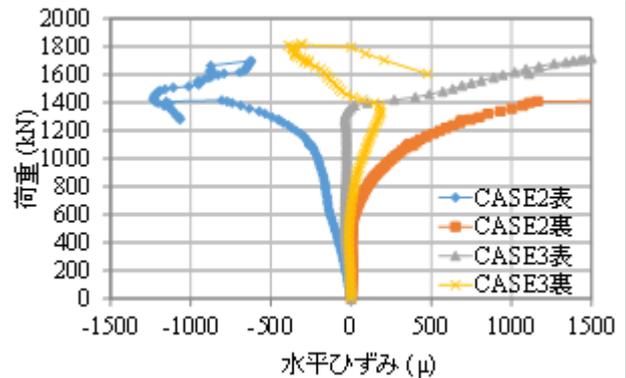
水平方向のシートは鉛直方向力を負担しないが、ウェブの座屈発生後に効果を発揮して終局耐力を向上させることができるため、本研究では水平方向にもシートを配置することを推奨する。ただし、水平方向に配置するシートの適切な層数については今後の課題である。

b) 繊維種の影響

繊維種以外が同条件の供試体である CASE3 と CASE5, CASE4 と CASE6 をそれぞれ比較すると、中弾性繊維を使用した供試体の方が、ウェブの座屈荷重で 7~17%, 終局荷重で 13~20%程度高い結果となった。文献 22 では全体座屈に対しても高弾性よりも中弾性の方が高い補強効果となっており、その違いは強度(特に圧縮強度)であるとされており、局部座屈においても、座屈時に圧



(a) CASE1 と CASE4



(b) CASE2 と CASE3

図-8 荷重と垂直ひずみの関係

縮側で繊維破壊が発生するため、繊維強度の高い中弾性の方が座屈荷重が高い結果となったと考えられる。

鋼構造物の場合、剛性換算にて設計することが多く、高弾性の方が使用されることが一般的¹⁹⁾であるが、本研究のような座屈補強の場合は、強度の高い中弾性の使用を推奨する。炭素繊維シートにはより強度の高い高強度タイプもあるが、剛性が低く積層数が多くなり、現場での施工性が悪いことから本研究で適用していない。

c) ポリウレアパテの影響

ポリウレアパテ以外が同条件の供試体である CASE1 と CASE2, CASE3 と CASE4, CASE5 と CASE6 をそれぞれ比較すると、ポリウレアパテがある供試体の方が、ウェブの座屈荷重で 1~21%, 終局荷重で 7~15%程度低い強度値となっている。ポリウレアパテは、はく離抑制効果を期待して使用されるが、今回のケースでは、ポリウレアパテがない場合においても、最大荷重に至るまで炭素繊維のはく離が起こらなかったため、低弾性のポリウレアパテによる荷重伝達ロス分、補強効果が小さくなったと考えられる。

しかし、図-5の荷重と鉛直変位の関係において、終局後の荷重の低下に着目すると、ポリウレアパテのない CASE2, CASE3, CASE5 では、3 mm 程度の鉛直変位の段階でポリウレアパテ有りの他の供試体よりも急激に荷重が低下していることがわかる。これは最大荷重後の繊維座屈に伴いシートはく離が発生したためと考えられる。

炭素繊維の補強量が増えるとはく離が懸念されることや、最大荷重後の靱性に注目すると、ポリウレアパテの効果が期待されるため、耐震性など局部座屈補強の観点から、ポリウレアパテの使用を推奨する。

d) フランジ補強の影響

ウェブのみではなく、フランジにもウェブの鉛直方向シートと同数貼り付けた CASE7 を、同条件でウェブのみを補強した CASE6 と比較する。フランジ補強をすることで、ウェブの座屈荷重で比較すると 19%、終局荷重で比較すると 25%も強度が向上した。これは図-7 の終局状況からもわかるように、ウェブの座屈はフランジのねじれを伴って発生するため、フランジの剛性を上げることでウェブの座屈荷重も向上したものと考えられる。

図-9 に CASE6 と CASE7 の荷重と中央の鉛直ひずみの関係を示すが、フランジ側にもシートを貼り付けることで座屈荷重近くでのウェブのひずみの増加を抑制できていることがわかる。

H 型断面の場合や補剛板のついた板の場合、ウェブのみではなくフランジや補剛板も補強し、剛性を上げることで座屈耐力をさらに上げることが可能であると考えら

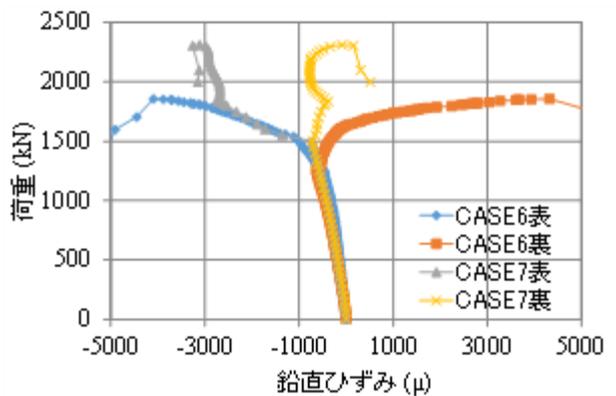


図-9 荷重と垂直ひずみの関係

れる。そのため、フランジや補剛板も合わせて補強することが有効であるといえる。

4. ウェブの耐荷力評価

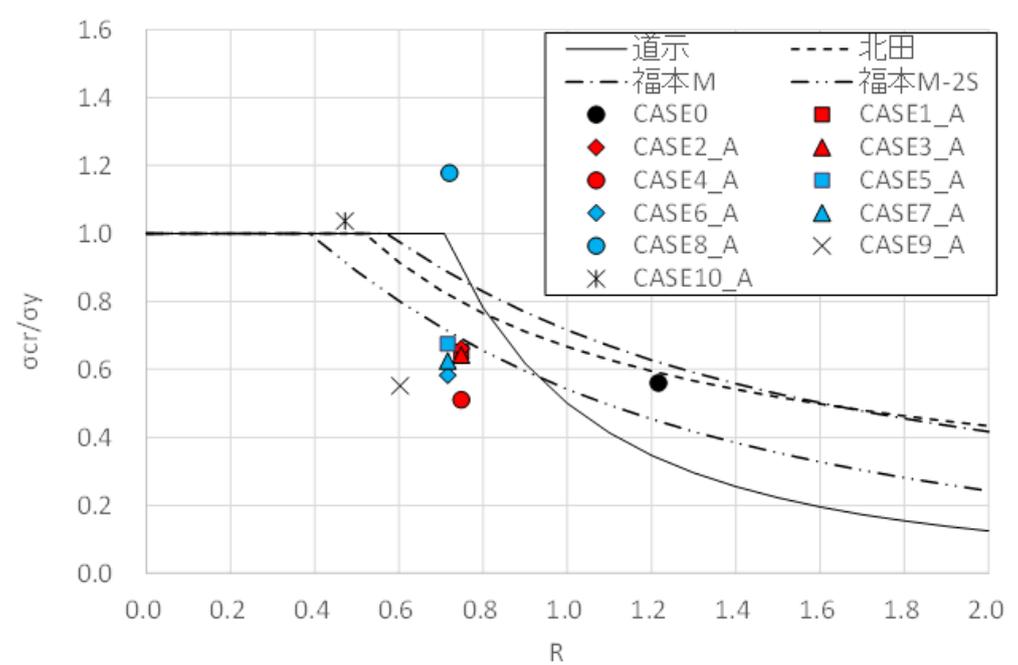
ウェブのみに着目し、耐荷力を幅厚比パラメータに炭素繊維剛性分を考慮することで評価することを試みる。炭素繊維の補強効果は式(2)のように剛性換算で鋼材の板厚にシートの剛性を考慮して幅厚比パラメータを計算する。また、式(1)の補強後の板厚を使用して断面積を計算した炭素繊維による断面増加を鋼材の降伏にも考慮する場合と、しない場合の 2 パターンについて計算し比較する。

考慮する場合の耐荷力計算値を P_{calA} 、考慮しない場合を P_{calB} として表-6 に耐荷力の実験値と計算値を比較した。ここで、実験より得られたウェブの座屈荷重は、ウェブとフランジの面積比を考慮してウェブのみが負担する荷重に補正している。また、実験結果を耐荷力曲線にプロットしたものを図-10 に示す^{24,25)}。 P_{calA} では、CASE8 と CASE10 以外は危険側に評価されているのに対し、 P_{calB} では概ね安全側に評価されていることがわかる。これは、本供試体のような補強対象範囲と炭素繊維シートの貼付け範囲が等しく、定着長が確保できない場合は、鋼材の降伏を向上させるまで炭素繊維シートが寄与しないためであると考えられる。

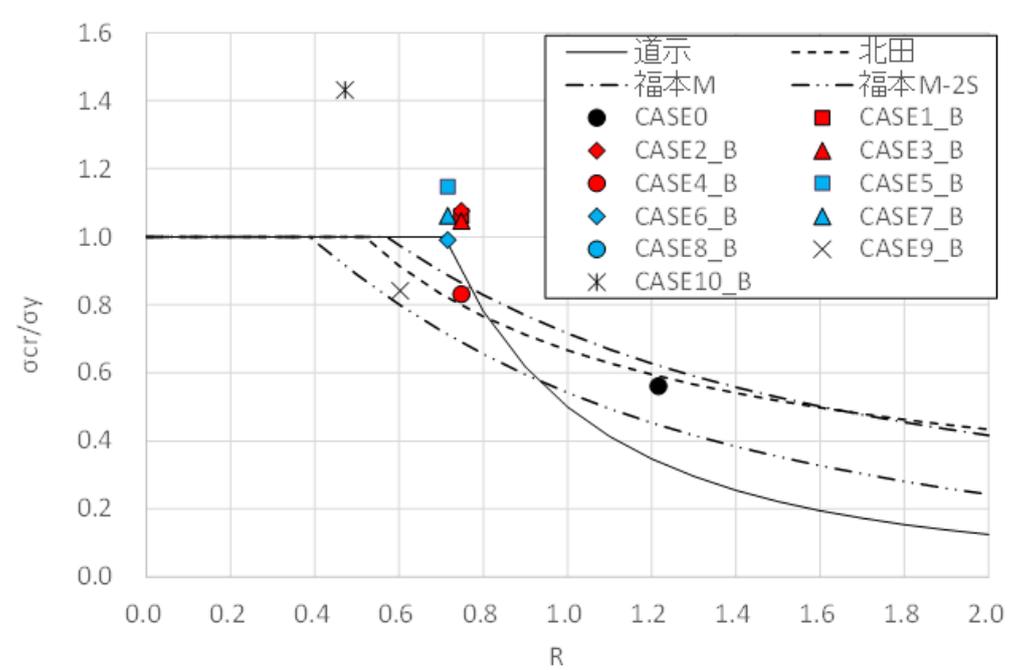
したがって、本研究では、炭素繊維シートによる断面増加の寄与は幅厚比パラメータのみに考慮し、降伏には考慮せずに評価することを推奨する。

表-6 ウェブ耐荷力の実験値と計算値

供試体		幅厚比 パラメータ R	耐荷力 実験値 kN			耐荷力 計算値 kN			
ケース	名称		P_{crw} (補正值)	P_{crw}/P_{yA}	P_{crw}/P_{yB}	P_{calA}	実験/計算	P_{calB}	実験/計算
CASE0	t6-N	1.216	360	0.56	0.56	217	1.66	217	1.66
CASE1	t6-HM-VP	0.748	681	0.65	1.06	933	0.73	574	1.19
CASE2	t6-HM-V		691	0.66	1.08		0.74		1.20
CASE3	t6-HM-VH		671	0.64	1.05		0.72		1.17
CASE4	t6-HM-VHP		533	0.51	0.83		0.57		0.93
CASE5	t6-MM-VH	0.716	736	0.68	1.15	1062	0.69	626	1.18
CASE6	t6-MM-VHP		636	0.58	0.99		0.60		1.02
CASE7	t6-MM-VHFP		681	0.63	1.06		0.64		1.09
CASE8	t6-MMS-VHP	0.720	1276	1.18	1.99	1045	1.22	619	2.06
CASE9	t8-MM-VHP	0.603	730	0.55	0.84	1321	0.55	867	0.84
CASE10	t11-MM-VHP	0.472	1627	1.04	1.43	1569	1.04	1137	1.43



(a) Rと降伏に炭素繊維の断面増加を考慮



(b) Rのみに炭素繊維の断面増加を考慮

図-10 ウェブの耐荷力曲線と実験値

5. まとめ

炭素繊維シート接着鋼板の局部座屈挙動を明らかにするため、3種の幅厚比パラメータを有するH型の鋼短柱を用い、炭素繊維シートの種類、貼付け方向、ポリウレアパテの有無をパラメータとした一軸圧縮実験を行った。得られた知見を以下に示す。

① 無補強と比較し、炭素繊維シートを貼り付けたすべての供試体において、ウェブの座屈荷重および終局

荷重が向上した。

② 水平方向のシートは鉛直方向力を負担しないが、ウェブの座屈発生後に効果を発揮して終局耐力を向上させることができるため、水平方向にもシートを配置することが望ましい。ただし、水平方向に配置するシートの適切な層数については今後の課題である。

③ 同じ剛性の補強量でも高弾性よりも、強度の高い中弾性の方が補強効果が高かった。座屈補強の場合は強度の高い中弾性の使用が望ましい。

- ④ ポリウレアパテは本研究の実験では耐荷力において優位性は見られなかったが、最大荷重後の急激な荷重低下を防ぐことができるため、耐荷性や靱性に着目すると、ポリウレアパテの使用が望ましい。
- ⑤ H型断面の場合、ウェブのみではなくフランジや補剛板も補強し、剛性を上げることで座屈耐力をさらに上げることが可能である。
- ⑥ 炭素繊維シートによる断面増加の寄与は幅厚比パラメータのみに考慮し、降伏には考慮せずに設計することで耐荷力を安全側に評価することができる。

謝辞：本研究に際して、当時ものつくり大学大学院の菊池新平君他研究室各位に実験の実施とデータ整理でお世話になりました。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，1994.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，1996.
- 3) 土木研究所 平成21年 重点プロジェクト研究成果報告書：戦-44. 補修・補強効果の長期持続性・耐久性に関する研究，2009.
- 4) 松坂 敏博，森山 陽一，小笹 浩司，太田 秀樹，藤野 陽三，宮川 豊章，西村 和夫：高速道路の構造物における大規模更新および大規模修繕の導入と課題，土木学会論文集 F4，Vol.73，No.1，pp.1-18，2017.
- 5) 杉浦江，小林朗，大垣賀津雄，稲葉尚文，富田芳男，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の補修における炭素繊維シート接着方法に関する解析的研究，土木学会論文集 A，Vol.64，No.4，pp.806-813，2008.
- 6) 杉浦江，小林朗，稲葉尚文，本間淳史，大垣賀津雄，長井正嗣：鋼部材腐食損傷部の炭素繊維シート接着による補修技術に関する設計・施工法の提案，土木学会論文集 F，Vol.65，No.1，pp.106-118，2009.
- 7) 大倉一郎，福井唯夫，中村圭吾，松上泰三：炭素繊維シートによる鋼板応力の低下とはく離せん断応力，土木学会論文集，No.689/I-57，pp.239-249，2001.
- 8) 石川敏之，大倉一郎，西田貴裕，横田季彦，齋藤 誠：CFRP 板付着端近傍への低弾性接着剤の使用によるはく離せん断応力の低減，土木学会構造工学論文集，Vol.54A，pp.842-849，2008.
- 9) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，秀熊佑哉，堀本歴，長井正嗣：腹板を CFRP 補強した鋼桁のせん断座屈試験と強度評価法，土木学会論文集 A1，Vol.68，No.3，pp.635-654，2012.
- 10) 奥山雄介，宮下剛，若林大，小出宜央，小林朗，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 CFRP を用いた補修工法の実験的研究，土木学会構造工学論文集，Vol.58A，pp.710-720，2012.
- 11) 奥山雄介，宮下剛，若林大，秀熊佑哉，小林朗，小出宜央，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，土木学会構造工学論文集，Vol.60A，2014.
- 12) 若林大，宮下剛，奥山雄介，秀熊佑哉，小林明，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. 1，44-63，2015.
- 13) 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.
- 14) 土木学会 複合構造委員会：FRP 接着による構造物の補修・補強指針（案），2018.
- 15) 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田 崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強法に関する実験的研究，土木学会論文集，No. 766/I-68，pp.17-31，2004.
- 16) 渡辺貴之，石田圭吾，林和彦，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol. 48A，pp. 725-734，2002.
- 17) 小野紘一，杉浦邦征，三木亮二，小牧秀之，若原直樹：炭素繊維シート巻き立てによる損傷鋼管の補修効果に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第10巻，pp.225-230，2002.
- 18) 西野孝仁，古川哲也：円形鋼管柱材の局部座屈形成に対する炭素繊維シートの補剛効果，構造工学論文集，Vol. 49B，pp.489-496，2003.
- 19) 西野孝仁，古川哲也，三谷勲：炭素繊維で補剛された鋼製圧縮材の座屈挙動と接着応力，土木学会第56回年次学術講演会，I-B222，2001.
- 20) 土木研究センター：炭素繊維シートによる鋼製橋脚の補強工法ガイドライン（案），2002.
- 21) 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.
- 22) 秀熊佑哉，大垣賀津雄，菊池新平，宮下剛，奥山雄介：炭素繊維シート接着により補強された鋼製柱の耐荷力評価法に関する実験研究，構造工学論文集，Vol.65A，pp.769-778，2019.
- 23) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋・鋼部材編，2017.
- 24) 土木学会：座屈設計ガイドライン，2005
- 25) 北田俊行，中井博，越智内士：高張力鋼を用いた圧縮板・圧縮補剛板の終局強度に関する研究，構造工学論文集，Vol.46A，pp.179-190，2000.

(Received August 28, 2020)

LOCAL BUCKLING BEHAVIOR OF STEEL COLUMN STRENGTHENED WITH CARBON FIBER SHEET

Yuya HIDEKUMA, Kazuo OHGAKI, Takeshi MIYASHITA

At present, there are cases in which the steel members used in bridges constructed before the revision of design live loads and seismic loads have insufficient load bearing capacity. In particular, it is necessary to consider both overall buckling and local buckling in the design of steel columns, and it is not easy to strengthen them. On the other hand, in repairing steel members by bonding carbon fiber sheets, there are many studies on corrosion, but strengthening studies on buckling have not been sufficiently conducted. Therefore, in this study, uniaxial compression tests were conducted using steel short columns with three types of width-thickness ratio parameters, with parameters such as the type of carbon fiber, the direction of carbon fiber, and the presence or absence of poly-urea putty. Considering the effect of each parameter on the local buckling strength, a basic study on the evaluation method of load bearing capacity was performed.