

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

岡崎 直斗¹・中村 一史²・岸 祐介³・松井 孝洋⁴

¹学生会員 首都大学東京 大学院 博士前期課程 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

²正会員 首都大学東京 大学院 准教授 都市環境科学研究科都市基盤環境学域
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: hnaka@tmu.ac.jp

³正会員 首都大学東京 助教 都市環境科学部都市基盤環境コース
(〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: kishi@tmu.ac.jp

⁴正会員 東レ株式会社 コンポジット技術第1部 (〒455-8502 愛知県名古屋市中区大江町9番の1)

E-mail: Takahiro_Matsui@nts.toray.co.jp

本研究は、炭素繊維シートを周方向に巻立てた円形鋼製橋脚の補強効果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を対象として、解析的検討を行ったものである。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の中空円形断面であり、その頂部に降伏軸力の10%の一定の軸力と漸増繰り返し水平力を作用させる実験が行われている。高強度タイプの炭素繊維シート（7層）が、座屈の損傷前（補強モデル）と損傷後（補修モデル）に巻立てられた試験体で検討を行った。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節点軸力要素でモデル化した。解析結果より、補強モデルについては、水平耐力および座屈モードを定量的に評価できること、また、補修モデルについては、実験結果に対して水平変位の予測精度は低かったが、水平耐力は水平変位が小さい範囲においては、概ね評価できることが確かめられた。

Key Words : carbon fiber sheets, circular steel bridge pier, rehabilitation, buckled, Elastic-Plastic behavior

1. はじめに

近年、高度経済成長期に架設された建造物の多くが、供用から50年以上を経過し、より合理的な維持管理が求められている。特に、円形鋼製橋脚は都市部の高架橋などに多く適用されており、地震時に損傷を受けた場合、都市機能への影響は大きい。実際に、旧基準に基づいて設計された鋼製橋脚では、レベル2地震により、局部座屈による変形の進展に伴い橋脚が大きく傾斜した事例¹⁾が報告されている。既設の鋼製橋脚に対する一般的な耐震補強工法としては、コンクリート充填工法や鋼板当て板が採用されてきた。しかし、いずれの施工においても重機等が必要であり、作業空間や重量増加の面から、必ずしも施工性や効率がよいとはいえない。

このような背景を踏まえ、適用が進められているのが炭素繊維シート巻立て工法²⁾³⁾である。炭素繊維シートは軽量かつ高強度であり、耐久性が高く、施工が容易で

あるという特徴を持つ材料である。炭素繊維シートはコンクリート建造物や鋼建造物の耐震補強工法のひとつとして広く用いられている。

円形鋼製橋脚に対する炭素繊維シート巻立て補強⁴⁾⁶⁾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複数層巻立てることにより、局部座屈の発生を抑制して塑性変形の進行を遅らせることが可能であることや、靱性が向上することが明らかになっており、鋼製橋脚に対する耐震補強工法³⁾として提案されている。

また、座屈損傷した円形鋼製橋脚に炭素繊維シートを巻立て補修した場合の、性能回復の実験的検討⁷⁾も行われており、炭素繊維シートに破壊が発生するまでは、座屈の発生が抑制されることが明らかとなっている。

炭素繊維シートの巻立てによる耐震補強および補修工法では、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の設計が重要であり、解析手法による数値計算を参考に決定することが望ましい。

円形鋼製橋脚の繰り返し弾塑性挙動については、繰り返し変形による履歴曲線の包絡線の劣化挙動や局所変形モードなどを精度予測するために、主に三曲面モデルを用いた非線形解析手法による検討⁸⁾が行われており、繰り返し挙動が再現できることが報告されている。

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検討の事例は少なく、モデル化を含めて十分な検討が行われていない。特に、座屈損傷した円形鋼製橋脚の応急復旧を目的とする場合、できるだけ簡易かつ合理的なモデルの作成が求められる。そこで本検討では、炭素繊維シートを周方向に巻立てた補強と補修による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を比較対象として、解析的な検討を行った。なお、ここでは、既存の構成則のなかでは、比較的精度良く、鋼製橋脚の履歴挙動を予測することのできる移動硬化則を用いて検討を行った。

2. 検討対象の鋼製橋脚モデル

(1) 検討対象試験体の概要⁷⁾

先行研究の実験的検討で用いた試験体は図-1に示すように、高さ $h=1900\text{mm}$ 、外径 $D=457.2\text{mm}$ の中空円形断面である。試験体の基部から 150mm までの位置には、基部の座屈を防止する目的で板厚 16mm の補剛リブ（12本）が溶接接合されている。また、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 $t=12.7\text{mm}$ から $t=9.5\text{mm}$ に断面変化させている。試験体は、底盤と載荷ブロック治具に接合するために、上下に板厚 32mm の鋼板を溶接接合した。試験体の径厚比パラメータ Rt および細長比パラメータ λ は、式(1)、(2)に示すように、道路橋示方書⁹⁾の適用範囲内になるように設計した。

表-1 試験体諸元

鋼種	STK400
高さ h (mm)	1900
外径 D (mm)	457.2
内径 d (mm)	438.2
降伏応力 σ_y (N/mm ²)	368.9
ヤング率 E (kN/mm ²)	205.0
降伏ひずみ μ	1799.5
ポアソン比 ν	0.3
板厚中心半径 R (mm)	223.8
断面二次半径 r (mm)	158.6
降伏水平荷重 H_y (kN)	289.4
軸力比 P/P_y	0.1
径厚比 D/t	48.1

$$Rt = \frac{R}{t} \frac{\sigma_y}{E} \sqrt{3(1-\nu^2)} \quad (0.03 \leq Rt \leq 0.08) \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{2h}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (0.2 \leq Rt \leq 0.4) \quad (2)$$

ここで、 R ：板厚中心半径、 t ：板厚、 σ_y ：降伏応力、 E ：ヤング率、 ν ：ポアソン比、 h ：有効座屈長、 r ：断面二次半径である。鋼材のヤング率 E およびポアソン比 ν は材料試験による値を用いた。表-1に、試験体諸元を示す。軸力比は橋脚の降伏荷重に対する上部構造の自重の比であり、既往の研究⁴⁾を参照して、0.1を採用した。

(2) 実験装置および実験概要⁷⁾

漸増繰り返し載荷実験の概要を図-2に示す。上部工重量を想定した一定鉛直荷重 P を載荷後、変位制御方式により橋軸直角方向に水平荷重を載荷させている。水平荷重の載荷位置は、試験体天端に設置された載荷ブロック

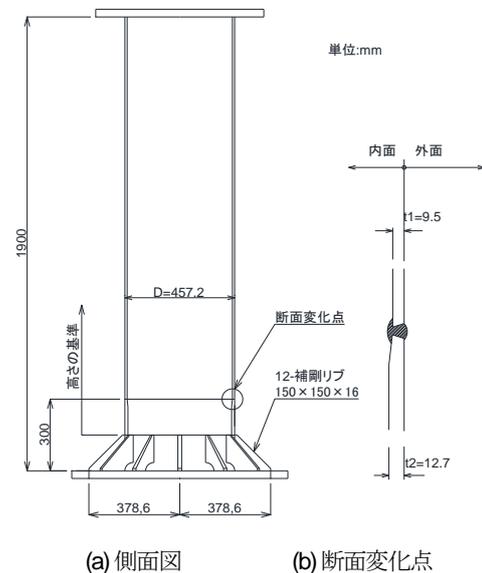


図-1 試験体の概略図

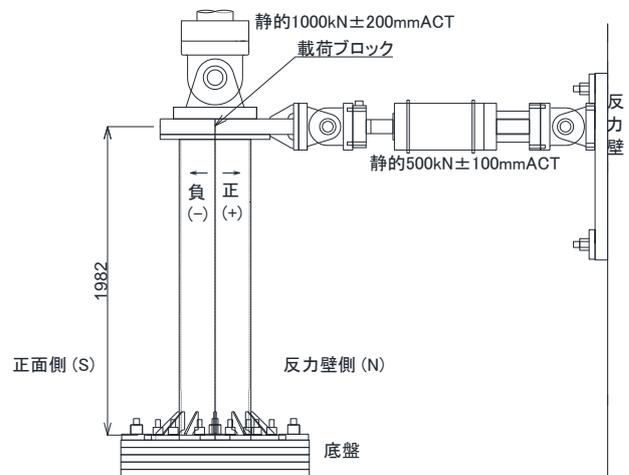


図-2 実験装置の概要

の中心部とし、その位置は試験体の基部から 1982mm の高さである。

試験体に作用させる鉛直荷重 P は、上部工の自重を想定した値であり降伏軸力の 10% とした。水平変位は、降伏水平変位 $\delta_y(10\text{mm})$ を基準とし、試験機の最大ストロークである $\pm 9\delta_y$ まで荷重を行った。今回の実験ではすべて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。

$$P = 0.1\sigma_y \times A = 491.3\text{kN} \quad (3)$$

$$\delta_y = \frac{H_y h^3}{3EI} = 10\text{mm} \quad (4)$$

$$\frac{P}{A} \pm \frac{H_y \times h}{I} = \delta_y \quad (5)$$

ここで、 A : 断面積、 H_y : 降伏水平荷重、 h : 試験体高さ、 I : 断面二次モーメントである。

(3) 炭素繊維シート巻立てによる補強実験の概要

実験時に用いた炭素繊維シートはすべて、破断ひずみの大きい高強度タイプ（繊維重量 $300\text{g}/\text{mm}^2$ 、引張強度 $3.4\text{kN}/\text{mm}^2$ 、弾性係数 $245\text{kN}/\text{mm}^2$ ）である。炭素繊維シートの配置と積層数は、補修・補強ともに基部からの高さ $300\sim 600\text{mm}$ の範囲で、周方向に 7 層とした。

図-3(a)に荷重プログラムを示す。炭素繊維シート巻立て補強実験では、無荷重の状態であらかじめ炭素繊維シート巻立て補強を行ったうえで、漸増正負交番荷重を行った。

(4) 炭素繊維シート巻立てによる補修実験の概要

図-3(b)に補修実験の荷重プログラムを示す。補修による検討では、はじめに漸増正負交番荷重による一次荷重により、所定の損傷を試験体に与えた。なお、所定の損傷とは、円形鋼製橋脚の耐力がピーク時の 95% 程度まで低下し、座屈が目視で確認できる領域と定義した。実験

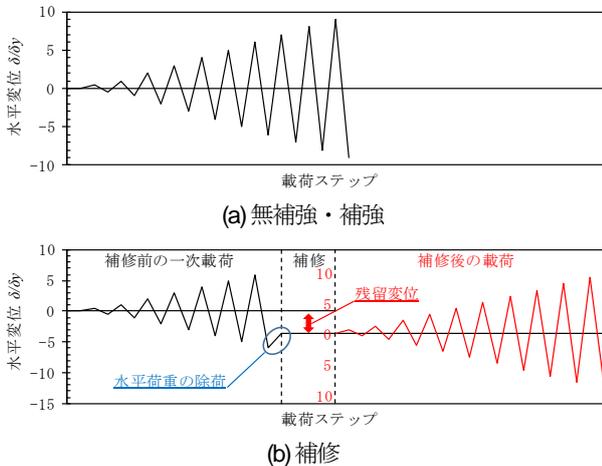


図-3 荷重プログラム

時には、 $\pm 6\delta_y$ 荷重終了時点で水平耐力がピーク時の 95% 程度まで低下し、座屈が目視で確認できたため、これを所定の損傷と判断した。一次荷重 ($\pm 6\delta_y$) の終了後、水平ジャッキの水平力を除荷してゼロとしたが、自重を想定した想定荷重 P は作用させた状態で、炭素繊維シート巻立て (7 層) による補修を行った。その後、再度漸増正負交番荷重を行った。

3. 補強解析モデルと解析方法⁷⁾

(1) 鋼製橋脚モデルの作成

図-4(a)に、FE解析モデルを示す。モデルの諸元はすべて実験的検討における試験体と同様としている。円形鋼製橋脚は 4 節点曲面シェル要素でモデル化した。メッシュサイズは $24\text{mm} \times 24\text{mm}$ とし、座屈の発生が予想される基部から $300\sim 600\text{mm}$ の 300mm のみ $12\text{mm} \times 12\text{mm}$ とした。

鋼材の構成則は、試験体から切り出したクーポン試験片を引張試験による結果から求め、ヤング率、降伏応力

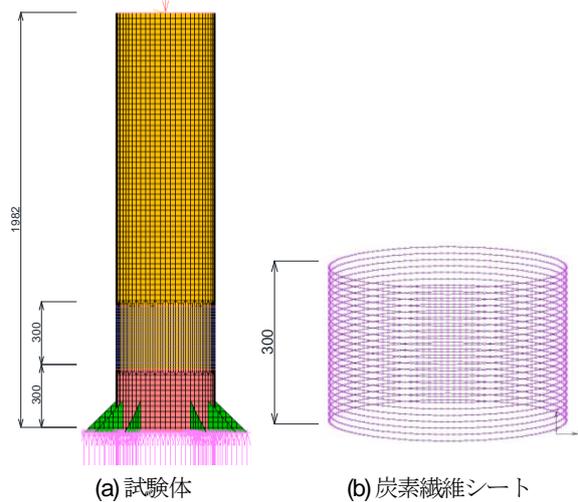


図-4 FE 解析モデル

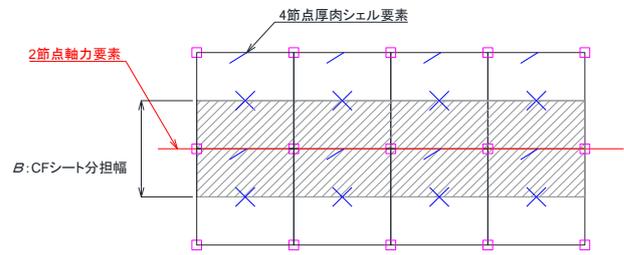


図-5 2 節点軸力要素の剛性

表-2 炭素繊維シートの材料物性値

炭素繊維シートの種類	高強度タイプ
炭素繊維シートの設計厚 t_f (mm)	0.167
引張強度 (kN/mm^2)	3.4
ヤング率 (N/mm^2)	245
破断ひずみ ($\times 10^6$)	14,000

は表-1に示したとおりである。解析モデルでは、応力とひずみの関係を多直線でモデル化し、真応力-真ひずみに変換して、移動硬化則を適用した。

境界条件については、試験体基部の変位をすべて拘束した。荷重条件については、試験体の頂部に、降伏軸力の10%を鉛直载荷した状態で、図-3(a)に示した漸増正負繰り返し载荷(±9δ)を水平変位として作用させた。数値解析には、汎用有限要素法プログラムMarc2013を用いて、弾塑性有限変位解析を行った。

(2) トラス要素を用いた炭素繊維シートのモデル化

図-4(b)に示すように炭素繊維シートは2節点軸力要素でモデル化した。炭素繊維シートは、樹脂が含浸して硬化すれば圧縮力にも抵抗できるが、部分的にはく離れた状態で、圧縮力が作用した場合には、部材として薄いため、十分に抵抗できないと判断し、非抗圧性(圧縮力には抵抗しない性質)を考慮してモデル化した。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。はく離はモデル化していない。軸力要素の剛性は、図-5に示すとおり、積層した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。

$$B \times t_f \times 7 \quad (\text{炭素繊維シートの積層数}) \quad (6)$$

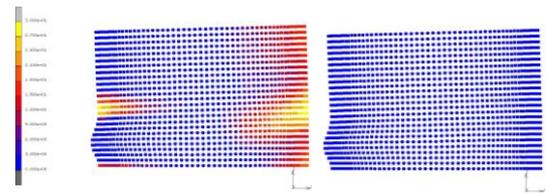
なお、炭素繊維シート巻立てに用いる樹脂については、鋼部材に接着され一体化される点で重要な材料であるが、力学的な寄与のほとんどは炭素繊維シートであるため、単純なモデル化として炭素繊維シートのみのも物性値を用いている。

また、表-2に炭素繊維シートの材料物性値を示す。炭素繊維シートのヤング率は平均値であり、引張強度はメーカーの特性値である。破断ひずみは、引張強度まで線形挙動を呈すると仮定して、引張強度とヤング率の関係から算定した。

4. 炭素繊維シート補修のモデル化

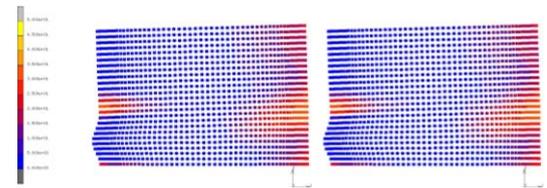
(1) 補修のモデル化

補修モデルの载荷プログラムは、図-3(a)に示す水平変位を入力した。補修モデルの炭素繊維シートは、補修モデルと同様の2節点非抗圧軸力要素を使用した。補修モデルでは、はじめに軸力要素を無効にした状態で一次载荷を行い、モデルに所定の損傷を与えた。その後、水平荷重を除荷したうえで、軸力要素を有効化し、再び漸増繰り返し载荷を行った。なお、解析における所定の損傷は実験時と同様に、最大荷重がピーク時の95%まで低下し、局部座屈が目視で確認できる領域(±6δ)として



(a) 応力初期化なし (b) 応力初期化あり

図-6 軸力要素有効化時のCFシートの周方向応力



(a) 応力初期化なし (b) 応力初期化あり

図-7 軸力要素を有効化した次のステップの周方向応力

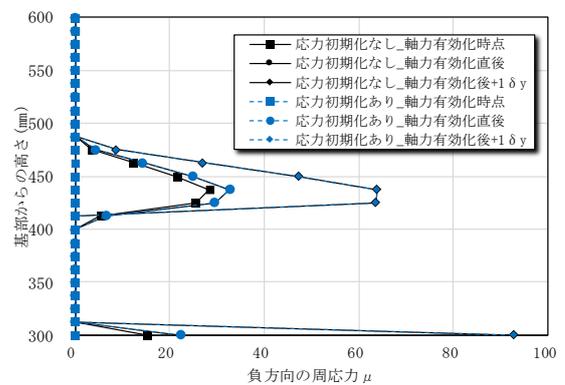


図-8 応力の初期化の影響

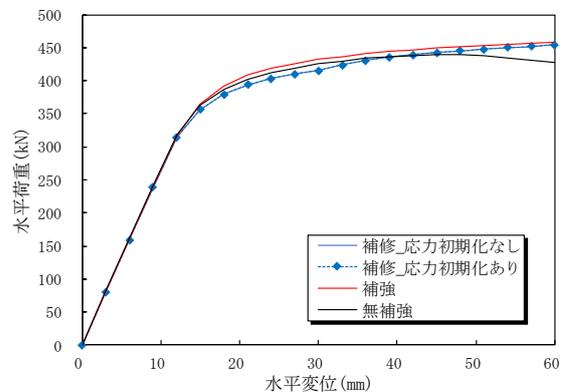


図-9 プッシュオーバー解析

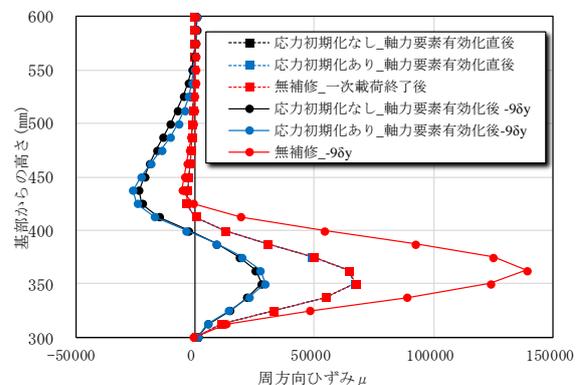


図-10 負方向の周ひずみ分布

いる。

(2) 軸力要素有効化の際の力の再配分の影響の確認

炭素繊維シート巻立ての際には、座屈損傷した円形鋼管製橋脚に、炭素繊維シートを手作業で貼付けるため、炭素繊維シートの樹脂が効果した時点では、炭素繊維シートには力はかからない。一方で、補修の解析においては、2節点軸力要素を有効化する際に、鋼管に発生していた応力が2節点軸力要素に再配分される。その際に、モデル化の妥当性として、2節点軸力要素が負担する応力の影響を確認するために、プッシュオーバー解析を用いて、軸力要素を有効化した時点での、応力の初期化の有無についてそれぞれモデルを作成し、比較を行った。

図-6に、軸力要素有効化時のCFシートの周方向応力を示す。コンター図より、2節点軸力要素を有効化した時点で、応力初期化モデルでは、炭素繊維シートに発生している応力が初期化されている。その後、図-7より、炭素繊維シートに発生する応力は初期化しない場合とほぼ同様の結果となることからわかる。図-8に、基部からの高さによる、炭素繊維シートの周方向の応力分布として、炭素繊維シートに発生する応力の詳細を示している。応力の初期化による影響が小さい理由としては、一次荷重の時点で、鋼管が降伏しており、周方向の力のほとんどを2節点軸力要素が受け持つこと、また、有効化の際における応力の再配分で、2節点軸力要素に配分される応力が比較的小さいことなどが考えられる。

図-9に、無補強、補強、補修（応力初期化なし）、補修（応力初期化あり）の各解析モデル頂部の水平荷重-水平変位関係を示す。プッシュオーバー解析の結果、補修（応力初期化なし）と補修（応力初期化あり）では、水平耐力は同様の結果となることからわかる。

図-10に、補修モデルの鋼管のひずみ分布を示す。応力の初期化の有無により、補修後の $-9\delta_y$ 終了後における周方向ひずみが若干異なることがわかる。さらに、2節点軸力要素の補修効果を確認するため、同様のプログラムで、補修を行わない鋼管のみのモデルの解析を行った。その結果、補修を行わない場合、鋼管のひずみは補修モデルより大きく増加し、2節点軸力要素の効果が確認できる。

以上の結果より、2節点軸力要素によって炭素繊維シートの周方向拘束効果を再現できると考えられる。また、2節点軸力要素の有効化の際の、応力の再配分の影響は小さいと考え、補修のモデルは簡便な補修（応力初期化なし）モデルを採用した。

5. 解析結果と考察

(1) 座屈モードの比較

炭素繊維シート巻立て補強を行った試験体の損傷の状

況を比較する。実験では、 $\pm 9\delta_y$ の範囲内では、炭素繊維シートに変化は確認されなかった。また、 $+9\delta_y$ 付近で、基部から400mmの位置で内側に入り込む変形が発生し、荷重終了後には図-11のような4波のダイヤモンド座屈が形成された。解析では、 $-5\delta_y$ 付近で基部から375mmの位置で、内側に入り込む変形が発生し、その後も頂部の水平変位が増加するとともに変形量は増加し、荷重終了後には図-13(a)のようになった。荷重終了後の残留変位は46.4mmであり、座屈モードは実験時と同様のダイヤモンド座屈であった。

図-12に炭素繊維シート巻立てによる補修を行った実験の試験体の損傷状況を示す。まず、補修前に、 $\pm 6\delta_y$ ま

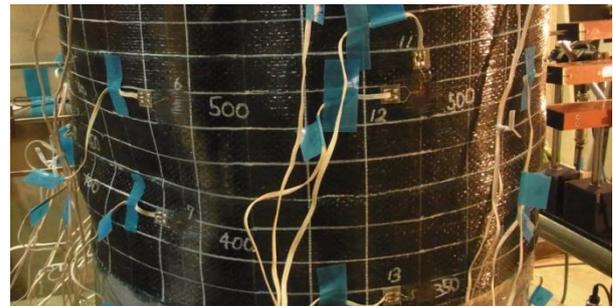
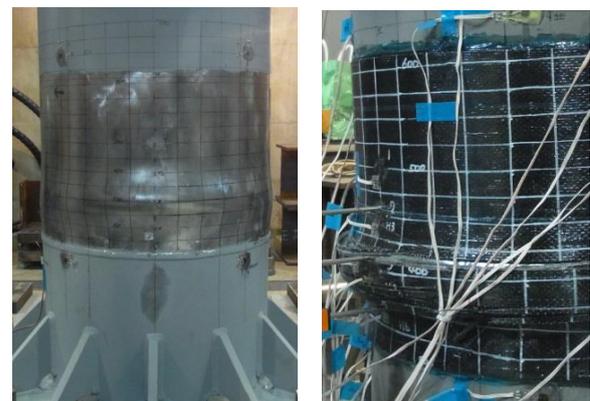
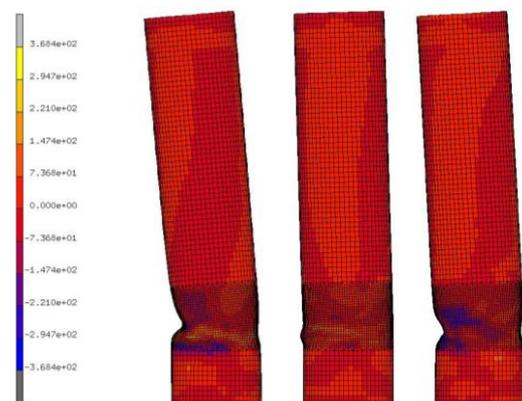


図-11 補強した試験体のダイヤモンド座屈（4波）の状況



(a) 補修前の残留変位 ($\pm 6\delta_y$ 荷重後) (b) $-7\delta_y$ の荷重時

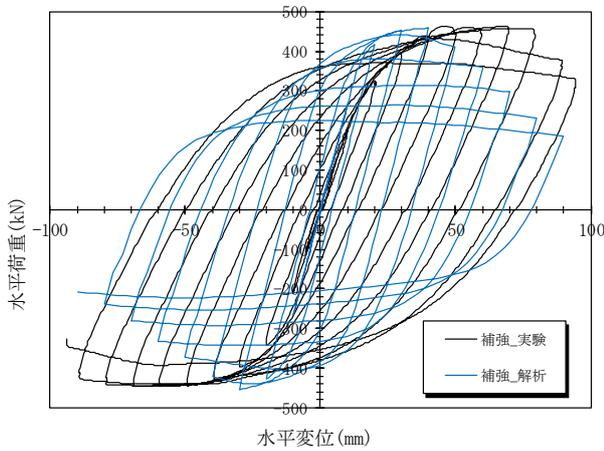
図-12 補修実験の状況



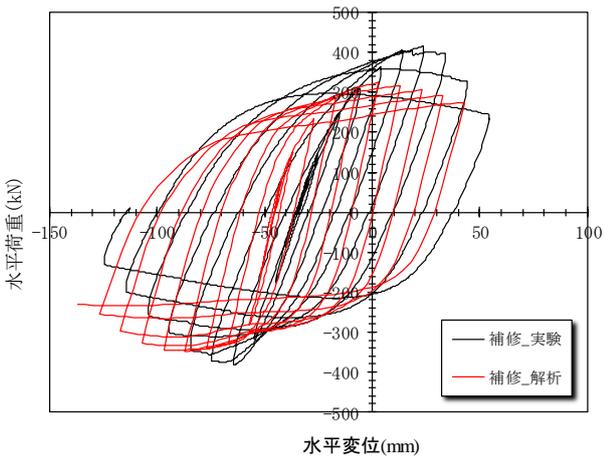
(a) 補強 ($-9\delta_y$) (b) 補修（一次荷重終了後）(c) 補修 ($-9\delta_y$)

図-13 補修実験の状況

で一次荷重を行った結果、基部から 400mm の位置に提灯座屈が形成された (図-12(a))。-6 δ_y に到達した後、水平荷重を除荷した時、試験体頂部の残留水平変位は 35.2mm であった。次に、補修後の荷重では、+1 δ_y 荷重途中で樹脂が割れる音が発生し、+2 δ_y で、炭素繊維シート中のガラス繊維の部分に破損した。+3 δ_y で、正側において基部から 410mm の位置で周方向に割れが発生し、+5 δ_y で、基部から 370mm の位置で長さ 200mm にわたって周方向の割れが発生した。その後も周方向の割れや部分的な離れが徐々に進展し、-7 δ_y で、正面側の座屈部の炭素繊維シートが、鋼材の座屈部の曲げを追従できず全てはく離した。この時、炭素繊維シートは、プライマーとの界面ではなく離れ、鋼材の表面が目視で確認できた。+8 δ_y で、基部からの高さ 375~450mm の範囲の炭素繊維シートがほぼ全て破壊された⁷⁾。



(a) 補強



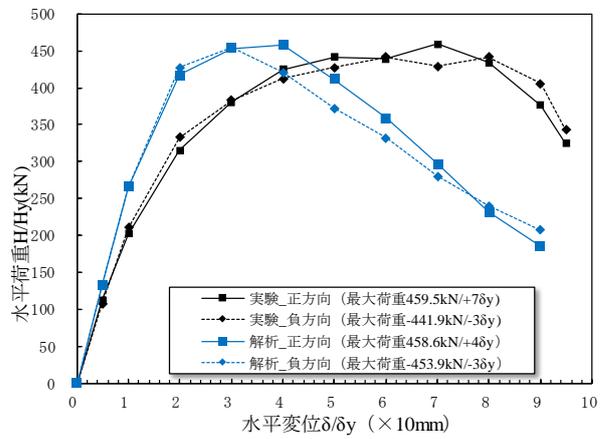
(b) 補修

図-14 水平荷重と水平変位の関係

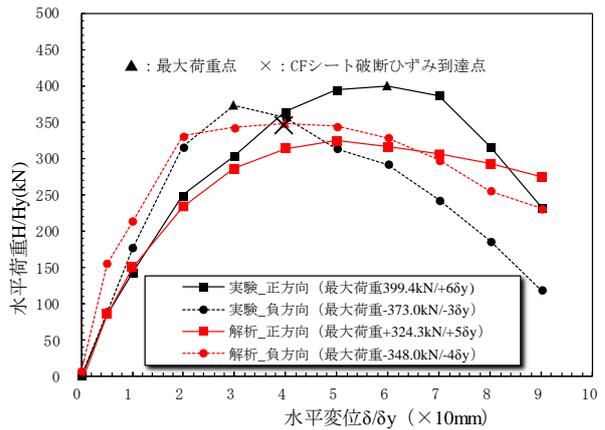
表-3 最大・最小水平荷重の比較

試験体	正・負	実験 (kN)	解析 (kN)
補強	正	459.5	458.6
	負	-441.9	-453.9
補修	正	399.4	324.3
	負	-373.0	-348.0

図-13 に炭素繊維シート巻立て補修の解析結果の状況を示す。一次荷重では、図-13(b)のように基部から 375mm の位置に提灯座屈が形成された。一次荷重終了後の残留水平変位は約 15.5mm であった。その後、2 節点軸力要素を有効化し、再度荷重を行うと、+5 δ_y 付近で、提灯座屈の根元付近に位置する、基部から 450mm の位置で、内側に入り込む座屈が発生した。その後、荷重を続けると内側に入り込むように座屈変形が生じ、荷重終了後には図-13(c)のように、内側に大きく入りこむ座屈モードが形成された。炭素繊維シートは、簡便なモデル化のために圧縮力には抵抗しない部材としている。鋼管内側へ変形は、炭素繊維シートが圧縮力を受ける方向への作用に基づくものである。したがって、このようなモデル化では、炭素繊維シートの効果を過小に評価されていると考えられ、実験と解析で変形モードが異なる要因と推察された。



(a) 補強



(b) 補修

図-15 H/H_y と δ/δ_y の関係

表-4 エネルギー吸収率の比較

試験体	正・負	実験	解析
無補強	正	1.000	-
	負	1.000	-
補強	正	1.169	1.073
	負	1.266	1.130
補修	正	0.957	0.849
	負	0.904	1.031

以上の結果より、2 節点軸力要素を用いた、補強モデルでは、変形量には差が見られるものの、座屈位置やモードについては概ね表現できることがわかった。

補修モデルでは、補修前の一次载荷のモードはある程度再現できるのに対し、補修後の損傷の様子には大きな違いがみられることが分かる。これは、実験の際には、補修後の载荷の途中で、炭素繊維シートのはく離や周方向の割れが発生しているのに対し、軸力要素のみを用いた解析モデルでは、プライマーと炭素繊維シートの境界でのはく離や、炭素繊維シートの割れを表現できないためだと考えられる。また、水平変位が増加すると、炭素繊維シートの剛性による、周方向拘束効果の影響で、鋼管が内側に入り込むようなモードに変形することも原因と考えられる。

(3) 水平荷重と水平変位の関係

図-14 に、各試験体の実験と解析における水平荷重 H と水平変位 δ の関係を、表-3 に、最大・最小水平荷重をそれぞれ示す。

図-14(a)の補強試験体の結果より、実験時の最大荷重は正側で 459.5kN (+7 δ_y)、負側で-441.9kN (-6 δ_y) となった。一方、解析モデルでは最大荷重は正側で 458.6kN (+4 δ_y)、負側で-453.9kN (-3 δ_y) となった。実験と解析の結果を比較すると、最大荷重時の水平変位は異なるものの、最大荷重は概ね一致した。

図-14(b)の補修の結果より、補修後の実験時の最大荷重は正側で 399.4kN (+6 δ_y)、負側で-373.0kN (-3 δ_y) となった。一方、解析モデルでは最大荷重は正側で 324.3kN (+5 δ_y)、負側で-348.0kN (-4 δ_y) であり、正側の最大荷重に大きな差が見られた。これは、実験と解析で補修後の座屈モードが異なることが原因と考えられる。負側においても最大荷重は一致しなかった。

(4) エネルギー吸収率による性能回復の比較

図-15には、水平荷重と水平変位の関係から包絡線を求め、両軸を無次元化したものを示す。縦軸は降伏水平荷重 H_y で、横軸は降伏水平変位 δ_y でそれぞれ除して無次元化している。図中には、補強、補修それぞれの実験と解析の結果を併記している。補強の解析モデルでは、水平変位が+5 δ_y より大きくなると解析結果の方がエネルギー吸収能を小さく評価していることがわかる。また、補修の解析モデルにおいては負方向では、概ね挙動を再現できているものの、正方向のエネルギー吸収能を小さく評価していることがわかる。これも、前述したとおり、補修後の座屈モードが実験時と大きくことなることによる結果と考えられる。

表-4に、エネルギー吸収率の比較を示す。補強、補修の実験および解析のエネルギー吸収率を、正負それぞれ、

無補強の実験結果のエネルギー吸収率と比較している。解析結果より補強モデルでは、エネルギー吸収率は正側、負側ともに10%程度の差が見られる。また、補修モデルでは、実験結果と比較して、正側では約10%小さくなり、負側では10%増加する結果となった。

また、補修モデルにおいては、補修後の-4 δ_y で、2節点軸力要素が一部破断ひずみに達していた。そのため、解析によるエネルギー吸収率は、本モデルよりさらに低下すると予想される。

以上の結果より、本検討の2節点軸力要素を用いた簡易なモデルによる解析手法では、最大荷重についてはある程度予測できるものの、エネルギー吸収率の評価は難しいことがわかる。炭素繊維シート巻立て耐震補強の弾塑性挙動を正確に把握するためには、水平変位が増加した範囲における、炭素繊維シートの圧縮特性や破壊挙動をより正確にモデル化する必要がある。また、今回の検討では橋脚の構成則として移動硬化則を用いたが、塑性域での履歴は構成則のモデル化の影響が大きいため、今後検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では、先行研究として行った、座屈損傷した円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立て補強および、補修に関して解析的な検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- (1) 2 節点非抗圧軸力要素を用いた、円形鋼製橋脚の炭素繊維シート巻立て補強の解析モデルでは、最大荷重については概ね評価することが可能であることがわかった。しかし、水平変位が増加したときの耐荷力やエネルギー吸収率については、実験と解析で大きな差がみられる。
- (2) 座屈損傷した円形鋼製橋脚の炭素繊維シート補修解析では、2 節点軸力要素を有効化した際に、再分配される応力の影響は小さいことが分かる。よって、2 節点軸力要素を有効化する際の応力の初期化に関しては、ある程度無視することができるため、より簡便なモデル化が可能である。
- (3) 2 節点軸力要素を用いた補修モデルでは、補修後の水平変位が小さい範囲では、概ね挙動を再現できることがわかる。しかし、水平変位が増加するにつれて、座屈モードやエネルギー吸収率に大きな差が見られる。補修の実験の際には、座屈した箇所に巻立てた炭素繊維シートは、はく離や割れを伴う複雑な挙動をしており、簡易なモデル化による解析手法では、10%程度の誤差を有することが予想される。

今後の課題としては、水平変位が増加した範囲での弾塑性挙動をより詳細に把握するためのモデル化が挙げられる。特に、炭素繊維シートと樹脂が一体化した場合の圧縮抵抗力や、炭素繊維シートのはく離、炭素繊維シートが破断ひずみに達した際の挙動について、正確なモデル化が必要といえる。

参考文献

- 1) 阪神高速道路管理技術センター編：大震災を乗り越えて震災復旧工事誌，阪神高速道路公団，1997.9
- 2) 土木学会コンクリート工学委員会：連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，コンクリートライブラリ 101，2000.7
- 3) (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
- 4) 渡辺貴之，石田圭吾，林和彦，山口隆裕，池田尚治：炭素繊維シートを用いた鋼製橋脚の耐震補強，構造工学論文集，Vol.48A，pp.725-734，2002.3
- 5) 松村政秀，北田俊行，徳林宗孝，池田啓士，岡田崇：炭素繊維シートを円周方向に貼付する橋脚鋼管柱の耐震補強に関する実験的研究，土木学会論文集No.766/I-68，pp.17-31，2004.7
- 6) 小室雅人，岸徳光，三上浩，西弘明：AFRP シート巻き付けによる実規模鋼管橋脚の耐震補強に関する静載荷実験，構造工学論文集，Vol.52A，pp.1327-1336，2006.3
- 7) 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.69-83，2017.2
- 8) 後藤芳顕，王慶雲，高橋宣男，小畑誠：繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と材料構成則，土木学会論文集，No.591，I-43，pp.189-206，1998.4
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，pp.225-230，2012.3

ELASTO-PLASTIC BEHAVIOR ANALYSIS BY GRADUALLY REPEATING HORIZONTAL FORCE FOR CIRCULAR STEEL BRIDGE PIER BY EXTERNALLY BONDED CARBON FIBER SHEET

Naoto OKAZAKI, Hitoshi NAKAMURA, Yusuke KISHI and Takahiro MATSUI

This study carried out cyclic loading for steel bridge pier by FE analysis in order to evaluate reinforcement effect and performance recovery of the externally bonded carbon fiber sheet. Experiments of previous research have been conducted to apply a constant axial force of 10% the yield axial force and a gradually increasing repetitive horizontal force to the top of the specimen. Verification targets are following: one is the specimen reinforced by carbon fiber sheets, other is the buckled specimen repaired by carbon fiber sheets. The carbon fiber sheet was modeled by a truss element considering non-anti-pressure property (resistless for compression force). As a result, the reinforcement model can quantitatively evaluate the horizontal loading capacity and buckling mode. In the repaired model, it was confirmed that the horizontal loading capacity can be approximately evaluated in the range where the horizontal displacement is small.