

論文 RC 梁のかぶりへの CFRP の埋設による曲げひび割れ幅低減効果

村田 裕志*1・福浦 尚之*2

要旨：RC 構造物では、曲げひび割れ幅の制限によってその断面寸法や鉄筋量が決定されるものがある。本研究では、RC 部材のかぶり部分に CFRP のケーブルやグリッドを配置することで曲げひび割れ幅の分散効果が期待できると考え、梁の載荷実験による検討を行った。その結果、CFRP を配置することにより、CFRP を配置しない通常の RC 梁試験体と比較して最大ひび割れ幅を 3 分の 1 程度へと大幅に低減できることが確認できた。ひび割れ幅の低減効果は CFRP の配置量に依存するが、土木学会コンクリート標準示方書のひび割れ幅算定式を簡易に拡張した式によって CFRP を配置した RC 梁のひび割れ幅を評価できることを示した。

キーワード：曲げ、ひび割れ幅、ひび割れ分散、かぶり、CFRP、RC 梁

1. はじめに

ボックスカルバートなどの地下の RC 構造物では、使用時荷重として常時土水圧が作用するため、使用限界状態の照査項目の 1 つである曲げひび割れ幅の制限によってその断面寸法や鉄筋量が決定される部材がある。他方、RC 橋脚などでは、地震時の照査によってその仕様が決定されるため、SD490 といった高強度鉄筋を使用することによって断面の縮小や鉄筋量の低減を図ることで合理化することが可能となっている。しかし、使用時の曲げひび割れ幅の制限で仕様が決定される RC 構造物では、高強度鉄筋を利用したとしてもヤング係数が変わらず曲げひび割れ幅を低減することができないため、高強度鉄筋の利用拡大の妨げとなっている。

RC 部材の曲げひび割れ幅に影響する第 1 の因子はかぶりであることが知られており^{1),2)}、かぶりの浅い位置に鉄筋を配置すればひび割れが分散し、曲げひび割れ幅を低減できる。しかし、耐久性の問題から鉄筋のような腐食する材料をかぶりの浅い部分に配置することは実用上不可能である。

一方、CFRP (炭素繊維強化プラスチック) の有効活用を目的として、多段配筋された鉄筋の一部を CFRP で置き換えた混合配筋梁に関して曲げひび割れ幅やたわみについて研究されている³⁾。CFRP は腐食することがなく耐久性に非常に優れた材料であることから、かぶりの浅い位置に配置することが可能である。

そこで、通常のかぶりを有する RC 部材のかぶり部分に CFRP 製のケーブルやグリッドを配置することで曲げひび割れを分散させ、曲げひび割れ幅の低減が期待できると考えた。この考えのもと、梁の載荷実験を実施し、かぶりへの CFRP の埋設による曲げひび割れ幅の低減効果について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1 に梁試験体の概要を、表-1 に実験ケースを示す。試験体は幅 370×高さ 900×長さ 5800mm の RC 梁であり、載荷スパンを 5200mm、せん断スパンを 1600mm、等曲げモーメント区間を 2000mm とした。主鉄筋の芯かぶりは 100mm、有効高さを 800mm とした。主鉄筋は D32 SD490 を 3 本配置し、引張鉄筋比は 0.80% となっている。試験体のかぶり部分には純かぶり 30mm の位置に CFRP のひび割れ分散材を埋設した。試験体は 5 体とし、無補強 1 体 (N)、CFRP ケーブルを用いたものを 2 体 (C1 および C2)、CFRP グリッドを用いたものを 2 体 (G1 および G2) とした。各ケースのひび割れ分散材の設置状況を写真-1 に示す。CFRP グリッドを用いた G1、G2 では部材軸方向に 4 本の素線が配置されるようにした。打設面は載荷時の側面とした。主鉄筋の総断面積に対する CFRP の軸方向の総断面積の比率は、C1、C2、G1、G2 でそれぞれ 3.9%、12.1%、2.2%、5.9% である。

コンクリートの圧縮強度および CFRP の材料物性を表-2 および表-3 に示す。コンクリートの圧縮強度は 35N/mm² 程度であり、ケースによる相違はほとんどなかった。CFRP はケーブル、グリッド共に引張強度が非常に高い材料である。

2.2 載荷概要

加力は静的単調載荷とし、352kN、480kN、608kN、735kN、862kN の荷重に達した時点で変位をホールドした。352kN～862kN の荷重は、主鉄筋応力が 180、240、300、360、420N/mm² となる理論荷重である。この理論値は無補強の試験体 N に対して RC 断面計算を行なって算出した。その際、コンクリートの強度は 30N/mm² としてコンクリート標準示方書⁴⁾の応力-ひずみ関係を用い、鉄筋はヤング係数 200kN/mm² の弾性体として計算を行った。

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 副主任研究員 博(工) (正会員)

*2 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 チームリーダー 博(工) (正会員)

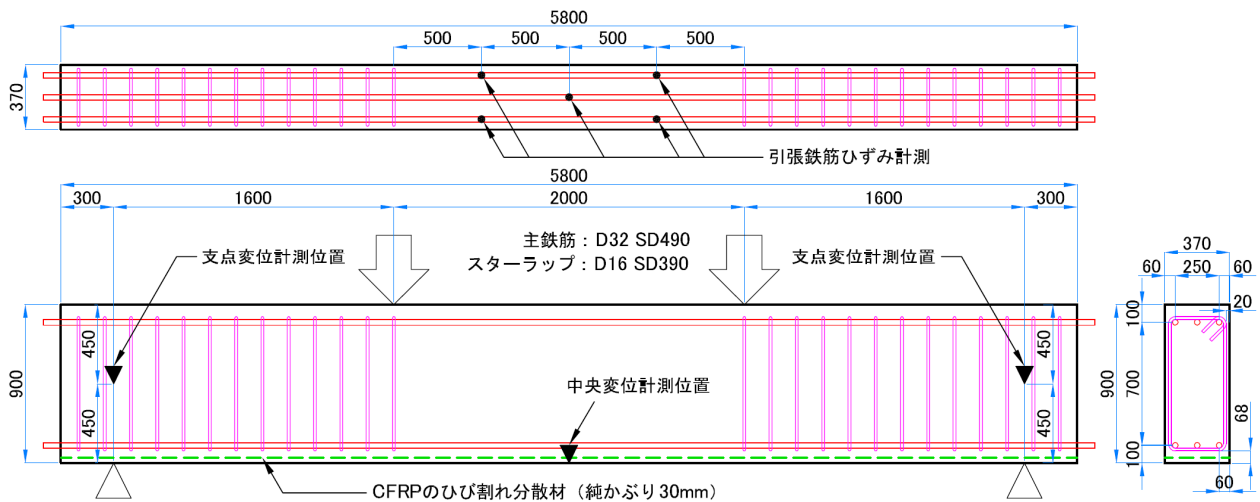


図-1 試験体寸法および配筋

表-1 試験ケース

ケース名	CFRPの種類
N	配置なし (通常のRC梁)
C1	ケーブル: $\phi 7.5\text{mm}@125\text{mm}$ (3本) ※1
C2	ケーブル: $\phi 10.5\text{mm}@62.5\text{mm}$ (5本) ※2
G1	グリッド: 断面積 $13.2\text{mm}^2@100\times 100\text{mm}$
G2	グリッド: 断面積 $35.0\text{mm}^2@100\times 100\text{mm}$ ※3

※1 7本より線, 有効断面積 31.1mm^2

※2 7本より線, 有効断面積 57.8mm^2

※3 断面積 17.5mm^2 のものを2枚重ねて配置 (35.0mm^2)



(a) C1

(b) C2



(c) G1

(d) G2

写真-1 CFRPの配置状況

表-2 コンクリート強度

ケース	圧縮強度 (N/mm ²)
N	34.5
C1	34.5
C2	35.2
G1	34.9
G2	34.3

表-3 CFRPの材料特性

材料	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
ケーブル	2500※	155※
グリッド	1400※	100※

※ メーカー保証値

なお, 安全係数は一切考慮していない。

各荷重での変位ホールド時に試験体全体のひび割れの描画と, 等曲げモーメント区間のすべての底面ひび割れとその1本分支点側の底面ひび割れの幅の計測を行った。等曲げモーメント区間外のひび割れも1本計測対象とした理由は, 区間外でも載荷点近傍に発生したひび割れは比較的ひび割れ幅が大きくなるためである。載荷状況を写真-2に示す。

ひび割れ幅の計測位置は試験体底面の主鉄筋がある位置とした。ひび割れ幅の計測については, 変位ホールド後に荷重がわずかに低下して安定状態になった時にクラックスケールにより計測した。また, 鉄筋ひずみは図-1に示した5箇所計測し, 変位は試験体中央と支点位置の両側面で計測した。



写真-2 載荷状況

3. 実験結果

3.1 荷重-たわみ曲線

荷重-たわみ曲線を図-2に示す。たわみは試験体中央変位 (2点平均) から支点変位 (4点平均) を差し引い

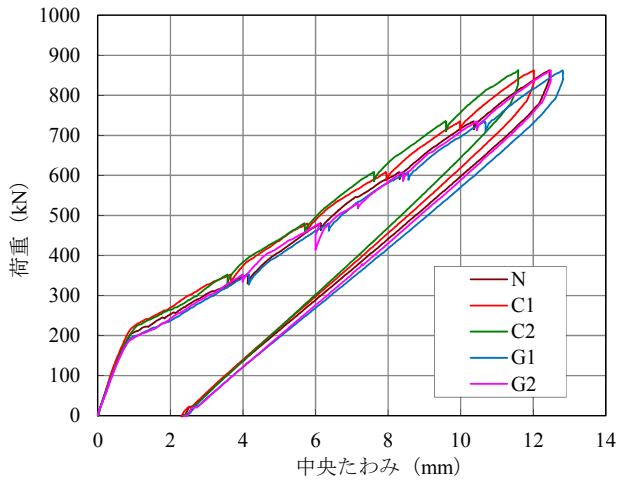


図-2 荷重-たわみ曲線

表-4 862kN 時でのひび割れ計測結果

ケース	ひび割れ間隔 (mm)		ひび割れ幅 (mm)	
	平均	最大	平均	最大
N	229	379	0.52	0.95
C1	129	246	0.22	0.60
C2	96	197	0.13	0.30
G1	120	250	0.21	0.45
G2	97	181	0.17	0.35

たものとした。CFRP の配置による荷重-たわみ曲線の差異はほとんど見られなかった。目視によるひび割れ発生荷重も全ケースで 140kN 前後であり、ケースによる違いは特になかった。これは、配置した CFRP の断面積が鉄筋の断面積と比較して小さかったためと考えられる。

3.2 ひび割れ状況

最終荷重である 862kN 時でのひび割れ間隔とひび割れ幅の値を表-4 に、同時点でのひび割れ状況を図-3 に示す。図-3 において、メッシュの縦線は等曲げモーメント区間の部材軸方向に 500mm 間隔としている。水平線については、底面は引張鉄筋位置を表し、側面については下から順に引張鉄筋位置、高さ中央位置、圧縮鉄筋位置を示している。表-4 と図-3 から、N と比較して他のケースでは明確にひび割れが分散しており CFRP をかぶり部分に配置した効果が確認できる。特に CFRP の配置量の多い C2 と G2 では、最大ひび割れ間隔が半分程度となり、最大ひび割れ幅は 3 分の 1 程度にまで低減していることが分かる。

ひび割れ幅と平均鉄筋ひずみの関係を図-4 に示す。凡例中の「ave」は平均ひび割れ幅を、「max」は最大ひび割れ幅を示している。また、「示方書」は N に対してコンクリート標準示方書⁴⁾のひび割れ幅算定式 (式(1)) によって最大ひび割れ幅を算出した結果を表している。

$$w_{\max} = 1.1k_1k_2k_3(4c + 0.7e)(\epsilon_s + \epsilon'_{csd}) \quad (1)$$

ここで、 w_{\max} : 最大ひび割れ幅、 k_1 : 異形鉄筋の場合

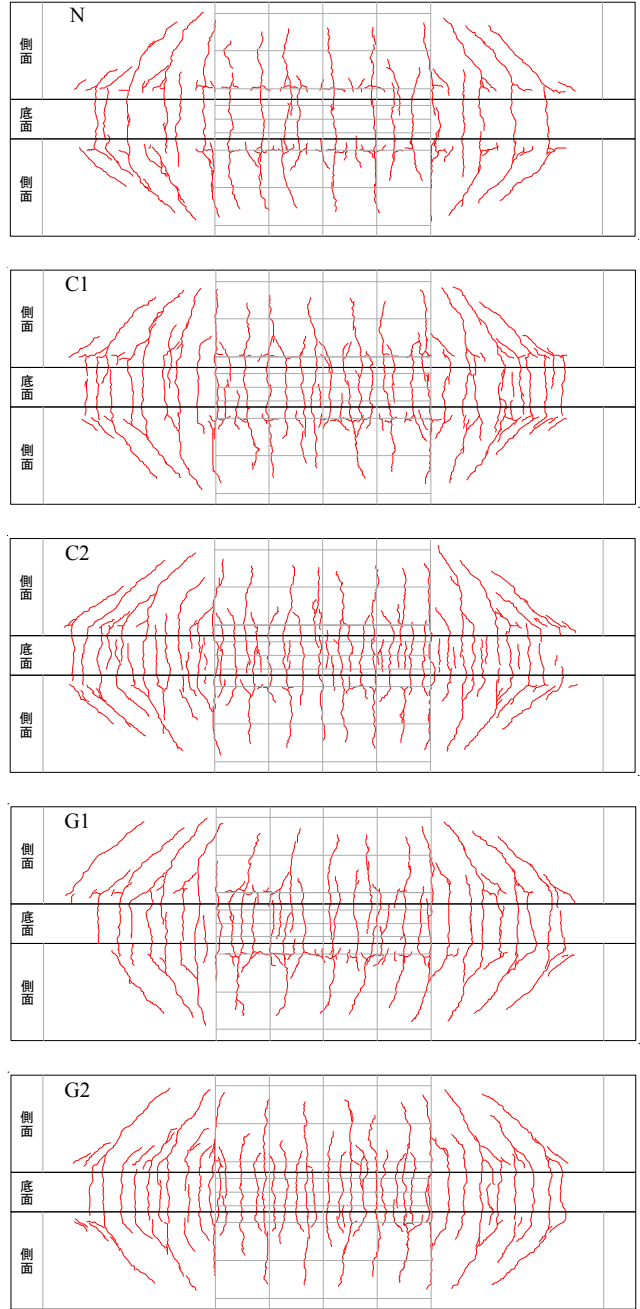


図-3 862kN 時でのひび割れ状況

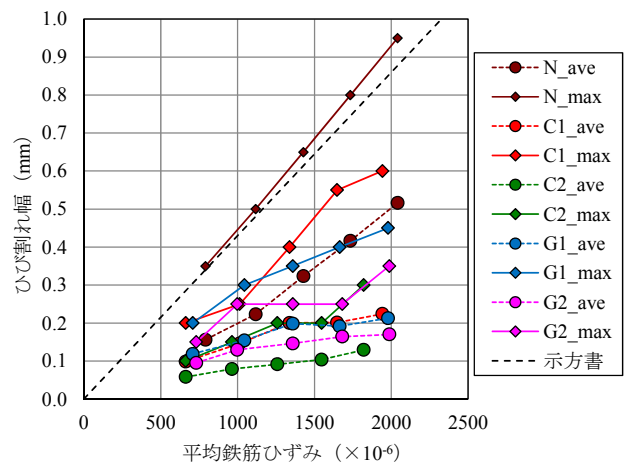


図-4 ひび割れ幅-平均鉄筋ひずみ関係

1.0, $k_2: 15/(f_c'+20)+0.7$, $k_3: 1$ 段配筋の場合 1.0, f_c' : コンクリートの圧縮強度, c : 鉄筋の純かぶり (=84mm), e : 鉄筋のあき (=93mm), ε_s : 鉄筋ひずみ, ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するためのひずみ, である。なお, 本実験に関しては収縮やクリープの影響がないものとして ε'_{csd} は 0 と設定した。

図-4 より, 式(1)によって, N の最大ひび割れ幅を概ね評価できていることが確認できる。CFRP を用いた他の 4 ケースでは, 上昇の傾向にバラつきがあるものの, N と同様に平均鉄筋ひずみが上昇するのに伴ってひび割れ幅が平均, 最大ともに大きくなっていることが分かる。C2 のみ平均鉄筋ひずみが他のケースと比較して小さくなっているのは, CFRP の断面積が引張鉄筋断面積の 12.1%と C1, G1, G2 より比較的多いためであると考えられる。

3.3 ひび割れ幅とひび割れ間隔の関係

通常の RC 部材のひび割れ幅は, 鉄筋の伸びとコンクリートの伸びの差として生じ, 一般的にコンクリートの伸びは小さく実用上無視できるため²⁾, 式(2)が成立する。

$$w = L \cdot \varepsilon_{s,ave} \quad (2)$$

ここで, w : ひび割れ幅, L : ひび割れ間隔, $\varepsilon_{s,ave}$: 平均鉄筋ひずみ, である。

式(2)の「ひび割れ幅=ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみ」という関係は, CFRP と鉄筋を混合配筋させた梁の曲げひび割れにおいても成立することが既往の研究³⁾で確認されている。

式(2)が今回の実験結果においても整合するか確認するため, 縦軸をひび割れ幅, 横軸をひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみとして整理したものが図-5 である。図-5 では, 荷重が 352kN, 608kN, 862kN の時の状態を示している。図中のプロットについて, 「ave」は縦軸が平均ひび割れ幅, 横軸は平均ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみを表している。「max」については, 縦軸が最大ひび割れ幅, 横軸が最大ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみを表している。これらの値は全て実験値を用いて整理した。

図-5 より, 今回の実験結果においても式(2)が概ね整合することが確認できる。平均と最大の両方において, 平均鉄筋ひずみが低い状態から高い状態まで整合しており, CFRP をかぶり部分に配置した RC 部材でも「ひび割れ幅=ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみ」が成立することを表している。厳密に言えば, CFRP も引張材として機能しているため, 本来は最も底面に近い CFRP の平均ひずみを用いるべきであるかもしれないが, 本実験では CFRP の断面積が主鉄筋の断面積に対して小さいため, 引張材としての CFRP の影響は無視できるものとした。

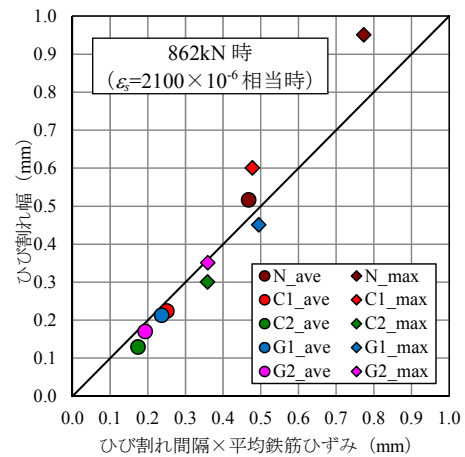
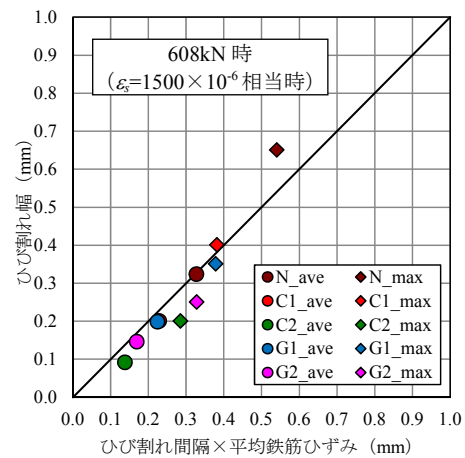
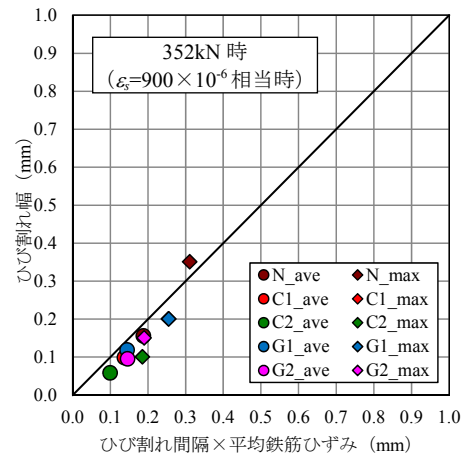


図-5 ひび割れ幅—ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみ関係

3.4 ひび割れ間隔

前節において, 図-5 により式(2)が成立することを示したが, これはひび割れ間隔を適切に予測できれば, ひび割れ幅の予測ができることを示している。

ひび割れ間隔の推移状況を図-6 に示す。各グラフは縦軸を平均鉄筋ひずみとしており, 上に向かって荷重が進行した状態であることを表している。N においては, 荷重が進行してもひび割れ間隔がほとんど変化していないことが分かる。一方, CFRP をかぶり部分に配置した他の 4 ケースでは荷重が進行するごとにひび割れ間隔が

小さくなっている。これは、今回の载荷の範囲ではひび割れが定常状態に向かう途中であることを示している。谷垣らの研究⁵⁾によれば、弾性係数の小さい補強材のみを用いた場合、ひび割れが定常状態へ達する時の補強材の平均ひずみは $3000 \sim 5000 \times 10^{-6}$ 程度とされている。鉄筋と CFRP の両方を用いた梁においても、鉄筋単体を用いた通常の RC 梁よりもひび割れが定常状態に達するひずみは大きいものと考えられる。

4. ひび割れ間隔予測式の提案

本研究では、平均鉄筋ひずみが 1500×10^{-6} に達した時

の最大ひび割れ間隔 L_{max} を予測する式の提案を試みた。 1500×10^{-6} という値は鉄筋と CFRP の混合配筋の梁での研究³⁾を参考にした。実験における平均鉄筋ひずみ 1500×10^{-6} 時の最大ひび割れ間隔は、平均鉄筋ひずみとひび割れ間隔の関係を線形近似して求めた (図-6)。

ひび割れ幅算定式である式(1)中において、 $4c+0.7e$ が最大ひび割れ間隔 L_{max} を算定する部分となっている。この形式を基本形状として、かぶりに CFRP を配置した RC 梁の最大ひび割れ間隔 L_{max} を求める式として以下のように式を拡張した。

$$L_{max} = \alpha \cdot L_1 + (1 - \alpha) \cdot L_2 \quad (3)$$

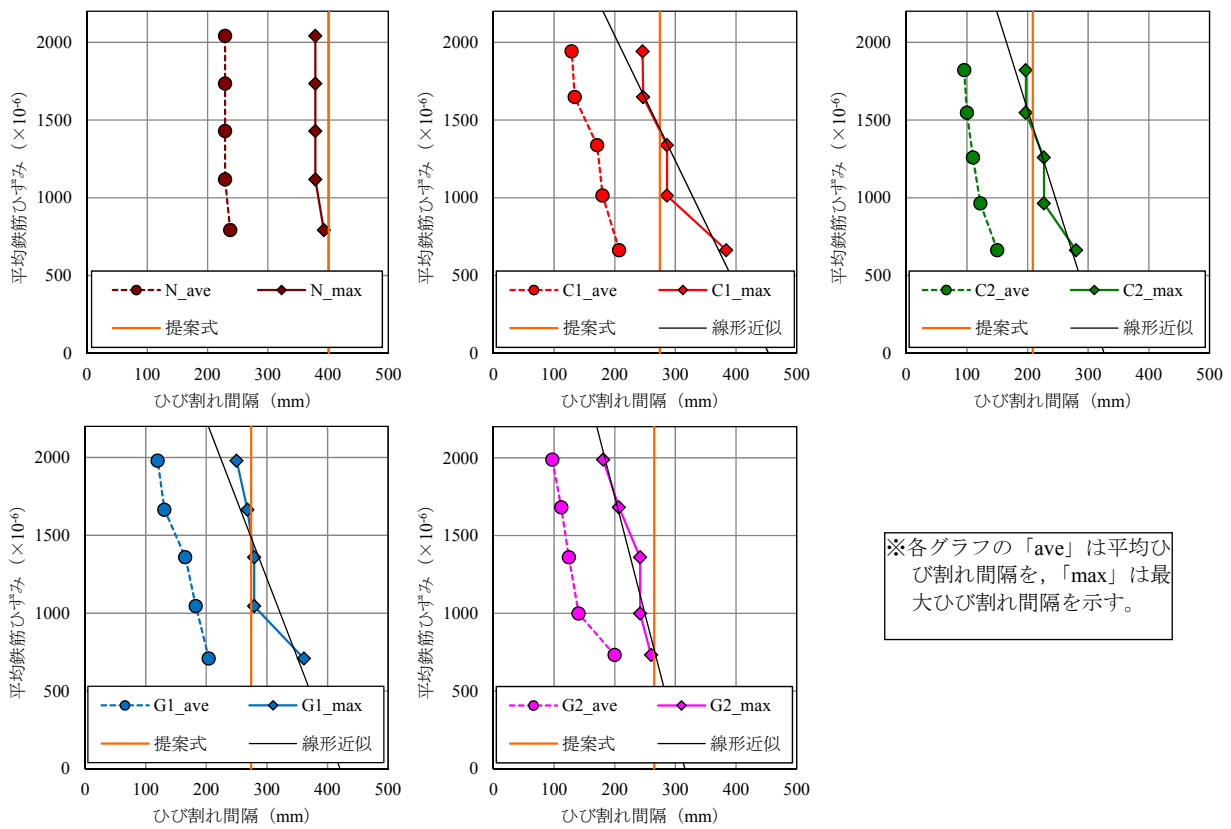


図-6 ひび割れ間隔の推移

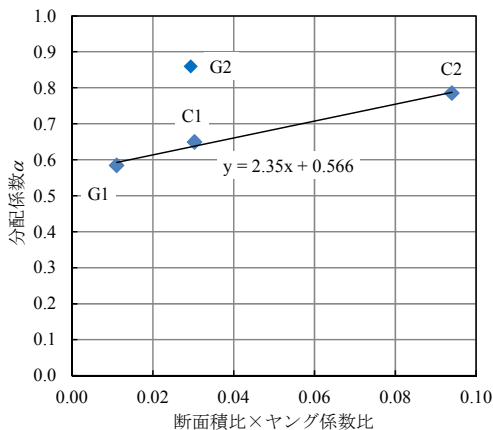


図-7 分配係数 α のフィッティング

表-5 提案式による最大ひび割れ間隔の計算結果

	C1	C2	G1	G2
CFRP の $4.0c+0.7e$ (L_1)	202	156	187	187
鉄筋の $4.0c+0.7e$ (L_2)	401			
平均鉄筋ひずみが 1500×10^{-6} 時の L_{max} (実験結果の補完値)	272	209	276	217
断面積比	3.92%	12.13%	2.22%	5.88%
ヤング係数比	77.5%	77.5%	50.0%	50.0%
断面積比×ヤング係数比	0.030	0.094	0.011	0.029
分配係数 α (実験結果から逆算)	0.649	0.785	0.584	0.860
分配係数 α (式(6))	0.637	0.787	0.592	0.635
提案式 (式(3)) による L_{max}	274	209	274	265

$$L_1 = 4c_1 + 0.7e_1 \quad (4)$$

$$L_2 = 4c_2 + 0.7e_2 \quad (5)$$

ここで、 α : 分配係数、 L_1 : CFRP の $4.0c+0.7e$ 、 L_2 : 鉄筋の $4.0c+0.7e$ 、 c_1 : CFRP の純かぶり、 e_1 : CFRP のあき、 c_2 : 鉄筋の純かぶり、 e_2 : 鉄筋のあき、である。 $\alpha=0$ の時は、通常の RC 部材での最大ひび割れ間隔を求める式となる。 α は主鉄筋に対する CFRP の断面積比とヤング係数比に相関があると考えられるため、断面積比×ヤング係数比をパラメータとして α のフィッティングを行った。フィッティングの様子を図-7 に示すが、G2 のみ相関が小さかったため、フィッティング対象から除外した。これは、グリッド状のものでは断面積がある程度大きいと、グリッド間隔の 2 倍にひび割れ間隔が制限されることが指摘されているためである³⁾。このようにして式(6) が得られた。

$$\alpha = 2.35 \cdot (A_r/A_s) \cdot (E_r/E_s) + 0.566 \quad (6)$$

ここで、 A_r : CFRP の断面積、 A_s : 鉄筋断面積、 E_r : CFRP のヤング係数、 E_s : 鉄筋のヤング係数、である。適用範囲は $0.011 \leq (A_r/A_s) \cdot (E_r/E_s) \leq 0.094$ とする。

フィッティングに関連する各種数値および式(3)~(6) で得られた L_{max} を表-5 に示す。実験の全 5 ケースでの全荷重段階に対し、表-5 の最下行の L_{max} に平均鉄筋ひずみの実験値を乗じ、その値を最大ひび割れ幅の実験値と比較した結果を図-8 に示す。N では $\alpha=0$ とした。式(3)~(6) は平均鉄筋ひずみが 1500×10^{-6} に達した時の最大ひび割れ間隔を予測する式であるため、各ケースにおける L_{max} の予測値はいずれの荷重段階においても表-5 の最下行の値で一定となるが、図-8 より、概ね最大ひび割れ幅を評価できるものとなっている。なお、 α のフィッティングにおいて対象外とした G2 では、最大ひび割れ幅を過大評価する結果となっている。

5. まとめ

曲げひび割れ幅の低減を目的として、かぶり部分に CFRP のケーブルやグリッドを配置した RC 梁の載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) かぶり部分に CFRP を配置することにより、曲げひび割れが分散した。ひび割れ間隔において最大 2 分の 1 となり、ひび割れ幅においては最大 3 分の 1 程度まで低減できた。
- (2) CFRP をかぶり部分に配置した RC 梁においても「ひび割れ幅=ひび割れ間隔×平均鉄筋ひずみ」の関係が成立した。
- (3) CFRP を用いた場合、鉄筋ひずみが 2100×10^{-6} 程度と

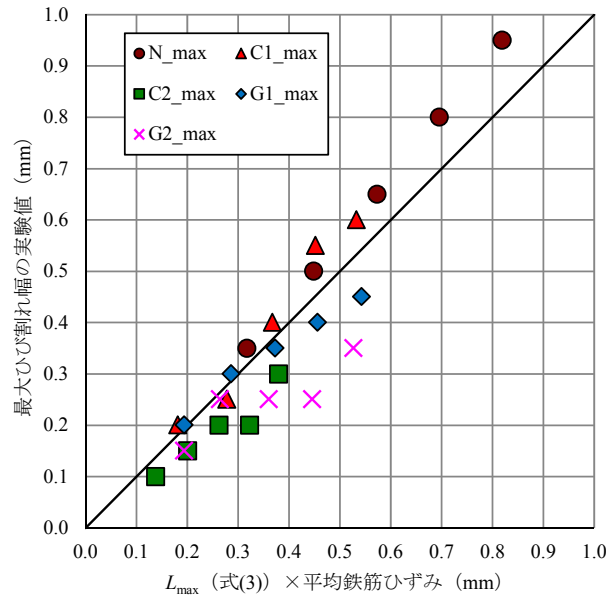


図-8 最大ひび割れ幅の予測結果

なるまでの範囲ではひび割れが定常状態とならず、ひび割れ間隔の減少が続く。

- (4) コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅算定式内の最大ひび割れ間隔を算定する項を簡易に拡張した式で、CFRP をかぶり部分に配置した RC 梁のひび割れ間隔やひび割れ幅を評価できる可能性を示した。今後は、図-6 で表れていたひび割れ間隔の変化をモデル化できれば、さらに予測精度は上がるものと考えられる。また、今後の実験データの蓄積により α の精度の向上が図れるであろう。

参考文献

- 1) 角田与史雄：鉄筋コンクリートの最大ひびわれ幅、コンクリートジャーナル、Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970
- 2) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状、土木学会論文集、No.384/V-7, pp.21-32, 1987
- 3) 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
- 4) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編]、pp.223-226, 2013
- 5) 谷垣正治、野村設郎、岡本直、蓮尾孝一：組紐状高強度繊維補強材を用いたコンクリート梁の曲げひび割れ性状、日本建築学会構造系論文報告集、No.426, pp.37-46, 1991