

炭素繊維シート巻立てによる円形鋼製橋脚の補修・補強に関する解析的検討

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

円形鋼製橋脚の耐震補強工法のひとつとして、炭素繊維シート巻立て工法がある。その補強方法に関しては、実験的検討が行われており、炭素繊維シートを円周方向に巻き立てることによる補強効果や、座屈後に巻き立てた場合の性能回復の検討が行われている。一方、炭素繊維シート巻立てによる円形鋼製橋脚の耐震補強に関する解析的な検討は少なく、モデル化を含めて十分な検討が行われていない。そこで本検討では、炭素繊維シートを周方向に巻き立てた補強と性能回復の定量的な評価を行うために、先行研究の実験的な検討¹⁾を比較対象として、解析的検討を行った。

2. 円形鋼製橋脚と炭素繊維シートのモデル化と解析方法

対象とした円形鋼製橋脚は、基部から載荷点までの高さが 1982mm、外径 457.2mm の中空円形断面とした。表-2 に、検討モデルの諸元を示す。また、炭素繊維シートは破断ひずみの大きい高強度タイプ（引張強度 3.4kN/mm²、弾性係数 245kN/mm²）とし、基部からの高さ 300～600mm に巻立てを行うこととした。

数値解析では、汎用有限解析プログラム Marc2013 を適用した弾塑性有限変位解析を行った。円形鋼製橋脚は 4 節点厚肉シェル要素で、炭素繊維シートは非抗圧性（圧縮軸力には抵抗しない）を考慮した 2 節点軸力要素でそれぞれモデル化した。炭素繊維シートの軸力要素の節点は、円形鋼製橋脚のシェル要素の節点と同じ座標値とし、完全に接合した状態とした。軸力要素の剛性は、炭素繊維シートの引張剛性と軸力要素が配置される間隔を考慮して算出した。表-1 に、解析モデルを示す。

補強モデルの荷重条件としては、モデル頂部に降伏軸力の 10% を鉛直載荷した状態で、水平変位を変位制御により、漸増正負繰り返し載荷とした。炭素繊維シートの積層数を 1～9 層として比較検討を行った。

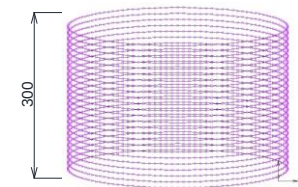
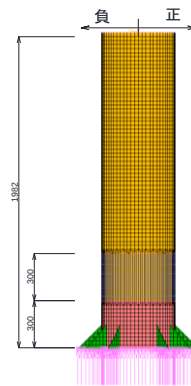
補修モデルの載荷プログラムを図-2 に示す。補修モデルにおいては、軸力要素を無効にした状態で一次載荷を行い、モデルに所定の損傷を与えた。その後、水平荷重を取り除いたうえで、軸力要素を有効化し、再び漸増正負繰り返し載荷を行った。なお、所定の損傷とは、最大荷重がピーク時の 95% 程度まで低下し、局部座屈が確認できる領域としている¹⁾。

3. 検討結果と考察

補強モデルの解析結果の一部として、図-3 に、軸力要素でモデル化した炭素繊維シートの周方向のひずみのコンター図と変形図を示す。図を省略したが、炭素繊維シートが 1 層の場合は +1 δ_y で、図-3(a) より 3 層の場合は +4 δ_y 場合でそれぞれ破断ひずみに達していることがわかる。両者の破断時の鋼管の変形モードはそれぞれ、水平方向

表-1 解析モデル

	モデル名	積層数 n
対策なし	N	0
補強	R _n	1,3,5,7,9
補修	S _n	7



(a) 解析試験体 (b) 炭素繊維シートモデル
 図-1 解析モデル

表-2 解析モデル諸元

鋼種	STK400
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	368.9
ヤング率 E (kN/mm ²)	205.0
板厚中心半径 R (mm)	224.3
径厚比パラメータ R_t	0.070
細長比パラメータ λ	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

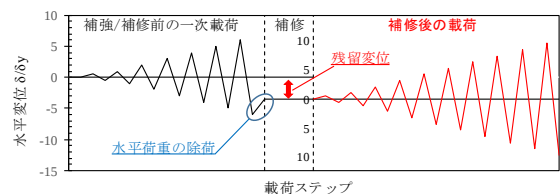
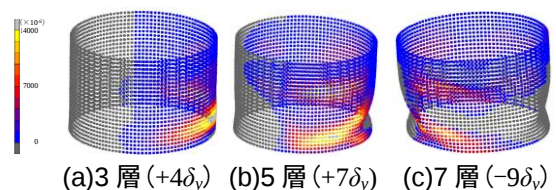


図-2 載荷プログラム



(a) 3層 (+4 δ_y) (b) 5層 (+7 δ_y) (c) 7層 (-9 δ_y)
 図-3 軸力要素でモデル化した炭素繊維シートの周方向ひずみのコンター図と変形図

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

载荷に対してはらみだす提灯座屈であった。一方、図-2(b), (c)より炭素繊維シート積層数が5層以上では、変形モードが内側に入り込むダイヤモンド座屈へ移行することがわかる。そのため、周方向の最大ひずみが生じる箇所は、载荷軸方向に対して 45° の位置となり、5層では $+7\delta_y$ で破断ひずみに達することがわかる。また、図-3(c)より7層以上では、 $-9\delta_y$ まで载荷しても炭素繊維シートは破断ひずみに達していないことがわかる。図-4に補強実験時の損傷の状況を示す。実験においては、载荷終了後に4波のダイヤモンド座屈が発生したが、解析においても座屈のモードを正確に再現されていることがわかる。

図-5に、解析結果による水平荷重 H と水平変位 δ の関係を示す。これは、水平荷重と水平変位の関係からその包絡線を求めたものである。図-5(a)は正側、(b)は負側の $H-\delta$ の関係である。炭素繊維シートの積層数が1層および3層の場合、水平変位が小さい段階で炭素繊維シートに破断が生じるため、エネルギー吸収性能の増加は小さいことがわかる。積層数が5層以上の場合には $+7\delta_y$ で破断ひずみに達していることから、それ以上でのエネルギー吸収は期待できないことがわかる。また、実験結果と解析結果の最大荷重はおおよそ一致している。

補修モデルについては、その変形図を図-6に示す。解析での一次载荷終了後(補修前)には、図-6(a)のような残留変位が生じた。これは、実験時と同様のモードであった。補修後のモードを比較すると、実験時には炭素繊維シートの補修性能が低下する領域において、外側にはらみだす提灯座屈が進展した(図-6(c))。しかし解析においては、水平変位が増加するにつれて、残留変位が生じた箇所とその反対側で、面内方向に入り込むような座屈進展しており、実験と解析の変形モードが異なる結果となった(図-6(b))。これは、水平変位が増加すると、炭素繊維シートの剛性により、鋼管が内側に入り込むようなモードに変形するためであると考えられる。図-7に補修後のエネルギー吸収性能を示す。図-7より、負方向においては実験時の補修後の崩落線を概ね表現できたものの、正方向では $+4\delta_y$ 以降のエネルギー吸収性能が低くなった。これは、モードの変形の違いによるものと考えられる。また、最大荷重も一致しなかった。

4. まとめ

以上のことから、補強モデルにおいては、炭素繊維シート巻立て補強の積層数の影響を解析的に評価できるといえた。補修モデルについては、補修後の性能に関して、水平変位が小さい範囲では実験結果を概ね再現できているものの、水平変位が大きくなると、実験と解析に差異が生じた。モデル化に関しては、さらに検討を行う予定である。

参考文献 1) 岡崎直斗, 中村一史, 岸祐介, 松井孝洋: 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, 第71回年次学術講演会, I-258, pp.515-516, 2016.9

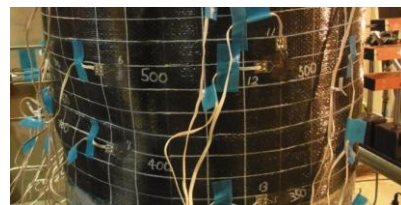


図-4 補強した試験体の座屈の状況($-9\delta_y$)

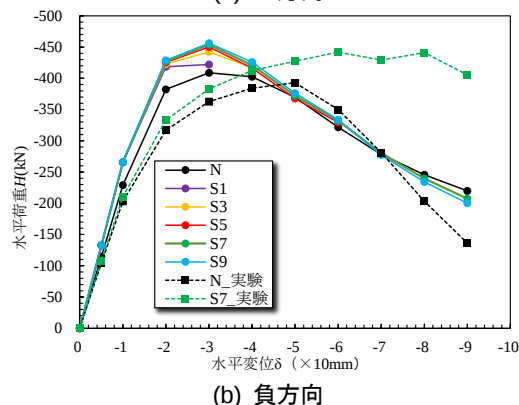
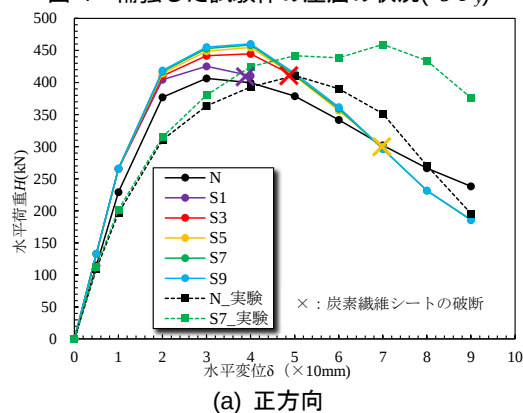


図-5 水平荷重-水平変位曲線

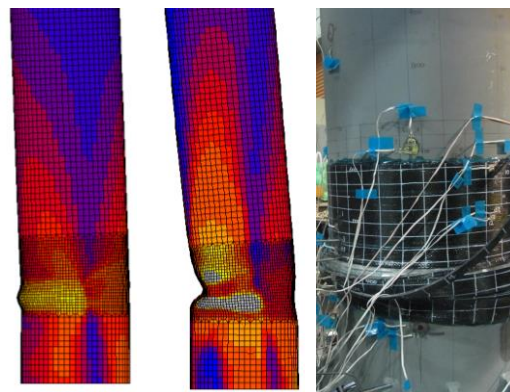


図-6 補修モデルの変形図

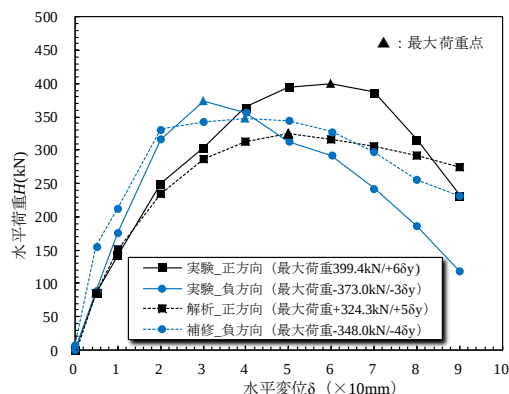


図-7 補修の水平荷重-水平変位曲線