

AFRPシートを巻き付けた小型鋼管橋脚模型の静的載荷実験

Static Loading Tests of Steel-Pipe Pier Models Jacketed with AFRP Sheet

室蘭工業大学
北海道開発局
三井建設(株)
日本製鋼所
室蘭工業大学

正員
正員
フェロー
正員
○学生員

岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
池田 憲二 (Kenji Ikeda)
三上 浩 (Hiroshi Mikami)
小枝 日出夫 (Hideo Koeda)
渡部 将行 (Masayuki Watabe)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、鋼製橋脚の耐震性向上に関する実験的・解析的研究が各研究機関や大学で精力的に行われている。これらの研究成果により、既設鋼製橋脚の耐震性向上を目的として、コンクリート充填あるいは補剛リブの増設などが有効であることが明らかになっている^{1), 2)}。しかしながら、コンクリート充填による耐荷力の上昇に伴うアンカー基部への負担の増大や補剛リブの溶接における残留応力の発生など、留意しなければならない点も多い。また、これらの補強工法は、基本的に鋼製橋脚の内部を対象に行うため、必ずしも施工性に優れているとは言えない。一方、鋼製橋脚の耐震性を効率よく向上させるためには、局部座屈の発生を抑制すること、あるいはその発生を遅延させることが有効であるものと考えられる。

このような観点より、本研究では鋼製橋脚の簡易かつ効率的な補強工法の開発を目的として、鋼管橋脚模型に2方向アラミド繊維連続シートを巻き付け接着した(以後、単にシート補強)試験体を対象に静的載荷実験を行った。本研究では、シート接着による局部座屈の抑制効果を含めた耐荷力および靱性能向上効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究では、AFRPシートの巻き付け効果およびその範囲が鋼管橋脚模型の耐荷力および靱性能に及ぼす影響について検討するため、試験体寸法およびシート軸剛性を一定とし、シートの巻き付け高さを変化させている。図-1に試験体の形状および寸法を、表-1に試験体名、

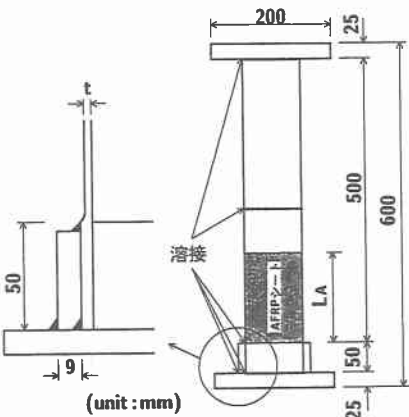


図-1 試験体の形状および寸法

シート巻き付け高さ(以後、単にシート高さ)および各パラメータを示している。なお、試験体名はシート高さ、載荷方法が容易に明らかになるように第一項目はシート高さ、第二項目は載荷方法を示している。ここで、-m, -c は、それぞれ静的単調載荷実験、静的漸増繰返し載荷実験を意味する。表中の細長比パラメータ $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R_t はそれぞれ次式によって定義される。

$$\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{\sigma_{ys}}{E_s}}, \quad R_t = \frac{R}{t} \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)} \quad (1), (2)$$

ここで、 L : 荷重点高さ、 r : 断面二次半径、 E_s : 鋼材の弾性係数、 σ_{ys} : 鋼材の降伏応力、 R : 平均半径、 t : 板厚、 ν_s : ポアソン比、である。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 熱間仕上継目無鋼管) を所定の長さで切断し、施盤により内外面を切削して製作した。なお、製

表-1 試験体寸法および各パラメータ

試験体名	荷重点高さ* L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	AFRPシート		板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
			L_A (mm)	L_A/L			
A0-m, -c	631.5	500	0	0	1.5	0.479	0.086
A1-m, -c			125	0.25			
A2-m, -c			285	0.57			
A4-m, -c			500	1.00			

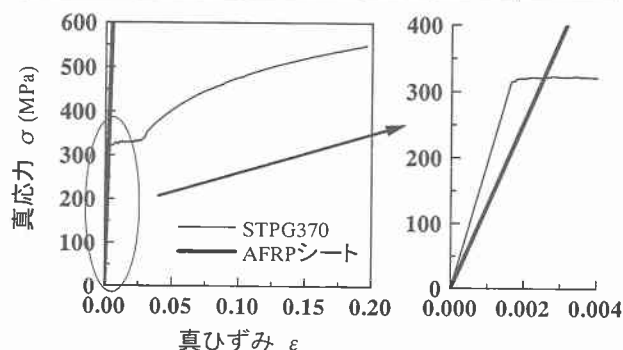
* 荷重点高さとは、試験体基部から水平荷重位置までの高さである

表－2 鋼材の材料特性

降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	降伏歪み ε_y (μ)
336	550	206	0.3	1633

表－3 AFRPシートの1方向の材料特性（公称値）

引張強度 σ_A (GPa)	弾性係数 E_A (GPa)	ポアソン比 ν_A	厚さ (mm)	目付量 (g/m ²)	破断歪み ε_A (μ)
2.48	126.51	0.4	0.04	57	19600

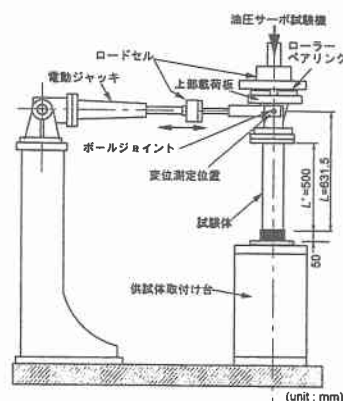


図－2 真応力－真ひずみ関係

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 ± 0.05 mmである。また基部は剛体変形をできるだけ防ぐため、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9 mm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200 mm、板厚25 mmの正方形板を周溶接により取り付けている。

表－2には本実験で使用した鋼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 6号試験片を製作し、引張試験により算定している。また、表－3に本実験で使用したAFRPシートの1方向の材料特性を示している。AFRPシートは、全て1方向の繊維目付け量(単位面積当たりの連続繊維の質量)が57 g/m²、公称保証耐力が100 kN/mの2方向シートである。本実験では上述のAFRPシートを全試験体に3周巻き付け、その接着範囲を変化させている。図－2には本実験で用いた鋼材およびAFRPシートの真応力－真ひずみ関係を示している。図より、使用した鋼材は加工硬化や残留応力が無いことより明確な降伏棚が存在していることがわかる。

AFRPシートの巻き付け方法は、以下の手順によって行った。1) 下地処理としてプライマーを塗布する。2) プライマー乾燥後、含浸・接着用樹脂を塗りその上にシートを接着させ、気泡を抜きながら連続的に3周巻き付ける。3) シート接着後、室温を20度前後に保ち、気中養生をさせ、触感により粘着感がないことを確認する。である。なお、シート巻き付け開始位置は、載荷方向中立軸とし、ラップ長は約2 cm程度としている。AFRPシート巻き付け高さ L_A の、鋼管高さ L' に対する比は、 $L_A/L' = 0.0, 0.25, 0.57, 1.0$ の4種類とした。



図－3 静的載荷実験装置

2.2 実験装置および載荷方法

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。鉛直荷重は油圧サーボ式試験機を用い、別途実施する加振実験時と上載重量を等しくするために、11.8 kNの軸力を載荷している。また、試験体上端に水平変位や回転が生じた場合でも軸力が常に鉛直下向きに作用するようにローラーベアリングを設置している。水平荷重はストローク200 mmの電動式ジャッキを用い、また、水平荷重の載荷部にはボールジョイントを設置して、試験体上端部に生じる水平および鉛直方向の変位と回転をできるだけ拘束しないようにしている。

実験の測定項目は、荷重載荷点における水平変位と水平荷重、および試験体の載荷方向において局部座屈が発生すると予想される位置を中心とする各点のひずみである。水平変位はひずみゲージ式変位計を用いて測定し、水平荷重載荷位置と試験体基部固定盤との相対変位を用いて評価することとした。また、水平荷重の測定には容量50 kNのロードセルを使用している。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。1) 一方向に変位を単調増加させる実験(以後、単調載荷) 2) 1サイクルごとの漸増変動変位繰り返し載荷(以後、繰り返し載荷)である。繰り返し載荷方法は、AFRPシート巻き付け無しの試験体(A0-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 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 δ_{yE} は、次式で定義される降伏水平荷重 H_y に相当する変位として求めている。

$$H_y = \frac{(\sigma_y - P/A)I_s}{(R + t/2)L} \quad (3)$$

ここで、 H_y は鋼管基部最外縁が降伏応力 σ_y に達するときの水平荷重(降伏水平荷重)、 P は軸力、 A は鋼管の断面積、 I_s は鋼管の断面2次モーメントである。なお、降伏応力 σ_y には材料試験より得られた実測値を用いている。無補強試験体における H_y は5.25 kN、また、単調載荷実験より δ_{yE} は4.898 mmとなっている。

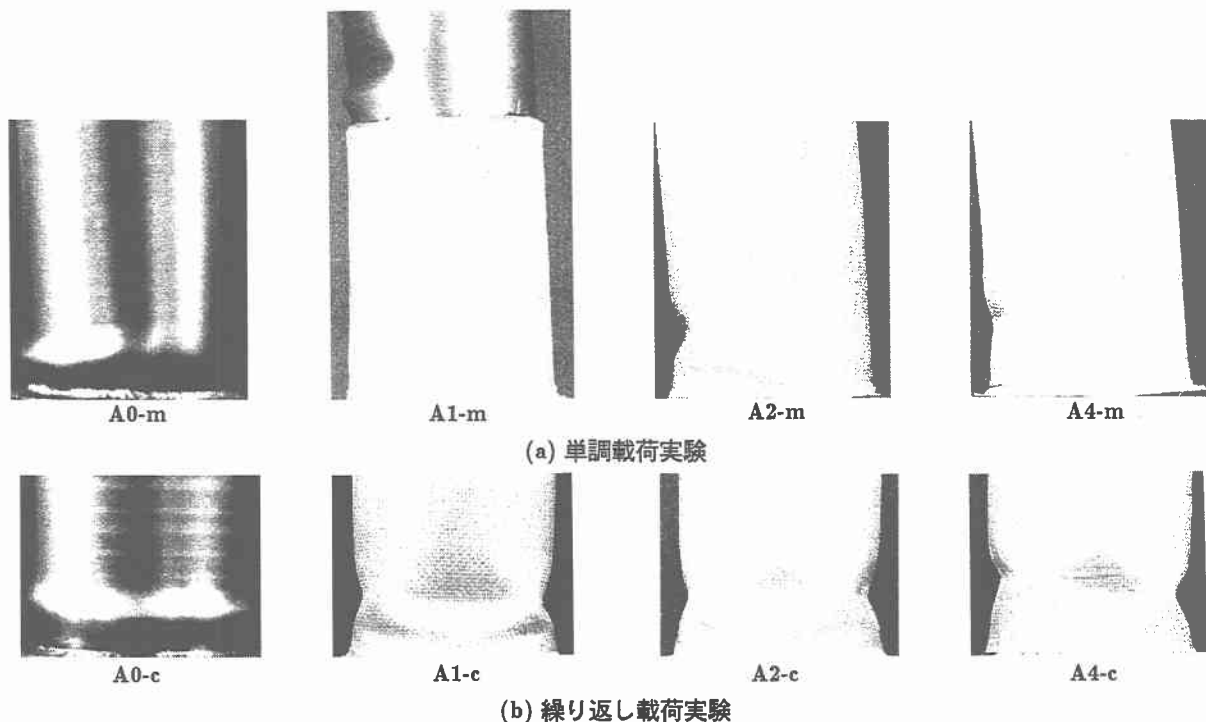


図-4 実験終了後における局部座屈発生状況

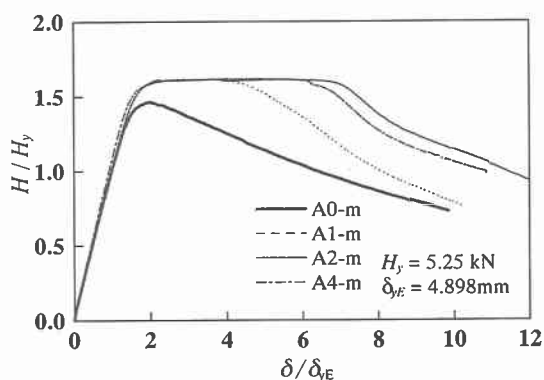


図-5 水平荷重-水平変位曲線 (単調載荷実験)

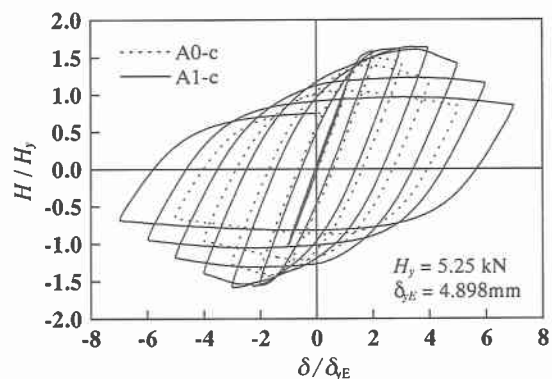


図-6 水平荷重-水平変位曲線 (繰返し載荷実験)

3. 実験結果および考察

3.1 局部座屈発生状況

図-4に各試験体の実験終了後における局部座屈発生状況を示している。(a)図より、単調載荷実験におけるA0-m試験体は基部から20 mm程度の位置でEFB (Elephant Foot Bulge) 型の局部座屈が発生したことがわかる。また、A1-m試験体については、シート巻き付け範囲上部でA0-m試験体と同様にEFB型の局部座屈が発生している。一方、A2-m、A4-m試験体の場合には、EFB型の座屈はみられず、基部から約30 mmの高さで内部に入り込む座屈形状を示している。

また、(b)図より繰返し載荷実験における座屈形状に着目すると、A0-c試験体は、基部から20 mm程度の位置で中心軸に関して対象なEFB型の局部座屈が発生していることに対し、AFRPシートを巻き付けた3試験体は基部から50 mm程度の範囲で、薄肉鋼管模型でみられるダイヤモンド型の局部座屈が発生して終局に至っていることがわかる。これより、繰返し載荷実験の場合にはシート高さによらず、ほぼ同様な耐荷力特性を

示すものと推察される。また、シート補強することによりEFB型の座屈を抑制できることがわかる。

3.2 単調載荷実験

図-5には、各載荷方法における水平荷重-水平変位曲線を試験体ごと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 および降伏水平変位 δ_{yE} で除して無次元化している。また、表-4に各試験体の最大耐荷力 H_m 、塑性率 μ 、座屈形態およびその発生位置を一覧にして示している。塑性率 μ は、水平荷重が最大耐荷力 H_m に到達後、その95%まで低下した時点での変位 δ_u と降伏水平変位 δ_{yE} との比をとり、 $\mu = \delta_u / \delta_{yE}$ として評価している。

図-5より、いずれの試験体においても、 $H/H_y = 1.3$ 程度までは、ほぼ同一な挙動を示していることがわかる。これより、AFRPシート巻き付け効果およびその範囲が試験体の初期剛性に与える影響は小さいものと考えられる。また、 $H/H_y = 1.3$ 以降において、無補強のA0-m試験体の場合には、その勾配が緩やかになり、最大耐荷

表－4 最大荷重および塑性率一覧

試験体名	H_m (kN)	H_m/H_y	δ_u^{*1} (mm)	μ	座屈形態	座屈発生位置 ^{*4} (mm)	
						圧縮側	引張側
A0-m	7.69	1.46	13.7	2.80	EFB ^{*2}	18	--
A0-c	7.87	1.50	16.1	3.29		20	17
A1-m	8.52	1.62	23.7	4.84	EFB	140	--
A1-c	8.45	1.61	21.6	4.40	DP ^{*3}	0～40	0～40
A2-m	8.51	1.62	35.6	7.26	--	30	--
A2-c	8.47	1.61	22.0	4.48	DP	0～50	0～50
A4-m	8.27	1.57	33.0	6.73	--	30	--
A4-c	8.71	1.66	21.2	4.34	DP	0～60	0～60

^{*1}最大耐力から 0.95 H_m まで低下した時点の変位,

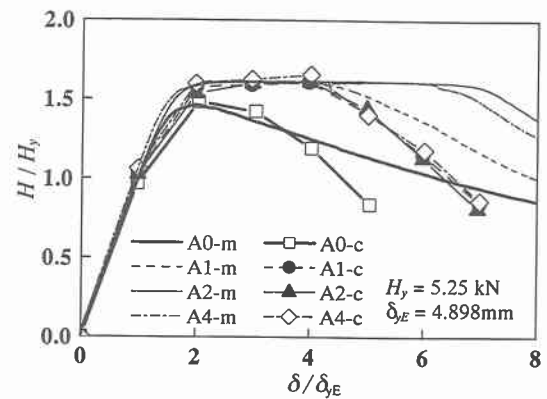
^{*2}Elephant Foot Bulge, ^{*3}ダイヤモンド座屈, ^{*4}基部からの高さ

力到達後基部近傍に発生した局部座屈の進展によって、荷重が徐々に低下するバイリニア型の曲線分布を示している。一方、AFRP シート補強した A1～A4-m 試験体の場合には、A0-m 試験体に見られるようなバイリニア型の曲線分布とは異なり、 H_m 到達後、荷重を持続したまま変形が進行し、やがて終局に至るトリリニア型の曲線分布を呈している。これは、図－4 に示されているように、試験体に AFRP シートを巻き付け接着することによって、A0-m 試験体に見られるような EFB 型の局部座屈の発生が抑制されることに起因しているものと推察される。また、シート補強された試験体の塑性率 μ は、A1-m 試験体で 4.8 程度、A2、A4-m 試験体で 7.0 程度となっており、無補強試験体 ($\mu = 2.8$) の 1.8 倍、2.5 倍程度になっている。なお、A1-m 試験体の塑性率 μ が A2、A4-m 試験体と比較して、小さく示されているが、これはシート巻き付け上部で局部座屈が発生したためと考えられる。

3.3 繰り返し載荷実験

図－6 には繰り返し載荷実験における水平荷重－水平変位曲線の一例として、A1-c 試験体について示したものである。図には、比較のため無補強の A0-c 試験体に関する結果を併せて示している。図より、無補強の A0-c 試験体の場合には、2 サイクル目で最大荷重値 $H_m/H_y = 1.5$ を示し、その後荷重が低下している。一方、A1-c 試験体の場合には、2 サイクル目でほぼ最大値 $H_m/H_y = 1.6$ を示し、その後 4 サイクル目まで荷重の低下がみられず、ほぼ一定値を示している。また、シート補強された試験体の塑性率 μ が約 4.4 であるのに対し、無補強試験体の場合には 3.3 となっており、シート補強によって靱性能が向上することがわかる。これは、単調載荷実験と同様、シート巻き付けによる拘束効果によって EFB 型の局部座屈の発生が抑制されるためと考えられる。

図－7 には、各試験体の水平荷重－水平変位曲線の包絡線を単調載荷実験と比較する形で示している。図より、シート補強した 3 試験体の包絡線は、ほぼ一致している



図－7 包絡線 (繰り返し載荷実験)

ことがわかる。これは、いずれの試験体も 1) 基部近傍に発生した局部座屈により耐力が低下していること、2) その形状はダイヤモンド型の局部座屈であり、3 試験体ともほぼ一致していること、によるものと考えられる。これより、繰り返し載荷実験の場合には、耐力および靱性能はシートの高さによってそれほど影響されないことがわかる。以上より、鋼管橋脚模型に AFRP シート補強することで、EFB 型の局部座屈の発生を抑制し、ダイヤモンド型の座屈モードへ移行させることによって靱性能を向上させることができるものと考えられる。

4. まとめ

本研究は合理的な補強工法の開発を目的として、小型鋼管柱模型に AFRP シートを巻き付け接着した試験体を製作し、静的載荷実験を実施した。本研究内で得られた結果を整理すると、

- 1) AFRP シートを小型鋼管橋脚模型に巻き付け接着させることにより、基部近傍に発生する EFB 型の局部座屈を防ぐことが可能である。また、これにより座屈モードは EFB 型からダイヤモンド型座屈に移行する。
- 2) 静的単調載荷実験において AFRP シート補強した試験体は、無補強試験体とほぼ同様の耐力増加率であるが、靱性能は無補強の場合と比較して 1.8 倍以上向上させることができる。

参考文献

- 1) 岡本 隆, 水谷 慎吾, 長山 秀明, 原 茂樹, 半野久光, 田嶋 仁志: 縦リブ補強した円形断面鋼製橋脚の耐震性評価, 構造工学論文集, Vol.46A, 2000.3
- 2) 岸 徳光, 佐藤昌志, 小枝日出夫, 小室雅人, 小野信市: 正弦波加振を受けるコンクリート充填鋼管柱模型の弾塑性応答性状, 第 2 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, 土木学会, 185-192, 1998.11