

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に関する研究

杉野 雄亮*1・竹下 永造*2・郭 度連*3

要旨：耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果について定量的に評価するため、耐アルカリ性ガラス繊維ネットを埋設した RC 試験体の曲げ載荷試験を行った。その結果、耐アルカリ性ガラス繊維ネットは、鉄筋に発生する応力を負担することで、ひび割れ幅を低減することが認められた。また、ひび割れ幅の低減効果に加え、ひび割れの分散効果も認められた。これらをまとめ、本論文は、ひび割れ幅の低減効果と、ひび割れの分散効果から、ひび割れ抑制効果を定量的に評価したものである。

キーワード：耐アルカリ性ガラス繊維ネット、ひび割れ、HN/鉄筋比、ひび割れ抑制係数

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の長寿命化が重視される現状にあって、ひび割れ制御技術の確立への期待は大きくなっている。その制御技術の中には、膨張材や低熱セメント、収縮低減剤などを使用し、「ひび割れの発生を防止」する方法と、誘発目地を施してひび割れを集中させる、あるいは、補強鉄筋や繊維補強シートなどを用いてひび割れを分散させ、「ひび割れ幅を制御する」方法がある¹⁾。前者は、コンクリートの水密性・気密性を確実に確保しなければならない場合や、コンクリート構造物の美観・価値を著しく損なう可能性がある場合に求められる。しかし、この方法では、ひび割れの発生を許容しない設計において、技術的に可能であっても、過剰な対策を講じることとなり、経済的ではない場合がある。一方、後者は近年のひび割れ幅制御技術の蓄積に伴い、ひび割れを抑制する確実かつ経済的な手法として、徐々にではあるが採用されている。

連続繊維補強シートの一つとして耐アルカリ性ガラス繊維をネット状に配置したものがあり、方向性を有する

ことで効率的なひび割れ低減効果が期待されるものである²⁾。耐アルカリ性ガラス繊維そのものは古くからの材料であり、既往の研究も少なくないが³⁾、ネット状に形状を考案し、ひび割れ低減材料として用いた研究事例は少なく⁴⁾⁵⁾、そのひび割れ幅を制御するメカニズム的部分に関して評価したものは十分とはいえない現状である。

このような背景のもと、本研究ではひび割れ幅の制御方法として使用されている「耐アルカリ性ガラス繊維ネット」に着目し、そのひび割れ抑制効果に関して報告するものである。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの配合

表-1に使用材料を、表-2にコンクリートの配合をそれぞれ示す。コンクリートの水セメント比は、試験体の大きさと鉄筋比を考慮し、D10およびD13を使用した試験体はW/C=35%とし、D6を使用した試験体はW/C=55%とした。試験体の呼び強度は、W/C=55%のD6シリーズは40N/mm²、W/C=35%のD10、D13シリーズは60N/mm²

表-1 使用材料

材料	記号	物性
セメント	C	早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³
水	W	上水道水
粗骨材	G	桜川産砂岩碎石, 密度2.65g/cm ³ , 吸水率0.67%, F.M.6.74
細骨材	S	掛川産山砂, 密度2.56g/cm ³ , 吸水率2.2%, F.M.2.78
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能AE減水剤
	Ad	リグニンスルホン酸系AE減水剤

表-2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	呼び強度 (N/mm ²)	単位量 (kg/m ³)			
						W	C	S	G
35	46	20	18	4.5	60	168	480	757	900
55	46	20	18	4.5	40	168	305	823	978

*1 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修 (正会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修 (正会員)

*3 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 博士 (工学) (正会員)

である。

2.2 使用材料

表-3 に耐アルカリ性ガラス繊維ネットの力学特性および形状寸法を示す。本研究で使用した耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以降、HN と称す）の形状は、写真-1 に示すように、最も効率のよい軸配向になっており⁶⁾、コンクリートに発生する引張応力を効率的に負担するとともに、引張応力が働く箇所に的確に施工することで効果的にひび割れを抑制できることを特徴としている。写真の施工状況で示すように、実用上は間隔を開けて設置しており、コンクリートの充填性を阻害しないことは実験的に確認されている。

鉄筋は、SD295 の D6, D10, D13 を使用しており、試験体の鉄筋比はそれぞれ 0.3, 0.7, 1.3% である。

2.3 試験水準

表-4 に試験水準を示す。D10 を使用した試験体では、

表-3 HNの力学特性および形状寸法

項目	物性	測定方法
引張強さ (N/幅)	15,000以上	JIS L1096
弾性係数 (N/mm ²)	74,000	JIS L1096
シートの幅 (cm)	21±0.7	JIS L1096
メッシュの大きさ (mm×mm)	30×30±8	JIS L1096



写真-1 HNの外観および施工状況

表-4 試験水準

試験体名	載荷方法	鉄筋比 (%)	鉄筋種類	HN枚数		
LP1-D6-HN0	中央点 載荷	0.3	D6	0		
LP1-D6-HN1				1		
LP1-D10-HN0		0.7		D10	0	
LP1-D10-HN1					1	
LP1-D10-HN2		2				
LP1-D13-HN0		1.3			D13	0
LP1-D13-HN1	1					
LP2-D6-HN0	2点 載荷	0.3	D6			0
LP2-D6-HN1				1		
LP2-D10-HN0		0.7		D10		0
LP2-D10-HN1						1
LP2-D13-HN0		1.3			D13	0
LP2-D13-HN1						1

HNの埋設枚数を 0, 1, 2枚とし、D6およびD13を使用した試験体では、HNの敷設枚数を 0, 1枚とした。また、載荷方法は、中央点載荷法 (LP1 シリーズ) および 2点載荷法 (LP2 シリーズ) の 2パターンとした。

3. ひび割れ抑制の評価手法

3.1 ひび割れ幅の低減効果の評価手法

試験体中央部に曲げひび割れが 1本のみ生じることを想定した試験方法を検討し、HN のひび割れ幅の低減効果を評価した。ひび割れ幅の低減効果を定量的に評価するため、無補強 (HN が 0枚) および HN を埋設した試験体において、同一荷重時に発生する曲げひび割れ幅の比率から、式(1)のように、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W を算出した。

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

W : ひび割れ幅低減効果を表す指標

W_{PL} : 無補強の試験体に生じる曲げひび割れ幅

W_{HN} : HN を埋設した試験体に生じる曲げひび割れ幅

このとき W の算出は、ひび割れ発生荷重の 2倍までの計測点に対し、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W をすべて求め、それらを平均化して行った。

(1) 試験体概要

図-1 に試験体の形状寸法を示す。試験体は、長さ 700mm、幅 200mm、高さ 100mm とし、かぶり厚は、35mm

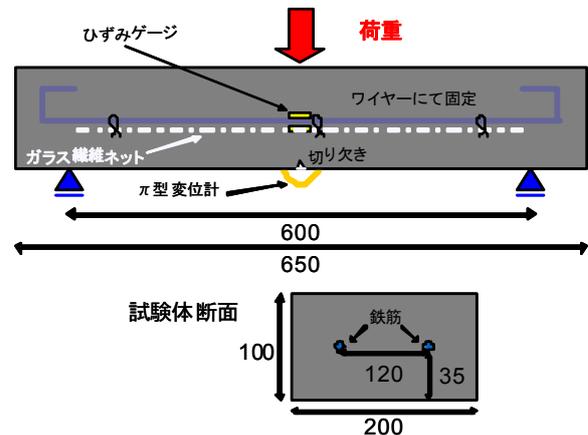


図-1 試験体の形状寸法 (中央点載荷法)



写真-2 HNの設置状況

とした。試験体中央には、ひび割れが分散して生じることを防ぐため、切り欠き（断面欠損：-7mm）を設けた。HNは、鉄筋に敷設し、ワイヤーで固定した。

HNの設置状況を写真-2に示す。また、鉄筋中央には、ひずみゲージを貼付し、鉄筋に発生するひずみを測定した。

表-5 ひび割れ発生荷重と鉄筋降伏荷重

試験体名	荷重 (kN)	
	ひび割れ発生	鉄筋降伏
LP1-D6-HN0	9.08	10.75
LP1-D6-HN1	9.12	15.95
LP1-D10-HN0	10.0	21.5
LP1-D10-HN1	9.5	22.7
LP1-D10-HN2	10.5	28.2
LP1-D13-HN0	11.08	32.54
LP1-D13-HN1	12.95	38.41

(2) 荷重方法

荷重は2点支持の中央1点荷重とした。荷重はロードセルにより測定し、ひび割れ幅は、試験体中央に設置したゲージ長100mmのπ型変位計を用い測定した。

(3) 試験結果および考察

表-5に、ひび割れ発生荷重と鉄筋降伏荷重を示す。ひび割れ発生荷重の判定は、試験体底面に貼付したπ型変位計の測定値の中で、ひび割れ発生に伴い最も低い荷重で急変した点とし、鉄筋降伏荷重の判定は、鉄筋中央部のひずみゲージにより測定した鉄筋ひずみが降伏ひずみである2000μに達した点とした。表より、いずれの鉄筋種類においても、HNの有無に関わらず、ひび割れ発生荷重は同程度であるが、HN埋設枚数が増えると、鉄筋降伏荷重は増加することが分かる。

図-2に、曲げ荷重-ひび割れ幅の関係を示す。図よ

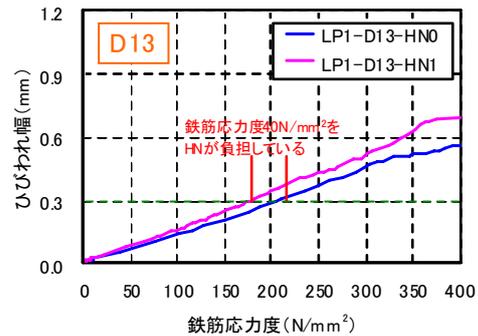
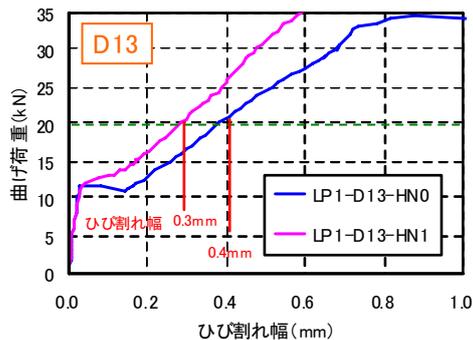
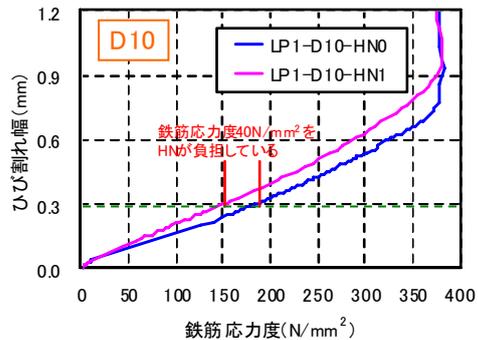
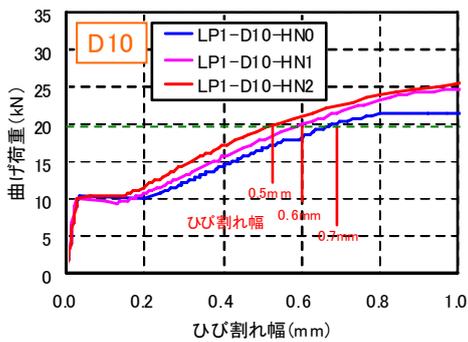
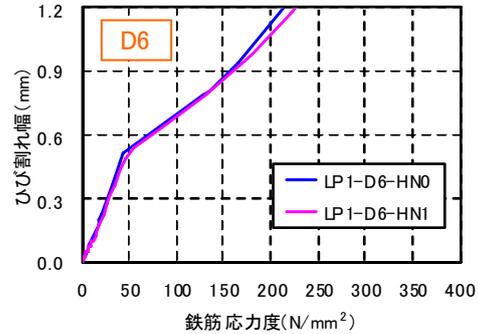
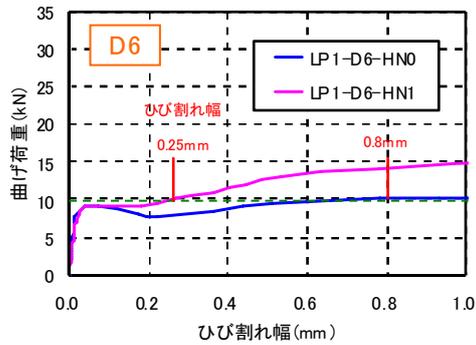


図-2 曲げ荷重-ひび割れ幅の関係

図-3 ひび割れ幅-鉄筋応力度の関係

り、ひび割れ発生後の応力開放（曲げひび割れ発生後のひび割れ幅の増加）に差が生じており、HN を埋設している試験体については、ひび割れ発生後のひび割れ幅の増加を抑制していることが分かる。その後、ひび割れ幅の増加に伴い HN の効果が現れ、例えば D10 を使用した試験体の同一曲げ荷重による比較では、LP1-D10-HN0 がひび割れ幅 0.7mm であるのに対し、LP1-D10-HN1 はひび割れ幅 0.6mm、LP1-D10-HN2 はひび割れ幅 0.5mm となっている。

図-3 にひび割れ幅－鉄筋応力度の関係を示す。ここで、鉄筋応力度は、鉄筋ひずみの測定値から算出した。図より、D10 および D13 を使用した試験体では、同一ひび割れ幅において、HN を埋設すると、無補強の試験体に比べ、鉄筋応力度が約 40N/mm² 小さくなっており、HN が鉄筋に発生する応力の一部を負担していると考えられる。しかし、D6 を使用した試験体に関しては、同一ひび割れ幅のとき、鉄筋応力度に大きな差異が認められず、ひび割れ－鉄筋応力度曲線の傾きが他の試験体とは大きく異なっており、傾きが大きいことが分かる。これは、ひび割れ発生後すぐに鉄筋降伏に到達しやすいためである。その影響により、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみを精度よく測定することが難しかったため、差が生じなかったものと考えられる。また、この傾向は図-2 の曲げ荷重－ひび割れ幅でも認められており、D6 試験体のひび割れ幅低減効果が過大評価される一因になっている。

表-6 に、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W を示す。HN を 1 枚埋設した試験体を比較すると、使用した鉄筋種類が D13、D10、D6 の順にひび割れ幅低減効果を表す指標 W が小さくなっており、鉄筋量が少ないほど、HN のひび割れ幅低減効果が大きくなると考えられるが、D6 は前述のような要因によって過大評価される傾向にある。一方、HN の埋設枚数が 2 枚の場合は、HN の埋設枚数が 1 枚の場合に比べ、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W が小さくなり、HN の埋設枚数を増加させることにより、ひび割れ幅低減効果が大きくなると考えられる。

3.2 ひび割れの分散効果の評価手法

3.1 の切り欠きを設けたひび割れ幅の評価試験では、材料的な特性としてのひび割れ幅の抑制効果を確認しており、ひび割れの分散効果については考慮されていない。本節では、試験体に等曲げモーメント区間を設け、複数ひび割れが生じる条件において、HN のひび割れ分散効果を評価した。国枝らは、荷重－変位曲線における最大荷重までの面積が、等曲げモーメント区間に生じたひび割れ本数と相関があり、ひび割れの分散性を評価する指標となり得ることを示しており⁷⁾、本論文では、この手法をもとに、ひび割れ分散性を評価した。HN のひび割れ分散効果を定量的に評価するため、無補強および HN

を埋設した試験体の荷重－変位曲線における鉄筋降伏時までの面積を算出し、式(2)のように、ひび割れ分散効果を表す指標 D として算出した。

$$D = \frac{D_{HN}}{D_{PL}} \quad (2)$$

D : ひび割れ分散効果を表す指標

D_{PL} : 無補強の試験体の荷重－変位曲線における鉄筋降伏荷重までの面積

D_{HN} : HN を埋設した試験体の荷重－変位曲線における鉄筋降伏荷重までの面積

(1) 試験体概要

図-4 に試験体の形状寸法を示す。試験体の寸法、かぶり厚さ、および鉄筋の配置は、中央点載荷法による試験と同様である。2 点載荷法による曲げ強度試験では、等曲げモーメント区間を 130mm とした。HN は、鉄筋に敷設し、ワイヤーで固定した。鉄筋中央には、ひずみゲージを貼付し、鉄筋に発生するひずみを測定した。

(2) 載荷方法

載荷は、2 点支持の 2 点載荷とした。荷重はロードセルにより測定し、ひび割れ幅は、等曲げモーメント区間に設置した π 型変位計を用い測定した。 π 型変位計の貼付位置を図-5 に示す。また、試験体中央のたわみ量を測定するため、試験体中央に接触型変位計を設置した。

(3) 試験結果および考察

図-6 に、曲げ荷重－変位および鉄筋ひずみ－変位の関係を、表-7 に、ひび割れ分散効果を表す指標 D をそ

表-6 ひび割れ幅低減効果を表す指標 W

試験体名	ひび割れ幅低減指標 W
LP1-D6-HN1	0.20
LP1-D10-HN1	0.80
LP1-D10-HN2	0.76
LP1-D13-HN1	0.82

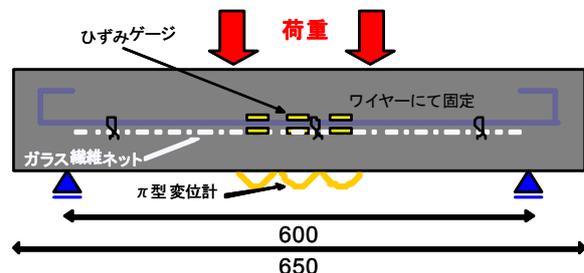


図-4 試験体の形状寸法 (2点載荷法)

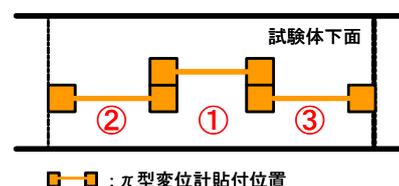


図-5 2点載荷時の π 型変位計の貼付位置

れぞれ示す。図より、荷重－変位曲線における鉄筋降伏荷重までの面積を比較すると、HNを埋設した試験体は、無補強のものより大きくなる事が分かる。また、表より、ひび割れ分散効果を表す指標 D は、D13、D10、D6の順に大きくなっており、鉄筋量が少ないほど、ひび割れ分散効果は大きくなる事が分かる。なお、ひび割れの分散現象は、図-5に示した中央部の π 型変位計の貼付位置①、②、③の各位置に貼付した π 型変位計の測定値からも確認することができる。一例として、図-7に、D13を使用した試験体のひび割れ幅－変位関係を示す。図より、無補強の試験体では、中央部分の π 型変位計①の測定値が大きくなっており、特定の部分に応力が集中

していると考えられる。これに対し、HNを埋設した試験体では、各位置の π 型変位計の測定値が同程度であることから、応力が均等に分散し、ひび割れが分散していると考えられる。

4. ひび割れ抑制効果の定量的評価

ひび割れ幅の低減効果を表す指標 W は、HNを用いた場合の総ひび割れ幅の低減効果を示している。また、ひび割れの分散効果を表す指標 D は、ひび割れ本数を示しており、式(3)に示すように、総ひび割れ幅をひび割れ本数で割ることで、HNを用いた場合の無補強のコンクリートに対するひび割れ抑制効果を定量的に示すことができる。

$$\alpha = \frac{W}{D} \quad (3)$$

α : ひび割れ抑制係数

W : ひび割れ幅低減効果を表す指標

D : ひび割れ分散効果を表す指標

一方、ひび割れの低減効果は前述したように、鉄筋比と深い相関関係があり、鉄筋比が大きいほど、HNの効果は小さく、鉄筋比が小さいほど、HNの効果は大きく

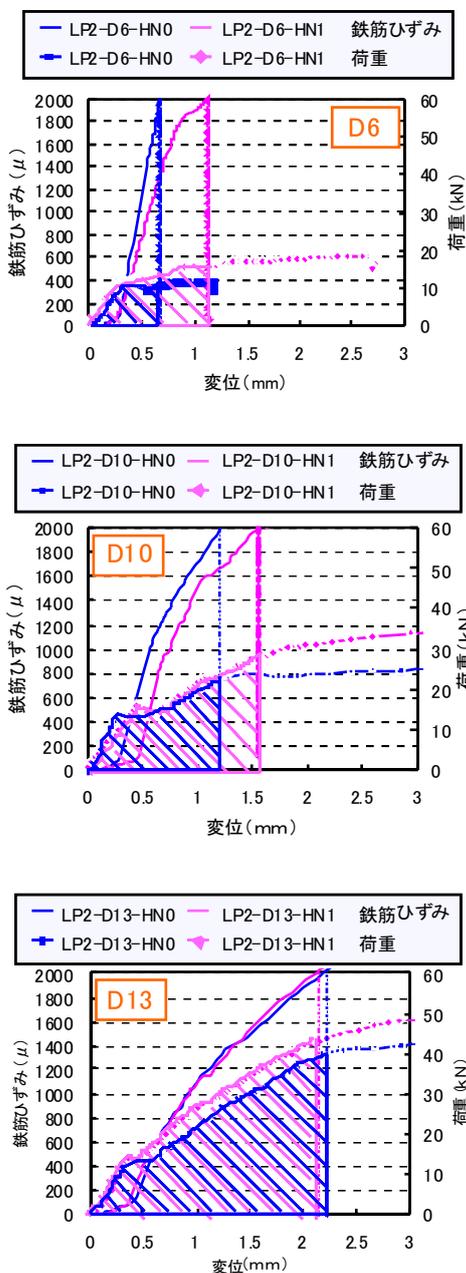


図-6 荷重－変位の関係

表-7 ひび割れ分散効果を表す指標 D

試験体名	鉄筋降伏荷重までの面積	ひび割れ分散指標 D
LP2-D6-HN0	5.39	2.52
LP2-D6-HN1	13.55	
LP2-D10-HN0	14.47	1.66
LP2-D10-HN1	23.99	
LP-D13-HN0	35.75	1.17
LP-D13-HN1	41.85	

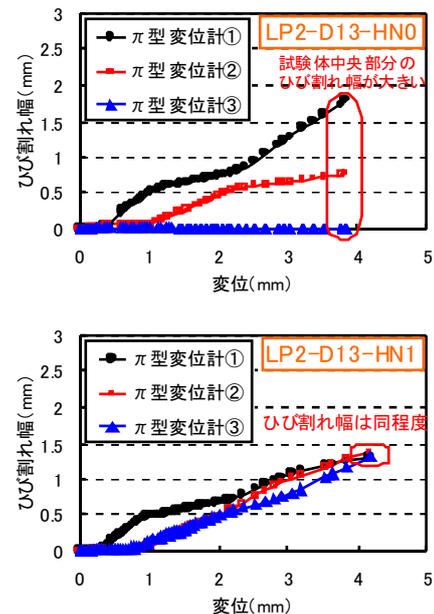


図-7 ひび割れ幅－変位の関係

表-8 ひび割れ抑制係数

鉄筋種類	HN枚数	HN/鉄筋比 (%)	ひび割れ幅低減指標 W	ひび割れ分散指標 D	ひび割れ抑制係数 α
D6	1	27.0	0.20	2.52	0.08
D10	1	12.0	0.80	1.66	0.48
	2	24.0	0.76	-	-
D13	1	6.7	0.82	1.17	0.70

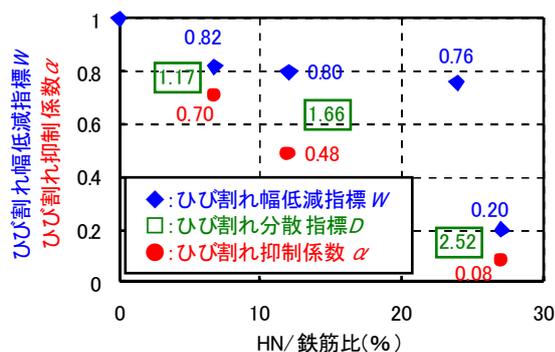


図-8 HN/鉄筋比-ひび割れ抑制係数の関係

なると考えられる。したがって、ひび割れの低減効果は、HNおよび鉄筋比との関数と考えられ、表-8にひび割れ抑制係数を、図-8にHN/鉄筋比-ひび割れ抑制係数の関係をそれぞれ示す。ここで、HN/鉄筋比とは、HNと鉄筋の断面積比である。なお、HNの断面積は、ネットの長手方向繊維の断面積の和とした。図より、HN/鉄筋比が大きくなると、ひび割れ幅低減効果を表す指標 W が小さくなり、ひび割れ幅の低減効果が大きくなると考えられる。また、ひび割れ分散効果を表す指標 D についても、HN/鉄筋比が大きくなると、大きくなり、ひび割れ分散効果は大きくなると考えられる。したがって、HNの断面積が増加する、もしくは鉄筋量が減少するほど、HNのひび割れ幅低減効果、ひび割れ分散効果が共に大きくなるため、双方の影響を受け、ひび割れ抑制効果が大きくなると考えられる。

本研究では、耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用いたコンクリートのひび割れ抑制効果をひび割れ幅およびひび割れ分散性を表す指標を用いて評価しており、実験的にその効果の定量化を試みている。現状では試験データも十分とは言えず、ひび割れの分散性の検証を含めた今後のデータの蓄積によって評価方法の妥当性は得られるものと考えられる。

5. まとめ

耐アルカリ性ガラス繊維シートのひび割れ抑制効果について定量的に評価するため、耐アルカリ性ガラス繊維シートを埋設したRC試験体の曲げ載荷試験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 耐アルカリ性ガラス繊維ネットを埋設したコンクリートは、鉄筋に発生する応力的一部分を負担し、ひび割れ発生後のひび割れ幅の増加を抑制する。
- (2) 耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用いたコンクリートは、応力の均一分散によるひび割れ分散効果が認められる。
- (3) ひび割れの抑制効果は、鉄筋比と密接な関係があると考えられ、HN/鉄筋比によるひび割れの抑制効果を示すことができ、HN/鉄筋比が大きくなると、無補強のコンクリートに比べてひび割れの抑制効果は大きくなる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006
- 2) 栗原貢介，李春鶴，郭度連，辻幸和：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.1363-1368，2009
- 3) 例えば，三嶋清敬：特殊な材料を用いたコンクリート（その18）ガラス繊維，コンクリート工学，Vol.25，No.6，pp.81-86，1987
- 4) 大谷俊浩，蔣海燕，佐藤嘉昭，竹内好雄：耐アルカリ性ガラス繊維ネットによるコンクリートの収縮ひび割れ抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.331-336，2009
- 5) 郭度連，竹下永造：耐アルカリ性ガラス繊維ネットによる収縮ひび割れの抑制，日本建築学会大会学術講演概要集，pp.487-488，2009.8
- 6) 後藤芳弘，今橋聰：ガラス繊維強化セメントにおける繊維補強効率について，セメント技術年報 30，pp.439-442，1976
- 7) 国枝稔，森川秀人，山下賢司，六郷恵哲：複数ひび割れを生じる高靱性セメント複合材料のひび割れ分散性の評価，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.285-290，2004