

AFRP シート補強鋼材の力学的特性に関する板引張試験

Coupon test for mechanical 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)  
 三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)  
 室蘭工業大学 ○学生員 吉田 英二 (Eiji Yoshida)

1. はじめに

近年、鋼構造物の耐震補強や補修を目的として、新繊維素材シートに着目した研究が盛んに行われている。著者らも、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<sup>1)~3)</sup>。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。

著者らは、既往の研究において、AFRPシートで補強した鋼材の力学的特性を検討するために、JIS 5号試験片に所定の層数のAFRPシートを接着して試験体を製作し、引張試験を実施した<sup>4)</sup>。その結果、1)シート補強量が増加するに従い、初期剛性は増加し、弾性域内における最大荷重値も増加すること、2)その一方、シートの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こと、等を明らかにしている。しかしながら、これらの知見は、鋼材降伏後にもまもなくシートと鋼材間に面内剥離が発生したため、鋼材降伏後のシートによる補強効果に関して十分な検討を行うことができず、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を明らかにしている。

このような背景より、本研究では既往の実験結果<sup>4)</sup>を踏まえ、試験体の寸法や補強シートの面内剥離を防止するためにシート定着部に改良を加えたAFRPシート補強試験体を製作し板引張試験を実施した。ここでは、既往の研究と同様にAFRPシートの引張剛性を4種類に変化させた試験体を製作し、鋼材の荷重-ひずみ関係に及ぼすAFRPシートの補強効果に関する影響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、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

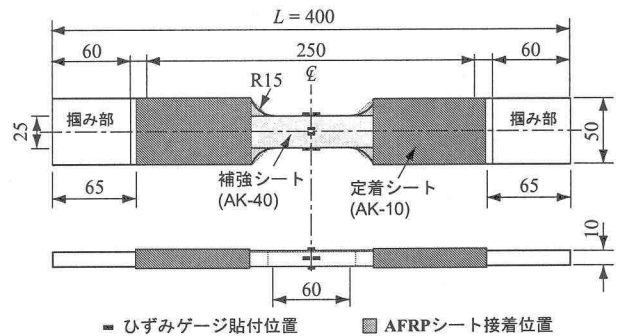


図-1 試験体の形状寸法

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* $L_n$	補強割合 $\rho$ (%)
L0-1/2/3	0	0
L1-1/2/3	1	21.3
L2-1/2/3	2	42.6
L3-1/2/3	3	63.9

\* 片面あたりの層数

実施した。本実験では、これら4種類の試験体について、同一条件の試験体を3体ずつ製作した。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  $L = 400$  mm、全幅  $W = 50$  mm、板厚  $t = 10$  mm である。なお、掴み部は端部から 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：270 × 25 mm）の両面に所定の層数の1方向AFRPシートを接着している。なお、既往の研究成果を踏まえ、補強シートの面内剥離を防止するために、補強シートの端部定着長を拡張し、かつ補強シートとほぼ同程度の剛性になるように、所定の量の2方向AFRPシート（以後、定着シート）を巻き付け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みを正確に計測するために、計測レンジを変化させている。

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片面に接着されたシート層数、第二項目が試験体番号

表-2 鋼材の材料特性値

試験体名	鋼種	降伏 応力 $\sigma_y$ (MPa)	引張 強度 $\sigma_u$ (MPa)	弾性 係数 $E_s$ (GPa)	ポアソ ン比 $\nu_s$	降伏開始 ひずみ $\epsilon_y$ ( $\mu$ )
L0-1	SS400	374	584	205	0.3	1,824
L0-2		377	586	204	0.3	1,848
L0-3		379	584	202	0.3	1,876
平均値	SS400	377	585	204	0.3	1,849

表-3 AFRP シートの材料特性値 (公称値)

	規格	繊維 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 $\sigma_a$ (GPa)	破断 ひずみ $\epsilon_{ua}$ ( $\mu$ )
補強シート	AK-40	280	0.193	118	2.06	17,500
定着シート	AK-10	57	0.04			

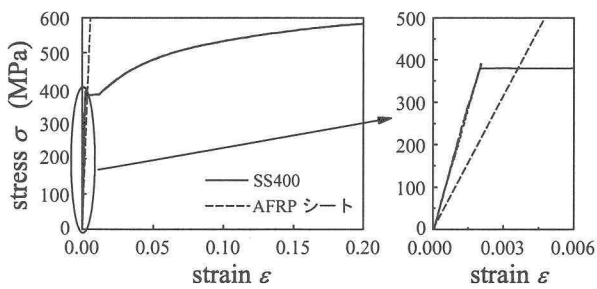


図-2 真応力-真ひずみ関係

を示している。また、補強割合  $\rho$  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。

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

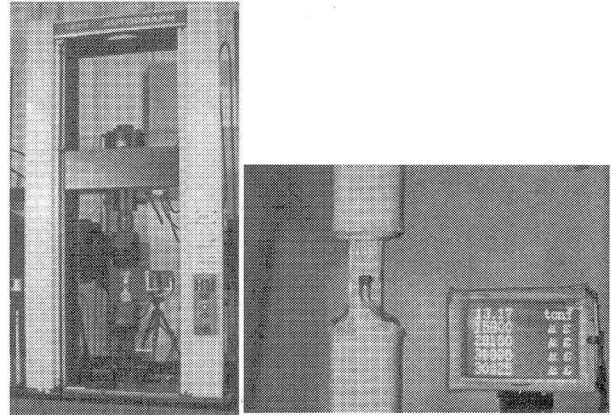
ここで、 $\sigma_a$ : AFRP シートの引張強度、 $A_a$ : AFRP シートの断面積 ( $=L_n \times t_a$ )、 $\sigma_y$ : 鋼材の降伏応力、 $A_s$ : 鋼材の断面積である。

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、降伏開始ひずみ等に若干の差異がみられるものの、ほぼ同一の力学的特性を示していることが分かる。

表-3 には、本実験で使用した AFRP シートの材料特性値を示している。AFRP シートは、2種類のものを用途別に使用した。すなわち、補強シートは繊維目付量 (単位面積当たりの連続繊維の質量) が  $280 g/m^2$  の 1 方向シートを、定着シートは繊維目付量が  $57 g/m^2$  の 2 方向シートを用いた。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、試験体に所定のシート層数 ( $L_n=0, 1, 2, 3$ ) を接着した。

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することが分かる。また、AFRP シートの弾性係数  $E_a$  は、鋼材の約 6 割である。

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。



(a) 試験装置

(b) 実験状況

写真-1 実験装置およびその状況

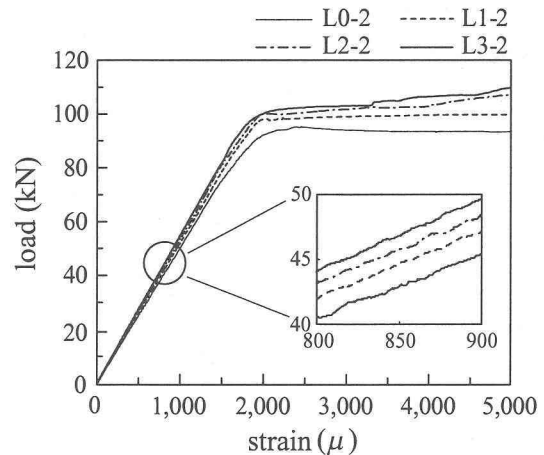


図-3 荷重-ひずみ関係 (鋼材部)

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、無補強試験体の場合には鋼材が破断に至るまで、AFRP シート補強試験体の場合には鋼材に貼付したひずみゲージ出力が  $45,000 \mu$  程度に達するまで行っている。計測は全てアンブ内蔵のデジタルメモリレコーダ (サンプリング周波数:  $20 Hz$ ) 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。

図より、シート層数  $L_n$  の増加とともに初期勾配も増加していることが分かる。また、弾性域における最大荷重値  $P_{emax}$  について着目すると、シート層数の増加に伴い  $P_{emax}$  も上昇している。なお、鋼材降伏後の荷重-ひずみ関係に着目すると、シート補強試験体はいずれも緩や

表-4 初期剛性および最大荷重値一覧

試験体名		初期剛性 $K_i$		弾性域における最大荷重値 $P_{emax}$	
		(kN/ $\mu$ )	平均値	(kN)	平均値
L0	1	0.0477	0.0480	88.30	88.89
	2	0.0494		91.34	
	3	0.0470		87.02	
L1	1	0.0530	0.0506	98.00	93.59
	2	0.0483		89.23	
	3	0.0505		93.49	
L2	1	0.0537	0.0528	99.27	97.64
	2	0.0523		96.73	
	3	0.0524		96.92	
L3	1	0.0534	0.0536	98.78	99.08
	2	0.0531		98.20	
	3	0.0542		100.25	

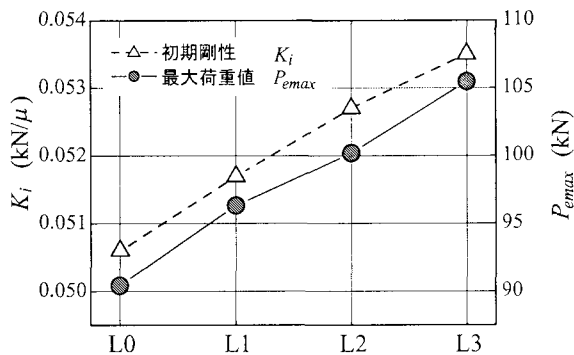


図-4 シート補強量と初期剛性および最大荷重との関係

かに荷重が増加していることが分かる。これは、ひずみレベルが5000 $\mu$ 以下の領域まではシートと鋼材が完全に付着していることを意味しており、シート定着部に改良を加えた効果が十分に発揮されたものと考えられる。

表-4には、図-3に示す荷重-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  $P_{emax}$  を全試験体について一覧にして示している。表より、同一補強量の試験体の初期剛性に着目すると、各試験体でほぼ同程度の値を示しており、ばらつきが小さいことが分かる。一方、最大荷重値  $P_{emax}$  の場合には、試験体によって若干のばらつきが生じている。このばらつきは補強シート接着時における施工誤差に起因するものと考えられる。

図-4には、表-4より得られた弾性域における各試験体の平均初期剛性  $K_i$  および最大荷重値  $P_{emax}$  とシート補強量の関係を示している。表より、初期剛性および最大荷重とも、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分かる。

### 3.2 最大荷重およびシートひずみ

表-5には、実験結果より得られた最大荷重  $P_{dmax}$  とその時のシートひずみ  $\epsilon_d$ 、理論最大荷重  $P_{amax}$  および試験体の終局状態を一覧にして示している。なお、シートひずみは2枚のゲージ出力の平均値である。また、理論最大荷重  $P_{amax}$  は、シートの公称破断ひずみである  $\epsilon_{ua} = 17,500 \mu$  時の荷重であり、表-2および表-3に示す材

表-5 最大荷重、シートひずみ、理論最大荷重および終局状態の一覧

試験体名		実験値				理論最大荷重*1 $P_{amax}$	終局状況
		最大荷重 (kN)		ひずみ ( $\mu$ )			
		$P_{dmax}$	平均値	$\epsilon_d$	平均値		
L1	1	125.71	128.20	20,425	21,111	114.15	シート破断
	2	128.86		19,625			
	3	130.02		23,313			
L2	1	132.93	137.31	18,488	16,388	134.04	シート剥離
	2	136.53		13,838			
	3	142.46		16,838			
L3	1	130.13	131.88	16,512	12,923	153.94	シート剥離
	2	132.00		11,075			
	3	133.51		11,363			

\*1 鋼材を完全弾塑性体、AFRPシートを弾性体と仮定する場合のシート公称破断ひずみ  $\epsilon_{ua} = 17,500 \mu$  時の荷重

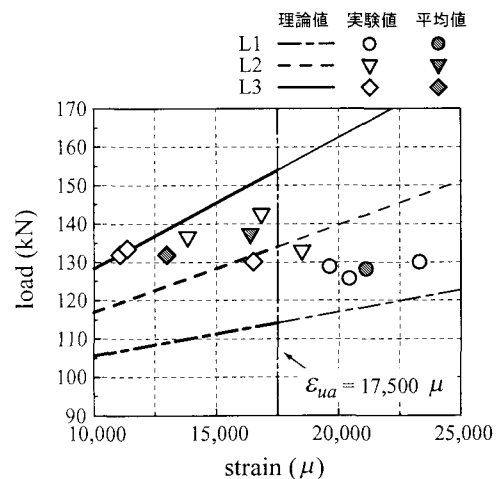


図-5 最大荷重とシートひずみの関係

料物性値を用いて、鋼材を完全弾塑性体、AFRPシートを弾性体とし、両者が互いに完全に付着しているものと仮定して、算出した値である。

表より、各試験体の最大荷重およびシートひずみには、ばらつきが生じていることが分かる。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。また、シート補強試験体の終局状態を比較すると、L1試験体の場合にはシート破断、L2/L3試験体の場合にはシートと鋼材間の面内剥離によって荷重が急激に低下し終局に至っている。

図-5には、表-5に示す最大荷重  $P_{dmax}$  とシートひずみ  $\epsilon_d$  の関係を示している。なお、図中、白抜き印は3試験体の実験値を、灰色印はそれらの平均値を示している。また、図には前述の簡易解析より得られる理論荷重-ひずみ曲線（以後、理論線）を併せて示している。図より、シート破断で終局に至ったL1試験体（○印）の場合には、いずれの実験結果も理論線より上方の領域に位置し、かつシートひずみ  $\epsilon_d$  が公称破断ひずみ  $\epsilon_{ua} = 17,500 \mu$  以上となっている。また全ての試験体でシート破断において終局に至っていることから、1層補強の場合にはシート破断時までの力学的特性を適切に評価しているものと考えられる。

一方、L2試験体（▽印）の場合には、実験値が理論線を中心に分布にしており、若干のばらつきが見られる。

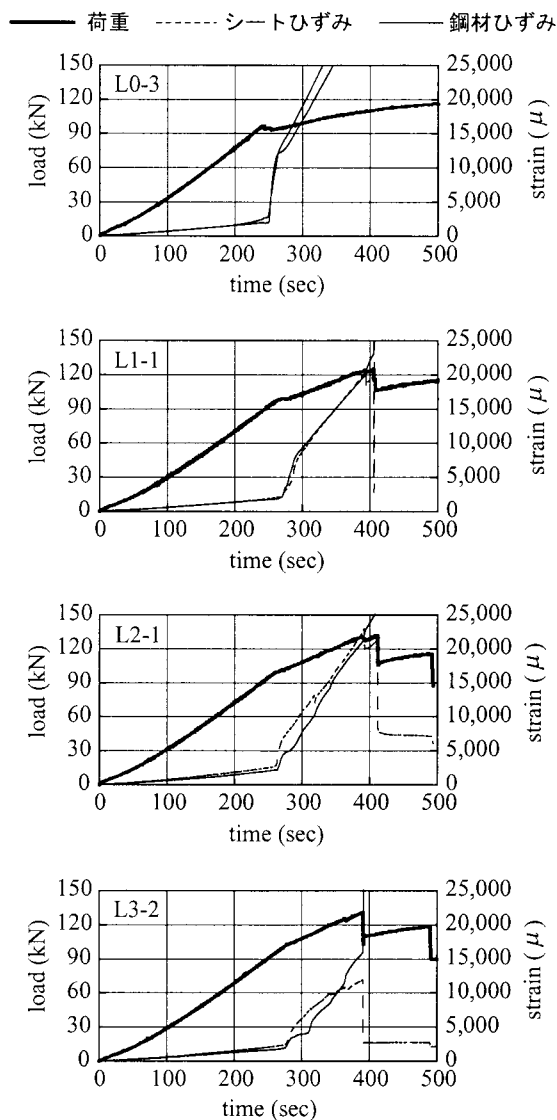


図-6 荷重、鋼材およびシートひずみの時系列分布

しかしながら、それらの平均値はシートの公称破断ひずみ  $\epsilon_{ua}$  以下となっていることより、2層補強した場合には、シートの破断に至る前にシートと鋼材の付着強度が不足し、面内剥離が生じたものと考えられる。

L3試験体(◇印)の場合には、実験値が理論線付近あるいはその下方の領域に分布し、かつシートの公称破断ひずみ  $\epsilon_{ua}$  以下となっている。また、L2試験体と比較して最大荷重値およびシートひずみも小さく、他の試験体と比較して小さなひずみレベルで面内剥離していることが分かる。これは、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、鋼材と補強シート間の面内剥離が生じやすくなるためと考えられる。従って、シートの破断に至るまでの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を確保する必要がある。

### 3.3 シート補強量と剥離メカニズム

図-6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、L0-3試験体の場合

には、 $t=220$  sec 前後で鋼材が降伏し、その後降伏棚の終了( $t \approx 250$  sec)とともに再び荷重が増加し、それに伴い鋼材ひずみが急激に上昇している。

一方、L1-1試験体の場合には、 $t=270$  sec 程度から鋼材およびシートひずみが急激に上昇し、シートひずみが約  $20,000 \mu$  に達した時点( $t \approx 400$  sec)で、シート破断が発生し、荷重が無補強試験体の荷重レベルまで急激に低下していることが分かる。

次にL2-1試験体の場合に注目すると、L1-1試験体の場合と同様に鋼材降伏後、ひずみが急激に上昇している。しかしながら、L1-1試験体の場合とは異なり、補強シートひずみが約  $20,000 \mu$  に達した時点( $t \approx 390$  sec)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、再度荷重が上昇するものの、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。また、L3-2試験体の場合には、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  $10,000 \mu$  程度に達した時点( $t \approx 390$  sec)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。

## 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。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) 弾性域における最大荷重値および初期剛性は、シート補強量に比例して増大する。
- 2) シート定着部を改良することにより、ひずみレベルが  $5,000 \mu$  以下の領域においてシートと鋼材が完全に付着していることを確認した。
- 3) しかしながら、1層補強の場合を除いて、シートと鋼材間の面内剥離によって終局に至ったことより、シートの破断まで含めた補強効果を適切に評価するためには、試験体の形状寸法や補強シートの定着方法に更なる改良を加えて、シートの定着強度を増大させる必要があることが明らかになった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、(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, 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, pp. 304-307, 2002.1
- 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静的載荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 9, pp. 513-520, 2001.11
- 4) 小室雅人, 岸 徳光, 三上 浩, 保木和弘: AFRPシートで補強した鋼材の力学的特性に関する一検討, 土木学会北海道支部論文報告集, 第59号, pp. 170-173, 2003.1