

論文

[2146] 連続繊維緊張材を用いた PC 梁のせん断性状

中井裕司*1・浅井洋*1・岡野素之*2・小田切隆幸*3

1. はじめに

コンクリート部材の補強材として、高強度、軽量、非磁性であり耐腐食性に優れている連続繊維補強材が注目され、様々な利用方法について各方面で研究されている。なかでも、連続繊維補強材を緊張材として利用する方法は、連続繊維補強材の材料物性およびコストを考慮すると優れていると考えられる。連続繊維緊張材を用いたコンクリート梁の曲げ性状はほぼ従来の曲げ理論に従うことが明らかにされており[1]、曲げ設計手法の提案も行われている[2]。しかし、連続繊維緊張材を用いたコンクリート梁のせん断性状についての研究例[3]は少ないのが現状である。まず、せん断補強筋のない梁のせん断耐力について、連続繊維緊張材の種類・弾性係数の影響およびプレストレスの評価方法についても明確にされていない。

そこで、本研究はせん断補強筋のない梁の緊張材としてアラミド繊維、炭素繊維製緊張材に加え PC 鋼より線を用い、緊張材の弾性係数および断面積の相違とプレストレス量の相違に着目し、せん断補強筋のない梁のせん断特性およびその耐力を検討することを目的として行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用した緊張材は、表-1に示すアラミド繊維、炭素繊維製緊張材および PC 鋼より線の3種類である。アラミド繊維製緊張材（以下アラミド緊張材）は、 $\phi 6$ mmの異形アラミド FRP ロッドを4本平行に束ねたものである。炭素繊維製緊張材（以下炭素緊張材）は、より線状に加工したものである。表中の規格引張強度はカタログ値を、引張強度は強度試験結果[5]を示す。コンクリートは早強ポルトランドセメントを用い、粗骨材の最大寸法を20mm、単位水量163kg/m³、水セメント比37%とし、その目標圧縮強度を500kgf/cm²とした。

2.2 供試体

供試体はプレテンション方式で作成した。供試体の諸元を表-2に示す。緊張材の種類、プレストレス量、緊張材の量を実験変数として9体作成した。緊張材の量は、供試体の曲げ耐力がほぼ一定になるように連続繊維緊張材の実緊張材比*4を曲げ引張破壊形式領域で一定にした[2]。有効プレストレスはアラミド緊張材の規格引張強度の0%、20%、40%および60%とし、各水準での有効プレストレス量を同一とした。供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は T 型断面で桁高

表-1 緊張材の力学的特性値

	公称直径 (mm)	公称断面積 (mm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	規格引張強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/mm ²)
アラミド緊張材	4× $\phi 6$	113.0	-	180	220	5400
炭素緊張材	15.2	113.6	-	179	220	14000
PC 鋼より線	12.7	98.7	160	190	197	19700

*1 住友建設(株) 技術研究所 (正会員)

*2 (株)大林組 技術研究所 (正会員)

*3 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

500mm、上フランジ巾450mm、ウェブ巾100mmで、有効桁高450mmとし、全長4000mmである。なお、桁端部は付着割裂防止のために500mmにわたり拡幅し異形鉄筋にて補強した。緊張材は、下縁に3本の緊張材を2段に分けて配置し、また、上縁のコンクリート応力が緊張直後にその引張強度以内に収めることを目的とし上縁に応力調整用の小型緊張材を2本配置した。供試体のプレストレスによる平均圧縮応力度は0～50kgf/cm²である。

2.3 載荷方法および測定項目

載荷方法および測定項目を、図-2に示す。スパン長を3000mmの単純支持とし、せん断スパン比(a/d)を2.5とする対称4点載荷とした。載荷方法は変位制御により行い、曲げひび割れが断面図心を越えた時点および明確なせん断ひび割れが発生した時点で除荷し、以後破壊まで単調に載荷した。

測定項目は、供試体の変形を支点部のほかに5点、緊張材の滑り込みを2点、梁上縁のコンクリート圧縮歪みを3点、下縁のコンクリート引張歪みを5点、純曲げ区間の曲げひび割れ巾を3点、下縁から200mmのせん断ひび割れを4点、そして、せん断スパン中央の図心におけるコンクリート表面主応力を測定した。さらに、画像変位計測システム(EMTEC製)にてせん断スパン中

表-2 供試体の諸元

No.	供試体名	緊張材	緊張材断面積 (cm ²)	実緊張材比*4	応力調整用緊張材断面積	弾性係数比	プレストレス量 (tf)	a / d
1	A06	アラミド	3.39	0.074	0.56	0.27	43.0	2.5
2	A04	アラミド	3.39	0.074	0.56	0.27	29.0	2.5
3	A02	アラミド	3.39	0.074	0.56	0.27	14.0	2.5
4	A00	アラミド	3.39	0.074	0.56	0.27	0.0	2.5
5	A04D	アラミド	6.78	0.147	0.56	0.27	29.0	2.5
6	C04	炭素	3.41	0.074	0.61	0.70	29.0	2.5
7	C00	炭素	3.41	0.074	0.61	0.70	0.0	2.5
8	S04	P C鋼より線	2.96	0.074	0.56(アラミド)	1.00	29.0	2.5
9	S00	P C鋼より線	2.96	0.056	0.56(アラミド)	1.00	0.0	2.5

*4 実緊張材比
$$pe = \frac{fpu \cdot Ap}{f'ck \cdot b \cdot d}$$

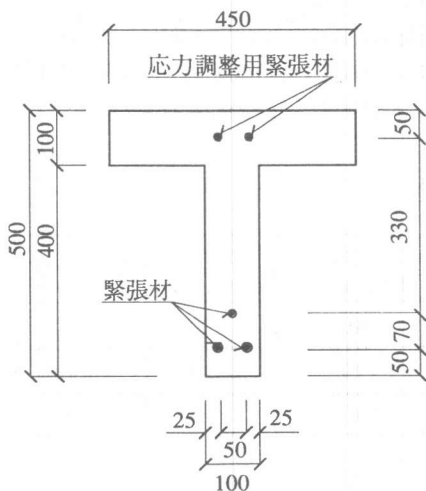


図-1 供試体断面

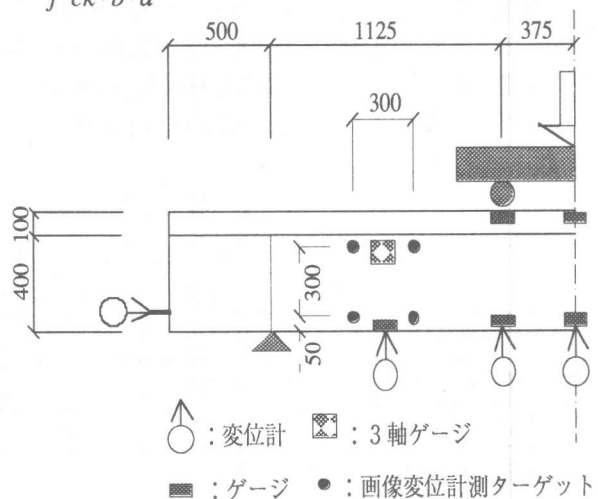


図-2 載荷方法：計測項目

央のウェッブ300×300mm区間の4点の2次元の変位を測定した。

3. 実験結果と考察

実験結果の一覧を表-3に示す。計算値は次のように算出した。曲げひび割れは下縁のコンクリート応力が引張強度にいたる荷重とし、せん断ひび割れは全断面有効としたせん断スパンの図心位置におけるコンクリートの主応力が引張強度にいたる荷重とした。曲げ耐力はコンクリート標準示方書に従い安全係数を1として算出した荷重である。せん断耐力は以下の式により求めた。式(2)はコンクリート標準示方書のせん断補強筋のない梁のせん断耐力式の基本となった二羽らの式であり、式(3)はせん断耐力に対するプレストレスの効果を評価した佐藤らの式である[4]。

$$P_{scal} = 2 \cdot (V_c + V_p) \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$V_c = 0.94 \cdot f_c^{1/3} \cdot (100pw)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) \cdot bw \cdot d \quad \dots \dots (2)$$

$$V_p = \frac{2 \cdot M_o}{a} \quad \dots \dots \dots (3)$$

なお、コンクリートの負担するせん断耐力(Vc)の算出にあたり緊張材の断面積は弾性係数による換算を行っていない。

3.1 破壊およびひび割れ性状

供試体は、まず曲げひび割れが発生し、S00を除いて、載荷点位置の近傍からせん断ひび割れが一気に生じ、その後、支点から延びるせん断ひび割れが載荷点から延びるせん断ひび割れと上縁圧縮部で交わり、せん断スパン部分の載荷点と支点を結ぶ上部3角形部分が飛び抜け、残存アーチ機構が座屈するように崩壊する急激な破壊にいたった。なお、破壊時、炭素緊張材の場合は緊張材が破断し、アラミド緊張材の場合は支間の下縁かぶりコンクリートが全て剥落し、PC鋼より線の場合は緊張材定着部の滑りが認められた。また、付着の良好なアラミド緊張材、炭素緊張

表-3 実験結果の一覧

No	供試体名	コンクリート (kgf/cm ²)		曲げひび割れ (tf)			せん断ひび割れ (tf)			最大耐力 (tf)					破壊形式
		圧縮強度	引張強度	Ptest	Pcal	$\frac{Ptest}{Pcal}$	Ptest	Pcal	$\frac{Ptest}{Pcal}$	Ptest	曲げ Pbcal	せん断 Pscal	$\frac{Ptest}{Pbcal}$	$\frac{Ptest}{Pscal}$	
1	A06	516	34.1	27.0	24.1	1.12	35.0	28.8	1.22	52.0	53.2	51.2	0.98	1.02	S
2	A04	560	44.5	17.9	18.3	0.98	26.9	26.6	1.01	37.7	53.0	37.7	0.71	1.00	S
3	A02	590	45.9	10.4	11.6	0.90	21.3	21.4	1.00	31.0	52.6	24.1	0.59	1.29	S
4	A00	611	46.5	5.4	4.7	1.15	9.2	15.9	0.58	21.3	52.2	10.5	0.41	2.03	+ S
5	A04D	580	42.6	17.4	18.1	0.96	26.8	26.0	1.03	41.2	93.2	40.5	0.44	1.02	S
6	C04	556	41.0	16.8	18.4	0.91	26.4	25.8	1.02	39.0	52.5	38.3	0.74	1.02	S
7	C00	463	35.9	4.4	4.2	1.05	8.4	12.3	0.68	13.1	51.5	9.5	0.25	1.38	+ S
8	S04	619	50.2	17.2	17.4	0.99	25.6	27.6	0.93	44.0	38.7	34.5	1.14	1.28	+ S
9	S00	577	42.7	4.6	4.3	1.07	11.1	14.6	0.76	37.5	38.6	9.8	0.97	3.83	+BS

S：せん断破壊 B S：曲げせん断圧縮破壊 +：緊張材の滑り出しをとまなう

材は、曲げひび割れ後、緊張材に沿った付着割裂ひび割れが生じた。

曲げひび割れ荷重はほぼ計算値と一致した。せん断ひび割れ荷重はプレストレス量が0のシリーズを除き一致した。プレストレス量が0のシリーズのせん断ひび割れ荷重が低い原因は、曲げひび割れもしくは微細な緊張材の付着割裂ひび割れの延長上にせん断ひび割れが生じたためである。従って、せん断ひび割れ発生位置において、これらのひび割れが生じていなければ上記算定方法でせん断ひび割れ荷重が推測できると考えられる。

代表的なひび割れ図を図-3に示す。定性的に、ひび割れ間隔はアラミド緊張材、炭素緊張材、PC鋼より線の順に大きくなり、曲げひび割れおよびせん断ひび割れ巾はアラミド緊張材、炭素緊張材、PC鋼より線の順に小さくなる。

曲げひび割れ巾と計算値の関係を図-4に示す。計算値はコンクリート標準示方書に従った。なお、 $k_1=1.3$ とした。連続繊維緊張材の場合、ひび割れ巾は計算値より小さく、ひび割れ間隔が影響していることが理解できる。

一定荷重時のせん断ひび割れ巾と緊張材の換算断面積（断面積×弾性係数比）の比の関係を図-5に示す。せん断ひび割れ巾は緊張材の換算断面積の比と相関関係を持っている。また、せん断ひび割れ巾の大きさが、せん断耐力と相関を持たないことが理解できる。

画像変位計測システムによって得たデータを、有限要素法で用いる4角形要素の形状関数を利用して、ひび割れを含んだせん断スパン中央の上縁から250mmの位置における主変形割合（ひび割れがなければ、主歪みに相当する）を算出した。この主変形割合と荷重との関係を図-6に示す。緊張材の換算断面積が少ないほど大きな主変形割合を示しており、せん断変形量が卓越していることが理解できる。また、プレストレス量が2.9tonfのグループの終局主変形割合は0.015から0.025の範囲に大きく分布しているが計算せん断耐力に対して実験値はほぼ等しい。したがって、緊張材の弾性係数の違いによる終局主変形割合の相違がせん断耐力に及ぼす影響は少ないといえる。さらに、プレストレス量による違いを見てみると、プレストレス量の大きいグループはせん断ひび割れ

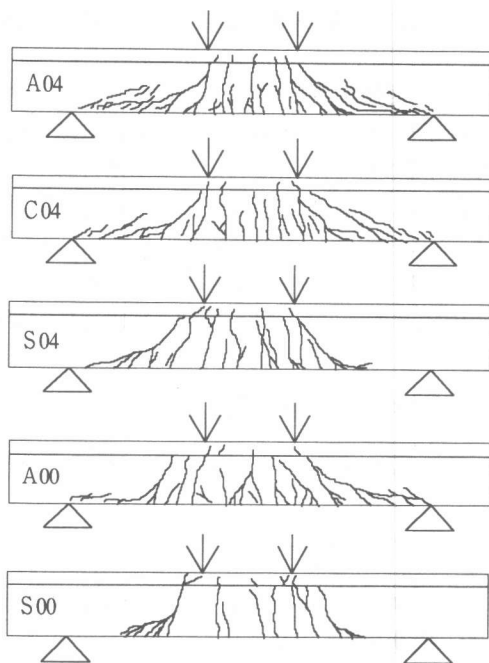


図-3 ひび割れ図

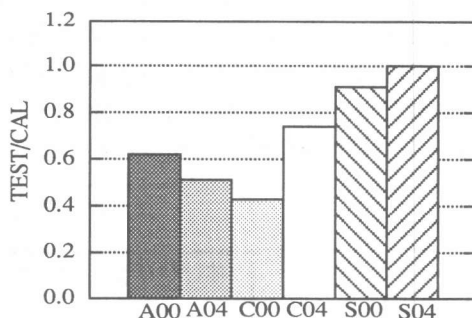


図-4 曲げひび割れ巾と計算値の関係

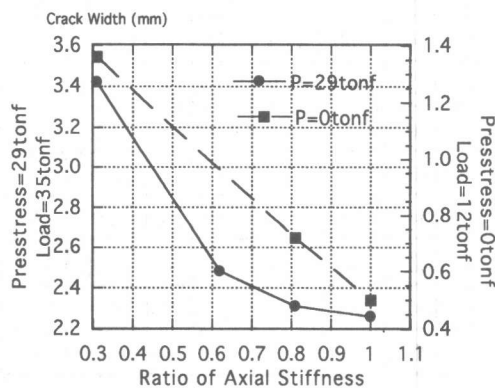


図-5 換算断面積比とせん断ひび割れ巾の関係

発生後も主変形割合の増加が著しく、プレストレス量がせん断ひび割れ後のせん断耐力の増加に寄与していることが解る。

主変形割合と緊張材の換算断面積比との積と荷重の関係を図-7に示す。すると、両者の関係はほぼ統一的に表せる。前述のように特定のせん断ひび割れ巾と緊張材の換算断面積はある程度の相関関係を持っていたが、大きさのあるエリアでひび割れを評価すると線形な関係であることが理解できる。

3.2 せん断補強筋のない梁のせん断耐力

(1) 緊張材定着部の滑りの影響

A00、C00、S00およびS04供試体は緊張材定着部の滑り込みが認められた。滑り込み量と荷重の関係を図-8に示す。滑りの発生荷重はせん断ひび割れ荷重にほぼ相当している。プレストレス量が0のグループの滑り込み量は0.01mm以下と微小であり、緊張材に発生している応力を解放するような定着機構を破壊する滑りではない。しかし、試験区間全体の緊張材の付着性能が劣化していることが推測できる。この原因は、A00とC00は付着性能が高いためせん断ひび割れおよび付着割裂ひび割れが多発したことによるものであり、S00は緊張材の付着性能が低いためと考えられる。これらの供試体のせん断耐力は計算値より著しく大きく、緊張材の付着性能の劣化がせん断耐力の向上に寄与している可能性が考えられる。これは、池田らの知見[6]と一致するが、連続繊維緊張材の付着劣化がひび割れを原因とするところが異なる。

(2) プレストレスの影響

耐力とプレストレス量の関係を図-9に示す。プレストレス量が増加するに従い、供試体のせん断耐力が増加していることを理解できる。その増加量は式(3)にてほぼ評価が可能である。一方、コンクリート標準示方書の棒部材のせん断耐力式は、プレストレス量によるせん断耐力の増加量を過小に評価する傾向にある。さらに、同式の値は全ての供試体のせん断ひび割れ荷重をも下回っている。

(3) 緊張材の断面積、弾性係数の影響

せん断耐力の計算値を耐力で除した値をソートした結果を図-10に示す。計算値は、Vcを①式(2)に示す方法と、②.緊張材の弾性係数比を用いて断面積を換算する方法とを併記している。大きなプレストレス量の連続繊維緊張材を用いた供試体は

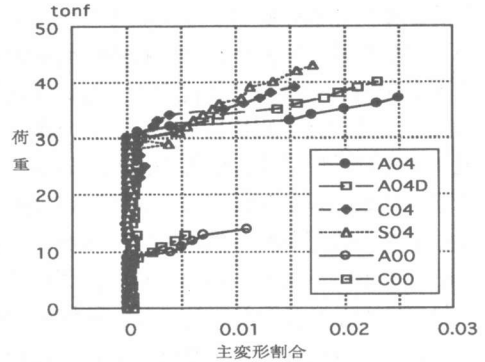


図-6 主変形割合と荷重の関係

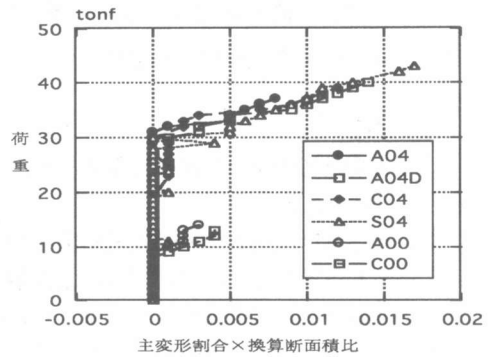


図-7 主変形割合×換算断面積比と荷重の関係

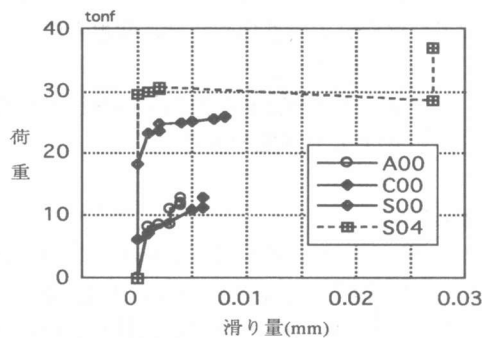


図-8 緊張材定着部の滑り

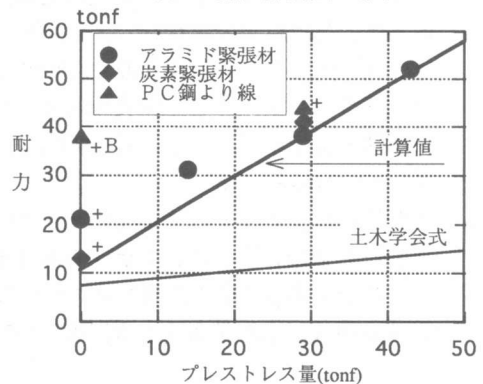


図-9 耐力とプレストレス量の関係

計算値と実験値の整合がよい。また、A04とA04Dの供試体を見ると、緊張材の断面積の評価も本実験の内では妥当と言える。計算方法①②に関しては、大きな結果の違いはないが、実験値との整合性は計算方法①が優れている。A02を除いてS04以下A00迄は、緊張材定着部の微小な滑りが確認された供試体であるが、計算値は耐力を過小評価している。特に、プレストレス量が0つまりRC梁の場合は、弾性係数の小さい場合にはせん断耐力が低下すると報告されているが、本実験でもいちたT型断面の場合、せん断ひび割れ後も耐荷力の増加が認められるので、上述の傾向は認められなかった。

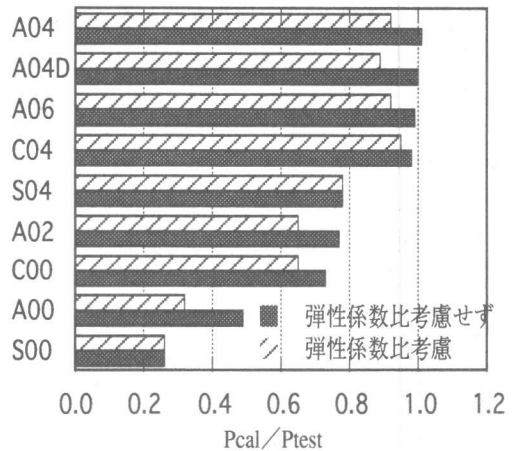


図-10 実験値と計算値の比較

4. 結論

せん断補強筋のない連続繊維緊張材を用いたPC梁のせん断実験より得られた結果は、以下の通りである。

- (1) せん断ひび割れ巾とせん断耐力との相関は、認められない。
- (2) ある領域のせん断ひび割れ巾と間隔の積は、緊張材の換算断面積と線形な関係がある。
- (3) 緊張材定着部の微小な滑りは、せん断耐力を増加させている可能性がある。
- (4) プレストレス量がせん断耐力に与える影響は大きく、単純梁の場合、デコンプレッションモーメントをせん断スパンの1/2で除す値で評価できる。
- (5) 緊張材の弾性係数がせん断耐力に与える影響は小さく、設計において、積極的に評価する必要はない。
- (6) アラミド緊張材の断面積の増加がせん断耐力に与える影響は、コンクリート標準示方書式のVcで評価できる。

参考文献

- 1) 迎邦博ほか：AFRPロッドを用いたPC構造物に関する研究（その3）、住友建設技術研究所所報、No16、pp.33-48、1989.10
- 2) 中井裕司ほか：FRP緊張材を用いたプレレストコンクリート梁の曲げ終局限界状態について、コンクリート工学年次論文報告集、13-2、pp.749-754、1991.6
- 3) 例えば、鳥取誠一・涌井一・向谷池誠一：FRPロッドを引張補強筋およびせん断補強筋として用いたRC、PCはりのせん断耐力、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、pp.199-204、1992.4
- 4) 佐藤勉・山住克巳・渡邊忠明：プレレストコンクリートはりのせん断強度、鉄道総研報告、Vol.2, No.8、1988.8
- 5) 中井裕司ほか：アラミド緊張材の力学特性とその信頼性、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、pp.75-78、1992.4
- 6) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究、土木学会論文報告集、第293号、pp.101-109、1980.1