

# 曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔の算定方法に関する研究

来海 豊\*

ひび割れ間のコンクリートに発生する最大引張応力を二つの引張応力が重ね合わされたものであると仮定し、曲げを受ける鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔の算定方法を新たに提案した。その一つは、一軸引張部材モデルに基づく引張応力である。もう一つは、コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることによってはりの引張縁に発生する引張応力である。提案する方法によると、広範囲な鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔を、比較的精度よく推定できる。

**Key Words :** crack spacing, flexure, reinforced concrete beam

## 1. 序論

鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔の算定方法に関しては、比較的多くの研究が行われている<sup>1)~3)</sup>。しかし、近年では、鋼纖維を混入したポリマー含浸コンクリートのような高引張強度コンクリートを用いた薄内部材の開発も、行われつつある<sup>4)</sup>。これに対し、このような特殊な部材に至るまで、広範囲に渡ってひび割れ間隔を精度よく推定する方法は、未だ提案されていない。

現在提案されている鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔算定方法の代表的なものとしては、鉄筋コンクリート角柱の一軸引張部材モデルをはりの引張側に適用する方法がある<sup>1)</sup>。この一軸引張部材モデルを適用する方法の場合、引張鉄筋の重心と同じ所を中心とするコンクリートの断面を有効断面とする方法が一般に用いられている<sup>2)</sup>。しかし、一軸引張部材モデルをコンクリートの引張強度が極端に高い場合に適用すると、一つの断面にしかひび割れが発生しないことが想定される。たとえば、引張強度が  $13 \text{ N/mm}^2$  のポリマー含浸コンクリートと降伏点強度が  $370 \text{ N/mm}^2$  の引張鉄筋を用いたはりに一軸引張部材モデルを適用した場合を考えてみる。この場合、引張鉄筋の断面積とコンクリートの有効断面積の比が約 3.51% 以下の時には、一つの断面にひび割れが発生すると同時に引張鉄筋が降伏し、もはや他の断面にひび割れが発生しないことになってしまう。したがって、従来より提案されている鉄筋との付着作用に基づく引張応力以外の要因を考慮する必要があると考えられる。

一方、Beeby<sup>3)</sup>は、ひび割れ幅の推定モデルの検討に当たって、鉄筋コンクリートはりのひび割れ発生状況には、偏心圧縮力の作用する無筋コンクリート柱においても安定したひび割れが発生するとの同様の作用も存在す

ると考察している。この偏心圧縮力によりはりの引張縁のコンクリートに発生する引張応力を算定するには、ひび割れ断面付近において、ひび割れの発生する前から平面保持の仮定が成立していないという問題点がある<sup>5)</sup>。このことは、応力算定を複雑化するものであり、偏心圧縮力により発生する引張応力を工学的に精度よく算定する方法が提案されていない原因と考えられる。

本研究は、高引張強度でかつせいい性破壊する材料を用いた場合や、はり高さあるいは引張鉄筋比等が大きく変化する場合にも適用できる鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ間隔の算定方法を提案するものである。ひび割れ間隔の算定に当たっては、ひび割れ断面のコンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより、はりの引張縁に発生する引張応力を新たな要因として考慮している。この引張応力を算定可能とするために、先ず、平面保持の仮定が成立していないことの影響を簡便に考慮できる方法を検討した。そして、圧縮合力の偏心に基づく引張応力に、鉄筋との付着作用に基づく引張応力を重ね合わせることにより、既に発生しているひび割れ間の中間部の引張縁に新たなひび割れが発生するかどうかを検討した。なお、実験は、高引張強度コンクリートを活用した薄内部材を主に研究対象として考えているため、膨張コンクリートと鋼纖維を用いた鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりについて行っている。

## 2. 実験概要

プレーンコンクリート、鋼纖維を混入していないポリマー含浸コンクリート、鋼纖維混入率が 1.5 vol. % のポリマー含浸コンクリートおよび鋼纖維混入率が 3.0 vol. % のポリマー含浸コンクリートという合計 4 種類のコンクリートを用いて、鉄筋コンクリートはり供試体を作製した。これらの 4 種類のコンクリートは、いずれも単位セメント量を  $405 \text{ kg/m}^3$  とし、普通ポルトランド

\* 正会員 工博 秩父セメント(株)中央研究所 主任研究員  
(〒360 熊谷市月見町 2-1-1)

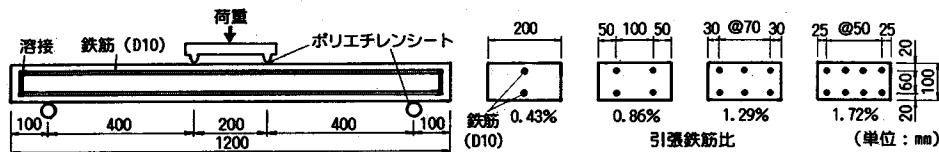


図-1 鉄筋コンクリートはり供試体

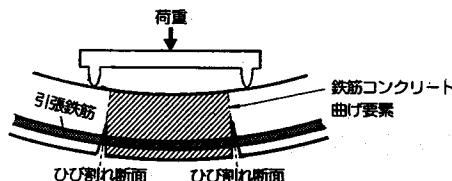


図-2 ひび割れ発生状況の模式図

セメントを用いたものである。粗骨材としては、JIS A 5001「道路用碎石」に規定されている単粒度碎石S-5(7号)の粒度範囲となるように調整した2.5~5 mmの碎石を用いた。また、ポリマー含浸コンクリートには、はり供試体のコンクリート部分に発生する初期引張応力を軽減する観点から、57 kg/m<sup>3</sup>のエトリンガイト系膨張材を用いた。使用した鉄筋は、断面積が0.69 cm<sup>2</sup>、ヤング係数が181 kN/mm<sup>2</sup>、降伏点強度が367 N/mm<sup>2</sup>の異形鉄筋D10である。鋼纖維については、直径が0.35 mm、長さが15 mmで、引張強度が2 500 N/mm<sup>2</sup>のカットワイヤを使用した。そして、含浸モノマーには、一般的に用いられているメチルメタクリレート(MMA)モノマーを使用した。

鉄筋コンクリートはり供試体は、図-1に示すようにすべて上下対称配筋である。コンクリートの各種類ごとに、引張鉄筋比  $p = A_s / (b \cdot d)$  を0.43, 0.86, 1.29および1.72%と4段階に変化させたため、合計16体のはり供試体について実験を行った。ここに、 $A_s$ ,  $b$  および  $d$  は、それぞれ引張鉄筋の全断面積、はり幅および有効高さである。そして、すべてのはり供試体に対し、軸方向鉄筋端部は、上側の鉄筋と下側の鉄筋を連結する別の鉄筋を溶接することにより定着した。なお、以降の図表において供試体名を記号で表示する際、PC, PIC, SFPIC 1.5 および SFPIIC 3.0 は、それぞれプレーンコンクリート、鋼纖維を混入していないポリマー含浸コンクリート、鋼纖維混入率が1.5 vol. % のポリマー含浸コンクリートおよび鋼纖維混入率が3.0 vol. % のポリマー含浸コンクリートを表す。また、後に続くB1, B2, B3 および B4 は、それぞれ前記の引張鉄筋比  $p$  が0.43, 0.86, 1.29および1.72%のはり供試体を指す。

鉄筋コンクリートはり供試体の曲げ載荷試験は、単純はり形式で、スパンを100 cm、等モーメント区間を20 cmとして、図-1に示すように4点曲げ載荷方式により行った。そして、摩擦力を軽減するために、中間にグ

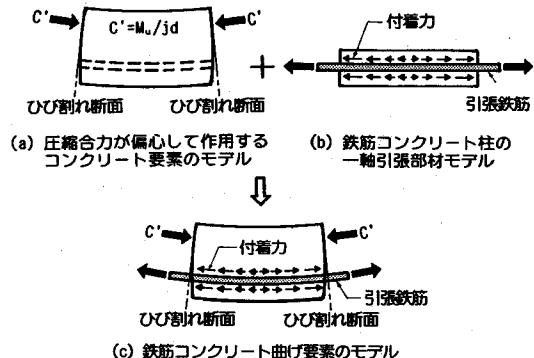


図-3 ひび割れ間の鉄筋コンクリート曲げ要素のモデル

リースを挟んだ幅が2~3 cmのポリエチレンシート2枚ずつを載荷板および支承とはり供試体との間に挿入して、はり供試体が曲げ耐力を至るまで載荷した。

### 3. ひび割れ間隔の算定方法の提案

#### (1) 鉄筋コンクリート曲げ要素のモデル

図-2は、鉄筋コンクリートはりにおけるひび割れ発生状況を模式的に示したものである。そして、図-2に示すはりスパン中央の等モーメント区間から、隣接するひび割れ間の鉄筋コンクリート曲げ要素を取り出し、その要素モデルを示すと、図-3のようになる。このモデルにおいては、実際に生じていると考えられる応力状態を示した図-3 (c) は、図-3 (a) と図-3 (b) の状態を重ね合わせたものであると仮定する。換言すると、鉄筋コンクリートはりの引張縁に発生する引張応力は、コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張応力と、鉄筋との付着作用により伝達される引張応力を重ね合わせたものであると仮定することになる。しかし、ひび割れの発生に対しては、コンクリートが非線形挙動をするために、引張応力の単純な重ね合わせは成立しない。このため、先ず、コンクリートに作用する圧縮合力の偏心に基づく引張応力を、線形弾性論を適用して算定する。次に、算定した引張応力を、本章の(3)に述べる方法によりコンクリートのせん断変形を考慮して補正する。その後、補正した値に、鉄筋との付着作用により伝達される引張応力を重ね合わせることによって、コンクリートの非線形性を考慮する。

#### (2) ひび割れ間隔の算定方法の概念

ひび割れ間隔の算定方法の概念を図示すると、図-4

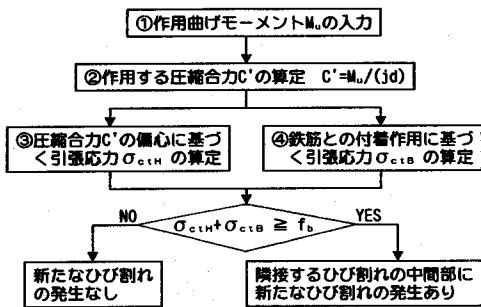


図-4 ひび割れ間隔の算定方法の概念

のようになる。先ず、①作用曲げモーメントとして鉄筋コンクリートはりの曲げ耐力  $M_u$  を与える。次に、②コンクリートに作用する圧縮合力  $C'$  を、式(1)により求める。その際、圧縮合力  $C'$  の作用位置から引張合力の作用位置までの距離、すなわちアーム長 ( $jd$ ) の  $j$  は、簡便化するために、一定値とする。その  $j$  の値は、土木学会・コンクリート標準示方書・設計編<sup>6)</sup>において、終局限界状態の検討に用いてよいとされている 1/1.15 とする。なお、図-4 中における③および④については、それぞれ本章の(3)および(4)に述べる通りである。そして最後に、 $\sigma_{cih}$  および  $\sigma_{ciB}$  という 2 つの引張応力を加算して、はりの引張縁に発生する全引張応力  $\sigma_{cit}$  を求める。この全引張応力  $\sigma_{cit}$  がコンクリートの曲げ強度  $f_b$  を超えた時に、既に発生しているひび割れ間の中間断面に新たなひび割れが発生するものと仮定する。

$$C' = M_u / (jd) \quad \dots \dots \dots (1)$$

### (3) 圧縮合力の偏心に基づく引張応力の算定

ひび割れ断面のコンクリートに作用する圧縮合力  $C'$  が偏心していることによってはりの引張縁に発生する引張応力の算定に当たっては、前述のように、コンクリートのせん断変形を考慮した線形弾性論が適用できると仮定する。そして、コンクリートのせん断変形を考慮した引張応力を線形有限要素解析により算定し、有限要素解析による値と平面保持の仮定を用いる棒部材の線形弾性計算による引張応力の値との比である係数  $C_{cl}$  を求める。すなわち、圧縮合力の偏心によってはりの引張縁のコンクリートに発生する引張応力  $\sigma_{cih}$  は、式(2)に示すように、平面保持の仮定を用いる棒部材の線形弾性計算結果に係数  $C_{cl}$  を乗じることによって求まると仮定する。

$$\sigma_{cih} = C_{cl} \cdot \{-C'/(bh) + C' \cdot e \cdot 6/(bh^2)\} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここに、 $h$ : はり高さ、 $e$ : 圧縮合力の偏心量である。

図-5 には、有限要素解析に用いた要素分割を示す。隣接するひび割れ間のコンクリートは、8 節点アイソパラメトリック長方形要素により表現する。また、数値積分については、各方向に 3 つの積分点を持つガウスの求積法を用いる。そして、コンクリートの引張応力を比較

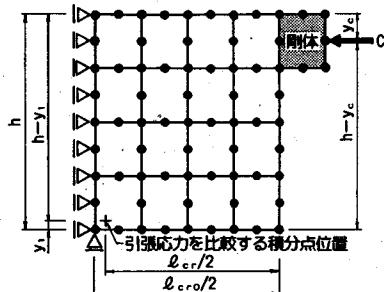
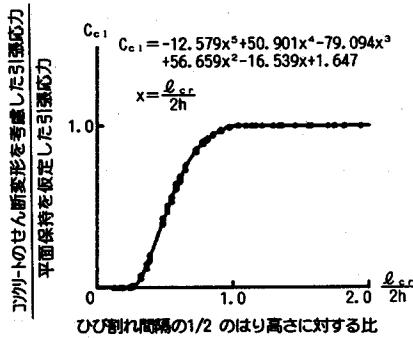


図-5 要素分割図

図-6 係数  $C_{cl}$  と既に発生しているひび割れの間隔  $l_{cr}$  の 1/2 のはり高さ  $h$  に対する比 ( $l_{cr}/2h$ ) との関係

する位置は、最も大きな引張応力が発生すると考えられる図-5 に示す積分点位置とする。なお、図-5 に示す要素分割としたのは、1 要素の各方向の寸法を 1/2 として、要素数を 4 倍にした要素分割の場合についても計算した結果、前述の係数  $C_{cl}$  の算定値に要素寸法が及ぼす影響は実質的に認められなかったことによる。

図-6 は、求めた係数  $C_{cl}$  と既に発生しているひび割れの間隔  $l_{cr}$  の 1/2 のはり高さ  $h$  に対する比、すなわち  $(l_{cr}/2h)$  との関係を示したものである。この図における横軸の  $(l_{cr}/2h)$  の値が 1.05 より小さい場合のように、平面保持の仮定が成立しない領域が存在することがわかる<sup>5)</sup>。しかし、横軸の  $(l_{cr}/2h)$  の値が 1.05 以上の場合には、平面保持の仮定が適用できると考えられる。なお、係数  $C_{cl}$  を求めるに当たっては、コンクリート系の構造材料で想定される範囲として、コンクリートのヤング係数およびせん断剛性を、それぞれ 19.6~39.2 kN/mm<sup>2</sup> の範囲で 3 段階および 6.76~17.8 kN/mm<sup>2</sup> の範囲において 12 段階に変化させている。また、圧縮合力の作用位置は、図-5 に示すはり下縁からの距離  $(h - y_c)$  として、はり高さ  $h$  の 0.875 および 0.9 倍の 2 段階の値を仮定している。そして、既に発生しているひび割れの間隔  $l_{cr}$  のはり高さ  $h$  に対する比を変えることにより、合計 320 通りの場合について係数  $C_{cl}$  を算出した。

図-6 に示す係数  $C_{cl}$  を算出した際、前述した各要因の影響については、次のようになつた。先ず、コンクリー

トのヤング係数およびせん断剛性の変化が係数  $C_{cl}$  の算定値に及ぼす影響は、実質的に認められなかった。次に、既に発生しているひび割れの間隔  $\ell_{cr}$  のはり高さ  $h$  に対する比の影響については、 $\ell_{cr}$  を固定して  $h$  を変化させた場合と、これと逆に  $h$  を固定して  $\ell_{cr}$  を変化させた場合の計算を行って調べた。両方の計算結果を同一の  $(\ell_{cr}/2h)$  において比較した時、図-6 にプロットした点のように、係数  $C_{cl}$  の算定値にはほとんど変化が認められなかった。このため、図-6 では、 $(\ell_{cr}/2h)$  のみを変数とみなし、これを横軸として係数  $C_{cl}$  を示している。しかし、圧縮合力の作用位置の影響については、 $(\ell_{cr}/2h)$  が 0.25~1.05 の範囲において、はり下縁からの距離  $(h-y_c)$  をはり高さ  $h$  の 0.875 倍とした場合の係数  $C_{cl}$  の算定値は、 $h$  の 0.9 倍とした場合よりも、最大で約 0.03 大きくなる傾向となった。なお、第 4 章の表-1 に示す本研究で対象としたはり供試体に対して、圧縮合力の作用位置を算出した結果は、すべてこの仮定した 2 段階の  $(h-y_c)/h$  の範囲内に入っている。

以上より、圧縮合力の偏心に基づく引張応力を算定する際には、図-6に実線で示す式(3)のように、 $x = (\ell_{cr}/2h)$  を変数とした関数で近似した係数  $C_{cl}$  を用いることとする。そして、式(3)から求まる係数  $C_{cl}$  を用いると、これに対して ±0.015 程度の範囲内に、図-6に示したすべての計算結果は入っていた。

$$\left. \begin{aligned} C_{cl} &= 0.0 && (0.0 \leq x \leq 0.25) \\ &= -12.579x^5 + 50.901x^4 - 79.094x^3 \\ &\quad + 56.659x^2 - 16.539x + 1.647 && (0.25 < x < 1.05) \\ &= 1.0 && (1.05 \leq x) \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

#### (4) 鉄筋との付着作用に基づく引張応力の算定

付着応力  $\tau_1$  は、既に発生しているひび割れの間隔を  $a_{cr}$  として、図-7 および式(4)に示すような余弦関数状に分布するものと仮定する。これは、一軸引張部材における付着応力分布に対する六車らの説明図<sup>7)</sup>を参考にして、簡便な関数により分布形状を仮定したことによる。また、付着応力の最大値  $\tau_{1max}$  は、前記のコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>における材料係数  $\gamma_c$  を 1.0とした式(5)に示す設計付着強度  $f_{bod}$  から求める。そして、先ず、基本定着長の場合の補正方法を考慮して、設計付着強度  $f_{bod}$  を式(6)のように補正し、付着強度  $f_{bod1}$  を算出する。この補正是、引張鉄筋のかぶりと引張鉄筋の直径が付着強度に及ぼす影響を考慮するためである。次に、付着強度  $f_{bod1}$  の  $\beta_1$  倍として、付着応力の最大値  $\tau_{1max}$  を式(7)により求める。この倍率  $\beta_1$  は、土木学会・コンクリート標準示方書・設計編<sup>6)</sup>に示されている値が付着応力の平均値と考えられることから、付着強度  $f_{bod1}$  を  $\tau_{1max}$  に変換するための係数となる。



図-7 仮定した付着応力分布

ここに,  $\ell$ : ひび割れ断面からの距離である.

ここに,  $f'_c$ : コンクリートの圧縮強度である.

ここに、 $\alpha$ ：次のように定義される係数である。

$\alpha=1.0$  (  $k_c \leqq 1.0$  の場合)

$= 0.9$  (1.0 <  $k_c \leq 1.5$  の場合)

=0.8 (1.5 <  $k_c$  ≤ 2.0 の場合)

$=0.7$  (2.0  $< k_c \leq 2.5$  の場合)

=0.6 (2.5 <  $k_c$  の場合)

ここに、 $k_c = c/\phi$ 、 $c$ ：引張鉄筋のかぶり、 $\phi$ ：引張鉄筋の直径である。

付着応力が鉄筋軸に沿って式(4)のような余弦関数状に分布すると仮定する場合、付着応力の最大値 $\tau_{1\max}$ は、付着応力の平均値の $\pi/2$ 倍となる。そこで、 $\tau_{1\max}$ は、基本定着長の補正方法を考慮した付着強度 $f_{bod1}$ の $\pi/2$ 倍と置く。また、土木学会・鋼纖維補強コンクリート設計施工指針(案)<sup>8)</sup>によると、鋼纖維の混入は、鉄筋とコンクリートとの付着強度を高める効果を有すると考えられている。そこで、本研究では、式(8)に示す倍率 $\beta_1$ の算定式において、実験結果を考慮し、鋼纖維混入率 $V_f(\text{vol. \%})$ の0.8倍という鋼纖維の効果を表す項を仮定する。

式(8)における $0.8 \cdot V_f$ という鋼纖維の効果を表す項を仮定するに当たっては、次のような検討を行った。先ず、前記の設計施工指針(案)<sup>8)</sup>において設計基準曲げ強度に応じて規定されている許容付着応力度をもとに、これに示されている配合設計例や実験データを参考にして付着強度を推定した。この結果はおおむね許容付着応力度の1.8~2.3倍程度となつたため、前記の設計施工指針(案)<sup>8)</sup>においては、付着強度と許容付着応力度との比を約2として安全性を考慮していると考えた。そして、逆に、許容付着応力度の2倍が鋼纖維補強コンクリートの設計付着強度であり、これを式(6)のように補正した値の $\pi/2$ 倍が付着応力の最大値であると考えて、鋼纖維混入率が1.0 vol. %および1.5 vol. %の場合について鋼纖維の効果を求めるとき、それぞれ $0.77 \cdot V_f$ および $0.67 \cdot V_f$ となつた。ポリマー含浸を行うと、鋼纖維とマトリックスとの付着強度が顕著に向上升す。

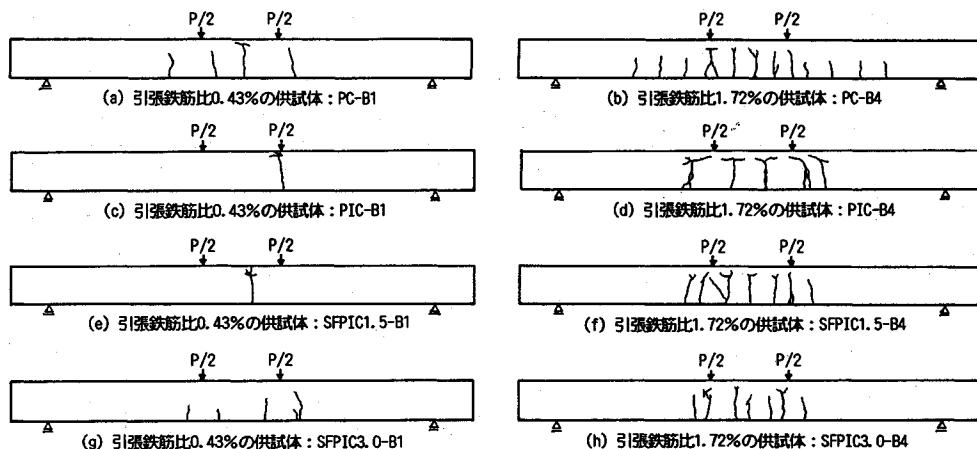


図-8 載荷試験後におけるひび割れ発生状況例

ること<sup>9)</sup>から、鉄筋と鋼纖維補強コンクリートとの付着強度も高まるものと推察される。これらのこととも考慮すると、式(8)中の $0.8 \cdot V_f$ はおおむね妥当なものと思われる。そこで、本研究の範囲では、すべて式(8)中の $0.8 \cdot V_f$ として鋼纖維の効果を表すこととした。

以上より、倍率 $\beta_1$ を式(8)のように仮定すると、鉄筋との付着作用に基づいてはりの引張縁に発生する引張応力 $\sigma_{ctB}$ は、式(9)により与えられる。

$$\sigma_{ctB} = \int_0^{l_{cr}/2} \tau_1 \cdot u \cdot d\ell / A_{ce} \quad \dots \dots \dots (9)$$

ここに、 $u$ :引張鉄筋の全周長、 $A_{ce}$ :引張鉄筋の重心と同じ所を中心とする引張側のコンクリートの有効断面積である<sup>2)</sup>。

#### 4. ひび割れ間隔の算定方法の評価

##### (1) 載荷試験後におけるひび割れ性状

図-8は、それぞれプレーンコンクリートを用いた基準鉄筋コンクリートはり供試体、鋼纖維を混入していない鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体、鋼纖維混入率が1.5 vol. %の鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体および鋼纖維混入率が3.0 vol. %の鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体について、載荷試験後のひび割れ発生状況を例示したものである。なお、図-8に示す供試体名の記号については、第2章に述べている。

ひび割れ本数は、基準鉄筋コンクリートはり供試体が最も多く、引張鉄筋比 $\rho$ が1.72%の場合には、等モーメント区間の外側にもひび割れがかなり認められる。これに対し、鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体の場合には、ほとんどのひび割れが、スパン中央の等モーメント区間に発生している。このような鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりのひび割れの分散性も、鋼纖維混入率が増大するのに伴い、徐々によくなる傾向にあるよう

である。たとえば、引張鉄筋比 $\rho$ を0.43%とした時にについて、比較してみると、図-8(c)に示す鋼纖維を混入していない鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体および図-8(e)に示す鋼纖維混入率が1.5 vol. %の鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体については、1本のひび割れが進展することによって破壊に至っている。しかし、鋼纖維混入率が3.0 vol. %と大きくなると、図-8(g)に示す鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体のように、図-8(a)に示す基準鉄筋コンクリートはり供試体と同数の4本のひび割れが認められる。また、これらのはり供試体においては、引張鉄筋比 $\rho$ が増大するのに伴って、ひび割れ間隔は徐々に小さくなるという共通した傾向が認められた。

##### (2) ひび割れ間隔の算定結果および考察

提案するひび割れ間隔の算定方法の評価は、実験値と計算値との比較により行った。そして、その比較を行うに当たっては、本実験の結果の他に、島ら<sup>10)</sup>の実験結果、池田ら<sup>11)</sup>の実験結果、岡田ら<sup>12)</sup>の実験結果および青柳ら<sup>13)</sup>の実験結果も用いた。用いたいずれのはり供試体も、2本以上のひび割れが発生しており、ひび割れ図や写真があるか、またはひび割れ本数が表示されているものである。これらのはり供試体の諸元を示すと、表-1のようになる。なお、以降の図表においては、ひび割れ間隔の記号として、ひび割れ間隔の算定に用いる( $l_{cr}/2$ )ではなく、実験値および計算値に対し、それぞれ $\ell_1$ および $\ell_2$ を用いることとする。

提案する方法によるひび割れ間隔の算定値は、コンクリートの曲げ強度の影響を大きく受けると考えられる。すなわち、ひび割れ間隔の算定に用いる曲げ強度としては、実際の部材中におけるコンクリートの曲げ強度に近いものが望ましいと考えられる。そこで、本研究では、これに比較的近いものとして、初期応力やはりの寸法効果等の影響が考慮された形になる可能性が高いと思われ

表-1 はり供試体の諸元

| 出典       | 供試体        | はり供試体の寸法          |                     |                  | 鉄筋       | 引張鉄筋比<br>$A_s/(b \cdot d)$ | コンクリート                       |                             | ※2<br>ひび割れ<br>発生モーメント<br>$M_{cr}$<br>(kN·m) | ※2<br>曲げ耐力<br>$M_u$<br>(kN·m) | ※2<br>ひび割れ間隔<br>$\ell_1$<br>(cm) |
|----------|------------|-------------------|---------------------|------------------|----------|----------------------------|------------------------------|-----------------------------|---|-------------------------------|----------------------------------|
|          |            | 高さ<br>$h$<br>(cm) | 有効高さ<br>$d$<br>(cm) | 幅<br>$b$<br>(cm) |          |                            | 圧縮強度<br>$f'_c$ ※2<br>(N/mm²) | 引張強度<br>$f_t$ ※2<br>(N/mm²) |   |                               |                                  |
| 島らの実験    | No.3       | 60                | 56                  | 25               | D10 (2本) | 0.10                       | 20.1                         | -                           | 44.0  | 52.0                          | 30.0                             |
|          | No.4       | 60                | 56                  | 25               | D10 (3本) | 0.15                       | 20.1                         | -                           | 45.2  | 65.2                          | 20.0                             |
|          | No.5       | 60                | 56                  | 25               | D10 (1本) | 0.20                       | 20.1                         | -                           | 45.2  | 65.2                          | 30.0                             |
| 池田らの実験   | No.1       | 26.3              | 23.8                | 15               | D10 (4本) | 0.80                       | 61.8                         | 3.73                        | 11.5  | 28.7                          | 7.2                              |
|          | No.3       | 26.3              | 23.8                | 15               | D10 (3本) | 0.20                       | 61.8                         | 3.73                        | 5.74  | 8.73                          | 26.4                             |
|          | No.5       | 26.3              | 23.8                | 15               | D10 (1本) | 0.20                       | 19.6                         | 1.77                        | 4.14  | 7.65                          | 16.7                             |
| 岡田らの実験※3 | SR-1       | 15                | 13                  | 8                | φ9 (2本)  | 0.51                       | 99.0                         | 11.8                        | 3.52  | 2.65                          | 26.8                             |
|          | SR-2       | 15                | 13                  | 8                | φ9 (2本)  | 1.02                       | 99.0                         | 11.8                        | 3.31  | 5.98                          | 17.2                             |
| 青柳らの実験   | A-1        | 40                | 35                  | 20               | D16 (2本) | 0.57                       | 26.9                         | 2.28                        | 15.8  | 55.5                          | 13.8                             |
|          | A-2        | 40                | 35                  | 20               | D16 (2本) | 0.57                       | 69.6                         | 6.37                        | 48.0  | 81.0                          | 35.0                             |
| 著者の実験Ⅰ   | PC-B1      | 10                | 8                   | 20               | D10 (1本) | 0.43                       | 46.1                         | 3.28                        | 1.26  | 2.45                          | 11.0                             |
|          | PC-B2      | 10                | 8                   | 20               | D10 (2本) | 0.86                       | 52.9                         | 4.02                        | 1.57  | 2.53                          | 10.3                             |
|          | PC-B3      | 10                | 8                   | 20               | D10 (3本) | 1.29                       | 55.1                         | 4.31                        | 1.86  | 7.12                          | 7.5                              |
| 著者の実験Ⅱ   | PTC-B2     | 10                | 8                   | 20               | D10 (4本) | 1.72                       | 52.9                         | 4.02                        | 1.67  | 8.76                          | 4.5                              |
|          | PTC-B3     | 10                | 8                   | 20               | D10 (3本) | 0.88                       | 133                          | 12.9                        | 5.77  | 8.41                          | 12.3                             |
|          | PTC-B4     | 10                | 8                   | 20               | D10 (4本) | 1.52                       | 132                          | 11.6                        | 4.53  | 11.9                          | 9.8                              |
| 著者の実験Ⅲ   | SEPC1-5-B2 | 10                | 8                   | 20               | D10 (2本) | 0.86                       | 153                          | 13.1                        | 5.59  | 8.59                          | 9.2                              |
|          | SEPC1-5-B3 | 10                | 8                   | 20               | D10 (3本) | 1.29                       | 153                          | 13.1                        | 5.30  | 10.8                          | 7.6                              |
|          | SEPC1-5-B4 | 10                | 8                   | 20               | D10 (4本) | 1.72                       | 153                          | 13.1                        | 5.81  | 12.6                          | 5.6                              |
| 著者の実験Ⅳ   | SEPC3-0-B1 | 10                | 8                   | 20               | D10 (1本) | 0.43                       | 165                          | 14.7                        | 6.28  | 9.71                          | 9.7                              |
|          | SEPC3-0-B3 | 10                | 8                   | 20               | D10 (3本) | 1.29                       | 159                          | 15.5                        | 6.08  | 12.1                          | 7.1                              |
|          | SEPC3-0-B4 | 10                | 8                   | 20               | D10 (4本) | 1.72                       | 169                          | 13.8                        | 5.88  | 15.0                          | 4.9                              |

※1 鋼織維を混入したポリマー含浸コンクリートの引張強度は、ひび割れ発生荷重より算出した割裂引張強度である。

※2 著者の実験以外のデータは、文献より読み取ったものである。

※3 岡田らの実験データは、鉄筋レジンコンクリートはりについてのものである。

ことから、ひび割れ発生モーメント  $M_{cr}$  の実験値を用いて算出した式(10)に示す曲げ強度  $f_b$  を採用した。そして、この曲げ強度とはりの曲げ耐力  $M_u$  の実験値を用いて算定したひび割れ間隔について、実験値と比較した。

$$f_b = 6 \cdot M_{cr} / (bh^2) \quad \dots \dots \dots (10)$$

ここに、 $M_{cr}$ ：はりのひび割れ発生モーメントである。

以下には、ひび割れ間隔の算定を行った結果を示す。なお、既に発生したひび割れの間隔が算定されるひび割れ間隔の2倍を下回ると、隣接するひび割れ間に新たなひび割れが発生しないことになる。したがって、最終的に推定されるひび割れ間隔は、算定されるひび割れ間隔から、その2倍の範囲に存在すると考えられる<sup>3)</sup>。

先ず、図-9に、コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張応力を考慮しないで、鉄筋との付着作用に基づく引張応力のみを用いて、表-1に示したすべてのはり供試体のひび割れ間隔を算定した結果を示す。この図によると、特に、本実験の鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体や基準鉄筋コンクリートはり供試体の場合に、計算値の方が実験値よりも大きくなる傾向が認められる。

図-10は、表-1に著者の実験Ⅰとして示す基準鉄筋コンクリートはり供試体4体を例に採り上げ、ひび割れ間隔と引張鉄筋比  $\rho$  との関係を示したものである。この図には、鉄筋との付着作用に基づく引張応力のみを要因として考慮した計算Ⅰによる推定範囲と、計算Ⅰで考慮した引張応力およびコンクリートに作用する圧縮合力の偏心に基づく引張応力の両方の要因を考慮した計算Ⅱによる推定範囲が示してある。実験値は、鉄筋との付着作用に基づく引張応力のみを考慮した計算Ⅰによる推定範

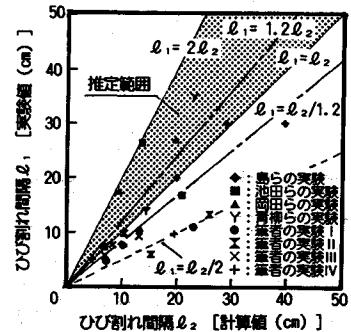


図-9 圧縮合力の偏心に基づく引張応力を考慮しない場合のひび割れ間隔の実験値と計算値との関係

図に入ることなく、圧縮合力の偏心に基づく引張応力も考慮した計算Ⅱによる推定範囲、すなわち計算値からその2倍という前述した範囲に入っている。このことと図-9に示した結果は、ひび割れ間隔を算定する際に、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響を考慮する必要のあることを示唆していると考えられる。同時に、提案する方法の計算Ⅱによる計算値（最小の推定値）は、引張鉄筋比  $\rho$  の増大とともにひび割れ間隔が徐々に小さくなるという本章の(1)に述べた実験値の傾向をほぼ表していると考えられる。

図-11は、鉄筋ポリマー含浸コンクリートはり供試体の中から、引張鉄筋比  $\rho$  が1.72%のはり供試体を例に採り上げ、そのひび割れ発生状況を示した図-8(d), 図-8(f)および図-8(h)より求めたひび割れ間隔と鋼織維混入率との関係を示したものである。この図にも、前述した図-10の場合と同様の計算Ⅰおよび計算Ⅱの推定範囲が示してある。この場合の実験値も、圧縮合力の偏心に基づく引張応力を考慮した計算Ⅱによる推定範

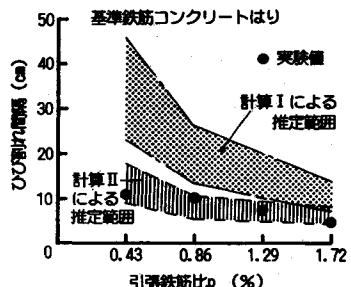


図-10 ひび割れ間隔と引張鉄筋比との関係

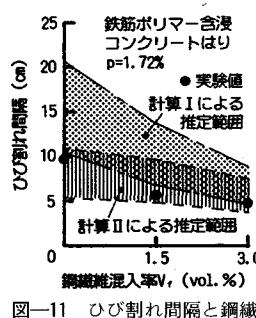


図-11 ひび割れ間隔と鋼纖維

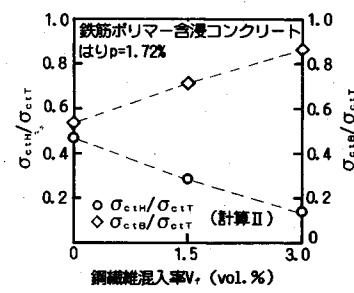


図-12 はりの引張縁に発生する全引張応力  
の内訳と鋼纖維混入率との関係

因に入っている。そして、提案する方法の計算Ⅱによる計算値は、鋼纖維混入率の増大とともにひび割れの分散性が徐々によくなるという本章の(1)に述べた実験値の傾向をおおむね表していると考えられる。なお、計算Ⅰと計算Ⅱによる推定範囲が図-10に比べて近づいているのは、引張鉄筋比  $\rho$  が 1.72% と大きいことに加えて、鋼纖維を混入したことが、圧縮強度の上昇よりも、鉄筋との付着強度の上昇に貢献しているためと考えられる。

図-12には、図-11の計算Ⅱによるひび割れ間隔を算定した時点において、圧縮合力の偏心に基づく引張応力  $\sigma_{ctH}$  と、鉄筋との付着作用に基づく引張応力  $\sigma_{ctB}$  がはりの引張縁に発生する全引張応力  $\sigma_{ctT}$  に占める割合を示している。鋼纖維混入率の増大に伴って、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の割合は小さくなり、鉄筋との付着作用に基づく引張応力の割合が大きくなる傾向となっている。この鋼纖維混入率の増大とともに付着作用に基づく引張応力の影響が大きくなる傾向と、ひび割れ間隔の実験値が図-11に示した提案する方法の推定範囲にあることを考え合わせると、鋼纖維の混入により鉄筋との付着作用が高まるとする考え方をおおむね妥当であると思われる。ただし、鋼纖維の効果を表す式(8)中の  $0.8 \cdot V_f$  については、使用材料等の条件が異なる場合にはさらに検討を要すると考えられる。

一方、表-1 および図-9 に示したいずれのはり供試体の場合も、ひび割れ間隔の実験値のはり高さに対する比が 0.25 より大きく、式(3)によると、ひび割れ間隔が圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響を受ける可能性が高いと考えられる。しかし、その影響度は、図-9～図-11 に示したひび割れ間隔の算定結果から、はり高さ、引張鉄筋比、コンクリート強度、鉄筋径、かぶり等の要因によって変化するものと推察される。そこで、これらの要因の値が変化した場合の影響について、数値解析を用いて検討することにした。ここで数値解析を用いるのは、各要因の値が単独に変化する場合およびいくつかの要因の値が同時に変化する場合の影響を、ある一定の条件下で検討することができると考えられるためである。

ある。そして、各はりの曲げ耐力  $M_u$  は、鉄筋のひずみ硬化を考慮した島ら<sup>10)</sup>の方法により算定した。コンクリートの曲げ強度については、式(11)に示す前記のコンクリート標準示方書<sup>6)</sup>における材料係数  $r_c$  を 1.0 とした設計曲げ強度  $f_{bd}$  を用いた。なお、以下に示す数値解析は、すべてはり幅を 20 cm として行っている。

はり高さの影響を検討する際には、式(6)に示す付着強度  $f_{bod1}$  が同一となるように  $k_c = c/\phi$  を 1.6 に固定して、次の 2 つの前提条件の下に数値解析を行った。前提条件 I は、引張鉄筋量が一定となるように同じ鉄筋を同一本数用い、かぶり  $c$  も変えないではり高さのみを変えるものである。すなわち、はり高さの増大に伴い、引張鉄筋比  $\rho$  は小さくなることになる。これに対し、前提条件 II は、引張鉄筋比  $\rho$  と鉄筋本数を一定とし、はり高さを変えるものである。この場合、 $k_c = c/\phi$  を一定としているため、かぶり  $c$  と引張鉄筋径  $\phi$  は、はり高さの増大に伴って大きくなることになる。

図-13は、はり高さがひび割れ間隔に及ぼす影響を、前提条件Iの計算例で示したものである。はり高さが60cm程度までは、はり高さが高くなり、引張鉄筋比が小さくなるに従って、ひび割れ間隔は増大する傾向を示している。しかし、はり高さが60cm程度以上の高さになると、ひび割れ間隔は一定となっている。

前述した図-13のひび割れ間隔を算定した時点において、圧縮合力の偏心に基づく引張応力  $\sigma_{ctH}$  がはりの引張縁に発生する全引張応力  $\sigma_{ctT}$  に占める割合を示すと、図-14のようになる。はり高さが高くなり、引張鉄筋比  $\rho$  が小さくなるに従い、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の占める割合は小さくなる傾向にある。そして、はり高さが約 60 cm 以上になると、鉄筋との付着作用に基づく引張応力のみによって、ひび割れが発生することになる。この傾向は、コンクリートの圧縮強度が 20 N/mm<sup>2</sup> および 60 N/mm<sup>2</sup> のいずれの場合にも認められる。したがって、はり高さの低いはりのひび割れ間隔を算定する際に、圧縮合力の偏心に基づく引張応力  $\sigma_{ctH}$  の影響が無視できなくなるものと思われる。

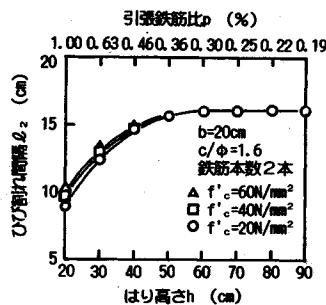


図-13 はり高さがひび割れ間隔に及ぼす影響

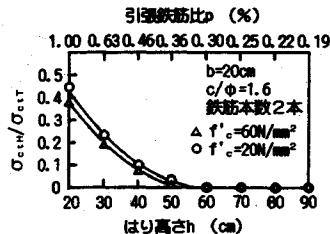
図-14 圧縮合力の偏心に基づく引張応力がはりの引張縁に発生する全引張応力に占める割合 ( $\sigma_{ctH}/\sigma_{ctT}$ ) とはり高さとの関係

図-15は、はり高さと引張鉄筋比  $p$  がひび割れ間隔に及ぼす影響について、前提条件Ⅱの計算例を示したものである。引張鉄筋比  $p$  を 0.4% とした場合には、ひび割れ間隔は、はり高さが高くなるに従い、増大する傾向を示している。これに対し、引張鉄筋比  $p$  を 0.8% とした場合のひび割れ間隔は、はり高さが 60 cm 程度までは、はり高さが高くなるに従って増大しているが、それ以上の高さになると、一定値になっている。また、ひび割れ間隔は、引張鉄筋比  $p$  を 0.8% とした場合が 0.4% とした場合に比べて小さくなっている。そして、はり高さが低い時には、両者の差は小さくなる傾向にあり、引張鉄筋比  $p$  の増大とともにひび割れ間隔は徐々に小さくなることが推測される。このことは、図-10に示した実験値の傾向とも、おおむね一致しているものと思われる。さらに、コンクリートの圧縮強度が高くなるのに伴い、ひび割れ間隔は大きくなる傾向が認められる。この傾向については、はり高さが低く、引張鉄筋比  $p$  が小さい場合に顕著に認められるようである。なお、引張鉄筋比  $p$  は、本実験のはり供試体の場合と同様に、同一の高さのはりに対し、有効高さを同一として同じ鉄筋を用い、鉄筋本数を変えることにより、変化させている。

図-16には、圧縮合力の偏心に基づく引張応力  $\sigma_{ctH}$  がはりの引張縁に発生する全引張応力  $\sigma_{ctT}$  に占める割合に対して、はり高さおよび引張鉄筋比  $p$  が及ぼす影響を前提条件Ⅱの計算例で示してある。この図に示す全引張応力  $\sigma_{ctT}$  も、図-12 および図-14 の場合と同様に、コンクリートの曲げ強度に達した時の値である。前提条件

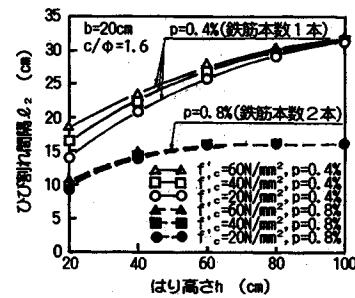
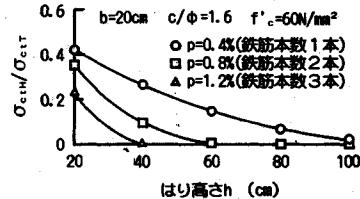
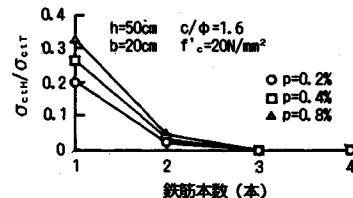


図-15 はり高さと引張鉄筋比がひび割れ間隔に及ぼす影響

図-16 圧縮合力の偏心に基づく引張応力がはりの引張縁に発生する全引張応力に占める割合 ( $\sigma_{ctH}/\sigma_{ctT}$ ) とはり高さとの関係図-17 圧縮合力の偏心に基づく引張応力がはりの引張縁に発生する全引張応力に占める割合 ( $\sigma_{ctH}/\sigma_{ctT}$ ) と鉄筋本数との関係

件Ⅰの場合と同様に、はり高さが低くなるに従い、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の占める割合は大きくなる傾向が認められる。また、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の割合を同一のはり高さで比較すると、その割合は引張鉄筋比  $p$  が小さいほど大きくなる傾向にある。ただし、これは、前述した図-15の場合と同じ方法で引張鉄筋比  $p$  を変化させていることから、鉄筋の全断面積と全周長との比が一定であることを前提としている。さらに、ひび割れ間隔が圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響をほとんど受けなくなる時のはり高さは、引張鉄筋比  $p$  が大きくなるに従い、低くなる傾向を示している。そして、図-16と同様の傾向は、コンクリートの圧縮強度  $f'_c$  が 20 N/mm<sup>2</sup> および 40 N/mm<sup>2</sup> の場合にも認められた。

図-17は、高さが 50 cm のはりに対し、かぶり  $c$  と鉄筋の直径  $\phi$  との比  $k_c = c/\phi$  を 1.6 に固定し、引張鉄筋比  $p$  を同一として鉄筋本数を変えた場合について、圧縮合力の偏心に基づく引張応力  $\sigma_{ctH}$  がはりの引張縁に発生する全引張応力  $\sigma_{ctT}$  に占める割合の計算例を示したものである。鉄筋本数の減少に従い、ひび割れ間隔の

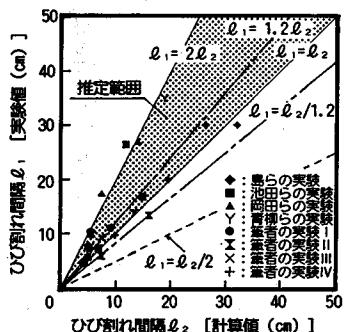


図-18 圧縮合力の偏心に基づく引張応力を考慮した場合のひび割れ間隔の実験値と計算値との関係  
(5次関数で近似した係数  $C_{cl}$  を使用)

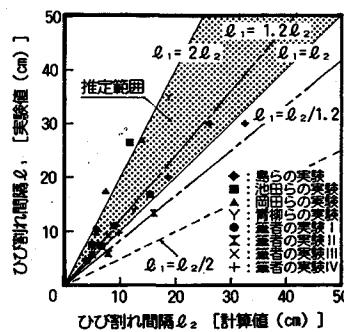


図-19 圧縮合力の偏心に基づく引張応力を考慮した場合のひび割れ間隔の実験値と計算値との関係  
(1次関数で近似した係数  $C_{cl}$  を使用)

算定値に及ぼす圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響が増大する傾向が認められる。これは、引張鉄筋比  $p$  が同一という条件下において、鉄筋本数の減少に従い、鉄筋の全周長が小さくなり、付着作用によって伝達される引張応力が相対的に小さくなることによると考えられる。したがって、この計算例のように、高さが比較的高いはりにおいても、コンクリートと鉄筋との付着作用があまり卓越しない場合には、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響を受けるものと考えられる。この1例としては、1本の異形鉄筋 D 19 を引張鉄筋に用いたはりであり、図-9に示すように、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の影響を無視すると、実験値と計算値との比が約 0.76 となる表-1に示した島ら<sup>10)</sup>の供試体 No.5 のようなはりが、該当するものと思われる。

図-18には、鉄筋との付着作用に基づく引張応力と、圧縮合力の偏心に基づく引張応力の両方を考慮して、表-1に示したすべてのはり供試体のひび割れ間隔を算定した結果を示してある。なお、この図の計算値を求める際にも、鉄筋との付着作用に基づく引張応力のみを考慮してひび割れ間隔を算定した図-9の場合と同様に、ひび割れ発生モーメント  $M_{cr}$  の実験値から算出したコンクリートの曲げ強度を用いている。図-18によると、実験値は推定範囲である計算値からその2倍の範囲におおむね入っている。したがって、圧縮合力の偏心に基づく引張応力を考慮することにより、本研究で対象としたような広範囲の鉄筋コンクリートはりにおいても、ひび割れ間隔を比較的精度よく推定できるものと考えられる。

以上のひび割れ間隔の計算値を求めるに当たっては、圧縮合力の偏心に基づく引張応力を算定するための係数  $C_{cl}$  として、 $x = (\ell_{cr}/2 h)$  を変数とした式(3)に示す5次関数により近似したものを用いている。この5次関数は、図-6に示した関係を比較的精度よく近似できるものと考えられるが、実用的な関数とはいえない。図-19は、式(12)に示す1次関数により近似した係数  $C_{cl}$

を用いて、ひび割れ間隔を算定した結果を示したものである。この図-19と前述の図-18を比較すると、両者間に顕著な差は認められない。このため、ひび割れ間隔の算定に用いる係数  $C_{cl}$  は、 $x = (\ell_{cr}/2 h)$  を変数とした式(12)のような1次関数により、実用上、表すことができるものと考えられる。

$$\left. \begin{aligned} C_{cl} &= 0.0 && (0.0 \leq x \leq 0.215) \\ &= 1.4x - 0.3 && (0.215 < x < 0.928) \\ &= 1.0 && (0.928 \leq x) \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

## 5. 結 論

本研究では、高引張強度コンクリートであることを利用した鉄筋ポリマー含浸コンクリートはりのような薄肉部材を主な対象として、鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔の算定方法について検討した。このため、ひび割れ間隔に及ぼすはり高さ等の要因の影響についても、数值解析を主体に検討した。本研究の範囲において、次のような結論を得た。

(1) ひび割れ間隔の算定方法として、鉄筋との付着作用によりはりの引張縁のコンクリートに伝達される引張応力という従来の要因に加えて、新たにコンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張応力を考慮する方法を提案した。このひび割れ間隔算定方法では、両方の要因に基づく引張応力の合計がコンクリートの曲げ強度を超えた時に、隣接するひび割れ間に新たなひび割れが発生するものと仮定している。そして、提案する方法によると、プレーンコンクリートのみならず、鋼纖維を混入したポリマー含浸コンクリートのような高引張強度コンクリートを用いた場合に至るまで、広範囲な鉄筋コンクリートはりのひび割れ間隔を、比較的精度よく推定できることが明らかとなった。

(2) コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張応力は、平面保持の仮定を用いる棒部材の線形弾性計算から求まる引張応力に、コンクリートのせん断変形を考慮した低減係数を乗じた値と

して示される。この係数は、ひび割れ間隔のはり高さに対する比を変数として表示すると、他の要因の影響をほとんど受けないことがわかった。

(3) コンクリートのせん断変形を考慮した引張応力の低減係数は、ひび割れ間隔のはり高さに対する比を変数とした1次関数により、実用上、表すことができるものと考えられる。

(4) コンクリートに作用する圧縮合力が偏心していることにより発生する引張応力の影響は、特に高さの低いはりのひび割れ間隔を算定する際に無視できなくなるものと考えられる。

(5) 高さが比較的高いはりにおいても、鉄筋の全断面積に比較して全周長が小さく、コンクリートと鉄筋との付着作用があまり卓越しない場合には、圧縮合力の偏心に基づく引張応力がひび割れ間隔の算定値に影響を及ぼすものと考えられる。

**謝辞：**本論文は、学位論文の一部を中心にしてまとめたものである。主査をして頂いた東京大学工学部土木工学科教授 岡村 甫先生には、貴重なご助言ならびにご指導を賜りました。ここに、深く感謝の意を表します。また、実験にご尽力頂いた秩父セメント(株)の中央研究所開発部の奥山康夫氏、村上和幸氏ならびに渡邊武生氏の各位に、感謝致します。

## 参考文献

- 1) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれたわみに関する研究の現状、土木学会論文集、第384号/V-7, pp.21~32, 1987年8月。
- 2) 岡村 甫・前田詔一：鉄筋コンクリート工学、市ヶ谷出版社、pp.98~102, 1987年。

- 3) Beeby, A.W. : The Prediction of Crack Widths in Hardened Concrete, The Structural Engineer, Vol.57A, No.1, pp.9~17, Jan., 1979.
- 4) 来海 豊・奥山康夫・村上和幸：力学的性状の異なる材料を用いた鉄筋コンクリート部材の構造解析に関する実験的研究、コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム論文集、pp.51~58, 1990年3月。
- 5) 吉本 彰：コンクリートの変形と破壊、学叢社、pp.146~161, 1990年。
- 6) 土木学会：平成3年版 コンクリート標準示方書・設計編。
- 7) 六車 熙・森田司郎：鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究、日本建築学会論文報告集、第134号、pp.1~8, 1967年4月。
- 8) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針(案)、コンクリートライブラリー第50号、1983年3月。
- 9) Ertürk, T. and Tokyay, M. : Interfacial Failure in Steel Fiber Reinforced Polystyrene Impregnated Mortar, International Conference on Mechanical Behavior of Materials-4, Vol.1, pp.507~515, 1984.
- 10) 島 弘・二羽淳一郎・岡村 甫：曲げを受ける低鉄筋比はりにおける脆性破壊の防止に関する検討、土木学会論文集、第378号/V-6, pp.231~237, 1987年2月。
- 11) 池田尚治・山口隆裕・後藤康之：鉄筋比の小さい鉄筋コンクリートはりの曲げ拳動に関する研究、コンクリート工学論文集、第1巻、第1号、pp.51~59, 1990年1月。
- 12) 岡田 清・小林和夫・矢村 潔・平井正樹：レジンコンクリートの補強に関する2, 3の実験、セメント技術年報、22, pp.502~506, 1968年。
- 13) 青柳征夫・阿部博俊・金津 努：低温度下における鉄筋コンクリート曲げ部材の力学的特性、電力中央研究所報告、研究報告:379015, 1979年12月。

(1992.6.10 受付)

## A METHOD FOR ESTIMATING CRACK SPACINGS OF REINFORCED CONCRETE FLEXURAL MEMBERS

Yutaka KIMACHI

A method for estimating crack spacings of reinforced concrete beams subject to flexure is proposed. In the proposed method, it is assumed that the tensile extreme fiber stress of concrete between each pair of adjacent cracks is caused by the sum of two tensile stresses. The one is the tensile stress of concrete based on the model of uniaxial tensile test of the reinforced concrete prism. The other is the tensile stress of concrete caused by the compressive resultant force acting eccentrically on the concrete at the cracked section. It is presented that the crack spacings of reinforced concrete beams can be estimated with relatively good accuracy by the proposed method.