

論文 繊維混入コンクリート部材のひび割れ幅に関する実験的検討

西野 崇史^{*1}・下村 匠^{*2}・中井 裕司^{*3}・伊澤 一^{*4}

要旨：種々の短繊維を混入したコンクリートを用いて作製した鉄筋コンクリート供試体の一軸引張試験を行った。繊維混入が鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅の低減に有効であることを実験的に確認した。繊維混入によるひび割れ幅低減の主たるメカニズムは、ひび割れ間隔、コンクリートの引張剛性が変化するからではないことを明らかにし、ひび割れにおける繊維の架橋効果であると考察した。

キーワード：短繊維、繊維混入コンクリート、ひび割れ幅、ひび割れ間隔

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の新設時には、工費縮減、耐久性向上など、多くの付加価値をもたらす新材料や新工法が求められている。高架橋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が¹⁾、多機能性を求める観点からは、剥落防止のみならず、同時に他の効果も期待できる方が魅力的である。

そこで本研究では、繊維混入による鉄筋コンクリートの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製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調べた。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。



写真-1 T-321 凹凸 (アラミド繊維)



写真-2 T-327 (アラミド繊維)

表-1 実験に使用した短繊維

短繊維名	材質	長さ (mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (MPa)	引張弾性率 (GPa)
T-321 凹凸	アラミド	30	1.26	1230	26.0
T-327	アラミド	9	1.36	2750	58.1
ビニロン	PVA	30	1.30	880	26.7
鋼繊維	スチール	30	7.85	2350	196

*1 長岡技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系助教授 博士 (工学) (正会員)

*3 三井住友建設株式会社 土木事業本部部長 (正会員)

*4 帝人テクノプロダクツ株式会社 産業資材技術センター

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。ベースコンクリートの配合は、全供試体同一とした。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。

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²⁾。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。

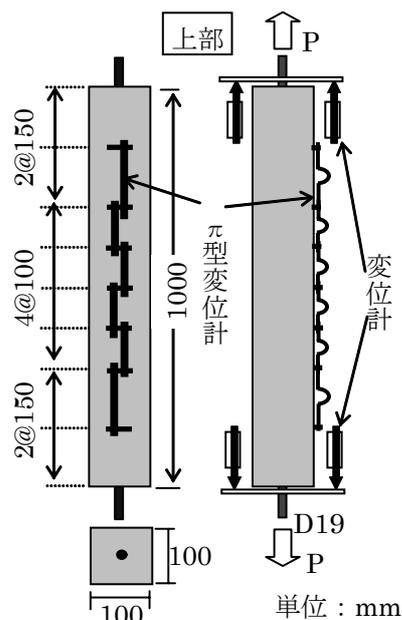


図-1 供試体形状および変位計設置位置

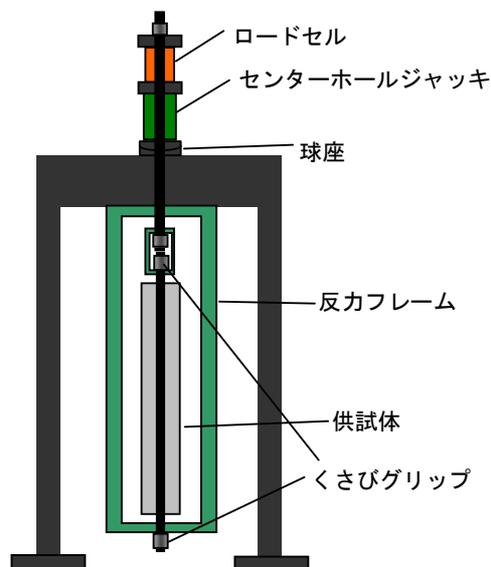


図-2 載荷方法

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 (%)	単体量(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

表-3 各供試体に使用したコンクリート

供試体名	短繊維名	繊維混入率 (%)	圧縮強度 f _c '(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	-	

表-3には、荷重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、打設に適切なフレッシュ性状が確保でき、かつ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勘案して設定した。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³⁾⁴⁾。

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、荷重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荷重した。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。荷重は単調荷重とした。

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る。

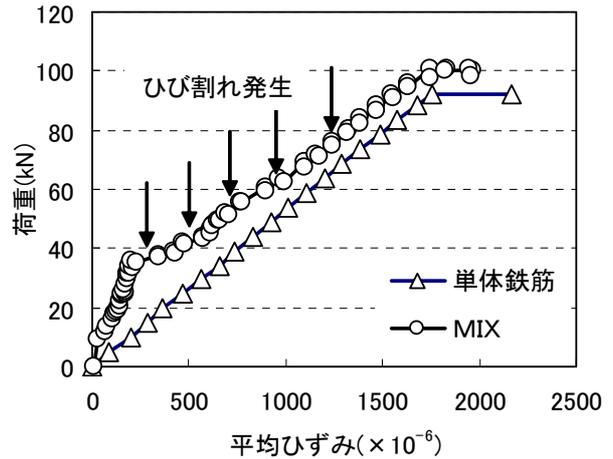


図-3 荷重と平均ひずみの関係(供試体MIX)

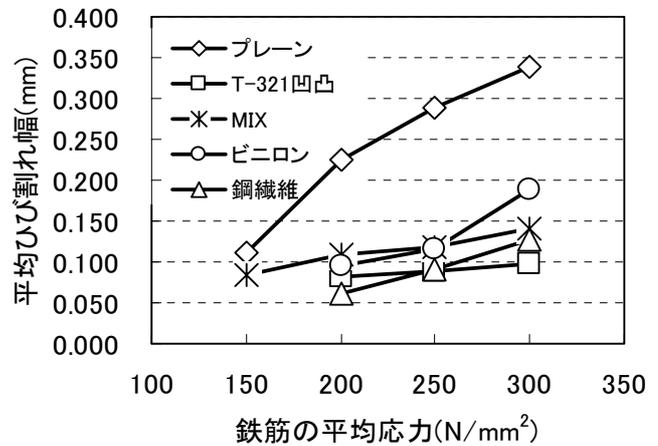


図-4 鉄筋応力と平均ひび割れ幅の関係

図-4は、鉄筋応力が150, 200, 250, 300N/mm²の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。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(繊維無混入)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、荷重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。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。繊維の有無による違いに比べると、繊維種類の違いによる影響は小さい。

表-4 実験結果 (ひび割れ本数, 平均ひび割れ幅)

	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 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	143	325	294	179	
MIX	333	249	143	143	530	530	195	195
ビニロン	249	249	199	199	380	380	244	
鋼繊維	251	201	167	167	392	252	252	

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) での値を示している。ひび割れ間隔は, 供試体中のひび割れ幅測定区間に生じたひび割れの間隔を実測した結果である。

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⁵⁾⁶⁾。

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

ここに, w : ひび割れ幅, k_1 : 鋼材の付着性状を表す係数, k_2 : コンクリートの品質 (圧縮強度 $f'c$) がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数, k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数, c : かぶり, c_s : 鋼材の中心間距離, ϕ : 鋼材径, σ_{se} : 鉄筋応力の増加量, E_s : 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, 鉄筋コンクリートのひび割れ幅を, 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) という形式で評価する考え方に基づいている。右辺の $\{4c + 0.7(c_s - \phi)\}$ は, 定常状態におけるひび割れ間隔を表している。 σ_{se}/E_s は鉄筋のひずみを表す項であり, コンクリートの引張力負担を無視した鉄筋応力 (ひび割れ断面における鉄筋応力に相当) を用いて算定している。

鉄筋コンクリートのひび割れ幅は, 種々の因子により変化する可能性がある。ひび割れ幅が変化する機構として以下が考えられる。

- 1) ひび割れ間隔が変化するため
- 2) コンクリートのテンションスティフニング効果が変化する事により, 同一荷重時における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ため
- 3) 鉄筋とコンクリートのすべり性状が変化する事により, 同一荷重時における鉄筋とひび割れ間コンクリートのひずみ差が変化するため

コンクリート強度を実験パラメータとした著者らの既往の実験²⁾では, コンクリート強度の増大にともないひび割れ幅が低減されるメカニズムは, 上記 1)2)3)が混在し, コンクリート強度の

範囲や荷重レベルによって、それらの機構の割合が異なることを明らかにしている。

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低減効果が何に起因するのかを、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。繊維種類によりひび割れ間隔は異なった。繊維混入コンクリート間で比較すると、たしかに、平均ひび割れ幅の大きかったビニロン供試体は、平均ひび割れ間隔も大きい結果となった。このことから、繊維混入コンクリートにおいても、ひび割れ間隔がひび割れ幅と関連していると思われる。しかし、図-4においてすべての繊維混入コンクリートのひび割れ幅がプレーン供試体よりも著しく小さかったことに比べると、図-5において繊維混入によりひび割れ間隔がプレーン供試体よりも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の主たるメカニズムは、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

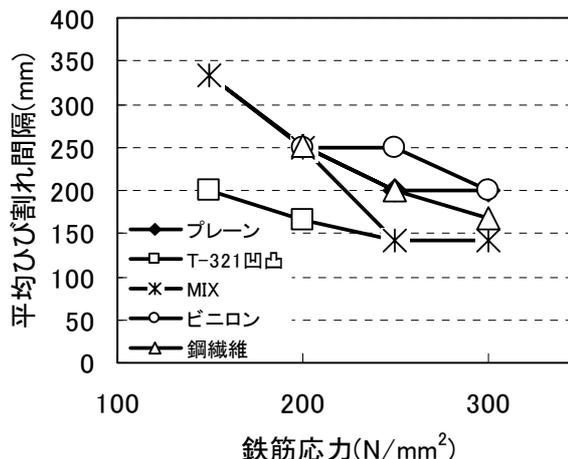


図-5 鉄筋応力と平均ひび割れ間隔の関係

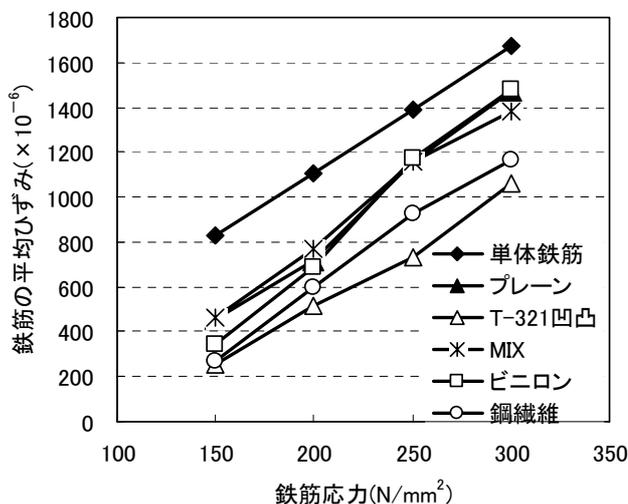


図-6 鉄筋応力と鉄筋の平均ひずみの関係

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。また、その中でもひび割れ幅の大きかったプレーンやビニロン供試体は、テンションスティフニング効果が小さいこと、ひび割れ幅の小さかった T-321 凹凸供試体は同効果が大きいことがわかる。しかし、図-4においてすべての繊維混入コンクリートのひび割れ幅がプレーン供試体よりも著しく小さかったことを勘案すると、テンションスティフニング効果の向上のみでは、繊維混入によるひび割れ幅低減効果は説明できないと思われる。

4.4 繊維による架橋効果

4.2節 4.3節における検討の結果、繊維混入により、ひび割れ間隔、コンクリートのテンションスティフニング効果はいくらか変化したもの

の、繊維混入によるひび割れ幅低減の主要なメカニズムではないと判断した。残るメカニズムとして考えられるのが、ひび割れ間の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すべりにより、ひび割れ間の鉄筋とコンクリートのひずみ差が生じ、これがひび割れ幅となる。繊維混入コンクリートでは、ひび割れを跨ぐ繊維による架橋効果が考えられる。すなわち、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。このことにより、ひび割れ発生後もひび割れ間のコンクリートの引張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。図-7は、このメカニズムの模式的に表したものである。

しかし、本実験結果だけでは、ここで述べた仮説を検証できない。今後行う実験により、明らかにしていきたいと考えている。

5. まとめ

本研究の範囲で以下の知見を得た。

- (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) 繊維混入によりひび割れ幅が低減される主たるメカニズムは、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フ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考察した。今後、実験によりこの仮説を検証したい。

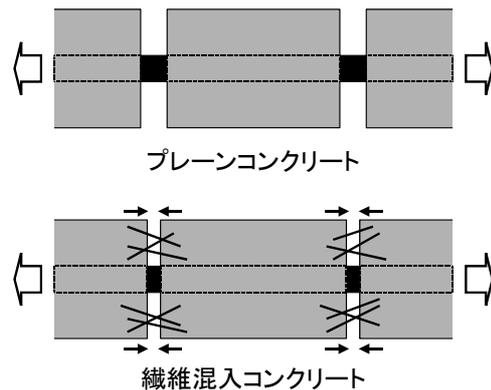


図-7 繊維の架橋効果によるひび割れ幅抑制のイメージ図

謝辞

本研究の遂行にあたり、長岡技術科学大学副学長丸山久一先生の助言を頂きました。実験では、長岡技術科学大学大学院趙玉国氏、船戸昭彦氏、田坂雄治氏の協力を頂きました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 財団法人 高速道路技術センター：繊維補強材を使用したコンクリートの適用性検討，pp.3-29，2003.3
- 2) 五角 亘，下村 匠，丸山 久一：コンクリートの品質がRC部材のひび割れ幅に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1333-1338，2001
- 3) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，pp.36-42，2002.1
- 4) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），pp.3-78，1999.11
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書「構造性能照査編」，pp.100-102，2002.3
- 6) 土木学会：2002年版 コンクリート標準示方書 改訂資料，コンクリートライブラリー108，pp.32-40，2002.3