

論文

[1192] 板状のFRPロッドを用いたコンクリートはりの曲げ性状

正会員 秋山 暉(鹿島建設技術研究所)

正会員○天野玲子(鹿島建設技術研究所)

奥村一正(鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

近年、様々な新材料・新素材が開発されており、その中でも、各種の長繊維を樹脂で固めたFRPロッドは、軽量、高強度、耐腐食性に優れるなどの特徴を有し、鋼材に替わるコンクリート補強材として期待されている。しかし、これまでの研究の結果から、FRPロッドはコンクリートとの付着力が小さいためプレテンションPCはりに応用する場合には定着長が長くなり、また、鋼材のように塑性伸びがないためPCはりとして粘りのないことが明らかとなってきた。

そこで、付着特性に優れた板状のFRPロッドを緊張材として用いたプレテンションPCはり部材を開発することとし、ここでは、その脆性的挙動を改善するための一手段を得るために、FRPロッドの付着特性(ボンド又はアンボンド)やFRPロッド一本当りの緊張力を変化させた場合のコンクリートはりの変形及び耐力等の基本特性について調べる実験を実施した。

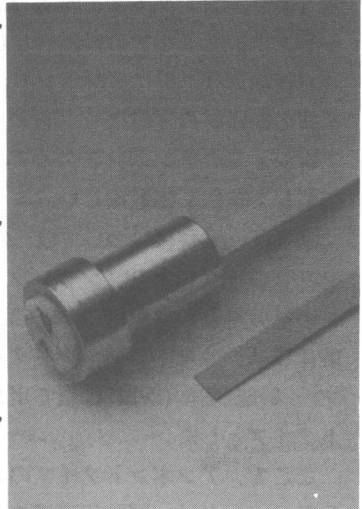


写真-1 板状AFRPロッド

2. FRPロッドの材料特性

このFRPロッドは表-1に示すようなアラミド繊維とエポキシ樹脂で構成されており、写真-1に示すような表面に規則的な凹凸が形成されている板状のロッドである。試験体を使用したAFRPロッドの諸元値を表-2に、引張強度特性を表-3に示す。

なお、引抜試験の結果、コンクリート部材中における定着長は約6cmであり、その平均付着応力度は140kg/cm²であった。

3. 曲げ特性

3.1 試験体及び試験方法

試験体の形状寸法を図-1に示し、試験体の種類を表-4に

表-1 アラミド繊維のカatalog値

	引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	伸び率 (%)	密度 (g/cm ³)
アラミド繊維	28500	1.26×10 ⁶	2.3	1.45

表-2 AFRPロッドの諸元

繊維数 (f)	断面形状 (mm)	断面積(mm ²)		密度 (g/cm ³)
		樹脂込み	繊維のみ	
100,000	1.5×20	27.75	11.1	1.25

表-3 AFRPロッドの引張強度特性

引張強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	伸び率 (%)
11,200	5.10×10 ⁵	2.2

(樹脂込み)

示す。

S-1～S-4試験体については、AFRPロッド 4本を緊張材としてプレストレスを導入し、S-1試験体(P-B)は全てボンドタイプ、S-2試験体(P-U)は全てアンボンドタイプ、S-3試験体(P-BU)は外側 2本をボンドタイプ、内側 2本をアンボンドタイプの緊張材とし、S-4試験体(PR-U)はアンボンドタイプの緊張材の下段に 2本のノンテンションのアンボンドタイプの補強材を追加して配置した。

S-5, S-6試験体については、AFRPロッド 4本をノンテンションの補強材として配置し、S-5試験体(R-U)は全てアンボンドタイプ、S-6試験体(R-B)は全てボンドタイプとした。

ここで、アンボンドタイプのAFRPロッドは、試験体両端の30cmを定着部とし、定着部以外の部分については、ポリエステル樹脂のシートを巻き付けてコンクリートとの付着を切るようにした。

プレストレスを導入した試験体の載荷実験時(材令14日)の緊張力は、1ロッド当り 1.7t (0.54Pu, Pu=3.1t) であり、コンクリート応力は上縁で $-11\text{kg}/\text{cm}^2$ 、下縁で $47\text{kg}/\text{cm}^2$ である。緊張直後の各ロッドの緊張力のばらつきは $\pm 3\%$ であった。

コンクリートの配合及び強度特性を表-5, 6に示す。

加力方法は、図-2に示すように、スパン 200cm, 純曲げ区間50cmの2点載荷とし、変位制御とした。

表-4 試験体一覧

	補 強 材			補強材比 (%)
	緊張力 (t/本)	ボンド, アンボンド	ノンテンション補強材の有無	
S-1	1.87	ボンド	無	0.38
S-2	1.87	アンボンド	無	0.38
S-3	1.87	ボンド, アンボンド	無	0.38
S-4	1.87	アンボンド	有	0.60
S-5	0	アンボンド	有	0.38
S-6	0	ボンド	有	0.38

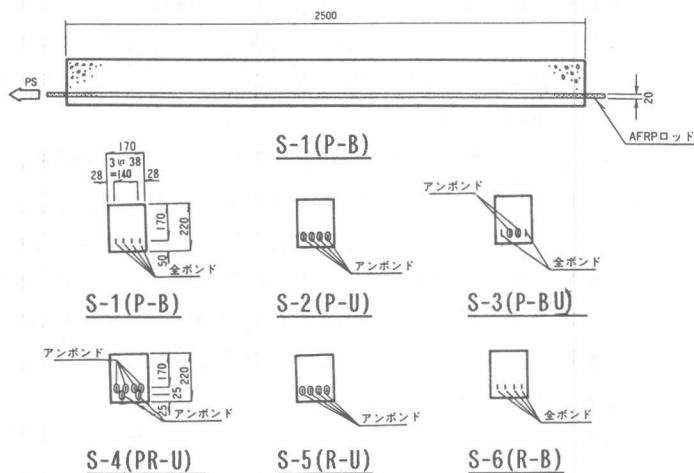


図-1 試験体形状寸法

表-5 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
					W	C	S	G	
20	19	3.6	34.5	34.8	174	504	567	1089	9.13

表-6 コンクリートの力学的特性

	圧縮強度 (kg/cm ²)	弾性係数 (kg/cm ²)	割裂強度 (kg/cm ²)
導 入 時	442	—	—
試 験 時	507	3.56×10^2	40

3. 2 荷重－変位関係

図－3に各試験体の荷重－変位曲線を示し、表－7に最大荷重及び終局たわみを示す。

S-1試験体(P-B)は、ひびわれが3.70tで発生し、15.5mmのたわみが生じた時点で最大荷重5.01tとなって4本のボンド緊張材が同時に破断した。

S-2試験体(P-U)は、ひびわれが3.29tで発生し、26.0mmのたわみが生じた時点で最大荷重4.43tとなりアンボンド緊張材4本の内の1本が破断した。その後、しだいに荷重が低下しながら残り3本のアンボンド緊張材が順次破断に至って、最後の緊張材が破断した時のたわみ（終局たわみ）は39.5mmであった。

S-3試験体(P-BU)は、ひびわれが3.81tで発生し、8.3mmのたわみが生じた時点で4.37tの最大荷重となりボンド緊張材2本が同時に破断して1/3程度まで荷重が低減した。その後、アンボンド緊張材2本で荷重を受け、再度荷重が増加してアンボンド緊張材2本が順次破断した。終局たわみは32.4mmであった。

S-4試験体(PR-U)は、ひびわれが3.33tで発生し、22.6mmのたわみが生じた時点で最大荷重4.86tとなりアンボンド緊張材4本の内の1本が破断した。しだいに荷重が低下しながら残り3本のアンボンド緊張材が順次破断し、その後更に、ノンテンションアンボンドの補強材2本で荷重を受け、再度荷重が増加して補強材が順次破断した。終局たわみは74.5mmであった。

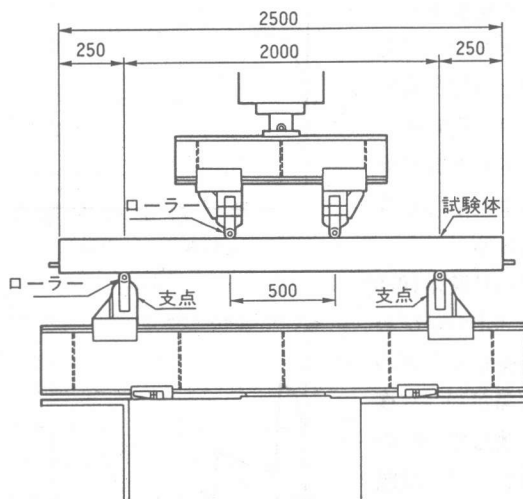
S-5試験体(R-U)は、ひびわれが1.07tで発生し、荷重2.06t(45.0mm)の時点から圧縮側のコンクリートが剥離し始めたが、荷重2.48t(76.1mm)の時点で荷重が最大となってアンボンド緊張材4本の内の1本が破断した。その後、しだいに荷重が低下しながら残り3本のアンボンド緊張材が順次破断した。終局たわみは121.1mmであった。

S-6試験体(R-B)は、ひびわれが1.07tで発生し、最大荷重3.00tの時のたわみは42.0mmであって、斜めひびわれが圧縮側に突き抜けて破壊した。

3. 3 ひびわれ性状

図－4に終局時におけるひびわれ状況を示す。

PCはりであるS-1～S-4試験体では、ひびわれ発生荷重をコンクリートの曲げ強度($0.9f_c^{2/3}$)とプレストレスによる下縁圧縮応力度から求めた曲げモーメントより自重の影響を差し引



図－2 荷重装置図

表－7 試験結果一覧

試験体名	ひびわれ発生時 Pcr(ton)	最大荷重時		破壊モード	終局時 δ_{max} (mm)
		Pu(ton)	δ_u (mm)		
S-1	3.70	5.01	15.5	破断	15.5
S-2	3.29	4.43	25.5	破断	39.5
S-3	3.81	4.37	8.3	破断	32.4
S-4	3.33	4.86	22.6	破断	74.5
S-5	1.07	2.47	76.5	破断	121.1
S-6	1.31	3.00	42.0	圧壊	54.5

いて算定すると

3.7t となって実験値とほぼ一致しており、所定のプレストレス力が導入されたものと考えられる。

S-1試験体(P-B)

では 6本のひびわれが生じてひびわれ間隔が10cm程度と分散していたのに対し、S-2試験体(P-U)では、2本のみ生じたひびわれが先端部で部材軸方向に分岐してコンクリート圧縮域を分離させる傾向にあった。

S-3試験体(P-BU)では 4本のひびわれが生じてひびわれ間隔が20cm程度となっていたが、ボンド緊張材が破断した後アンボンドの緊張材のみが抵抗するようになると 1本のひびわれのみでひびわれ幅が広がった。緊張材・補強材とも

にアンボンドタイプである S-4試験体(PR-U)では S-2試験体(P-U)と同様に 2本のひびわれが生じた。

RCはりである S-5、S-6試験体では、ひびわれ性状も幾分異なったものとなっており、S-5試験体(R-U)については 1本のひびわれのみが生じたためひびわれ幅がかなり広がり終局時で最大22mmとなった。S-6試験体(R-B)では始め10cm間隔程度にひびわれが分散していたが、しだいに斜めひびわれが卓越するようになった。

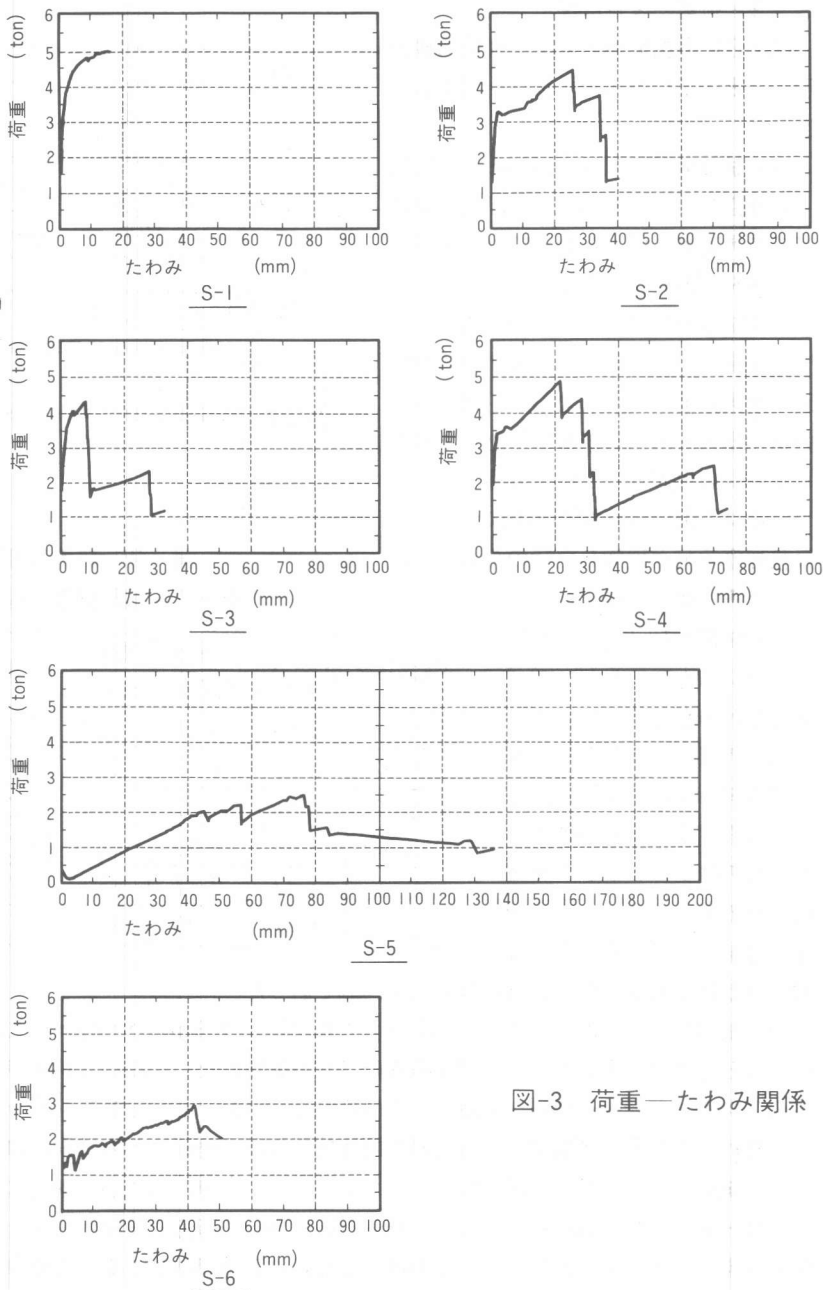


図-3 荷重—たわみ関係

3. 4 破壊モードと

最大荷重の比較

S-1試験体(P-B)では、弾性材料である緊張材が同時に破断して脆性的な破壊モードを生じるが、その最大荷重をRC理論で算定すると、5.35tとなり実験値とはほぼ一致した。これにより曲げ耐力がRC理論で算定可能であることがわかる。

S-2試験体(P-U)では、アンボンド緊張材が順次破断するため脆性的な傾向はやや緩和されていたが、その最大荷重は S-1試験体(P-B)よりも10%程低減した。これは、鋼材によるアンボンドPCはりと同様の傾向であり、ひびわれ状況や定着部の影響による各緊張材の伸びの差で最大荷重時の各緊張材の有効引張応力度が低減することや、ひびわれ位置での曲率が大きくなって緊張材である板状のAFRPロッドを縦使いしているため緊張材断面下縁に終局ひずみが発生することで緊張材の破断が生じ有効引張応力度を低減させること、緊張材とコンクリートとの間の摩擦係数等の影響と考えられる。

S-3試験体(P-BU)では、最大荷重時にボンド緊張材 2本が同時に破断するが、その後アンボンド緊張材が抵抗するので脆性的な破壊は生じない。ただし、変形性能そのものはすべてアンボンドタイプである S-2試験体(P-U)よりも小さかった。S-3試験体(P-BU)の最大荷重は、S-1試験体(P-B)よりも10%程低減した。これは、アンボンド緊張材の見掛けの弾性係数が小さいため、

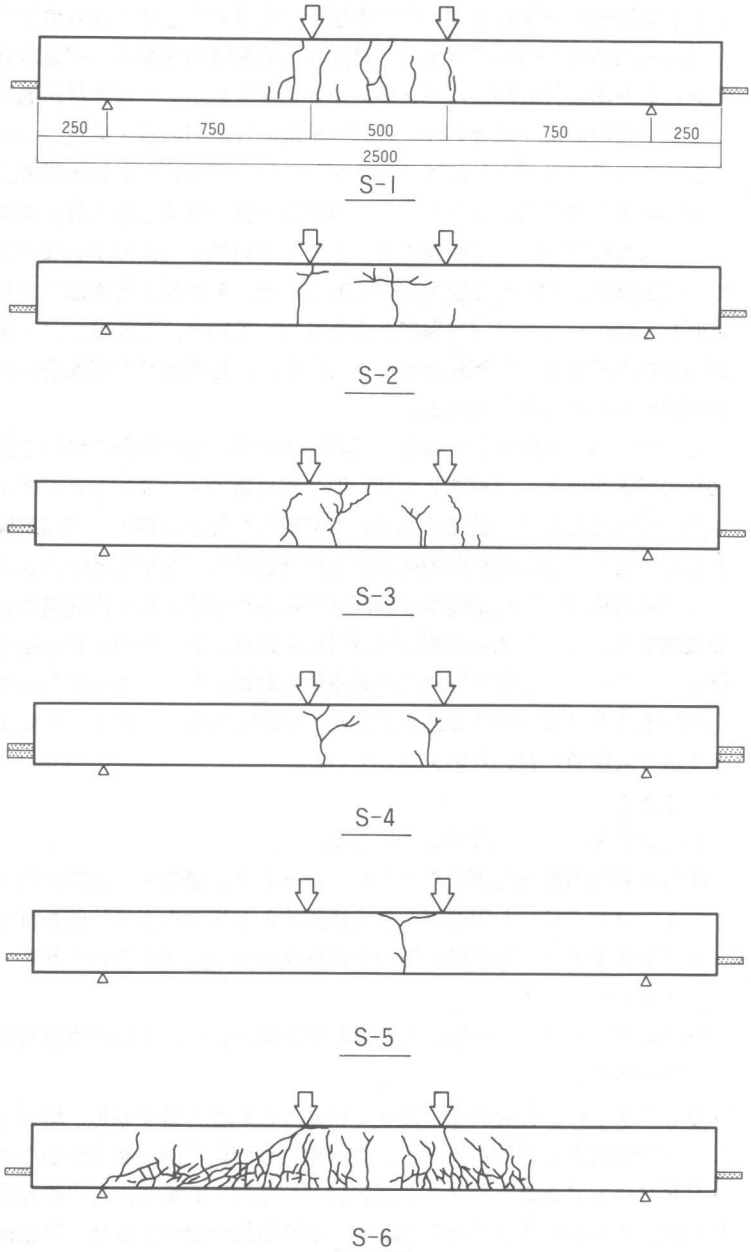


図-4 ひびわれ図

ボンド緊張材の荷重に対するひずみ増分が大きいことによるものと考えられる。

S-4試験体(PR-U)のアンボンド緊張材の破断時の挙動は S-2試験体(P-U) と同様であったが、アンボンド緊張材破断後にノンテンションのアンボンド補強材が抵抗することで更にたわみが伸びて変形性能がより改善された。S-4試験体(PR-U)の最大荷重は S-2試験体(P-U) よりも10%程度大きくなっていたが、これはノンテンションのアンボンド補強材の負担分を考慮すると17%程度の荷重増加分が見込めるため、この荷重増加分の影響で最大荷重が増加したと考えられる。

S-5試験体(R-U) の圧縮側コンクリートが剥離した後の挙動はアンボンド補強材が順次破断して S-2試験体(P-U) と類似のものであったが、その最大荷重は半分程度であり、最後の補強材が破断した時のたわみは 3倍程度と大きくなっていた。これは、ノンテンションであってひびわれが 1本のみでひびわれ幅が大きくなったため、各補強材の有効引張応力度が S-2試験体(P-U) より低減したためと考えられる。

ここで、S-4試験体(PR-U)と S-5試験体(R-U) との関係について調べてみると、S-2試験体(P-U) の最大荷重と、S-4試験体(PR-U)の終局時のノンテンションアンボンドの補強材のひずみに対応して得られる S-5試験体(R-U) の荷重の半分との和は、S-4試験体(PR-U)の最大荷重と同等となっており、各試験体毎の荷重を重ね合わせることが可能であることが分かる。

S-6試験体(R-B) は補強材が破断せずに斜めひびわれが圧縮側コンクリートに突き抜けることで破壊した。ここで既往の研究[1][2]によれば、FRPロッドを補強材としたはりのせん断耐力はコンクリート示方書の基本式の鉄筋比に鋼材とFRPロッドとの弾性係数の比率で低減した値を用いることで算定可能であることが示されている。この考え方によるせん断耐力算定値は 3.4 tであり実験値と良い対応を示していた。

4. まとめ

以上をまとめると、次のようになる。

- ①付着特性の優れた板状のAFRPロッドを、緊張力や付着性状(ボンド、アンボンド)を変えてコンクリート補強材として使用すると様々な変形性能を付与することが可能である。
- ②ボンドタイプの補強材を用いた試験体の耐力は既存のRC計算により算定することが可能である。
- ③アンボンドタイプの補強材が存在する場合には、その耐力算定等について今後とも検討が必要である。

以上のように、付着特性の優れた板状のAFRPロッドを、緊張力や付着性状を変えてコンクリート補強材として使用すると、最大荷重後の脆性的な挙動がかなり改善されることが分かった。

FRPロッドをコンクリート補強材として用いる場合、その脆性的な破壊形態に対する対策としては、安全率を大きく取る方法や、危険予知の観点から最大荷重後に脆性的な挙動を示さないようにする方法等が考えられる。このような対策の内、どのような方法が最適であるかは対象構造物や環境条件、設計方法等を考慮して慎重に決定されるべきであると思われる。

今後はせん断載荷や繰返し載荷を行ったような場合にも同様な挙動が得られることを検討していく予定である。

なお、本研究は日本アラミド㈱との共同研究として行っているものである。

[参考文献]

- [1] 辻他：FRPで補強したコンクリートはりの曲げ及びせん断性状，第10回JCI年講
- [2] 寺田他：FRPで補強したRCはりの破壊性状について，第10回JCI年講