

AFRPシートを巻き付けた小型鋼管橋脚模型の基部加振実験

Base Excitation Tests of Steel-Pipe Pier Models Jacketed with AFRP Sheet

北海道開発局 ○正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)
室蘭工業大学 正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
三井建設 (株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学 正員 矢吹 信喜 (Nobuyosi Yabuki)

1. はじめに

現在、既設鋼製橋脚の補強方法として内部を対象としたコンクリート充填あるいは補剛リブの増設、また外部を対象として鋼板溶接などが有効な補強方法であることが明らかになっている。しかしながら、これらの補強方法は、必ずしも施工性に優れていないこと、溶接による残留応力の発生、および耐荷力の上昇によるアンカー基部への負担の増大など、問題点がいくつか存在する。そこで、著者らは上述の諸問題に対処するために、RC橋脚等の耐震補強方法の一つとして採用されているアラミド繊維連続シート（以後、AFRPシート）巻き付け工法に着目し、この工法の鋼製橋脚への適用を考えた。すなわち AFRP シートの高弾性伸び特性により、鋼管橋脚の局部座屈の発生を抑制し、その結果靱性能を向上させようとするものである。

このような観点から、本研究では2方向 AFRP シートを鋼管橋脚模型に巻き付け接着した試験体を製作して基部加振実験を行った。ここでは、シート巻き付けの有無、巻き付け高さの違いによる鋼管橋脚模型の耐震性向上に与える補強効果について検討を行っている。

2. 実験概要

2.1. 試験体

本研究では、AFRPシート補強を施すことにより、鋼管橋脚模型の耐震性に与える影響を検討することを主な目的としていることより、試験体は全て同一形状のものを使用し、シート巻き付け高さ（以後、単にシート高さ）のみを変化させて基部加振実験を行った。図-1に試験体の形状および寸法を、表-1に試験体寸法および試験体パラメータを示している。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 ：弾性係数、 σ_{ys} ：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、

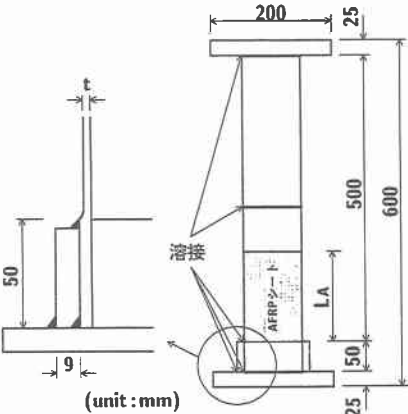


図-1 試験体の形状および寸法

表-1 試験体寸法および試験体パラメータ

荷重点* 高さ L (mm)	鋼管 高さ L' (mm)	半径 R (mm)	板厚 t (mm)	細長比 パラメータ $\bar{\lambda}$	径厚比 パラメータ R_t
631.5	500	48.0	1.5	0.511	0.099

*荷重点高さとは、試験体基部から鉛垂重心位置高さである

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

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橋梁上部工の質量を模擬した鉛塊を固定するために、幅 200 mm、板厚 25 mm の正方形板を周溶接することにより取り付けている。

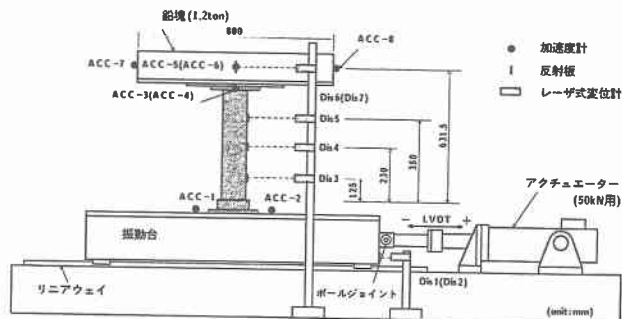
2.2. 材料試験

表-2には、試験体の材料特性を調べるために、鋼管から JIS 6 号試験片を製作して引張試験を行った結果を示している。表-3に本実験で使用した AFRP シート

表－4 加振実験条件および固有振動数、入力加速度、破壊形式の一覧

試験体名	シート巻き付け 高さ(mm)		最低次 固有振動数 f_0 (Hz)	加振 振動数 f_i (Hz)	入力加速度 α_i (gal)	実験終了後の 破壊性状	座屈発生 高さ(mm)		
	L_A	L_A/L'					A側	B側	
A0-I	0	0.00	4.20	3.0	125, 250, 375	A 側に EFB 発生, 倒壊	10	--	
A0-S					375	B 側に EFB 発生, 倒壊	--	15	
A1-I	125	0.25	4.22		125, 250, 375, 500	B 側に DP 発生, 倒壊	--	30	
A1-S					500	B 側シート継ぎ目上部に DP 発生, 倒壊	--	140	
A2-I	285	0.57	4.30		125, 250, 375, 500	A 側に DP 発生, 倒壊	40	--	
A2-S					500	A 側に DP 発生, 倒壊	30	--	
A4-I	500	1.00	4.22		125, 250, 375, 500	B 側に DP 発生, 倒壊	--	30	
A4-S					500	A 側に DP 発生, 倒壊	40	--	

A側：アクチュエーター側，B側：反アクチュエーター側，EFB＝Elephant Foot Bulge，DP＝ダイヤモンド座屈



図－2 実験装置の概要図

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。

2.3. 実験装置および実験方法

図－2には、簡易振動台を用いた実験装置の概要を示している。簡易振動台は2本のリニアウェイ上に設置しており、ボールジョイントを介して最大荷重50 kN、油圧源吐出量31.7 l/minのアクチュエーターに接続されている。また、試験体上部には橋梁上部工の質量を模擬した全質量1.2 tonの鉛塊(800×800×185 mm)を設置し加振実験を行った。本実験では、鋼管橋脚模型の動的挙動特性を把握するために、歪ゲージ式加速度計(容量2 G)を振動台、試験体頂部、鉛塊重心位置高さの加振方向およびその鉛直方向の計8ヶ所、レーザ式変位計を振動台、試験体、鉛塊の高さ重心位置の計7ヶ所に設置した。計測は全てデジタルレコーダにより一括収録している。なお、サンプリング応答周波数は1 kHzである。

実験は、1) アクチュエーターをシャットダウンさせることにより試験体に自由振動状態を励起させ、最低次固有振動数を求める実験、2) 弾性状態から弾塑性状態までの鋼管橋脚の動的挙動を検討するために加振振動数 $f_i = 3.0$ Hzと固定し、初期入力加速度 α_{in} および増分加速度 $\Delta\alpha$ を125 galと設定して、試験体が倒壊または傾斜に至るまで繰り返し加振実験(以後、繰り返し加振実験)、および3) 繰り返し加振実験での最終入力加速度 α_{final} で単に加振する実験(以後、単一加振実験)

の3種類について実施した。

加振実験は、アクチュエーターが設定加速度状態に達するまで数秒間の時間を要することより、加振時間を統一するために、繰り返し加振実験では加振開始8秒後、単一加振実験では1.5倍の12秒経過後にアクチュエーターの電源を遮断することとした。なお、電源遮断後、振動台における加速度はほぼ線形に低減する。

表－4には、試験体名、最低次固有振動数 f_0 、および実験終了後における試験体の破壊性状を一覧にして示している。試験体名は、シート高さ、加振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、第二項目は加振方法を示している。ここで、-I、-Sはそれぞれ繰り返し加振実験、単一加振実験を意味する。また、シート高さ L_A は鋼管高さ L' に対する比であり、ここでは $L_A/L' = 0.0, 0.25, 0.57, 1.0$ の4種類とした。表より、最低次固有振動数 f_0 はAFRPシート補強の有無に関わらず4.2 Hz程度となっていることより、シート補強による固有振動数の上昇はほとんど無いことがわかる。

3. 実験結果

3.1. 局部座屈発生状況

図－3には、繰り返し加振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、シート補強無し試験体A0-Iの場合には、基部近傍でEFB(Elephant Foot Bulge)型の局部座屈が発生し、倒壊に至ったことがわかる。また、(b)～(d)図よりシート補強を施した試験体では、いずれも基部からの高さ30～40 mm程度の位置で試験体が内側に入り込むダイヤモンド型の局部座屈発生により、シートが端部から引き剥がれている。なお、単一加振時においてもシート高さ125 mmの試験体(A1-S)を除いて、繰り返し加振実験と同様な局部座屈形状を示していることを確認している。なお、シート高さ125 mmの単一加振実験(A1-S)では、シート巻き付け範囲上方の鋼管部においてダイヤモンド型の局部座屈が発生していた。

3.2. 応答加速度および応答変位

図－4には、鉛塊重心位置における絶対応答加速度(以下、単に応答加速度)と相対応答変位(以下、単に応

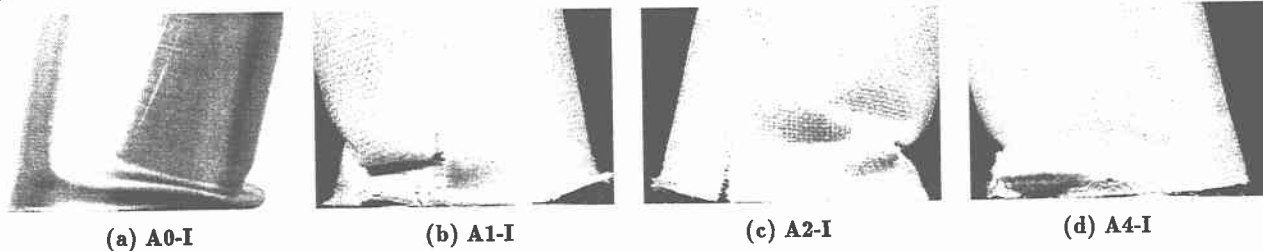


図-3 実験終了後における局部座屈発生状況(繰り返し加振実験)

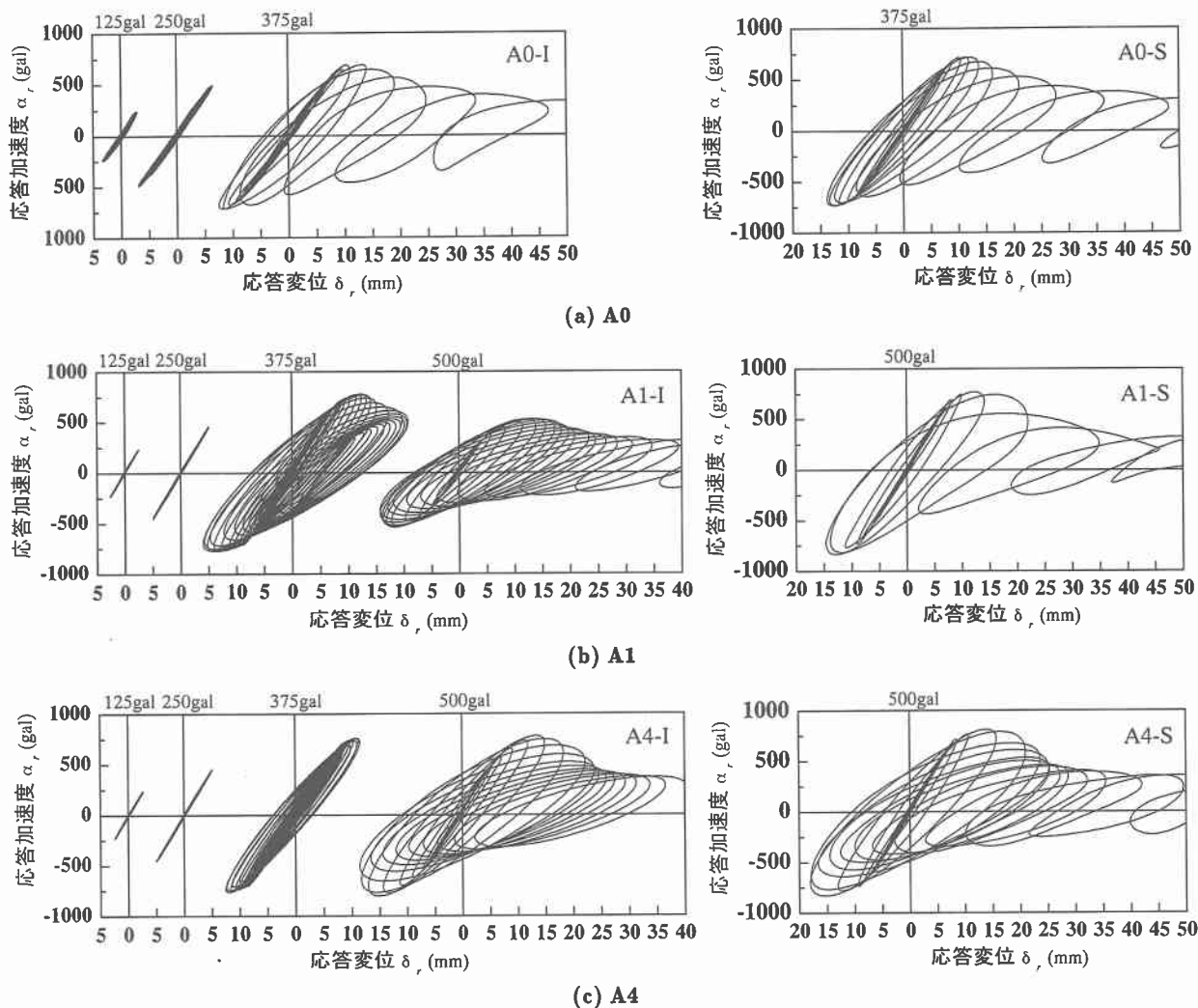


図-4 絶対応答加速度-相対応答変位に関する履歴曲線

答変位)に関する履歴曲線を示している。ここでは紙面の都合上、A0、A1、A4 試験体について示すこととする。繰り返し加振実験結果に着目すると、入力加速度 $\alpha_i = 125 \text{ gal}$ 、 250 gal では、シート補強の有無に関わらず、いずれの試験体も弾性的な挙動を示していることがわかる。

入力加速度 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ の場合、シート補強無し試験体 A0-I では履歴ループの中心が一方向に移動しながら振動していることより、倒壊に至ったことがわかる。一方、シート高さ 125 mm の試験体 A1-I の場合には、試験体基部で内側に入り込む局部座屈が発生し、3 mm 程度の残留変位が生じているものの、倒壊には至っていない。また、シート高さ 500 mm の試験体 A4-I では、塑

性化の進行を意味する履歴ループが形成されているものの、その大きさは他の試験体よりも小さい。また、残留変位も生じていない。これより、シート補強を施すことにより試験体の塑性化の進行を遅延させることができるものと推察される。

その後、シート補強した試験体において、更に入力加速度を $\alpha_i = 500 \text{ gal}$ に増加させた場合には、試験体 A1-I では入力加速度が増加しているにもかかわらず、応答加速度は減少している。これは、 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 加振時に基部近傍に発生した局部座屈によって、その部分から軟化現象を示し加振エネルギーが試験体上方へ伝達されないためと推察される。一方、試験体 A4-I では、入力加速度 $\alpha_i = 375 \text{ gal}$ 加振時と同程度の最大応答加速度

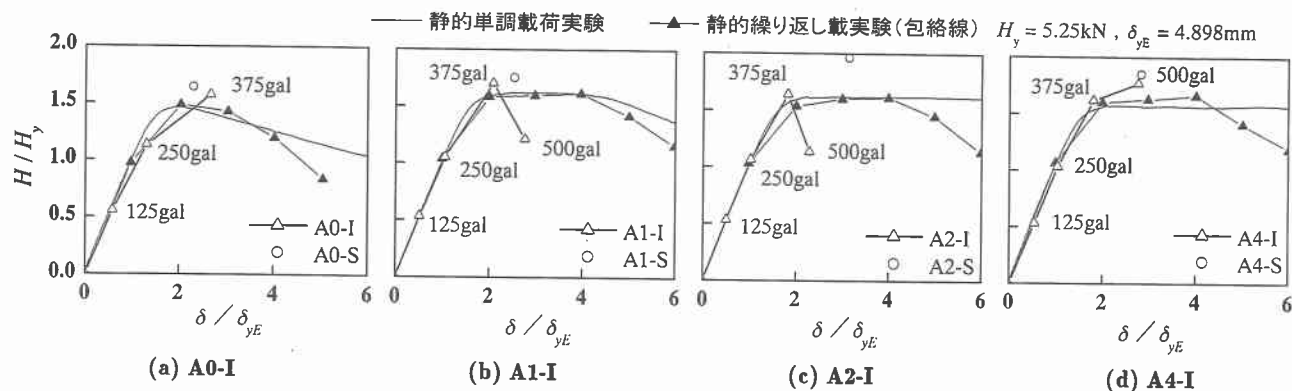


図-5 静的載荷実験と基部加振実験における換算水平荷重-応答変位関係

を示した後に倒壊していることがわかる。

次に、単一加振実験と繰り返し加振実験を比較する。(a) 図より、シート補強無し試験体 A0-I, A0-S において、同一の入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal で加振実験を行った場合、試験体 A0-I は単一加振実験 (A0-S) における最大応答加速度と同程度の値を示していることがわかる。しかしながら、試験体 A0-I は A0-S よりも少ない振動回数で偏心していく傾向にある。これは、加振履歴の影響により、塑性化がより早く進行したことを意味している。また、(b) 図より、シート高さ 125 mm の試験体 A1-I, A1-S において、入力加速度 $\alpha_i = 500$ gal で加振実験を行った場合、試験体 A1-S における最大応答加速度が A1-I よりも大きな値を示していることがわかる。これは、上述したように試験体 A1-I では、 $\alpha_i = 375$ gal 加振時において、加振履歴の影響により塑性化が進行し軟化傾向を示すためと考えられる。一方、(c) 図のシート高さ 500 mm の試験体 A4-I, A4-S では、最大応答加速度が両者でほぼ同じ値を示していることから、未だ加振履歴の影響が抑制されているものと推察される。

また、(b), (c) 図より入力加速度 $\alpha_i = 500$ gal で単一加振実験を行った試験体 A1-S, A4-S では最大応答加速度がほぼ同程度の値を示しているものの、試験体 A1-Sの方が加振開始初期で倒壊に至っている。このことから、シート巻き付け範囲を高くすることによって耐震性がより向上するものと考えられる。

3.3. 基部加振実験と静的載荷実験の比較

図-5 には、各入力加速度 α_i における最大応答加速度に鉛塊質量を乗じて得られる慣性力 (換算水平荷重 H) とその時の応答変位 δ の関係を示している。図は、それぞれ降伏水平荷重 H_y および降伏水平変位 δ_{yE} で無次元化している。ここで、 H_y は弾性梁理論に基づき、基部最外縁が降伏するときの水平荷重、 δ_{yE} は別途実施した静的単調載荷実験結果¹⁾から得られた H_y 時における変位量である。なお、図中には、同一試験体における静的載荷実験結果も併せて示している。

図より、繰り返し加振実験に着目すると、弾性応答領域と考えられる無次元換算荷重 H/H_y が 1 以下の場合 ($\alpha_i = 125, 250$ gal 入力時)、いずれの試験体においても加振実験結果は静的載荷実験から得られる曲線とほぼ一致していることがわかる。入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal で

加振実験を行った場合、換算水平荷重は静的最大耐力と同程度以上の値を示している。この時点で、無補強試験体 A0-S は倒壊に至っている。 $\alpha_i = 500$ gal 加振の場合には、試験体 A4-I を除いて無次元化水平荷重 H/H_y は減少していることがわかる。これは、試験体 A4-I を除き $\alpha_i = 375$ gal 加振時に塑性化の進行に伴い試験体の基部近傍に発生した局部座屈による影響であると考えられる。一方、シート高さ 500 mm の試験体 A4-I の場合には、 H/H_y は増加し倒壊に至った。これは、上述に示すように $\alpha_i = 375$ gal 加振時において、顕著な塑性化が見られず、他の試験体と比較して健全であるためと考えられる。

一方、単一加振実験と繰り返し加振実験を比較すると、シート補強の有無に関わらず単一加振実験では最大換算水平荷重は増加することがわかる。

以上より、動的耐力 (最大換算水平荷重) は、静的載荷実験結果から得られる静的最大耐力を用いることにより、設計的に安全側で評価可能であることがわかる。

4. まとめ

本研究では、鋼管橋脚の耐震設計に必要な基礎データの蓄積を目的として、小型鋼管橋脚模型を用いた基部加振実験を行い、AFRP シートの有無や巻き付け高さが鋼管橋脚模型の耐震性に与える影響について検討を行った。本実験内で得られた結果を要約すると、

- 1) AFRP シート巻き付け補強することにより、倒壊時にはダイヤモンド型の局部座屈が発生する。
- 2) AFRP シート巻き付け補強することにより、最大応答加速度は増加し、塑性化の進行を遅延させる効果がある。これは、シートを全面 (本実験では、500 mm) に巻き付けた場合で顕著である。
- 3) AFRP シート巻き付け補強することにより、基部加振実験における最大換算水平荷重は、静的載荷実験から得られた最大耐力より大きい。

参考文献:

- 1) 池田 憲二, 岸 徳光, 三上 浩, 小枝 日出夫, 渡部 将行: 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, 土木学会, 北海道支部論文報告集, 第 57 号 (A), 2001.2