

炭素繊維シートが巻立てられた円形鋼製橋脚のモデル化と 漸増繰り返し水平力による弾塑性挙動

首都大学東京大学院（研究当時） 正会員○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

円形鋼製橋脚に対する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¹⁾がある。その補強方法に関しては、既往の実験的検討により、炭素繊維シートを周／軸方向に複数層巻立てた場合の補強効果や、座屈後に巻立てた場合の性能回復の検討²⁾が行われている。このような、炭素繊維シート巻立てによる耐震補強では、円形鋼製橋脚の寸法や断面に最適な炭素繊維シートの積層数および積層範囲が重要であり、適切なモデル化と解析手法によって、最適な設計ができることが望ましい。そこで、本検討では、先行研究²⁾の炭素繊維シートが巻立てられた鋼製橋脚を対象として、積層数と積層方向の組み合わせが補修・補強の効果へ与える影響を解析的に検討した。

2. 円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立てによる耐震補強のモデル化

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-1に、解析モデルの諸元を示す。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、巻立ての範囲は、基部からの高さ300～600mmとした。炭素繊維シートの積層数は、周／軸方向の組み合わせについて0～7層の奇数層で、パラメトリックに比較することとした。

数値解析では、汎用有限要素解析プログラム Marc2013 を適用した弾塑性有限変位解析を行った。図-1に、FE解析モデルを示す。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2節点軸力要素でモデル化した。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。炭素繊維シートの圧縮力抵抗性は、周方向については、軸力要素を圧縮力に抵抗しない非抗圧とし、軸方向については、500MPaの圧縮限界を設定することにより、安全側の評価となるように制御した。また、周方向の炭素繊維シートについては、先行研究において、載荷の途中で、後述する図-5(a)に示すような損傷の発生が報告されているため、サブルーチンにより引張側についてのみ炭素繊維シートの破断を制御している。

図-2に、補修モデルの載荷プログラムを示す。実験時の状況を再現するために、軸力要素を無効化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、再び漸増繰り返し載荷をおこなった。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、局部座屈が目視で確認できる領域と設定している。実験時には、-6 δ_y 終了時点で局部座屈の形成が確認されたが、解析モデルでも、-6 δ_y 終了時点で同様の座屈が発生することを確認している。また、補強モデルにつ

表-1 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

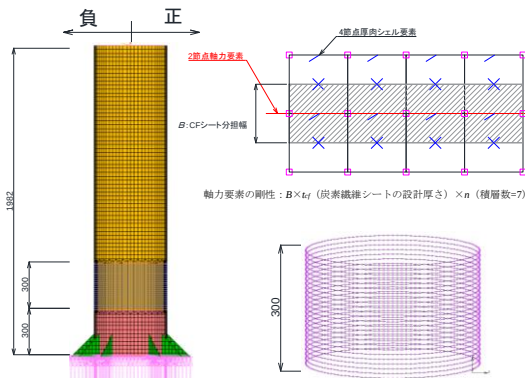


図-1 FE解析モデル

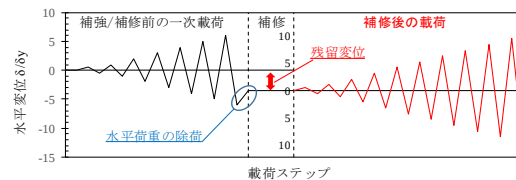


図-2 載荷プログラム

Key Words : 炭素繊維シート, 円形鋼製橋脚, モデル化, 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

いては、単純漸増繰り返し荷重としている。

3. 炭素繊維シート巻立てによる耐震補強の最適化

図-3 に、先行研究と同様の周方向 7 層の補強モデルの座屈モードの比較を示す。実験時には、水平変位が増加した場合に、図-3(a)に示すような、内側に入り込む座屈が発生したが、解析モデルでも、実験時の挙動が再現されている。図-4 に、補強モデルの、無補強の実験結果に対する、周／軸の積層数によるエネルギー吸収率の増加率を示す。なお、図は正・負の結果を合算したものである。エネルギー吸収率についても、実験結果と解析結果はほぼ同値であり、モデルの妥当性が確認された。先行研究の実験結果²⁾より、周方向 7 層の積層では、エネルギー吸収率が約 15% 向上することが確認されたが、軸方向にも炭素繊維シートを追加することで、さらに 10% 程度の増加が見込めることがわかった。また、エネルギー吸収率は、炭素繊維シートの積層数が周 5/軸 3 層の場合で最大となり、それ以上は増加しないことがわかる。これは、積層数が増加すると、座屈箇所が補強範囲の上部へ移動するためである。

4. 炭素繊維シート巻立てによる補修の最適化

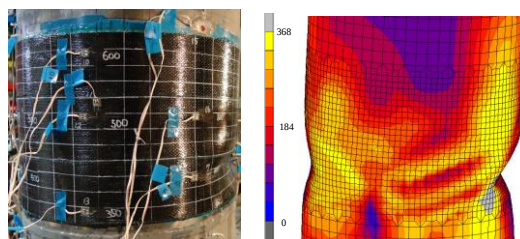
図-5 に、先行研究と同様の周方向 7 層の補修モデルの、荷重終了後の座屈モードの比較を示す。座屈頂部の位置に若干の違いがみられるものの、実験時の座屈モードを再現できていることがわかる。また、図を略したが、サブルーチンを用いた制御により、水平変位の増加に伴う、炭素繊維シートの破断を再現可能であることが確認された。図-6 に、補修モデルの、補修を行わない解析モデルに対する、周／軸の積層数によるエネルギー吸収率の増加率を示す。補修モデルについても、実験結果と解析結果はほぼ同値であり、モデルの妥当性が確認された。補修については、エネルギー吸収率は積層数に比例して増加することがわかる。特に軸方向の積層の効果が大きく、軸方向に炭素繊維シートを追加することで、先行研究で採用した周 7 層を上回る補修性能となることがわかった。また、補修モデルでは、積層数の増加に伴い座屈モードが大きく変化することが確認された。具体的には、周方向のみの積層では、一次荷重で発生した提灯座屈が一様に進展していくが、軸方向に炭素繊維シートを追加することで、部分的に内側に入り込む座屈が発生し、複雑な挙動となることが確認された。この挙動により、最大耐力後の荷重履歴曲線の崩落線が急激に低下する可能性があるため、積層数の増加による補修性能が向上するとは一概には評価できないと考えられる。

5. まとめ

以上のことから、本研究で提案した補強・補修モデルを用いれば、実験結果のエネルギー吸収率および座屈モードを実用上十分な精度で再現できること、炭素繊維シートの周／軸の積層数の最適化についての評価が可能であることが確認された。

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

2) 岡崎直斗，中村一史，岸祐介，松井孝洋，瀬戸内秀規：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性能回復に関する検討，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.73，No.1，pp.52-61，2017.5



(a) 実験結果 (+9 δ_y) (b) 解析結果 (+9 δ_y)
図-3 補強周 7 層モデルの座屈モードの比較

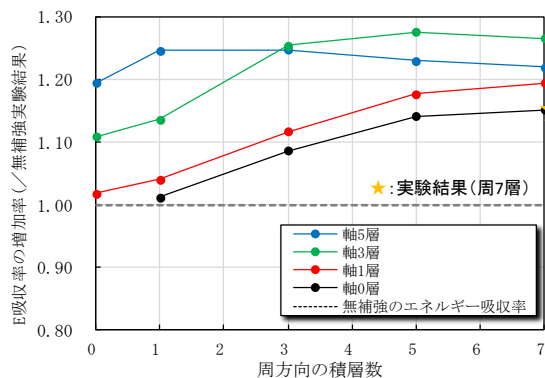
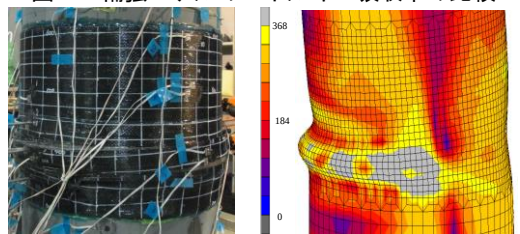


図-4 補強モデルのエネルギー吸収率の比較



(a) 実験結果 (-9 δ_y) (b) 解析結果 (-9 δ_y)
図-5 補修周 7 層モデルの座屈モードの比較

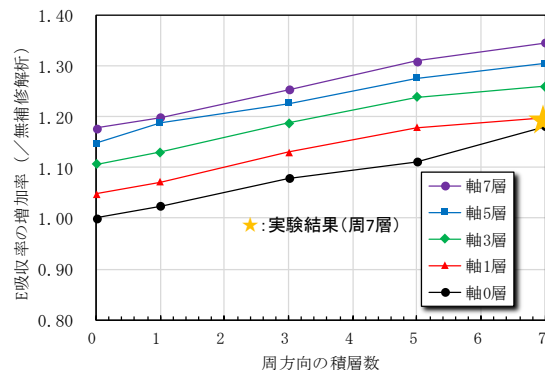


図-6 補修モデルのエネルギー吸収率の比較