

論文

[1193] 組紐状炭素繊維棒材で補強されたコンクリート梁の曲げ挙動に関する実験的研究

正会員 ○永坂 具也 (東海大学工学部)

正会員 近藤 悟 (東海大学大学院)

1. はじめに

文献1), 2)において、高強度な上に軽量で耐腐蝕性にすぐれたアラミド繊維を樹脂含浸により組紐状に成形加工した棒材がコンクリート部材の補強材として有効であることが示された。しかしながら、棒材としてのヤング係数が鉄筋に比べて著しく低いために、ひび割れ後の部材の剛性が確保しにくく、プレストレス緊張材としての利用あるいはその併用が試みられた。

本研究は、これを踏まえて、弾性係数がより高い炭素繊維を同様に組紐状に加工した棒材を補強筋とするコンクリート梁について、鉄筋代替の曲げ補強筋としての可能性を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 試験体

梁の試験体の概略を図-1に示す。スパン3m、単純支持、2点集中荷重を想定し、22.5cm×30cmの矩形断面で引張側補強材として呼び名C128の組紐状炭素繊維棒材を複数本配置したものである。試験体は合計11体製作された。その内訳および各々の呼称を表-1に示す。実験の変動因子としては、繊維棒材の本数、棒材の表面における珪砂の接着の有無、繰返し載荷履歴の負荷の有無、

表-1 試験体の一覧

試験体名	引張側補強筋	
	配筋	補強筋比 (%)
C 2	2-C128	0.34
C 2 S	2-C128S	0.34
C 3	3-C128	0.51
C 3 S-1	3-C128S	0.51
C 3 S-2	3-C128S	0.51
C 3 S-3	3-C128S	0.51
C 3 S-N	3-C128S	0.51
C 3-C	3-C128	0.51
C 3 S-C	3-C128S	0.51
C 4	4-C128	0.68
C 4 S	4-C128	0.68

表-2 補強筋の材料特性

呼び名	種別	断面積 (cm ²)	ヤング係数 (t/cm ²)	強度 (kg/cm ²)
C128	炭素繊維	1.00	944	14300
D10	異形鉄筋	0.71	1710	3470
D6	異形鉄筋	0.32	2100	4050

[注] 強度欄において、炭素繊維は破断強度を、異形鉄筋は降伏強度を示す。

[注] 試験体名中、末尾のNは補強筋にゲージを貼付していないもの、Cは繰返し載荷されたものを示す。また、Sを含むものは補強筋が砂付きであることを示す。

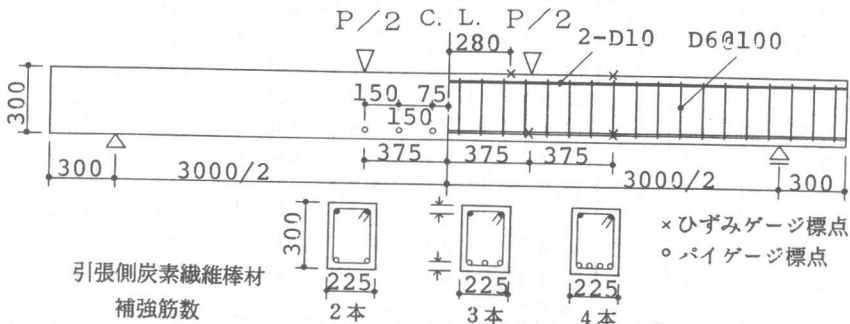


図-1 試験体の概略

および補強筋に対するひずみゲージの有無の4種類である。圧縮側補強材としては一律にD10の異形鉄筋が配置されている。また、いずれの試験体についても曲げ破壊を先行させるため、D6のあばら筋を用いて全長にわたって10cm間隔の補強がなされている。C128の炭素繊維棒材は、繊維束数が128であることを示し、樹脂含有率は約40%である。その材料特性をD10、D6の異形鉄筋と共に表-2に示す。なお、炭素繊維棒材の応力とひずみは破断に至るまで比例関係を示す。さらに、使用したコンクリートの調査を表-3に示す。ここに、混和剤にはポゾリス№70を用いた。

2.2 荷重・測定方法

試験体の大部分は一方単調荷重を想定したものであるが、繰返し荷重は変位制御を基本とする図-2に示す片振れの荷重履歴にしたがった。いずれの荷重方法による場合も、試験体の最大耐力の発現を確認した後に荷重を終了した。梁のたわみに関しては、試験体の両面において中央点と2つの荷重点位置の支持点位置に対する鉛直方向の相対移動量を1/100mm精度の電気式変位計を用いて測定した。また、引張補強筋レベルのコンクリート面における伸び量を1/1000mm精度のパイゲージを用いて測定するために、図-1中に示す位置にその標点治具を貼付した。さらに、上部圧縮側のコンクリート面にも、同図中に示すような位置に60mmの線ひずみゲージを貼付した。補強筋のひずみ測定位置もやはり同図中に示されているが、いずれも3mmの箔ひずみゲージを2枚ずつ貼付して測定した。以上の測定は、2点の集中荷重の合計として0.5t増分毎に行った。なお、コンクリート面のひび割れの伸展、ひび割れ幅の観測も随時行った。

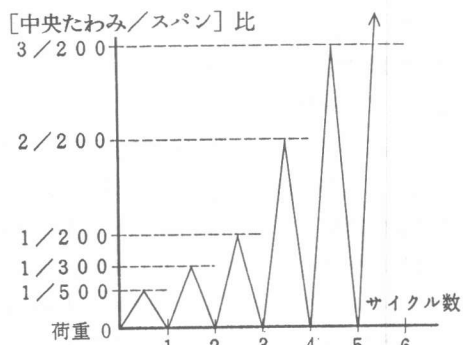


図-2 繰返し荷重履歴スケジュール

表-3 コンクリートの調査

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水 セメント 比 (%)	細骨材率 (%)	単位重量 (kg/m ³)				
				水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	18	40.5	38.1	183	452	622	1058	4.52

表-4 コンクリートの力学特性と試験体の耐力

試験体名	ひび割れ耐力 (t)		最大耐力 (t)			コンクリートの力学特性		
	実験値	計算値	実験値	計算値1	計算値2	圧縮強度	ヤング係数	割裂強度
						(kg/cm ²)	(t/cm ²)	(kg/cm ²)
C2	1.0	1.1	11.7	11.8	12.0	381	231	30.0
C2S	1.0	1.1	11.5	11.5	12.0	392	252	33.0
C3	1.0	1.1	16.2	18.1	18.0	381	249	35.2
C3S-1	0.5	1.1	17.0	18.3	18.2	409	248	33.1
C3S-2	1.0	1.1	16.7	17.8	17.8	392	252	33.0
C3S-3	1.5	1.1	18.1	17.9	17.6	392	252	33.0
C3S-N	1.0	1.1	17.7	18.1	18.0	409	248	33.1
C3-C	1.0	1.1	18.5	18.3	18.2	381	231	30.0
C3S-C	1.0	1.1	15.0	18.3	18.2	381	249	35.2
C4	1.0	1.1	20.7*	23.9	20.7*	381	231	30.0
C4S	1.0	1.1	18.0	23.9	20.7*	392	252	33.0

[注] *印は耐力が補強筋の破断ではなく、コンクリートの圧潰で定まったことを示す。

3. 実験結果および考察

各試験体のテストピースによるコンクリートの力学特性、ならびに、曲げひび割れ耐力と最大耐力の実験結果を表-4に示す。また、梁中央部の純曲げ領域を中心として抽出した実験終了時のひび割れ図を図-3に、荷重と中央たわみとの関係を図-4~8に示す。

3. 1 ひび割れ・破壊性状

図-3は繊維棒材に珪砂を接着したものとししないものとを対照して示したものであるが、棒材の配筋数にかかわらず、両者のひび割れ性状には大差なかった。棒材の配筋数に着目した場合、その本数を増すと、曲げひび割れの本数が増大すると共にその上方への伸展が抑えられるように見受けられる。ただし、3本と4本の場合の差はわずかである。また、配筋数が特に2本の場合には、その位置のコンクリート面に付着割裂状のひび割れが目立って発生するが、これは断面内の補強筋の負担力の集中性により、曲げひび割れの数が減少するためと思われる。このことは、同等のたわみにおけるひび割れ幅が3、4本の場合よりも大きくなったことから推察された。他方、3本配筋の繰返し履歴を受けた試験体では、新たなひび割れの発生はほとんどないものの、既に生じているひび割れがさらに上方に伸展した。なお、図には示していないが、補強材にひずみゲージの貼付されていないC3S-Nの試験体と同等の配筋のなされているC3S-1~3の試験体とではひび割れ性状に顕著な差はなく、ゲージ貼付による影響は認められなかった。さらに、破壊時にはC4の試験体では圧縮縁のコンクリートの圧潰が先行したが、その他の試験体ではすべて繊維棒材の破断が先行した。その破断時の破壊モードは極めて激烈で、棒材に蓄えられていたひずみエネルギーの急激な解放によるとみられ、棒材周辺のコンクリートが破碎した。

3. 2 荷重-たわみ性状

図-4は同等の試験体4体の荷重-たわみ曲線を比較したものであるが、いずれも大差なく、補強材に対するひずみゲージ貼付の影響も認められない。図-5は繊維棒材の本数の違いと珪砂接着の有無の影響をみたものである。同図より、本数の影響は曲げひび割れを発生以降の直線状の勾配すなわち剛性の差として顕著に現れている。さらに図-9によって、その剛性が本数を増すにしたがい直線的に増大することがわかる。また、図-5, 9に繰返し載荷履歴を与えた試験体について比較した図-6を加えた3つの図のいずれからも、全般的な傾向としては珪砂接着の有無の差は少なく、そのわずかな違いも配筋数によって異なり、一律には現れていないようにみ

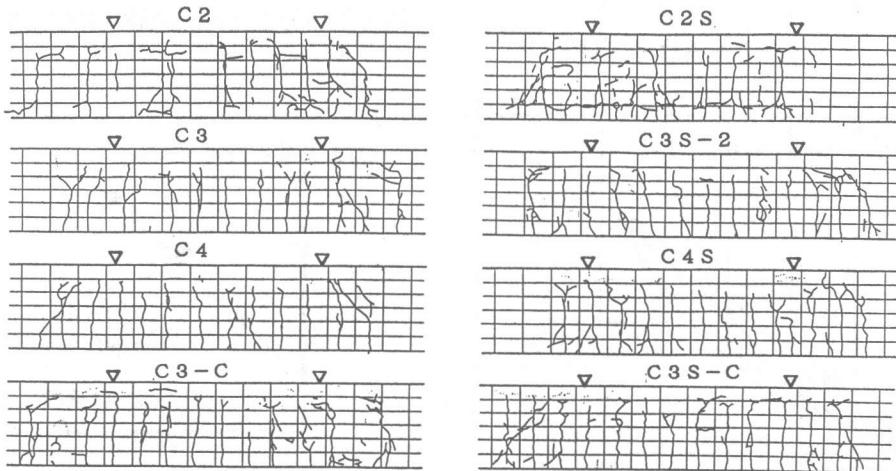


図-3 ひび割れ図の例示

える。ただし、低荷重時では珪砂接着によりたわみの抑えられる効果がみられる。図-7, 8は、繰返し荷重によって得られた荷重-たわみ曲線を同等の配筋を有する試験体から単調荷重によって得られたものと比較したものであるが、通常の鉄筋コンクリート梁と同様、スケルトンとしては両者に大差のないことがわかる。ただし、棒材に珪砂の接着されていない場合の図-6では、単調荷重による試験体の方が耐力、剛性共に低くなる結果となったが、少なくとも、この程度の繰返し荷重による劣化はほとんどないことが示されたと考えられる。

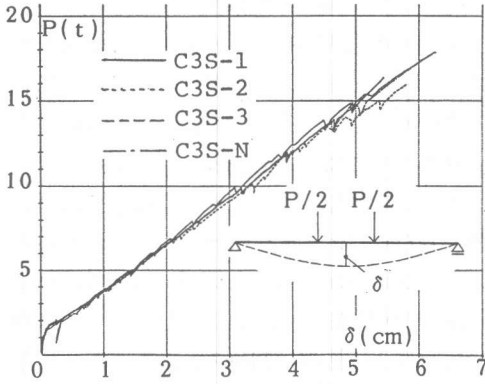


図-4 荷重-たわみ曲線の比較 (1)

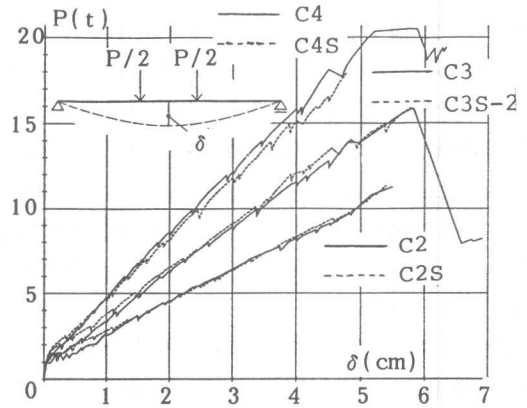


図-5 荷重-たわみ曲線の比較 (2)

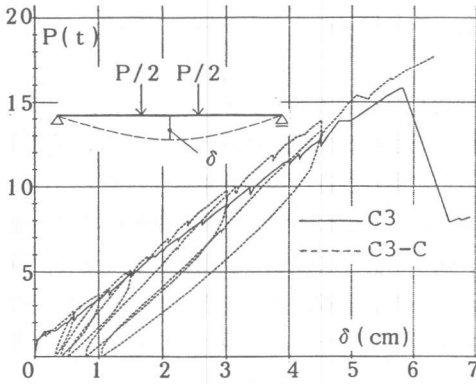


図-6 荷重-たわみ曲線の比較 (3)

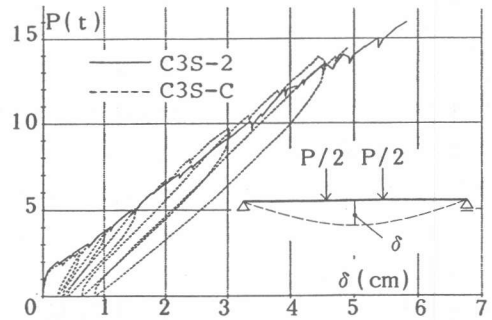


図-7 荷重-たわみ曲線の比較 (4)

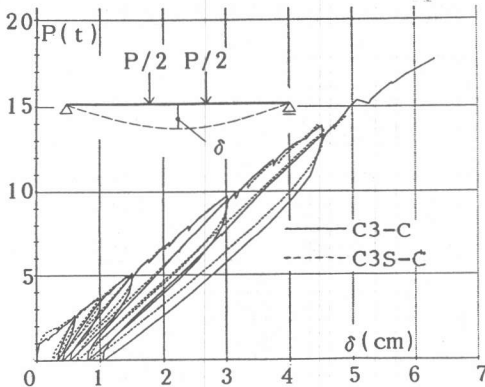


図-8 荷重-たわみ曲線の比較 (5)

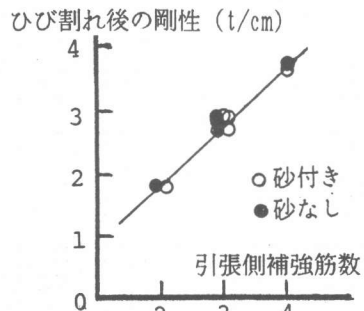


図-9 ひび割れ後の接線剛性

3. 3 耐力

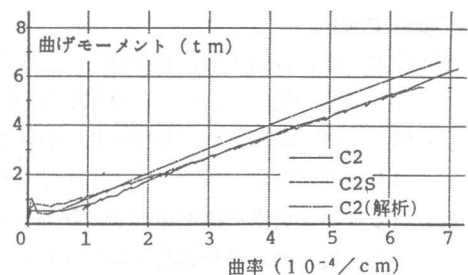
表一4に示すように、曲げひび割れの発生耐力は大部分の試験体が約1tとなったが、この結果は、コンクリートの曲げひび割れ強度を $1.8\sqrt{F_c}$ とする鉄筋コンクリート部材について慣用の算定式³⁾を用いて得られる計算値とほぼ同等である。他方、最大耐力は前述のようにC4の試験体のみが圧縮縁のコンクリートの圧潰によって定まったが、その他はすべて繊維棒材の破断により定まった。棒材の配筋量の増すにつれての耐力値の増大傾向は顕著にみられるものの、棒材が3、4本となるとバラツキが明らかに大きくなる。この理由としては、通常の鉄筋よりも大きいとみられる材料強度のバラツキもさることながら、各棒材の配筋レベルの若干の差が各々の棒材の各個撃破的な破断を誘発することによって配筋量に見合う累加の強度が発現されない可能性も指摘できよう。このことは、各棒材のひずみの測定値からも推察される。したがって、このような繊維棒材によって補強されるコンクリート梁の実施設計に際しては、材料強度の保証値に対してどの程度の安全率を見積もるべきかを明確にすることを要しよう。また、これらの耐力値は、棒材の破断を生じる荷重とする場合、鉄筋コンクリート梁において慣用の曲げ終局強度の略算式、

$$M_u = 0.9 a_t \sigma_y d$$

において $a_t \sigma_y$ にそれぞれ引張繊維棒材の断面積の合計、棒材の破断強度を代入することによって表一4中の「計算値1」のように算出され、これらは実験値と良く対応する。同表に付記されている「計算値2」は平面保持を仮定した上で、圧縮側のコンクリートにSmith & Youngによる応力-ひずみ関数⁴⁾を用いて断面の力のつりあいから反復計算法により求められたものである。この場合、繊維棒材が4本配筋されている試験体に関してはコンクリートの圧潰によって定まる耐力値が算出された。この場合、圧潰ひずみとしては実際に圧潰の生じたC4の試験体の圧縮縁のコンクリートに貼付されたひずみゲージの値から4000 μ を仮定して実験値と一致する値が算出された。C4Sの試験体の場合には、これよりもさらに低い耐力において棒材の破断が生じたと考えられる。また、「計算値2」では、引張補強量が3本以下の場合には棒材の破断によって定まる耐力値が算出され、この場合には「計算値1」と大差ない結果となった。

3. 4 曲げモーメント-曲率関係

図一10~12は、試験体の中央断面における引張側の繊維棒材のひずみと圧縮縁のコンクリートのひずみの両者の測定値から平面保持を仮定して曲率を求め、曲げモーメントとの関係を描いたものである。各曲線は、最大耐力付近になると補強材のひずみの測定値が乱れるために、いずれも最大耐力時の曲げモーメントよりも幾分低い値までが示されている。各々の図中に「解析」として示したものは、前節における「計算値2」を算出したのと同等の方法によって求めたものである。各実験曲線は各々の荷重-たわみ曲線の形状と酷似し、引張補強材が2本の場合には付着割裂状のひび割れが影響してか、解析との差がやや大きくなるものの、総じて、それぞれ対応する解析曲線とも良く一致しているといえよう。これらによって、珪砂の接着の有無によらず、棒材のコンクリートとの十分な付着性が示されたものと考えられる。



図一10 曲げモーメント-曲率関係 (1)

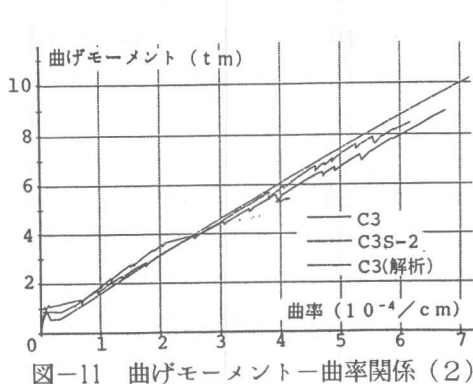


図-11 曲げモーメントー曲率関係 (2)

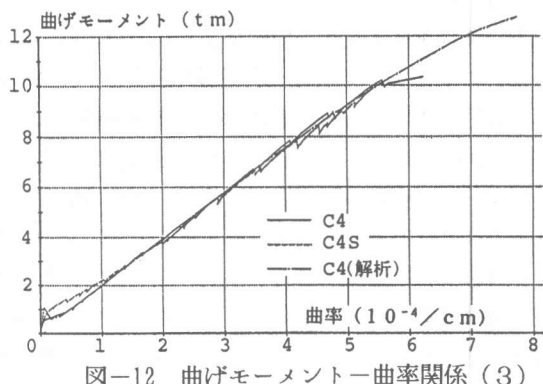


図-12 曲げモーメントー曲率関係 (3)

4. 結論

組紐状炭素繊維棒材を曲げ補強筋とするコンクリート梁の有効性に関して、本実験研究の範囲内で得られた知見を以下に要約して示す。

- (1) 棒材表面の珪砂の接着は低応力時では変形を抑える効果を示す。しかし、全般的な荷重ー変形挙動に関しては顕著な差をもたらさず、組紐状の成形加工による表面処理のみで棒材の耐力を発現させるに十分な付着性が認められた。ただし、通常の鉄筋と比べると大きな引張力が課されるため、特に配筋量が少ない場合にはひび割れの集中性がみられ、コンクリートの付着割裂状のひび割れが多く発生する。
- (2) 配筋本数を増すと、ひび割れ以降の剛性はほぼ直線的に増大する。他方、耐力は材料強度からの配筋本数に見合う強度の累加性が成立しにくくなる。
- (3) 最大耐力は、棒材の破断で決定される場合、鉄筋コンクリート梁で慣用の曲げ終局強度の略算式を準用して推算される。一方、圧縮縁のコンクリートの圧潰で決定される場合には、圧潰ひずみを 4000μ 程度に見積もることにより、平面保持に基づく断面の力のつりあいから求められる。
- (4) 最大耐力前の5サイクル程度の一方向繰返し载荷では、剛性、耐力の劣化は認められない。

[謝辞]

本研究の実施に際しては、平成元年度本学卒論生の伊東直康、木下 隆、松野秀則、水谷一彦の4君の協力を得ました。ここに、謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 岡本 直、谷垣正治、松原澄行：アラミド繊維による組紐状棒材の研究（その2. コンクリート補強効果について）、日本建築学会学術講演梗概集、1987、pp. 531～532.
- 2) 岡本 直、遠藤克彦、松原澄行、谷垣正治：アラミド繊維による組紐状棒材を用いたPRCはりの曲げ性状、コンクリート工学年次講演論文集、No. 10-2、1988、pp. 671～676.
- 3) 日本建築学会構造標準委員会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 シリーズ9「はり・柱の曲げ終局強度と変形性状」、建築雑誌、vol. 94、1979、pp. 37
- 4) Smith, G. M. and Young, L. E. : Ultimate Flexural Analysis Based on Stress-Strain Curves of Cylinders, ACI Journal, Procs. Vol. 53, Dec. 1956, pp. 597-610