

# AFRP シート巻き付けによる大型鋼管橋脚の耐震補強に関する実験的検討

Experimental study on aseismic retrofit for large-scale steel-pipe bridge piers winded with AFRP sheet

室蘭工業大学	正員	小室 雅人	(Masato Komuro)
室蘭工業大学	フェロー	岸 徳光	(Norimitsu Kishi)
三井住友建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
(独)北海道開発土木研究所	正員	西 弘明	(Hiroaki Nishi)
室蘭工業大学	○学生員	山田 純平	(Junpei Yamada)

## 1. はじめに

著者らは、円形断面鋼製橋脚の合理的な耐震補強工法の開発を目的に、アラミド繊維 (AFRP) シート巻き付け接着工法を提案し、直径 10 cm 程度の小型あるいは直径 26 cm 程度の中型鋼管橋脚模型を用いた静荷重実験によってその有効性を確認してきた<sup>1),2)</sup>。その結果、1) 鋼製橋脚の耐荷力は、局部座屈の発生とともに低下すること、2) AFRP シートを橋脚外面に巻き付けることにより、その拘束効果によって橋脚に発生する局部座屈を抑制・遅延させることが可能となり、変形性能を飛躍的に向上させることができること、また、3) 補強後の最大耐荷力の増加率は 20 % 程度であり、過度な耐力増加を抑えることが可能であることから基礎に対する負担が大きくなること、等を明らかにしている。しかしながら、これらの知見は室内レベルの試験体を用いて得られたものであり、提案の補強工法を実構造物に適用するためには、実物大の橋脚模型を用いて施工性や耐震性能向上効果等を検証する必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、提案の補強工法の実橋脚レベルへの適用性の検証を目的として、直径 60 cm、高さ 4 m 程度の大型鋼管橋脚模型を対象に、2 方向 AFRP シートを巻き付け接着した試験体 (以後、単にシート補強) を製作し、静的単調および漸増繰返し載荷実験を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

図-1 および表-1 には、試験体の形状寸法および各パラメータを示している。試験体の鋼管部は、外径 600 mm、厚さ 12 mm の既製鋼管を用い、その基部は剛体変形を可能な限り抑制するため、図-1 に示すように底板上面から約 400 mm の位置に外ダイヤフラム (外径 800 mm、板厚 22 mm) を、および外ダイヤフラムと底板の間に補剛リブ (板厚 22 mm) を溶接している。

試験体に巻き付け接着する AFRP シートに関しては、既往の研究成果<sup>2)</sup>を参考にシート補強割合  $\rho$  (単位幅当たりの鋼材の一軸降伏耐力に対するシートの引張耐力の比) が  $\rho \geq 1.0$  となるように、保証耐力が 490 kN/m の 2 方向 AFRP シートを試験体の基部から上方に向かって 50 cm ごとに 10, 8, 6, 3 層と段階的に減少させて巻き付けている。なお、外ダイヤフラム上面 (以後、単に基部) から 50 cm の高さ (シート層数: 10 層) におけるシート補強割合は  $\rho \approx 1.1$  である。

表-2 には試験体名および実験条件を示している。試験体名は、補強工法および載荷方法が容易に明らかになるよ

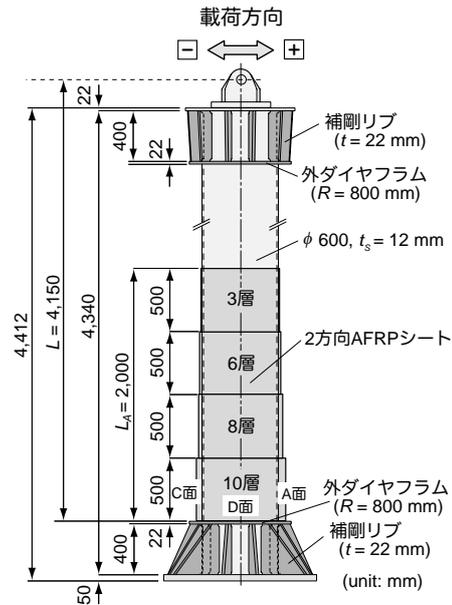


図-1 試験体の形状寸法および各パラメータ

表-1 試験体の形状寸法および各パラメータ一覧

荷重点 高さ *1	板厚中心 半径	板厚	細長比 パラメータ *2	径厚比 パラメータ *3
L (mm)	R (mm)	t <sub>s</sub> (mm)	$\bar{\lambda}$	R <sub>t</sub>
4,150	294	12	0.546	0.075

\*1 試験体基部から荷重作用位置までの高さ

$$*2 \bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}, *3 R_t = \frac{R}{t_s} \frac{f_y}{E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)}$$

表-2 試験体名および実験条件

試験体名	AFRP シート			降伏水平 荷重 H <sub>y</sub> (kN)	実験降伏 水平変位 δ <sub>yE</sub> (mm)
	層数 L <sub>n</sub>	高さ L <sub>A</sub> (mm)	補強割合 ρ *1		
LN-m, -c	0	0	0.00	239.8	58.6
LA-m, -c	10	2,000	1.08		

$$*1 \rho = f_{ua} t_a L_n / f_y t_s$$

うに、第 1 項目は補強工法 (LN: 無補強, LA: AFRP シート巻き付け) を、第 2 項目は載荷方法 (m: 単調載荷実験, c: 繰返し載荷実験) を示している。

表-3 には、本実験で使用した鋼材 (SKK400 材) の材料特性を示している。鋼材の材料特性は、試験体から JIS 5 号試験片を製作し引張試験により求めている。また、表-4

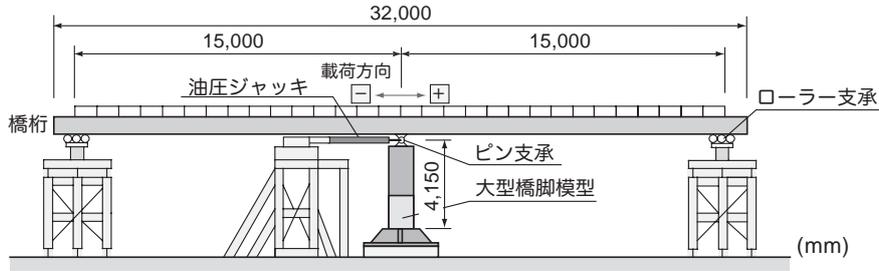


図-2 実験装置の概要

表-3 鋼材の力学的特性 (SKK400)

降伏応力 *1 $f_y$ (MPa)	ポアソン ン比 $\nu_s$	弾性係数 $E_s$ (GPa)	引張強度 $f_t$ (MPa)	降伏ひずみ $\epsilon_y$ ( $\mu$ )
380	0.3	206	452	1,845

\*1 降伏応力は 0.2% 耐力から算出

表-4 AFRP シートの 1 方向の力学的特性 (公称値)

目付量 *1 ( $g/m^2$ )	厚さ $t_a$ (mm)	引張強度 $f_{ua}$ (MPa)	弾性係数 $E_a$ (GPa)	ポアソン比 $\nu_a$	破断ひずみ $\epsilon_{ua}$ (%)
870	0.24	2,060	118	0.4	1.75

\*1 目付量は 2 方向の場合の値



写真-1 実験風景

には、本実験で使用したエポキシ樹脂によって含浸硬化された AFRP シートの 1 方向の材料特性を示している。

## 2.2 実験装置および実験条件

図-2 には、本実験で使用した実験装置の概要を示している。実験は、(独)北海道開発土木研究所が所有する全長 32 m の実規模二径間連続橋の中央部に試験体を設置し、上部工の自重による軸力載荷後、ストローク 1,200 mm の油圧ジャッキを 2 本使用して、変位制御方式により橋軸方向に水平荷重を作用させている。水平荷重の載荷位置は、試験体天端に設置されたピン支承部とし、その位置は基部から 4,150 mm の高さである。

試験体に作用する鉛直荷重  $P$  は、上部工の自重で与えることとし、 $P=833$  kN を載荷している。この荷重は降伏軸力に対して 9.9% 程度であり、実験前に中間支点上にロードセルを設置し計測した実測値である。写真-1 には、実験風景を示している。

実験は水平変位制御方式により、2 種類の載荷方法で行った。すなわち、1) 一方向に変位を単調増加させる (以後、単調載荷) 実験および 2) 1 サイクルごとの漸増変動変位による繰り返し載荷 (以後、繰り返し載荷) 実験である。繰り返し載荷方法は、無補強試験体 (LN-m 試験体) における単調載荷実験結果から得られた降伏水平変位  $\delta_{yE}$  (以後、単に実験降伏水平変位) を基準にして、各サイクルで水平変位  $\delta$  をその整数倍に漸増させながら正負方向に繰り返し与えている。なお、変位振幅の基準となる実験降伏水平変位  $\delta_{yE}$  は、無補強試験体 (LN-m 試験体) の基部近傍に貼付したひずみゲージ出力より鋼材が降伏したときの水平変位として求めている。なお、LN-m 試験体における実験降伏水平変位  $\delta_{yE}$  は 58.6 mm であり、そのときの水平荷重 (以後、降伏水平荷重  $H_y$  と定義する) は 239.8 kN であった。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 局部座屈発生状況

写真-2 には、各試験体における実験終了後の基部近傍の局部座屈状況を示している。写真-2 (a) より、単調載荷実験における LN-m 試験体は、曲げ圧縮側面において基部から高さ 110 mm 程度の位置で、外側に凸状となる局部座屈 (以後、EFB 型座屈) が発生していることが分かる。一方、シート補強した LA-m 試験体に関しては、シートの拘束効果によって外側に凸状となる EFB 型の局部座屈は発生せず、基部より高さ 180 mm 付近において、内側に入り込むような局部座屈 (以後、DP 型座屈) が発生している。

一方、写真-2 (b) より、繰り返し載荷実験における座屈状況に着目すると、LN-c 試験体は、基部から 110 mm 程度の位置で中心軸に対して対称な EFB 型の局部座屈が発生しているのに対し、シート補強した LA-c 試験体はいずれも基部より高さ 180 mm 付近が内側に入り込むような DP 型の局部座屈が発生し終局に至っていることが分かる。

以上より、本実験の範囲内では、AFRP シートを巻き付けることによって、載荷方法にかかわらず基部近傍に発生する局部座屈の形状は EFB 型から DP 型となることが明らかになった。

### 3.2 単調載荷実験

図-3 には、単調載荷実験における水平荷重-水平変位曲線を試験体毎に比較して示している。縦軸、横軸は、それぞれ降伏水平荷重  $H_y$  および実験降伏水平変位  $\delta_{yE}$  を用いて無次元化している。

図より、両試験体の初期剛性に着目すると、シート補強

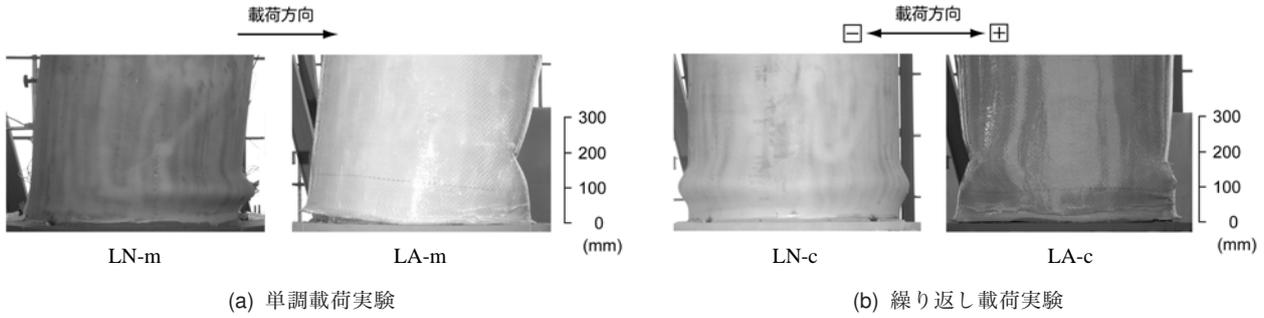


写真-2 実験終了後における基部近傍の局部座屈状況

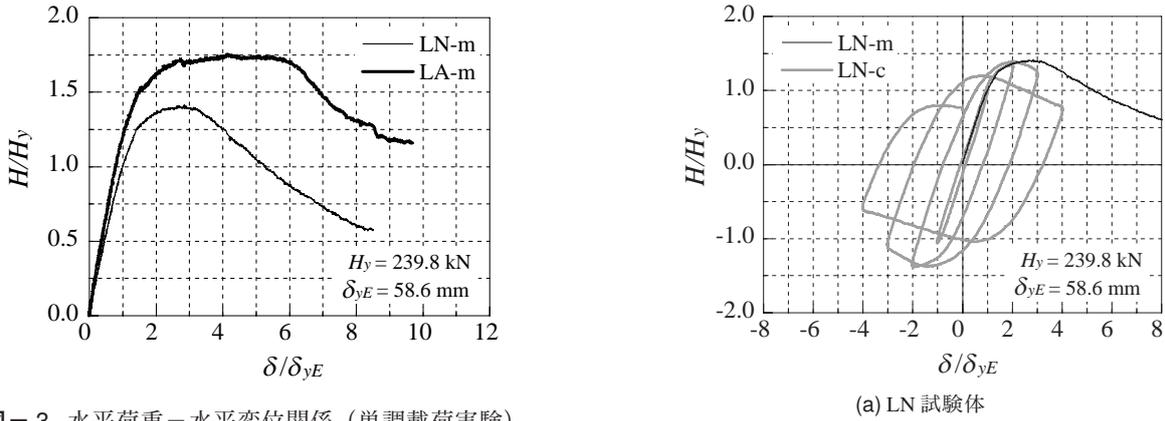


図-3 水平荷重-水平変位関係 (単調荷重実験)

した LA-m 試験体が無補強の LN-m 試験体よりも若干大きく示されている。これは、試験体に 2 方向 AFRP シートを巻き付けることによって、軸方向に対する補強効果が発揮されたためと考えられる。また、 $H/H_y \geq 1.25$  において、無補強の LN-m 試験体の場合には、その剛性勾配が徐々に低減しながら、 $\delta/\delta_{yE} \approx 3$  で最大荷重値  $H_m/H_y = 1.42$  に到達し、その後基部近傍に発生した EFB 型の局部座屈の成長によって荷重が徐々に低下している。一方、シート補強した LA-m 試験体の場合には、 $H/H_y \geq 1.5$  において剛性勾配が徐々に低下するものの、荷重は緩やかに増大し、無補強の LN-m 試験体の最大荷重時変位 ( $\delta/\delta_{yE} \approx 3$ ) 付近からほぼ最大荷重レベルを保ちながら変形が進行し、最終的には  $\delta/\delta_{yE} \approx 6$  で基部近傍に内側に入り込むような DP 型の局部座屈が発生し、荷重が低下している。

### 3.3 繰り返し荷重実験

図-4 には、繰り返し荷重実験における各試験体の無次元水平荷重-無次元水平変位曲線を単調荷重実験結果と比較する形で示している。

図-4 (a) に示す無補強の LN-c 試験体に着目すると、3 サイクル目の  $\delta/\delta_{yE} \approx 2$  で最大荷重値  $H_m/H_y \approx 1.39$  を示し、その後荷重が低下している。一方、シート補強した LA-c 試験体 (b 図) の場合には、3 サイクル目までほぼ最大値  $H_m/H_y \approx 1.7$  を示し、4 サイクル目まで荷重の低下が見られずほぼ一定値を示している。その後、基部近傍に発生した局部座屈の成長とともに荷重が低下し、最終的には 6 サイクル目で終局に至っている。

図-5 には、各試験体における無次元水平荷重-無次元水平変位曲線の包絡線を示している。なお、図には単調荷重実験結果も併せて示している。図より、単調荷重と繰り返し荷重実験結果を比較すると、最大荷重値は両者でほぼ

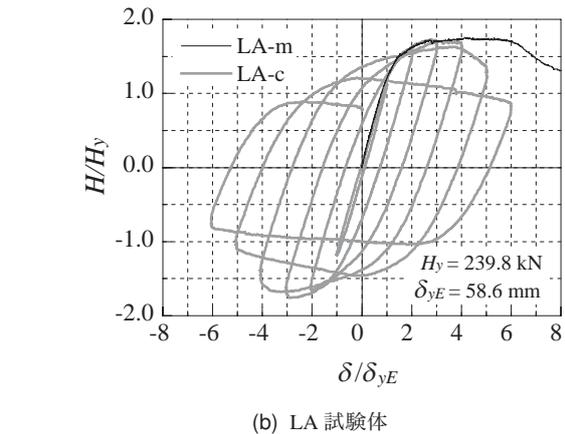


図-4 水平荷重-水平変位関係 (繰り返し荷重実験)

等しい値を示しているものの、最大荷重値到達後の剛性低下は、後者の方が前者よりも大きいことが分かる。これは、繰り返し荷重の影響によって、局部座屈が単調荷重時と比較して早期に成長するためと考えられる。

### 3.4 履歴エネルギー吸収量

図-6 には、繰り返し荷重実験におけるサイクル毎の無次元エネルギー吸収量を示している。なお、無次元エネルギー吸収量は、サイクル毎の全エネルギー吸収量を弾性エネルギー  $E_e = H_y \delta_{yE} / 2$  を除して算出している。

図より、シート補強の有無にかかわらず、3 サイクル目まではほぼ同一の分布特性を示している。しかしながら、4 サイクル目以降では、その分布特性に大きな差異が見られる。すなわち、LN-c 試験体の場合にはその増加率が小さく示しているのに対し、シート補強した LA-c 試験体の場合にはその増加率が変化せず、未だ大きなエネルギー吸

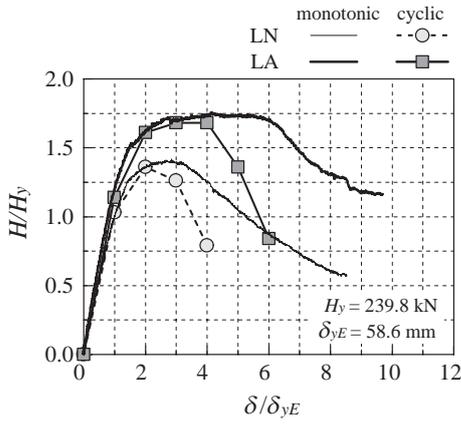


図-5 包絡線の比較

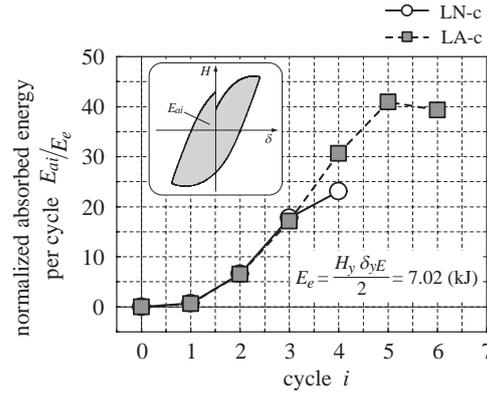


図-6 各サイクルにおける無次元エネルギー吸収量

表-5 最大荷重および塑性率一覧

試験体名	最大荷重 $H_m$ (kN)	無次元最大荷重 $H_m/H_y$	$\delta_{95}^*1$ (mm)	塑性率 $\mu_{95}$ ( $= \delta_{95}/\delta_{yE}$ )	座屈形式*2	座屈発生位置	
						圧縮側 (A面)	引張側 (C面)
(a) 単調載荷実験							
LN-m	339.3	1.42 (1.00)*3	198.8	3.39 (1.00)	EFB	110	-
LA-m	421.5	1.76 (1.24)	361.2	6.16 (1.82)	DP	180	-
(b) 繰り返し載荷実験							
LN-c	334.2	1.39 (1.00)	139.1	2.37 (1.00)	EFB	110	110
LA-c	414.6	1.73 (1.24)	241.2	4.12 (1.74)	DP	180	180

\*1 最大荷重  $H_m$  から  $0.95H_m$  まで低下した時点の変位

\*2 EFB: 外側に凸状となる局部座屈 (象の脚型座屈), DP: 内側に入り込むような局部座屈 (ダイヤモンド型座屈)

\*3 ( ) 内の値は無補強試験体 (LN-m/LN-c) に対する割合

取能を有していることが分かる。

### 3.5 最大荷重および塑性率の比較

表-5には、各試験体の最大荷重値  $H_m$ 、塑性率  $\mu_{95}$ 、座屈形態およびその発生位置を一覧にして示している。なお、塑性率  $\mu_{95}$  は、前述の図-3に示す単調載荷時の水平荷重-水平変位曲線からも分かるように、シート補強試験体の場合には、無補強試験体の場合と異なり、最大荷重と同程度の荷重レベルを持続したまま変形が進行することを踏まえ、水平荷重が最大荷重値  $H_m$  に到達後、その95%まで低下した時点での変位  $\delta_{95}$  と実験降伏水平変位  $\delta_{yE}$  との比をとり、 $\mu_{95} = \delta_{95}/\delta_{yE}$  として評価している。

表-5(a)より、単調載荷実験結果に着目すると、各試験体における無次元最大荷重値  $H_m/H_y$  は、無補強のLN-m試験体で  $H_m/H_y = 1.42$  であるのに対し、シート補強したLA-m試験体では1.76であり、その増加率は24%となっている。一方、LA-m試験体の塑性率  $\mu_{95}$  はLN-m試験体のそれと比較して、1.8倍程度向上している。これは、前述のように2方向AFRPシートによる軸方向の補強効果と周方向の拘束効果に起因しているものと考えられる。

表-5(b)より、繰り返し載荷実験結果の最大荷重に着目すると、無補強のLN-c試験体の場合には  $H_m/H_y = 1.39$ 、シート補強のLA-c試験体の場合には  $H_m/H_y = 1.73$  を示しており、単調載荷時の場合と概ね一致した値となっている。また、シート補強のLA-c試験体の塑性率  $\mu_{95}$  は、無補強のLN-c試験体の約1.7倍を示しており、シートを巻き付け接着することにより変形性能が向上していることが分かる。

以上より、本実験の範囲内では、シートを適切に巻き付け補強することにより、載荷方法にかかわらず、無補強試験体と比較して最大荷重の上昇を1.2倍程度に抑え、変形性能を1.7倍程度向上させることができることが明らかになった。

### 4. まとめ

- 1) 既往の研究成果と同様に、AFRPシートを鋼管橋脚外面に巻き付け接着することにより、シートの周方向の拘束効果によって、基部近傍に発生するEFB型の局部座屈を抑制することができる。
- 2) AFRPシートを巻き付けて補強した試験体は、無補強試験体と比較して最大耐力の上昇を1.2倍程度に抑え、変形性能を1.7倍程度向上させることができる。
- 3) 以上より、提案の補強工法は円形鋼管製橋脚の耐震補強工法の一つとして適用可能であることが明らかになった。

### 参考文献

- 1) 池田憲二, 岸 徳光, 小室雅人, 三上 浩: AFRPシート補強鋼管橋脚模型の静的載荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 9, pp. 513-520, 2001.11.
- 2) 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, 池田憲二: AFRPシートを巻き付け補強した鋼管橋脚模型の耐荷性状に関する静載荷実験, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1387-1398, 2004.3.