

アラミド短繊維混入によるコンクリート部材のひび割れ幅抑制効果

コンクリート研究室 西野 崇史
指導教官 下村 匠
丸山 久一

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の新設においては、工費縮減、耐久性向上、多機能性など、多くの付加価値を目指した新技術や新工法の開発が課題となっている。高架橋など構造物からのコンクリート片の剥落防止を目的として、打設現場で短繊維を混入するコンクリートの適用が検討されている¹⁾。しかし、多機能性を求める観点からは、繊維混入による剥落防止効果のみならず、同時に他の効果も期待できる方がより魅力的である。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート部材において繊維混入コンクリートを用いることによるひび割れ幅抑制効果に着目した。種々の短繊維を混入したコンクリートを用いて作成した鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行い、ひび割れ幅に及ぼす繊維混入の影響を検討した。繊維混入によるひび割れ幅低減のメカニズムを、ひび割れ間隔、コンクリートのテンションステイフニング効果、ひび割れにおける繊維の架橋効果の観点から検討した。

2. 実験概要

2.1 使用短繊維

本研究で使用した短繊維種類および物性値を表-1に示す。これらの繊維のうち、本研究で主たる検討対象としているのは、“T-321 凹凸”，“T-321”のアラミド短繊維である。鋼繊維およびビニロン短繊維は比較検討用に用いた。写真-1にT-321凹凸繊維を示す。T-321凹凸繊維は、突起を形成する樹脂により繊維が拘束されている。そのため、コンクリートに投入しても練混ぜ時に繊維が解繊しない。写真-2にT-327繊維を示す。T-327繊維は仮収束繊維のため、練混ぜ時に容易に解繊する。

2.2 ベースコンクリートの配合

ベースコンクリートの配合を表-2に示す。本研究では、ベースコンクリートの配合は全供試体同一で行った。したがって、コンクリートの種類に関する実験パラメータは短繊維種類のみとなる。



写真 - 1 T-321凹凸(アラミド)



写真 - 2 T-327(アラミド)

表 - 1 使用短繊維

短繊維名	材質	長さ (mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (kg/mm ²)	引張弾性率 (kg/mm ²)
T-321凹凸	アラミド	30	1.26	125	2650
T-327	アラミド	9	1.36	280	5920
ビニロン	PVA	30	1.30	90	3000
鋼繊維	スチール	30	7.85	240	20000

表 - 2 ベースコンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 w/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単用量 (kg/m ³)			
					水 (W)	セメント (C)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)
20	10	45	6	44	175	389	740	960

2.3 供試体

実験に用いた供試体は、**図-1**に示すように、100×100×1000mm のコンクリート角柱の中心に D19 異形鉄筋（降伏強度 328.9N/mm²，弾性係数 1.88×10⁵N/mm²）を 1 本埋め込んだものである。

短繊維の種類により、**表-3**に示す全部で 5 体の供試体を作製した。コンクリートの打設は、供試体を寝かせ長軸直交方向に行った。打設後の供試体は、乾燥収縮を防ぐため、載荷試験時まで湿布養生を行った。**表-3**には、載荷試験時におけるコンクリートの圧縮強度の実測値を示している。その値は 43～52N/mm² の範囲であった。繊維混入率は、試行錯誤の結果、打設に適当なフレッシュ性状が確保でき、繊維混入の主目的であるコンクリートの剥落防止のために標準的に使用される量を念頭に設定した。**表-3**には、JSCE-552 鋼繊維補強コンクリートの曲げタフネス試験方法に準じて求めた、各繊維混入コンクリートの曲げじん性係数も示した。

2.4 実験方法

供試体の両端からそれぞれ 150mm 内側の 700mm の区間をひび割れ幅測定区間とし、**図-1**に示すように、載荷試験前にこの区間に π 型変位計を隙間なく設置した。

供試体の自重による曲げの影響を排除するために、供試体を反力フレーム内に垂直に設

置し載荷した。コンクリートより露出させた鉄筋端部にくさびグリップを取り付け、加力を行った (**図-2**)。

荷重は加力側（上側）において、ロードセルにより測定した。鉄筋の平均ひずみは、**図-1**に示すように、供試体両端部において鉄筋に取り付けたアルミ治具を介して鉄筋の変位を変位計により測定し、長さ変化を供試体長で除することにより求めた。ひび割れ間隔は鋼尺により測定した。載荷は単調載荷とした。

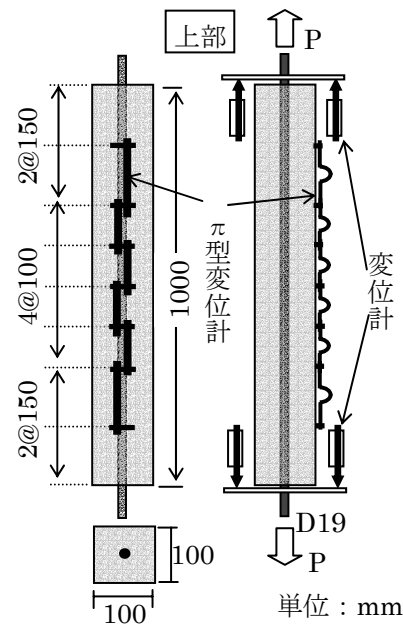


図-1 供試体形状，変位計設置位置

表 - 3 供試体の水準

供試体名	短繊維名	繊維混入率 (%)	圧縮強度 fc'(N/mm ²)	曲げじん性係数 (N/mm ²)	試験材齢 (日)	SP剤添加量 C× (%)
プレーン	-	-	50.0	0.04	28	-
T-321凹凸	T-321凹凸	0.5	49.9	1.30		-
MIX	T-321凹凸	0.2	43.0	1.00		0.2
	T-327	0.1				
ビニロン	ビニロン	0.5	48.0	1.70		-
鋼繊維	鋼繊維	0.5	52.0	2.40	-	

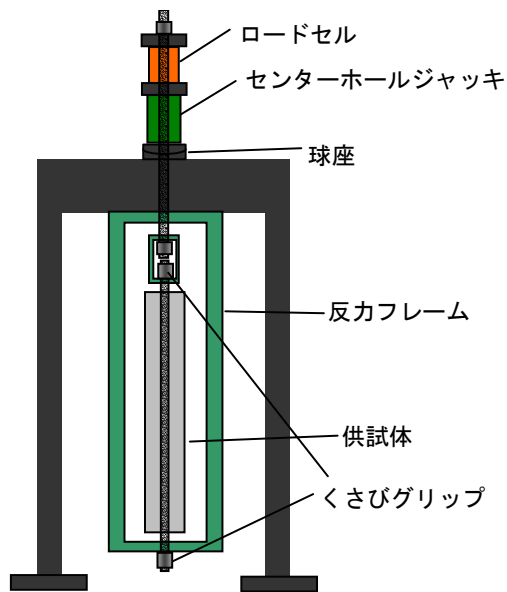


図-2 荷重方法

3 実験結果

供試体 MIX を例に、実験結果を図-3 に示す。図-3 は荷重と平均ひずみの関係を示したものである。第1 ひび割れ発生後、荷重の増加とともに順次ひび割れが発生する。新たなひび割れの発生は徐々に少なくなりひび割れ間隔が定常状態に近づいた。また、ひび割れ発生後もコンクリートのテンションスティフニング効果により、同一荷重時における鉄筋の平均ひずみは、別途試験した単体鉄筋

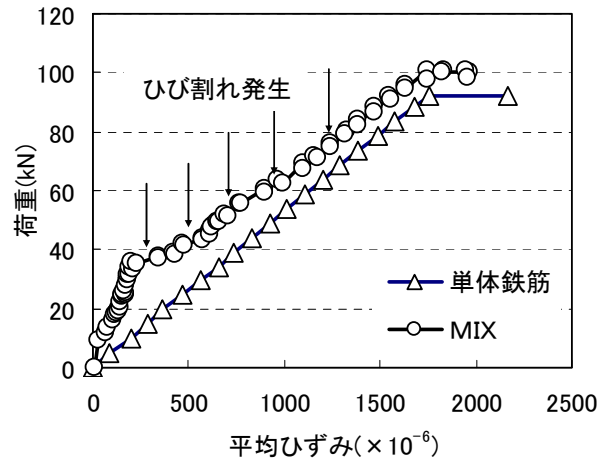


図-3 荷重と平均ひずみの関係

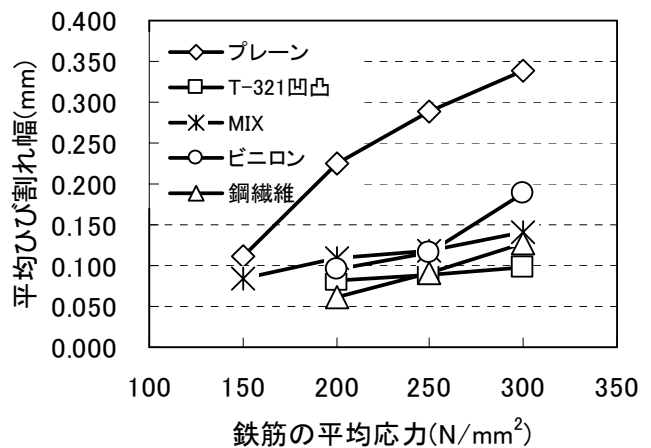


図-4 鉄筋の平均応力と平均ひび割れ幅の関係

表 - 4 供試体の実験結果

	第1ひび割れ発生応力 (N/mm ²)	ひび割れ本数				平均ひび割れ幅 (mm)			
		150 (N/mm ²)	200 (N/mm ²)	250 (N/mm ²)	300 (N/mm ²)	150 (N/mm ²)	200 (N/mm ²)	250 (N/mm ²)	300 (N/mm ²)
プレーン	136.7	2	3	4	4	0.112	0.225	0.289	0.339
T-321凹凸	160.6	0	4	5	6	0.082	0.088	0.097	
MIX	144.3	2	3	6	6	0.085	0.108	0.118	0.142
ビニロン	185.0	0	3	3	4	0.094	0.117	0.189	
鋼繊維	174.6	0	3	4	5	0.061	0.090	0.128	

表 - 5 供試体の実験結果(ひび割れ間隔)

	平均ひび割れ間隔 (mm)				最大ひび割れ間隔 (mm)			
	150 (N/mm ²)	200 (N/mm ²)	250 (N/mm ²)	300 (N/mm ²)	150 (N/mm ²)	200 (N/mm ²)	250 (N/mm ²)	300 (N/mm ²)
プレーン	334	251	201	201	315	315	315	315
T-321凹凸		199	166	143		325	294	179
MIX	333	249	143	143	530	530	195	195
ビニロン		249	249	199		380	380	244
鋼繊維		251	201	167		392	252	252

のひずみ（ひび割れ断面におけるひずみに相当）よりも小さいことが確認できた。

図-4は、いくつかの適当な応力レベルにおける全供試体の平均ひび割れ幅を比較したものである。比較する応力レベルは、鉄筋応力が150, 200, 250, 300N/mm²の段階とした。ここで鉄筋応力とは、荷重を鉄筋断面積で除したものであり、ひび割れ断面での鉄筋応力に相当する。

プレーンコンクリート供試体と比較すると、いずれの繊維混入コンクリート供試体も平均ひび割れ幅が明らかに小さい値を示している。

ベースコンクリートの配合はすべての供試体に共通しており、載荷試験時のコンクリート強度も大差なかったため、図-4に見られるひび割れ幅低減効果は、繊維によりもたらされたものであるといえる。繊維混入によるひび割れ幅低減効果は、いずれの繊維を用いた場合でも大差なく、同一荷重レベルで比較すると、繊維無混入のコンクリートの約半分のひび割れ幅となっている。

全供試体の実験結果の総括を表-4, 5に示す。ひび割れ本数、ひび割れ幅、ひび割れ間隔は、各応力レベル(150,200,250,300N/mm²)の値を示している。

4 ひび割れ幅への影響因子に関する検討

4.1 ひび割れ幅算定式

土木学会コンクリート標準示方書では、以下のひび割れ幅算定式が採用されている。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \times \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (1)$$

ここに、w：ひび割れ幅、k1：鋼材の付着性状を表す係数、k2：コンクリートの品質（圧縮強度fc'）がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数、k3：引張鋼材の段数の影響を表す係数、c：かぶり、cs：鋼材の中心間距離、φ：鋼材径、σse：鉄筋応力度の増加量、Es：鉄筋の弾性係数、ε'csd：コンクリートの収縮・クリープ等によるひび割れ幅の増加を表す数値である。

式(1)は、ひび割れ間の変形適合条件より、

(ひび割れ幅) = (係数) × (ひび割れ間隔) × (鉄筋とコンクリートのひずみ差) という形式でひび割れ幅を評価する考え方に基づいている。右辺の{4c+0.7(cs-φ)}は、定常状態におけるひび割れ間隔を表している。σse/Esは鉄筋のひずみを表す項であり、一般にコンクリートの引張り負担を無視して算定される鉄筋応力（ひび割れ断面における鉄筋応力に相当）を用いる。右辺冒頭の係数k1,k2,k3は、鋼材の表面形状、コンクリートの品質、配筋段数の各種因子がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数である。これらの因子がひび割れ幅に影響を及ぼす機構は様々であって、

① ひび割れ間隔の変化

② コンクリートのテンションスティフニング効果などの影響により実際の鉄筋平均ひずみと算定式で考慮される鉄筋ひずみとが異なること

③ 鉄筋とコンクリートのすべりによる鉄筋とコンクリートのひずみ差の変化

が考えられる。荷重レベルや条件によって、これらの機構の割合は変化することが明らかにされている²⁾。このことを踏まえ、式(1)は、上記①から③の機構の割合を問題にしなくとも、最終的なひび割れ幅の算定結果が実験事実と整合するように、各種因子の影響を係数で表して冒頭に乗じる形をとっている⁴⁾。

さて、繊維を混入したコンクリートの実験結果に見られたひび割れ幅抑制効果を正しく見積もり、将来的にひび割れ幅算定式に導入するためには、繊維によりひび割れ幅が低減される機構をある程度明らかにしておく必要がある。そこで、図-4に見られた繊維混入によるひび割れ幅が低減効果が何に起因するからなのかを、ひび割れ間隔、テンションスティフニング効果、鉄筋とコンクリートのひずみ差の観点から検討する。

4.2 ひび割れ間隔

図-5は、全供試体の各応力レベルにおける平均ひび割れ間隔を比較したものである。全体的に、繊維混入によりひび割れ間隔が減少する明確な傾向は認められない。したがって、繊維混入によるひび割れ幅低減効果は、ひび割れ間隔が減少するためではないといえる。

4.3 テンションスティフニング効果

鉄筋コンクリート中のコンクリートは、ひび割れ間における鉄筋との付着により、ひび割れ発生後も平均的には引張力を負担する。この効果が高いほど、同一荷重時における鉄筋の平均応力および平均ひずみが小さくなり、ひび割れ幅が小さくなるといえる。

図-6は、鉄筋応力（荷重を鉄筋断面積で除したもの）と鉄筋の平均ひずみの関係を示したものである。プレーンコンクリートもいずれの繊維混入コンクリートも、コンクリートのテンションスティフニング効果により、単体鉄筋よりも同一荷重時の鉄筋の平均ひずみが小さいことが認められる。しかし、その傾向が、プレーンコンクリートよりも繊維混入コンクリートにおいて顕著であるとはいえない。したがって、繊維混入によるひび割れ幅低減効果は、コンクリートのテンションスティフニング効果を増大させるためではないといえる。

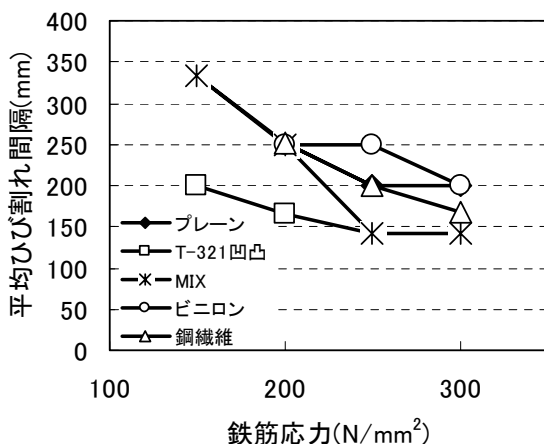


図-5 鉄筋応力と平均ひび割れ間隔の関係

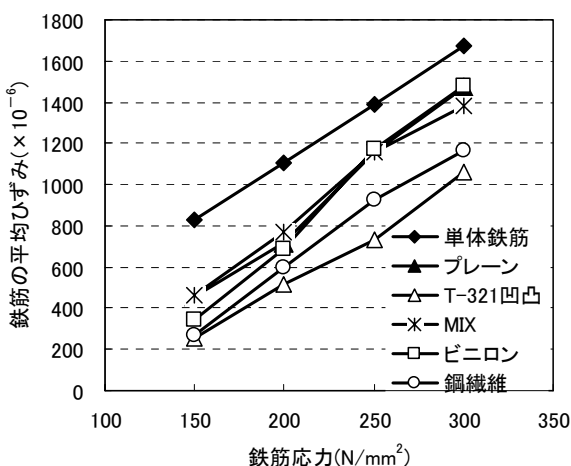


図-6 鉄筋応力と鉄筋の平均ひずみの関係

4.4 繊維による架橋効果の検討

4.2節 4.3節における検討の結果、繊維混入によるひび割れ幅低減機構は、ひび割れ間隔の点からも、コンクリートのテンションスティフニング効果の点からも説明できないことがわかった。残るメカニズムとして考えられるのが、鉄筋とコンクリートのひずみ差が繊維混入により変化することである。

プレーンコンクリートの場合、鉄筋とコンクリートのひずみ差の原因となるのは、鉄筋とコンクリートの付着に依存する両者のすべりである。繊維混入コンクリートでは、これに加え、ひび割れを跨ぐ繊維による架橋効果が考えられる。ひび割れ発生後もひび割れを跨ぐ繊維の存在により、ひび割れ両側のコンクリート間で応力が伝達される。これにより、ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートの弾性変形が維持され、ひび割れの開口が抑制されると考えられる。

そこで、本研究では一軸引張試験にて発生したひび割れ部に、非接触変位計を写真-3に示すように設置し、ひび割れ部の変位を測定した。測定間距離は15mm前後である。図-7に実験結果を示す。供試体はプレーンとT-321凹凸を使用した。

図-7より、繊維混入コンクリートのひび割れ幅抑制効果が顕著に現れている。また、この実験はひび割れ部の変位を計測しているため、コンクリートの品質などは考慮されない。となると、繊維混入コンクリートのひび割れ幅抑制効果は、ひび割れを跨ぐ繊維の存在による架橋効果によるものだといえる。



写真-3 非接触変位計設置状況

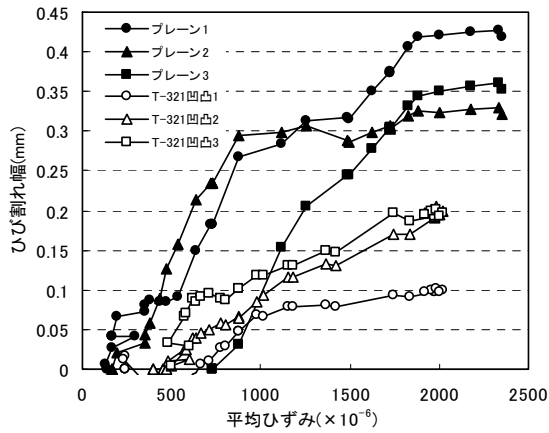


図-7 非接触変位計測定によるひび割れ幅推移

5 繊維混入コンクリートのひび割れ幅算定式の提案

これまでの検討結果で、短繊維混入コンクリートにおいては、ひび割れ間隔およびコンクリートのテンションステイニング効果によるひび割れ幅抑制効果への影響は、プレーンコンクリートと相違ないことを確認した。

繊維混入コンクリートのひび割れ幅抑制効果の主たる影響因子は、ひび割れを跨ぐ繊維の存在による架橋効果であると確認した。ゆえに、繊維混入コンクリートのひび割れ幅算定式は、土木学会式(1)に繊維混入コンクリートの架橋効果を与えることによりそのまま応用できると考えられる。

そこで、土木学会式(1)に繊維混入コンクリートの架橋効果（鉄筋とコンクリートのひずみ差）を考慮し、式を展開すると以下になる。その際、コンクリートのひずみ ε_c は、

$$\varepsilon_c = \alpha \frac{\sigma_{se}}{E_s} \quad \alpha : \text{架橋効果を表す係数}$$

とし土木学会式(1)に導入する。

$$\begin{aligned} w_{FRC} &= 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \\ &\quad \times \left(\left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} - \alpha \frac{\sigma_{se}}{E_s} \right) + \varepsilon'_{csd} \right) \\ &= 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \\ &\quad \times \left((1 - \alpha) \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} \right) + \varepsilon'_{csd} \right) \\ &\quad \dots \dots (2) \end{aligned}$$

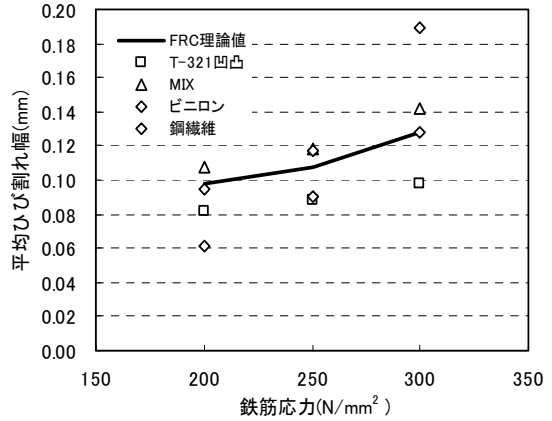


図-8 計算値と実験値の比較

架橋効果を表す係数 α を本実験結果から算出すると $\alpha = 0.6$ となった。

図-8 に繊維混入コンクリートのひび割れ幅提案式から算出した計算値と実験値の比較を示す。図-8 より、計算値と実験値がほぼ一致していることがわかる。これより、これより本研究範囲内では繊維混入コンクリートのひび割れ幅算定式が適用可能であるといえる。

6 結論

本研究の範囲で以下の結論を得た。

- (1) コンクリートに短繊維を混入することにより、鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅が低減されることが実験により確認できた。その効果は、アラミド、ビニロン、鋼のいずれの繊維においても同様に認められた。繊維無混入の場合に比べて、同じ応力レベルのひび割れ幅を約半分にすることが確認できた。
- (2) 繊維混入により鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅が低減されるメカニズムは、ひび割れ間隔が減少するためでも、コンクリートのテンションステイネスが増加するためでもないことが、実験結果に基づく検討の結果明らかとなった。
- (3) 繊維混入により鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅が低減されるメカニズムは、ひび割れを跨ぐ繊維による架橋効果であることを確認した。
- (4) 提案した繊維混入コンクリートのひび割れ幅算定式の計算値が本研究範囲内の実験値に適用可能であることを確認した。