

論文

[2116] FRP 緊張材を用いた PC はりの曲げ耐力および破壊形式

正会員 辻 幸和 (群馬大学建設工学科)
 正会員○石田知子 (群馬大学大学院)
 正会員 橋本親典 (群馬大学建設工学科)
 正会員 丸岡正知 (群馬大学大学院)

1. はじめに

近年、FRP 緊張材を PC 鋼材に代わるコンクリートの補強材として利用する研究開発が活発に行われている。FRP 緊張材は、PC 鋼材に比較して高強度かつ軽量であり、耐久性が大きいという優れた品質を持っている。また、非磁性体であるという特性を有し、建設分野への適用範囲を拡げつつある。

しかしながら、このように高性能な FRP 緊張材も、一方では付着力が小さいという傾向が認められる。そこで、PC 鋼材とは異なる付着性状およびヤング係数を持つ FRP 緊張材の品質が、PC はりの曲げ性状に及ぼす影響について把握する必要があると考えられる。

本研究では、先ず積層モデルを用いた解析プログラムにより算出した計算値と実験値との比較を行ない、解析プログラムの妥当性を検証し、その後、FRP 緊張材を用いたポストテンション方式の PC はりにおいて、緊張材とグラウト間の付着の有無、緊張材の塑性域の有無、緊張材のヤング係数、コンクリートの圧縮強度およびプレストレスの導入量が PC はりの曲げ性状に及ぼす影響を、解析プログラムを使用して数値実験を行った結果について報告するものである。

2. 解析方法

解析には、図-1 に示すように、部材断面を中立軸と平行に細分割する積層モデルを用いた。なお、要素の分割幅は、1 cm とした。図-2 には、解析に用いたコンクリートの応力-ひずみ曲線を示す。

なお、解析にあたり以下の仮定を設けた[1]。

- (1) 断面内の応力は各層において一定となり、その大きさは各層の図心位置で代表させる。
- (2) 緊張材がグラウトとの付着によって周囲のコンクリートと完全に一体化していると仮定した場合(以下、付着有と略称する)、ひずみ分布は平面保持に従う。
- (3) 緊張材の付着作用が無いと仮定した場合(以下、付着無と略称する)、载荷による緊張材の伸びと緊張材位置のコンクリートの部材全長にわたっての伸びとが等しいという変形の適合条件を満足する[2]。

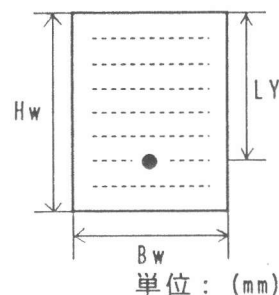


図-1 積層モデル

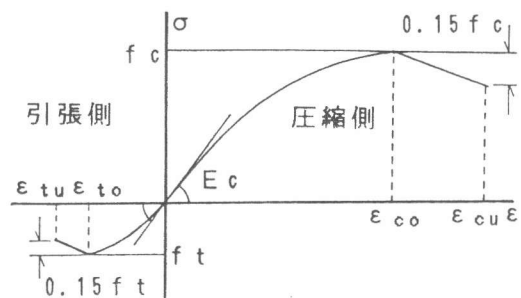


図-2 コンクリートの応力-ひずみ曲線

また、機械的プレストレスの導入は、緊張材の引張強度(f_{pu})に対する緊張材の緊張時における有効引張応力(σ_{pe})の比 σ_{pe}/f_{pu} のプレストレスの導入率で定義される。

3. 既報の実験値との比較

解析プログラムの妥当性を検証するために、既に報告されている2種類のはり（供試体Ⅰ・供試体Ⅱ）についての実験値との比較を試みる。供試体Ⅰはプレテンション方式によるPCはりで、供試体Ⅱはポストテンション方式による実物大規模のPC桁である[3],[4]。

3・1 使用材料

試験に用いた緊張材は、炭素繊維FRP緊張材で、その物性については表-1に示す。緊張材は、プルトルージョン法により成形したものをを用いている。また、緊張材のリラクゼーション率はいずれも3%としている。また、供試体Ⅱにおいて、FRP緊張材をそのまま緊張材として用いことは、きわめて困難であるため、表-1に示した物性を有するFRP緊張材8本を1ケーブルとし、1つの定着具で定着するマルチ方式を用いている。ケーブルの諸元を表-2に示す。

コンクリートの圧縮強度は、供試体Ⅰが664kgf/cm²であり、供試体Ⅱが583kgf/cm²であった。また、いずれの供試体もコンクリートの乾燥収縮を 250×10^{-6} 、クリープ係数を3.0としている。

3・2 供試体および載荷方法

図-3には供試体の断面を示す。供試体Ⅰは、幅が10cm、高さが15cmである。緊張材の本数は1本および2本で、有効高さを12.0cmとして配置している。プレストレスの導入率は、0.10、0.40、0.55、0.70の4種類としている。供試体Ⅱは上縁が64cm、下縁が70cm、高さが40cmである。ケーブルの本数は5本とし、有効高さを26.6cmとして配置している。プレストレスの導入率は、およそ0.55である。

載荷方法は、いずれも2点集中載荷である。供試体Ⅰは、スパン長が180cm、等曲げモーメント区間が30cm、供試体Ⅱは、スパン長が890cm、等曲げモーメント区間が100cmとしている。

3・3 実験値と計算値の比較

表-3には、供試体Ⅰの静的曲げ試験の結果を示す。実験値と付着有と仮定した計算値との比は0.94~1.12となり、積層モデルを用いた解析方法の妥当性は、十分に期待できるものと考えら

表-1 FRP緊張材の物性

項目	供試体Ⅰ	供試体Ⅱ
呼び径 (cm)	0.6	0.8
断面積 (cm ²)	0.224	0.490
引張強度 (kgf/cm ²)	19400	18600
ヤング係数 (kgf/cm ²)	1.4×10^6	1.5×10^6

表-2 ケーブルの諸元

呼び名	8-φ8ケーブル
緊張材の本数	8
断面積 (cm ²)	3.92

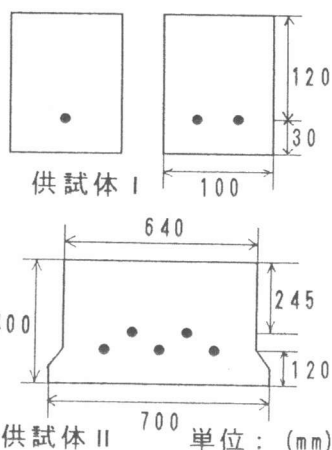
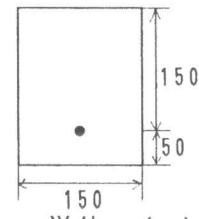


図-3 供試体の断面

表-3 供試体Ⅰの静的曲げ試験の結果

供試体	本数	緊張力	破壊モーメント (tf·m)							
			実験値 M	破壊 形式	付着無 Mud	M Mud	破壊形式 (付着無)	付着有 Mue	M Mue	破壊形式 (付着有)
1-40	1	0.40	0.559	緊張材の破断	0.504	1.11	緊張材の破断	0.498	1.12	緊張材の破断
1-55	1	0.55	0.536		0.503	1.06	緊張材の破断	0.497	1.08	緊張材の破断
1-70	1	0.70	0.551		0.503	1.10	緊張材の破断	0.493	1.12	緊張材の破断
2-10	2	0.10	0.926		0.930	0.99	曲げ圧縮破壊	0.980	0.94	緊張材の破断
2-55	2	0.55	1.020		0.982	1.04	緊張材の破断	0.972	1.05	緊張材の破断
2-70	2	0.70	0.979		0.979	1.00	緊張材の破断	0.963	1.02	緊張材の破断

れる。破壊形式に関しては、すべてFRP緊張材の破断による破壊と報告されているが、試験体記号2-10は、緊張材の破断となった付着有のものよりも、曲げ圧縮破壊となった付着無の計算値の方が実験値に近い値を示している。その値の差がわずかであったため、破壊形式の判定が異なったものと思われる。なお、破壊形式の異なった供試体番号2-10を除き、極微少ではあるが付着無とした計算値の方が付着有の場合より大きな値を示している。これは、付着有の場合に比べ付着無とすると、緊張材の負担する応力が小さくなるため、同一荷重におけるひずみが小さくなることに起因する。

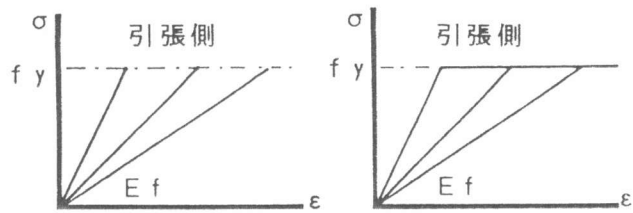


単位：(mm)
図-4 はりの断面

供試体IIについては、破壊荷重の実験値が30.1tであったのに対し、計算値は28.5tと近い値を示し、実物大規模のポストテンション方式のPCはりに対しても、本プログラムの妥当性は十分に認められる。

4. 数値実験の概要

数値実験に用いたはりは、図-4に示すように幅が15cm、高さが20cmの断面で、長さが120cmのものを使用した。緊張材の本数は1本とし、有効高さは15cmとして配置した。また、FRP緊張材は、応力-ひずみ曲線が図-5に示すように、塑性域が無いものと有るものについて検討し、ヤング係数に関わらず、公称断面積が66.48mm²、引張強度が150kgf/mm²と一定とした。荷重方法は、スパン長が100cm、等曲げモーメント区間が30cmの2点集中荷重とした。



(a) 塑性域が無い場合 (b) 塑性域が有る場合
図-5 FRP緊張材の応力-ひずみ曲線

5. 破壊モーメント

図-6は、塑性域のないFRP緊張材を用い、コンクリートの圧縮強度を400kgf/cm²、プレストレスの導入率を0.5と一定とし、付着の有無と緊張材のヤング係数を変化させた場合、緊張材のひずみ増加量と曲げモーメントの関係について示したものである。緊張材のヤング係数が、0.5×10⁶kgf/cm²と小さい場合、付着無では、緊張材が引張強度に達する前に圧縮縁が破壊ひずみに達する

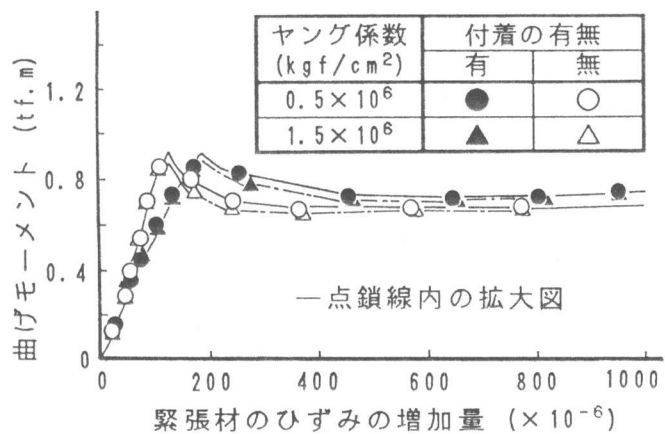
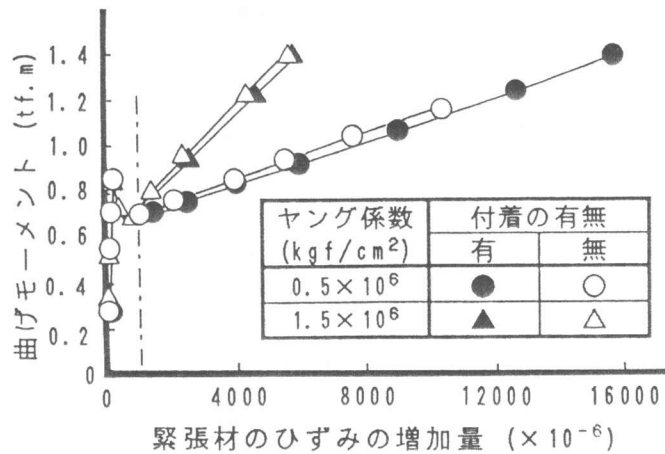


図-6 緊張材のひずみの増加量と曲げモーメントの関係

曲げ圧縮破壊となった。しかしながら、付着有のはりでは緊張材が引張強度に達し破断した曲げ破断となった。そして、破壊モーメントは、曲げ圧縮破壊したはり小さい値を示す。緊張材のヤング係数が $1.5 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ の場合は、付着の有無に関わらず、曲げ破断していることが認められる。また、緊張材のひずみが一点鎖線内の場合を拡大した図において、緊張材のヤング係数に関わらず、付着無の方が同一荷重に対するひずみの増加量が小さいことが認められる。

コンクリートの圧縮強度を 400 kgf/cm^2 と一定とし、プレストレスの導入率を0.3, 0.5, 0.7と変化させ、付着有とした場合を図-7に、付着無とした場合を図-8に示す。

図-7に示す付着有の場合、塑性域の有るFRP緊張材を使用すると、緊張材のヤング係数とプレストレスの導入率が変化しても、緊張材が引張強度に達した後に圧縮縁のコンクリートが圧壊する曲げ引張破断となった。そのため、はりの破壊モーメントは一定の値を示す。塑性域の無いFRP緊張材を使用した場合も、緊張材のヤング係数とプレストレスの導入率に関わらず、緊張材が引張強度に達し、FRP緊張材が破断する曲げ破断となった。そのため、はりの破壊モーメントは一定の値を示した。またその値は、塑性域の有るFRP緊張材を使用した場合と破壊形式は異なるもののほぼ等しいことも認められる。

図-8に示す付着無の場合は、緊張材のヤング係数が小さいと、曲げ圧縮破壊となる。そのため、付着有の場合に比べ、緊張材のヤング係数やプレストレス導入率の影響を受け易く、緊張材のヤング係数が小さくなると破壊モーメントは低下する。これは、前述したように、付着無の場合は、付着有の場合に比較し、緊張材の応力負担分がはり軸方向に平均化され小さくなるのが原因である。したがって、このような場合には、FRP緊張材の塑性域の有無が及ぼす影響もないことになる。

図-9には、プレストレスの導入率を0.5と一定とし、コンクリートの圧縮強度を 200 kgf/cm^2 と、 1000 kgf/cm^2 とに変化させた場合について示す。コンクリートが高強度となると、付着の有

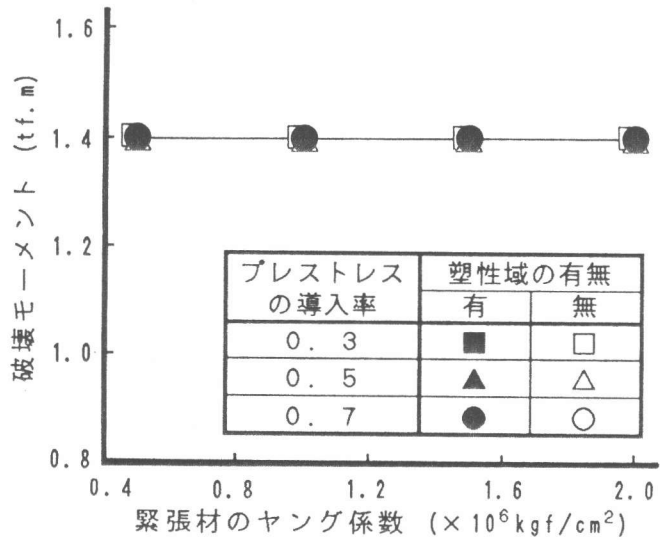


図-7 緊張材のヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響 (付着有)

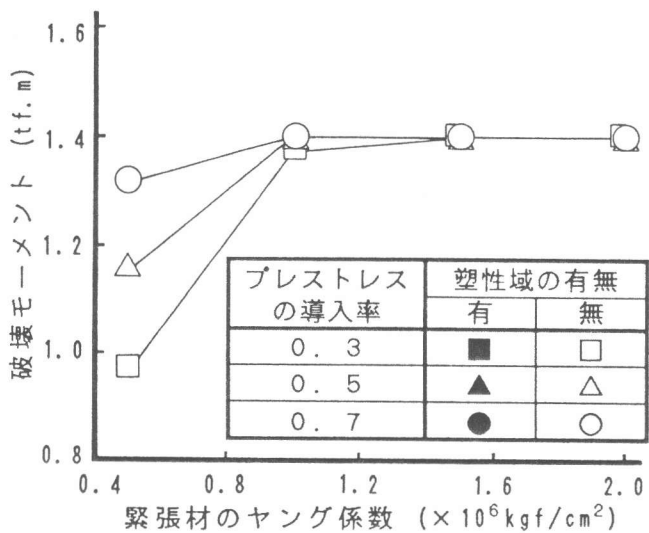


図-8 緊張材のヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響 (付着無)

無に関わらず、塑性域の有るFRP緊張材の場合は曲げ引張破壊、塑性域の無いFRP緊張材の場合は曲げ破断となる。そのため、緊張材のヤング係数に関わらず破壊モーメントは一定となる。

これに対し、コンクリートの圧縮強度が200kgf/cm²と低強度のものを使用した場合、緊張材のヤング係数が小さくなると曲げ圧縮破壊となり易く、破壊モーメントは低下する。この現象は、付着有とした場合に比較して、付着無とした場合の方が、より大きな緊張材のヤング係数から現れる。なお、コンクリートの圧縮強度に関わらず、塑性域の有無による破壊モーメントへの影響はほとんど認められず、ほぼ等しい値を示した。

以上の4図より、緊張材のヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響は、緊張材の付着性状、コンクリートの圧縮強度と強い相関性があり、FRP緊張材の付着力が小さく、コンクリートの圧縮強度が小さいほど、はりは曲げ圧縮破壊となり易く、破壊モーメントは低下することが認められた。また、図-5に示した応力-ひずみ曲線をもつFRP緊張材を用いた場合、塑性域の有無による破壊モーメントの値への影響は認められないものの、破壊形式に相違が生じた。

7. 破壊形式

図-5の(a)に示すような、塑性域の無いFRP緊張材を用いたPCはりの破壊形式は、次の2通りの場合が考えられる。

- (1) FRP緊張材の応力度が引張強度に達する前にコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊
- (2) FRP緊張材の応力度が引張強度に達し、FRP緊張材の破断による曲げ破断

この内、(2)で述べたような破壊形式は、現時点でのFRP緊張材が塑性域を有しないことが原因で生じる。部材がこの破壊形式をとる場合、曲げ引張破壊に比べ破壊は急激であり極めて脆性的な性状を示す。一方、(1)に示すような曲げ圧縮破壊する場合は、(2)の場合と比較して破壊は幾分緩やかであり、さらに圧縮部のコンクリートを補強することにより、急激な破壊をある程度防ぐことができる。そこで、破壊時の安全性に着目すると、破壊モーメントの値は多少小さくなるものの、破壊形式が、(1)に示す曲げ圧縮破壊となることが望ましいと言える。しかしながら、FRP緊張材の高強度という利点を有効に利用するためには、ただ単に曲げ圧縮破壊をすればよいということにはならない。そこで、FRP緊張材の高強度の有効利用を考慮した場合、PCはりの破壊時において、引張強度の80%以上の応力を緊張材が負担する必要があるとして検討した。

FRP緊張材のヤング係数とコンクリートの圧縮強度が破壊形式に及ぼす影響について、付着有の場合を表-4に、付着無の場合を表-5に示す。(1)に示す曲げ圧縮破壊のうち、緊張材が

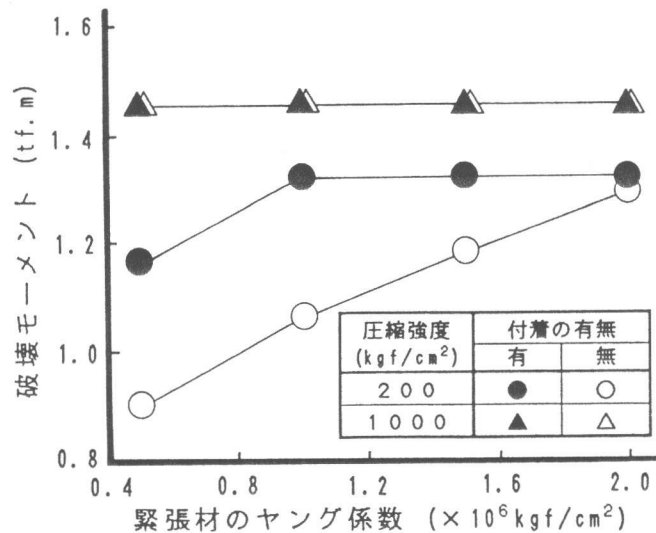


図-9 緊張材のヤング係数が破壊モーメントに及ぼす影響 (圧縮強度変化)

PCはりの破壊時に引張強度の80%以上の応力を負担する場合を○、80%以下の場合を△、(2)に示す曲げ破断による破壊を×で表すものとする。いずれの付着性状においても、コンクリートの圧縮強度とFRP緊張材のヤング係数が大きくなるほど、PCはりは曲げ破断となり易い傾向が認められる。また、付着無に比べて付着有の方が、より小さなコンクリートの圧縮強度とFRP緊張材のヤング係数で、はりは曲げ破断を起こし易く、極めて脆性的な破壊であることも確認された。したがって、曲げ破断という脆性的な破壊を防ぐためには、破壊モーメントはある程度低下するものの、緊張材のヤング係数とコンクリートの圧縮強度を小さくすることが必要であると考えられる。

表-4 緊張材のヤング係数とコンクリートの圧縮強度が破壊形式に及ぼす影響(付着有)

		圧縮強度 kgf/cm ²				
		200	400	600	800	1000
ヤング係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	0.5	○	×	×	×	×
	1.0	×	×	×	×	×
	1.5	×	×	×	×	×
	2.0	×	×	×	×	×

表-5 緊張材のヤング係数とコンクリートの圧縮強度が破壊形式に及ぼす影響(付着無)

		圧縮強度 kgf/cm ²				
		200	400	600	800	1000
ヤング係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	0.5	△	○	○	×	×
	1.0	△	×	×	×	×
	1.5	○	×	×	×	×
	2.0	○	×	×	×	×

7・まとめ

実験値との比較により、積層モデルを用いた解析プログラムは充分適用できものと判断し、数値実験を行ったところ、以下のことを確認することができた。

- (1) 緊張材とグラウト間の付着を考慮し、塑性域の有無、ヤング係数、プレストレスの導入率、コンクリートの圧縮強度を変化させると、緊張材のヤング係数が小さく、コンクリートの圧縮強度が小さいほど、はりは曲げ圧縮破壊となり易く、また破壊モーメントは低下する。この現象は、付着無の場合およびプレストレスの導入率が小さいほどより顕著である。
- (2) 塑性域が無いFRP緊張材を用い、PCはりが緊張材の破断に伴う曲げ破断すると、その破壊は極めて脆性的である。そのような破壊を防ぎ、曲げ圧縮破壊を生じさせるためには、使用したFRP緊張材の引張強度に対して、むしろ緊張材のヤング係数を小さく、コンクリートの圧縮強度も小さくする必要がある。また、より高強度のFRP緊張材で補強したPC構造物を建造するためには、塑性域を有するFRP緊張材の開発が必要であろう。

《参考文献》

- 1) 辻 幸和・岩井 稔・奥泉 貴朗・橋本 親典：グラウトの付着性能を考慮したPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.12, No.1, pp.161~166, 1990.6
- 2) 六車 熙・渡辺 史夫・西山 峰広：アンボンドPC部材の曲げ終局に関する研究、プレストレストコンクリート Vol.26, No.1, pp.10~16, 1984.1
- 3) 丸山 武彦・伊東 幸雄・西山 啓伸：CFRPロッドを用いたPCはりの曲げ性状、土木学会第44回年次学術講演会講演概要集 第5部, pp.310~311, 1989.10
- 4) 広岡 政之・兜森 保人・塚田 悟：新素材を緊張材として用いたPC桁の載荷試験、ピー・エス・コンクリート株式会社 技術資料第10号 pp.193~228, 1988.3