炭素繊維強化樹脂により補強された鋼トラス部材の交番載荷挙動に関する実験的検討

日本橋梁（株）　正会員　○川村 弘昌
立命館大学　正会員　野阪 克義　伊津野 和行

1．背景と目的

鋼トラス橋に地震力が作用すると，トラス部材には圧縮方向と引張方向の軸力が交互に動的な挙動で作用することが想定される．既往の研究では，圧縮方向の軸力により全体座屈が発生した部材に対してその後に引張方向の軸力が作用する場合や，座屈変形が進展した部材に再び圧縮方向の軸力が作用した場合の挙動を確認した実験や検討は，土木の分野では事例が少ない．特に炭素繊維強化樹脂（以下，CFRP）により補強した鋼部材に対して，座屈変形を考慮した繰り返し交番載荷に関する研究は前例がほとんどない．

そこで本研究では，鋼トラス橋の部材に対して CFRP を用いた耐震補強設計手法を確立することを目的とした基礎的検討として，トラス橋の 2 次部材に多く使用されている H 形部材を CFRP シートで補強し，圧縮方向と引張方向の軸力を交互に作用させた場合の挙動とその補強効果を明らかにするための交番載荷試験を実施した．

2．実験概要

交番載荷試験の試験体および CFRP 補強 4 層の場合の補強範囲は，図 1 に示す通りである．フランジおよび腹板の寸法は弱軸方向に対する全体座屈のみに着目するため，局部座屈しない断面となるように幅厚比パラメータを 0.7 以下とした．フランジおよび腹板の断面寸法は，幅 50mm×厚さ 4.5mm，幅 90mm×厚さ 4.5mm とし，幅厚比パラメータ R はそれぞれ 0.278，0.361 となった．試験体は，写真 1 の試験装置の設置状況に示す通り，試験体の両端に配置したヒンジ部のピンの間隔が有効座屈長になるように試験装置に配置した．また，有効座屈長は，全体座屈が発生する幅厚比パラメータが 1.0 以上となる長さとした．ヒンジ間の距離である有効座屈長は l=900mm となり，細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ は 1.059 である．

交番載荷試験のパラメータは，表 1 に示す CFRP シートの種類および積層数の組み合わせであり，計 3 ケースについて検討した．

荷重の載荷方法について，圧縮載荷時は，変位制御による単調載荷とし，1 サイクルごとに最大変位を 0.5mm ずつ増加させ，全体座屈による面外方向への大きな変形が発生するまで載荷した．引張載荷時は，荷重制御により最大荷重を 175kN として単調載荷とした．

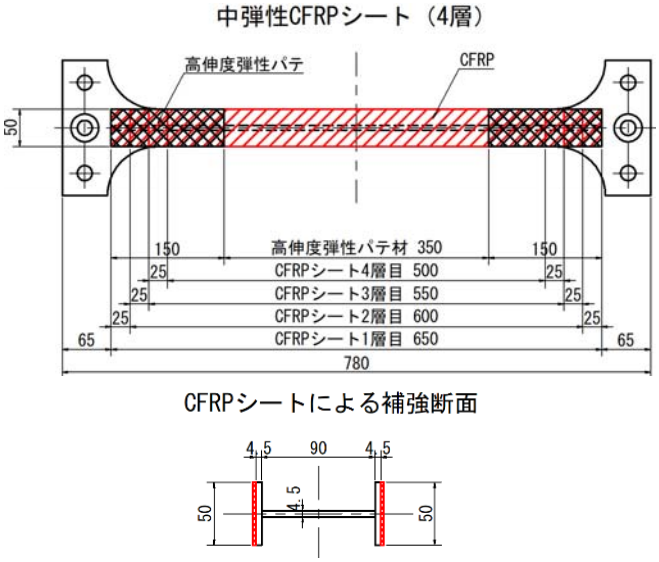

図 1 試験体形状と CFRP の補強範囲（単位：mm）

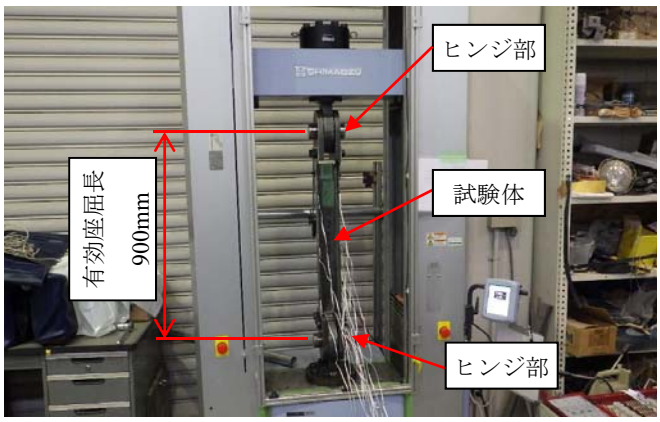

写真 1 試験装置の設置状況

表 1 実験パラメータ（E_{cf}：弾性係数，σ_{cf}：引張強度）

試験ケース	実験パラメータ	
	CFRP シートの種類	CFRP シートの積層数
A	なし	なし
B	中弾性シート E_{cf}=4.12×10^{5}N/mm^2 σ_{cf}=3502N/mm^2	2 層
C		4 層

キーワード　鋼トラス部材，全体座屈，交番載荷試験，炭素繊維強化樹脂（CFRP），耐震補強
連絡先　〒650-0023　兵庫県神戸市中央区栄町通 1-2-7 大同生命神戸ビル 5 階　日本橋梁株式会社　TEL 078-771-5265

© Japan Society of Civil Engineers

3．実験結果と考察

交番載荷試験で得られた試験体中央付近での鋼材のひずみと載荷荷重の関係を図 2 および図 3 に示す．この結果より，鋼材のひずみと荷重の履歴ループが，座屈変形が進展するにつれて，ひずみの履歴の中心が少しずつ(−)方向にずれていくことを確認できた．これは，ひずみの増加により，鋼材が部分的に塑性化して，残留ひずみとして蓄積されたためである．

また，交番載荷試験の結果より，座屈変形による鋼材の塑性化が試験体の断面剛性に与える影響を確認するために，図 2 および図 3 の試験体中央付近での荷重と鋼材のひずみの関係における傾きを数値として表したものを図 4 および図 5 に示す．CFRP を 2 層補強したケースでは，1 サイクル目の圧縮の載荷時および除荷時と全サイクルの引張の除荷時の傾きは設計値に対して 92～98%であり，設計値とほぼ同じ値であった．しかし，1 サイクル目以降の引張の載荷時は 31～60%，2 サイクル目以降の圧縮の載荷時は 61～89%となり繰り返し載荷が進むにつれて徐々に緩やかな傾きに変化していることが確認できた．CFRP を 4 層補強したケースでは，1～4 サイクル目の圧縮の載荷時と除荷時および全サイクルの引張の除荷時の傾きは設計値に対して 92～111%であり，設計値とほぼ同じ値であった．しかし，3 サイクル目以降の引張の載荷時は 42～80%，5 サイクル目以降の圧縮の載荷時は 87～92 となり，繰り返し載荷が進むにつれて徐々に緩やかな傾きに変化することが確認できた．この現象は，繰り返し載荷で座屈変形が進展することにより鋼材の断面剛性が低下することが原因であると推定できる．しかし，この 2 つのケースを比較すると，CFRP の補強層数が多いケースにおいて傾きの変化が始まるサイクルが遅いことが確認できた．このことより，CFRP の補強層数が多い方が，傾きが緩やかになる現象を抑制する効果があると推定できる．

4．まとめ

本研究の実験で得られた知見は以下の通りである．

(1) 圧縮力と引張力の繰り返し載荷により全体座屈の変形が進展するにつれて鋼材の断面剛性が低下することが明らかとなった．

(2) 上記の鋼材の断面剛性の低下に対しては，CFRP で鋼材を補強することにより，その低下を抑制する効果があることを示した．

今後の課題として，今回の実験結果を踏まえて，トラス部材の CFRP 補強を考慮した橋梁全体に対する耐震補強の効果を検証する必要がある．

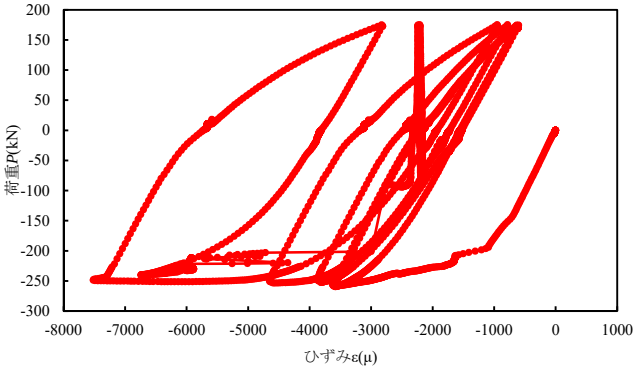

図 2 鋼材のひずみと荷重の関係（CFRP 補強 2 層）

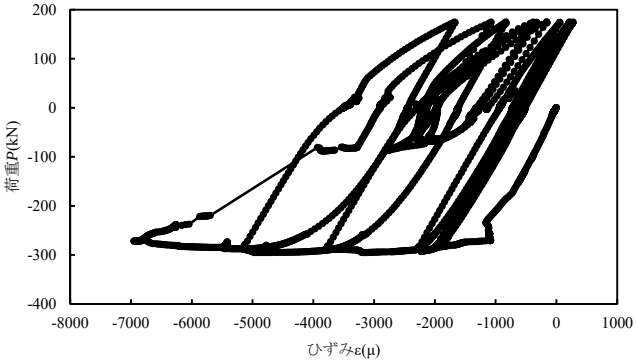

図 3 鋼材のひずみと荷重の関係（CFRP 補強 4 層）

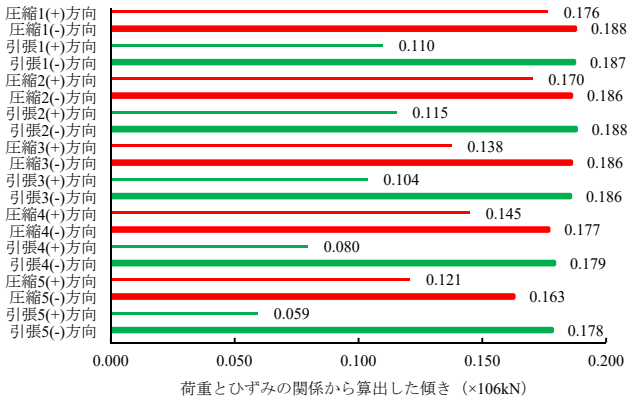

図 4 荷重と鋼材のひずみの関係から算出した傾き（CFRP 補強 2 層）（設計値：0.191×10^{6}kN）

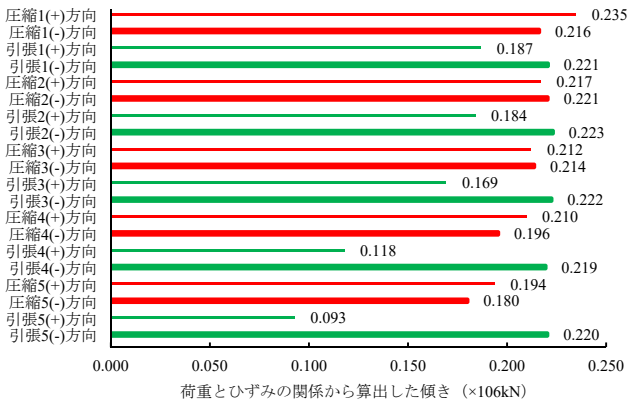

図 5 荷重と鋼材のひずみの関係から算出した傾き（CFRP 補強 4 層）（設計値：0.212×10^{6}kN）

© Japan Society of Civil Engineers