

論文 繊維補強鉄筋コンクリートはり部材の曲げひび割れ幅

鈴木 幸憲^{*1}・下村 匠^{*2}・田中 泰司^{*3}

要旨： 繊維混入によるひび割れ幅低減メカニズムを実験的に検証する目的で、アラミド繊維および鋼繊維を混入した鉄筋コンクリートはり部材を作製し、曲げ載荷試験を実施した。テンションスティフニング効果が確認できないほどの比較的少量の繊維混入量であっても、ひび割れ幅を低減する効果があることを実験的に確認した。また、鉄筋平均ひずみ、コンクリート平均ひずみ、平均ひび割れ間隔を用いてひび割れ幅低減機構を検討した結果、ひび割れ間隔の低減効果によって、概ね整理されることが示された。

キーワード： 繊維補強コンクリート、ひび割れ幅、ひび割れ間隔、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防止を目的として、短繊維を混入した繊維補強コンクリートや繊維メッシュを型枠内側に貼付する工法¹⁾が適用され始めている。これらの工法では、剥離したコンクリートの自重に抵抗できるだけの繊維が混入されていけばよいので、繊維使用量は比較的少ない。そのため、繊維混入によっても、ひび割れ以降のじん性の増加など、部材の力学特性を改善する効果はほとんど期待できない。

これまでに筆者らは、このような低添加型の繊維コンクリートであっても、ひび割れ幅の低減効果が期待できることを実験的に示し²⁾、その機構がコンクリート表面ひずみの増加と付着の改善による複合効果であると推察した³⁾。

ただし、これらの検討は一軸引張条件下で行われたものであり、実構造部材に近い曲げ条件下におけるひび割れ幅低減効果の実証が課題として残っていた。

本研究では、材質および形状の異なるアラミド繊維および鋼繊維を混入した鉄筋コンクリートはり部材を作製し、曲げ載荷試験により、各繊維のひび割れ幅低減効果を実験的に確認した。また、ひび割れ幅低減メカニズムの妥当性確認と各影響因子の検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用繊維

本研究に使用した繊維は、アラミド繊維 2 種類、鋼繊維 1 種類である。使用したアラミド繊維、鋼繊維を写真-1～写真-3に示す。

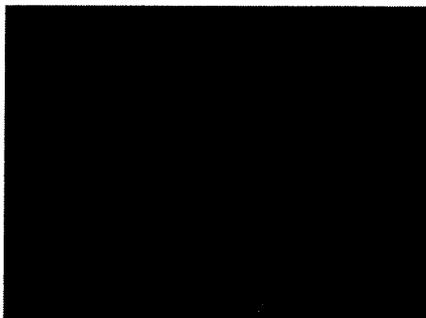


写真-1 T-321 凹凸



写真-2 T-327



写真-3 鋼繊維

*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)

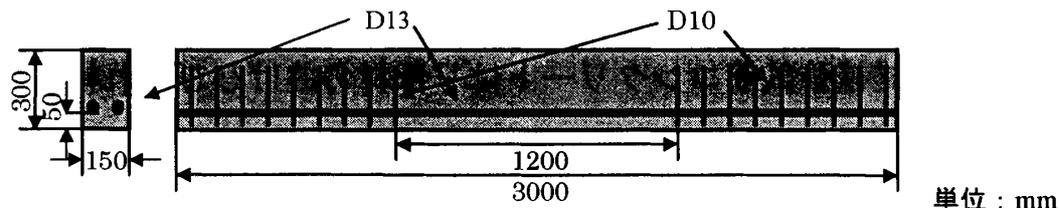


図-1 鉄筋コンクリートはり試験体

T-321 凹凸は、樹脂によって繊維に節が設けられており、T-327 は、練混ぜ時に解繊する特徴をもつ。表-1 に、各種繊維の物性値を示す。

2.2 コンクリートの配合

表-2 に、コンクリートの配合を示す。アラミド繊維および鋼繊維の繊維混入率は、体積比で0.2~0.5%とした。全試験体を同一フレッシュ性状とするため、高性能 AE 減水剤を用いて調整を行った。

2.3 試験体

図-1 に示すように、試験体断面は 300×150mmとした。主鉄筋にはD13 異形鉄筋を 2 本配置し、鉄筋表面までのかぶりを 50mmとした⁴⁾。表-3 に、主鉄筋の材料試験結果を示す。

等曲げモーメント区間を 1200mmとし、せん断スパンと定着部にせん断補強筋 D10 を 100mm 間隔で配置した。表-4 に、試験体一覧を示す。MIX 試験体には、T-321 凹凸と T-327 を 2:1 の割合で混合した繊維を使用した。

2.4 載荷試験

載荷方法は、載荷スパン 2700mm の対称 2 点集中載荷とした。本実験では、はり底面におけるひび割れ幅を検討対象としている。

図-2 に、測定機器設置図を示す。ひび割れ幅は、クリップ型変位計により測定した。クリップ型変位計は、予備試験より得られたひび割れ発生荷重 (26kN) まで載荷を行った後に一旦除荷し、確認されたひび割れを跨ぐように設置した。コンクリート表面ひずみは、ひずみゲージ (検長 30mm を 15mm 間隔で 2 列貼付) により測定した。部材軸平均ひずみは、 π 型変位計を連続して設置し、変形量の和を測定区間長で除することで求めた。ひび割れ幅、コンクリート表面ひずみおよび部材軸平均ひずみは、試験体底面で測定した。

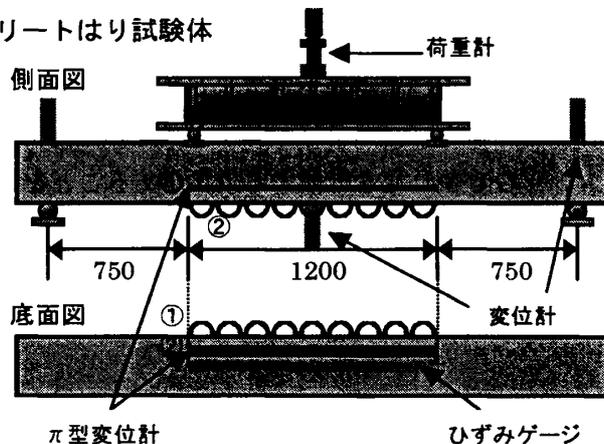


図-2 測定機器設置図
表-1 各種繊維の物性値

繊維名 (名称)	T-321 凹凸	T-327	鋼繊維
材質	アラミド		スチール
形状	短繊維		
密度 (g/cm ³)	1.26	1.36	7.85
引張強度 (MPa)	1225	2744	2352
引張弾性率(GPa)	26	58	200
長さ (L) (mm)	30	9	30
糸径 (d) (mm)	0.6	0.56	0.6
アスペクト比(L/d)	50	16	50

表-2 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 air (%)	細骨材比 s/a (%)	単位数(kg/m ³)			
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
20	10±3	45	6	44	175	389	739	1002

表-3 鉄筋の材料試験結果

種別	呼び径	降伏強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
SD345	D13	376.4	182.4
	D10	364.5	180.9

表-4 試験体一覧

試験体名	繊維混入率 (Vol %)			圧縮強度 (N/mm ²)
	T-321 凹凸	T-327	鋼繊維	
T-321 凹凸	0.5	-	-	46.4
T-327	-	0.2	-	46.8
鋼繊維	-	-	0.5	46.5
MIX	0.2	0.1	-	51.4
基準試験体	-	-	-	45.6

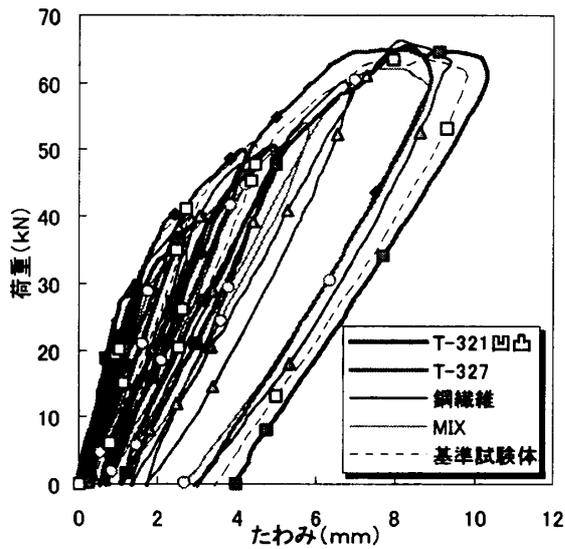


図-3 荷重-たわみ

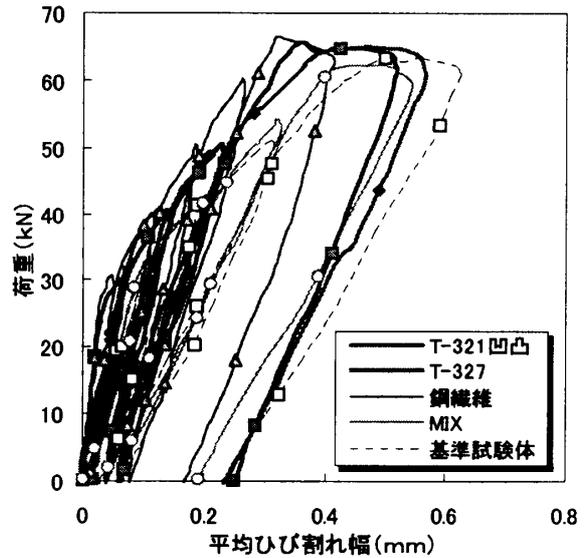


図-4 荷重-平均ひび割れ幅

3. 実験結果

3.1 荷重-たわみ

各試験体の荷重-たわみ関係を図-3に示す。繊維混入の有無、繊維の種類に関わらず、すべての試験体がおおむね同様の曲線となった。このことから、本実験の範囲では、繊維の混入が少量であるので、繊維が力を受け持つことによるテンションスティフニング効果の増進は小さいと考えられる。

3.2 荷重-平均ひび割れ幅

図-4に、荷重-平均ひび割れ幅関係を示す。平均ひび割れ幅 (w_a) には、クリップ型変位計から得られる測定値の平均値を採用した。同一荷重時の平均ひび割れ幅は、基準試験体に比べて、繊維入り試験体 (T-321 凹凸, T-327, 鋼繊維, MIX) ではいずれも小さい。

3.3 平均ひび割れ幅-部材軸ひずみ

図-5に平均ひび割れ幅と部材軸ひずみとの関係を示す。部材軸ひずみが同一であるときには、繊維入り試験体の平均ひび割れ幅は、基準試験体に比べて小さい。繊維種類に関しては、鋼繊維がアラミド繊維に比べてひび割れ幅の低減効果が若干大きくなるが、繊維形状による違いは明確ではない結果となった。

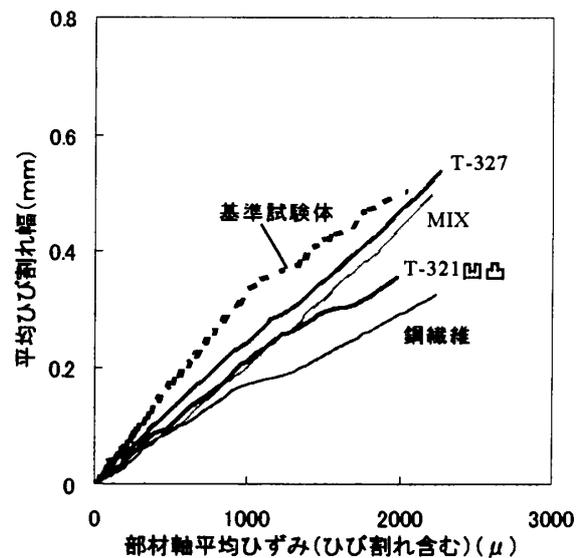


図-5 平均ひび割れ幅-部材軸ひずみ

4. ひび割れ幅低減メカニズムの検証

4.1 ひび割れ幅低減メカニズム

ひび割れ幅 (w_a) は、ひび割れを除くコンクリート表面ひずみ (ϵ_{ca}), 鉄筋ひずみ (ϵ_{sa}), ひび割れ間隔 (l) より、式(1)のように表せる。

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

同一荷重時のひび割れ幅低減効果は、これら3つの因子によって整理できる。ここでは、各試験体底面での測定値を対象として、検討を行うこととした。

表-5 各試験体の平均ひび割れ間隔の推移

	T-321 凹凸	T-327	鋼繊維	MIX	基準 試験体
ひび割れ幅測定開始時 (0kN)	383.5	223.8	234	150	239
30 k N	255.3	223.8	175.3	150	239
40 k N	191	186.3	168.8	150	239
50 k N	191	186.3	149.7	150	239
60 k N	147.2	186.3	131	150	211.5
主鉄筋降伏	147.2	186.3	131	150	187
降伏荷重 (k N)	65.6	64.5	66.5	62.0	62.6

4.2 コンクリート表面ひずみ (ϵ_{ca})

図-6に、T-321凹凸のコンクリート表面ひずみ分布を示す。ここで、ひび割れ箇所の測定値は除外した。ひび割れ間ではひずみ分布は凸型となるが、荷重の増加にともないコンクリートひずみは全体的に伸張側 (+側) から収縮側 (-側) に移行している。このような傾向は、T-321凹凸に限らず、全試験体について確認された。

図-7、図-8に、荷重-コンクリート表面ひずみの平均値関係を示す。載荷初期段階では表面ひずみの平均値は伸張側にあり、載荷にともなうコンクリートの弾性変形が確認される。この傾向はひび割れ幅低減効果の大きいT-321凹凸、鋼繊維において大きい。しかしながら、伸張側のひずみの最大値はたかだか100 μ 程度であり小さい。全ての試験体において、鉄筋降伏時には表面ひずみの平均値は100 μ 程度の収縮ひずみとなった。これは、載荷以前に鉄筋により拘束されていたコンクリートの収縮が、引張鉄筋とコンクリートの付着切れにより解放されたものと考えられる。

これらのことから、コンクリート表面ひずみ性状が繊維混入により変化することによるひび割れ幅低減効果は、低荷重段階では若干認められるものの、荷重の増加にともない消失してしまうので、全体としてその効果は小さいと判断した。

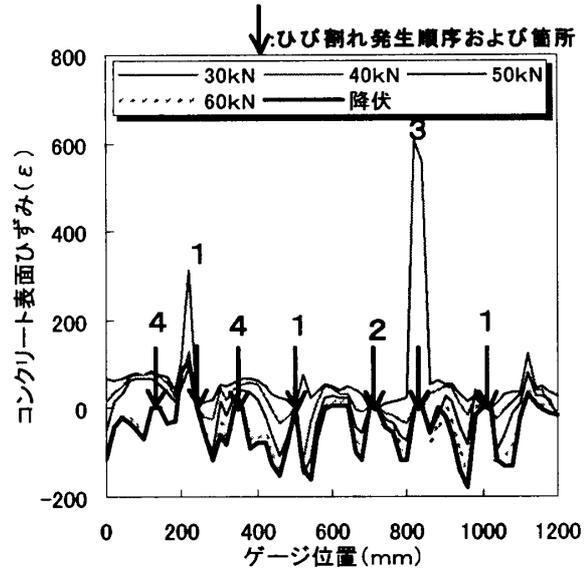


図-6 コンクリート表面ひずみ分布 (T-321凹凸)

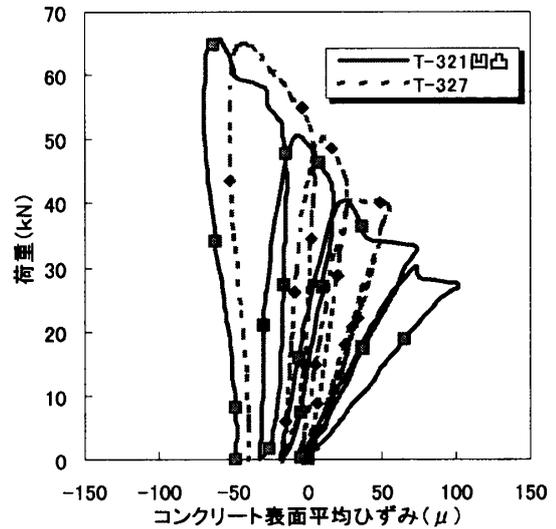


図-7 荷重-コンクリート表面平均ひずみ

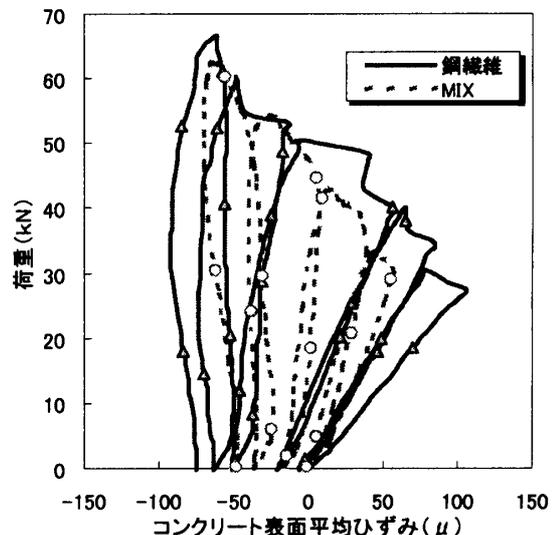


図-8 荷重-コンクリート表面平均ひずみ

4.3 平均ひび割れ間隔 (l)

3.1 で述べたように本実験では繊維の混入が少量であるので、鉄筋ひずみが低減されるほど繊維が力を受け持つことはない。さらに 4.2 で考察したように、繊維混入によるひび割れ幅の低減効果に及ぼすコンクリート表面ひずみの寄与が小さいので、式(1)に従えば、主としてひび割れ間隔の減少によって説明できると考えられる。

平均ひび割れ間隔 l はひび割れ本数により求められる。ひび割れ本数は、コンクリートのひずみ分布を参照し、目視による確認を総合して判定した。ここで、ひび割れの発生は、コンクリート表面ひずみが 1000μ 以上となった時点とした。

表-5 に、ひび割れ幅測定開始時から主鉄筋降伏までの平均ひび割れ間隔の推移を示す。全試験体で、荷重の増加と共に平均ひび割れ間隔が漸減した。等曲げ区間で平均ひび割れ間隔の漸減が確認されなかった MIX 試験体においても、測定区間で、ひび割れ本数の増加が確認されており、MIX 試験体も漸減したと判断される。

ひび割れ発生直後に相当する、荷重が 30kN 以下の範囲では、繊維の有無によるひび割れ本数の違いは $1\sim 2$ 本であり比較的小さい。一方、荷重が $40\sim 50\text{kN}$ の範囲では、 $1\sim 4$ 本であり、繊維の有無による違いが大きくなる。

本試験の場合、基準試験体に発生したひび割れは 4 本であるので、ひび割れが 1 本増加するごとに、平均ひび割れ幅は 25% 程度減少することになる。このため、表-5 で示される平均ひび割れ間隔の差は無視できない。

以上の検討から、本試験における繊維混入によるひび割れ幅低減効果は、主としてひび割れ間隔の低減効果により説明可能であると考えられる。

4.4 ひび割れ幅の測定値と変形適合式による推定値の比較

図-9 には、クリップ型変位計の測定値から得られる平均ひび割れ幅と、コンクリート表面

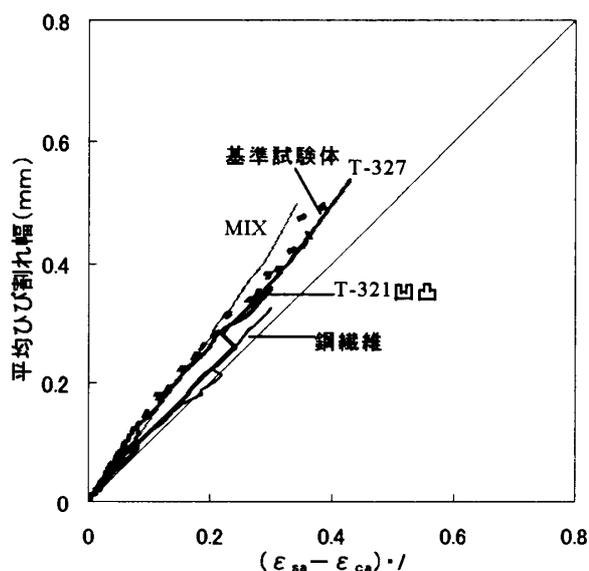


図-9 平均ひび割れ幅 - $(\varepsilon_{ssa} - \varepsilon_{ca}) \cdot l$

ひずみ及び部材軸平均ひずみの測定値を式に代入して算出される平均ひび割れ幅との比較を示した。

ここで、ひび割れ間隔 l は、前項のひび割れ発生の判定基準に従い、新たなひび割れが発生するごとに対応する値を適宜設定している。平均ひび割れ幅の推定値は実測値を概ね再現している。このことから、ひび割れ間隔の漸減が、ひび割れ幅が低減する主な要因であることが分かる。

5. ひび割れ間隔の低減機構

ノッチを設けることで、強制的にひび割れ位置を固定しひび割れ間隔を一定とした場合には、繊維混入によりコンクリートひずみが増加することが既往の試験により示されている³⁾。一方、本研究のようにひび割れ位置を固定しておらずひび割れ間隔が可変である場合には、コンクリートひずみはほぼ同様となる代わりに、ひび割れ本数が増加する。これらの相反するひび割れ幅低減機構は、鉄筋周囲の付着特性によって整理可能と考えられる。

引張下にある鉄筋コンクリート部材では、鉄筋周囲に微細なコンカル状のひび割れが形成されることが知られている⁶⁾。繊維を混入した際に

は、これらの微細ひび割れに対する架橋効果によって、付着特性が改善すると推察される。この場合、ひび割れ間隔が固定された条件下では付着の増進によって、コンクリートに伝達される力は大きくなり、コンクリートひずみが大きくなると思われる。一方、ひび割れ間隔が可変である場合には、付着の増進により、より多くのひび割れが発生する。部材の変形とともにひび割れ本数が増加し、コンクリートの平均応力は低下していく。新たなひび割れが発生できなくなるまで、変形が進むと、コンクリートの平均応力はひび割れ本数によらず同様になると考えられる。このような付着に関わる微視的機構のために、ひび割れ間隔を強制的に固定した場合と、可変である場合で、ひび割れ幅低減機構が異なる結果になったと推察される。

6. まとめ

比較的少量の繊維が混入された鉄筋コンクリートはり部材の曲げ載荷試験を実施し、ひび割れ幅低減機構について、実験的な検証を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 繊維混入による架橋効果が明確に確認できないほどの少量の添加量であっても、鋼繊維、アラミド繊維ともに、鉄筋コンクリートはり部材のひび割れ幅を低減する効果がある。
- (2) 繊維混入がコンクリートの表面ひずみ挙動に影響を及ぼすことによるひび割れ幅低減効果は小さい。
- (3) 繊維混入によるひび割れ幅低減効果は、主としてひび割れ間隔の低減による。これをひび割れの変形適合式に適切に反映することにより、繊維混入コンクリート部材のひび割れ幅が算定可能となると考えられる。
- (4) ひび割れ間隔の低減機構は、繊維による鉄筋の付着特性の改善効果を仮定することで整理される。

謝辞

実験に用いたアラミド繊維は帝人テクノプロダクツに提供いただいた。本研究を取りまとめるにあたり、中井裕司氏（前田工織）のご助言を得た。付記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 船戸昭彦, 下村 匠, 田中泰司, 中井裕司: 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, コンクリート工学年次論文集, pp.1321-1326, Vol.27, No.2, 2005
- 4) 趙 唯堅, 丸山久一: 多段配筋を有する鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ性状に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.490/V-23, pp.137-145, 1994.5
- 5) 阿部浩幸, 大城壮司, 余 国雄, 二羽淳一郎: 鋼繊維補強コンクリートの曲げひび割れに関する研究, 第13回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.159-164, 2004.10
- 6) Y. Goto: Cracks Formed in Concrete Around Deformed Tension Bars, ACI Journal, 68-26, pp.244-251, Apr/1971