

論文 ネット状連続繊維補強材を併用した RC はりの曲げひび割れの抑制に関する評価

李 春鶴^{*1}・杉浦 亮介^{*2}・辻 幸和^{*3}・郭 度連^{*4}

要旨： ネット状連続繊維補強材を適用例とし、鉄筋との併用した RC はりの曲げひび割れ幅の抑制に関する評価を試みた。かぶり、引張鉄筋径、ネット状連続繊維枚数を要因として、曲げひび割れ幅に及ぼす影響を実験的に明らかにし、土木学会式にそれを取り入れることで、ネット状連続繊維補強材を併用した RC はりの曲げひび割れの抑制を評価する方法を提示した。

キーワード： ネット状連続繊維補強材、曲げひび割れ幅、かぶり、引張鉄筋

1. はじめに

鉄筋コンクリート(RC)構造物に生じるひび割れは、構造物の外観を悪くするとともに、耐久性を大きく損なう原因となっている。そのため、構造物を維持・管理するにあたりひび割れは重点事項とされており、ひび割れの発生と幅の予測技術および制御技術の確立が重要とされている。

そのひとつに、ネット状連続繊維補強材(以下、連続繊維と略称する)を使用したひび割れ抑制工法がある。これは、ひび割れの発生する方向がある程度予測可能な箇所における使用を想定して設計されており、引張応力の働く箇所に的確に施工することで効率的にひび割れを抑制できる。また、軽量で運搬や施工が容易なため、擁壁側面やスラブなどの実構造物への使用も多数報告されている。しかし、連続繊維を用いた場合の収縮ひび割れの抑制効果についての研究は多く報告¹⁾されているが、曲げひび割れを対象とした研究事例は少なく、抑制効果のメカニズムを把握し、定量的な評価方法を確立することが必要である。

既往の研究によれば、連続繊維を RC はりの引張鉄筋に積層させて配置することで曲げひび割れの分散性やひび割れ幅の抑制効果があり、曲げ性状が向上することおよび打込み時における連続繊維の形状変化は、ひび割れの抑制効果に影響が少ないことが確認できた²⁾。また、連続繊維を RC はりに使用した際の曲げひび割れの抑制効果は鉄筋比と密接な関係があり、ひび割れ幅およびひび割れの分散性を表す指標を用いた定量的な評価方法も考案されている³⁾。

本研究では、連続繊維による曲げひび割れの抑制効果の定量的な評価とデータの蓄積、検討項目の拡張を目的とし、鉄筋と併用して配置した連続繊維が、かぶりと引

張鉄筋径を要因とった RC はりに及ぼす影響を実験により検討し、連続繊維を配置した RC はりの曲げひび割れの抑制を評価する方法を提示する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

作製した供試体一覧を表-1 に示す。コンクリートの圧縮強度を 24N/mm^2 とし、かぶり、引張鉄筋、連続繊維の配置枚数を変化させた RC はり供試体を 12 体作製した。供試体名の第 1 項は、供試体のかぶりにより「C35」、「C70」とし、第 2 項で引張鉄筋の径の違いにより「D16」、「D19」とする。また、第 3 項では連続繊維の配置枚数により「0」、「1」、「2」を付記した。

供試体の形状寸法および計測位置を図-1 に示す。供試体は、高さを 300mm、幅を 300mm、長さを 1500mm の矩形断面とした。連続繊維の長さは、はりの長さと同じ 1500mm とした。連続繊維の形状および配置方法を図-2 および図-3 にそれぞれ示す。連続繊維の配置方法は、引

表-1 供試体の概要

供試体名	引張鉄筋のかぶり (mm)	引張鉄筋の呼び名	繊維枚数 (枚)	引張鉄筋比 (%)	連続繊維/鉄筋断面面積比 (%)
C35D16-0	35	D16	0	0.52	—
C35D16-1			1		4.28
C35D16-2			2		8.56
C35D19-0		D19	0	0.75	—
C35D19-1			1		2.97
C35D19-2			2		5.93
C70D16-0	70	D16	0	0.60	—
C70D16-1			1		4.28
C70D16-2			2		8.56
C70D19-0		D19	0	0.87	—
C70D19-1			1		2.97
C70D19-2			2		5.93

*1 群馬大学大学院 工学研究科助教 博士(工学) (正会員)

*2 (株) ピーエス三菱

*3 群馬大学大学院 工学研究科教授 工学博士 (正会員)

*4 太平洋マテリアル(株) 開発研究所主任研究員 博士(工学) (正会員)

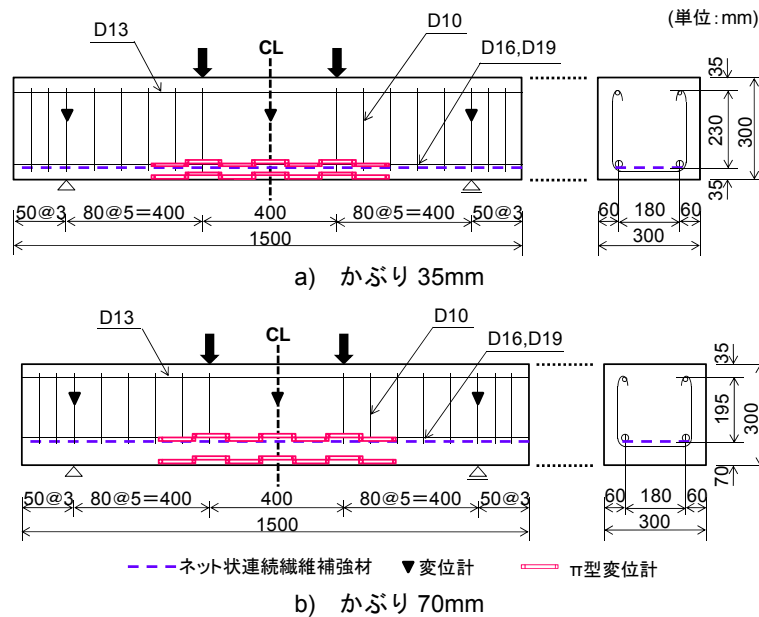


図-1 供試体の形状寸法

張鉄筋に 20cm 間隔で針金を用いて結束をさせ、複数枚用いる場合には、メッシュが重なるように積層させて配置した。また、本実験では壁面に使用することを想定して、打込みの際には横打ちで打ち込む。かぶり部と内部に同時に打ち込むことにより、コンクリートの重さによる連続繊維のネット状の形状変化を防ぐ。打込み終了後、材齢 2 日で脱型し、材齢 103～105 日まで湿布養生を行い、養生終了後荷重を行った。

荷重方法は、等曲げモーメント区間を 400mm、スパンは 1200mm とする 2 点集中荷重とした。

2.2 使用材料

コンクリートはレディーミクストコンクリートを使用し、スランプを 15.0cm、空気量を 4.5%とした。

鉄筋の力学的特性を表-2 に、示す。引張鉄筋には D16 および D19 を 2 本ずつ、圧縮鉄筋には D13 を 2 本、せん断補強筋には D10 をせん断スパン内に 80mm 間隔でそれぞれ配置した。また、定着長の不足を補うため、両支点部の外にせん断補強筋と同等のものを 50mm 間隔で 2 本の合計 4 本配置した。

連続繊維の力学的特性と形状寸法を表-3 に示す。連続繊維は、幅が 210mm、ネット間隔が 30mm×30mm の一軸方向に配向しており、耐アルカリ性ガラス繊維をアクリルの樹脂で束ねたもので作製されている。

2.3 測定方法

曲げひび割れ幅の測定には、供試体側面に測定長が 100mm の π 型変位計を供試体側面の引張鉄筋位置と引張縁から 10mm の位置にそれぞれ 7 箇所貼付して測定を行った。

鉄筋のひずみ測定には、測定長が 6mm のワイヤストレーンゲージを供試体中央部の鉄筋の下面に貼付して

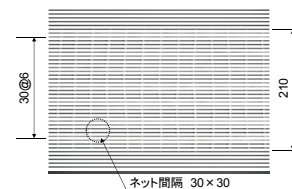


図-2 連続繊維の形状

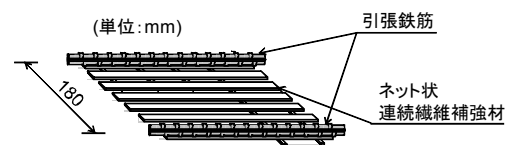


図-3 連続繊維の配置方法

表-2 鉄筋の力学的特性

種類	呼び名	材質	弾性係数 (kN/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
せん断補強鉄筋	D10	SD295	203.3	357.5
圧縮鉄筋	D13	SD295	192.7	347.3
引張鉄筋	D16	SD295	181.2	343.3
	D19	SD345	202.9	397.9

計した。引張鉄筋は供試体中央部に 100mm 間隔で 2 枚、圧縮鉄筋は供試体中央部に 1 枚貼付した。

コンクリートのひずみ測定には、測定長が 60mm のコンクリートゲージを使用した。引張縁には幅方向に 100mm 間隔で 3 枚貼付する。圧縮縁には、中央部に 75mm 間隔で 3 枚貼付した。

たわみの測定には、変位計を用い、供試体中央部の両面および支点の片面の計 4 箇所配置した。中央部に配置した 2 個の変位計の平均値から、支点に配置した変位計の平均値を差し引いたものを、たわみとした。

曲げ強度試験は、100mm×100mm×400mm の角柱供試体を 6 体作製した。圧縮強度試験は、φ100×200mm の

円柱供試体を6体作製した。どちらの試験用供試体も3体を水中養生とし、3体を湿布養生とした。養生期間は水中養生のものを28日間、湿布養生のものをはり供試体の材齢と同じにした。

3. 実験結果および考察

3.1 荷重および破壊形式

表-4に、圧縮強度と曲げ強度、曲げひび割れ発生荷重、引張鉄筋降伏荷重、破壊形式を示す。本載荷実験では、供試体の変形が大きいため、中央のたわみが大体30～40mmになるまで載荷し、その後、除荷を行った。圧縮強度および曲げ強度は、RCはり供試体と同じ湿布養生をした、載荷時の材齢の実測値である。曲げひび割れ発生荷重の判定には、供試体側面に貼付した π 型変位計の測定値が急増した時の荷重を、引張鉄筋降伏時荷重の判定には、引張鉄筋に貼付したワイヤストレーンゲージの測定値の中で最も低い荷重で急変した荷重を、それぞれ採用した。

表に示すように、引張鉄筋の径およびかぶりに関わらず、連続繊維を配置した供試体の曲げひび割れ発生荷重および引張鉄筋降伏荷重は、連続繊維を配置していない供試体より大きくなっている。これは、連続繊維配置による、引張強度の増加⁴⁾および付着による連続繊維の引張力の分担²⁾が考えられる。

図-4に示すように、作製した12体のはりすべてで、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の載荷点近傍に発生した。その後、引張鉄筋が降伏した後に連続繊維が破断し、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。

3.2 連続繊維による分担効果に関する考察

供試体中央位置のたわみと荷重の関係をかぶりごとに、図-5と図-6にそれぞれ示す。すべての供試体は曲げ挙動が卓越し、各供試体は、50kN前後の荷重で曲げひび割れが発生しており、その後、曲げ剛性は主鉄筋比に応じて変化している。降伏荷重も主に引張鉄筋比に応じ

表-3 連続繊維補強材の力学的特性および形状寸法

項目	規格 ^{a)}	測定方法
引張強さ(N/mm ²)	1,500	JIS L 1096
弾性係数(N/mm ²)	74,000	JIS L 1096
幅(mm)	210±7	JIS L 1096
メッシュの大きさ(mm)	30×30±8	JIS L 1096

^{a)} 公称値

て変化し、その影響は、引張鉄筋比、かぶりの順で小さくなっていることが認められる。また、配置した連続繊維量に関わらず、曲げタフネスの変化はほとんどない。

図-7および図-8に、供試体引張鉄筋の中央位置のひずみと荷重の関係を示す。引張鉄筋の呼び名がD16およびD19の供試体は、引張鉄筋中央位置のひずみがそれぞれ2000 μ および2500 μ 程度の時、降伏していることが認められる。また、図に示すように、引張鉄筋が降伏する前の荷重段階において、同一な荷重における単位引張鉄筋断面積の連続繊維の有無による引張鉄筋ひずみの差は、D16の供試体がD19より大きい。これは、引張鉄筋比が小さいほど、引張力の負担における連続繊維の影響が大きいことを示唆する。

図に示すように、全体的には、配置した連続繊維の量が大きければ、荷重に対しての連続繊維の負担割合が大きい。すなわち、連続繊維を1枚配置した時では、引張鉄筋の応力度によってその負担割合にばらつきが生じたものの、2枚配置することで、連続繊維の負担割合が顕著であることが確認された。連続繊維を1枚配置した時では、連続繊維の引張応力の分担分が小さかったため、引張鉄筋の応力度の負担力にばらつきが出たものと考えられる。今後は、ばらつきが少ない連続繊維を2枚配置した供試体に対して、考察を行う。

3.3 曲げひび割れの抑制効果

これ以降は、等曲げモーメント区間の曲げひび割れを検討の対象にする。図-9には、曲げひび割れ抑制効果に関する評価結果を示す。ここで、ひび割れ抑制効果を表す指標は、杉野らの研究³⁾を参照して、以下の式により算出した。

表-4 圧縮強度、曲げ強度、曲げひび割れ発生荷重、引張鉄筋降伏荷重、破壊形式

供試体名	繊維枚数 (枚)	圧縮強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	曲げひび割れ 発生荷重 (kN)	引張鉄筋 降伏荷重 (kN)	破壊形式
C35D16-0	0	31.6	4.76	48.2	177.2	曲げ引張破壊
C35D16-1	1			54.8	192.0	
C35D16-2	2			53.1	197.1	
C70D16-0	0			45.7	152.9	
C70D16-1	1			50.0	164.1	
C70D16-2	2			54.9	175.5	
C35D19-0	0	31.2	4.30	50.9	282.3	
C35D19-1	1			57.0	292.6	
C35D19-2	2			54.9	289.3	
C70D19-0	0			44.4	245.2	
C70D19-1	1			48.0	241.8	
C70D19-2	2			47.5	251.5	

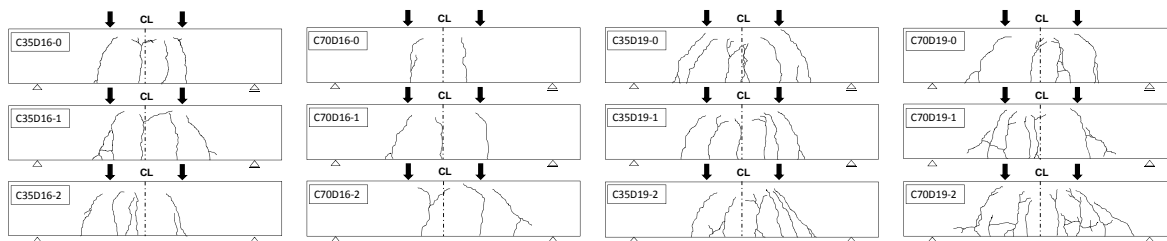


図-4 ひび割れの発生状況

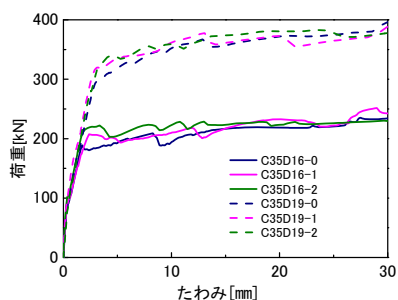


図-5 荷重とたわみの関係 (C35 シリーズ)

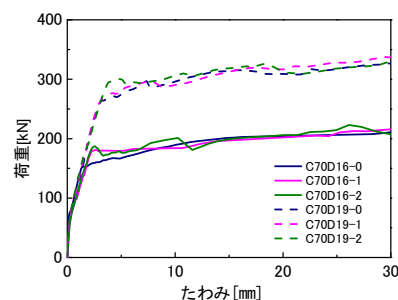


図-6 荷重とたわみの関係 (C70 シリーズ)

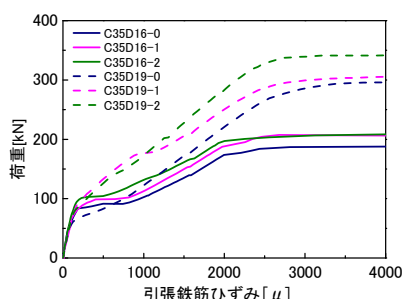


図-7 荷重と引張鉄筋ひずみの関係 (C35 シリーズ)

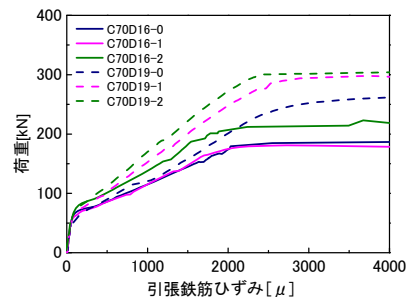


図-8 荷重と引張鉄筋ひずみの関係 (C70 シリーズ)

$$\alpha = \frac{W}{D} \quad (1)$$

ここで、 α ：ひび割れ抑制係数効果指標、 W ：連続繊維を配置した供試体の平均曲げひび割れ幅を無補強供試体の平均ひび割れ幅で除した値、 D ：連続繊維を配置した供試体の荷重-変位曲線における鉄筋降伏荷重までの面積を、連続繊維を配置していない供試体の荷重-変位曲線における鉄筋降伏荷重までの面積で除した値である。

図に示す連続繊維断面積は、長手方向繊維の断面積の和とした。図より、引張鉄筋量が減少するほど、ひび割れ抑制効果があることが確認できた。また、かぶりの影響は、引張鉄筋径に関わらず、かぶりが小さいほど供試体のひび割れ抑制効果が大きい。

4. 曲げひび割れ幅算定式の連続繊維補強はりへの適用に関する検討

4.1 連続繊維を配置した最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係

図-10 および図-11 は、最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係を、かぶりごとにそれぞれ示している。曲げひび割れ幅は、供試体側面の引張縁から 10mm の位置で測定した値である。また、最大ひび割れ幅の取り方について、池田らの研究⁵⁾では、最も大きいひび割れ幅

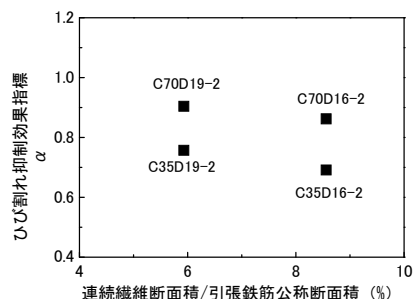


図-9 ひび割れ抑制効果指標

3 個の平均値を用いて評価しているが、鉄筋腐食の観点からは、最大値を示す 1 本のひび割れに着目するのがより適切と考え、ここでは、1 本の最大ひび割れ幅を対象とした。

図に示すように、連続繊維を配置した供試体のかぶり、引張鉄筋径、連続繊維の配置方法に関わらず、最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋のひずみはほぼ直線関係を持つことが確認でき、引張鉄筋のひずみが大きくなるほど、最大曲げひび割れ幅が比例して大きくなることが確認できた。また、かぶりに関わらず、連続繊維を配置した供試体の最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみは直線関係の勾配が連続繊維を配置していない供試体より若干大きくなっており、同一な引張鉄筋のひずみにおいては、連続繊維を配置した供試体の最大曲げひび割れ幅が

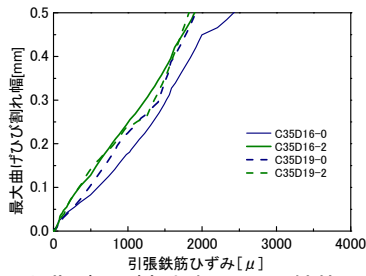


図-10 最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係 (C35 シリーズ)

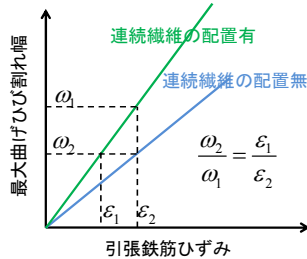


図-12 最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係の模式図

大きいものの、同じ荷重に対する連続繊維を配置した引張鉄筋のひずみが小さくなるため、図-7 および図-8 の荷重と引張鉄筋の関係を含めて、連続繊維による最大曲げひび割れ幅の影響を論じることが可能である。

図-12 に、最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋のひずみの関係を示す。図に示すように、引張鉄筋のひずみが ε_2 の時の、連続繊維を配置した供試体および連続繊維を配置していない供試体の最大曲げひび割れ幅がそれぞれ ω_1 および ω_2 で、最大曲げひび割れ幅が ω_2 の時の連続繊維を配置した供試体および連続繊維を配置していない供試体の引張鉄筋のひずみがそれぞれ ε_1 および ε_2 である。

土木学会コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅の算定式⁶⁾によると、ほかの条件に変化が無い限り、引張鉄筋のひずみが小さくなると、曲げひび割れ幅が小さくなる。したがって、連続繊維を配置していない供試体の最大曲げひび割れ幅が、例えば ω_2 の時、連続繊維の配置による最大曲げひび割れ幅の低減効果は、連続繊維を配置した供試体の引張鉄筋ひずみと連続繊維を配置していない供試体の引張鉄筋ひずみの比 $\varepsilon_1/\varepsilon_2$ で表すことができる。さらに、図-12 の最大曲げひび割れ幅の比と引張鉄筋ひずみの比は逆数関係から、ある最大曲げひび割れ幅が、例えば ω_2 の時の連続繊維の配置による最大曲げひび割れ幅の低減効果は、引張鉄筋のひずみが ε_2 の時の、連続繊維を配置していない供試体の最大曲げひび割れ幅と連続繊維を配置した供試体の最大曲げひび割れ幅の比 ω_2/ω_1 で表すことが可能である。すなわち、連続繊維の配置による最大ひび割れ幅の低減効果は、任意の引張鉄筋ひずみ、例えば ε_2 の時の、連続繊維を配置していない供試体の最大曲げひび割れ幅 ω_2 と連続繊維を 2 枚配置した供試体の最大曲げひび

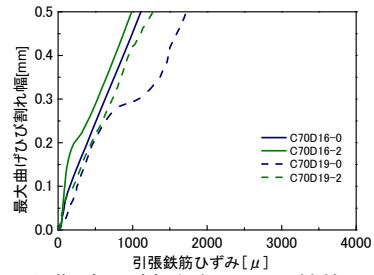


図-11 最大曲げひび割れ幅と引張鉄筋ひずみの関係 (C70 シリーズ)

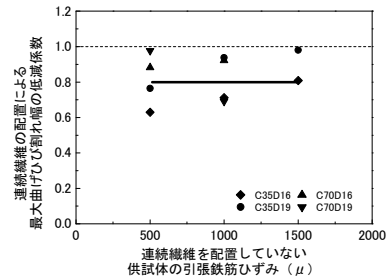


図-13 連続繊維の配置による最大曲げひび割れ幅の低減係数

表-5 等価鉄筋比 ρ_e の変化係数

供試体名	ρ_e	供試体名	ρ_e
C35D16-1	0.98	C35D19-1	0.99
C70D16-1		C70D19-1	
C35D16-2	0.97	C35D19-2	0.98
C70D16-2		C70D19-2	

び割れ幅 ω_1 の比として表すことが可能である。

したがって、引張鉄筋ひずみがそれぞれ 500, 1000, 1500 μ になる時の、連続繊維の配置による最大曲げひび割れ幅の低減係数を図-10 および図-11 から算定し、その結果を図-13 に示す。この低減係数が小さいほど、連続繊維のひび割れ抑制効果があると考えられる。図に示すように、連続繊維の配置による最大曲げひび割れ幅の低減係数は、本研究の引張鉄筋量およびかぶり範囲内では、それぞればらつきがあるものの、大体 0.8 になっていることが認められた。

4.2 連続繊維の配置による等価鉄筋比の変化

使用した連続繊維は、一軸方向に配向しているため、鉄筋のような拘束材として考えられる。もちろん、コンクリートとの付着性状が鉄筋とは異なり、一概に論じることが不可能であるが、等価鉄筋比の概念を導入し、かつ鉄筋ひずみとひび割れ幅は比例関係を維持していることを勘案して連続繊維の影響を試みる。連続繊維を等価鉄筋として扱う時の等価鉄筋の鉄筋量の変化は、以下の式で表すことができる。

$$\rho_e = A_s / \{A_s + (E_{HN}/E_s)A_{HN}\} \quad (2)$$

ここで、 ρ_e : 等価鉄筋比の変化係数、 A_s : 引張鉄筋の公称断面積、 A_{HN} : 連続繊維の断面積、 E_s : 鉄筋のヤング係数、 E_{HN} : 連続繊維のヤング係数である。

表-5 は、等価鉄筋比の変化係数の計算結果である。表に示すように、本研究の範囲内での変化係数は 1.0 に近い値となっている。ひび割れ幅のばらつきが大きい実験

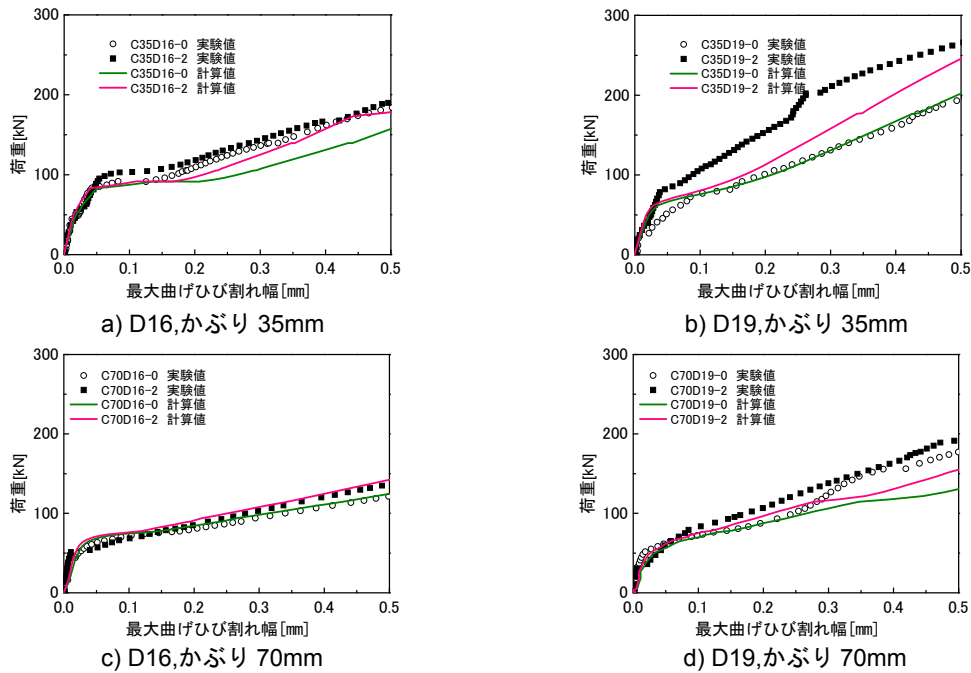


図-14 計算値と実験値の比較結果

結果からみても、等価鉄筋比による連続繊維のひび割れ抑制効果の予測は、現実的な意味を持たないと推測できる。

4.3 曲げひび割れ幅算定式の連続繊維補強はりへの適用

図-14 に、4.1 で議論した連続繊維を配置することによるひび割れ幅の低減効果、連続繊維を配置していない供試体の荷重と引張鉄筋のひずみの関係から求めた荷重と応力関係を、土木学会コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅の算定式⁶⁾へ反映した式(3)より求めた計算値と実験値の比較を示している。

$$w=1.1k_1k_2k_3k_4\{4c+0.7(c_s-\phi)\}(\sigma_{se}/E_s+\epsilon_{cs}') \quad (3)$$

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、 k_4 :連続繊維によるひび割れ抑制効果を示す係数で、繊維量、繊維の性質を表す係数、 c :かぶり(mm)、 c_s :鋼材の中心間隔(mm)、 ϕ :鋼材径(mm)、 σ_{se} :コンクリートと連続繊維の引張抵抗を無視して計算した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(N/mm²)、 ϵ_{cs}' :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である。

4.1 の考察からここで、 k_4 は0.8とする。

図に示すように、式(3)による連続繊維の影響を土木学会式に k_4 の係数を考慮することで、一般的に安全側で曲げひび割れ幅が予測できると考えられる。

5. まとめ

本研究では、ネット状連続繊維補強材を鉄筋との併用

した RC はりの曲げひび割れ幅の抑制に関する評価方法を検討した結果、ネット状連続繊維補強材が RC はりの曲げひび割れに及ぼす影響を明らかにし、土木学会式にその影響を考慮することで、ネット状連続繊維補強材を併用した RC はりの曲げひび割れの抑制を概ね評価するようになった。

参考文献

- 1) 水谷征治, 網野貴彦, 内藤英晴, 清宮 理: 繊維材料を用いたコンクリートの乾燥収縮抑制効果について, 土木学会第 65 回年次学術講演会, Vol.65, pp.345-346, 2010.9
- 2) 栗原貢介, 辻幸和, 李 春鶴, 郭 度連: ネット状連続繊維補強材を併用した RC はりの曲げ性状, コンクリート工学論文集, Vol.21, No.2, pp.25-33, 2010.5
- 3) 杉野雄亮, 竹下永造, 郭 度連: 耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.1847-1852, 2010.7
- 4) 酒井貴洋, 清宮 理, 安 同祥, 佐野清史, 羽瀧貴士: 各種繊維補強コンクリートのひび割れ抑制効果に関する実験的検討, 土木学会第 65 回年次学術講演会, Vol.65, pp.795-796, 2010.9
- 5) 池田尚治, 辻 幸和, 小山清一, 鈴木昭信, 山田 絃: 太径ねじふし鉄筋 D64 とひび割れ制御鉄筋を用いた RC 部材の曲げひび割れ性状, コンクリートライブラリー, 第 71 号, pp.37-43, 1991.10
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書[設計編], 土木学会, pp.102-105, 2009.3