

AFRPシート補強鋼管橋脚模型の動的耐荷性状に及ぼす補強量の影響

Effects of Sheet Volume on Dynamic Ultimate Strength of Steel-Pipe Pier Models Strengthened with AFRP Sheet

北海道開発土木研究所

正員 池田 憲二 (Kenji Ikeda)

室蘭工業大学

正員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

室蘭工業大学

正員 小室 雅人 (Masato Komuro)

室蘭工業大学

○学生員 渡部 将行 (Masayuki Watabe)

1. はじめに

近年、既設鋼製橋脚の老朽化による補修、耐震性能向上を目的とした補強工法に関する実験的・解析的研究が各研究機関や大学等で盛んに行われている。その中で、特に円形断面鋼製橋脚の耐震性能を向上させるためには、基部近傍に発生する象の脚 (EFB) 型の局部座屈を抑制または遅延させることが有効であるものと考えられる。著者らは、既設鋼管橋脚の耐震性能向上を目的として、小型鋼管橋脚模型に AFRP シートを巻き付ける補強工法に着目し、その適用性について検討を行った¹⁾。その研究の結果、単位幅当たりのシート補強量を鋼材の一軸降伏耐力の 60% 程度とすることにより、無補強の場合に比較して耐震性能が大きく向上することを明らかにしている。しかしながら、合理的な AFRP シート補強工法を確立するためには、シート接着範囲 (以後、シート高さ)、巻き付け層数 (以後、シート層数) について十分に検討する必要がある。

このような観点より、本研究では 2 方向アラミド連続繊維シートを小型鋼管橋脚模型に巻き付け接着した試験体を製作して、基部に定常な正弦波を直接入力する基部加振実験を実施した。ここでは、シート巻き付け高さおよび巻き付け層数を変化させた 7 種類の試験体を対象に鋼管橋脚模型の動的耐荷性状に及ぼす補強量の影響について比較検討を行っている。

2. 実験概要

2.1. 試験体

本研究では、鋼管橋脚模型の耐震性能に及ぼす AFRP シート補強量の影響を検討するため、試験体は同一形状のものを使用し、シート層数を 3 種類、シート高さを 2 種類に変化させて基部加振実験を実施した。図-1 に試験体の形状寸法を示している。試験体は板厚 $t_s = 1.5$ mm、鋼管高さ $L_s = 500$ mm、板厚中心半径 $R = 48$ mm である。また、細長比パラメータ λ 、径厚比パラメータ R/t_s はそれぞれ 0.479、0.086 である。表-1 には、試験体名および AFRP シート補強量を一覧にして示している。試験体名は、シート層数 L_n 、シート高さ L_A および加振方法が容易に明らかになるように、第一項目はシート層数、第二項目はシート高さ、第三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している。試験体基部は剛体変形をできるだけ防ぐために、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

表-1 試験体名および加振実験条件一覧

試験体名	AFRP シート			入力加速度 α_i (gal)
	L_n	L_A (mm)	L_A/L_s	
L0-A0-I, -S	0	0	0.00	125, 250, 375
L1/L2/L3*-A1-I, -S	1/2/3	125	0.25	125, 250, 375, 500
L1/L2*/L3*-A2-I, -S	1/2/3	285	0.57	125, 250, 375, 500

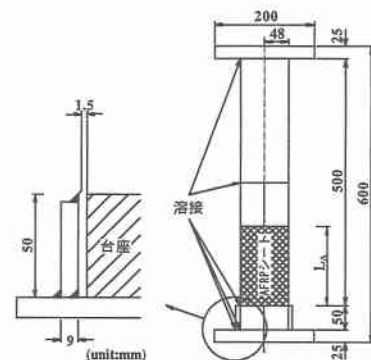
*試験体は入力加速度 $\alpha_i = 500$ gal まで加振

図-1 試験体の形状寸法

とにより固定している。また、試験体の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。

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。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 方向の繊維目付量 (単位面積当たりの連続繊維の質量) が 57 g/m^2 、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 シートの接着範囲を基部から高さ $L_A = 125, 285$ mm とし、シート層数 L_n を 1, 2, 3 層と変化させている。なお、AFRP シート巻き付け高さ L_A の鋼管高さ L_s に対する比は、 $L_A/L_s = 0.25, 0.57$ である。

2.2. 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図を示している。簡易振動台は 2 本のリニアウエ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 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

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	1,633

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 t_A (mm)	目付量 (g/m^2)	破断歪み ε_A (μ)
2.48	126.5	0.4	0.04	57	19,600

(800×800×185 mm)を設置して加振実験を行った。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2G）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、サンプリング周波数は1kHzである。

実験は、試験体に減衰自由振動状態を励起させ、最低次固有振動数を求めた後、1)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す加振実験（以後、繰り返し加振実験）、2)繰り返し加振実験での最終入力加速度 α_{final} で単一加振する実験（以後、単一加振実験）の2種類について実施した。

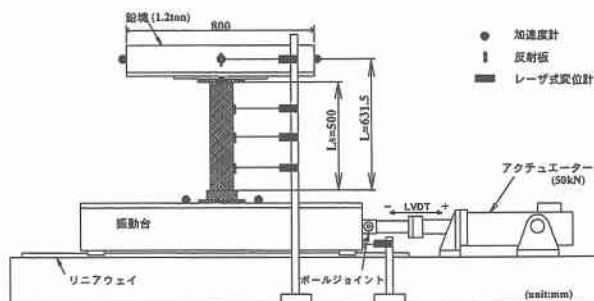
加振実験は、1)アクチュエーターが設定入力加速度状態に達するまで数秒間の時間を要すること、また2)加振時間を統一するために、繰り返し加振実験では加振開始8秒後、単一加振実験では1.5倍の12秒後にアクチュエーターの電源を遮断することとした。なお、電源遮断後、振動台における加速度はほぼ線形に低減する。ただし、後述のL3-A2-I試験体の入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal時における加振時間は、アクチュエーター制御装置の不具合により、規定時間よりも1.5秒程度長い約9.5秒となっている。なお、減衰自由振動波形より、最低次固有振動数 f_0 は、AFRPシート補強の有無およびその補強量にかかわらず $f_0 \approx 4.2$ Hzとなっている。

3. 実験結果

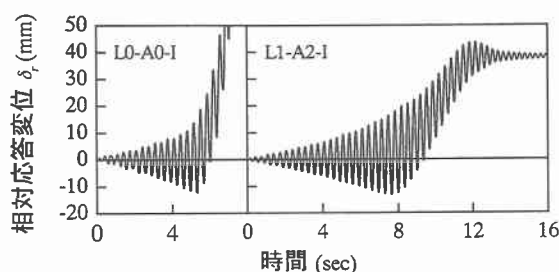
3.1. 相対応答変位波形

図－3には、鉛塊重心位置における相対応答変位（以後、応答変位）波形の一例として、無補強であるL0-A0-I試験体およびシート層数 $L_n = 1$ 、シート高さ $L_A = 285$ mmであるL1-A2-I試験体について示している。なお、図は、入力加速度 $\alpha_i = 375$ galの結果である。

図より、L0-A0-I試験体は加振開始5秒程度までほぼ線形に振幅を増加させ、その後は振動の中心が一方向に移動していることより、倒壊に至ったことがわかる。一方、シート補強したL1-A2-I試験体は加振終了時である8秒程度まで振幅は単調増加し、その後は試験体の軟化現象により振動の中心が一方向に変位するものの、倒壊



図－2 実験装置の概要図



図－3 相対応答変位波形

には至らず約35 mmの残留変位が発生している。

3.2. 絶対応答加速度－相対応答変位履歴曲線

図－4には、鉛塊重心位置における絶対応答加速度（以後、応答加速度）－相対応答変位履歴曲線を示している。ここでは、繰り返し加振実験における無補強のL0-A0-I試験体およびシート高さ $L_A = 125$ mmであるL1/L2/L3-A1-I試験体についてのみ示している。

図より、入力加速度 $\alpha_i = 125, 250$ gal加振時に着目すると、履歴曲線はいずれの試験体もほぼ線形な分布性状を示しており、弾性振動状態であることがわかる。入力加速度 $\alpha_i = 375$ gal加振時における無補強のL0-A0-Iおよびシート層数 L_n が1であるL1-A1-I試験体は、振動中心が一方向に移動し倒壊に至ったことがわかる。しかしながら、シート補強したL1-A1-I試験体はL0-A0-I試験体に比較して、倒壊に至るまでの振動回数が多い。これは、シート補強を施すことによって、その拘束効果により基部近傍に発生する局部座屈が抑制され、試験体の倒壊が遅延したものと推察される。

また、2層巻きであるL2-A1-I試験体の場合においても振動中心が移動し倒壊の傾向を示すものの、完全に倒壊に至らず35 mm程度の残留変位が発生し加振を終了している。また、その振動回数は1層巻きであるL1-A1-I試験体よりも更に多い。また、3層巻きであるL3-A1-I試験体の場合は、塑性化を意味する履歴ループが形成されるものの、倒壊せず残留変位は5 mm程度となっている。なお、この時点で試験体基部において内側に入り込む局部座屈を確認している。L3-A1-I試験体について、更に入力加速度を $\alpha_i = 500$ galに増加させて加振した場合には、 $\alpha_i = 375$ gal時よりも最大応答加速度 α_{max} は若干減少し倒壊に至っている。この応答加速度の減少は $\alpha_i = 375$ gal時に基部近傍で発生した局部座屈によって試験体が軟化現象を示し、加振エネルギーが上方へ伝達さ

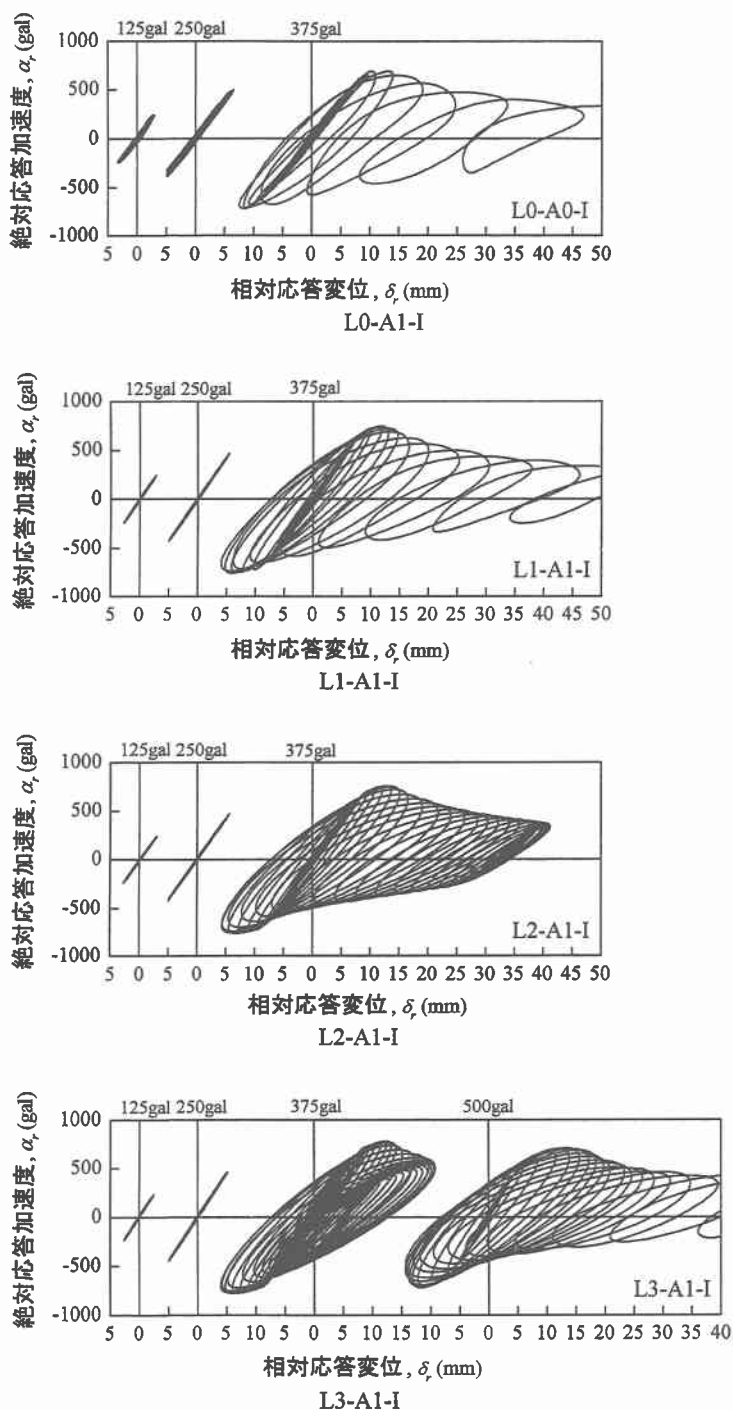
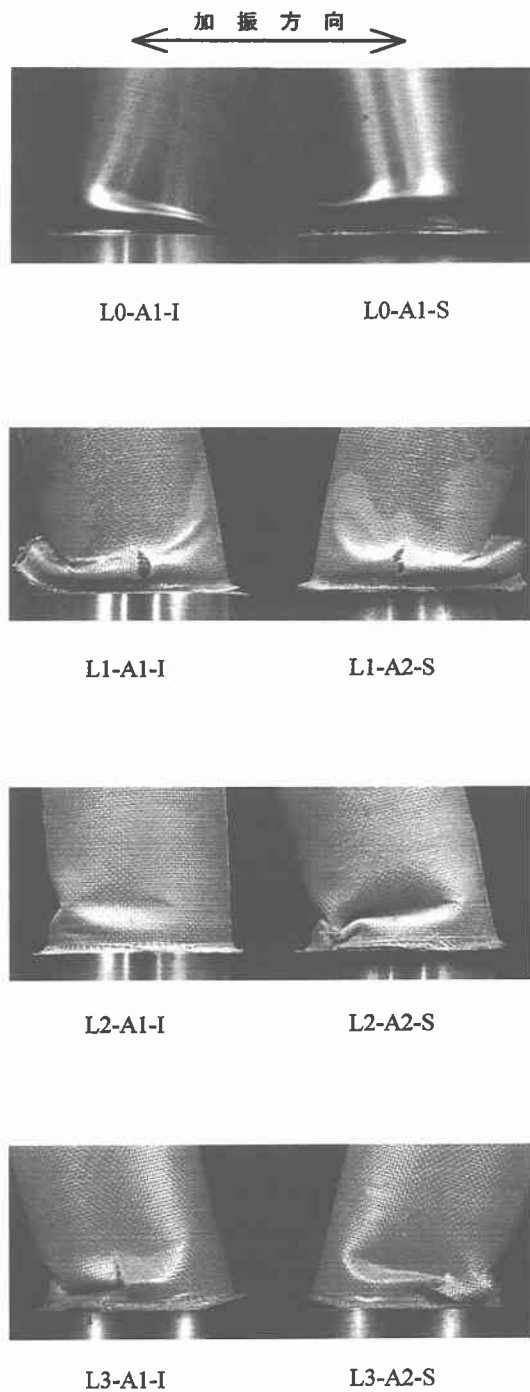


図-4 絶対応答加速度-相対応答変位履歴曲線



(a) 繰り返し加振実験 (b) 単一加振実験
図-5 局部座屈発生状況

れないためと推察される。なお、4試験体の最大応答加速度は、いずれの場合も $\alpha_{\max} \approx 750 \text{ gal}$ となっている。

以上より、シート層数 L_n を増加させることにより、1)シートの拘束効果によって基部近傍に発生した局部座屈を抑制し、2)更に試験体の倒壊を遅延させることが可能であるものと判断される。

3.3. 局部座屈発生状況

図-5(a), (b)には、それぞれA1試験体の繰り返し加振(L1/L2/L3-A1-I)およびA2試験体の単一加振(L1/L2/L3-A2-S)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、繰り返し加振実験結果に着目すると、無補強であるL0-A0-I試験体は、外側に凸状となるEFB型の局部座屈が発生していることがわかる。また、L1-A1-I試験体の場合には、シートが鋼管部の面外方向への変形を抑制できず、倒壊方向および加振方向中立面において破断し、EFB型の局部座屈が発生している。

一方、シート層数 L_n が2および3であるL2/L3-A1-I試験体は、L1-A1-I試験体とは異なり、いずれも内側に入り込むようなダイヤモンド型の局部座屈が発生している。なお、シート巻き付け高さが285mmのA2試験体においても、同様な局部座屈が発生していることを確認し

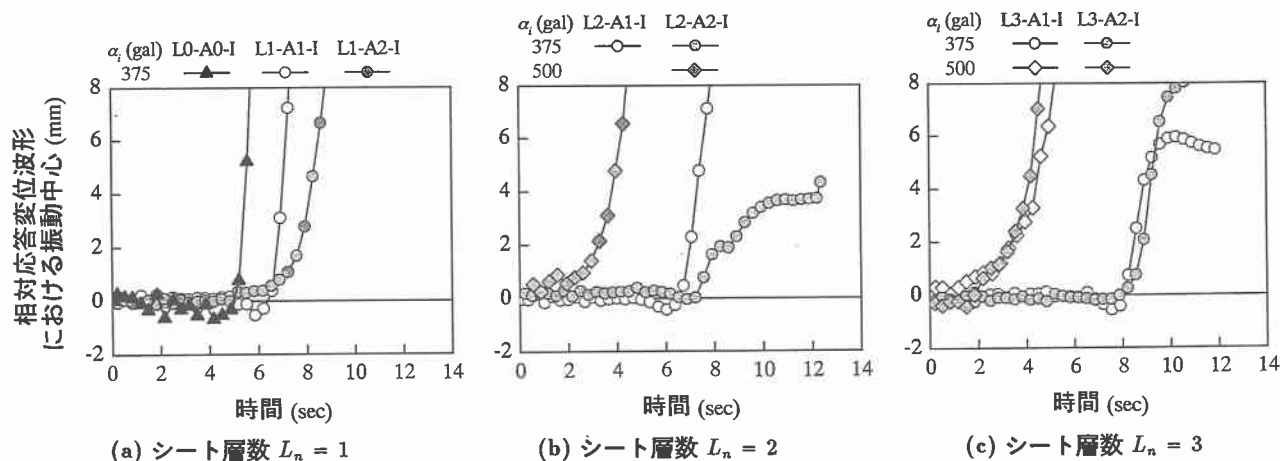


図-6 振動中心位置の時間的推移

ている。

次に(b)図に示すシート高さ $L_A = 285\text{mm}$ である A2 試験体の単一加振実験結果に着目すると、いずれの試験体においても、シート高さが 125mm の A1 試験体における繰り返し加振時とその座屈モードは類似であることがわかる。また、シート接着範囲よりも上部で EFB 型の局部座屈が発生した L3-A1-S 試験体¹⁾を除いた A1 試験体の座屈形状は、同一層数である A2 試験体とほぼ等しいことを確認している。

以上より、シート層数 L_n が 2 層以上の場合には、加振方法およびシート高さ L_A にかかわらず、EFB 型の局部座屈をシートの拘束効果によって抑制し、内側に入り込むようなダイヤモンド型の座屈モードに移行させることができるものと考えられる。なお、これらの座屈形態は別途実施した静的繰り返し載荷実験終了時における座屈モードとほぼ対応していることを確認している。

3.4. 相対応答変位における振動中心の時間的推移

図-6 には、図-3 に示した応答変位波形における各サイクルの振動中心位置の時間的推移を示している。ここでは、繰り返し加振実験における入力加速度 $\alpha_i = 375, 500\text{gal}$ 加振時の結果について示している。なお、(a)~(c)図は、それぞれシート層数 L_n が 1, 2, 3 である A1/A2 試験体について示している。また、(a)図には比較のため無補強である L0-A0-I 試験体についても併せて示している。

(a)図より、無補強である L0-A0-I 試験体は、約 5 秒後に振動中心が急激に移動しているのに対し、シート補強した L1-A1/A2-I 試験体はいずれも 6 秒程度より移動している。しかしながら、倒壊に至るまでの時刻に着目すると、シート高さが 285mm の L1-A2-I 試験体が 125mm の L1-A1-I 試験体よりも遅くなっていることがわかる。

以上より、シート補強を施すことにより、基部近傍に発生する局部座屈の進展をシートの拘束効果によって抑制し、試験体の倒壊を遅延させることが可能であることがわかる。また、その遅延効果は、シート高さが増加するほど大きい。

次に、(b)図より、シート層数 $L_n = 2$ である L2-A1/A2-I 試験体に着目する。入力加速度 $\alpha_i = 375\text{gal}$ 時において、

両試験体はともに 7 秒程度から振動中心が移動していることがわかる。しかしながら、その偏心傾向は大きく異なり、L2-A1-I 試験体が急激に偏心し倒壊に至っているのに対し、L2-A2-I 試験体の場合には緩やかに偏心し、 4mm 程度の残留変位が生じた状態で加振を終了している。なお、L2-A2-I 試験体に対して、更に入力加速度 $\alpha_i = 500\text{gal}$ まで増加させた場合には、加振開始直後より倒壊に至っていることがわかる。

最後に、(c)図に示す 3 層巻きである L3-A1/A2-I 試験体に着目すると、入力加速度 $\alpha_i = 375\text{gal}$ 時にはいずれも 8 秒後より偏心傾向がみられ、同様な分布性状を示している。しかしながら、 $L_A = 125\text{mm}$ の L3-A1-I 試験体の残留変位は約 6mm であるのに対し、 $L_A = 285\text{mm}$ の L3-A2-I 試験体では、約 8mm となっている。この両者の差異は、前述のように L3-A2-I 試験体の $\alpha_i = 375\text{gal}$ 加振時における加振時間が 9.5 秒と長いことに起因しているものと考えられる。更に、入力加速度 $\alpha_i = 500\text{gal}$ 加振時には、2 試験体ともほぼ同様な分布性状を示していることがわかる。

以上より、加振方法にかかわらずシート層数 $L_n = 3$ 、シート高さ $L_A = 285\text{mm}$ の L3-A2 試験体が、最も耐震性能に優れていることが明らかになった。

4. まとめ

本実験から得られた結果を要約すると、

- 1) シート補強を施すことにより、基部近傍に発生する局部座屈の進展を抑制し、試験体の倒壊を遅延させることができる。
- 2) また、局部座屈形状はシート層数が 1 層の場合には、EFB 型、2 層以上ではダイヤモンド型となる。
- 3) 本研究範囲内で得られた最適な AFRP シート補強量は、シート層数 $L_n = 3$ 、シート高さ $L_A = 285\text{mm}$ である L3-A2 試験体である。このときの補強量は単位幅当たりの鋼管の一軸降伏耐力の 60% 程度である。

参考文献

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