

# 論文 RC 構造物におけるネット状連続繊維補強材のひび割れ抑制効果に関する基礎的研究

安井賢太郎\*1・李春鶴\*2・長塩靖祐\*3・辻幸和\*4

**要旨:** 近年、鉄筋コンクリート構造物のひび割れ対策としてネット状連続繊維補強材を用いる事例が増えてきているが、ほとんどは竣工時の初期ひび割れの対策として用いられている。本研究では、ネット状連続繊維の構造材料としてのひび割れ抑制効果に着目した。異なる鉄筋径、ネット状連続繊維補強材の有無とその配置位置や繊維量がひび割れ抑制効果に及ぼす影響を実験的に検討し、そのひび割れ抑制のメカニズムを解明することを目的とした。その結果、ネット状連続繊維補強材を供試体に配置することにより、鉄筋径に関わらずひび割れ分散効果、ひび割れ抑制効果を得ることが確認できた。

**キーワード:** ネット状連続繊維補強材、ひび割れ制御、RC 構造物、一軸引張試験、分担力、相乗効果

## 1. はじめに

近年、ネット状連続繊維補強材（以下連続繊維と称する）は、竣工時の初期ひび割れの発生は許容するものの、耐久性上有害となるひび割れ幅とならないように制御する補助材料として広く使用されている<sup>1)</sup>。

筆者らは、これまでに連続繊維を構造用材料として使用し、荷重作用時におけるひび割れ抑制効果に着目して検討を続けてきた。例えば、コンクリートのかぶり、鉄筋径、連続繊維を配置する枚数をパラメーターとしたはりを作製して曲げ荷重試験を行い、連続繊維により曲げひび割れ発生荷重と引張鉄筋降伏荷重が増加し、ひび割れの抑制効果を確認した<sup>2)</sup>。また栗原らの研究<sup>3)</sup>では、連続繊維がかぶりに配置されることでひび割れ発生荷重は増加するが、降伏荷重および最大荷重は連続繊維の破断が先行するため低下することが認められている。

しかしながら、これらの研究においては連続繊維のひび割れ抑制効果のメカニズムがまだ解明されておらず、連続繊維とコンクリートの相乗効果によってひび割れが抑制されていると推測している段階である。この現状において連続繊維を用いて構造物を設計する場合、合理化設計を行うことが困難となっている。そのため、連続繊維によるコンクリートとの相乗効果を解明して合理化設計へと適用することが重要な課題といえる。

本研究では、異なる鉄筋径、連続繊維の配置位置および繊維量をパラメーターとした供試体の一軸引張強度試験を行い、連続繊維のひび割れ抑制効果に関するメカニズムの解明をすることを目的とする。一軸引張強度試験を行うことで、構造物に一方方向の引張荷重を作用させた際の構成材料（コンクリート、鉄筋および連続繊維）の

表-1 ネット状連続繊維補強材の特性値

項目	単位	特性値
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	1,500
引張弾性率	N/mm <sup>2</sup>	74,000
破断時の伸び	%	2
軟化点	℃	800
密度	g/cm <sup>3</sup>	2.8
熱膨張係数	×10 <sup>-6</sup> /K	9.0

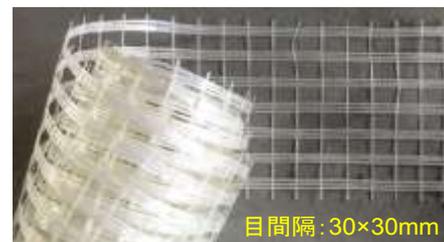


写真-1 ネット状連続繊維補強材の外観

荷重分担を定量化することができるものと考えている。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料とコンクリート配合

#### (1) 連続繊維の特性

表-1に本実験に使用した連続繊維の特性値を示す。また、連続繊維の外観を写真-1に示す。連続繊維は耐アルカリ性ガラス繊維である。

#### (2) コンクリートの使用材料

表-2にコンクリートの使用材料、表-3にコンクリートの配合を示す。供試体は2回に分けて作製したものの、その配合は同じである。コンクリートの設計基準強度は18 N/mm<sup>2</sup>であり、目標スランブは18.0±2.5 cm、目標空気量は4.5±1.5%と設定した。なお、コンクリートは後述する

\*1 宮崎大学 工学部教育研究支援技術センター 修士（工学）（正会員）

\*2 宮崎大学 工学部教育研究部准教授 博士（工学）（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）

\*4 NPO 法人 持続可能な社会基盤研究会理事長 工博（正会員）

表-2 コンクリートの使用材料一覧

材料名	記号	備考
水	W	地下水・上澄水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.15 g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	福岡県玄海灘長間礁沖, 表面密度 2.58 g/cm <sup>3</sup> 宮崎県宮崎市田野町産, 表面密度 2.58 g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	大分県津久見市産, 表面密度 2.71 g/cm <sup>3</sup>
AE 減水剤	Ad	AE 減水剤 標準形 I 種

表-3 コンクリートの配合

コンクリート種類	W/C (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		W	C	S	G	Ad
AA	67	183	274	857	960	2.74
BB	67	183	274	857	960	2.74

一軸引張強度試験において、鉄筋が降伏する以前にコンクリートのひび割れを発生させる目的で貧配合とした。

## 2.2 コンクリートの力学的特性

水中養生と一軸引張強度試験の供試体と同様の養生をさせたコンクリートの力学的特性値を表-4 に示す。

## 2.3 鉄筋の力学的特性

使用した鉄筋の材質は SD345 で、呼び名が D10, D16, D22 の 3 種類を用いた。また、それぞれの鉄筋に対して引張強度試験を行った結果を表-5 に示す。

## 2.4 供試体の種類及び概要

表-6 に供試体の種類を示す。コンクリート種類 AA は 3 月上旬、コンクリート種類 BB は同年の 12 月下旬に作製した。供試体は連続繊維の有無と枚数、配置位置、鉄筋径を組み合わせると合計 10 体を作製した。

図-1 に供試体の概要図を示す。すべての供試体の長さは 1500mm で、コンクリート種類が AA の供試体の断面寸法は、鉄筋径により異なっている。呼び名が D16, D22 の鉄筋を使用した場合は 150×150mm、呼び名が D10 の鉄筋を使用した場合は 100×100mm の断面寸法である。

また、実構造物では連続繊維を配置する場合、連続繊維

表-4 コンクリートの力学的特性

コンクリート種類	養生方法	材齢 (日)	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
AA	水中	28	27	25.1	2.7
	湿布	80	25	25.9	3.2
BB	水中	28	30	20.9	2.3
	湿布	28	28	18.6	1.9

表-5 鉄筋の力学的特性

コンクリート種類	呼び名	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )
AA	D10	203.5	404.5	550.0
	D16	191.3	390.0	559.0
	D22	196.1	375.0	540.0
BB	D22	195.1	374.0	580.0

維が部材の縁まで配置されることはなく、その影響を確認するため、供試体高さが異なる HN22B(4)I, II を作製し、比較検討を行った。その HN22B(4)II (コンクリート種類が BB) の断面寸法は 150×300mm である。

連続繊維を配置しないものを Nx、かぶりに配置するものを HNxA、鉄筋位置に配置するものを HNxB とした 3 種類の供試体 (x は異なる鉄筋の呼び名の数字を示す) と称し、HNxA, HNxB それぞれに 2 枚、4 枚の連続繊維を配置した供試体を作製した。ここで、連続繊維の配置は構造物表面のひび割れを抑制することを目的にかぶり位置に配置し、鉄筋の負担する引張力の一部を繊維が負担することを目的に鉄筋位置に配置した。

コンクリート種類 AA の供試体は材齢 3 日で脱型し、コンクリート種類 BB で作製した供試体は材齢 2 日で脱型し、共に材齢 28 日まで湿布養生を行い、その後載荷実験を行うまでは室内で保管した。

強度試験用供試体は材齢 3 日で脱型した後、材齢 28 日まで水中養生させたものと鉄筋コンクリート供試体と同様に脱型後載荷試験まで湿布養生を行った 2 種類のものを用意した。一軸引張試験時の供試体材齢はそれぞれ D10 が 80 日目、HN16B が 80 日目、N16, HN16A(2) が 94 日目、N22, HN22A(2) が 98 日目、HN22A(4),

表-6 供試体の種類

コンクリート種類	鉄筋呼び名	供試体名	断面形状 (mm×mm)	連続繊維有無	連続繊維配置位置	連続繊維枚数
AA	D10	N10	100 × 100	無	—	—
		HN10A(2)		有	かぶり	2
	D16	N16	150 × 150	無	—	—
		HN16A(2)		有	かぶり	2
		HN16B(2)			鉄筋	
	D22	N22	150 × 150	無	—	—
		HN22A(2)		有	かぶり	2
		HN22A(4)				
HN22B(4)I		有		鉄筋	4	
HN22B(4)II						
BB		HN22B(4)II	150×300	有		

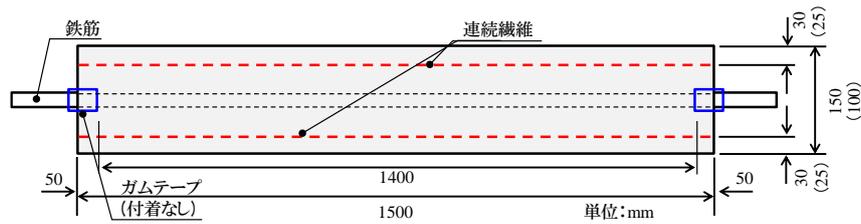
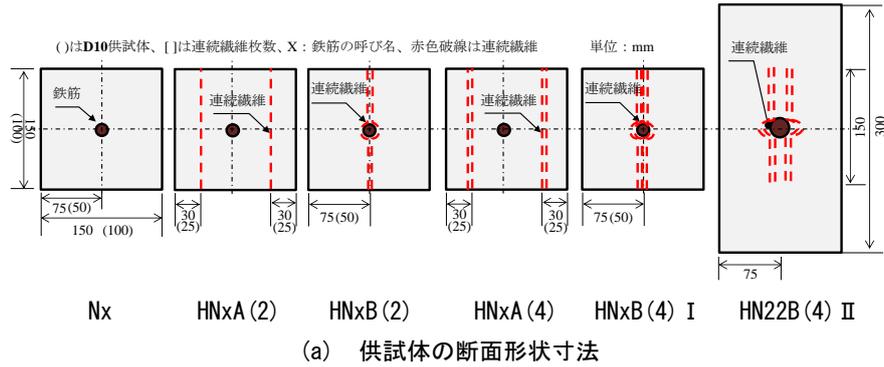


図-1 一軸引張強度試験供試体の概要

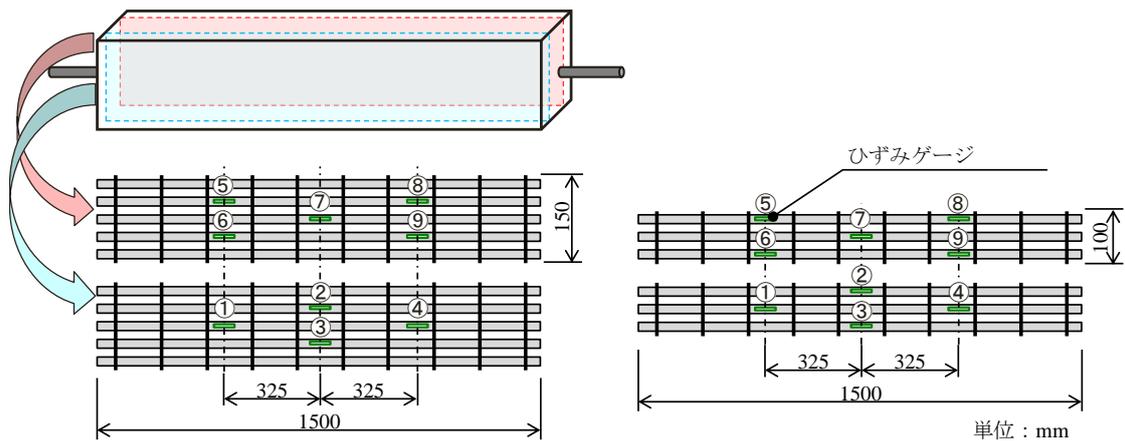
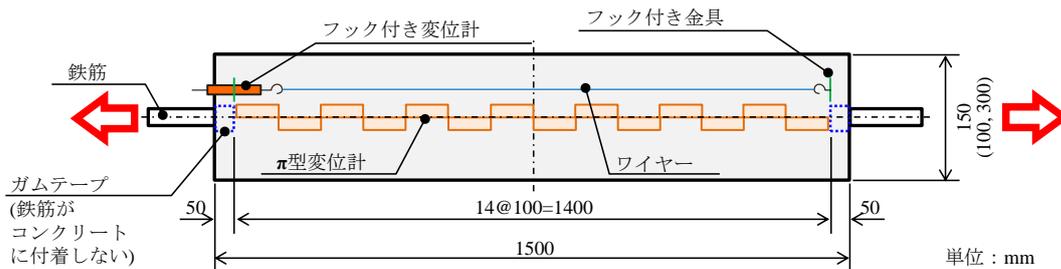


図-2 一軸引張強度試験の概要

HN22B(4)Iが101日目、HN22B(4)IIが28日目であった。

## 2.5 実験項目

本研究では、圧縮強度試験、弾性係数試験、割裂引張強度試験、曲げ強度試験、一軸引張強度試験を実施した。

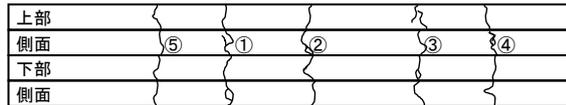
圧縮強度試験はJIS A 1108、弾性係数試験はJIS A 1149、

割裂引張強度試験はJIS A 1113、曲げ強度試験はJIS A 1106に準拠して行った<sup>4)</sup>。

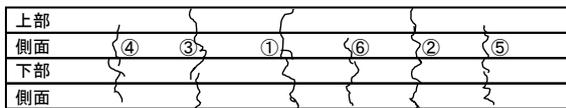
一軸引張強度試験の概要を図-2に、試験状況を図-3に示す。供試体から張り出した鉄筋をそれぞれ反対方向に引っ張ることで荷重を与えた。供試体のひび割れ幅は、



図-3 一軸引張強度試験状況

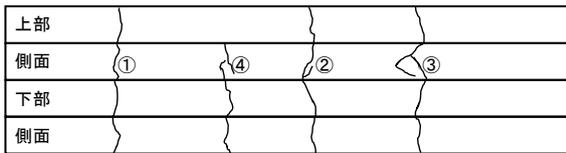


(a) N10

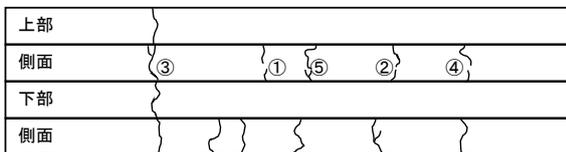


(b) HN10A(2)

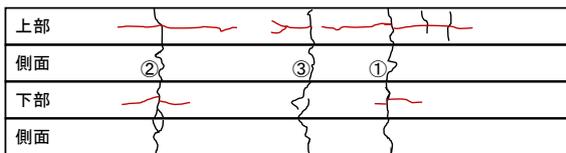
図-4 ひび割れ発生状況 (D10)



(a) N16



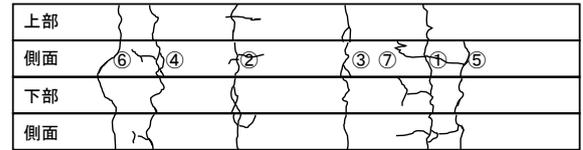
(b) HN16A(2)



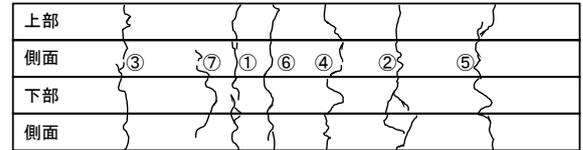
(c) HN16B(2)

図-5 ひび割れ発生状況 (D16)

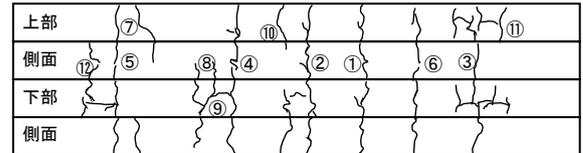
側面にπ型変位計 (PI-5-100, 東京測器研究所製, 標点距離: 100mm) を合計 14 個取り付けて計測し, 連続繊維のひずみは, ひずみゲージ (UBFLA-1, 東京測器研究所製) を合計 9 枚貼り付けて計測を行った。また, 供試体全体の変形は, 供試体の両側面にフック付き変位計 (SDP-CT, 東京測器研究所製) とフック付き金具を取り付け, ワイヤを介して変形量の計測を行った。載荷は鉄筋が降伏するまで行った。なお, 引張鉄筋のひずみは, ひずみゲージを貼らず, 供試体の変形量を有効長さ 1400mm で除することにより算出した。これは鉄筋を研磨してひずみゲージを貼ることで, 計測箇所の断面欠損



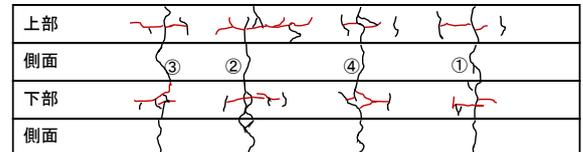
(a) N22



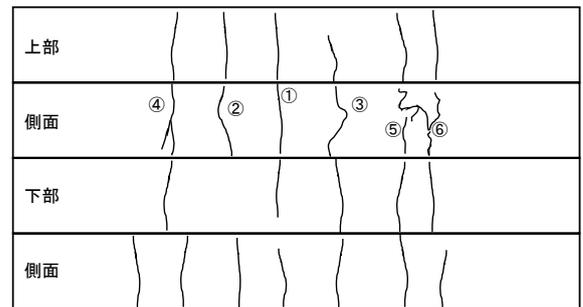
(b) HN22A(2)



(c) HN22A(4)



(d) HN22B(4) I



(e) HN22B(4) II

図-6 ひび割れ発生状況 (D22)

表-7 初期ひび割れ発生荷重とひび割れ本数

コンクリート種類	供試体名	初期ひび割れ発生荷重(kN)	ひび割れ発生本数(本)
AA	N10	20.0	5
	HN10A(2)	21.1	6
	N16	55.7	4
	HN16A(2)	53.7	5
	HN16B(2)	52.0	3
	N22	52.0	7
	HN22A(2)	51.5	7
	HN22A(4)	54.6	12
HN22B(4)I	48.0	4	

に伴う応力集中を避けるためである。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ひび割れ発生状況

図-4~図-6 は, ひび割れ発生状況を示す。なお, 図中の数字は, ひび割れ発生順番を示している。これらの図に示すように, 連続繊維を配置することで, 連続繊維を

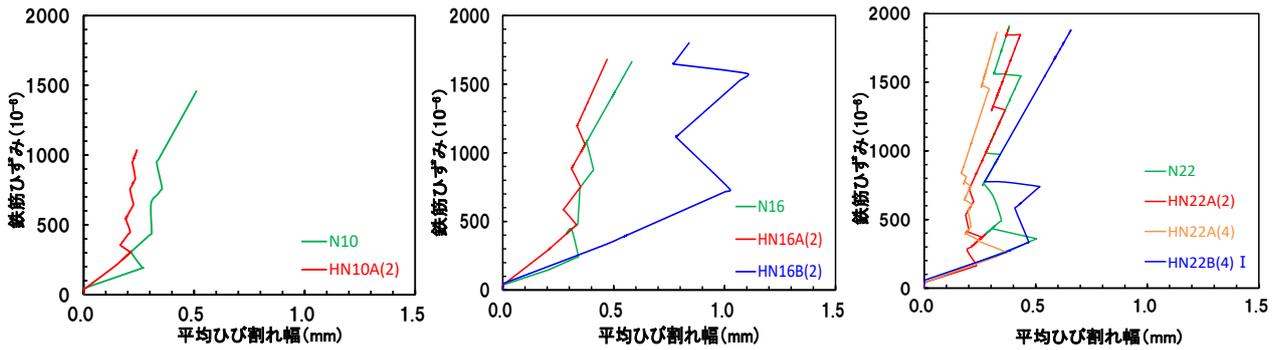


図-7 鉄筋ひずみと平均ひび割れ幅の関係

表-8 連続繊維分担力の実測値と理論値の比較

コンクリート 種類	供試体名	鉄筋ひずみ(10 <sup>-4</sup> )							
		500		1000		1500		ひび割れ多発時	
		実測値 (kN)	理論値 (kN)	実測値 (kN)	理論値 (kN)	実測値 (kN)	理論値 (kN)	実測値 (kN)	理論値 (kN)
AA	HN10A(2)	-1.6	< 8.3	1.5	< 8.7			2.8	< 4.0
	HN16A(2)	7.8	> 5.2	13.2	> 6.0	16.7	> 9.1	16.0	> 10.3
	HN16B(2)	-3.0	< 2.0	0.7	< 3.5	12.7	> 5.0	13.5	> 10.3
	HN22A(2)	-2.0	< 15.8	-2.6	< 20.7	7.1	< 27.7	18.9	> 12.0
	HN22A(4)	-7.4	< 1.7	1.9	< 16.7	5.4	< 19.1	22.4	> 18.0
	HN22B(4)I	-16.8	< 1.7	-17.3	< 9.6	5.4	< 20.9	20.4	> 18.0

配置していない供試体と比べてひび割れ本数が増加する傾向にあった。その一方で、連続繊維を鉄筋に配置した供試体 HN16B(2)と HN22B(4) I の供試体は、ひび割れ本数が少なく、鉄筋に沿ったひび割れ(赤色)が発生することが確認できた。

供試体 HN16B(2)と HN22B(4) I は、配置した連続繊維の量が多く、中央に集中してかつ、上下縁まで至っているため、連続繊維による欠損および両側のコンクリートの一体化を阻害することになり、連続繊維の配置位置に沿ったひび割れが誘発されて、連続繊維によるひび割れ分散効果が得られなかったものと推測される。一方で、供試体上下縁まで至らないように連続繊維を配置した供試体 HN22B(4)II と比較すると、上記のような鉄筋に沿ったひび割れは発生していないことが確認できる。実構造物では、上下縁まで連続繊維を配置することはほとんどなく、このように配置した本研究のコンクリート種類 AA 供試体における検討は安全側の検討であると考えられる。従って、HN16B(2)および HN22B(4)I の供試体の試験結果については、供試体の作製方法(連続繊維の配置)による影響も考慮して考察を行う。

### 3.2 ひび割れ分布およびひび割れ発生荷重

表-7 は各供試体の初期ひび割れ発生荷重とひび割れ発生本数を示している。この表より、連続繊維を配置した供試体(HN16B(2), HN22B(4)Iを除く)は連続繊維を配置していない供試体に比べて、ひび割れ発生荷重はほ

とんど変化ないものの、ひび割れ本数は増加することが確認できる。さらに、HN22A(2)の供試体よりも、4枚の連続繊維を配置した HN22A(4)の供試体のひび割れ本数が多いことが確認できる。

### 3.3 ひび割れ分布およびひび割れ発生荷重

連続繊維によるひび割れ抑制効果を、同じ鉄筋ひずみにおける平均ひび割れ幅の比較で確認した。鉄筋ひずみは、 $\pi$ 型変位計の合計から求まる供試体の長さ変化量を供試体の $\pi$ 型変位計を設置した長さの1400mmで除して求めた。

図-7に鉄筋ひずみと平均ひび割れ幅の関係を示す。平均ひび割れ幅は、ひび割れ発生箇所におけるひび割れ幅の合計を、その時のひび割れ本数で除したものである。

この図より、平均ひび割れ幅について、連続繊維をかぶりに配置した供試体は、連続繊維を配置していない供試体と比べてひび割れ抑制効果が確認できた。しかし、鉄筋位置に連続繊維を配置した供試体の場合は、その抑制効果が顕著ではなかった。また、HN22A(2)よりも繊維量の多いHN22A(4)の平均ひび割れ幅が小さいことから、連続繊維をかぶりに配置し、さらに繊維量を増やすことでひび割れ幅の抑制効果が大きくなるものと考えられる。

### 3.4 連続繊維の効果

表-8に連続繊維分担力の実測値と理論値を示す。連続繊維分担力の理論値は、連続繊維のひずみ測定値を用いて、(1)式により算出した。

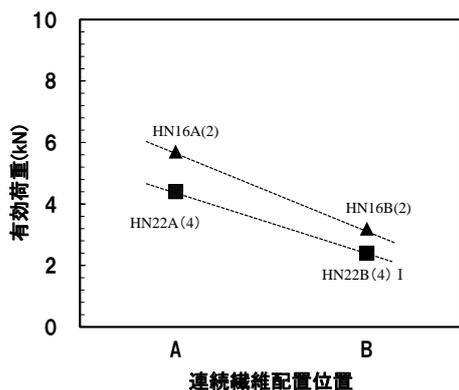


図-8 連続繊維位置の影響

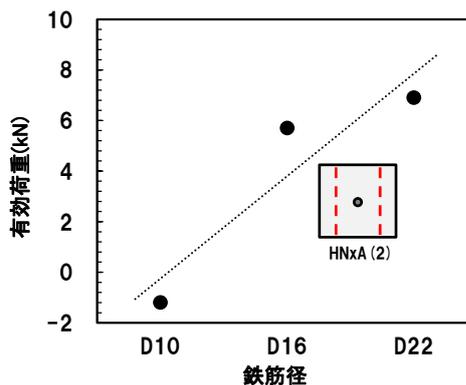


図-9 鉄筋径の影響

$$F_{HN} = E_{HN} \times \varepsilon_{HN} \times A_{HN} \quad (1)$$

ここで、 $F_{HN}$ ：連続繊維分担力(kN)，

$E_{HN}$ ：連続繊維のヤング係数(kN/mm<sup>2</sup>)，

$\varepsilon_{HN}$ ：連続繊維のひずみ

(=ひずみゲージ9枚の平均値)，

$A_{HN}$ ：連続繊維の断面積(mm<sup>2</sup>)

連続繊維分担力の実測値は、同じ鉄筋径において、同様なひずみの時の連続繊維を配置した供試体と連続繊維を配置していない供試体との荷重の差で算出した。連続繊維の分担力の実測値が正の値の場合は、連続繊維による分担効果（引張力の負担）があることを示す。

表-8より、鉄筋ひずみが大きくなるにつれて、連続繊維の分担力の実測値が正の値を示す供試体が増え、かつひび割れ多発時においては、すべての供試体の分担力の実測値が正の値を示していることが確認できる。加えて、実測値が理論値より大きい場合は、その差が連続繊維の分担力を超えた値であると考えられることから、コンクリートとの相乗効果を示しているものと考えられる。ここでいう相乗効果とは、連続繊維がコンクリートを拘束することによるコンクリート引張力の増加と考えており、今後の研究において詳細な検討が必要である。

図-8、図-9は、表-8のひび割れ多発箇所における相乗効果を示している。図の縦軸の有効荷重は、相乗効果を示す連続繊維の分担力の実測値と理論値の差である。図-8に示すように、鉄筋径にかかわらず、連続繊維をかぶりに配置した供試体が鉄筋沿いに配置した供試体よりも相乗効果が大きいことが確認できる。また、図-9に示すように、連続繊維をかぶりに配置した場合、鉄筋径が大きくなるほど連続繊維とコンクリートの相乗効果が大きいことが確認できる。これは、本研究の断面寸法において、鉄筋の径が大きいくほど、連続繊維の効果が大きくな

ることを示している。

#### 4. まとめ

異なる鉄筋径、連続繊維の配置位置及び繊維量の一軸引張強度試験を行い、ひび割れの分散効果と抑制効果を検討した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 連続繊維量を増加し、鉄筋コンクリート供試体と併用することで初期ひび割れ発生抑制効果、ひび割れ発生後の分散効果が確認できた。
- 2) 連続繊維を鉄筋位置ではなく、かぶりに配置することでひび割れ幅の抑制効果が大きくなった。
- 3) 連続繊維とコンクリートの相乗効果が確認でき、鉄筋径が大きいくほど、その効果が大きいことが確認できた。

#### 謝辞：

本研究の実施において、太平洋セメント株式会社よりセメントを提供いただいた。ここに深くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 竹下永造, 大塚久哲, 李靖：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
- 2) 李春鶴, 杉浦亮介, 辻幸和, 郭度連：ネット上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, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1285-1290, 2011
- 3) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.2, pp.25-33, 2010
- 4) 土木学会：2013年制定コンクリート標準示方書[規準編], 2013