

AFRP シート巻き付けによる鋼管橋脚模型の耐震性能向上効果に関する一検討

Experimental study on aseismic performance for steel-pipe bridge piers winded with AFRP sheet

室蘭工業大学

室蘭工業大学

三井住友建設(株)

(独)北海道開発土木研究所

(株)ケイジーエンジニアリング

○正 員

小室 雅人

(Masato Komuro)

フェロー

岸 徳光

(Norimitsu Kishi)

フェロー

三上 浩

(Hiroshi Mikami)

正 員

西 弘明

(Hiroaki Nishi)

正 員

小澤 靖

(Yasushi Ozawa)

1. はじめに

近年、RC 構造物の補修、補強材料として広く利用されている炭素繊維やアラミド繊維などの新素材繊維シートを用いた鋼構造物の補強・補修工法の開発に関する研究が盛んに試みられている¹⁾。著者らも、特に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、種々の実験的研究を実施してきた^{2)~4)}。その結果、適切な量のアラミド繊維 (AFRP) シートを鋼製橋脚に巻き付け接着することにより、1) 外側に凸状となる局部座屈 (以後、EFB 型座屈) の発生を抑制し、内側に入り込むような局部座屈 (以後、DP 型座屈) に移行させることができ、かつ 2) 最大耐荷力の増加率を抑え、変形性能を向上させることが可能であることを実験的に明らかにしている。しかしながら、この耐震性能向上効果は、試験体寸法や鋼種 (鋼材の材料特性) 等によって異なることが予想されるため、これらの影響を把握しておくことは合理的な耐震補強工法を確立する上で非常に重要であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、円形鋼製橋脚に対する AFRP シート巻き付け接着工法の耐震性能におよぼす試験体寸法や鋼材の材料特性の影響について、既往の研究成果を用いて実験的に検討を行った。なお、ここでは、既往の研究成果^{2)~4)}を踏まえ、特に基部近傍に発生する局部座屈がシートの拘束効果によって内側に入り込む DP 型座屈となった試験体を対象に検討を行うこととした。

寸法、鋼種および各パラメータを示している。小型試験体は外径 $\phi 97.5$ mm、板厚 $t_s = 1.5$ mm、鋼管高さ $L' = 500$ mm、中型試験体は外径 $\phi 265.2$ mm、板厚 $t_s = 4.4$ mm、鋼管高さ $L' = 1,200$ mm、大型試験体は外径 $\phi 600$ mm、板厚 $t_s = 12$ mm、鋼管高さ $L' = 3,918$ mm である。また、各試験体には、終局時に基部近傍に発生する外側に凸状となる局部座屈を抑制するために、図に示すように 2 方向 AFRP シートを鋼管外面に所定の層数を巻き付け接着している。図 2 には、各試験体の真応力-真ひずみ関係を示している。図より、小型試験体の場合 (STPG370 材) には、明確な降伏棚があることが分かる。

表 2 には、試験体名および実験条件を一覧にして示している。試験体名の第 1 項は試験体寸法 (S: 小型, M: 中型, L: 大型試験体) とシート補強の有無 (N: 無補強, A: シート補強)、第 2 項は載荷方法 (m: 静的単調載荷実験, c: 静的漸増繰返し載荷実験) を意味している。なお、本研究では、既往の研究成果を踏まえ、終局時に基部近傍が内側に入り込むような DP 型の局部座屈が発生した試験体を対象に検討を行うことより、各試験体のシート補強割合 ρ (単位幅あ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) は、それぞれ $\rho = 0.59, 0.96, 1.08$ となっている。

2.2 実験方法

実験は、所定の軸力を載荷後、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返し載荷 (以後、繰返し

2. 実験概要

2.1 試験体

図 1 および表 1 には、本論文で使用する試験体の形状

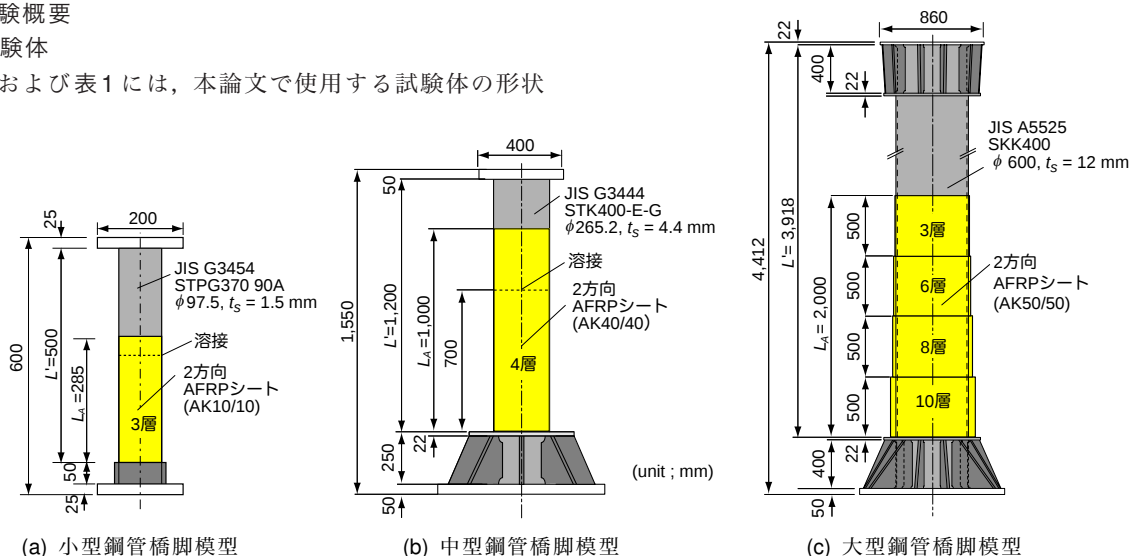


図 1 試験体の形状寸法

表 1 試験体の形状寸法および各パラメータ一覧

試験体名	鋼種	降伏応力 f_y (MPa)	荷重点高さ* ¹ L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	板厚中心半径 R (mm)	板厚 t_s (mm)	細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ * ²	径厚比パラメータ R_t * ³
S	STPG370	336	631.5	500	48	1.5	0.478	0.086
M	STK400	378	1,405	1,200	130.4	4.4	0.415	0.090
L	SKK400	380	4,150	4,300	294	12	0.546	0.075

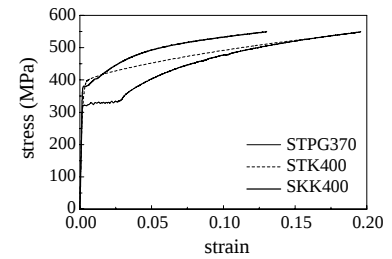
*¹ 荷重点高さ：試験体基部から荷重作用位置までの高さ。*² $\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}$, *³ $R_t = \frac{R}{t_s} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}} \sqrt{3(1-\nu_s^2)}$ 

図 2 真応力－真ひずみ関係

表 2 試験体名および実験条件一覧

試験体名	2方向AFRPシート* ¹				軸力 <i>P</i> (kN)	軸力比 <i>P/P_y</i> (%)	降伏 水平荷重 <i>H_y</i> (kN)	降伏水平変位	
	厚さ <i>t_a</i> (mm)	層数 <i>L_n</i>	高さ <i>L_A</i> (mm)	補強割合* ² <i>ρ</i>				実験値 <i>δ_{yE}</i> (mm)	解析値 <i>δ_y</i> (mm)
(a) 小型鋼管橋脚模型									
SN-m, c	0	0	0	0.59	11.8	7.8	5.25	4.898	4.109
SA-m, c	0.048	3	285						
(b) 中型鋼管橋脚模型									
MN-m	0	0	0	0.96	124	9.1	56.5	11.4	8.28
MA-m	0.193	4	1,000						
(c) 大型鋼管橋脚模型									
LN-m	0	0	0	1.08* ³	833	9.9	239.8	56.8	32.0
LA-m	0.240	10	2,000						

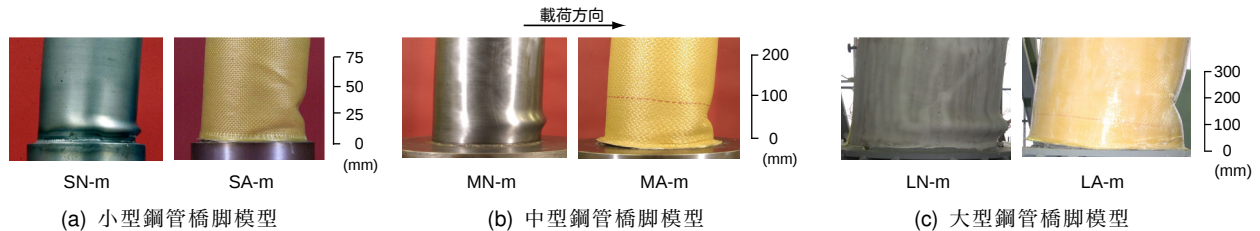
*¹ 弾性係数 $E_a = 118$ (GPa), 引張強度 $f_{ua} = 2,060$ (MPa)*² 補強割合 ρ ：単位幅当たりの鋼材の一軸降伏耐力に対するシートの引張耐力の比 ($\rho = \frac{f_{ua} t_a L_n}{f_y t_s}$).*³ 基部から高さ 50 cm 領域における補強割合。

写真1 実験終了後の局部座屈発生状況（単調載荷実験）

し載荷）実験の2種類を実施した。なお、繰り返し載荷方法は無補強試験体 (nN-m) における単調載荷実験結果から得られた降伏水平変位 δ_{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 δ 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。変位振幅の基準となる実験降伏水平変位 δ_{yE} は、1) 小型および中型試験体の場合には、無補強試験体 (SN/MN-m) の単調載荷実験結果をもとに、弾性は理論から計算される鋼管基部最外縁が降伏応力 f_y に達するときの水平荷重に相当する水平変位とし、2) 大型試験体 (LN-m) の場合には、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た。表2には各試験体の実験時降伏水平変位 δ_{yE} を示している。なお、実験装置等の詳細に関しては、文献2)～4)に譲ることとする。

3. 実験結果および考察

3.1 単調載荷実験

写真1には、単調載荷実験終了後における基部近傍の局部座屈発生状況を示している。無補強試験体 (nN-m) の場合には、いずれもEFB型の局部座屈が発生している。またその位置は基部より0.18～0.2 ϕ (ϕ ：外径)程度である。一方、シート補強試験体 (nA-m) の場合には、

シートの拘束効果によって基部より0.25～0.3 ϕ 付近が内側に入り込むDP型の局部座屈が発生している。なお、両者の座屈位置を比較すると、シート補強試験体が無補強試験体と比較して高いことが分かる。

図3には、単調載荷実験から得られる無次元水平荷重－無次元水平変位曲線およびシート補強試験体における無次元ひずみ－無次元水平変位関係を示している。図の左縦軸は降伏水平荷重 H_y 、右縦軸は鋼材の降伏ひずみ ϵ_y および横軸は実験降伏水平変位 δ_{yE} で無次元化している。図中の周方向ひずみおよび軸方向ひずみは、それぞれ処女載荷時に曲げ圧縮および曲げ引張となる側面の値であり、 h は基部からひずみゲージ貼付位置までの高さを示している。

図3より、無補強試験体の場合には $H/H_y \leq 1$ までほぼ線形的に荷重が増大し、その後緩やかに剛性が低下し、小型試験体 (SN-m) では $\delta/\delta_{yE} \simeq 2$ 、中型および大型試験体 (MN/LN-m) では $\delta/\delta_{yE} \simeq 3$ で最大荷重値を示していることが分かる。その後、写真1からも分かるように、基部近傍にEFB型の局部座屈が発生し、その成長とともに終局に至っている。なお、小型試験体と他の2試験体における最大荷重時変位の差は、降伏棚の有無による影響⁵⁾と考えられる。

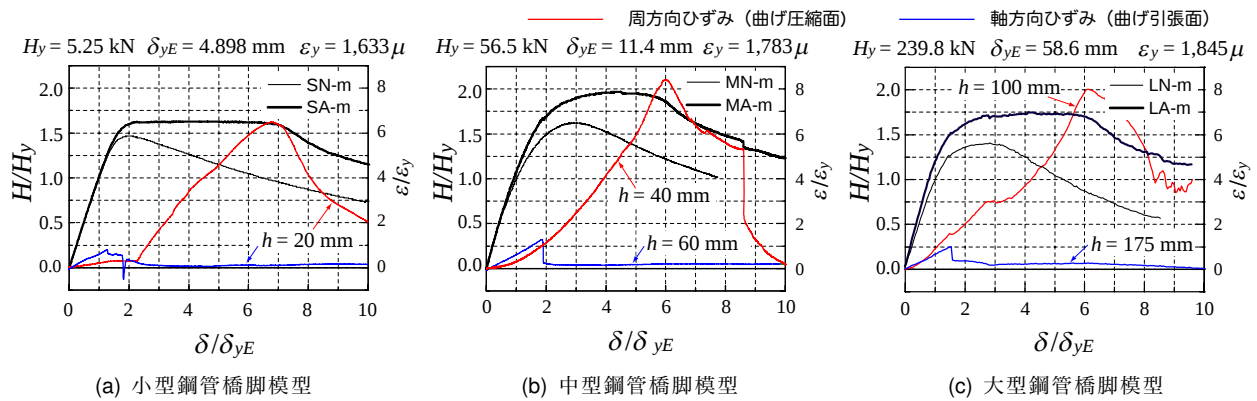


図 3 無次元水平荷重－無次元水平変位曲線および無次元ひずみ－無次元水平変位（単調荷重実験）

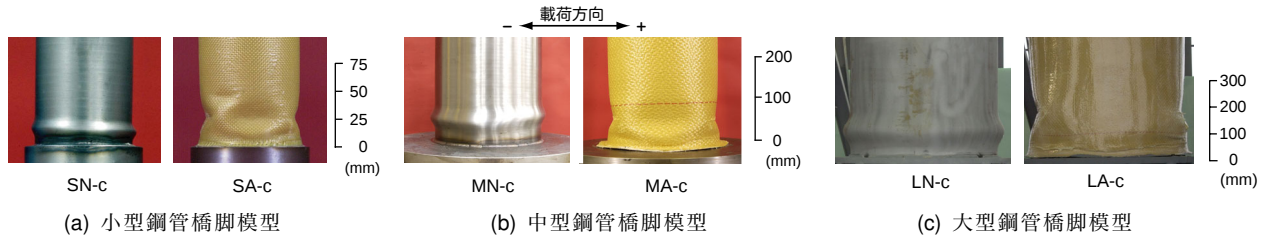


写真2 実験終了後の局部座屈発生状況（繰り返し荷重実験）

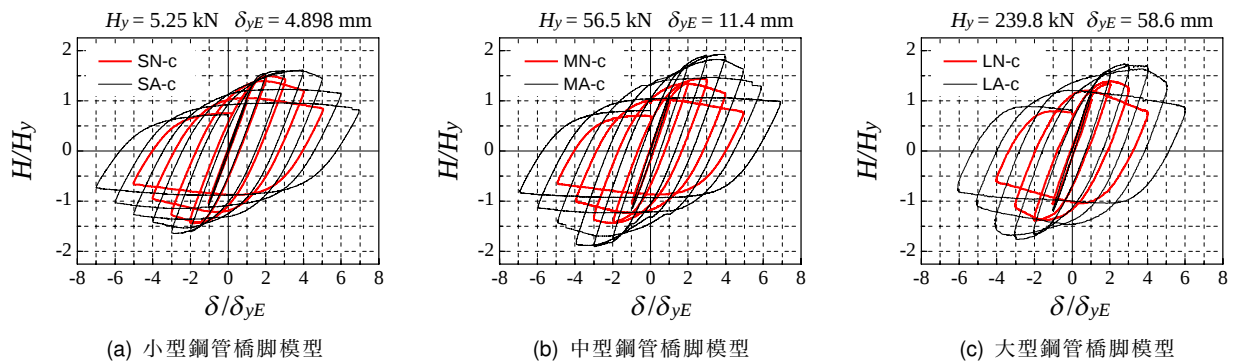


図 4 無次元水平荷重－無次元水平変位曲線（繰り返し荷重実験）

一方、シート補強試験体の場合には、いずれも $H/H_y > 1$ においてもほぼ線形的に荷重が増加し、無補強試験体の最大荷重値付近から緩やかに剛性が低減しながら、最大荷重値に到達している。これは、試験体に2方向AFRPシートを巻き付けることにより、1) 軸方向による補強効果が発揮され、試験体の曲げ耐力が向上したこと、および2) 周方向の拘束効果によってEFB型の局部座屈の発生を抑制したこと、の2つの要因によるものと考えられる。すなわち、図3に示す軸方向ひずみ（青線）と水平変位の関係に着目すると、いずれの試験体においても軸方向ひずみが水平変位の増加とともにほぼ線形に増大しており、軸方向のシートが曲げ耐力の向上に対して有効に作用していることが分かる。その後、 $\delta/\delta_{yE} = 1.5 \sim 2.0$ において、軸方向ひずみが急激に低下している。これは、この部分のシートの軸ひずみが解放されたことを示し、試験体の変形に伴いシートが鋼管から剥離したことによるものと考えられる。なお、小型試験体（SA-m）の場合には、明確な曲げ耐力の向上が確認されない。これは、シート補強割合 ρ が他の2試験体と比較して小さく、軸方向に対する補強効果も小さいこと等に起因して

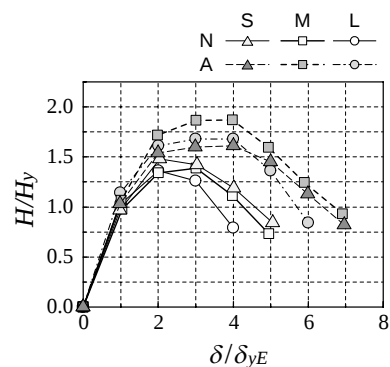


図 5 無次元水平荷重－水平変位関係（包絡線）

いるものと推察される。また、シート剥離後の緩やかな荷重の増大は図3に示す周方向ひずみ（赤線）が増大していることより、シートの周方向の拘束効果が発揮され、EFB型の局部座屈の発生を抑制しているためと考えられる。なお、最大荷重到達後の挙動に着目すると、小型試験体（SA-m）の場合には $\delta/\delta_{yE} \approx 7$ において、中型/大型試験体（MA/LA-m）の場合には $\delta/\delta_{yE} \approx 6$ において、鋼管が内側に入り込むようなDP型の局部座屈が発生し

表 3 最大耐力 H_m/H_y および塑性率 μ_{95}

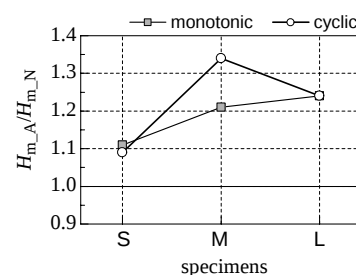
試験 体名	最大 荷重	無次元 最大荷重	δ_{95}^{*1} (mm)	塑性率 μ_{95} ($=\delta_{95}/\delta_{yE}$)	座屈 形態 ^{*2}	座屈発生 位置 ^{*3} (mm)	
	H_m (kN)	H_m/H_y				A 面 ^{*4}	C 面 ^{*4}
(a) 単調載荷実験							
SN-m	7.69	1.46 (1.00) ^{*5}	13.7	2.80 (1.00)	EFB	18	－
SA-m	8.51	1.62 (1.11)	35.6	7.26 (2.59)	DP	30	－
MN-m	91.8	1.62 (1.00)	43.8	3.86 (1.00)	EFB	52	－
MA-m	111.5	1.97 (1.21)	67.3	5.93 (1.54)	DP	67	－
LN-m	339.3	1.42 (1.00)	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							
SN-c	7.87	1.50 (1.00)	14.9	3.04 (1.00)	EFB	17	20
SA-c	8.47	1.63 (1.09)	22.0	4.48 (1.47)	DP	0 ～ 50	0 ～ 50
MN-c	81.3	1.44 (1.00)	35.2	3.10 (1.00)	EFB	63	57
MA-c	108.8	1.92 (1.34)	46.9	4.12 (1.33)	DP	62	65
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

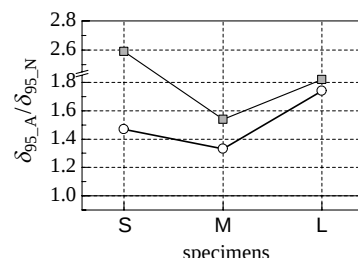
^{*2} EFB: 象の脚型座屈, DP: ダイヤモンド型座屈 ^{*3} 基部からの高さ

^{*4} A 面, C 面はそれぞれ処女荷重時に圧縮および引張側となる側面

^{*5} () 内の値は無補強試験体 (S/M/LN-m, c) に対する割合



(a) 最大荷重



(b) 塑性率

図 6 最大荷重および塑性率の増加割合

荷重が低下している。

3.2 繰り返し荷重実験

写真 2 には、繰り返し荷重実験終了後における基部近傍の局部座屈発生状況を示している。無補強試験体 (nN-c) の場合には、いずれも全周にわたり EFB 型の局部座屈が発生している。一方、シート補強した試験体 (nA-c) は、いずれも DP 型の局部座屈となっており、シートの拘束効果によって EFB 型の局部座屈を抑制していることが確認される。なお、局部座屈の発生位置は写真 1 に示す単調荷重実験の場合とほぼ等しい。

図 4 および図 5 には、それぞれ繰り返し荷重実験結果から得られる水平荷重—水平変位曲線およびその包絡線を示している。両図の縦軸、横軸はそれぞれ H_y , δ_{yE} で無次元化している。図 4 より、シート補強を施すことによって、いずれの試験体においても無補強試験体と比較して履歴ループが拡大しており、最大荷重および変形性能が向上していることが分かる。また、図 5 の包絡線より、無補強試験体の小型 / 大型試験体 (SN/LN-c) では $\delta/\delta_{yE} = 2$, 中型試験体 (MN-c) では $\delta/\delta_{yE} = 3$ で最大荷重を示している。一方、シート補強試験体 (SA/MA/LA-c) では、いずれの場合においても $\delta/\delta_{yE} = 4$ で最大荷重を示しており、変形性能が向上していることが分かる。

3.3 最大荷重および変形性能

表 3 には、各試験体の単調および繰り返し荷重実験結果から得られる最大荷重、塑性率、座屈形態および座屈発生位置を一覧にして示している。ここで表中における括弧内の数値は、無補強試験体 (nN-m/c) の値に対する割合を示している。また、 δ_{95} は水平荷重が最大荷重に到達後、その 95% まで荷重が低下した時点の変位量であり、塑性率 μ_{95} は δ_{95} を δ_{yE} で無次元化したものと定義した。

図 6 には、無補強試験体に対するシート補強試験体の最大荷重および塑性率の増加割合を示したものであり、表 3 の括弧内の数値を横軸に試験体名を取って整理したものである。表 3 および図 6 (a) より、最大荷重の増加割

合に着目すると、試験体寸法や荷重方法によって多少のばらつきは見られるものの、シート補強による最大荷重の増加割合は 1.1~1.3 倍程度となっていることが分かる。

一方、図 6 (b) の塑性率 μ_{95} の増加割合については、試験体寸法や荷重方法によって大きく異なることが分かる。しかしながら、地震時に重要と考えられる繰り返し荷重実験結果を見ると、最低でも約 1.4 倍となっており、シート補強によって変形性能は大きく向上することが分かる。

4. まとめ

- 1) 試験体寸法や鋼材の材料特性にかかわらず、適切なシート量を巻き付けることによって、基部近傍に発生する局部座屈を外側に凸状となる象の脚型座屈から内側に入り込むような DP 型の座屈形態に移行させることができる。
- 2) また、シート補強による最大荷重の増加割合は、最大 30 % 程度であるのに対し、変形性能は最低でも 40 % 程度向上することが明らかになった。

参考文献

- 1) 例えば, T. Kitada, M. Matsumura, and M. Tokubayashi: Seismic retrofitting method for circular steel column members by CFRP, *Proceedings of The Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas*, pp.703-709, 2003.6.
- 2) 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荷重実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 9, pp. 513-520, 2001.11.
- 3) 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荷重実験, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.1387-1398, 2004.3.
- 4) 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, 三田村浩: AFRP シートで補強した大型鋼管橋脚模型の耐荷性状に関する静荷重実験, 土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集 (CD-ROM), 1-362, 2005.9.
- 5) 岸 徳光, 池田憲二, 小枝日出夫, 小室雅人: 小型鋼管橋脚模型の耐震性能に関する鋼材の応力—ひずみ関係の影響, 土木学会論文集, Vol.696/I-58, pp.45-60, 2002.1.