

論文

[2153] 連続繊維補強コンクリート部材のひびわれ幅評価

福山 洋*¹・松崎 育弘*²・中野 克彦*³

1. はじめに

コンクリート部材における変形の基本要素である曲げひびわれ幅は、ひびわれ断面における引張補強筋の性質に大きく依存している[1]。そのため、ヤング係数や付着性状が鉄筋と異なる連続繊維補強材を用いた場合には、ひびわれ幅の評価方法が鉄筋コンクリートの場合と異なる可能性が考えられる。本報は、各種連続繊維補強コンクリートのひびわれ性状を調べ、鉄筋コンクリートに対する評価方法を適用した場合の問題点を顕在化し、連続繊維補強コンクリート部材のひびわれ幅の評価方法を提案するものである。

鉄筋コンクリート部材のひびわれ幅評価に関する既往の研究は数多くあり、各国の規準にその成果が取り入れられている。これらの中では、プレストレスト鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説（P R C指針）[2]の式が、鉄筋量が少ない場合や広範囲の鉄筋応力に対しても適応性が良いことが示されている[3]。連続繊維補強材を用いる場合は鉄筋の場合に比べて、耐久性に関するひびわれ幅の制限値が緩和できそうであることを考えると、評価式は比較的大きな主筋応力までを対象とすべきであり、またたわみ等を抑えるためにプレストレスを導入することも十分に考えられるため、このような部材も対象とすべきと考えられる。そこで本報では、P R C指針式を連続繊維補強のR CおよびP R C部材の評価式として用いることにし、その適応性を調べ適用に対しての考え方を整理する。P R C指針式は、ひびわれ幅を平均ひびわれ間隔と平均鉄筋ひずみの積で算出する方法を採っているため、本研究ではまずそれぞれの項目について検討を行い、次にこれらより得られた評価方法をはり部材の試験結果により検証する。

2. 平均主筋ひずみ

主筋の平均ひずみは主筋とコンクリートとの付着性状が絡むため、さまざまな表面形状をもつ連続繊維補強材ではその種類によって平均ひずみの相違が予想される。本章では、表面形状の異なる連続繊維補強材を用い、ひびわれ間隔を一定とした両引き試験の結果を用いて平均主筋ひずみの考察を行う。

2. 1 ひびわれ間隔を一定とした両引き試験の概要

試験体は図-1に示すように1辺15cm、長さ50cmのコンクリート角柱の中心に補強材を1本配したプリズム型で、中央部分にはひびわれを誘発するために目地を設けてある。目地部分の断面は、ひびわれ発生直後に補強材とコンクリートの間の付着応力が過度とならないように、コンクリートかぶり厚さを主筋径の約3倍に設定した。この場合、ひびわれ発生時に補強材に再配分される引張応力度は $1500\text{kgf}/\text{cm}^2$ 程度となる。ひびわれ間隔は22cmで、これは計算上はコンクリートのかぶり厚さが主筋径の4倍程度の場合の値である。本実験では割裂ひびわれの発生等によるデータのばらつきを避けるため、目地部分以外はこれよりも大きなかぶり厚さとした。試験体29

* 1 建設省建築研究所第三研究部構造研究室研究員、工博（正会員）

* 2 東京理科大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

* 3 東京理科大学助手 工学部建築学科（正会員）

体の実験因子は、補強材のヤング係数（連続繊維の種類：炭素、アラミド、ガラス）、表面形状（螺旋糸巻、組紐状砂付き、組紐状砂無し）、径（6～12φ）であり、比較用に異形鉄筋も用いた。加力は、本論文に示すものは、全て一方向の単調引張荷荷を行った。測定項目は、ひびわれ幅と補強材のひずみである。なお本報では、試験体の4面で測定した変形（検長50mm）の平均をひびわれ幅と呼ぶ。実験に用いた補強材の材料特性を表-1に示す。実験時のコンクリートの圧縮強度は534kgf/cm²、引張強度は43.9kgf/cm²である。

2. 2 実験結果および考察

1) ひびわれ幅

アラミド繊維補強コンクリート

について、ひびわれ断面の主筋応力度とひびわれ幅の関係を図-2に示す。曲線は、螺旋糸巻のものは径に関わらずほぼ同様な性状を示しているが、組紐状（砂付き）のものは径の大きい方が剛性が低くなっている。また、組紐状のもので表面に砂が付いていないものは、砂付きのものよりもひびわれ幅は大きい。これらの傾向は、炭素繊維補強コンクリートにも見られた。また、組紐状よりも螺旋糸巻の方がひびわれ幅は大きくなっているが、これは組紐状の方がヤング係数が大きいことに起因しているものと思われる。

2) 平均主筋ひずみ

図-3(a)に、各種補強材（同一径）のひびわれ断面の主筋応力度-平均主筋ひずみ関係を示す。平均主筋ひずみは、ひびわれ幅をひびわれ間隔で除したものである。この関係では、曲線は補強材の種類により大きく異なったが、平均主筋ひずみに主筋のヤング係数を掛け平均応力度で表すと、(b)のように螺旋糸巻状アラミド繊維補強材以外はどれも鉄筋とほぼ同一の曲線となった。これは即ち、連続繊維補強コンクリートの平均主筋ひずみは、ヤング係数を考慮すれば従来と同様な評価ができることを示している。そこでPRC指針式において、鉄筋のヤング係数の代わりに各補強材のヤング係数を用いて計算した平均主筋ひずみを図-3(a)中に曲線で示す。図より平均ひずみは、どれも計算値が実験値を上回っており安全側に評価されている。特に

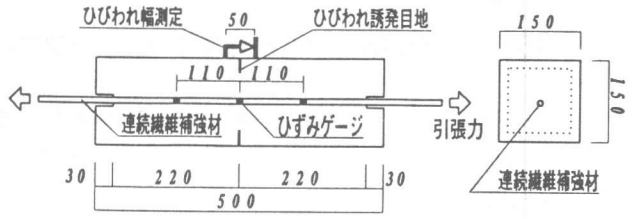


図-1 試験体形状

表-1 補強材の材料特性

| 表面形状 | 繊維種類 | 直径 (mm) | 周長 (cm) | 断面積 (cm ²) | 引張強度 (kgf/cm ²) | ヤング係数 (kgf/cm ²) |
|-------|------|---------|---------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 螺旋糸巻 | 炭素 | 6 | 1.88 | 0.283 | 10800 | 0.954 × 10 ⁶ |
| | | 10 | 3.14 | 0.786 | 10600 | 0.907 × 10 ⁶ |
| | | 12 | 3.77 | 1.41 | 10600 | 0.907 × 10 ⁶ |
| | アラミド | 6 | 1.88 | 0.283 | 8650 | 0.213 × 10 ⁶ |
| | | 8 | 2.51 | 0.503 | 9630 | 0.425 × 10 ⁶ |
| | | 10 | 3.14 | 0.786 | 12600 | 0.475 × 10 ⁶ |
| | ガラス | 6 | 1.88 | 0.283 | 4860 | 0.284 × 10 ⁶ |
| | | 8 | 2.51 | 0.503 | 7460 | 0.344 × 10 ⁶ |
| | | 10 | 3.14 | 0.786 | 8970 | 0.438 × 10 ⁶ |
| 組紐状砂付 | 炭素 | 8 | 2.80 | 0.420 | 16300 | 1.20 × 10 ⁶ |
| | | 10 | 3.50* | 0.660 | 16100 | 1.39 × 10 ⁶ |
| | | 12 | 4.20 | 0.900 | 14900 | 1.19 × 10 ⁶ |
| | アラミド | 8 | 2.80 | 0.420 | 16700 | 0.777 × 10 ⁶ |
| | | 10 | 3.50* | 0.660 | 15500 | 0.710 × 10 ⁶ |
| | | 12 | 4.20 | 0.900 | 14900 | 0.689 × 10 ⁶ |
| 異形鉄筋 | D10 | 3.00 | 0.713 | 8410** | 2.04 × 10 ⁶ | |

*: 砂が付いていないものは 3.10 mm、 **: 降伏強度

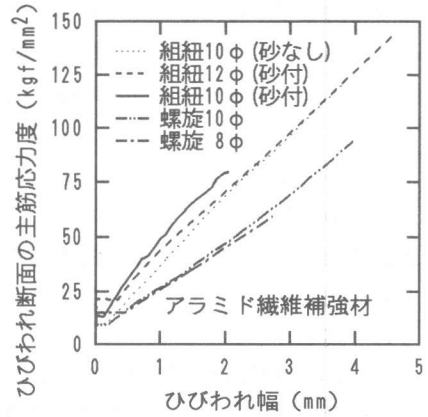


図-2 引張応力度-ひびわれ幅関係

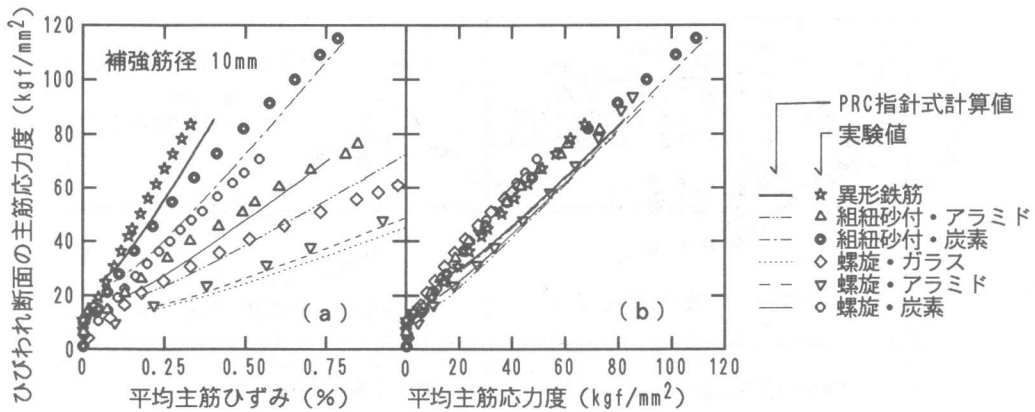


図-3 引張応力度-平均主筋ひずみ、平均主筋応力度関係

ヤング係数が小さな材料ではその差が大きくなっているが、(b)の平均主筋応力度は各計算値ともほぼ一致している。平均主筋応力度の実験値と計算値の間にも若干の差がみられるが、この原因としては、本実験で用いた補強材の径が、通常の主筋径よりも小さいことが考えられる。一般に主筋の径が小さくなるほど付着性能は向上するため、(b)図の関係ではその傾きが大きくなる。このことは、比較的径が小さい連続繊維補強材にとって、ひびわれ幅の評価に際しては安全側に作用する。しかし、ヤング係数が小さいものほど(a)のように実験値を過大評価することがあるため、さらにデータを蓄積し、細径をも含めた平均主筋ひずみの算定方法を確立する必要がある。

3) 付着性状

図-4、5に補強材のひずみより算出した平均付着応力度(τ)とすべり(s)の関係を示す。試験体のひびわれ断面での軸対称性より、ひびわれの両側での応力状況は同一であると仮定し、すべりはひびわれ幅の1/2とした。図-4に示す組紐状アラミド繊維補強材の砂付きのものでは、同一すべりに対する付着応力度は細径の方が大きい。これらに比べると、砂が付いていないものはひびわれ発生直後から付着性能が劣化しており、この差が図-2に見られるひびわれ幅の違いの原因であると思われる。図-5に同一径の補強材全種類の $\tau-s$ 関係を示す。螺旋糸巻状アラミド繊維補強材以外の $\tau-s$ 曲線は、ヤング係数の違いに関わらずどれも鉄筋のものと同様な曲線を示し、最大付着応力度は鉄筋コンクリートを上回っている。螺旋糸巻状アラミド繊維補強材は初期から付着が劣化し他と違いが見られるが、これが図-3(b)の差の原因となっているようである。

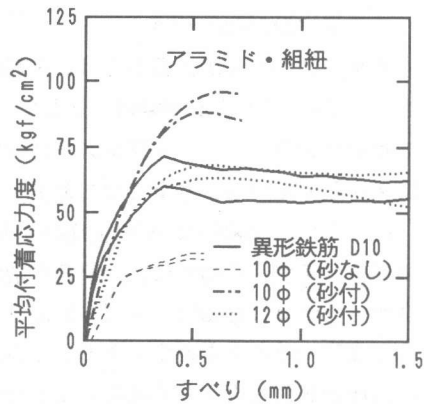


図-4 平均付着応力度-すべり関係 (アラミド繊維補強材)

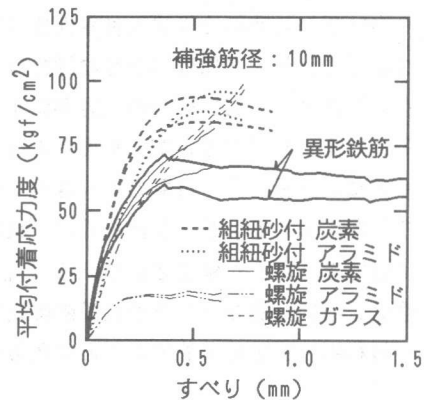


図-5 平均付着応力度-すべり関係 (補強材種類による比較)

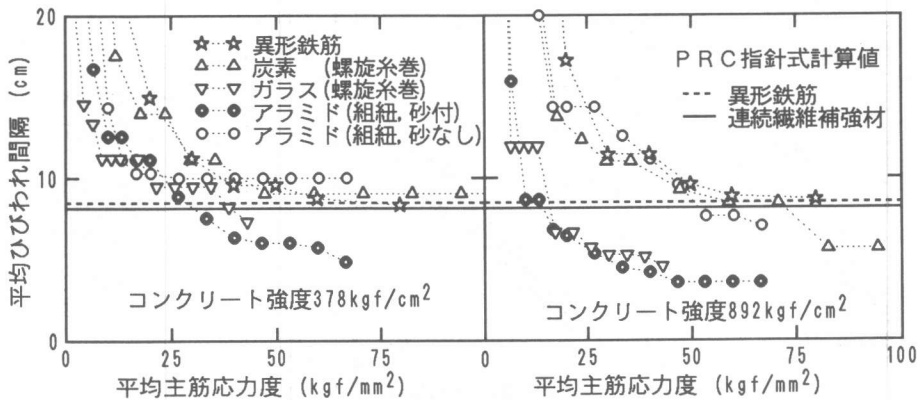


図-6 平均ひびわれ間隔-平均主筋応力度関係

3. 平均ひびわれ間隔

平均ひびわれ間隔に関しては、主筋の付着性能やヤング係数とその影響因子として考えられる。藤井[5]は、これらを実験因子として、断面 5×5 cm、長さ100cmのプリズム型試験体の両引き試験を行いテンションスティフネスを調べているが、その中で平均主筋ひずみと平均ひびわれ間隔の関係を示している。本章ではこのデータを引用し、平均ひびわれ間隔の算定式を検証する。

図-6に、文献[5]の平均主筋ひずみにヤング係数を掛けた平均主筋応力度と平均ひびわれ間隔の関係を示す。同図中には、PRC指針式により計算されたひびわれ定常状態のひびわれ間隔も合わせて示す。なお図-3(b)より、平均主筋応力度が同じならばひびわれ断面の主筋応力度もほぼ同一であると仮定できる。この図より、何れの補強材もひびわれ定常状態のひびわれ間隔はほぼ計算値付近もしくはそれ以下の値となっており、本算定式によりほぼ安全側に評価できることがわかる。これは、本実験で用いられた材料は2章の実験と同一種類のものであり、ほとんどのものが鉄筋以上の付着強度を有している(図-5参照)ことによると考えられる。ただし、平均ひびわれ間隔の推移は付着性能(アラミド繊維補強材の砂付きと砂無し)によって大きく異なる。またヤング係数が小さな材料ほど同一主筋応力度時の平均ひびわれ間隔は小さくなっている。これは、主筋に同一の応力がかかった場合、ヤング係数の小さいものほどひびわれ幅、即ち主筋のすべりは大きい、平均付着応力度とすべりの関係はヤング係数に関わらず同様な性状を示すため(図-5)付着力も大きくなり、結局コンクリートに働く引張力も大きくなることによると考えられる。PRC指針式は、鉄筋を用いた場合にはひびわれ定常状態以前のひびわれ幅も評価できることが確認されている[3]。従って鉄筋と同等以上の付着性能を有している連続繊維補強材を用いた場合(ひびわれ間隔は鉄筋よりも小さい)についても、ひびわれ定常状態以前のひびわれ幅の算定は可能であると考えられる。

4. ひびわれ幅評価式の検証

平均主筋ひずみは、PRC指針式において鉄筋のヤング係数の代わりに各補強材のヤング係数を代入すれば従来と同様に評価できること、平均ひびわれ間隔は、鉄筋と同等以上の付着性能を有する補強材であればPRC指針式でほぼ安全側に評価できることが前章までに明らかとなった。これらのことを踏まえ、PRC指針式がどの程度連続繊維補強コンクリート部材のひびわれ幅を評価できるものかを、梁の曲げ試験結果を用いて検証してみる。ここで対象とする実験は、主筋

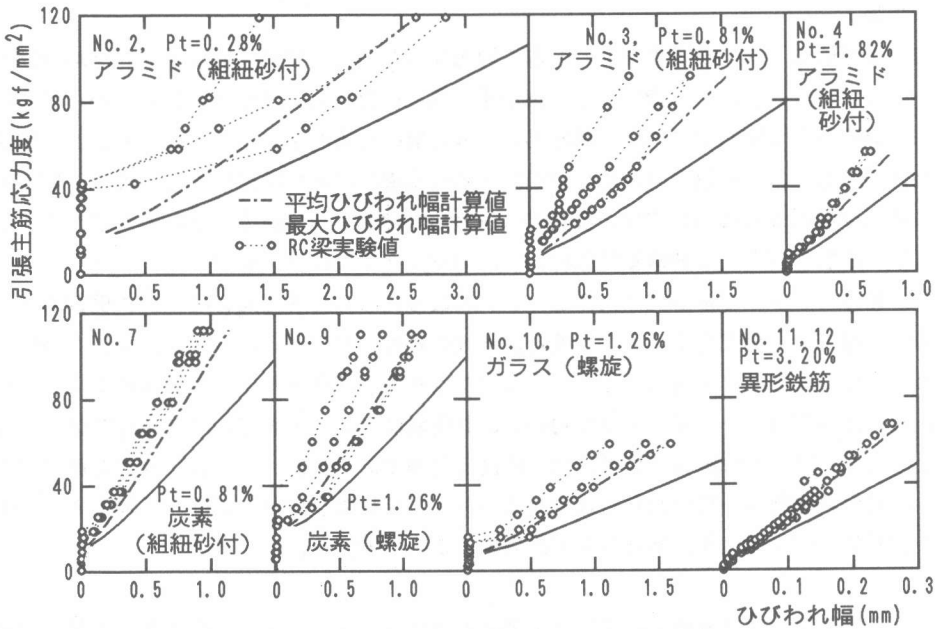


図-7 ひびわれ幅の実験値と計算値の比較 (RC梁)

の種類、引張主筋量などを変動因子とした連続繊維補強コンクリート単純梁の曲げ試験[6]と、複筋比、緊張材のアンボンド区間の長さなどを変動因子とした連続繊維補強Ⅲ種プレレストコンクリート (PRC) 単純梁の曲げ試験[7]である。実験に使用された連続繊維補強材の形状は螺旋糸巻と砂付きの組紐であり、2章の実験で用いた材料と同一種類である。試験体は何れも、断面 20×30 cm、純曲げ区間60cm、曲げせん断区間90cmの単純梁である。

図-7、8にそれぞれの実験結果とPRC指

針式の計算結果を示す。ひびわれ幅は何れも純曲げ区間の引張主筋高さ位置での値である。ひびわれ断面における主筋応力度の実験値は、断面曲げ解析により実験の各モーメントに対応する値を求めた。またPRC梁の主筋応力度は、コンクリートの応力が0の時点 (Decompression) からの変化量を用いている。なお、計算値にはコンクリートの乾燥収縮は考慮していないが、これは計算式の検証には安全側の仮定となる。計算値の最大ひびわれ幅は平均ひびわれ幅の1.5倍である。

図-7より、引張主筋比 (Pt)、主筋の種類に関わらず、何れの実験値もほぼ平均ひびわれ幅の計算値付近に分布しており、最大ひびわれ幅の計算値は越えていない。図-8に示すPRC梁の実験値は、圧縮主筋量を変化させたもの (引張主筋量は同じ) であり、ひびわれ測定位置 (純曲げ区間中央部) 断面では緊張材はアンボンドである。同図よりPRC梁の実験値についても、何れも最大ひびわれ幅計算値未満の値となっている。これらより、連続繊維補強材で補強されたRCおよびPRC梁のひびわれ幅はPRC指針の式を用いて評価できることが解った。

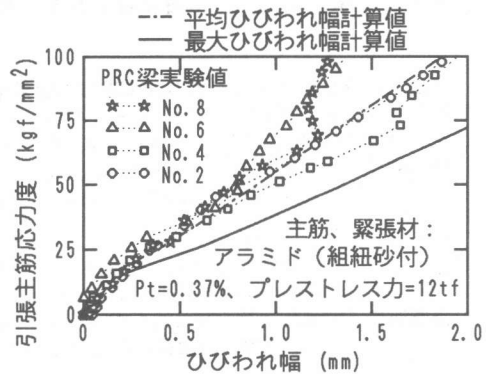


図-8 ひびわれ幅の実験値と計算値の比較 (PRC梁)

5. 結論

連続繊維補強コンクリートのひびわれ幅を評価するために、平均主筋ひずみと平均ひびわれ間隔について、P R C 指針式の適応性を実験結果を基に検討した。さらに、これらから得られた評価方法を梁部材の実験結果を用いて検証した。本研究の結論を下記に示す。なお、この結論は、鉄筋と同等もしくはそれ以上の付着性能を有する連続繊維補強材を用いた場合についてのものである。それ以外の場合については、現状では一般的な評価は不可能であるため対象外とする。

(1) 平均主筋ひずみは連続繊維補強材と鉄筋のヤング係数比倍、鉄筋コンクリートに比べ大きくなる。従って、P R C 指針式の鉄筋のヤング係数の代わりに各補強材のヤング係数を代入すれば、従来と同様に評価できる。ただし連続繊維補強材は一般に径が小さくまたヤング係数が小さいため、鉄筋コンクリートを対象とした算定式では平均主筋ひずみを過大評価する可能性がある。

(2) 連続繊維補強コンクリートの平均ひびわれ間隔は、同じ主筋応力度に対しては鉄筋よりも小さくなるが、ひびわれ定常状態ではほぼ鉄筋と同等であるため、P R C 指針式で算定できる。

(3) 連続繊維補強材を用いたR C 部材およびP R C 部材のひびわれ幅は、補強材のヤング係数を代入することによりP R C 指針の式で評価することができる。

謝辞： 本研究は、建設省新素材総プロ長繊維補強コンクリートWG（委員長 園部泰寿筑波大教授）の一環として行ったものであります。材料を提供戴いた関係各位に感謝致します。また、京都大学・藤井栄博士には貴重な資料を引用させて戴きました。厚くお礼申し上げます。

[付録：P R C 指針・ひびわれ幅算定式（鉄筋を主筋と読み替えたもの）]

平均ひびわれ幅 (Wav) : $Wav = l_{av} \times \epsilon t \cdot av$ (付1)

平均ひびわれ間隔 (l_{av}) : $l_{av} = 2(c + s/10) + k\phi / pe$ (付2)

平均主筋ひずみ ($\epsilon t \cdot av$) : $\epsilon t \cdot av = \frac{(2 \times 10^3 \sigma t - 0.8 Ef) + \sqrt{(2 \times 10^3 \sigma t - 0.8 Ef)^2 - 8 \times 10^3 Ef (Ft / pe - 0.8 \sigma t)}}{4 \times 10^3 Ef}$ (付3)

ただし、 $\epsilon t \cdot av \geq 0.4 \sigma t / Ef$ かつ、 $\epsilon t \cdot av \geq (\sigma t - 1050) / Ef$
記号：c=(cs+cb)/2、cs、cb:側面および底面でのコンクリートのかぶり厚さ、s:主筋の中心間隔、k=0.1(はりの場合)、 ϕ :主筋の直径、pe=a t/Ace、a t:引張主筋の断面積、Ace:コンクリートの有効引張断面積(引張側主筋の重心とその重心が一致する引張側コンクリートの断面積：Ace=(2cb+ ϕ)b)、b:はり幅、 σt :ひびわれ断面における主筋応力、Ef:主筋のヤング係数、Ft:コンクリートの引張強度

[参考文献]

- 1) 松崎育弘・福山洋ほか：鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生域の抵抗機構に関する実験研究－ひびわれの開閉性状－、日本建築学会構造系論文報告集、第388号、pp. 35-44、1988. 6
- 2) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種P C)構造設計・施工指針・同解説、日本建築学会、1986年
- 3) 鈴木計夫・大野義照：プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひびわれ幅に関する研究－その1 初期ひびわれ幅について－、日本建築学会論文報告集、第303号、pp. 9-19、1981. 5
- 4) 福山洋・松崎育弘：鉄筋コンクリート部材におけるひびわれ発生域の抵抗機構に関する実験研究－ひびわれ開閉モデルの検証－、日本建築学会構造系論文報告集、第409号、pp. 37-50、1990. 3
- 5) 藤井栄：長繊維補強コンクリートにおけるコンクリートの引張力分担、建設省総合技術開発プロジェクト建設事業への新素材・新材料利用技術の開発報告書、(財)国土開発技術研究センター、No. H2-1、pp. 149-164、1991. 3
- 6) 松崎育弘・中野克彦・河合幹太：長繊維補強材を用いたR C 梁の曲げ性状に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集13-2、pp. 807-810、1991
- 7) 中野克彦・松崎育弘・河合幹太：長繊維補強材を用いたプレストレストコンクリート梁の曲げ性状に関する実験研究、日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅱ、pp. 147-148、1992. 8
- 8) 福山洋・松崎育弘ほか：連続繊維補強コンクリートのひびわれ性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 153-154、1992. 8