座屈損傷を受けた円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立てによる補修効果

首都大学東京大学院　学生員○岡崎直斗　首都大学東京　正会員　中村一史
首都大学東京　正会員　岸　祐介　東レ　正会員　松井孝洋

1. はじめに

円形鋼製橋脚は都市部の高架橋などに多用されている．そのため，円形鋼製橋脚の地震時の損傷による都市機能への影響は大きく，効率的な補強対策や損傷時の応急復旧が必要となる場合がある．一般に，鋼製橋脚の耐震補強方法としてコンクリート充填工法や鋼板当て板工法が採用されるが，施工には重機等が必要になり，必ずしも施工性がよいとはいえない．これに対して，炭素繊維シートを巻き立てて接着する工法が提案[1]されている．これまでに炭素繊維シートを用いた円形鋼製橋脚の補強に対する検討が行われているが，局部座屈後の性能回復を目的とした研究は行われていない．そこで本研究では，座屈損傷を受けた円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立てによる補修効果に着目して実験的な検討を行った．

2. 試験体と漸増正負交番載荷実験の概要

2.1　試験体の設計条件と補修・補強方法

図-1，2 に示すように，試験体は，基部から載荷点までの高さ 1982mm，外径 457.2mm の中空円形断面である．試験体基部に配置した補剛材付近から破壊が先行しないように，基部から 300mm の位置で，板厚を 12.7mm から 9.5mm に変化させている．**表-1** に，材料物性値を示す．降伏強度σ_y，ヤング率 E およびポアソン比νは，試験体の長手方向より切り出した試験片を用いて，JIS に準拠した引張試験より得られた値である．また，径厚比パラメータ R_t および細長比パラメータλは，道路橋示方書の適用範囲で設定した．試験体は，無補強のケースに加え，予め炭素繊維シートを巻き立てた補強，座屈損傷後に炭素繊維シートを巻き立てた補修の 3 ケースを用意した．

炭素繊維シートは，破断ひずみの大きい高強度タイプ（繊維重量 300g/m^2，引張強度 3.4kN/mm^2，弾性係数 245kN/mm^2）を用いた．炭素繊維シートの配置と数量は，FEM 解析による事前検討を参考に，基部からの高さ 300～600mm の範囲で，周方向に 7 層とした．なお，炭素繊維シートと鋼管の接着を確実にするために，表面をディスクサンダーにより目粗し処理している．なお，補修の試験体では，漸増正負交番載荷により最大荷重がピーク時の 95%程度まで低下する±6δ_yまで載荷した後，水平荷重をゼロ（残留変形あり）とし，鉛直荷重を載荷した状態で補修を行い，再び±0.5 δ_yから±9δy まで漸増正負交番載荷を行った．

2.2　実験方法

図-2 に，試験体のセットアップを示す．容量 1000kN の鉛直ジャッキを用いて，上部工重量を想定した圧縮軸力 492kN を載荷した状態で，変位制御による漸増正負交番載荷を行った．漸増正負交番載荷は，降伏水平変位δ_y（10mm）を基準とし，試験機の最大ストロークである±9δ_yまで載荷を行った．なお，水平ジャッキを引き込む方向を正方向，押し出す方向を負方向としている．載荷速度は，±0.5δ_y～±1δ_yの範囲で 0.2mm/sec，±2δ_y～

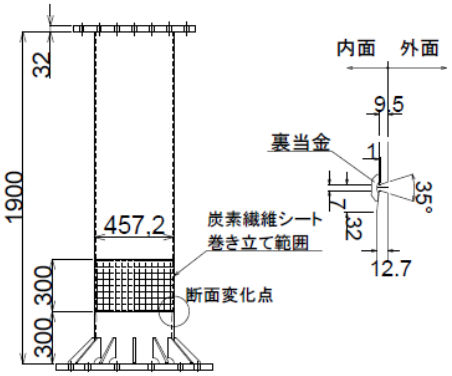


図-1　試験体

表-1　材料物性値

鋼種	STK400
降伏応力 σ_y（N/mm^2）	368.9
ヤング率 E（kN/mm^2）	205.0
ポアソン比 ν	0.3
板厚中心半径 R（mm）	224.3
径厚比パラメータ R_t※1	0.070
細長比パラメータ λ※2	0.338
降伏水平荷重 H_y（kN）	289.2
軸力比 P/P_y	0.1
径厚比 D/t	48.4

※1　$Rt = \frac{R}{t}\frac{\sigma y}{E}\sqrt{3(1-\mu^2)}$　$(0.03 \le Rt \le 0.08)$

※2　$\lambda = \frac{2h}{\pi r}\sqrt{\frac{\sigma y}{E}}$　$(0.2 \le \lambda \le 0.4)$

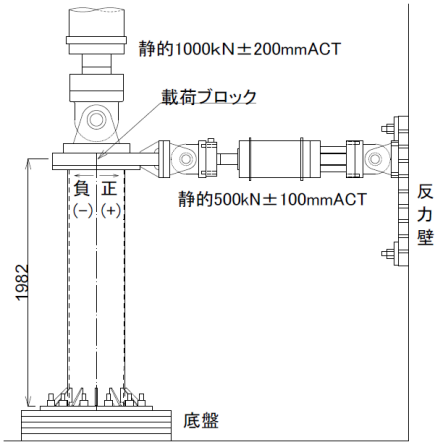


図-2　試験体のセットアップ

Key Words：炭素繊維シート，円形鋼製橋脚，耐震補強，座屈損傷
連絡先：〒192-0397　東京都八王子市南大沢 1-1　首都大学東京大学院　TEL.042-677-1111

±9δ_yの範囲で 0.5mm/sec とした．計測は，既往の研究成果 [1]を参考にひずみゲージおよび変位計を設置して行った．

3. 検討結果と考察

図-3 に，水平荷重と載荷点における水平変位の関係を示す．無補強の試験体では，最大耐力が正側で 427.2kN（+5δ_y），負側で−401.0kN（−4δ_y）となった．その後，+6 δ_yの載荷中に，基部から 400mm の位置で提灯座屈が生じ，水平荷重はピーク時の 95%まで低下した．

炭素繊維シートによる補強を行った試験体（**図-3(a)**）では，+5δ_y載荷途中で，面内方向への座屈（**写真-1(a)**）が生じた．最大耐力は正側で 459.5kN（+7δ_y），負側で−441.9kN（−5δ_y）となった．その後の載荷によって，面内方向への座屈が進行し，−9δ_yを超えたところで，炭素繊維シートには，周方向に割れが生じたが，破断には至らなかった．**図-4** より，補強によって，水平荷重がピークを迎えた後の包絡線の傾きは，無補強と比較して緩やかになった．これは，炭素繊維シートの周方向拘束による補強効果と判断された．

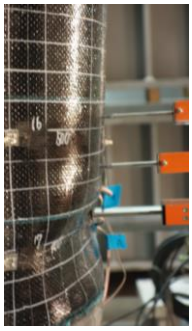
補修の試験体では，まず補修前に±6δ_yまで載荷を行った．載荷の履歴を省略したが，無補強の場合と同様の結果となり，−35.5mm の残留変位が生じた．その後，炭素繊維シート巻立てにより補修を行い，再び載荷を行った．その結果，周方向への割れは+1δ_y で生じ，その後も断続的に続き，+4δ_y で基部から 400mm 付近で部分的に破断した（**写真-1(b)**）．最大荷重は正側で 399.24kN（+6δ_y），負側で−372.99kN（−3δ_y）であった．荷重ー変位曲線から±3δ_y前後までは，最大荷重が座屈前に近い値まで回復するが，炭素繊維シートのはく離後（±6δ_y以後）は，無補強の状態と同程度となることがわかる．

表-3 に，無補強に対するエネルギー吸収率を示す．無補強と比較した場合，炭素繊維シートの補強では，エネルギー吸収率が最大 26.6%向上すること，補修では，正側では 4.4%，負側で 10.3%程度下回ることがわかる．これは，補修前の載荷によって，負側に大きな残留変形が試験体に生じており，補修後に載荷した場合，面外方向に残留変形を生じた箇所に巻き立てた炭素繊維シートに圧縮力が作用し，はく離するためと考えられる．しかしながら，補修後の 6δ_y〜9δ_yで比較すると，無補強に比べて，エネルギー吸収が 34.8%の向上することが確かめられた．

4. まとめ

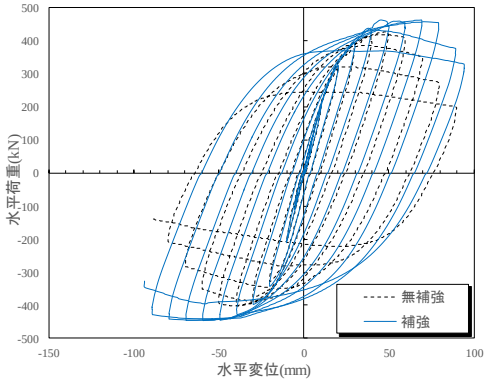
以上のことから，炭素繊維シート巻立てによる補強では，耐力の増加は小さいが，エネルギー吸収率は約 2 割程度向上することが確かめられた．補修に関しては，炭素繊維シート巻立てにより，損傷前と同程度まで耐荷力が回復することがわかった．損傷した円形鋼製橋脚の応急復旧の観点からは，本震で損傷した円形鋼製橋脚に炭素繊維シートを巻き立てて補修した場合，本震と同規模の余震に対しても効果があると考えられる．

参考文献　1）（財）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），2002.7

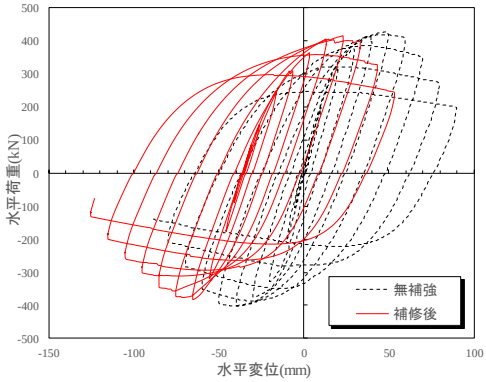


(a) 補強（-9δ_y時）　(b) 補修（+4δ_y時）

写真-1　各試験体における座屈の状況



(a) 補強実験結果



(b) 補修実験結果

図-3　水平荷重−水平変位曲線

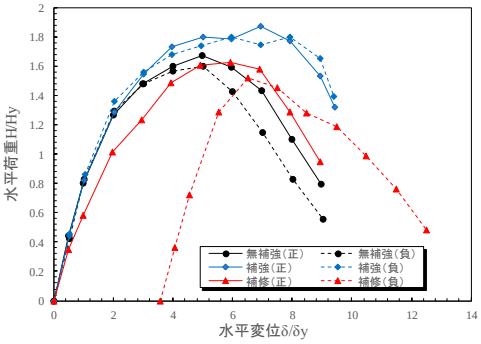


図-4　$H/H_y - \delta/\delta_y$の包絡線

表-3　エネルギー吸収率の比較

試験体	正・負	無補強に対するエネルギー吸収率	
		0〜9 δ_y	6 δ_y〜9 δ_y
無補強	正	1.000	−
	負	1.000	−
補強	正	1.169	−
	負	1.266	1.740
補修	正	0.956	−
	負	0.897	1.348