

AFRP シートで補強した鋼材の力学的特性に関する一検討

A Study on Material Property of Steel Strengthened with AFRP Sheet

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)
三井建設(株)	フェロー	三上 浩	(Hiroshi Mikami)
室蘭工業大学	○学生員	保木 和弘	(Kazuhiro Hoki)

1. はじめに

著者等は、鋼製橋脚の耐震補強工法の1つとして、円形断面鋼管橋脚にアラミド連続繊維シート（以後、AFRPシート）を巻き付け接着する補強工法に着目し、その適用性について実験的に検討を行ってきた^{1)~3)}。その結果、適切なシート接着範囲や巻き付け層数を設定することにより、無補強の場合と比較して変形性能や耐震性能の向上が期待でき、有効な補強工法であることが確認されている。しかしながら、実設計を想定する場合には、特にAFRPシートで補強された鋼材の複合部材としての力学的特性を適切に評価する必要がある。また、このような構造物を対象とした数値解析を合理的に実施するためには、シート補強量と応力-ひずみ関係等を把握しておくことは極めて重要である。

このような観点より、本研究ではAFRPシートで補強した鋼材の力学的特性の把握を目的として、JIS 5号試験片にAFRPシートを接着した試験体を製作し、引張試験を実施した。ここでは、AFRPシートの引張剛性を変化させた4種類の試験体を対象に、鋼材の耐荷力に及ぼすAFRPシート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、鋼材をAFRPシートで補強した場合の力学的特性を検討するために、試験体寸法を一定とし、無補強およびシート層数を3種類に変化させた引張試験を実施した。本実験では、これら4種類の試験体について、鋼材とAFRPシートとの付着特性等のばらつきを除去するために、同一条件の試験体を3体製作した。図-1には、本実験で用いた試験体の形状寸法を示している。試験体は、JIS 5号試験片に基づいて製作し、全長 $L=270$ mm、全幅 $W=50$ mm、板厚 $t=10$ mmである。なお、握み部は端部から60 mmとしている。シート補強試験体は、補強シートとして試験体平行部（接着面積： 120×25 mm）の両面に所定の層数のAFRPシートを接着している。なお、補強シートの剥離を防止するために、補強シート端部には、同一のAFRPシート（以下、定着シート）を3層重ねて接着補強している。

本実験では、試験体の荷重-ひずみ関係を詳細に把握するために、図-1に示すように試験体中心部の4面にそれぞれひずみゲージを2点ずつ貼付している。なお、各面の2点のひずみゲージは、弾性域と弾塑性域のひず

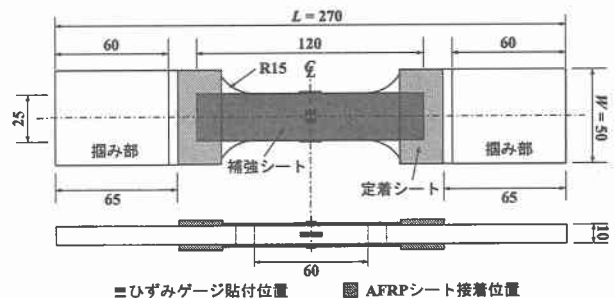


図-1 試験体の形状寸法

表-1 試験体名およびAFRPシート補強量一覧

試験体名	AFRP シート補強量	
	シート層数 *	補強割合
	L_n	ρ (%)
L0-1/2/3	0	0
L1-1/2/3	1	27.4
L2-1/2/3	2	54.8
L3-1/2/3	3	82.3

* 片面あたりの層数

みを正確に計測するために、計測レンジ幅を変化させている。

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、第一項目が試験体の両面に接着されたシート層数、第二項目が試験体番号を示している。また、補強割合 ρ は鋼材の全強に対するAFRPシートの引張耐力の割合として次式で定義される。

$$\rho = \frac{\sigma_a \cdot A_a}{\sigma_v \cdot A_s} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 σ_a :AFRPシートの引張強度、 A_a :AFRPシートの断面積、 σ_y :鋼材の降伏応力、 A_s :鋼材の断面積である。表より、片面に1層ずつ接着したLI試験体の補強割合 ρ は $\rho=27.4\%$ である。

表-2には、本実験で使用した鋼材（SS400）の力学的特性を調べるために実施した引張試験結果とその平均値を一覧にして示している。表より、各試験体の降伏応力、硬化開始ひずみ等に若干の差異がみられるものの、同一の力学的特性を示していることがわかる。また、降伏棚の長さは約18,000 μ である。

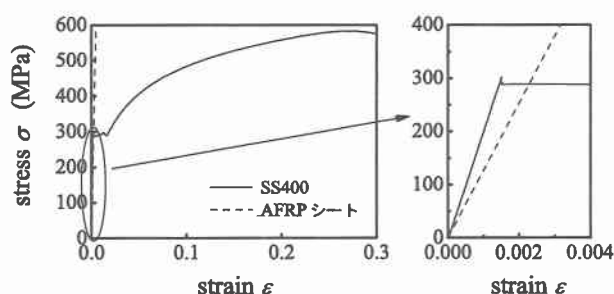
表-3に本実験で使用したAFRPシートの力学的特性値を示している。AFRPシートは、全て繊維目付量（単位面積当たりの連続繊維の質量）が 280 g/m^2 、引張強度

表－2 鋼材の材料特性値

試験体名	鋼種	降伏 応力 σ_y (MPa)	引張 強度 σ_u (MPa)	弾性 係数 E_s (GPa)	ポアソ ン比 ν_s	降伏開始 ひずみ ε_y (μ)	硬化開始 ひずみ ε_{st} (μ)
L0-1	SS400	290	584	204	0.3	1,424	19,632
L0-2		287	584	203	0.3	1,411	19,689
L0-3		293	584	202	0.3	1,448	19,812
平均値	SS400	290	584	203	0.3	1,428	19,711

表－3 AFRP シートの材料特性値（公称値）

規格	シート 目付量 (g/m ²)	シート 厚さ t_a (mm)	弾性 係数 E_a (GPa)	引張 強度 σ_a (GPa)	破断 ひずみ ε_{au} (μ)
AT-40	280	0.193	118	2.48	19,600



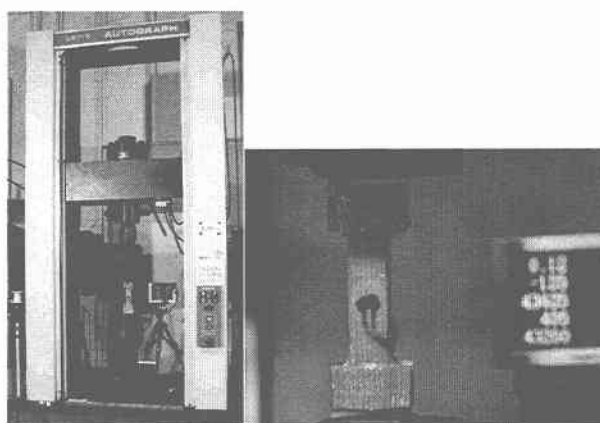
図－2 真応力－真ひずみ関係

$\sigma_a = 2.48$ GPa の一方向シートである。本実験では、AFRP シートの繊維方向が鋼材の引張方向と同一となるように、所定のシート層数 ($L_n = 0, 1, 2, 3$) を接着している。なお、AFRP シートの接着方法は、以下の手順に基づいて行った。すなわち、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・接着用樹脂を塗布し、その上にシートを気泡を抜きながら所定の層数を接着させる、3) シート接着後、室温を 20℃前後に保ち気中養生をして、触感により粘着感がないことを確認する、である。

図－2 には、本実験で使用した鋼材および AFRP シートの真応力－真ひずみ関係を示している。図より、使用した鋼材は明確な降伏棚が存在していることがわかる。また、AFRP シートの弾性係数 E_a は、鋼材の約 6 割となっている。

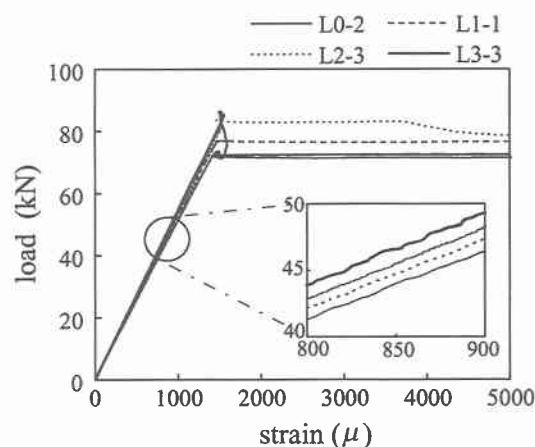
2.2 実験装置および実験方法

写真－1 には、本実験で用いたオートグラフ材料試験装置（許容荷重：250 kN）および実験状況を示している。実験は試験体の両端部を平板用掴み治具で固定し、試験体上端部と接続されているクロスヘッドを引張方向に移動させることにより実施した。なお、クロスヘッド移動速度は 1.0 mm/min と設定した。引張試験は、AFRP シート補強した鋼材の力学的特性を詳細に検討するため、無補強試験体については鋼材が破断に至るまで、AFRP シート補強した場合には鋼材に貼付したひずみゲージの示す値が 45,000 μ 程度に達するまで試験を行っている。計測は全てアンプ内蔵のデジタルレコーダ（サンプリン



(a) 試験装置 (b) 実験状況

写真－1 実験装置およびその状況



図－3 荷重－ひずみ関係（鋼材部）

グ周波数：20 Hz) により一括収録している。また、無補強試験体については、ひずみゲージの他に伸び計を用いて大変形域までのひずみを計測した。

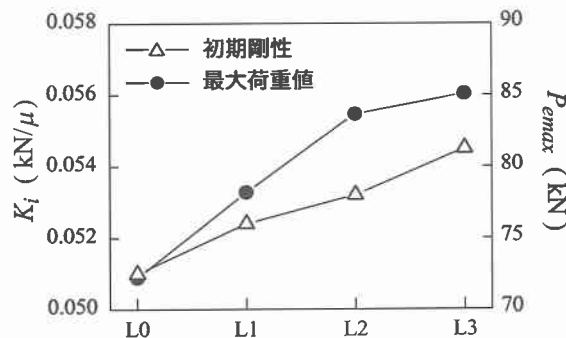
3. 実験結果

3.1 鋼材部における荷重－ひずみ関係

図－3 には、代表的な 4 種類の試験体における荷重－ひずみ関係を示している。図中には、弾性域における拡大図も併せて示している。なお、横軸のひずみ値は、鋼材部 2 面に貼付されたひずみゲージ出力の平均値（以後、鋼材ひずみ）である。また、表－4 には、弾性域における AFRP シートの荷重分担率を示している。なお、

表－4 AFRP シートの荷重分担率

試験体名		荷重分担率 γ (%)		
		実験結果	平均値	理論値
L1	1	2.2	2.3	2.2
	2	2.5		
	3	2.3		
L2	1	4.6	4.8	4.5
	2	5.2		
	3	4.7		
L3	1	6.7	6.9	6.7
	2	7.3		
	3	6.8		



図－4 シート補強量と初期剛性および最大荷重との関係

荷重分担率 γ は次式で与えられる。

$$\gamma = \frac{E_a \cdot A_a}{E_s \cdot A_s} \times 100 \quad (2)$$

表より、各シート補強試験体の平均荷重分担率は、理論値とほぼ一致していることがわかる。これより、弾性域では鋼材とシートは完全に接着しているものと判断される。

図－3の荷重－鋼材ひずみ関係より、シート層数の増加とともに初期勾配も増加していることがわかる。また、弾性域における最大荷重値について着目すると、シート層数の増加に伴い、最大荷重値も上昇していることがわかる。しかしながら、鋼材降伏後の荷重について着目すると、シート層数が1層および2層の場合には、降伏後も弾性域における最大荷重を維持しているものの、3層の場合には最大荷重値に到達後、急激に荷重が低下し、無補強試験体と同程度レベルとなっている。これは、シート層数が3層の場合には、荷重の増加に対して鋼材とシートの接着強度が不十分であり、補強シートと定着シートがほぼ同時に面内剥離に至ったためと考えられる。

表－5には、荷重－鋼材ひずみ関係から得られた初期勾配および弾性域における最大荷重値を全試験体について一覧にして示している。図より、L1試験体の初期勾配に着目すると、3体とも同程度の値を示していることがわかる。しかしながら、最大荷重値には若干の差異が生じている。例えば、L1-1試験体とL1-3試験体を比較すると約2.5 kNの差が示されている。この差は、補強シート

表－5 鋼材部における初期勾配および最大荷重値一覧

試験体名		初期勾配 K_i		弾性域における最大荷重値 P_{emax}	
		(kN/μ)	平均値	(kN)	平均値
L0	1	0.0510	0.0510	71.72	72.21
	2	0.0511		72.15	
	3	0.0508		72.76	
L1	1	0.0521	0.0524	76.92	78.19
	2	0.0525		78.16	
	3	0.0526		79.49	
L2	1	0.0527*	0.0532	82.59	83.69
	2	0.0531		85.68	
	3	0.0532		82.79	
L3	1	0.0545	0.0545	83.22	85.13
	2	0.0542		86.74	
	3	0.0547		85.42	

* 平均値の計算から除外した。

接着時における施工誤差によって生じる鋼材と補強シートの接着強度の差異等に起因するものと考えられる。このような傾向は、L2/L3試験体においても同様である。

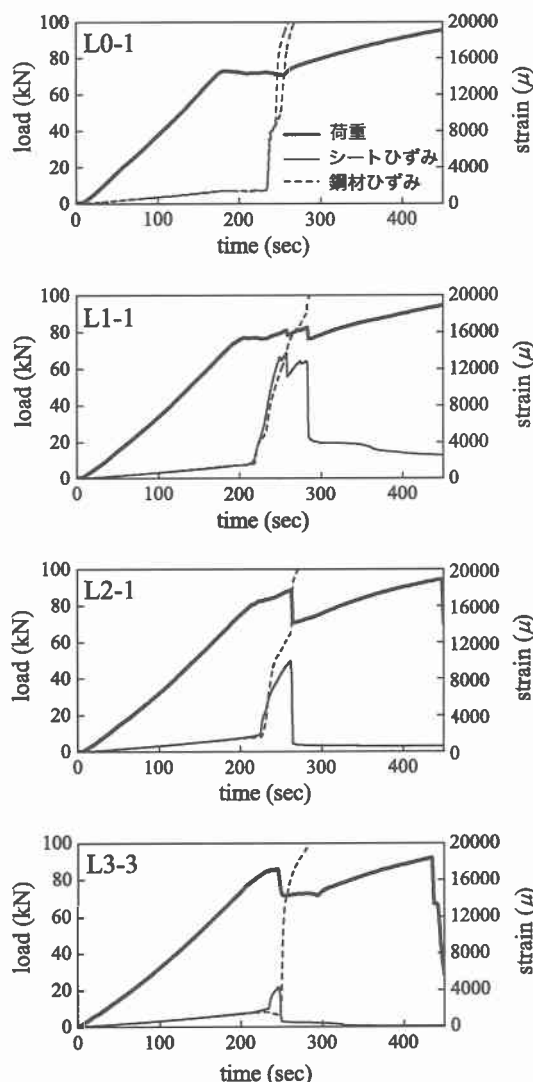
図－4には、弾性域における各試験体の平均初期剛性および最大荷重値とシート補強量の関係を示している。表より、初期剛性の場合に着目すると、シート層数の増加とともにほぼ線形的に増加していることがわかる。一方、最大荷重値の場合には、L0～2試験体がほぼ線形的に増加しているものの、L3試験体ではその増加率が低下していることがわかる。これは、シート層数が3層の場合には、前述したように鋼材と定着シートの面内剥離によって、シートの補強効果が十分に発揮されなかったためと考えられる。すなわち、シート補強効果を適切に評価するためには、シート端部の定着強度を十分に確保する必要がある。

3.2 シート補強量と剥離メカニズム

図－5には、代表的な4種類の試験体における荷重、鋼材ひずみおよび補強シートひずみの時系列分布を示している。なお、各ひずみは2つの面に貼付されたひずみゲージ出力の平均値である。図より、L0-1試験体の場合には、荷重が70 kN程度からほぼ横ばいとなっている。一方、その時の鋼材ひずみもほぼ一定値を示している。その後、鋼材ひずみが急激に増大し降伏棚の終了とともに荷重が再び増加している。

一方、L1-1試験体の場合には、 $t = 200$ sec前後から荷重が緩やかに上昇しているとともに、鋼材および補強シートひずみが増加している。一方、 $t = 220$ sec程度から鋼材および補強シートひずみが急激に上昇し、補強シートひずみが約14,000 μ に達した時点で、補強シートと鋼材の剥離が発生し、荷重が一時的に低下している。その後、再度荷重が増加するものの、定着シートの面内剥離の発生と同時に無補強試験体の荷重レベルまで低下していることがわかる。

次にL2-1試験体の場合に着目すると、L1-1試験体の場合と同様に補強シートひずみの増加によって荷重が緩やかに上昇していることがわかる。しかしながら、L1-1



図－5 荷重、鋼材ひずみおよびシートひずみの時系列分布

試験体の場合とは異なり、補強シートひずみが約 10,000 μ に達した時点で補強シートおよび定着シートがほぼ同時に面内剥離を起し、荷重が大幅に低下していることがわかる。また、L3-3 試験体の場合にも、他の補強試験体と同様に補強シートのひずみの上昇が見られるものの、補強シートひずみが 4,000 μ 程度に達した時点で、L2-1 試験体と同様、補強および定着シートと鋼材間に面内剥離が発生し、荷重が低下している。表－6 には、定着シート剥離時における荷重および補強シートひずみを一覧にして示している。表より、いずれの試験体も若干のばらつきがあることがわかる。これは、シートと鋼材の接着強度の差異等が影響しているものと考えられる。

以上、シート補強量を増大すると、補強シートが分担する荷重も増加し、鋼材と補強シートの面内剥離が生じやすくなる。従って、シート補強効果を適切に評価するためには、補強シートの面内剥離を抑制するための十分な定着強度の確保が極めて重要である。

4. まとめ

本研究では、AFRP シート補強鋼材の力学的特性の把

表－6 シート剥離時における荷重および補強シートひずみ

試験体名		荷重 P_{dmax}		シートひずみ ε_d	
		(kN)	平均値	(μ)	平均値
L1	1	80.97	83.39	13,767	14,517
	2	84.82		16,954	
	3	84.38		12,831	
L2	1	88.50	86.15	10,043	7,716
	2	86.80		8,592	
	3	83.16		4,513	
L3	1	83.22	85.00	2,174	3,343
	2	86.82		3,513	
	3	86.48		4,341	

握を目的として、JIS 5 号試験片に AFRP シートを接着した試験体を製作し引張試験を実施した。ここでは、補強の有無や補強割合が鋼材の力学的特性に及ぼす影響について比較検討を行った。本実験の範囲内で得られた結果を整理すると、以下ようになる。

- 1) シート補強量を増加させることにより、弾性域における最大荷重値は上昇し、試験体の初期剛性も増加する。一方、シート分担荷重が増加するため、鋼材とシート間の面内剥離が生じやすくなる傾向にある。
- 2) シート層数が 3 層の場合、鋼材の降伏後に荷重が無補強試験体と同程度まで急激に減少した。これは、荷重の増加に対して鋼材とシートの接着強度が不十分であり、補強シートと定着シートがほぼ同時に面内剥離に至ったためと考えられる。
- 3) シート補強量の増加とともに、補強シートおよび定着シートと鋼材間の面内剥離が早期に発生する傾向があることから、シート補強効果を適切に評価するためには、補強シートの面内剥離を防止するための十分な定着強度が必要であることが明らかとなった。

なお、今後の課題として、早期の面内剥離を防止するための十分な定着強度を確保するために、定着シートのより効果的な接着方法について検討する必要がある。

謝辞：本研究を行うにあたり、(株)日本製鋼所室蘭研究所の小枝日出夫氏、長谷川久氏には実験装置の借用や実験補助等のご協力を戴いた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 池田憲二，岸 徳光，小室雅人，三上 浩：基部加振を受ける AFRP シート補強鋼管橋脚模型の弾塑性応答性状，構造工学論文集，Vol.48A，pp. 67-76，2002.3
- 2) 池田憲二，岸 徳光，小室雅人，渡部将行：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，土木学会，北海道支部論文報告集，第 58 号，2001.1
- 3) 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靱性能に及ぼす補強量の影響，土木学会，北海道支部論文報告集，第 58 号，2001.1