

板状の AFRP 線材を用いた PC 部材の開発

秋 山 暉*
天 野 玲 子**
奥 村 一 正***

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 線材は、軽量、高強度、耐腐食性に優れるなどの特徴を有しているため、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。

なかでも、海洋・沿岸における塩害を受ける構造物やリニアモーターカーガイドウェイのような磁性の影響を強く受ける構造物など新しい分野での使用が有望である。

FRP 線材を構造部材へ適用しようとする場合、部材としての設計は、鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートの設計に準拠して行わざるを得ないが、この場合 FRP 線材の粘りの少ない性質などをどのように評価するかが重要である。

このため、FRP 線材を用いたコンクリート部材特有の設計手法の確立が待望されると同時に、当面は次のような点を考慮して実用化していくことが必要と考える。

- 1) 作用荷重の確実性とも密接な関係があるが、破壊に対する安全率に余裕をもたせる。
- 2) FRP 線材を部材に用いた場合の特性を把握し、その特性に対応した部材設計を行う。

ここでは、付着特性に優れた板状の AFRP (アラミド繊維) 線材を緊張材として用いたプレテンション PC 梁部材を開発するにあたり、耐荷性能の確認を行うとともに緊張材の付着特性を変えた場合の部材のたわみやひびわれ特性を実験を行って把握したので、それを報告する。

まず、小型梁試験体で、AFRP 線材をボンドタイプの緊張材として用いた PC 梁の曲げについての基本性状について調べた。さらに、その曲げ引張破壊時の脆性的挙動を改善するために、AFRP 線材の付着性状 (ボンドまたはアンボンド) や AFRP 線材の緊張力 (導入し

たものとししないもの) を変化させた場合の部材の変形および耐力について把握した。そして、この小型梁試験体の実験で得られた特性が大型部材を想定して、多段配筋した場合にも示されることを大型梁試験体による実験を行って確認した。

2. 板状の AFRP 線材「アラプリ」

この FRP 線材は表-1 に示すようなアラミド繊維 (日本アラミド (有) 製, 『トワロン』) 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線材 (日本アラミド (有) 製, 『アラプリ』) である。

表-1 アラミド繊維のカタログ値

	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	伸び率 (%)	密度 (gf/cm ³)
アラミド繊維	28 500	1.26×10 ⁶	2.3	1.45

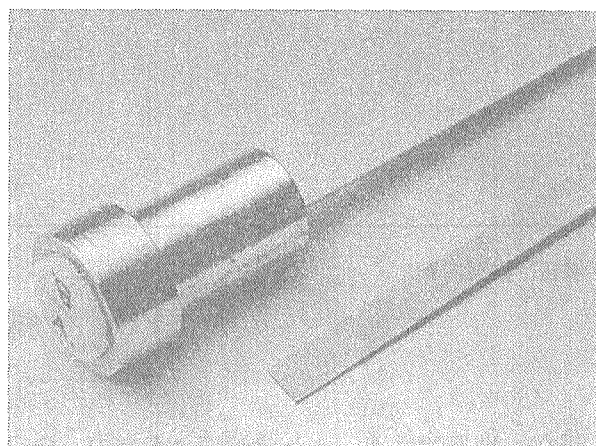


写真-1 板状のAFRP線材

表-2 AFRP線材の諸元

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

表-3 AFRP線材の引張強度特性

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

* Hikaru AKIYAMA : 鹿島建設 (株) 技術研究所 第1研究部

** Reiko AMANO : 鹿島建設 (株) 技術研究所 第1研究部

*** Kazumasa OKUMURA : 鹿島建設 (株) 技術研究所 第1研究部

試験体に使用したアラプリ（以下 AFRP 線材と称す）の諸元値を表—2 に、引張強度特性を表—3 に示す。なお、引抜き試験の結果、コンクリート部材中における定着長は約 6 cm であり、その平均付着応力度は 140 kgf/cm² であった。

3. 小型梁試験体による 曲げ 載荷実験

3.1 試験体および試験方法

試験体の形状寸法を図—1 に示し、表—4 に試験体の種類を示す。

試験体は、スパン 200 cm、高さ 22 cm、幅 17 cm の矩形断面梁 6 体 (S-1~S-6) で、AFRP 線材を緊張材および補強材（緊張しないもの）として配置した。

S-1~S-4 試験体については、AFRP 線材 4 本を緊張材としてプレストレスを導入し、基本試験体である S-1 試験体 (P-B) はすべてボンドタイプ、S-2 試験体 (P-U) はすべ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下段に 2 本の緊張力を導入しない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 線材 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) はすべてアンボンドタイプ、S-6 試験体 (R-B) はすべてボンドタイプとした。

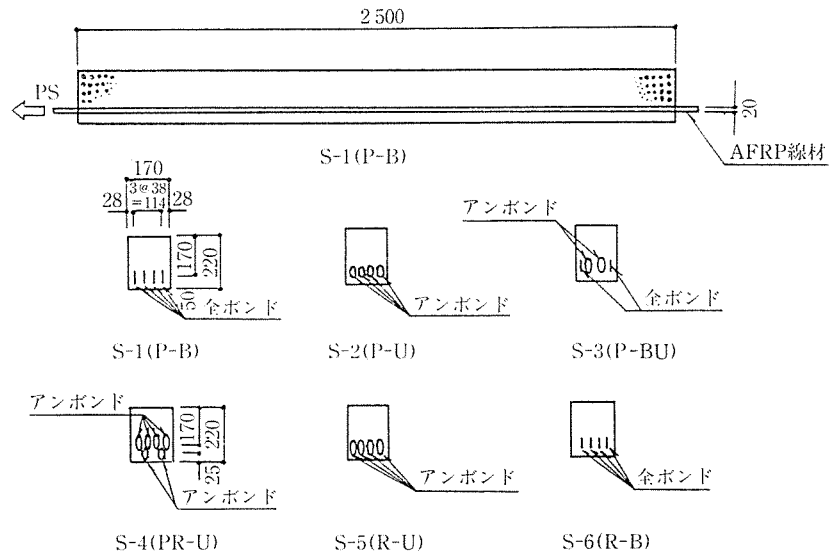
ここで、アンボンドタイプの AFRP 線材は、試験体両端の 30 cm を定着部とし、定着部以外の部分については、ポリエステル樹脂のシートを巻き付けてコンクリートとの付着を切ることとした。

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 1.7 tf (0.54 P_u, P_u = 3.1 tf) であり、コンクリート応力は上縁で -11 kgf/cm²、下縁で 47 kgf/cm² である。

コンクリートの配合および強度特性を表—5、6 に示す。

表—4 試験体一覧表

	補 強 材			補強材比 (%)
	緊張力 (tf/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

す。

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

3.2 実験結果および考察

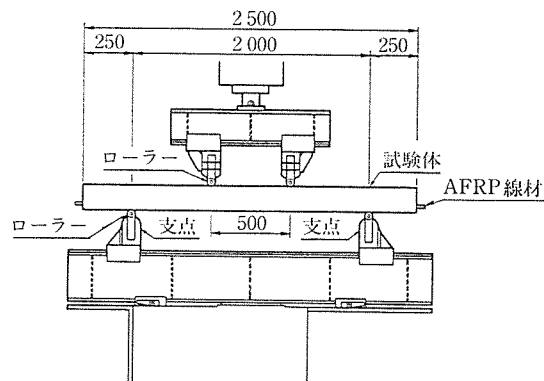
試験結果一覧を表—7、各試験体の荷重-たわみ関係を図—3 に、S-1 試験体の純曲げ区間を対象としたモーメント-曲率関係を図—4 に、各試験体の終局時にお

表—5 コンクリートの配合

粗骨大 材寸 の法 (mm)	ス ラ ン ブ (cm)	空 気 量 (%)	水 セ メ ン ト 比 W/C (%)	細 骨 材 率 S/a (%)	単 位 量 (kgf/m ³)				AE 減 水 剤
					水 W	セ メ ン ト C	細 骨 材 S	粗 骨 材 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 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
導 入 時	442	—	—
試 験 時	507	3.56 × 10 ⁵	40



図—2 載荷装置

◇論文報告◇

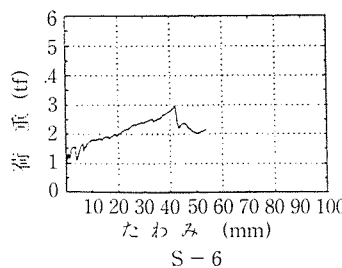
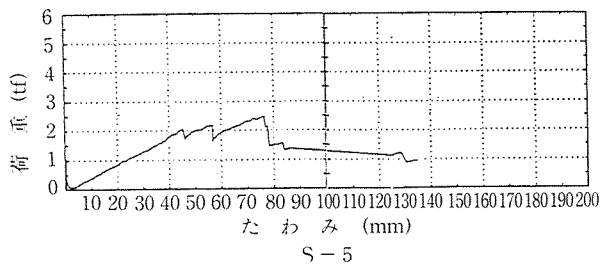
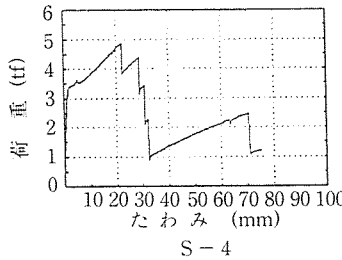
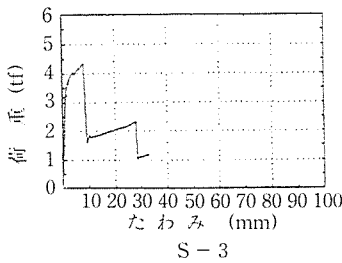
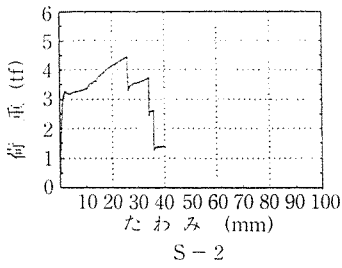
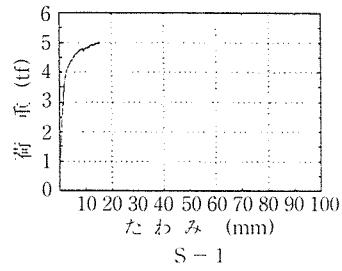


図-3 荷重-たわみ関係

表-7 試験結果一覧表

試験体名	ひびわれ発生時 P_{cr} (tf)	最大荷重時		破壊モード	終局時 δ_{max} (mm)
		P_u (tf)	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	せん断	54.5

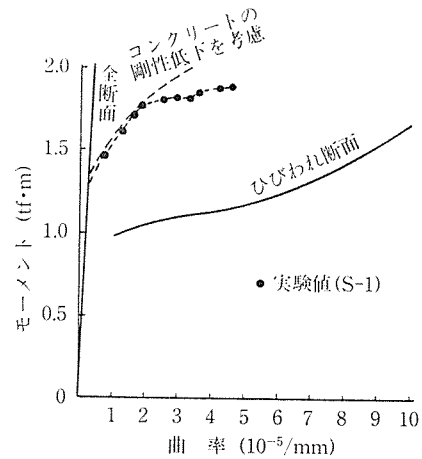


図-4 モーメント-曲率関係

けるひびわれ図を 図-5 に示す。

3.2.1 基本試験体 (S-1 試験体) の曲げ性状

表-7 および 図-3, 図-5 によれば, 基本試験体である S-1 試験体 (P-B) では, 3.7 tf でひびわれが発生した後, ひびわれは定着長のほぼ 2 倍の 10 cm 程度の間隔で分散して生じた。15.5 mm のたわみが生じた時点で最大荷重 5.01 tf となって 4 本のボンダタイプの緊張材が同時に破断して終局に至った。

ひびわれ発生荷重をコンクリートの曲げ強度 ($0.9 f_c^{1/3}$) 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分を差し引いて算定すると 3.7 tf となって実験値と良く一致しており, 所定のプレストレス力が導入されたものと考えられる。

AFRP 線材の破断による最大荷重を RC 理論により自重の影響分を差し引いて算定すると, 5.01 tf となり実験値 (5.01 tf) と良く一致した。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。

図-4 において, 純曲げ区間におけるモーメント-曲率関係¹⁾を軸力を考慮した RC 理論で算定したものと比較すると, 最大荷重の 93% (4.7 tf) までは実験値は算定値と良い対応を示していた。それ以後, ひびわれ間の緊張材位置に水平ひびわれを生じて付着が切れ, 曲率が急激に大きくなり, 最大荷重時に算定値の約 180% の曲率となった。水平ひびわれを生ずる以前に, 実験値と算定値が良い対応を示したのは, 本来ならば AFRP 線

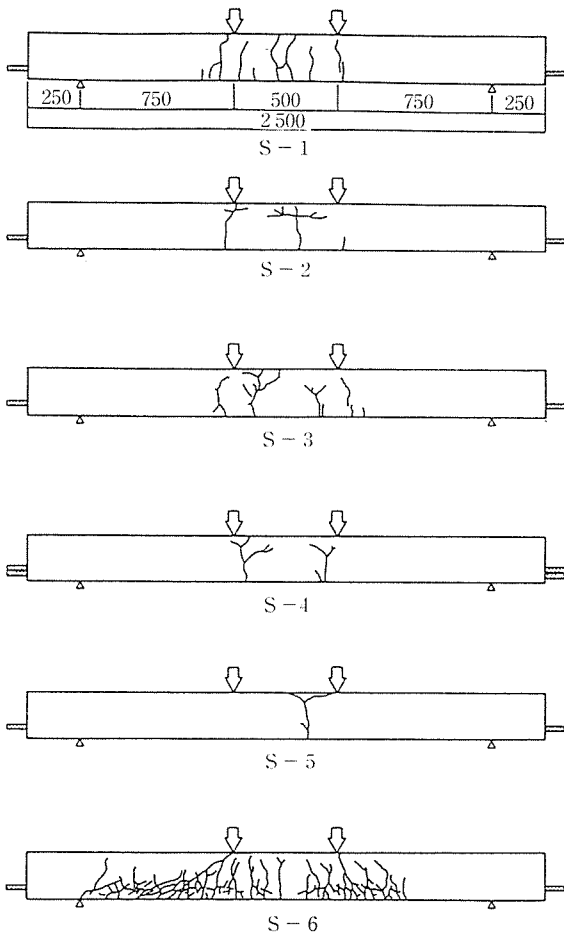


図-5 ひびわれ図

材の弾性係数が小さいためひびわれ幅が大きくなり曲率も大きくなると考えられるのに対して、ここで使用した線材の場合、平均付着応力度が大きいためひびわれ幅を抑える効果が発揮されたためと考えられる。

以上より、AFRP 線材をボンドタイプの緊張材として用いたプレテンション PC 梁部材の曲げ特性は、RC 理論で推定可能であることがわかった。

3.2.2 AFRP 線材の付着性状や緊張力を変化させた場合の曲げ性状

各試験体の破壊モードと最大荷重について比較する。

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、その最大荷重は RC 理論により算定することができる。

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 (4.43 tf) は RC 理論による算定値 (5.01 tf) よりも 10% ほど低減した。これは、緊張材である板状の AFRP 線材をここでは縦使い (図-1 参照) しているため、集中したひびわれ位置での緊張材の角変化が大きくなり、緊張材断面下縁のひずみが終局ひずみに達するため有効引張応力度を低減させること、および緊張材

とコンクリートとの間の摩擦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タイプ緊張材 2 本が同時に破断するが、その後アンボンドタイプの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% ほど低減した。これは、アンボンドタイプの緊張材の見掛けの弾性係数がボンドタイプに比べて小さいため、ボンドタイプ緊張材の荷重に対する負担率が相対的に大きくなることによるものと考えられる。ここで、最大荷重時のボンドタイプ緊張材に対するアンボンド緊張材のひずみの割合は約 70% であり、これを考慮して RC 理論で最大荷重を算定すると 3.98 tf となり、実験値 (4.37 tf) とほぼ対応していた。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、さら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% ほど大きくなっていったが、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計算上は 17% 程度の荷重増加分が見込めるため、この影響で最大荷重が増加したものと考えられる。

S-5 試験体 (R-U) の圧縮側コンクリートが剝離した後の挙動は、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 S-2 試験体 (P-U) の 55% 程度であり、最後の補強材が破断したときのたわみは 3 倍程度と大きくなっていった。これは、ノンテンションの補強材を使用したことで、ひびわれが 1 本しか入らず、ひびわれ位置での補強材の角変化がより大きくなったため、各補強材の有効引張応力度が S-2 試験体 (P-U) に比べて低減したためと考えられる。

ここで、S-4 試験体 (PR-U) の最大荷重を実験値を用いて推定する場合、S-2 試験体 (P-U) の最大荷重 (4.43 tf) にノンテンションアンボンド補強材の応力負担分を加えればよいことになる。S-4 試験体 (PR-U) の最大荷重時のノンテンションアンボンド補強材のひずみ (4800×10^{-6}) に対応して得られる S-5 試験体 (R-U) の荷重は 1.1 tf であり、これの半分は 0.55 tf となって、これが補強材の応力負担分となる。

この結果、実験値を用いて推定した値 4.98 tf は、S-4 試験体 (PR-U) の最大荷重 (4.86 tf) と同等となっており、各試験体ごとの荷重を重ね合わせることが可能であることが分かる。

◇論文報告◇

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てせん断破壊した。ここで既往の研究²⁾によれば、FRP 線材を補強材とした梁のせん断耐力は、コンクリート示方書の基本式の鉄筋比に鋼材と FRP 線材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 tf であり、実験値 (3.00 tf) と良い対応を示していた。なお、AFRP 線材による梁のせん断耐力については、今後さらに研究を進めることが必要と考える。

以上のように、各緊張材や補強材の基本的な荷重-ひずみ特性を把握しておけば、種々の組み合わせを考慮したコンクリート梁部材の耐力をある程度推定することが可能であることが確認された。

4. 大型梁試験体による曲げ载荷実験

4.1 試験体および試験方法

試験体の形状寸法を 図-6 に示し、表-8 に試験体の種類を示す。

用いた試験体は、スパン 500 cm、高さ 45 cm、幅 30 cm の矩形断面梁 3 体で、緊張材としては AFRP 線材 18 本を 6 列 3 段に配置し、組立て筋として CFRP (炭素繊維) ストランドを用いた。

No. 1 試験体 (P-B) は緊張材 18 本すべてをボンドタイプとした。No. 2 試験体 (PR-U) は緊張材 18 本すべてをアンボンドタイプとし、さらにノンテンションでアンボンドの補強材 5 本を緊張材の下段に配置した。No. 3 試験体 (P-BU) は緊張材のうち両外側 2 列をボンドタイプ、内側 4 列をアンボンドタイプとして配置した。

アンボンドタイプの AFRP 線材は、小型梁試験体と同様に、試験体両端の 30 cm を定着部とした。

载荷実験時 (材令 14 日) の緊張力は 1 線材当り 1.7 tf ($0.54 P_u$, $P_u=3.1$ tf) であり、コンクリート応力は上縁で -6 kgf/cm²、下縁で 51 kgf/cm² である。緊張直後の各線材のひずみのばらつきは $\pm 3\%$ であった。

コンクリートは小型梁試験体と同様の配合であり、強度特性を表-9 に示す。

加力方法は、図-7 に示すように、スパン 500 cm、純曲げ区間 135 cm の 2 点载荷とした。変形状況に応じ

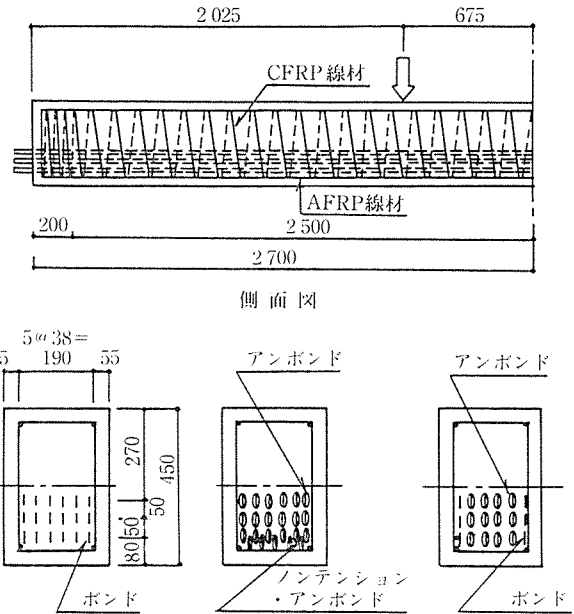


図-6 試験体諸元

表-8 試験体一覧表

	補 強 材			補強材比 (%)
	緊張力 (tf/本)	ボンド, アンボンド	ノンテンション補強材の有無	
No. 1	1.87	ボンド	無	0.52
No. 2	1.87	アンボンド	無	0.52
No. 3	1.87	ボンド, アンボンド	無	0.66

て、ひびわれ発生前に 4 サイクル、ひびわれ後に 3~4 サイクルの繰返し载荷を行った。

4.2 実験結果および考察

実験結果の一覧を表-9 に示し、各試験体の荷重-たわみ曲線を 図-8 に、終局時におけるひびわれ状況を 図-9 に示す。

すべての試験体は AFRP 線材の破断による曲げ引張破壊を生じた。

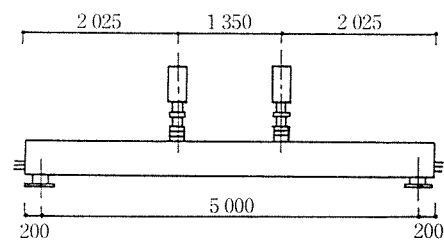


図-7 载荷方法

表-9 試験結果一覧表

試験体	ひびわれ発生時			最大荷重時				AFRP 破断時のひずみ		終局たわみ (mm)	実験時コンクリート強度 (kgf/cm ²)
	実験値 (tf)	計算値 (tf)	比率	実験値 (tf)	計算値 (tf)	比率	たわみ (mm)	ボンド ($\times 10^{-3}$)	アンボンド ($\times 10^{-3}$)		
No. 1	9.3	9.7	0.96	19.2	19.1	1.01	56.0	19 700	—	56.0	541
No. 2	8.2	9.4	0.87	18.5	22.6	0.78	68.0	—	18 700	261.5	457
No. 3	8.8	9.9	0.89	15.3	19.2	0.80	31.0	20 700	17 200	124.0	587

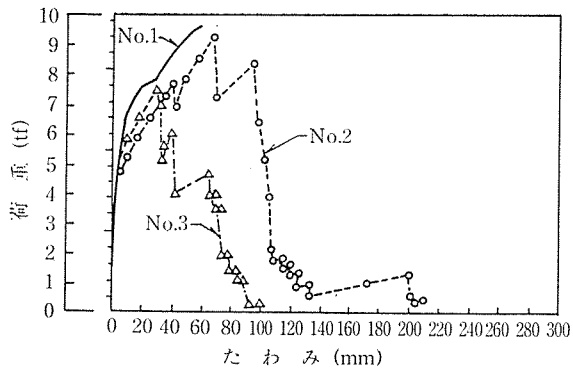


図-8 荷重-たわみ曲線

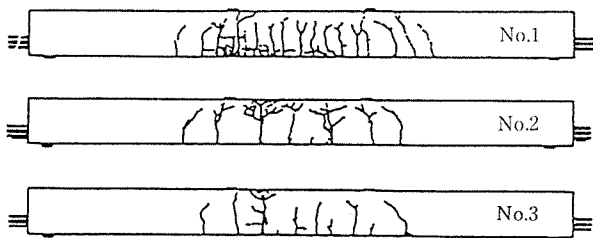


図-9 ひびわれ性状

表-9 によれば、No. 1 試験体 (P-B) の最大荷重 (19.2 tf) は、多段配筋を考慮した RC 理論による曲げ耐力計算値 (19.1 tf) と良い一致を見た。

No. 2 試験体 (PR-U) の最大荷重は、実験値が RC 理論による曲げ耐力計算値を 18% 下回った。これは、小型梁試験体と同様の傾向であり、このようなアンボンド緊張材の破断による曲げ引張破壊において耐力が RC 理論による曲げ耐力計算値よりも低下する現象については、今後さらに検討を要する。

No. 3 試験体 (P-BU) でも実験値が RC 理論による曲げ耐力算定値を 20% 下回っていた。ここで、No. 3 試験体 (P-BU) の最大荷重時の AFRP 線材のひずみを表-9 に示す。これより、小型梁試験体と同様、ボンドタイプとアンボンドタイプが混在する場合には、アンボンドタイプのひずみはひびわれ近傍位置でのボンドタイプのひずみの 70~80% となっていた。そこで、No. 3 試験体 (P-BU) の最大荷重の計算においても、アンボンドタイプのひずみをボンドタイプのひずみの 70% と仮定すると、算定値は 15.5 tf となって、実験値 (15.3 tf) と近い値になった。

このような多段配筋した場合も、一段配筋の場合と同様の手法を用いて梁部材の耐力を推定できることが分かった。

5. ま と め

以上をまとめると、次のようになる。

- ① 優れた付着特性を有する板状の AFRP 線材を緊張材とした PC 梁部材の曲げ特性については、既存の RC 理論により算定することが可能である。
- ② AFRP 線材の付着性状 (ボンド, アンボンド) を変えたり緊張力を導入しないで補強材として使用すると、コンクリート梁部材に様々な変形性能をもたせ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、耐力がボンドタイプに比べて 1~2 割低減したが、その算定方法等について今後とも検討が必要である。
- ④ 以上のような曲げ特性については、補強材である AFRP 線材を多段配筋した場合にも示されることが確認された。

本開発研究によって以上のように、付着特性の優れた板状の AFRP 線材を、付着性状や緊張力を変えてコンクリート補強材として使用すると、種々の変形特性を示すことが明らかとなった。

FRP 線材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、安全率を大きくとる方法や、危険防止の観点から最大荷重後にもある程度の荷重負担を可能にする方法等が考えられる。このような対策のうち、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考え、その場合にここで得られた結果が参考になれば幸いである。

なお、本研究は日本アラミド (有) との共同研究として行ったものである。

参 考 文 献

- 1) 村山, 須田, 古市: 高軸力・二軸曲げを受ける RC 部材の剛性評価方法, 1989 年度鹿島建設技術研究所年報, 1989
- 2) 辻, 斎藤, 間島, 小川: 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 年次講演会, 1988
- 3) 秋山, 天野, 奥村: 板状の AFRP 線材を用いたコンクリートはりの曲げ性状, 第 12 回 JIC 年次講演会, 1990

【1990 年 9 月 20 日受付】