

論文 繊維補強された鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅低減メカニズム

船戸 昭彦*1 ・下村 匠*2 ・田中 泰司*3 ・中井 裕司*4

要旨 : アラミド製の短繊維およびメッシュによって繊維補強された鉄筋コンクリート供試体を用いて一軸引張試験を実施した。繊維補強された鉄筋コンクリート部材にはひび割れ幅低減効果があることを実験的に確認した。繊維補強によるひび割れ幅が低減されるメカニズムを、ひび割れ間隔, 鉄筋平均ひずみ, コンクリート平均ひずみの観点から実験的に検討した。

キーワード : 繊維補強コンクリート, ひび割れ幅, アラミド繊維

1. はじめに

高架橋などの構造物からのコンクリート片の剥落を防止するために、短繊維をコンクリートに混入する工法や、コンクリート打設の際にメッシュを型枠内側に貼付する工法^{1),2),3)}の適用が試みられている。一方、コスト縮減の関連から、コンクリート構造物に適用するこの種の新材料には、コンクリート片剥落防止という単一の機能だけでなく、近年、多機能性が求められる傾向にある。

この観点から、著者らは繊維補強による鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅低減効果について実験的検討を行い、効果があることを確認した²⁾。しかし、そのメカニズムの解明について課題を残していた。そこで本研究では、短繊維およびメッシュ状繊維により補強された鉄筋コンクリート供試体のひび割れ幅試験を新たに実施し、繊維による鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅低減効果をあらためて確認するとともに、そのメカニズムを、ひび割れ間隔, 鉄筋平均ひずみ, コンクリート平均ひずみの観点から、実験的に解明することを試みる。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1) 繊維の種類

本研究で使用した繊維は、アラミド製の繊維で、短繊維二種類, メッシュ一種類である。使用した短繊維およびメッシュを写真-1~写真-3に示す。T-321 凹凸は樹脂によって節が設けられているのが特徴である。メッシュは、コンクリート表面間とのかぶり厚確保およびコンクリートとの付着確保のため、片面に硅砂が樹脂によって接着してある。表-1, 表-2に各繊維の物性値を示す。

(2) コンクリートの配合

表-3にコンクリートの配合を示す。短繊維の繊維混入率は体積比で0.2~0.5%とした。同一のフレッシュ性状を確保するため、高性能 AE 減水剤により調整を行った。



写真-1 T-321 凹凸



写真-2 T-327

*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 長岡技術科学大学 工学部環境・建設系助手 修(工) (正会員)
 *4 三井住友建設株式会社 土木事業本部 (正会員)

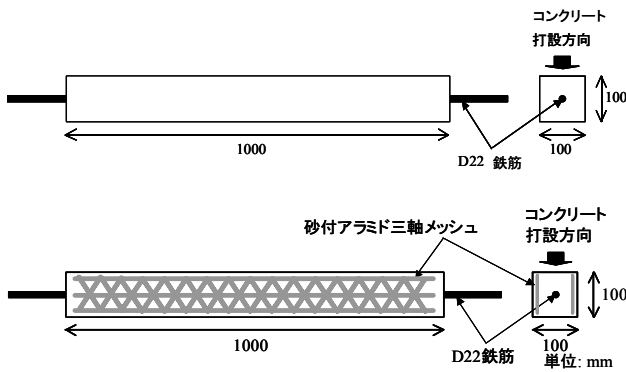


図-1 鉄筋コンクリート一軸引張供試体

本研究で使用する繊維によって補強されたコンクリートは、いずれも一軸引張応力下において、初期ひび割れ発生後に、引張応力がひずみ軟化を伴いながら漸減していくタイプである³⁾。

2.2 鉄筋コンクリート一軸引張供試体

ひび割れ幅試験に用いた供試体は、図-1に示すように、100×100×1000mmの角柱供試体で断面中央にD22の異型鉄筋(弾性係数194kN/mm²降伏強度377.9N/mm²)を1本埋め込んだものである。メッシュを用いた供試体は、型枠の長軸方向両側面に軸方向繊維が3束含まれるようにメッシュを貼付した。表-4に供試体概要を示す。

2.3 载荷試験

载荷は、供試体の自重による偏心の影響を排除するために、鉛直方向に行った。供試体中央部および中央部から168mmずつ離れた部分に5本、両側面で10本、ひび割れを誘発するためにノッチ(幅2mm、深さ5mm)を設けた。ひび割れ幅を測定するために、ノッチを跨ぐようにしてクリップ型変位計および非接触変位計を設置した。コンクリート表面のひずみを測定するために、打設時の側面に、 π 型変位計とひずみゲージ(検長30mmを15mm間隔で貼付)を設置した。鉄筋の平均ひずみは、供試体端部の鉄筋に治具を介して変位計により変位を測定し、長さ変化を供試体長で除することによって求めた。加力は、供試体から露出した鉄筋にカップラーを付け、鉄筋に直接引張力を加える方法で行った。载荷は単調载荷とした。図-2に測定機器



写真-3 砂付アラミド3軸メッシュ

表-1 アラミド短繊維の物性

材質	アラミド	
品番(記号)	T-321凹凸	T-327
糸径(mm)	0.6	0.56
長さ(mm)	30	9
密度(g/cm ³)	1.26	1.36
引張強度(MPa)	1225	2744
引張弾性率(GPa)	26	58
アスペクト比	50	16

表-2 アラミドメッシュの物性値

材質	アラミド
密度(g/cm ²)	1.39
引張強度(MPa)	3430
弾性係数(GPa)	72
バインダー樹脂	アクリル酸エステル樹脂
珪砂	JWWA規格3号珪砂

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法(mm)	スランブ(cm)	水セメント比 W/C(%)	細骨材率 s/a(%)	空気量(%)	単位量(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
25	10±3	45	43	6.0	175	389	723	984

表-4 供試体概要

水準	繊維混入量(Vol%)		高性能AE減水剤添加量	スランブ(cm)	鉄筋比(%)	材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)
	T-321凹凸	T-327					
ブレン	-	-	-	12.0	3.87	28	45.9
T-321凹凸	0.5	-	C*0.2%	9.5			47.9
T-327	-	0.2	C*0.5%	10.0			43.5
メッシュ	-	-	-	11.5			42.5

の設置状況を示す。

3. 実験結果

3.1 鉄筋応力-平均ひずみ関係

各供試体の実験結果の代表として、図-3にT-321凹凸を用いた供試体の実験結果と、鉄筋単体の応力-平均ひずみ関係をあわせて示す。他の供試体も、実験結果の傾向は同様であった。第一ひび割れ発生後、荷重の増加に伴い順次ひび割れが発生している。ひび割れ発生後、初期の

段階においてコンクリートのテンションステイフニング効果により、同一応力下における平均ひずみは、別途試験した単体鉄筋のひずみよりも小さいが、この効果は徐々に消失し、単体鉄筋に近づいている。

3.2 鉄筋応力-平均ひび割れ幅関係

図-4に各供試体の各応力レベル(100, 150, 200, 250, 300, 350N/mm²)における平均ひび割れ幅を示す。ひび割れ発生時の100N/mm²付近においては、プレーン供試体と繊維補強された供試体のひび割れ幅に大きな違いは見られないが、100N/mm²以降においては、使用繊維がメッシュの供試体はプレーン供試体に比べてひび割れ幅低減が確認された。しかし、T-321 凹凸, T-327 繊維を単独使用した供試体では、プレーン供試体に比べてひび割れ幅低減効果は確認されなかった。これは、繊維混入率が他の試験体に比して小さいこと、アスペクト比が小さく架橋面で抜け出しやすいためと考えられる。

4. 繊維混入によるひび割れ幅抑制メカニズムの検討

4.1 ひび割れに関する変形適合

ひび割れ幅 w は、鉄筋の平均ひずみを ϵ_{sa} 、コンクリートの平均ひずみ(ひび割れ部分以外)を ϵ_{ca} とすると、式(1)のように表せる。(図-5参照)。

$$w = l \cdot (\epsilon_{sa} - \epsilon_{ca}) \quad (1)$$

ここに、 l はひび割れ間隔である。式(1)によれば、同一荷重下におけるひび割れ幅の低減効果は、ひび割れ間隔 l 、鉄筋の平均ひずみ ϵ_{sa} 、ひび割れ部分以外のコンクリートの平均ひずみ ϵ_{ca} の3因子によって整理される。ここで、ひび割れ間隔 l は、ひび割れごとに異なるが、平均ひび割れ幅を問題にするなら、平均ひび割れ間隔を考えれば良い。また、コンクリートの表面におけるひび割れ幅を考えるなら、コンクリートのひずみは表面ひずみを用いるべきである。繊維混入によって、ひび割れ幅が低減されるということは、

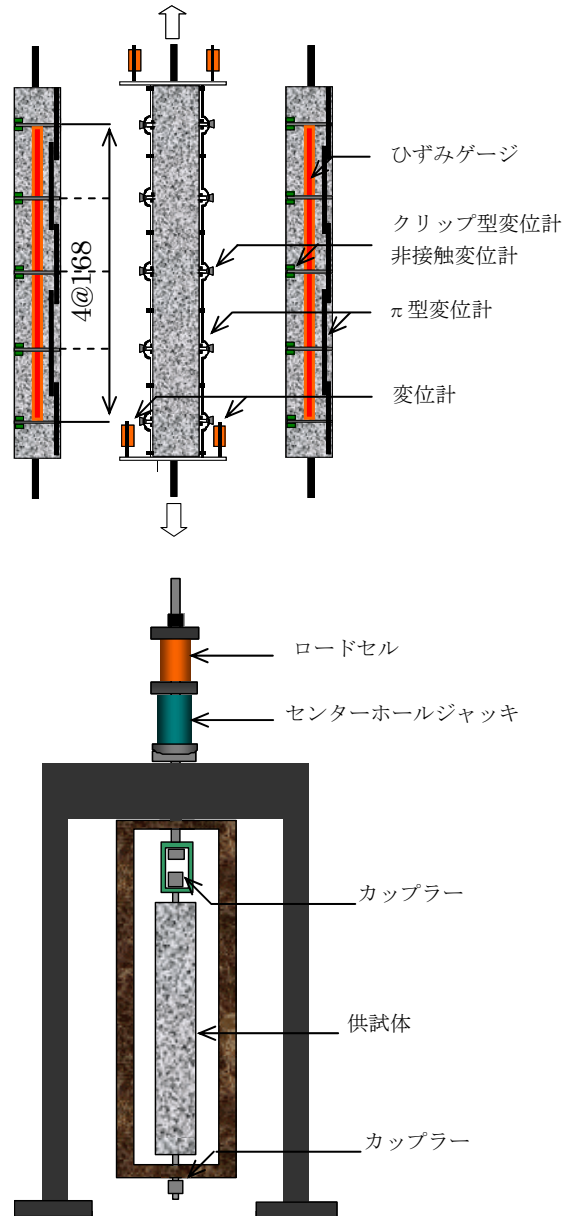


図-2 測定機器の設置図

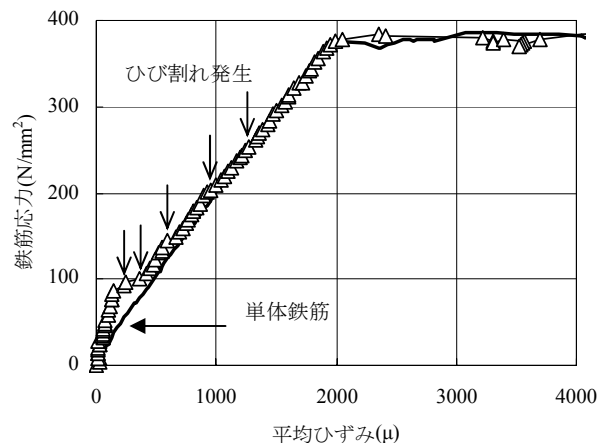


図-3 鉄筋応力-平均ひずみ関係 (T-321 凹凸)

繊維によってこの 3 因子のいずれかが変化するからに他ならない。以下、これらの影響因子ごとに検討する。

4.2 ひび割れ間隔

既往の研究には、繊維混入により、ひび割れ間隔はあまり変わらないとする報告²⁾と、ひび割れ間隔が低減されるとする報告⁴⁾がある。この相違は、使用繊維の種類、混入量によるものと思われる。著者らの既往の研究によれば、本研究で用いた繊維はひび割れ間隔はあまり変化させないことが確かめられている¹⁾。そこで、本研究では、ひび割れ間隔を検討因子から理想的に除外することを考え、既往の実験結果のひび割れ間隔の平均値を目安として、ノッチを設けてひび割れ位置を誘発することとした。このことにより、ひび割れ間隔は固定され、ひび割れ幅の変化に関する影響因子から除外される。

4.3 同一応力レベルにおける鉄筋平均ひずみ

同一荷重下における鉄筋平均ひずみが小さければ、ひび割れ幅も小さくなる。図-6 に鉄筋応力-鉄筋平均ひずみの関係を示す。プレーン供試体の Tension Stiffening に多少の違いは見られたが、ほぼ同様の傾向を示す結果となった。本研究では繊維混入量が比較的小さいため、ひび割れを跨ぐ繊維による引張力伝達により、鉄筋平均ひずみを減少させる効果は小さい。したがって、メッシュによって補強された供試体にみられたひび割れ幅低減は、鉄筋平均ひずみが減少したためではないと考えられる。

4.4 鉄筋平均ひずみと平均ひび割れ幅

図-7 に鉄筋平均ひずみと平均ひび割れ幅の関係を示す。平均ひび割れ幅はクリップゲージにより得られる測定値の平均とした。平均ひずみが等しい場合、いずれの繊維を用いた供試体においてもプレーン試験体に比べて平均ひび割れ幅が小さい結果となった。特にメッシュを使用した試験体で、顕著なひび割れ幅低減効果が確認された。これは繊維の混入によってひび割れ間のコンクリートひずみが引張られ、ひび割れを閉合させる方向に変形するためであると考

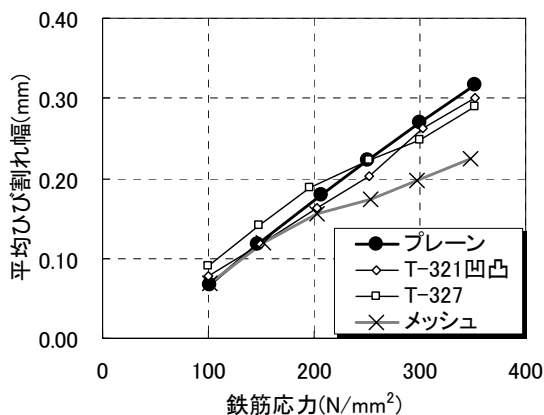


図-4 鉄筋応力-平均ひび割れ幅関係

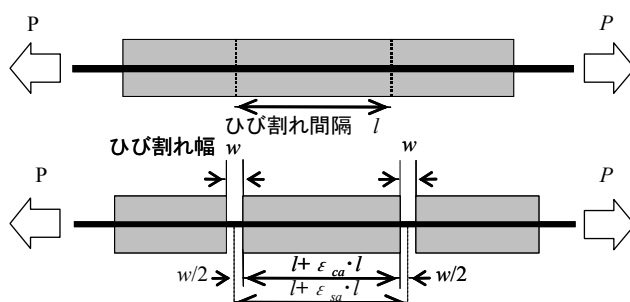


図-5 鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅

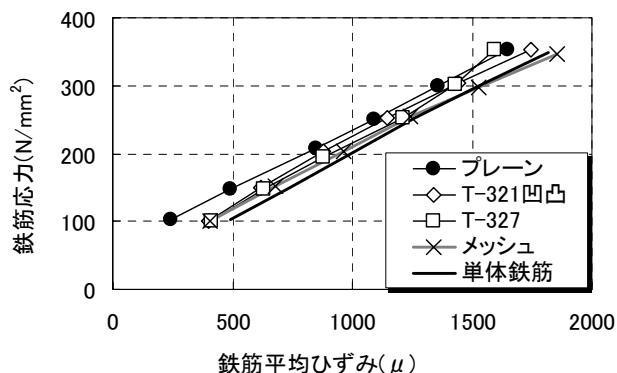


図-6 鉄筋応力-鉄筋平均ひずみ関係

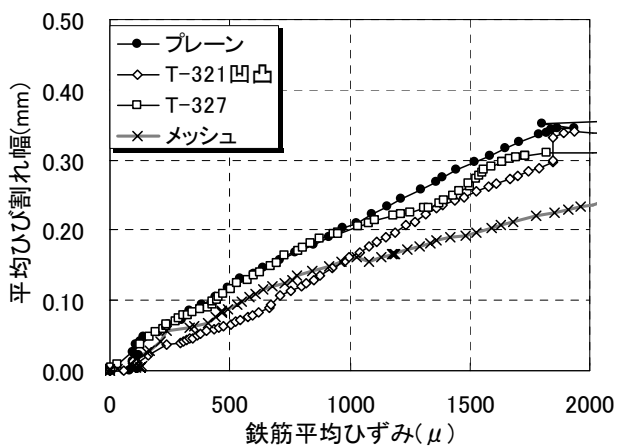


図-7 鉄筋平均ひずみと平均ひび割れ幅関係

えられる。そこで、コンクリート表面のひずみ分布に着目し、検討を行った。

4.5 コンクリート表面のひずみ

ひび割れ部以外のコンクリートの表面の平均ひずみと鉄筋応力との関係を図-8に示す。ここでコンクリート表面のひずみは π 型変位計の測定値 δ_a とクリップゲージの測定値 w_a から、以下の式により算出した。

$$\varepsilon_{ca} = \frac{\delta_a - w_a}{l} \quad (2)$$

図-8から繊維を混入した場合には、繊維の種類によらず、プレーン試験体に比べて、コンクリートの平均ひずみが、ほぼ同程度引張側に大きくなるのがわかる。この分だけ、平均ひび割れ幅が小さくとなると考えられる。

一方、図-9にひずみゲージにより得られたコンクリート表面の平均ひずみと鉄筋応力の関係を示す。図-8と図-9はともにコンクリート表面のひずみの測定値であるが、両者の値は異なっている。この原因を解明するために、コンクリートのひずみ分布に着目すると、ノッチ間のコンクリートのひずみゲージのいくつかが数百マイクロの大きな伸びひずみを呈していることが確認された。これは、载荷試験中、試験後の目視によるひび割れ観察時には確認されなかった微小なひび割れが発生したためである。

そこで、この微小なひび割れの開口に対応するひずみを除いたコンクリート表面のひずみを図-10に示した。このような処理を行ったコンクリートひずみは、試験体によらずほぼ等しいことから、繊維混入によるコンクリートの伸びひずみの増大は、微小なひび割れの発生に起因するものと推察される。

4.6 鉄筋平均ひずみと部材平均ひずみ

以上の検討結果より、短繊維によって補強された供試体では、プレーン供試体と比較して鉄筋平均ひずみ ε_{sa} がほぼ等しく、コンクリート平均ひずみ ε_{ca} が大きくなるといえる。このことと、式(1)を考え合わせれば、短繊維によって補強された供試体では、ひび割れ幅が低減されるはず

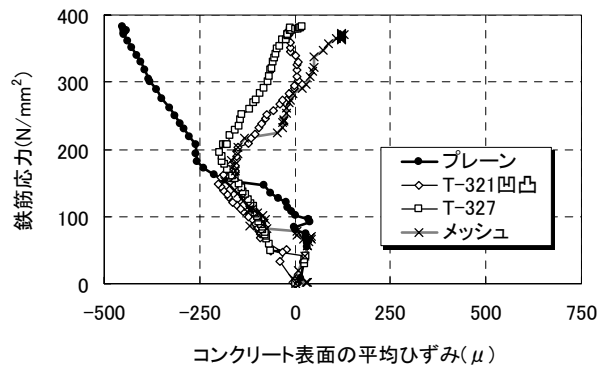


図-8 コンクリート表面のひずみと鉄筋応力の関係（ π 型変位計による）

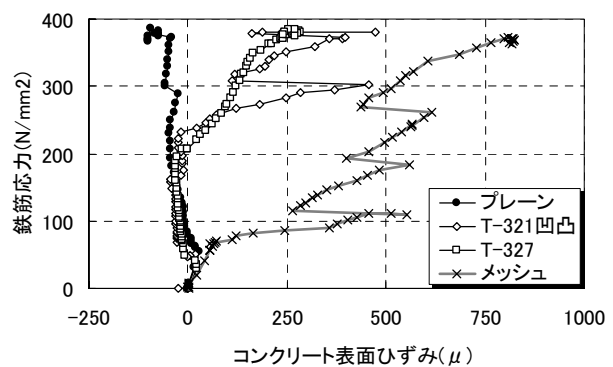


図-9 コンクリート表面のひずみと鉄筋応力の関係（ひずみゲージによる）

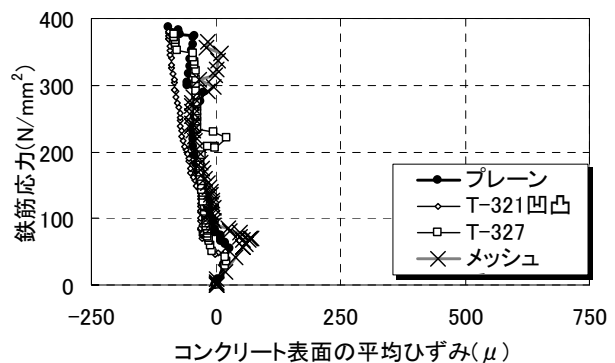


図-10 コンクリート表面のひずみと鉄筋応力の関係（微細ひび割れ部を除外）

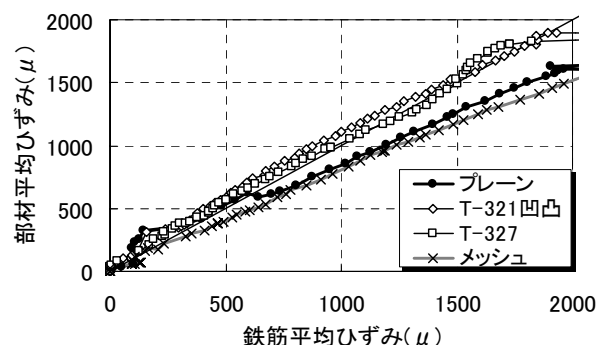


図-11 鉄筋平均ひずみと部材平均ひずみの関係

である。しかし実験により測定されたひび割れ幅には違いは認められない(図-4)。式(1)は、ひび割れを含むコンクリート平均ひずみ(部材平均ひずみ)と鉄筋平均ひずみが等しいことを前提としている。そこで、両者の実測値を比較し、この前提の成立を検証することとした。

図-11 に、変位計によって測定された鉄筋平均ひずみと π 型変位計によって測定された部材平均ひずみとの関係を示す。部材平均ひずみは以下に示す式により算出した。

$$\varepsilon_{ma} = \frac{\sum \delta}{L} \quad (3)$$

ここに、 ε_{ma} は部材平均ひずみ、 $\sum \delta$ は π 型変位計の変位量の総和、 L は測定間距離である。短繊維によって補強された供試体は、鉄筋平均ひずみと部材平均ひずみがほぼ一致する結果となったが、プレーン供試体メッシュ補強供試体は部材平均ひずみに比べて鉄筋平均ひずみが大きい結果となった。

これは短繊維補強された供試体は、端部における鉄筋の抜け出しが少ないことを意味している。材端部やひび割れ部においては鉄筋周囲の内部ひび割れの発生・進展にともない鉄筋の付着が劣化するが、短繊維が内部ひび割れに跨ぐようにして存在すれば、内部ひび割れの進展が抑制され、付着劣化による鉄筋の抜け出しが低減されることが考えられる。

以上を総括すると、本研究における実験では、短繊維を混入したコンクリートでは、コンクリートの表面ひずみの増加によるひび割れ幅低減効果と、良好な付着による部材平均ひずみの増加が相殺することで、プレーン試験体と同様のひび割れ幅となったものと考えられる。良好な付着による鉄筋抜け出しの抑制は、一軸引張供試体の材端部以外では、ひび割れ幅低減に寄与すると考えられるので、今後、本実験とは異なる載荷条件、供試体形状において実験する必要があると考えている。

5. まとめ

ひび割れ間隔を固定した条件下において、繊維補強による鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅低減メカニズムについて実験的に検討した結果以下のことが確認された。

- (1) 繊維メッシュは鉄筋コンクリート部材のひび割れ幅を低減する効果がある。
- (2) 本実験に用いた繊維の場合、繊維の混入により、鉄筋の平均ひずみを減少させる効果は小さい。
- (3) 短繊維を混入したコンクリートでは、ひび割れ間のコンクリート表面の平均ひずみが引張方向に増大することが確認された。
- (4) 短繊維を混入したコンクリートでは、鉄筋の抜け出しが抑制される。

参考文献

- 1) 西野 崇史, 下村 匠, 中井 裕司, 伊澤 一 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.2, 2004, pp.1531-1536
- 2) 青木 圭一, 中井 裕司, 多田 育修 : テクニカルレポート 予防保全としての剥落防止工法の開発 砂付アラミド3軸メッシュ工法, コンクリート工学, pp.29-34, Vol.42, No.11, 2004.11
- 3) 財団法人 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.1-42, 2002.1
- 4) 社団法人 プレストレスコンクリート技術協会 : 第13回プレストレストコンクリート発展に関するシンポジウム : 鋼繊維補強コンクリートを用いた PRC 橋の適用性検討, 論文集, pp.155-170, 2004.10