

AFRP シート補強鋼管橋脚模型の靱性能に及ぼす補強量の影響

Effects of Sheet Volume on Ductility 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)
 三井建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)

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。著者らは RC 橋脚に対する耐震補強工法の 1 つとして多くの研究が行われている AFRP シート補強工法に着目し、鋼管橋脚模型への適用性について実験的に検討を行った。その結果、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 % 程度にすることによって、基部近傍における局部座屈の発生を遅延させ、無補強の場合に比較して靱性能を大幅に向上させることができることを明らかにしている¹⁾。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、鋼管橋脚模型の耐荷力および靱性能の向上効果と AFRP シート補強量の関係について、より詳細な検討が必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 AFRP シートの最適な補強量を把握することを目的として、シート補強量を変化させた鋼管橋脚模型の静的載荷実験を実施した。ここでは、シートの巻き付け層数（以後、シート層数）およびシート巻き付け高さ（以後、シート高さ）を変化させた 7 種類の試験体を対象に鋼管橋脚模型の耐荷力および靱性能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、鋼管橋脚模型の耐荷力および靱性能に及ぼすシート補強量の影響を検討するために、試験体寸法を一定とし、シート層数を 3 種類、シート高さを 2 種類に変化させた実験を試みた。図-1 には、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 $\bar{\lambda}$ 、径厚比パラメータ R/t はそれぞれ 0.479、0.086 である。表-1 に試験体名、シート層数およびシート高さを示している。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層数、第二項目はシート高さ、第三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している。試験体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 9mm の鋼製リングをはめ込むことによ

表-1 試験体名および AFRP シート補強量一覧

試験体名	鋼管高さ L_s (mm)	AFRP シート		
		L_n	L_A (mm)	L_A/L_s
L0-A0-m, -c	500	0	0	0
L1/L2/L3-A1-m, -c		1/2/3	125	0.25
L1/L2/L3-A2-m, -c		1/2/3	285	0.57

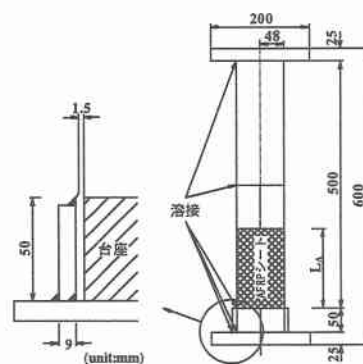


図-1 試験体の形状寸法

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 には、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/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. 実験装置および載荷方法

図-2 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 の軸力を載している。また、水平荷重はストローク 200 mm の電動式ジャッキを用いて与えている。

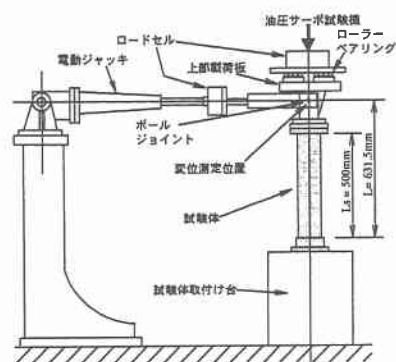
実験の測定項目は、荷重載荷点における水平変位と水平荷重、および試験体の載荷方向において局部座屈が発生すると予想される位置を中心とする各点のひずみであ

表一 2 鋼材の材料特性

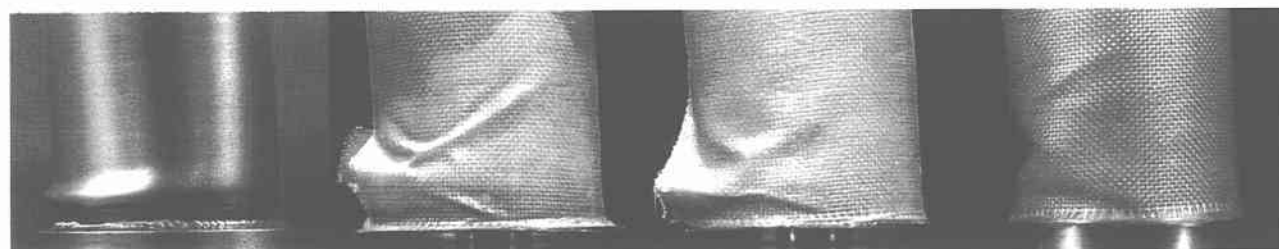
降伏応力 σ_y (MPa)	引張強さ σ_u (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s	降伏歪み ε_y (μ)
336	550	206	0.3	1,633

表一 3 AFRPシートの1方向の材料特性 (公称値)

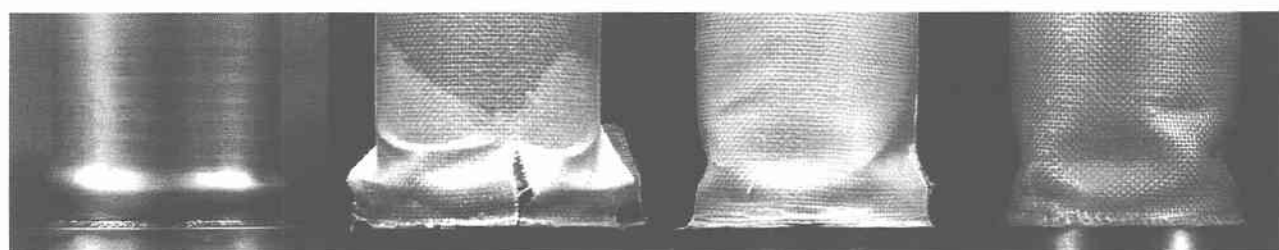
引張強度 σ_A (GPa)	弾性係数 E_A (GPa)	ポアソン比 ν_A	厚さ t_A (mm)	目付量 (g/m^2)	破断歪み ε_A (μ)
2.48	126.5	0.4	0.04	57	19,600



図一 2 静的荷重実験装置



(a) 単調荷重実験



(b) 繰り返し荷重実験

図一 3 実験終了後における局部座屈発生状況 (シート高さ $L_A = 285$ mm)

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、1) 一方向に変位を単調増加させる実験 (以後、単調荷重実験)、2) 1 サイクルごとの漸増変動変位繰り返し荷重 (以後、繰り返し荷重実験) の 2 種類の荷重方法で行った。各試験体の繰り返し荷重は、無補強試験体 (L0-A0-m 試験体) の単調荷重実験結果から得られた降伏水平荷重 H_y に相当する水平変位 δ_{yE} (以後、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作用させている。なお、降伏水平荷重 H_y は古典梁理論に基づき基部最外縁が降伏する時の水平荷重 ($H_y = 5.25$ kN) であり、また、実験降伏水平変位 δ_{yE} は 4.898 mm となっている。

3. 実験結果および考察

3.1. 局部座屈発生状況

図一 3 (a), (b) にはシート高さ $L_A = 285$ mm の A2 試験体における単調および繰り返し荷重実験終了時の局部座

屈発生状況を示している。また、併せて無補強試験体の結果についても示している。

(a) 図より、単調荷重実験結果に着目すると、L0-A0-m 試験体は基部から 20 mm 程度の位置に外側に凸状となる象の脚 (EFB) 型の局部座屈が発生している。また、シート層数が 1 層および 2 層である L1/L2-A2-m 試験体では、シートが EFB 型の局部座屈を完全に抑制できず、最終的には軸方向に破断している様子が伺える。一方、シート層数が 3 層である L3-A2-m 試験体はシートが面外方向の変形を抑制し、内側に入り込むダイヤモンド型の局部座屈が発生していることがわかる。 $L_A = 125$ mm の場合においても、シート巻き付け範囲よりも上部に局部座屈が発生した 3 層巻きの L3-A1-m 試験体¹⁾を除いて、他の 2 試験 (L1/L2-A1-m) は、 $L_A = 285$ mm の場合と同様にシートの破断を確認している。以上より、単調荷重の場合にはシート層数 n を 3 層とすることにより、EFB 型の局部座屈を抑制し、ダイヤモンド型に移行させることができることがわかる。

次に (b) 図に示す繰り返し荷重実験結果に着目すると、無補強試験体は全周に渡って EFB 型の局部座屈が発生

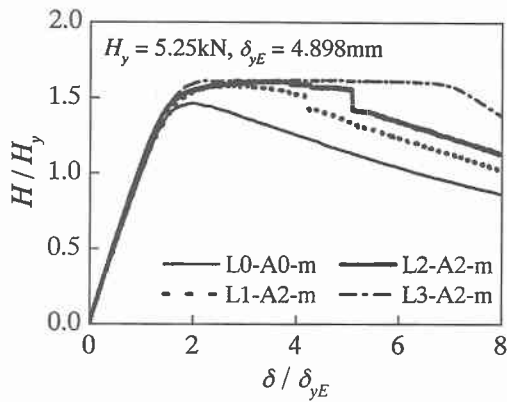


図-4 水平荷重-水平変位曲線 (単調載荷実験)

している。また、L1-A2-c 試験体はシートが両載荷面および載荷方向中立軸において破断し、L0-A0-c 試験体と同様に EFB 型の局部座屈によって終局に至っている。

一方、シート層数が2層および3層である L2/L3-A2-c 試験体は内側に入り込むダイヤモンド型の変形を示している。なお、L2-A2-c 試験体の場合には両載荷面においてシートの破断を確認している。シート高さ $L_A = 125\text{mm}$ である L1/L2/L3-A1-c 試験体の場合には、それぞれ同一層数の A2 試験体と同様な局部座屈が発生し、終局に至っている。

以上より、繰返し載荷の場合には、シート巻き付け範囲にかかわらず、シート層数を2層以上とすることにより、EFB 型の局部座屈の発生が抑制され、その座屈モードをダイヤモンド型に移行させることができるものと推察される。なお、2層巻き付けの場合のシート補強量は単位幅当たりの鋼管の一軸降伏耐力の 0.4 倍に対応している。

3.2. 単調載荷実験における $P-\delta$ 曲線

図-4 には、単調載荷実験における水平荷重-水平変位曲線の一例として、シート高さ $L_A = 285\text{mm}$ の結果を示している。また、無補強試験体における結果についても併せて示している。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} で無次元化している。

図より、無補強試験体は最大耐荷力 ($H_m/H_y \approx 1.45$) に達した後、基部近傍に発生した EFB 型の局部座屈によって耐力が徐々に低下していることがわかる。一方、シート補強した3試験体の最大耐荷力 H_m/H_y は、いずれも 1.6 程度を示し、補強試験体の約 1.1 倍増加している。また、シート層数 L_n が1層および2層である L1/L2-A2-m 試験体は、シート破断によって耐力が急激に減少し、無補強試験体の場合と同程度の軟化勾配を示し終局に至っている。なお、シート破断時の変位に着目すると、1層、2層の場合で、それぞれ $\delta/\delta_{yE} = 4, 5$ 程度となっており、シート層数が多いほど破断時変位も大きい。なお、シート層数 L_n が3層である L3-A2-m 試験体はシート破断がみられず、最大耐荷力 H_m を持続した後、図-3(a)に示したようなダイヤモンド型の局部座屈の進展とともに耐力が減少している。

以上より、シートの拘束効果によって、EFB 型の局部

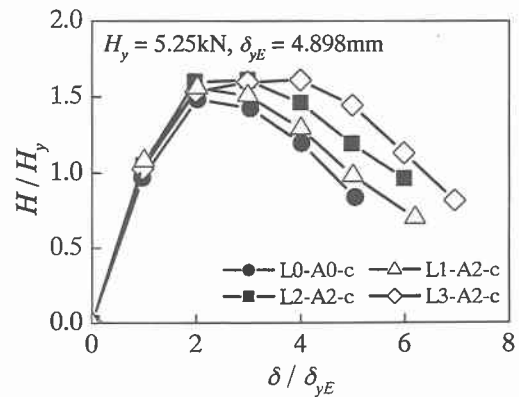


図-5 包絡線分布 (繰返し載荷実験)

座屈を抑制し、かつ靱性能を飛躍的に向上させるためには、3層以上の巻き付け量が必要であるものと考えられる。

3.3. 繰返し載荷実験における包絡線分布

図-5 には繰返し載荷実験における水平荷重-水平変位曲線の包絡線分布の一例として、シート高さ $L_A = 285\text{mm}$ の結果を示している。また、無補強試験体についても併せて示している。

図より、いずれの試験体も2サイクル目で最大耐荷力 H_m/H_y を示し、その値は L0-A0-c 試験体では $H_m/H_y = 1.5$ 程度、シート補強した3試験体の場合には 1.6 程度となっている。また、無補強およびシート層数 L_n が1である L1-A2-c 試験体は、ともに3サイクル目以降に耐荷力が減少している。一方、シート層数 L_n が2および3である L2/L3-A2-c 試験体は、2サイクル目以降、最大耐荷力を持続し、それぞれ4, 5サイクル目に耐荷力が減少している。これは、図-3(b)に示した局部座屈発生状況からもわかるように、座屈モードの差異によるものと考えられる。すなわち、無補強および L1-A2-c 試験体は面外変形となる EFB 型の局部座屈が発生しているのに対し、L2/L3-A2-c 試験体は内側に入り込むダイヤモンド型の局部座屈となっている。なお、シート層数が2および3層で耐荷力が減少するサイクル数が異なる要因として、L2-A2-c 試験体は両載荷面においてシートが軸方向に破断したためと推察される。

以上より、シート層数を増加させることによって、座屈モードを EFB 型からダイヤモンド型に移行し、靱性能を確保できるものと推察される。

3.4. 履歴エネルギー吸収量

図-6 にはシート高さ $L_A = 285\text{mm}$ である A2 試験体の繰返し載荷実験における無次元履歴エネルギー吸収量を示している。縦軸、横軸はそれぞれ無次元履歴エネルギー吸収量およびサイクル数である。なお、無次元エネルギー吸収量は水平荷重-水平変位曲線の1サイクル当たりのループ面積を弾性エネルギー $E_e = H_y \delta_{yE} / 2$ で除すことにより算出している。

図より、シート補強の有無にかかわらず、4サイクル目まではほぼ同一の分布性状を示していることがわかる。しかしながら、シート層数が3層である L3-A2-c 試験体

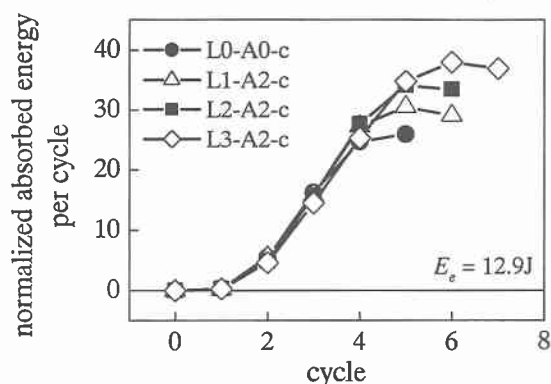


図-6 無次元エネルギー吸収量

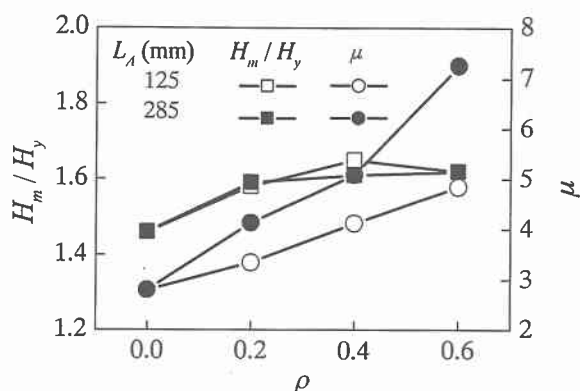
を除いた3試験体のエネルギー吸収量は、5サイクル目に最大値に達しており、その値はシート層数に比例して大きい。L3-A2-c試験体は6サイクル目に最大値を示し、4試験体の中で最も大きなエネルギー吸収能を有していることがわかる。これより、シート層数を増加させることにより、エネルギー吸収能を向上させることができることが明らかとなった。なお、シート層数 L_n が2層および3層である L2/L3-A2-c 試験体は同様な座屈モード（図-3(b)参照）で終局に至っているにもかかわらず、3層である L3-A2-c 試験体がより大きなエネルギー吸収量を示している。この差は、図-3(b)に示した局部座屈発生状況より、シートの破断の有無に起因しているものと推察される。

3.5. 耐力力および塑性率

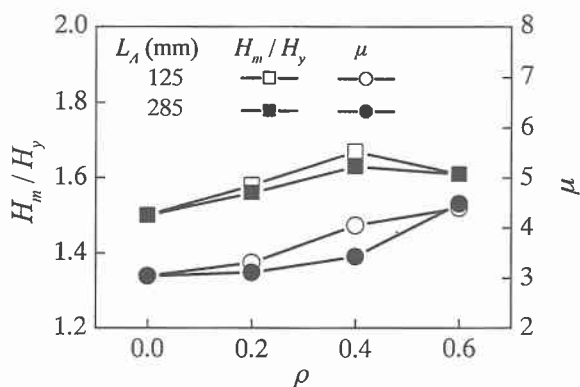
図-7(a), (b)には、それぞれ単調載荷実験および繰り返し載荷実験における各試験体の最大耐力力 H_m/H_y および塑性率 μ を示している。図中、左縦軸に最大耐力力 H_m/H_y 、右縦軸に塑性率 μ を、横軸には後述のシート補強量 ρ を取っている。なお、塑性率 μ は最大耐力力 H_m から $0.95 H_m$ まで低下した時点における水平変位 δ_{95} を実験降伏水平変位 δ_{yE} で除した値としている。また、シート補強量 ρ は単位幅当たりの鋼管の一軸降伏耐力 $\sigma_y t_s$ に対するシートの引張耐力 $\sigma_A t_A$ の比として、 $\rho = \sigma_A t_A / \sigma_y t_s$ で定義される。なお、シート層数 $L_n = 1, 2, 3$ 層である試験体の補強量は、それぞれ $\rho = 0.2, 0.4, 0.6$ 程度となる。

図-7(a)より、単調載荷実験結果に着目すると、各試験体における最大耐力力 H_m/H_y （図中、□、■印）は、無補強試験体で $H_m/H_y = 1.45$ 程度であるのに対し、シート補強試験体では ρ の大きさにかかわらず、いずれも 1.6 程度を示し、シート補強することにより耐力力は 1.1 倍程度増加することがわかる。一方、塑性率 μ （図中、○、●印）は、 ρ の増加とともに増大し、シート高さ $L_A = 125$ mm よりも $L_A = 285$ mm の場合がより向上している。

図-7(b)に示す繰り返し載荷実験結果より、最大耐力力 H_m/H_y は単調載荷実験結果と同様、シート補強試験体は $H_m/H_y = 1.6$ 程度を示している。これより、載荷方法にかかわらずシート補強を施すことによって、耐力力の上昇は 1.1 倍程度であることがわかる。一方、塑



(a) 単調載荷実験



(b) 繰り返し載荷実験

図-7 最大耐力力 H_m/H_y および塑性率 μ

性率 μ はシート層数の増加に伴い増大するものの、その傾向は単調載荷の場合に比較して小さい。また、シート高さに関しても顕著な差は見られない。

以上より、載荷方法にかかわらず、シート高さ $L_A = 285$ mm、シート層数 $L_n = 3$ の L3-A2 試験体が最も大きな靱性能を有していることが明らかとなった。

4. まとめ

本実験の範囲内で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) シート補強した各試験体の最大耐力力は、シート高さおよびシート層数にかかわらず、無補強試験体の約 1.1 倍増加する。また、塑性率は載荷方法によらずシート層数の増加に伴って上昇する。
- 2) 局部座屈形状はシート層数に依存する。すなわち、1層巻きでは EFB 型、2層巻きでは単調載荷の場合には EFB 型、繰り返し載荷の場合にはダイヤモンド型、また、3層巻きではダイヤモンド型となる。
- 3) また、エネルギー吸収量は、シート層数が増加するほど大きくなる。
- 4) 本実験の範囲内において、靱性能を十分に確保するための最適な補強量は、シート高さ $L_A = 285$ mm、シート層数 $L_n = 3$ である。この時の補強量は単位幅当たりの鋼管の一軸降伏耐力の 0.6 倍である。

参考文献

- 1) 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, 鋼構造年次論文報告集, Vol.9, pp.505-512, 2001.11