

円形断面鋼製橋脚の耐震補強法に関する一検討

Experimental study on seismic retrofitting method for steel-pipe bridge pier

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)
 室蘭工業大学 ○学生員 吉田 英二 (Eiji Yoshida)

1. はじめに

現在、既設鋼製橋脚の耐震補強工法としてコンクリート充填や縦補剛材の増設等が有効であることが明らかになっている。しかしながら、これらの補強工法は、鋼製橋脚の内部を対象に実施されるため、1) 必ずしも施工性に優れていないこと、2) コンクリート充填による耐荷力の上昇に伴うアンカー部への負担の増大等、留意しなければならない点が存在する。

一方、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製橋脚の耐震補強工法の開発に関する実験的研究が試みられている。その結果、特に円形断面鋼製橋脚を対象とする場合において、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 型座屈と称する) の発生を抑制し、内側に入り込むような局部座屈 (以後、DP 型座屈と称する) 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が明らかになっている。従って、既設鋼製橋脚の合理的な耐震補強工法を確立するためには、同一条件の下でそれらの補強工法を用いる場合の耐震性能向上効果を比較・検討することが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、円形断面鋼製橋脚の耐震補強工法として、コンクリート充填および AFRP シート巻き付け接着の 2 種類の補強工法を取り上げ、過去に実施した小型鋼管橋脚模型を用いた静載荷実験結果^{1),2)}を用いて、その耐震性能向上効果について直接的に比較・検討を行った。ここでは、コンクリート充填あるいは AFRP シート巻き付け補強範囲を 2 種類に変化させ、補強工法およびその範囲が耐震性能に与える影響について比較・検討

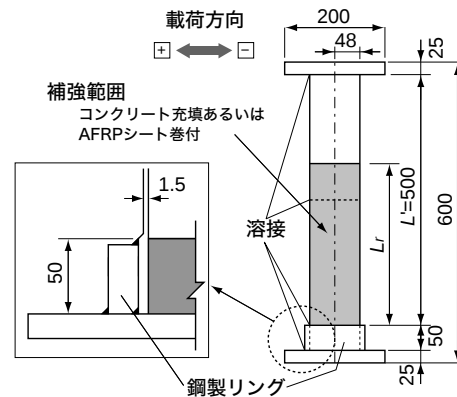


図-1 試験体寸法

を行っている。

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、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、補強範囲、シート層数および載荷方法が容易に明らかになるように、第 1 項目は補強工法 (N: 無補強, C: コンクリート充填, A: AFRP シート 3 層巻き付け) と補強範囲 L_r ($r=1: 125 \text{ mm}$, $r=2: 285 \text{ mm}$) を、第 2 項目は載荷方法 (m: 単調載荷実験, c: 繰り返し載荷実験) を示している。

試験体の鋼管部は、厚さ 5.7 mm の圧力配管用炭素鋼鋼管 (JIS G3454 STPG370 90A) を所定の長さに切断し、施盤により内外面を切削して製作した。なお、製作精度を保つために、試験体は 2 本の鋼管を突合わせ溶接して所定の長さとしている。板厚および径の加工公差は $\pm 0.05 \text{ mm}$ であ

表-1 試験体の形状寸法および各パラメーター一覧

荷重点高さ ^{*1} $L \text{ (mm)}$	鋼管高さ $L' \text{ (mm)}$	板厚中心半径 $R \text{ (mm)}$	板厚 $t_s \text{ (mm)}$	細長比パラメータ ^{*2} $\bar{\lambda}$	径厚比パラメータ ^{*3} R_t
631.5	500	48	1.5	0.478	0.086

^{*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} $R_t = \frac{R f_y}{t_s E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)}$

表-2 試験体名および実験条件

試験体名	補強工法	補強範囲 $L_r \text{ (mm)}$	載荷方法	軸力 $P \text{ (kN)}$	降伏 水平荷重 ^{*1} $H_y \text{ (kN)}$	降伏水平変位	
						実験値 ^{*2} $\delta_{yE} \text{ (mm)}$	解析値 ^{*3} $\delta_y \text{ (mm)}$
N-m, -c	-	0	m: 単調載荷	11.8	5.25	4.898	4.109
C1-m, -c	コンクリート	125					
C2-m, -c	充填	285	c: 繰り返し載荷	11.8	5.25	4.898	4.109
A1-m, -c	AFRP シート	125					
A2-m, -c	3 層巻き付け	285					

^{*1} $H_y = \frac{(f_y - P/A) \cdot I_s}{(R + t_s/2) \cdot L}$ ^{*2} 無補強試験体 (N-m) の単調載荷実験から得られる H_y に相当する変位 ^{*3} $\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI_s}$

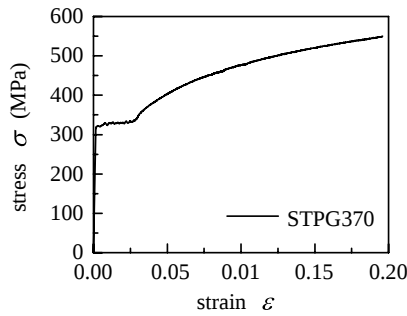


図-2 真応力-真ひずみ関係

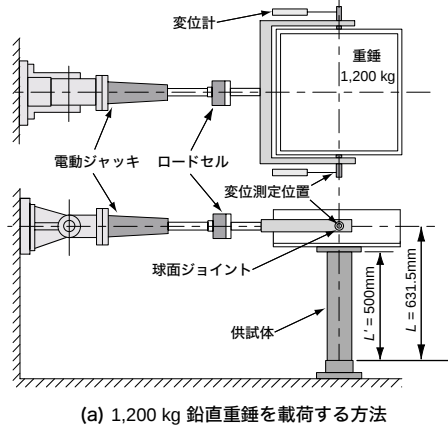
表-3 鋼材の力学的特性 (STPG370)

降伏応力 f_y (MPa)	ポアソン比 ν_s	弾性係数 E_s (GPa)	引張強度 f_t (MPa)
336	0.3	206	550

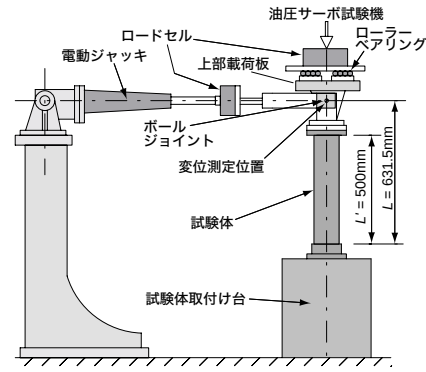
表-4 AFRP シートの1方向の力学的特性 (公称値)

目付量 (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 ν_a	破断ひずみ ϵ_{ua} (%)
180	0.04	2,060	118	0.4	1.75

*目付量は2方向の場合の値



(a) 1,200 kg 鉛直重錘を載荷する方法



(b) 油圧サーボ式試験器を用いて載荷する方法

図-3 実験装置の概要

る。また、試験体の基部は剛体変形を可能な限り抑制するため、図-1に示すように凸状の台座に鋼管を差し込み、外側に板厚9mmの鋼製リングをはめ込むことにより固定している。試験体の上端部には鉛直荷重を載荷するために、幅200mm、板厚25mmの正方形板を周溶接により取り付けている。

表-3および図-2には、本実験で使用した鋼材の力学的特性および鋼材の真応力-真ひずみ関係を示している。なお、鋼材の力学的特性は、試験体からJIS6号試験片を製作し引張試験により求めている。充填コンクリートは道路橋示方書に則して貧配合とし、設計基準強度を $f'_{ck} = 17.7$ MPaとして設計を行った。実験時の材料定数は、それぞれ圧縮強度 $f'_c = 19.2$ MPa、弾性係数 $E_c = 16.7$ GPa、ポアソン比 $\nu_c = 0.21$ である。また、コンクリートは試験体上板の中央に開けられた穴から所定の高さまで中詰めした。

表-4には、本実験で使用したAFRPシートの1方向の力学的特性を示している。なお、AFRPシートは、繊維目付量が180 g/m²、公称保証耐力が98 kN/mの2方向シートである。なお、AFRPシートの巻き付け方法に関しては、既往の文献2)を参照されたい。

2.2 実験装置および実験方法

図-3には、本実験で用いた静的載荷実験装置を示している。本研究では、2種類の方法で鉛直荷重を載荷している。すなわち、1) 1,200 kg 鉛直重錘を載荷する方法と、2) 油圧サーボ式試験機を用いて載荷する方法である。前者はコンクリート充填試験体に、後者は無補強およびAFRPシート補強試験体に使用した。水平荷重はストローク200 mmの電動式ジャッキを用いて、試験体の基部より高さ631.5 mmの位置で載荷している。実験における測定項目は、荷重載荷点での水平変位と水平荷重および試験体各位置でのひずみである。水平変位の測定にはひずみゲージ式変位計

を用い、水平荷重載荷位置と供試体基部固定板との相対変位を測定した。水平荷重は全て変位速度0.39 mm/sで載荷し、その測定には容量50 kNのロードセルを用いた。

実験は、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）実験の2種類を実施した。繰り返し載荷方法は、1) コンクリート充填試験体の場合には、弾性は理論に基づいて基部最外縁部が降伏応力に達する時の降伏変位 δ_y を、2) 無補強およびAFRPシート補強試験体の場合には、無補強試験体（N-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荷重 H_y に相当する変位 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。

3. 実験結果および考察

3.1 単調載荷実験

図-4には、単調載荷実験における無次元水平荷重-無次元水平変位曲線を補強範囲別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 δ_{yE} を用いて無次元化している。また、写真-1には、実験終了後の局部座屈発生状況を示している。なお、コンクリート充填試験体に関しては、内部コンクリートのひび割れ状況も併せて示している。

図-4(a)より、補強範囲125 mmの場合に着目すると、 $H/H_y \leq 1.0$ では、いずれの試験体もほぼ同一な挙動を示しており、コンクリート充填およびAFRPシート巻き付け効果が初期剛性に与える影響は小さいことが分かる。また、 $H/H_y \geq 1.0$ では、無補強のN-m試験体の場合には、 $H/H_y \approx 1.3$ から剛性勾配が徐々に低減しながら、 $\delta/\delta_{yE} = 2.0$ で最大荷重値 $H_m/H_y = 1.46$ 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

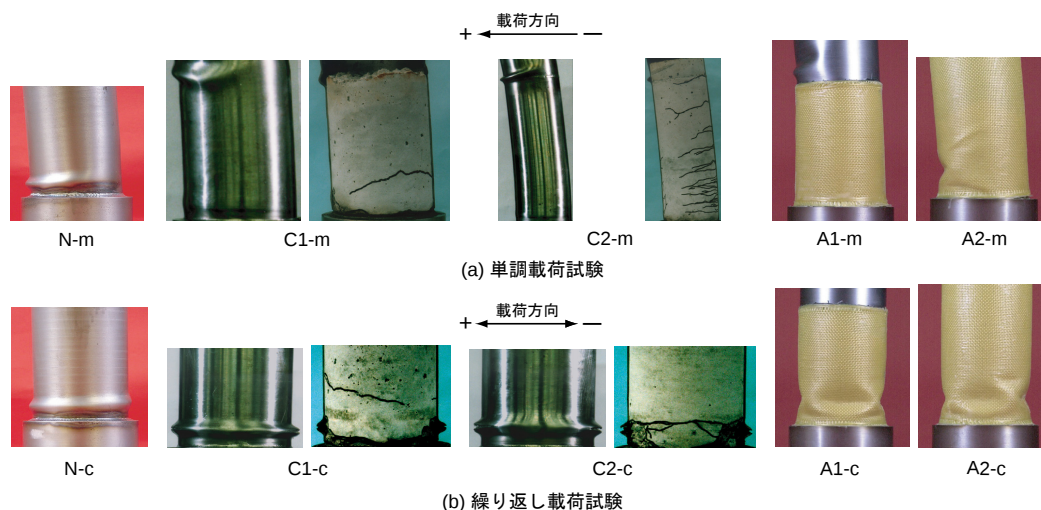


写真-1 局部座屈発生状況

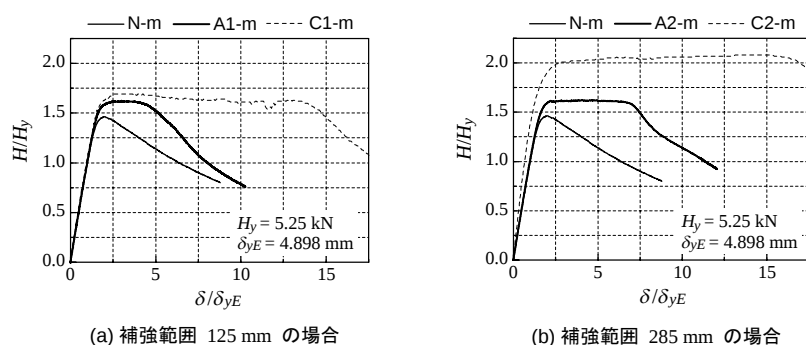


図-4 水平荷重-水平変位関係(単調荷重実験)

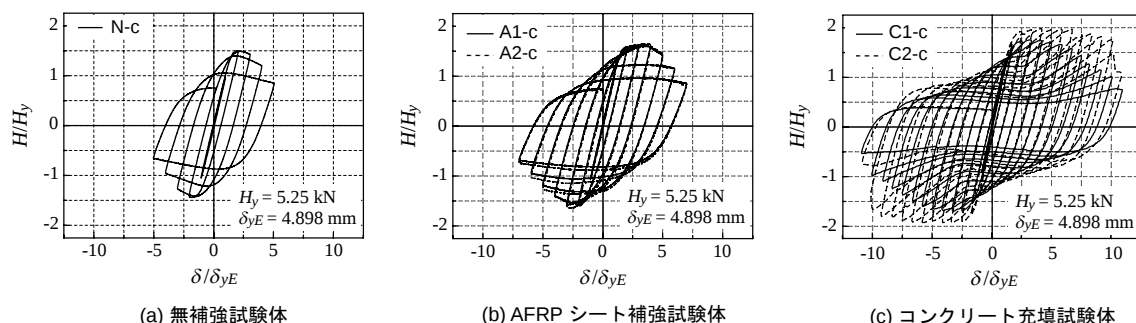


図-5 水平荷重-水平変位関係(繰返し荷重実験)

低下し、バイリニア型の曲線性状を呈している。

一方、シート補強の A1-m 試験体に着目すると、無補強試験体の最大荷重値近傍までほぼ線形的に荷重が増大し、最大荷重レベル ($H/H_y \approx 1.6$) を保持したまま変形量が増大している。その後、シート補強範囲の上方の鋼管部に EFB 型の局部座屈が発生し、終局に至っている。また、コンクリートを充填した C1-m 試験体の場合には、最大荷重レベル ($H_m/H_y \approx 1.7$) を保持したまま変形が進行し、最終的には、AFRP シート試験体と同様に、 $\delta/\delta_{yE} \approx 13$ でコンクリート上面近傍の鋼管部に EFB 型の局部座屈が発生し、終局に至っている。なお、これら 2 試験体は補強範囲が十分でないために補強範囲上端の鋼管部の抵抗曲げモーメントが作用曲げモーメントよりも小さくなり、その領域に局部座屈が発生したものと推察される。

次に 図-4 (b) 図に示す補強範囲 285 mm の場合に着目す

ると、シート補強をした A2-m 試験体の場合には、補強範囲 125 mm の場合と同様、最大荷重レベル ($H/H_y \approx 1.6$) を保持したまま変形が進行し、最終的には、基部近傍に内側に入り込む DP 型の局部座屈が発生し、終局に至っている。

一方、コンクリート充填の C2-m 試験体の場合には、初期剛性が他の試験体と比較して大きく、かつ、最大荷重も $H/H_y \approx 2.0$ を示しており、無補強試験体の約 1.4 倍と耐荷性状が大幅に向上していることが分かる。最終的には、 $\delta/\delta_{yE} \approx 15$ で C1-m 試験体と同様にコンクリート上面近傍の鋼管部に局部座屈が発生し、終局に至っている。

以上より、コンクリート充填と AFRP シート補強を比較すると、補強範囲 125 mm の場合には、両者はともに、無補強試験体と比較して、最大耐力の上昇を 10 % 程度に抑え、変形性能を向上させることができる。一方、補強範囲 285 mm の場合には、AFRP シート補強試験体は補強範囲

表-5 最大荷重と塑性率一覧

試験体名	H_m (kN)	H_m/H_y	δ_{95} (mm)	μ_{95}	座屈形態	座屈発生 ^{*1} 位置 (mm)	
						A面 ^{*2}	C面 ^{*2}
N-m	7.69	1.46(1.00)	13.7	2.80(1.00)	EFB	18	—
C1-m	8.90	1.69(1.16)	67.0	13.7(4.88)	EFB	125	—
C2-m	10.9	2.08(1.42)	84.0	17.2(6.13)	EFB	260	—
A1-m	8.52	1.62(1.11)	23.7	4.84(1.73)	EFB	140	—
A2-m	8.51	1.62(1.11)	35.6	7.26(2.59)	DP	30	—
N-c	7.87	1.50(1.00)	14.9	3.04(1.00)	EFB	20	17
C1-c	9.20	1.75(1.17)	26.3	5.37(1.77)	EFB	15	15
C2-c	10.4	1.98(1.32)	35.4	7.22(2.38)	EFB	15	15
A1-c	8.45	1.61(1.07)	21.6	4.40(1.45)	DP	0-40	0-40
A2-c	8.47	1.63(1.08)	22.0	4.48(1.47)	DP	0-50	0-50

^{*1} 基部からの高さ ^{*3} () 内の値は無補強試験体 (N-m/N-c) に対する割合

^{*2} A面, C面はそれぞれ処女載荷時に圧縮および引張側となる側面

125 mm とほぼ同程度の耐荷性状を有しているのに対し、コンクリート充填の場合には、最大耐力が無補強試験体の 40 % 程度に増大することが明らかになった。

3.2 繰り返し載荷実験

図-5 には、それぞれ補強範囲 125 mm および 285 mm の場合の繰り返し載荷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示している。また、写真-1 (b) には、実験終了後の変形性状を示している。

図-5 (a) より、無補強試験体に着目すると、2 サイクル目で $H_m/H_y = 1.50$ に達した後に、基部近傍に発生した EFB 型の局部座屈の発生により、荷重が徐々に減少し、終局に至っていることが分かる。

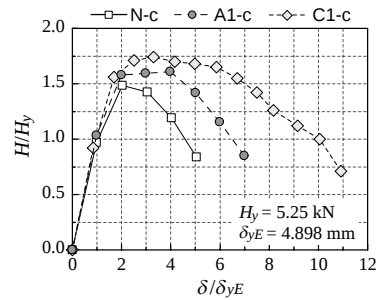
図-5 (b) のシート補強の A1-c 試験体に着目すると、補強範囲にかかわらず、いずれの場合もほぼ同様の履歴ループとなっている。また、最終的には、DP 型の局部座屈が発生し終局に至っている。一方、図-5 (c) のコンクリート充填試験体の場合には、いずれの場合も逆 S 字型の履歴ループが形成されている。これは、繰り返し載荷の進行とともに、写真-1 (b) のように試験体内部の基部コンクリートの劣化が進行し、剛性が低下したためと考えられる。

図-6 には、各試験体における繰り返し載荷実験の包絡線分布を補強範囲別に示している。図より、最大荷重値は単調載荷時のそれとほぼ同程度となっており、繰り返し載荷による最大荷重値の増減は見られない。一方、最大荷重が低下する変位振幅は、繰り返し載荷の影響によって単調載荷の場合よりも小さいことが分かる。

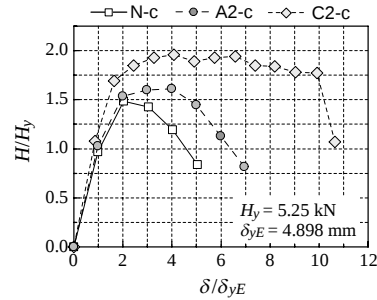
3.3 最大荷重および塑性率の比較

表-5 には、各試験体の最大荷重値 H_m 、塑性率 μ_{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 μ_{95} は、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 δ_{95} と実験降伏水平変位 δ_{yE} との比を取り、 $\mu_{95} = \delta_{95}/\delta_{yE}$ として評価している。

表-5 より、無次元最大荷重 H_m/H_y に着目すると、コンクリート充填試験体では、無補強試験体の 1.2 ~ 1.4 倍程度、AFRP シート補強試験体では、1.1 倍程度となっている。一方、表-5 に示す塑性率 μ_{95} に着目すると、無補強試験体では $\mu_{95} = 2.8 \sim 3.0$ 程度であるのに対し、コンクリート充填試験体では 5.4 ~ 17.2 (無補強試験体の 1.7 ~ 6.1 倍) AFRP シート補強試験体では 3.3 ~ 7.3 (無補強試験体の 1.4 ~ 2.6 倍) 程度となっており、変形性能は、補強工法や



(a) 補強範囲 125 mm の場合



(b) 補強範囲 285 mm の場合

図-6 包絡線分布 (繰り返し載荷実験)

補強範囲、載荷方法によって大きく異なることが分かる。

これより、コンクリート充填工法は、変形性能の飛躍的な向上が期待できる反面、最大耐力も向上する傾向にあるため、実施工時には、ケーソン基部の耐力との関係等に留意する必要があるものと考えられる。一方、シート巻き付け工法は、1) 最大荷重の増加率を 10 % 程度に抑え、変形性能 40 % 以上改善でき、また 2) 鋼管の外面に巻き付けるのみであることから施工性に優れているものと考えられる。最終的には、設計者が対象とする鋼製橋脚の条件を判断し、適切な補強工法を選定すべきであるものと考えられる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 補強範囲 125 mm の場合には、コンクリート充填および AFRP シート補強にかかわらず、無補強試験体と比較して、耐力の上昇を 10 % 程度に抑え、変形性能を向上させることができる。
- 2) 補強範囲 285 mm の場合には、AFRP シート補強は、補強範囲 125 mm とほぼ同程度の特性を有しているのに対し、コンクリート充填補強は、最大耐力が無補強試験体の 40 % 以上大幅に増大する。
- 3) コンクリート充填およびシート補強工法は、補強範囲を適切に設定することにより、どちらも優れた補強法の一つと考えられる。従って、設計者が実際に鋼管橋脚の補強を行う場合には、これらの特徴を理解した上で適切な補強工法を選定すべきであるものと考えられる。

参考文献

- 1) 小枝日出夫, 岸 徳光, 佐藤昌志, 小室雅人, 小野信市: 部分的にコンクリートを充填した鋼管橋脚模型の繰り返し載荷実験, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 6, pp. 77-84, 1998.11
- 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