

論文 耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果の数値的評価に関する考察

服部 匡洋^{*1}・竹下 永造^{*2}・大塚 久哲^{*3}・李 靖^{*4}

要旨: 著者らは耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以降、HN）のひび割れ抑制効果について確認するため、コンクリート圧縮強度や鉄筋種類等をパラメータとした RC 梁の曲げ載荷試験を実施し、HN の補強効果は鉄筋との付着改善にあることを既に明らかにしている。本論文では、HN による鉄筋との付着改善効果に着目し、各種ひび割れ予測方法に HN による効果を導入することを目的とした結果、曲げひび割れ幅や収縮ひび割れ幅の算定式において、HN による影響は、鉄筋ひずみの関数として考慮できることを明らかにした。

キーワード: ひび割れ, RC 梁, 耐アルカリ性ガラス繊維ネット, 等価付着喪失長さ

1. はじめに

耐アルカリ性ガラス繊維ネット (HN) は、ひび割れ抑制材料として注目を集めている。その理由として、施工前に HN を鉄筋に結束するだけで、ひび割れが抑制できる簡易性、HN 自体の素材の柔らかさにより、施工場所や条件によらず様々な箇所に施工できる利便性、さらに、ひび割れの発生が予想される部分に適切に設置できる経済性などが挙げられる。しかし、そのひび割れ抑制メカニズムについては未だ不明な点が多いため、実験的検討^{1), 2)}が行われてきた。

杉野ら¹⁾は HN を用いた RC 梁に対する曲げ載荷試験を実施し、HN による補強効果は鉄筋に生じる応力を負担することを示した。また、HN による補強効果として挙げられるひび割れ幅の低減効果とひび割れ分散効果に関する指標 W と D 、及びそれらを総合的に評価するひび割れ抑制係数 α を導入し、HN による補強効果の定量的評価を試みた。さらに、ひび割れと鉄筋比に密接な関係があり、HN/鉄筋比が大きくなるとひび割れ抑制効果が大きくなることを確認した。また、竹下ら²⁾は大型 RC 梁に対して、コンクリート強度、繊維ネットの取り付け位置、鉄筋との付着の有無をパラメータとした曲げ載荷試験を実施した。その結果、HN のひび割れ抑制効果はコンクリートの圧縮強度が小さい場合、鉄筋の付着強度が小さい場合に効果が増加することを明らかにした。また、HN のひび割れ抑制メカニズムが鉄筋との付着喪失領域を改善する効果によるものと推論した。

以上の既往研究を受けて、本論文では、HN/鉄筋比を統一し、コンクリート強度や鉄筋との付着の有無等に着眼した竹下らの実験結果を基に、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W を使用して HN による鉄筋との付着喪失領域

の改善効果やひび割れ幅低減効果について定量的に把握した。さらに、その結果を用い、指針等にて提案されている各種ひび割れ幅の算定式に当てはめ、算定式において HN による付着喪失領域の改善効果を考慮するための係数を新たに導入し、HN によるひび割れ幅抑制設計法について提案した。

2. 実験概要

2.1 実験概要

実験概要図を図-1 に示す。供試体は 1600mm の長さ、200×200mm の正方形断面を有する RC 梁である。コンクリートの配合強度は 20 と 40N/mm² とし、かぶりは 30mm である。主鉄筋は D16、帯鉄筋は D10 を使用した。また、曲げ降伏先行型破壊となるように帯鉄筋は 150mm 間隔で配置した。HN はかぶり側の鉄筋表面に設置し、結束線により固定した。固定間隔は 200mm である。

載荷は H 型鋼材を 2 個設置し、鋼板を介した 2 点載荷により実施した。荷重はジャッキ先端に取り付けたロードセルにて測定した。2 点間の載荷スパンは 400mm とした。計測装置として、ひずみゲージを下面主鉄筋に 3 測点×2 本、変位計を載荷点下と中央部に計 3 台、 π 型変位計を載荷点間に 11 台設置した。載荷風景を写真-1 に示す。

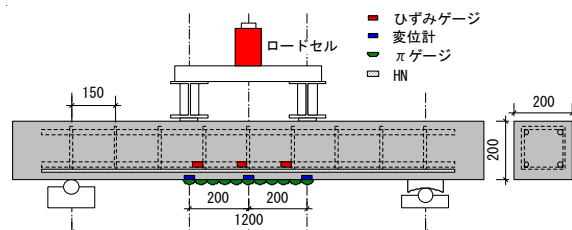


図-1 実験概要図 (単位: mm)

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 (学生会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 工修 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院 工博 (正会員)

*4 西日本高速道路株式会社 工修 (非会員)

2.2 検討ケース

既往実験における検討ケースを表-1に、HNの材料特性を表-2に、材料試験結果を表-3に示す。表-1に示すように、コンクリートの配合強度は20と40N/mm²、異形鉄筋、HNなしのNo.1を標準とし、パラメータ（鉄筋形状、配合強度、HNの位置）の違いがHNの補強効果に及ぼす影響について比較検討した。本文では、HNの補強効果が大きく発揮された鉄筋形状及び配合強度について検討した。ここで、表-2よりHNあたり繊維量が17.1mm²であるのに対し、引張鉄筋の総断面積は397mm²（D16×2）であるため、HN/鉄筋比は4.3%となる。これは、HN補強を施したNo.2, 4, 7で共通である。

2.3 ひび割れ幅の低減効果の評価手法

HNの設置によるひび割れ幅の低減効果を数値的に評

価するため、式(1)に示すひび割れ幅の低減効果Wを導入した¹⁾。これは、同一鉄筋ひずみにおいて、HNがある場合の最大ひび割れ幅をHNがない場合の最大ひび割れ幅で除したものである。

$$W = \frac{C_{HN}}{C_{PL}} \quad (1)$$

C_{HN} : HNがある場合の最大ひび割れ幅

C_{PL} : HNがない場合の最大ひび割れ幅

表-4に各検討ケースにおける最大ひび割れ幅を、表-5にひび割れ幅の低減効果Wを示す。表-5より、どのパラメータに対しても、一部の例外を除いてW=1.0を下回ることから、HNの補強効果によるひび割れ幅の低減を明瞭に確認することができ、またひび割れ幅の低減効果Wが鉄筋ひずみと明確な相関があることが知られる。



写真-1 載荷風景

表-2 HN材料特性

項目	特性値
HNあたり繊維量(mm ²)	17.1
メッシュサイズ(mm)	30×30±8
引張強度(N/mm ²)	1500
弾性係数(N/mm ²)	74000

表-1 検討ケース一覧

パラメータ	配合強度	HN位置	鉄筋種類	HN有無
No.1	標準	40N/mm ²	鉄筋外側 (かぶり側)	無
No.2				有
No.3	低強度	20N/mm ²		無
No.4				有
No.5	設置位置	40N/mm ²	鉄筋内側	有
No.6	鉄筋種類		鉄筋外側 (かぶり側)	丸鋼
No.7				有

表-3 材料試験結果

設計基準強度	圧縮強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	ヤング率(N/mm ²)
40N/mm ²	46.1	3.0	2.97×10 ⁴
20N/mm ²	20.8	1.7	2.51×10 ⁴

表-4 最大ひび割れ幅C (mm) の比較

パラメータ	HNの有無	鉄筋ひずみ (μ)					
		250	500	750	1000	1250	1500
No.1	無	0.072	0.137	0.207	0.267	0.329	0.386
No.2	有	0.046	0.098	0.187	0.265	0.334	0.387
No.3	無	0.037	0.124	0.208	0.297	0.358	0.404
No.4	有	0.024	0.093	0.178	0.231	0.281	0.330
No.6	無	0.076	0.237	0.462	0.775	1.145	1.652
No.7	有	0.048	0.209	0.360	0.539	0.598	0.654

表-5 ひび割れ幅低減効果Wの比較

パラメータ	HNの有無	W	鉄筋ひずみ (μ)					
			250	500	750	1000	1250	1500
No.1	無	No.1/No.1	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
No.2	有	No.2/No.1	0.649	0.715	0.901	0.994	1.015	1.003
No.3	無	No.3/No.3	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
No.4	有	No.4/No.3	0.653	0.752	0.858	0.778	0.785	0.815
No.6	無	No.6/No.1	1.066	1.727	2.228	2.904	3.481	4.277
No.7	有	No.7/No.1	0.673	1.524	1.738	2.019	1.818	1.694
		No.7/No.6	0.631	0.883	0.780	0.695	0.522	0.396

各パラメータにおける補強効果に着目すると、標準である No.2/No.1 ではひずみが大きくなると補強効果が小さくなるのに対し、圧縮強度の小さい No.4/No.3 では、ひずみが大きくなっても補強効果が持続する傾向がみられる。また、丸鋼鉄筋である No.7/No.6 はひび割れ幅低減効果 W の値が最も小さく、最も補強効果が発揮され、ひび割れ幅が低減された。

3. 曲げひび割れ幅の評価

コンクリート標準示方書³⁾には、曲げひび割れ幅 w の算定方法として、式(2)が示されている。この式(2)によれば、曲げひび割れ幅は、ひび割れ間隔とひび割れ間の鉄筋とコンクリートの伸びひずみの差との積で表される。また、ひび割れに影響を及ぼす種々の要因を考慮するために、影響係数 k_1 , k_2 , k_3 が乗じられている。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \left\{ 4c + 0.7(c_s - \phi) \right\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \quad (2)$$

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 (一般に、異形鉄筋の場合には 1.0、普通丸鋼および PC 鋼材の場合には 1.3 としよ)

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7 \quad (3)$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)。一般に、設計

圧縮強度 f'_{cd} を用いてよい

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8} \quad (4)$$

n : 引張鋼材の段数

c : かぶり (mm)

c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)

ϕ : 鋼材径 (mm)

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

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量 (N/mm²)

σ_{pc} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの PC 鋼材応力度の増加量 (N/mm²)

文献 2) により、HN のひび割れ抑制効果は鉄筋とコンクリートの付着喪失領域の改善にあることが報告されている。そのため、本検討では鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 k_1 に対して、HN による付着喪失領域の改善効果を新たに組み込むことにした。

式(2)により表されるひび割れ幅を W_{HN} 及び W_{PL} とし、これらを式(1)に代入する。鉄筋形状のみが異なる場合には、 k_1 を除いたすべての項が打ち消され、式(5)が得られる。異形鉄筋の場合、 $k_1=1.0$ であるため、式(5)の分母は 1 となり、式(5) は HN 補強時の k_1 を求める式となる。式(5)の左辺と式(1)の右辺が等しいため、 k_1 はひび割れ幅

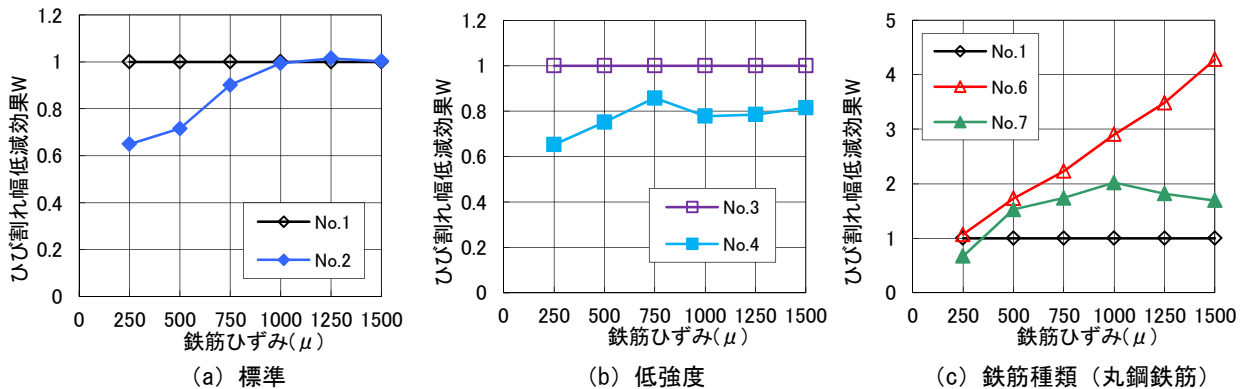


図-2 ひび割れ幅低減効果を表す指標 W の比較

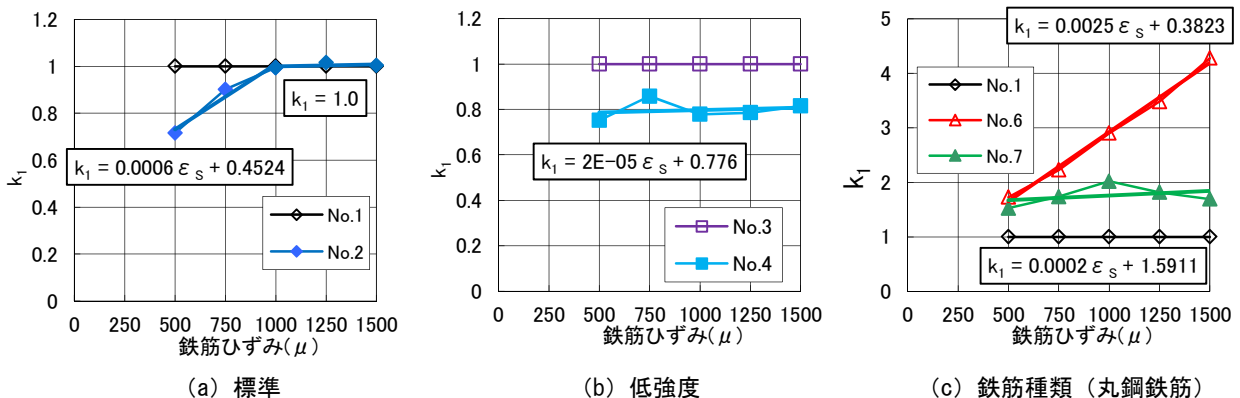


図-3 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数 k_1 の定式化

低減効果を表す指標 W と等しくなる。ここで、後述する収縮ひび割れ幅算定式についても、式(5)と同様の方法で K_{HN} なる HN 補強の影響を表す係数を求めることができ、 K_{HN} も W と等しくなる。

$$W = \frac{W_{HN}}{W_{PL}} = \frac{k_{1_HN}}{k_{1_PL}} = k_{1_HN} = \frac{K_{HN}}{K_{PL}} = K_{PL} \quad (5)$$

表-4 より W は鉄筋ひずみと相関関係にあるため、鉄筋ひずみの関数として最小 2 乗法により定式化した。また、丸鋼鉄筋で無補強の場合についても、異形鉄筋を基準として表した。得られた係数 k_1 を式(6)~(11)に示す。

コンクリート強度 40N/mm^2 ，異形鉄筋の場合、

$$k_1 = 1.0 \quad (\text{HN なし}) \quad (6)$$

$$k_1 = 0.0006\varepsilon_s + 0.4524 \quad (\text{HN あり, } k_1 \leq 1.0) \quad (7a)$$

$$k_1 = 1.0 \quad (\text{HN あり, } k_1 > 1.0) \quad (7b)$$

コンクリート強度 20N/mm^2 ，異形鉄筋の場合、

$$k_1 = 1.0 \quad (\text{HN なし}) \quad (8)$$

$$k_1 = 2.0 \times 10^{-5} \varepsilon_s + 0.776 \quad (\text{HN あり}) \quad (9)$$

コンクリート強度 40N/mm^2 ，丸鋼鉄筋の場合、

$$k_1 = 0.0025\varepsilon_s + 0.3823 \quad (\text{HN なし}) \quad (10)$$

$$k_1 = 0.0002\varepsilon_s + 1.5911 \quad (\text{HN あり}) \quad (11)$$

ここで、定式化において、 250μ についてはその他のひずみに比べて傾向が明確でないため、省略した。また、異形鉄筋の HN 補強 No.2 の場合、ひずみが大きくなると、 k_1 が大きくなり、異形鉄筋無補強の場合の $k_1=1.0$ を超えるため、上限値を設定し、 $k_1=1.0$ を最大値とした。

4. 収縮ひび割れ幅の評価

鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針 (案) (建築学会) ⁴⁾ によると、式(12)により収縮ひび割れ幅を求めることができる。式(12)は鉄筋ひずみに依存した算定式であり、曲げひび割れ幅の式(2)と類似している。また、竹下らの実験より、HN のひび割れ抑制効果は HN による付着損失領域の改善にあること明らかにされた。このため、本論文では等価付着損失長さ L_b を用いた HN ひび割れ抑制効果の定量的な評価を試みた。このとき、式(12)内の ε_{sh} 及び ε_{creep} を一定値とし、時間経過を無視することで、曲げ載荷により短時間で発生するひび割れに対しても適用可能であると考えた。

$$w = \{\varepsilon_{sl'} + (\varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_{creep})\} \times L_b \quad (12)$$

$$L_b = K \cdot L_b(0) \quad (13)$$

$$L_b(0) = 300(\text{mm}) \quad (14)$$

L_b : 等価付着喪失長さ (mm)

$\varepsilon_{sl'}$: ひび割れ位置の鉄筋ひずみ

ε_{sh} : ひび割れ発生直前の自由乾燥収縮ひずみ

ε_{creep} : コンクリートのクリープひずみ

E_s : 鉄筋ヤング係数 (N/mm^2)

$L_{b(0)}$: 基準断面および基本設定値における等価付着喪失長さ (mm)

$$K = K_{sh} \cdot K_{fc} \cdot K_d \cdot K_\rho \cdot K_\sigma \quad (15)$$

K_{sh} : 収縮ひずみの L_b への影響係数

$$K_{sh} = 1 \quad (16)$$

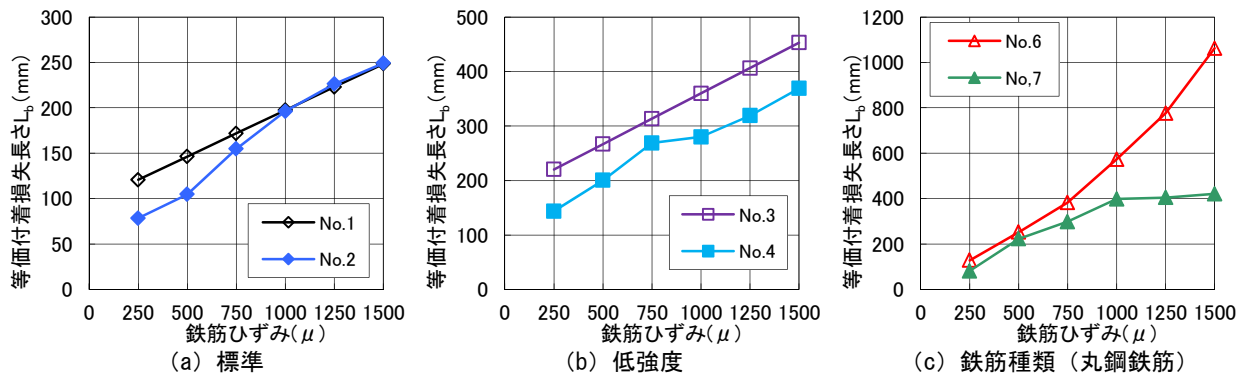


図-4 等価付着喪失長さ L_b と鉄筋ひずみの関係 (HN の有無)

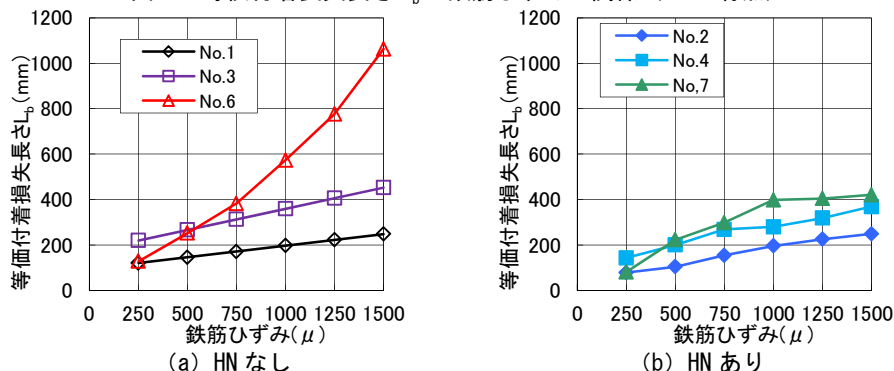


図-5 等価付着喪失長さ L_b と鉄筋ひずみの関係 (各パラメータ)

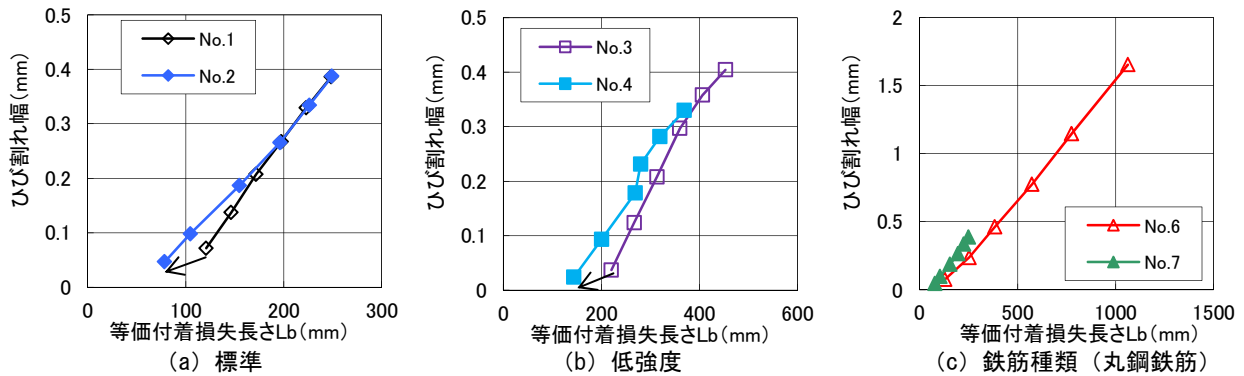


図-6 ひび割れ幅—等価付着喪失長さ \$L_b\$ 関係 (HNの有無)

\$K_{fc}\$: コンクリート圧縮強度の \$L_b\$ への影響係数

$$K_{fc} = -0.019 \times fc + 1.46 \quad (17)$$

\$K_d\$: 鉄筋径の \$L_b\$ への影響係数

$$K_d = 1.19 \quad (18)$$

\$K_\rho\$: 鉄筋比の \$L_b\$ への影響係数

$$K_\rho = -13.14 \times \rho + 1.077 \quad (19)$$

\$K_\sigma\$: 鉄筋応力の \$L_b\$ への影響係数

$$K_\sigma = 0.003 \times \sigma_s + 0.560 \quad (20)$$

そこで、本検討では式(15)について、HN補強効果を考慮するための係数 \$K_{HN}\$ を新たに導入した式(21)を提案する。このとき、式(12)(13)はそれぞれ(22)(23)で表される。

$$\bar{K} = K \cdot K_{HN} \quad (21)$$

$$w = \left\{ \varepsilon_{sl} + \left(\varepsilon_{sh}(t, t_0) - \varepsilon_{creep} \right) \right\} \times \bar{L}_b \quad (22)$$

$$\bar{L}_b = \bar{K} \cdot L_b(0) \quad (23)$$

3章と同様に、同一断面形状、同一鉄筋ひずみの場合、式(22)で表されるひび割れ幅 \$w_{PL}\$ と \$w_{HN}\$ を辺々除すと、式(5)に示すように \$K_{HN}/K_{PL}\$ の項のみが残る。\$K_{PL}\$ は無補強の状態を表し、HNの影響がないため \$K_{PL}=1\$ とした場合、式(5)より \$K_{HN}=k_{1_HN}\$ となる。このため、収縮ひび割れ幅に対するHNの影響係数 \$K_{HN}\$ に対しても式(6)～式(11)を用いることができる。

$$W = \frac{w_{HN}}{w_{PL}} = \frac{k_{1_HN}}{k_{1_PL}} = k_{1_HN} = \frac{K_{HN}}{K_{PL}} = K_{HN} \quad (5)$$

式(6)～(11)を用いて \$K_{HN}\$ を算出し、式(13)～式(21)を使用して算出した等価付着喪失領域長さ \$L_b\$ と鉄筋ひずみとの関係を図-4、5に示す。ひび割れ幅については鉄筋ひずみに対応したひび割れ幅の実験値を使用した。図-4より、同一鉄筋ひずみの場合、どのパラメータを見ても、HNの補強効果により等価付着喪失領域長さが小さくなり、HNの補強効果を表現することができた。また、等価付着喪失長さにおいても、HNの補強効果が鉄筋ひずみに依存していることが明らかになった。

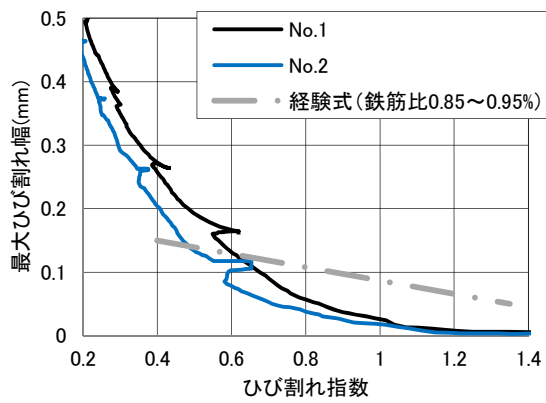
図-6にひび割れ幅と等価付着喪失長さの関係を示す。図-6より、同一ひずみにおいて、等価付着喪失長さが小さくなれば、ひび割れ幅も小さくなることわかる。

5. 温度ひび割れ幅の評価

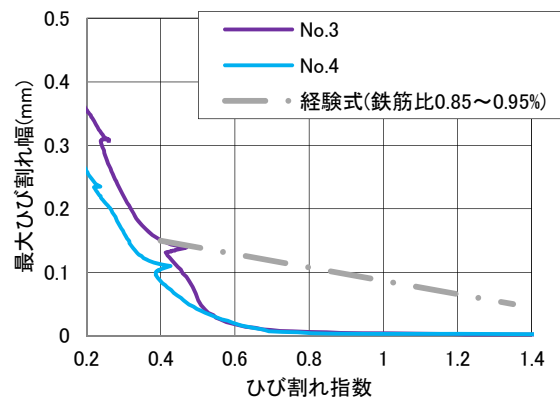
文献4)において、ひび割れ指数と最大ひび割れ幅の関係は直線的であるという経験則が示されている。また、文献5)には温度ひび割れによるひび割れ幅も鉄筋ひずみと関連性があることが掲載されている。ここで、ひび割れ指数は、(試験体の引張強度) / (構造物中の引張主応力) により計算され、その比率に応じて最大ひび割れ幅の予測値を簡易的に得ることができる。このため、本検討では曲げ載荷試験によって得られた鉄筋ひずみとひび割れ幅の関係性について確認し、曲げ載荷試験結果を使用した場合のHNの補強による最大ひび割れ幅—ひび割れ指数関係の変化を明らかにした。

実験により得られたひび割れ幅—ひび割れ指数関係を図-7に示す。図-7より、各パラメータにおいてHNがある場合とない場合の関係式を比較し、HNの補強効果を確認した。また、図-7には、コンクリート標準示方書に記されたひび割れ指数—最大ひび割れ幅関係の経験式(0.85～0.95%)を併せて示している。

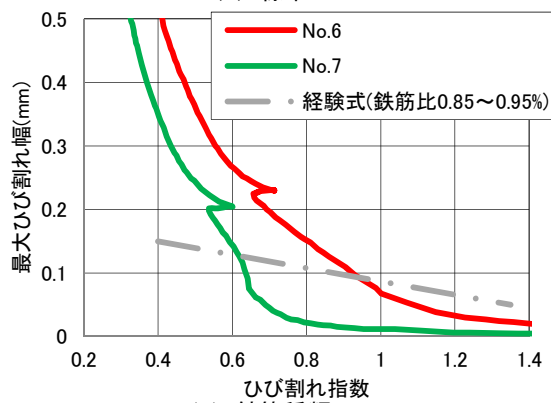
図-7より、経験則から得られた最大ひび割れ幅—ひび割れ指数関係は直線であるが、今回の実験により得られた最大ひび割れ幅—ひび割れ指数関係は曲線となることわかる。ここで、本実験の引張鉄筋比はどの供試体においても1.00%であるため、経験則の直線より下側に位置するのは調和的である。ただし、ひび割れ指数が小さくなるに従って最大ひび割れ幅が急上昇し、経験則の直線より上になり、しかもその時のひび割れ指数は各パラメータによって異なる。すなわち、付着の弱い丸鋼鉄筋の場合が最も大きく最大ひび割れ幅が上昇し、低強度コンクリートの場合は、ひび割れ指数も小さくなるため、曲線の上昇は遅れている。また、各パラメータにおいてHNで補強することにより、ひび割れ幅—ひび割れ指数関係を表す曲線が下方にシフトしたため、HNによる補強の効果を確認することができた。以上より、温度ひび割れ幅に対して曲げ載荷試験より得られた結果を適用した今回の検討では、その有用性を確認することができな



(a) 標準



(b) 低強度



(c) 鉄筋種類

図-7 ひび割れ指数とひび割れ幅の関係

かった。しかし、ひび割れ幅－ひび割れ指数関係においても、HN の補強効果については確認することができ、HN による補強効果は鉄筋比の増加と同等である可能性が示唆される。

6. まとめ

最後に、本検討により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) HN のひび割れ幅低減効果を表す指標 W を求めると、どのパラメータにおいても HN による補強効果を確認することができた。また、 W は鉄筋ひずみの関数として表現することができた。
- (2) コンクリートの圧縮強度 40N/mm^2 、異形鉄筋が標準供試体では、鉄筋ひずみが大きくなるにつれて HN による補強効果は小さくなった。しかし、 20N/mm^2 の場合、鉄筋ひずみが大きくなるにつれ、HN による補強効果は小さくなるが、 40N/mm^2 に比べ、その補強効果の低減量は小さかった。
- (3) 丸鋼鉄筋を使用した場合、異形鉄筋を使用した場合に比べ、HN による補強効果が高くなるのが数値的に確認できた。
- (4) 等価付着喪失長さを計算すると、どのパラメータにおいても、HN による補強効果は、鉄筋ひずみに依存する傾向が確認できた。
- (5) コンクリートの圧縮強度が 40N/mm^2 と比較して、

20N/mm^2 の場合、HN による補強効果は、初期の等価付着喪失長さが大きくなることが確認できた。

- (6) 最大ひび割れ幅－ひび割れ指数関係に着目しても、HN 設置により曲線が下方にシフトするため、HN による補強効果を確認できた。このため、HN を設置して補強することは、鉄筋比を増加させることと同等である可能性が示唆された。
- (7) HN によるひび割れ抑制効果は、本論文の範囲内では、HN による付着損失領域の改善を考慮するための係数を導入することで提案できた。

本論文では、曲げ及び収縮ひび割れ幅算定式において、ガラス繊維ネットや鉄筋比の関数を一定として検討したものであり、実験ケースに対してのみに適用可能な算定式となっている。このため、任意の配合強度や鉄筋比、補強比率に対して適用可能な算定式の提案が今後の課題である。また、本検討より温度ひび割れによるひび割れ幅を曲げ載荷試験から予測することは難しい。このため、HN の温度ひび割れに対する抑制効果は、より大型な試験体に対する曝露試験等により詳細に明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 杉野・竹下・郭：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
- 2) 竹下・大塚・李：耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用いた鉄筋コンクリート梁のひび割れ抑制メカニズム，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.1，pp.502-507，2012
- 3) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書[設計編]
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造構造物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 5) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008