

炭素繊維シート接着の方向が圧縮鋼板の座屈特性に及ぼす影響について

首都大学東京 学生会員 ○中村 俊太 首都大学東京 正会員 中村 一史
東レ 正会員 松井 孝洋

1. はじめに

現在、既設鋼製橋脚の耐震補強方法としてコンクリート充填工法が多く用いられている。しかし、同工法ではいくつかの問題が指摘されている。例えば、強度が過度に増大し基部へ負担がかかること、死荷重の増大により固有振動数が変化することなどがあげられる。一方、炭素繊維シート（以下、CFシートとよぶ）は高強度で直交異方性の特性を持つため、層数や方向の組み合わせにより強度や靱性が調整できると考えられている。さらに、軽量であるため施工性に優れている。橋脚の耐震問題では水平繰返し荷重に伴って生じる内圧によって、象の脚型座屈が発生すると、耐荷力が著しく低下する。これまでの研究では、CFシートの繊維方向を橋脚軸方向に接着することで強度の増大が、橋脚水平方向に接着することで靱性の向上が期待できることが示されている。しかし、繊維方向を任意の角度に接着した場合については十分な検討が行われていない。そこで、本研究では圧縮力を受ける鋼板を簡便にモデル化し、CFシートの接着方向および層数が座屈特性に及ぼす影響を解析的に検討した。

2. 解析方法とモデル化

2.1 解析条件と解析対象

解析には汎用有限要素解析プログラム Marc2005r3 を用いた。対象モデルについては、文献1)を参考に、荷重条件、境界条件の対称性を考慮して、四辺単純支持板を、図-1に示すように、水平方向をX、板厚方向をY、鉛直方向をZとする3次元ソリッド要素により1/4の領域をモデル化した。初期不整は初期たわみを最大0.5mm (1/1000)となるように正弦半波形で与えた。なお、残留応力は考慮していない。表-1に材料特性を示す。CFシートの厚さや目付量には多くの組み合わせが存在するが、ここでは、目付量を 300g/m^2 と同一とし、一方向材の高弾性CFシートと高強度CFシートを検討した。載荷荷重はCFシートの接着方向による座屈特性の比較が目的であるため、鉛直荷重のみを載荷した。載荷面には局部的な曲げ変形を防ぐために剛性の高いシェル要素で剛域を設けている。

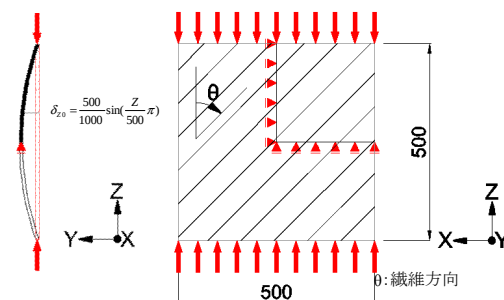


図-1 解析対象と境界条件

表-1 材料特性

		鋼板 (SM400)	CFシート	
			高弾性	高強度
厚さ	t (mm)	8.0	0.143	0.167
目付量	(g/m ²)	-	300	300
弾性係数	Ex (GPa)	200	9.0	15.0
	Ey (GPa)		9.0	15.0
	Ez (GPa)		640	245
ポアソン比	νxy	0.3	0.005	0.005
	νyz		0.005	0.005
	νzx		0.340	0.340
降伏応力	σ (MPa)	300	-	-
引張強度	σu (MPa)	450	1900	3400
せん断係数	Gxy (GPa)	-	4.0	4.0
	Gyz (GPa)		8.6	8.6
	Gzx (GPa)		8.6	8.6
破断ひずみ	εu (×10 ⁻⁶)	-	2950	13850

2.2 解析パラメータの設定と評価方法

(1) 接着方向による検討

CFSの層数は1層と5層とし、繊維方向が載荷方向である時を基準(0°)として15°間隔で90°までY軸まわりに回転させる。図-2に解析ケースの種類を示す。

(2) 層数による検討

繊維方向は90°で固定し、層数を1, 2, 4, 5, 8, 10と変化させて検討を行う。図-2に解析ケースの種類を示す。

(3) 解析手法と終局強度の評価

解析には、移動座標系に基づく弾塑性有限変位解析を適用し、求解は弧長増分法による。着目点は、面外変位、塑性化の最も大きいモデルの中心点であり、面外たわみ δ 、CFシートの最大主ひずみ ϵ および鋼板のミーゼス応力 σ を抽出した。CFシートの破断は最大主ひずみ ϵ により、鋼板の塑性化はミーゼス応力 σ により評価した。最大荷重に達しても破断・降伏が生じていなければ最大荷重 P をピーク荷重 P_p とする。しかし、先にどちらかの現象が生じていなければその時点での荷重をピーク荷重 P_p （この時の面外方向の変位を δ_p ）と決定する。最後に、座屈挙動を示すパラメータとして無補強時のピーク荷重 P_{p0} およびピーク時面外変位 δ_{p0} により強度上昇率 $\alpha(=P_p/P_{p0})$ と変形率 $\mu(=\delta_p/\delta_{p0})$ を計算した。

解析ケース名: ①②③

- ① UR : Unreinforced (無補強)
RE : Reinforced by Elastic (高弾性補強)
RS : Reinforced by Strength (高強度補強)
- ② 繊維方向回転角 (0,15,30,45,60,75,90)
- ③ CFSの層数 (1,2,4,5,8,10)

※ただし、パラメータとなった際は省略する。

例：高弾性CFS45°補強5層→RE45-5

図-2 解析ケースの種類

キーワード 圧縮鋼板の補強、炭素繊維シート、座屈耐荷力

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1 首都大学東京 TEL 042-677-1111

3. 解析結果と考察

(1) CF シートの接着方向の検討

図3、図4に、解析結果を示す。まず、図3より、繊維方向を90°としたRE90-5に注目すると、他の補強方法のものとは比べ、明らかに座屈強度が高く、ピーク時の面外方向変位は小さいことがわかる。次に、図4に、繊維方向と強度上昇率、変形率の関係を示すが、層数の違いによらず同じ傾向がみられたため、一例として、5層接着の結果を示す。強度が最も上昇したのは90°方向で接着したRE90-5であり、16.6%上昇した。しかし、塑性率が最も低下したのも90°方向であり、15%低下している。他方、0°方向で接着したRE0-5では、強度は4.1%の上昇であるが、塑性率は20.1%上昇している。繊維の接着方向に対して、強度上昇率は線形的に変化すると考えられ、変形率は45°までは、ほぼ一定値、45°より傾けると、変形率は線形的に上昇すると考えられる。

(2) CF シートの層数の検討

図5、図6に、剛性比に対する強度上昇率、変形率の関係をそれぞれ示す。剛性比は以下の式より算出した。

$$\xi = \frac{E_s t_s}{E_s t_s + n E_c t_c}, \quad \begin{cases} E_s: \text{鋼板の弾性係数} & t_s: \text{鋼板の厚さ} \\ E_c: \text{CFシートの弾性係数} & t_c: \text{CFシートの厚さ} \\ n: \text{CFシートの層数} \end{cases}$$

図5より、強度上昇率は剛性比により線形的に変化するといえる。また、繊維方向により傾きが変化し、90°の時に剛性比に対し最も大きな勾配となる。図6より、剛性比の変化に伴い、変形率は繊維方向の違いにより挙動が大きく異なる。繊維方向が45°以下の時、変形率は上昇し、0°で最大となる。一方、45°以上では、変形率は低下し、90°で最小となる。したがって、繊維方向θが増大すると変形率が低下するといえる。

(3) CF シートの材料特性による検討

図5および図6に示す通り、高弾性タイプの方が大きい座屈強度を示すことがわかる。特に顕著に現れているのは(2)の結果より、CFSを10層接着したRE90-10である。このケースでは高弾性が高強度よりも強度上昇率は9.5%大きく、塑性率は17.6%小さい値となっている。今回の検討では、最大荷重時にCFSの破壊および鋼板の降伏はしなかったため、座屈強度への影響はCFSの繊維方向の弾性係数に依存するといえた。

4. まとめと今後の課題

炭素繊維シートを接着した圧縮鋼板の座屈特性に関して、繊維の接着方向を変えることで、座屈強度および変形率におよぼす線形的な挙動になることが確かめられた。0°側と90°側はそれぞれ重要な座屈特性を補っているため、今後は方向性を組み合わせることで更なる補強が期待できる。また、層数を増加させることで、座屈強度および変形率は線形的に変化する。したがって、要求性能に応じて必要な補強層数が設計できるといえた。今後は、地震荷重への適用や、本研究では考慮しなかった接着剤や残留応力などを導入してより精密な解析を実施していく予定である。

参考文献

- 1) 宇井崇, 汐待公二郎, 西村宣男, 鈴木博之: 炭素繊維強化樹脂板を接着した圧縮鋼板の極限強度解析, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.43-50, 2002.

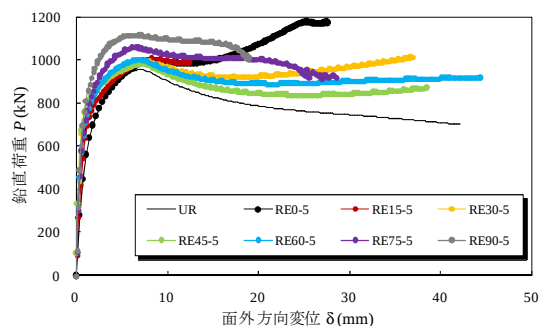


図3 高弾性CFS 5層接着に関する繊維方向の違いによる荷重変位曲線の比較

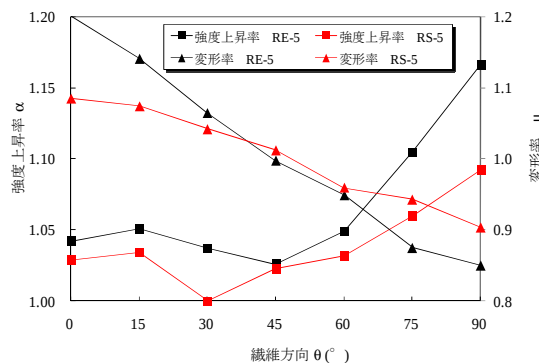


図4 繊維方向と強度上昇率・変形率

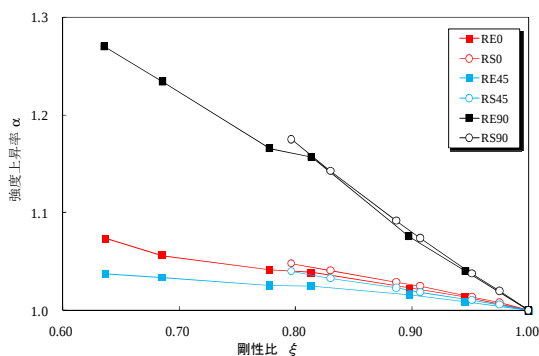


図5 剛性比と強度上昇率の関係

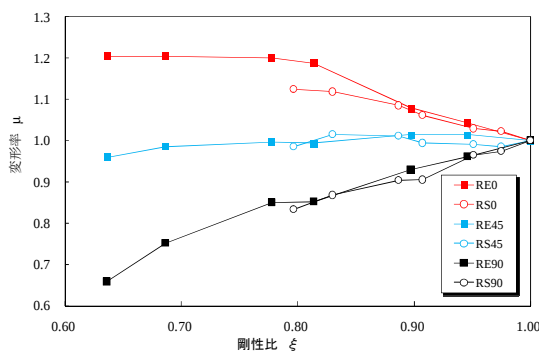


図6 剛性比と変形率の関係