

論文 連続繊維補強材によるRCはりの曲げひび割れ幅の制御に関する基礎研究

栗原 貢介^{*1}・李 春鶴^{*2}・郭 度連^{*3}・辻 幸和^{*4}

要旨：ひび割れ幅の制御が期待されるネット状連続繊維補強材を用いて、連続繊維の配置枚数およびコンクリートの強度を変化させて曲げひび割れ幅の抑制効果等を実験的に検討した。その結果、連続繊維を配置することで、連続繊維が引張力を負担し、曲げひび割れ発生荷重やひび割れ幅等の曲げ性状が向上すること、連続繊維の配置枚数を増やすことでひび割れ幅の抑制効果を効率的に得られ、ひび割れを分散させて発生させる効果が高められること、コンクリートの強度がひび割れ幅の抑制に及ぼす影響は小さいことが、それぞれ明らかになった。

キーワード：RCはり、曲げ性状、ネット状連続繊維補強材、曲げひび割れ幅

1. はじめに

連続繊維補強材は、軽量でかつ耐食性・耐薬品性に優れている等の理由から、耐久性の高い材料と言われている。また、連続繊維の形状を格子状にすることで、コンクリートとの付着が格子交差部で確保できるため、付着効果を大きくすることができる。そのため、塩害や中性化などによる鋼材の腐食が深刻となっている鉄筋コンクリート構造物へ適用することで、弱点の克服がなされている^{1), 2)}。現在、連続繊維の形状を格子状にしたまま、ネット状の連続繊維補強材が開発されている。この連続繊維は、格子状連続繊維補強材ほどの補強効果は必要としないが、施工が容易等の特徴を有する補強材である。また、鉄筋とともに配置することで、ひび割れを低減し、コンクリートとの付着も優れているものである。しかしながら、この連続繊維補強材を配置したRCはりの曲げ性状については、ほとんど報告されていない。

そこで、本文では、曲げひび割れ幅の制御を主目的としたネット状連続繊維補強材を鉄筋とともに配置したRCはりの曲げひび割れ性状を実験的に検討した結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体

ネット状連続繊維補強材(以降、連続繊維と略称する。)の配置枚数を変え、普通コンクリート(NHNシリーズ)および高強度コンクリート(HPNシリーズ)を用いたRCはり供試体を作製し、載荷試験を行なった。作製した供試体の概要を表-1に示す。普通コンクリートおよび高強度コンクリートの目標圧縮強度を、それぞれ24

N/mm²、50 N/mm²とし、連続繊維で配置していない無補強供試体の他に、連続繊維の配置枚数を1枚および、コンクリートとの付着面積を増加させるため3枚に増やした供試体を作製した。はり供試体名は、コンクリートの強度-繊維の配置枚数となるようにした。

供試体の形状寸法を図-1に示す。長さが3000mm、高さが300mm、幅が300mmの矩形断面とした。連続繊維は、幅150mmのものを使用した。また、非常に柔軟性がある素材であるため、コンクリートの打込み中に重みにより形状が半分に折り曲がり、かぶりを覆うように変形して配置した。そのため、連続繊維の折り曲がり後の幅を考慮して、引張鉄筋の位置を下縁から85mmとした。

載荷は、等曲げモーメント区間を800mm、支点間隔を2400mmとした2点載荷により行なった。作製した供試体は、材齢1日で脱型し、材齢28日まで湿布養生を行ない、材齢31日から42日の間で載荷試験を行なった。はりの他に、強度試験用供試体を各シリーズ6体ずつ作

表-1 供試体概要

はり供試体名	繊維枚数 (枚)	目標圧縮 強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)
NHN-0	0	24	12
NHN-1	1		
NHN-3	3		
HPN-0	0	50	
HPN-1	1		
HPN-3	3		

*1 群馬大学大学院 工学研究科社会環境デザイン工学専攻 (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科 博士(工学) (正会員)

*3 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

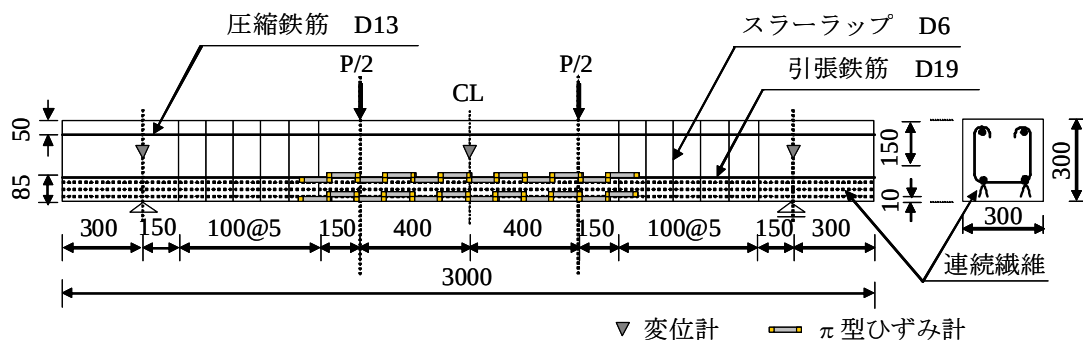


図-1 はり供試体の形状寸法および計測位置

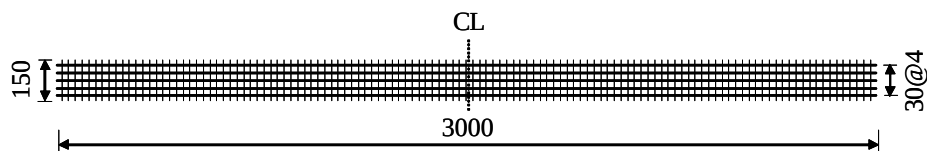


図-2 ネット状連続繊維の形状寸法



写真-1 連続繊維の外観

表-2 鉄筋の力学特性

種類	種類の記号	呼び名	ヤング係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
引張鉄筋	SD345	D19	182.2	389.9
圧縮鉄筋	SD345	D13	195.9	356.0
スターラップ	SD345	D6	167.8	356.8

表-3 連続繊維の力学特性と形状寸法

項目	規格	測定方法
公称質量 (g/m ²)	300±20	JIS L 1096
樹脂含有量 (%)	20±3	JIS L 1096
引張強さ (N/幅)	11,000 以上	JIS L 1096
弾性係数 (N/mm ²)	74.0	JIS L 1096
幅 (mm)	150±7	JIS L 1096
メッシュの大きさ (mm)	30×30±8	JIS L 1096

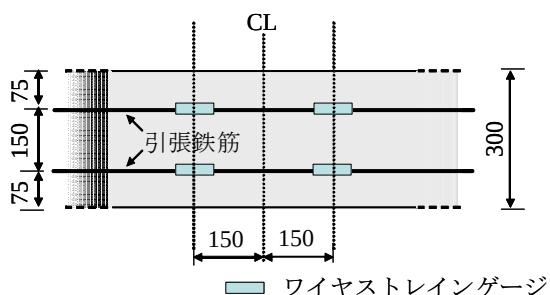


図-3 鉄筋のひずみの測定位置

製し、3体は標準養生、3体はRCはりと同様に湿布養生し、標準養生したものは材齢28日で圧縮試験を行い、湿布養生したものはRCはり載荷試験材齢に圧縮試験を行った。

2.2 使用材料

表-2に鉄筋の力学的特性を、表-3に連続繊維の力学的特性と形状寸法をそれぞれ示す。また、図-2には使用した連続繊維の形状寸法を、写真-1には連続繊維の外観をそれぞれ示している。引張鉄筋にはD19を2本、圧縮鉄筋にはD13を2本、せん断補強筋にはD6を100mm間隔でそれぞれ配置した。

連続繊維には、耐アルカリ性ガラス繊維を用いた、表

3にも示したような、幅が150mm、メッシュの大きさが30mm×30mmの一軸方向に配向している連続繊維を、2本の引張鉄筋の下部にそれぞれ固定して配置した。連続繊維は、非常に柔軟性があるため、コンクリート打込み中にコンクリートの重みにより連続繊維が半分折り曲がるように、形状を変化するように配置した。また、3枚配置する際には、メッシュ部が重なるように積層させて配置した。

コンクリートの打込みは、NHNシリーズおよびHPNシリーズともに、目標圧縮強度がそれぞれ24N/mm²、50N/mm²、スランプが12cmとなるレディーミクストコンクリートを用いた。

2.3 測定方法

ひび割れ幅は、コンクリートの側面にπ型ひずみ計を

表－4 ひび割れ発生，主鉄筋降伏，最大時荷重および破壊形式

供試体名	繊維枚数 (枚)	目標圧縮強度 (N/mm ²)	荷重 (kN)			破壊形式
			ひび割れ発生 ^{a)}	主鉄筋降伏 ^{b)}	最大時	
NHN-0	0	24	27.5	117.8	126.7	曲げ引張
NHN-1	1		34.4	128.3	131.9	曲げ引張
NHN-3	3		33.3	134.7	140.6	曲げ引張
HPN-0	0	50	37.0	122.5	160.7	曲げ引張
HPN-1	1		44.5	133.2	150.7	曲げ引張
HPN-3	3		48.3	156.6	170.3	曲げ引張

a) 供試体側面に貼付した π 型ひずみ計の急変点により判定

b) 引張鉄筋に貼付したワイヤストレインゲージの急変点により判定

貼付して計測した。 π 型ひずみ計は，図－1 に示すように，引張鉄筋位置およびコンクリート下縁から 10mm の位置のはり側面にも貼付した。

たわみの測定には，変位計を供試体中央部および片面の支点位置の計 4 箇所に配置した。中央部に配置した値から，支点到に配置した平均値を差し引いたものをたわみの値とした。

また，引張鉄筋のひずみは，図－3 に示すように，引張鉄筋の中央部から 150mm の位置に，それぞれゲージ長が 6mm のワイヤストレインゲージを貼付し，それら 4 枚の平均値をとった。

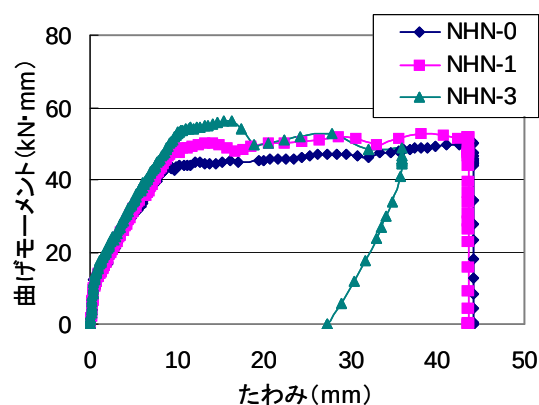
3. 荷重および破壊形式

表－4 に，ひび割れ発生時，主鉄筋降伏時および最大時の荷重並びに破壊形式を示す。ひび割れ発生荷重の判定には，供試体側面に貼付した π 型ひずみ計の測定値の中でひび割れ発生に伴い最も低い荷重で急変した点を，主鉄筋降伏時荷重の判定には，引張主鉄筋に貼付したワイヤストレインゲージの測定値の中で最も低い荷重で急変した点を，それぞれ基準とした。また，圧縮強度は，はり供試体と同時に作製し，同等な養生をさせた強度試験用供試体各 3 体の平均値とした。

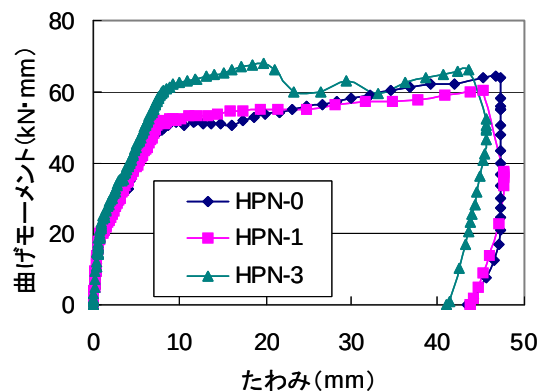
作製した供試体 6 体すべてで，まず曲げひび割れが等曲げモーメント区間に発生し，更に別の曲げひび割れが等曲げモーメント区間およびせん断スパン内に発生した。その後，引張鉄筋が降伏し，最終的に圧縮縁のコンクリートが圧縮破壊する曲げ引張破壊を生じた。

ひび割れ発生荷重は，連続繊維を 3 枚配置することで NHN シリーズでは 5.8kN、HPN シリーズでは 11.3kN，また，主鉄筋降伏荷重の場合も，NHN シリーズでは 17kN，HPN シリーズでは 30kN 以上の荷重増加が確認できた。これは，連続繊維が引張力を分担することで，ひび割れ発生荷重および引張鉄筋の降伏荷重が増加したと考えられる。

高強度コンクリートでは普通コンクリートに比べて，



(a) NHNシリーズ



(b) HPNシリーズ

図－4 たわみー曲げモーメント関係

無配置時の降伏時荷重が 4.7kN 増加したのに対して，連続繊維を 3 枚配置時に 21.9kN の増加が認められた。これより，3 枚配置することで強度による影響を受けることが認められた。

4. はり供試体のたわみ抑制効果

たわみと曲げモーメントの関係を図－4 に示す。連続繊維の配置による初期ひび割れ発生から引張鉄筋降伏時までのコンクリートのたわみは，NHN シリーズおよび HPN シリーズともに，剛性の増加が認められるものの，その増加は微小であるため，連続繊維の配置によるたわみの抑制効果は小さい。

引張主鉄筋の降伏後、連続繊維を3枚配置したはりで、たわみが15～20mm程度で曲げモーメントの低下が確認された。これは、連続繊維の破断であると考えられる。連続繊維を1枚配置のはりでは、引張主鉄筋の降伏後に連続繊維が破断することで、連続繊維が無配置の場合と同程度にたわむため、1枚配置ではたわみ抑制効果が小さいと考えられる。一方、3枚配置では主鉄筋が降伏し、連続繊維が1枚破断して曲げモーメントが低下した後も、その曲げモーメントを保ちながらたわみが増加している。これは、3枚配置することで、連続繊維が1枚破断しても他の連続繊維はコンクリートとの付着を保持して引張力を分担しているためであると考えられる。これより、1枚配置では引張主鉄筋降伏後すぐに連続繊維が破断してしまったため、たわみ抑制効果は無配置の場合と差はないことが確認された。たわみが40mmを超えると、変位計が伸びきったため計測を終了とした。

以上のことより、連続繊維を複数枚配置することで、主鉄筋の降伏から連続繊維の破断までのたわみを抑制することが出来ることが認められた。

エネルギーの定義を「荷重 $P \times$ たわみ δ 」としたとき、3枚配置時の1枚目の連続繊維が破断するたわみ20mm程度まででは、連続繊維を複数枚配置することで、主鉄筋の降伏から連続繊維の破断までのたわみを抑制し、エネルギーを吸収することが出来る。

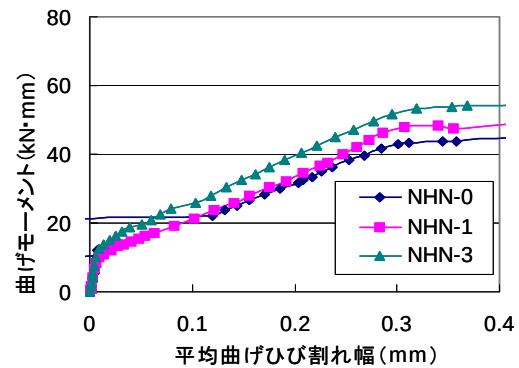
5. 曲げひび割れ幅の抑制効果

平均曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を図-5に、最大曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を図-6にそれぞれ示す。平均曲げひび割れ幅は、供試体の下縁から10mmの位置の等曲げモーメント区間内に貼付した π 型ひずみ計8個の平均値とした。また、最大曲げひび割れ幅は、その中の最大のものとした。

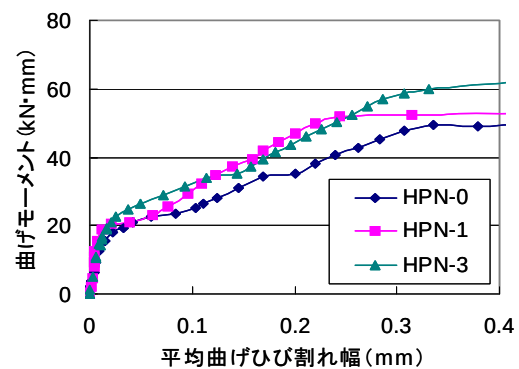
NHNシリーズでは、初期ひび割れ発生までの剛性に大きな差は生じず、連続繊維補強による同曲げモーメントに対する平均曲げひび割れ幅の抑制効果は小さい。しかし、初期ひび割れ発生後の平均ひび割れ幅は、連続繊維を3枚補強することにより、同一曲げモーメントに対してひび割れ幅が抑制されていることが認められる。

高強度コンクリートのHPNシリーズにおいても、初期ひび割れ発生までの効果は小さいものの、ひび割れ発生後は連続繊維の配置により、曲げひび割れ幅の抑制効果が認められる。また、NHNシリーズおよびHPNシリーズにおいて、同様の傾向を示したため強度によるひび割れ幅の抑制効果への影響は小さいと認められた。

このように、連続繊維が供試体下縁まで覆われないため、初期ひび割れ発生までの補強効果が小さいが、ひび割れが進展して連続繊維配置部に到達すると連続繊維

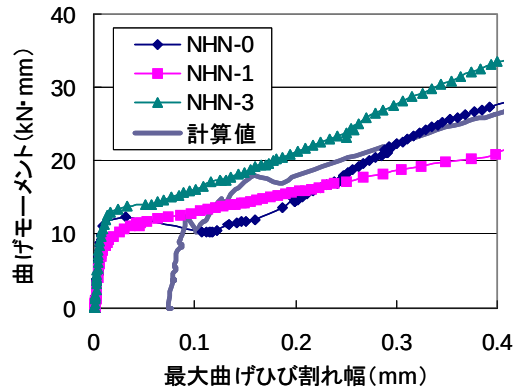


(a) NHNシリーズ

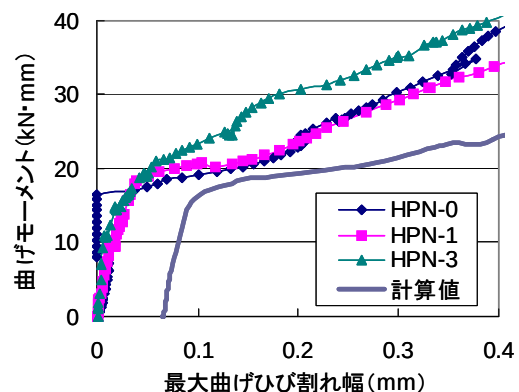


(b) HPNシリーズ

図-5 平均ひび割れ幅－曲げモーメント関係

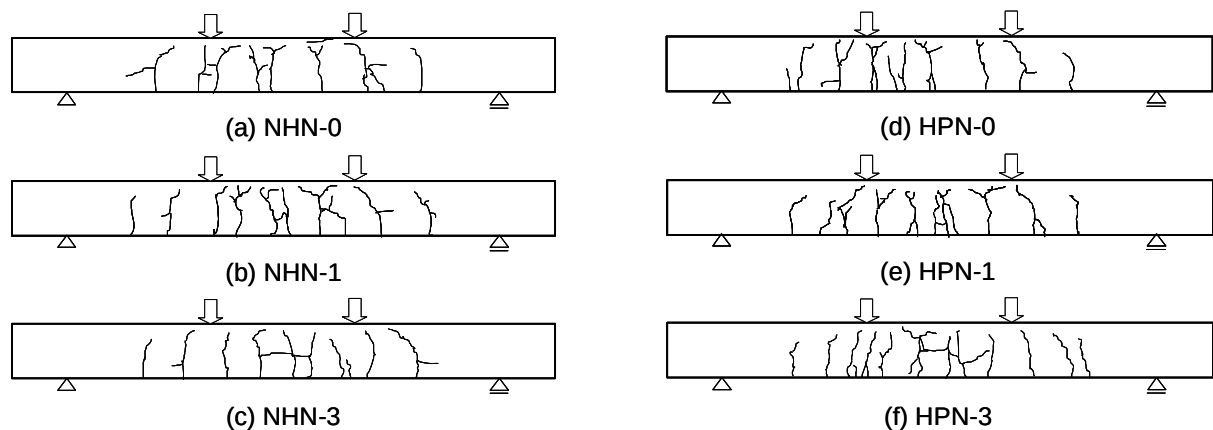


(a) NHNシリーズ



(b) HPNシリーズ

図-6 最大ひび割れ幅－曲げモーメント関係



図ー7 ひび割れの発生状況

が引張力を分担し、ひび割れの進展を抑制するものと考えられる。

図ー6 には、最大ひび割れ幅の計算値も追記している。計算値には、式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書に示されている式より、鉄筋の平均ひずみー平均曲げひび割れ幅関係を求めた後に、最大曲げひび割れ幅と曲げモーメントの関係を求めた^{3), 4)}。

$$W = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_{csd}' \right] \quad (1)$$

ここに、

k_1 ：鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数（異形鉄筋の場合は1.0）、 k_2 ：コンクリート品質がひび割れ幅に及ぼす係数、 k_3 ：引張鋼材の段数の影響を表す係数、 c ：かぶり(mm)、 c_s ：鋼材の中心間隔(mm)、 ϕ ：鋼材径(mm)、 σ_{se} ：鋼材位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加分(N/mm²)、 E_s ：鋼材の弾性係数、 ε_{csd}' ：コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値(普通強度の場合は 150×10^{-6} 、高強度の場合は 100×10^{-6})である。

実験値は、収縮およびクリープを考慮したことで、初期のひび割れ幅が大きく抑制したことが認められる。これは、連続繊維を配置したことと、かぶりが大きかったためと考えられる。連続繊維を無配置の時の実験値と解析値を比較すると、NHNシリーズでは、ひび割れ発生後の挙動が比較的一致していると言える。一方、高強度コンクリートを用いた HPN シリーズでは、実験値に対して計算値が安全側に評価される結果となった。

6. ひび割れの分散効果

終局時の等曲げモーメント区間に発生したひび割れの本数を表ー5 に、ひび割れ発生状況を図ー7 に、それぞれ示す。NHN シリーズでは、連続繊維を配置していない無補強のはりでひび割れが 4 本発生したのに対して、

表ー5 ひび割れの発生本数

供試体名	繊維枚数 (枚)	ひび割れ本数 (本)
NHN-0	0	4
NHN-1	1	5
NHN-3	3	6
HPN-0	0	5
HPN-1	1	6
HPN-3	3	6

連続繊維を 1 枚配置して補強したはりでは 5 本、3 枚配置して補強したはりでは 6 本とひび割れ本数の増加が認められた。また、HPN シリーズの場合も、無補強から 3 枚配置することで、ひび割れ本数は 5 本から 6 本へ増加したことが認められる。

図ー5 および図ー6 より、連続繊維を 3 枚配置することで、平均ひび割れ幅および最大ひび割れ幅がそれぞれ効果的に抑制されることが確認されている。

以上のことより、連続繊維の配置枚数を増やすことにより、連続繊維の断面積が大きくなることでコンクリートとの付着面積が増加し、応力を均一に分散させ、曲げひび割れを効率的に分散させることができると考えられる。

7. まとめ

ひび割れの制御効果が高いと考えられるネット状連続繊維補強材を配置した RC はり供試体を作製し、連続繊維を 1 枚および 3 枚配置した普通コンクリート、高強度コンクリートを用いた RC はりの曲げ性状を比較検討した。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 連続繊維の配置枚数を 3 枚とすることで、連続繊維による引張力の負担分が増し、ひび割れ発生荷重、主鉄筋の降伏荷重、最大荷重は増加することが確認さ

れた。

- 2) 連続繊維を3枚配置時に、コンクリート強度による影響を受けて、主鉄筋降伏時荷重が増加することが認められた。
- 3) 鉄筋降伏までのはりのたわみの抑制には、連続繊維1枚配置では大きな効果を発揮しないものの、3枚配置することで引張鉄筋降伏から連続繊維破断までのたわみの抑制効果が大きかった。これは、連続繊維破断が1枚ずつ生じたためだと考えられる。
- 4) 曲げひび割れ幅の抑制効果は、連続繊維が供試体下縁まで配置されず、ひび割れ発生までの補強効果が小さいと考えられる。しかし、ひび割れが進展して連続繊維配置部に到達すると連続繊維が引張力を分担し、ひび割れの進展に抵抗して、曲げひび割れ幅の抑制に効果があることが認められた。
- 5) 連続繊維を無配置時の曲げひび割れ幅の実験値と計算値を比較した結果、NHNシリーズでは実験値と計算値が一致した。また、HPNシリーズでは計算値が実験値に対して安全側に評価されることが認められた。
- 6) コンクリート強度の違いは、曲げひび割れ幅抑制効果に及ぼす影響はなく、同等の抑制効果が得られた。
- 7) 等曲げモーメント区間内に発生する曲げひび割れの

本数は、コンクリートの強度に関わらず、連続繊維の配置枚数を増やすことでコンクリートへの応力が均一に分散され、ひび割れを効率的に分散させることが認められた。

謝辞

本研究を行なうに当たり、ご助言や資材を提供して頂いた、太平洋マテリアル(株)、実験に協力頂いた本学卒論生・李学炫氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 中島規道，辻 幸和，斎藤 等：FRPを補強材として用いたCPCはりのせん断性状，土木学会年次学術講演会概要集第5部，44巻，pp.584-585，1989年
- 2) 趙 唯堅，丸山久一：格子状連続繊維補強コンクリートはりの曲げひび割れ幅とたわみ評価，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.49-61，1998.2
- 3) 趙 唯堅，丸山久一：鉄筋コンクリートはりのひび割れ幅算定式の再評価，土木学会論文集，No.490/V-23，pp.147-156，1994.5
- 4) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2008.3