

論文 PVA 短繊維で補強したコンクリートのひび割れ分散性に関する研究

伊藤 始^{*1}・岩波 光保^{*2}・横田 弘^{*3}

要旨：PVA 短繊維混入によるひび割れ分散性改善の定量評価を目的に、混入率をパラメータとした鉄筋コンクリートの一軸引張実験を行った。その結果、PVA 短繊維混入によりコンクリートのひび割れ分散性の改善が確認できた。加えて、平均ひび割れ間隔を引張軟化曲線の折曲がり点応力で整理することで、一軸応力状態における PVA 短繊維を混入したコンクリートのひび割れ幅の減少を低減係数として評価することができた。

キーワード：PVA 短繊維, 混入率, ひび割れ分散性, ひび割れ幅, 引張軟化曲線

1. はじめに

鉄筋コンクリート (RC) 部材の耐久性は、コンクリート表面に発生するひび割れの幅や間隔に大きく影響される。特に、ひび割れ幅は鉄筋径やかぶり、コンクリートの品質などの各種要因による影響を受け、鉄筋に生じる引張ひずみに比例して増加すると考えられている。RC 部材のひび割れ幅の照査において、要求性能を満たさない場合、鉄筋量を増やすことや同一の鉄筋量で鉄筋径を小さくして鉄筋間隔を小さくすることなどの対策が必要である。

このひび割れ幅の低減対策の一つとして、コンクリートの引張性状の改善を目的に、コンクリート中に鋼製あるいはプラスチック製の短繊維を分散させて混入する技術が検討されている。コンクリートのひび割れ低減対策として短繊維を使用する研究は、現在までに、鋼繊維を対象として行われており、ひび割れ幅の減少に有効であることが報告されている¹⁾。しかしながら、鋼繊維自体の耐久性や施工性の点で幅広く実用されていないのが現状である。

これに対して、本研究では、コンクリートの補強材として用いられる短繊維のうち、引張強度や付着強度が大きく、コンクリートとの分離抵抗性、作業性、耐食性に優れた PVA (ポリビニルアルコール) 短繊維を対象とした。本論文

は、PVA 短繊維 (以下、短繊維と記す) を用いた鉄筋コンクリートのひび割れ分散性を検討することを目的に、コンクリート種類、鉄筋比を変化させた試験体を用いて一軸引張実験を行った。実験結果より、短繊維の混入率がひび割れ分散性に与える影響を検討し、ひび割れ幅低減の定量的な評価を試みた結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 実験方法

実験は、コンクリート中に埋設した鉄筋に両側から引張力を作用させる一軸引張実験で行った。試験体は、断面寸法 (鉄筋比) を 150×150mm (0.023), 150×200mm (0.010) の 2 種類、コンクリート種類を普通コンクリートおよび軽量コンクリートの 2 種類、短繊維混入率を 0.0, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5% の 5 水準、短繊維種類を 2 種類とした全 12 ケースとした。表-1 に実験ケースとそのパラメータを示す。なお、断面寸法とコンクリート種類により試験体を、同表に示すように、N, L, W の各シリーズに区分した。

図-1 に実験方法を示す。N および L シリーズの試験体は断面中心に径 D25、長さ 4000mm の鉄筋を、W シリーズは同じ位置に径 D19 のネジふし付き鉄筋を配置した。なお、N および L シリーズの試験体両端には端部からの割裂ひび

*1 (独) 港湾空港技術研究所 依頼研修員 (前田建設工業(株)) 工修 (正会員)

*2 (独) 港湾空港技術研究所 主任研究官 工博 (正会員)

*3 (独) 港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

表-1 実験ケースおよびパラメータ

シ ス	試験 体名	試験体寸法・実験条件			鉄筋			コンクリート		短繊維		実験時のコンクリートの性状	
		断面 高さ h mm	断面 幅 b mm	付着区 間長さ L_b mm	材質	種類	主鉄筋比 $p=As/bh$	種類	種類	混入率 (体積比) %	圧縮 強度 f'_c N/mm ²	ヤング 係数 E_c kN/mm ²	
N	N-00	150	150	1900	USD685	D25	0.023	普通	A	0.0	39.0	32.4	
	N-03	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	0.3	40.2	32.2	
	N-05	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	0.5	36.6	30.9	
	N-10	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.0	35.5	30.8	
	N-05B	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	B	0.5	40.0	30.8	
L	L-00	〃	〃	〃	〃	〃	〃	軽量	A	0.0	39.7	21.2	
	L-05	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	0.5	42.5	21.0	
	L-10	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.0	46.6	22.7	
W	W-00	〃	200	2000	SD345	D19	0.010	普通	〃	0.0	37.0	28.6	
	W-05	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	0.5	38.5	29.1	
	W-10	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.0	39.1	28.0	
	W-15	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	〃	1.5	31.7	25.0	

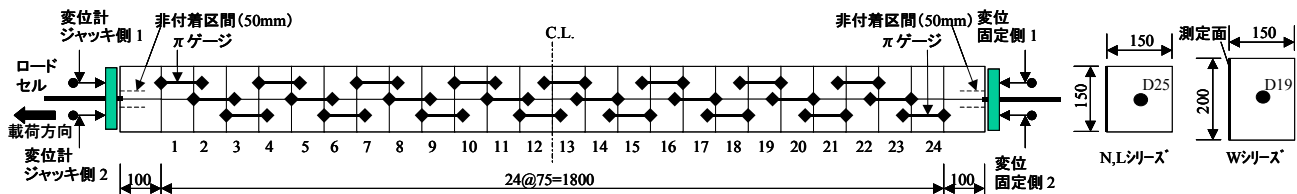


図-1 実験方法（平面図はN, Lシリーズ）

割れを防止するために非付着区間を 50mm ずつ設けた。

2.2 使用材料

(1) 短纖維

実験には 2 種類の短繊維を使用した。その物性を表-2 に示す。同表の dtex は、1dtex で糸長 10000m の糸質量が 1g であることを示す。

(2) 輕量骨材

軽量骨材は、中国・黄河の堆積物を原材料とする高性能人工軽量骨材（粗骨材）である。骨材の絶乾比重は 1.18 であり、24 時間吸水率は 2.69%である。骨材の粒径は 5~15mm である。

(3) コンクリートの配合

使用したコンクリートは、セメント種類を普通ポルトランドセメント、配合条件を普通コンクリートではスランプ 18cm、空気量 4.5%、粗骨材最大寸法 20mm、軽量コンクリートではスランプフロー450mm、空気量 5.5%、軽量粗骨材の最大寸法 15mm とした。目標単位容積質量は、普通コンクリートが 2290kg/m^3 、軽量コンクリートが 1770kg/m^3 である。

(4) 材料試驗結果

コンクリートの圧縮強度試験結果を表-1に併記し、鉄筋の引張試験結果を表-3に示す。

2.3 載荷方法

載荷は、図－１の載荷方向側の鉄筋にセンターホールジャッキおよびロードセルを配置し、両側の鉄筋をカプラーで載荷フレームに固定して実施した。計測は荷重、試験体の伸び、ひび割れ幅について行った。N および L シリーズのひび割れ幅は、図－１に示すように付着区間のうち 1800mm を 24 個の π ゲージを用いて 75mm 間隔で計測した。W シリーズでは付着区間 2000mm を 20 個の π ゲージを用いて 100mm 間隔で計測した。

表-2 短繊維の物性値

項目	単位	PVA-A	PVA-B
直径	mm	0.66	0.20
標準長	mm	30	12
織度	dtex	4440	390
アスペクト比	—	45.5	60.0
密度	kg/m ³	1300	
引張強度	N/mm ²	880	
ヤング係数	kN/mm ²	29.4	

3. 実験結果

3.1 コンクリートが負担する応力

図－2に試験体の平均ひずみとコンクリート平均応力の関係の一例を示す。平均ひずみは、試験体の伸びを付着区間長さで除した値である。また、コンクリート平均応力は、平均ひずみに相当する試験体の荷重から鉄筋単体の荷重を引いた値をコンクリート断面積で除した値である。このコンクリート平均応力は、コンクリートのテンションスティフニングを表しており、短繊維混入によるコンクリートの力学性状改善効果を反映していると考えられる。

短繊維を 1.0%混入した N-10 の平均応力は、無混入の N-00 の値を常に上回った。同様に W-15 の値は、W-00 の値を上回った。これは、短繊維の混入によりコンクリートの負担する応力が大きくなったためと考えられる。

なお、W-10 では、短繊維を 1.0%混入し、圧縮強度がシリーズ中で最も大きいにもかかわらず、図－2に示すようにコンクリート平均応力の最大値が無混入のものに比べ小さくなった。また、目視観察した結果、ひび割れが試験体下面に偏っており、載荷時において一軸引張応力状態を忠実に再現できなかったと判断し、以降の考察で用いないこととした。

3.2 ひび割れ幅

図－3に短繊維の混入率で整理したひび割れ幅の最大値と平均値を示す。最大ひび割れ幅は π ゲージにより計測されたひび割れ幅の最大値であり、平均ひび割れ幅はひび割れ幅の合計値をひび割れ本数で除した値である。なお、ここでのひび割れは、載荷終了時に試験体の 3 面以上に発生しているものとし、 π ゲージによる計測値が初期値より $\pm 0.05\text{mm}$ 以上変化した場合をひび割れと判定した。ここでの π ゲージの測定値におけるマイナスの値は、計測面の裏面からひび割れが発生することで計測された。

また、定常状態での検討を考えたため、荷重増加による新しいひび割れの発生がないように荷重レベルはできる限り高く、N, L シリーズ

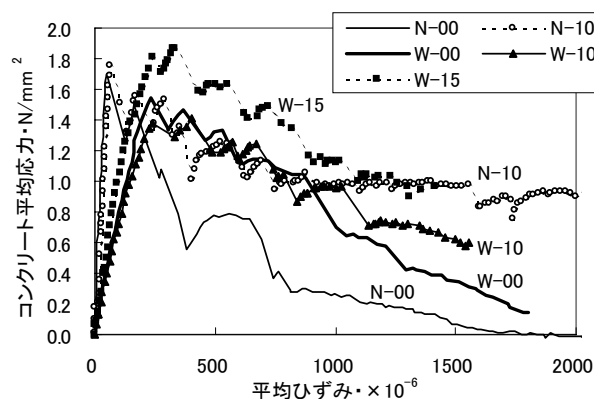
では鉄筋応力 600N/mm^2 、W シリーズでは 350N/mm^2 に相当する荷重時点の結果で整理した。N-10 において、1つの π ゲージ区間にひび割れが 2 本見られた。その区間での測定値は、最大値とならなかったため、最大ひび割れ幅には考慮せず、平均ひび割れ幅にはひび割れ本数を 2 本として考慮した。

最大ひび割れ幅（実線）は、混入率増加に対して明確な傾向が見られなかった。N シリーズの混入率 0.3%を除いて、短繊維を混入した平均ひび割れ幅（破線）は、混入率の増加に伴いひび割れ幅が減少していることが分かる。最もひび割れ幅が減少したシリーズは軽量コンクリートを用いた L シリーズであり、混入率 1.0%あたり 0.27mm の減少であった。

短繊維種類の違いを混入率 0.5%の N シリーズ・PVA-A（◇印）と N シリーズ・PVA-B（△印）の平均ひび割れ幅により比較した。PVA-A の平均ひび割れ幅に比べ PVA-B の値は 0.25mm 程度大きく、PVA-A・混入率 0.3%に近い値となっており、ひび割れ低減に対して PVA-A の方が有効であることが分かった。

表－3 鉄筋引張試験結果

シリーズ	種類	材質	降伏強度 f_y N/mm^2	引張強度 f_u N/mm^2	ヤング係数 E_s kN/mm^2
N, L	D25	USD685	751	980	19.9
W	D19	SD345	366	561	19.2

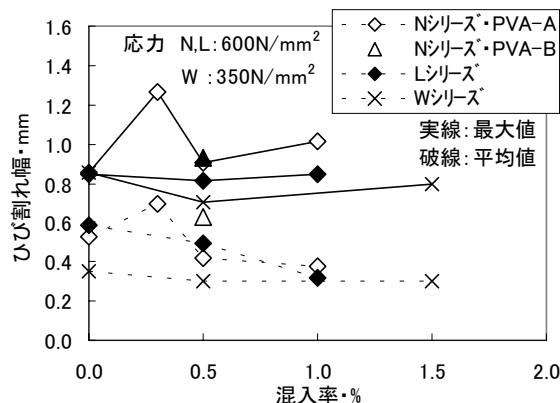


図－2 平均ひずみ－コンクリート平均応力

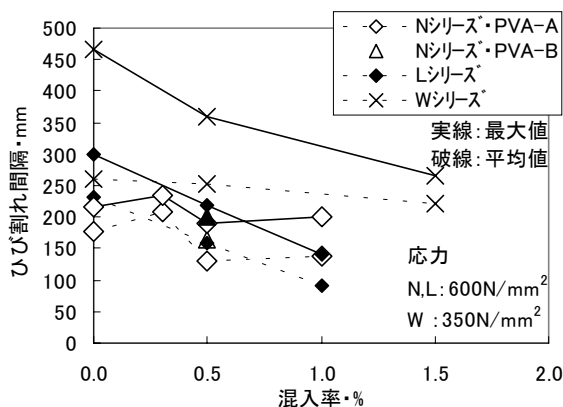
3.3 ひび割れ間隔

図－4に混入率とひび割れ間隔の関係を示す。平均ひび割れ間隔は、ひび割れ幅と同様の荷重時点における、両端部を除いたひび割れ間の長さの平均値であり、最大ひび割れ間隔は、各ひび割れ間隔の最大値である。LシリーズとWシリーズにおいて混入率増加に伴う最大ひび割れ間隔（実線）の減少傾向は明確であった。

平均ひび割れ間隔（破線）は、最大ひび割れ間隔に比べ緩やかであるが、LシリーズとWシリーズにおいて減少傾向が見られ、特に軽量コンクリートのLシリーズで減少傾向が大きくなった。軽量コンクリートのひび割れは、骨材界面に沿ってひび割れが進展する普通コンクリートとは異なり、骨材を貫通して脆性的に進展することが報告されている²⁾。軽量コンクリートにおいて、短繊維混入によるひび割れ間隔の減



図－3 混入率—ひび割れ幅



図－4 混入率—ひび割れ間隔

少が大きかった要因は、骨材の割れを伴う脆性的なひび割れ進展の抑制に短繊維が有効に働き、新たなひび割れを発生させたためと考えられる。

鉄筋比を変えたNシリーズとWシリーズの平均ひび割れ間隔を比較すると、鉄筋比が小さいWシリーズのひび割れ間隔が大きくなったが、混入率増加に対するひび割れ間隔の減少に明確な差は見られなかった。

4. ひび割れ幅の評価

4.1 評価方法

本実験を通して、短繊維を混入することにより、コンクリートのひび割れ分散性の改善が確認できたため、短繊維混入によるひび割れ間隔の検討を通して、ひび割れ幅低減効果の定量評価を試みた。ひび割れ幅の算定式は角田の提案式（角田式）³⁾、趙らの提案式（趙式）⁴⁾、コンクリート標準示方書の算定式（示方書式）などがある。ここでの評価は、これらのうち一軸引張実験の結果に基づいており、かぶり c と鉄筋間隔 c_s の比が小さいRC部材にも適応可能な角田式（式(1)）を用いた。

$$w_{max} = L_{max} (\sigma_{se} / E_s + \varepsilon'_{csd}) \quad (1)$$

$$L_{max} = 5.4 c \quad (2)$$

ここで、 w_{max} ：最大ひび割れ幅（mm） L_{max} ：最大ひび割れ間隔（mm）、 c ：かぶり（mm）、 σ_{se} ：鉄筋応力度（N/mm²）、 E_s ：鉄筋のヤング係数（N/mm²）、 ε'_{csd} ：コンクリートの収縮・クリープ等によるひずみ（ $=150 \times 10^{-6}$ ）

式(1)は、ひび割れ間隔に荷重とクリープ等によるひずみを乗じて、最大ひび割れ幅としている。今回の評価には、ひび割れ間隔の実験値 $L_{max,exp}$ を式(2)で算定した計算値 $L_{max,cal}$ で無次元化したひび割れ間隔比を用いた。なお、 $L_{max,exp}$ は、実験により求めた平均ひび割れ間隔に1.5を乗じた値とした⁴⁾。

一方、短繊維を混入することによるコンクリートの力学性能の改善効果を定量的に評価する物性値として、破壊エネルギーや引張軟化曲線などの破壊力学特性値がある。短繊維を混入し

たコンクリートの引張軟化曲線の折曲がり点 (B.P.) は、後述のモデル化により短繊維のみの効果を表現することができる。ここでの評価は、破壊力学特性値を代表する指標として B.P. 応力を用いた。

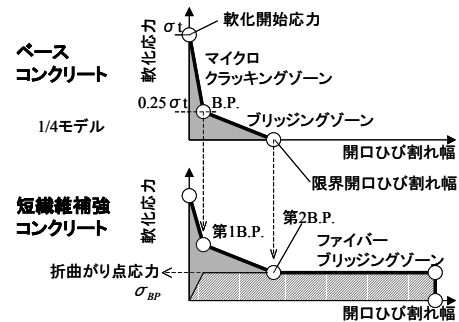
4.2 引張軟化曲線と折曲がり点応力

引張軟化曲線は、RILEM 法に準拠して別途実施した曲げ載荷試験により、計測した開口ひび割れ幅と荷重－変位関係を用いて修正 J 積分法に従って求めた⁵⁾。本研究では、短繊維を混入したコンクリートの引張軟化曲線は混入していないコンクリート（以下、ベースコンクリートと記す）の引張軟化曲線に短繊維の効果を足し合わせることで表現できると仮定して図－5 のようにモデル化を行った。ベースコンクリートの引張軟化曲線は近似モデルとして一般的に用いられる 1/4 モデルを仮定した。

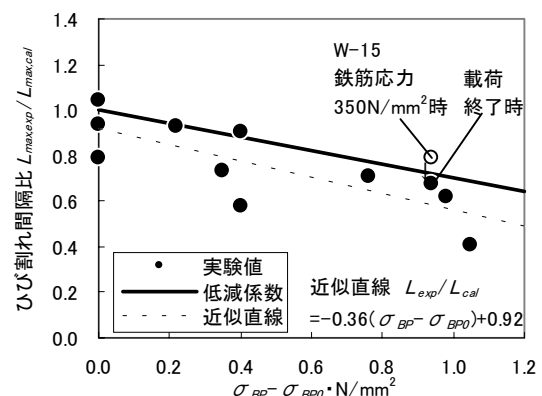
引張軟化曲線において、短繊維が負担する応力は、軟化開始時点では 0.0N/mm^2 であり、マイクロクラッキングゾーンにおいてひび割れが進展するのに伴い発生する。軟化応力のうちコンクリートの負担する応力は、ベースコンクリートの限界開口ひび割れ幅にあたる第 2B.P.において 0.0N/mm^2 となり、それ以降は軟化応力をすべて短繊維が負担する。ひび割れ幅評価の指標とする B.P.の応力 σ_{BP} は、短繊維の効果のみを表すために、この第 2B.P.の応力を用いた。ベースコンクリートにおいても 1/4 モデルの限界開口ひび割れ幅で実験値の軟化応力があるため、検討にはこの応力 σ_{BP0} も考慮して短繊維の効果を B.P.の応力の差 $\sigma_{BP} - \sigma_{BP0}$ で評価した。

4.3 低減係数の検討

ここでは、式(1)の修正を目的に、短繊維混入によるひび割れ幅の低減係数 k_f を検討した。本実験により得られた最大ひび割れ間隔の実験値 $L_{max,exp}$ と計算値 $L_{max,cal}$ の比（ひび割れ間隔比）を B.P.応力差 $\sigma_{BP} - \sigma_{BP0}$ で整理して図－6 に示す。W-15 のひび割れは、鉄筋応力 350N/mm^2 時から荷重終了時まで 1 本増加したため、ひび割れ間隔比を○印から●印にして検討した。



図－5 引張軟化モデルの決め方



図－6 折曲がり点応力差－ひび割れ間隔比

ひび割れ間隔比は、 $\sigma_{BP} - \sigma_{BP0}$ の増加に伴い小さくなる傾向を示しており、最小自乗法により近似した直線は図中のようにになった。ひび割れ幅の低減係数 k_f は、近似直線を参考に $\sigma_{BP} - \sigma_{BP0} = 0.0\text{N/mm}^2$ で 1.0 となり、短繊維によるひび割れ幅の低減効果を過大評価しないように、結果を下側にほぼ包含するかたちで式(3)のように提案した。

$$k_f = 1 - 0.3(\sigma_{BP} - \sigma_{BP0}) \quad (3)$$

ここで、 σ_{BP} : B.P.応力 (N/mm^2), σ_{BP0} : 混入率 0.0% の B.P.応力 ($\approx 0.1\text{N/mm}^2$)

4.4 曲げひび割れへの適用

別途行った RC はりの曲げ実験⁶⁾において、ひび割れ幅の計測を行った。この低減係数の精度を図－7 に示す RC はりの曲げ実験の結果により考察する。その結果を図－8 に示す。図－8 には、前述した角田式、趙式、示方書式により算定した直線とそれらに直接、低減係数 $k_f = 0.71$ (混入率 1.0%・ $\sigma_{BP} - \sigma_{BP0} = 0.98$) を乗じた直線をあわせて示す。B1-1, C1-1 の両ケー

スとも実験値は、低減係数を乗じない算定値よりも小さくなった。つまり、短繊維によるひび割れ幅低減効果が認められたとともに、低減係数導入の必要性和その精度が確認できた。

低減係数 k_f には一軸応力状態と曲げ応力状態の差を考慮すべきであるが、実験値と低減係数を乗じた算定値を比較すると、今回提案した値を用いても、短繊維を混入したコンクリートの曲げひび割れ幅をおおむね評価可能であった。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 一軸引張実験により、短繊維混入によるコンクリートのひび割れ分散性の改善が確認できた。短繊維混入率の増加により改善効果は大きくなった。
- (2) 軽量コンクリートを用いた場合のひび割れ分散性の改善効果が大きくなった。
- (3) 混入率を同一とした場合、長さ 12mm に比べ 30mm の短繊維を用いた場合のひび割れ分散性の改善効果が大きくなった。
- (4) 実験における平均ひび割れ間隔を引張軟化曲線の折曲がり点応力で整理することで、一軸応力状態における短繊維混入によるひび割れ幅の減少を低減係数として評価することができた。
- (5) 低減係数を曲げひび割れに適用した場合、提案した低減係数により、短繊維を混入したコンクリートの曲げひび割れ幅をおおむね評価可能であることが確認できた。

参考文献

- 1) 柳博文, 松岡茂, 武田康司, 松尾庄二: 鋼繊維補強コンクリートのひび割れ分散効果に対する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, pp.1225-1230, 1998
- 2) 石川雄康, 國府勝郎, 森大介, 岡本享久: 高性能軽量骨材を用いたコンクリートの破壊挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.1-13, 2003

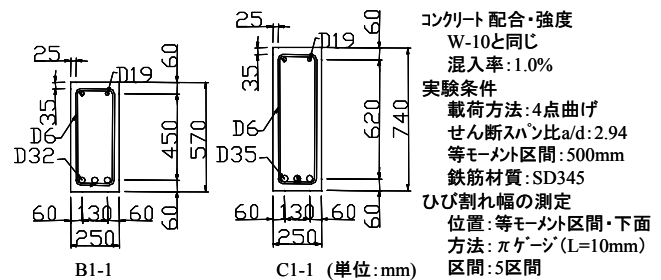


図-7 はり曲げ試験体の概要

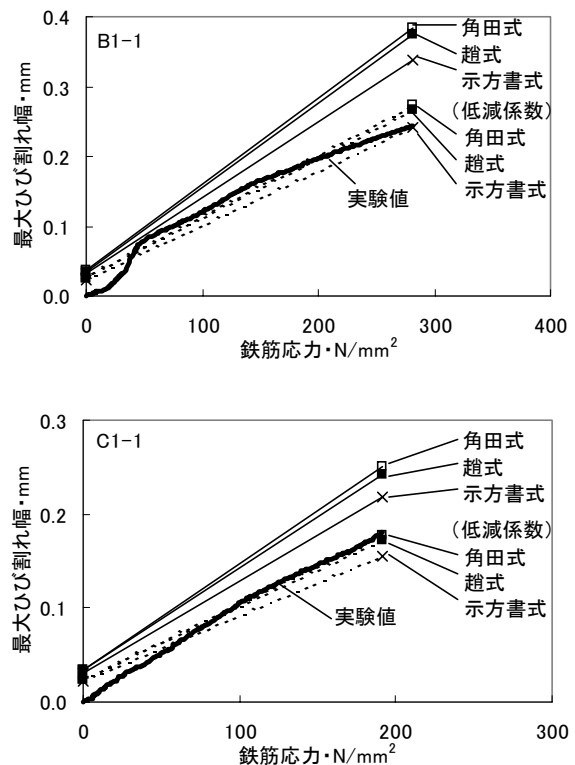


図-8 曲げひび割れの算定結果

- 3) 角田與史雄: 鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅, コンクリートジャーナル, Vol.8, No.9, pp.1-10, 1970
- 4) 趙唯堅, 丸山久一: 鉄筋コンクリートはりの曲げ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) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳洽: 曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測, 土木学会論文集, No.426/V-5, pp.203-212, 1991
- 6) 伊藤始, 岩波光保, 横田弘: ビニロン短繊維の混入が RC はりのせん断耐力に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1723-1728, 2003