

論文 RC部材における耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果

李 靖^{*1}・竹下 永造^{*2}・大塚 久哲^{*3}・山崎 智彦^{*4}

要旨: 耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用いたコンクリート部材のひび割れ抑制メカニズムの解明を目的として RC 部材による曲げ載荷試験を実施した。その評価方法は、ひび割れ幅の低減効果とひび割れの分散効果の二つの方面に着目し、コンクリートの圧縮強度・かぶり厚・鉄筋との付着の有無の3水準により RC 試験体の曲げ載荷試験を行い、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評価した。その結果、コンクリートの圧縮強度・かぶり厚・鉄筋との付着の有無のそれぞれについて、ひび割れ抑制効果に影響を及ぼすことが分かった。本論文は、その結果について報告するものである。

キーワード: 耐アルカリ性, ガラス繊維ネット, ひび割れ, 低減効果, 分散効果, 抑制効果

1. はじめに

コンクリート部材に対するひび割れの発生は、構造物の耐久性と美観性に悪い影響を及ぼすことから、これまで様々なひび割れ抑制手法の検討が行われてきた中で多くの補強材が次々と開発された。このうち連続繊維補強シートはネット状に配置したもので、繊維の高い引張強度によるコンクリートひび割れの抑制効果が期待されている。^{1), 2), 3), 4)}

本論文は耐アルカリ性ガラス繊維ネットを用い、RC部材の曲げ載荷試験を行い、ひび割れ幅の低減効果とひび割れの分散効果から、コンクリートの圧縮強度の違い、かぶり厚の違い、鉄筋との付着の有無をパラメータとして、ひび割れ抑制効果を定量的に把握するものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本論文で使用した鉄筋とメッシュ形状が異なる2種類の耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以降にHN, HN-Lと称す）の概要を表-1に示す。また、コンクリートに使用した材料一覧を表-2に、その配合を表-3に示す。

2.2 試験体製作

試験体は20℃恒温室にて製作後、20℃水中養生とした。材齢7日の段階で水中から取り出し、濡れウェスで包み、湿空養生とした。

2.3 試験体概要および載荷方法

今回の試験ケースは表-4に示すように9ケースがあり、図-1に示すように、一点載荷と二点載荷（等曲げモ

表-1 鉄筋およびネット概要

鉄筋		
直径φ (mm)		10
種類の記号		S D295A
耐アルカリ性ガラス繊維ネット		
引張強度 (N/mm ²)		1500
弾性係数 (N/mm ²)		74000
シート幅 (mm)		210±7
HN シート	メッシュ大きさ (mm×mm)	30×30±8
	あたりの繊維量 (mm ²)	17.1
HN-L シート	メッシュ大きさ (mm×mm)	55×40±8
	あたりの繊維量 (mm ²)	16.3

表-2 コンクリート材料一覧

種類	品名	密度 (g/cm ³)	記号
水	上水道水	1.00	W
セメント	早強ポルトランドセメント	3.14	C
細骨材	砕石砂	2.57	S
粗骨材	砕石 Gmax : 20mm	2.65	G
混和剤	高性能減水剤	—	Ad

表-3 コンクリートの配合とフレッシュ性状

配合	W/C	s/a	使用 セメント	SL	Air
	(%)	(%)		(cm)	(%)
60N/mm ²	45.0	46.4	早強ポルト	22.0	1.4
30N/mm ²	60.0		ランドセメ ント	20.5	1.8
単位量 (kg/m ³)					
W	C	S	G	Ad	
168	373	797	948	4.48	
	280	833	990	3.36	

*1 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻修士課程 (学生会員)

*2 太平洋マテリアル株式会社 開発研究所 工修 (正会員)

*3 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門教授 工博 (正会員)

*4 九州大学大学院 工学研究院建設デザイン部門技術職員 (正会員)

ーメント区間は130mm)の2種類の試験を行うため、ケースごとに二体ずつの試験体を用意した。No.1とNo.2は基準試験体、No.3とNo.4はコンクリートの圧縮強度が異なる試験体、No.5とNo.6はかぶり厚さが異なる試験体、No.7はネットのメッシュ形状が異なる試験体、No.8とNo.9は鉄筋とコンクリートの付着がない試験体である。試験体は、長さ700mm、幅200mm、高さ100mmの横に広い部材であり、ひずみゲージは鉄筋に貼付し、繊維ネットはワイヤーで鉄筋に固定した。

一点荷重の場合はひび割れを一本だけ発生させられるように、中央に切り欠きを設置した。No.8とNo.9では、鉄筋とコンクリートの付着をなくすため、鉄筋にグリスを塗布後、OHPシートを巻いた。

写真-1はコンクリート打設前の試験体で、写真-2はコンクリートとの付着をなくすためのOHPシートが巻かれた鉄筋である。

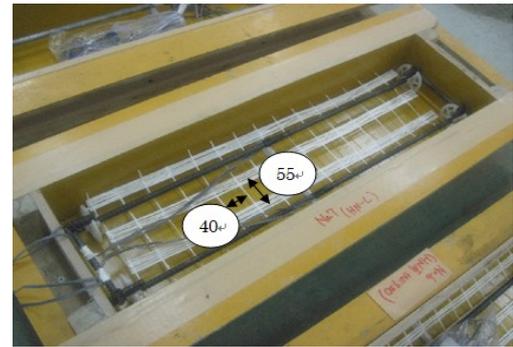


写真-1 試験体打設前の試験体の状況 (HN-L)

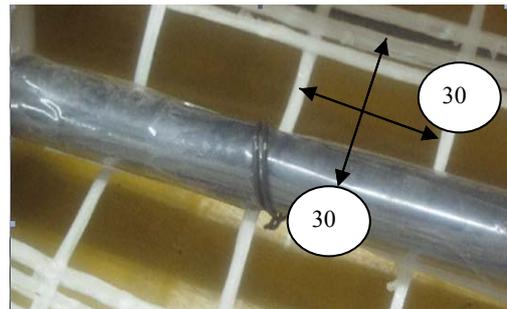


写真-2 鉄筋との付着が無いケースの試験体 (HN)

3. 実験結果

3.1 ひび割れ幅の低減効果

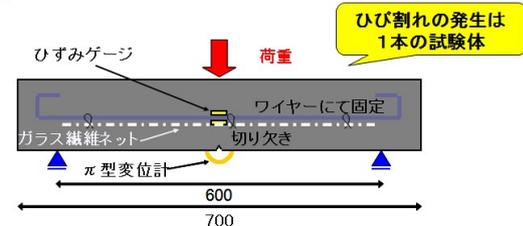
荷重は、2点支持の中央1点荷重とした。ひび割れ幅は、試験体中央に設置したゲージ長100mmのπ型変位計を用いて測定した。

写真-3に1点荷重試験後の供試体状況を示す。試験体中央に切り欠きがあったため、ひび割れの発生は一本のみであることを確認している。

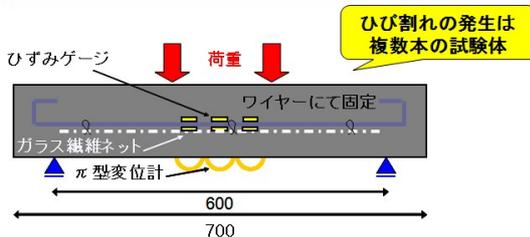


写真-3 一点荷重試験後の供試体 (No. 8) の状況

①ひび割れ幅低減性能を試験する供試体



②ひび割れ分散性能を試験する供試体



③供試体断面

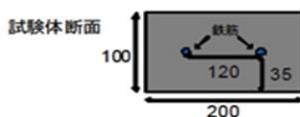


図-1 試験体の概念図(単位 mm)

表-4 試験体一覧

番号	圧縮強度	かぶり厚さ	HN	付着
NO.1	60N/mm ²	35mm	無し	あり
NO.2			有り	
NO.3	30N/mm ²	35mm	無し	
NO.4			有り	
NO.5	60N/mm ²	20mm	無し	なし
NO.6			有り	
NO.7		HN-L		
NO.8	35mm	35mm	無し	
NO.9			有り	

表-5 ひび割れ発生時と鉄筋降伏時の荷重

試験体番号	荷重 kN	
	ひび割れ発生時	鉄筋降伏時
No.1	10	26
No.2	13	29
No.3	7	25
No.4	10	28
No.7	14	28
No.8	9	23
No.9	10	22

表-6(1) ひび割れ幅計測値

試験体 番号	ひび割れ幅 (mm)			
	種類	500 μ 時	1000 μ 時	1500 μ 時
No. 1	W_{PL}	0.24	0.28	0.30
No. 2	W_{HN}	0.11	0.24	0.38
No. 3	W_{PL}	0.12	0.23	0.30
No. 4	W_{HN}	0.11	0.20	0.29
No. 7	W_{HN-L}	0.12	0.26	0.39
No. 8	W_{PL}	1.09	1.66	2.40
No. 9	W_{HN}	0.57	1.19	2.10

表-6(2) ひび割れ幅低減効果指標値

試験 体番 号	$W = W_{HN}/W_{PL}$			$W_{平均}$ ($W_1+W_2+W_3$)/3
	500 μ 時	1000 μ 時	1500 μ 時	
	W_1	W_2	W_3	
No. 1	0.46	0.86	1.27	0.86
No. 2	0.92	0.87	0.97	0.92
No. 3	0.50	0.90	1.30	0.89
No. 4	0.52	0.72	0.88	0.70
No. 7				
No. 8				
No. 9				

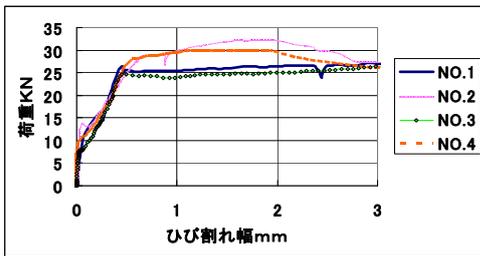


図-2 No. 1~No. 4 荷重-ひび割れ幅の関係

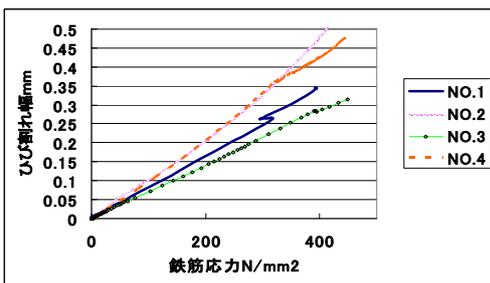


図-3 No. 1~No. 4 ひび割れ幅-鉄筋応力の関係

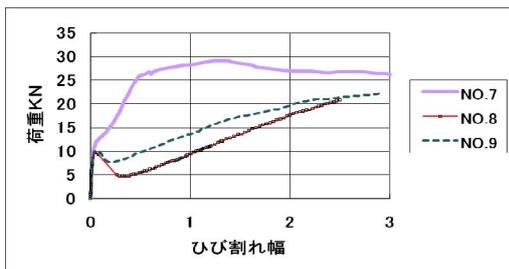


図-4 No. 7~No. 9 荷重-ひび割れ幅の関係

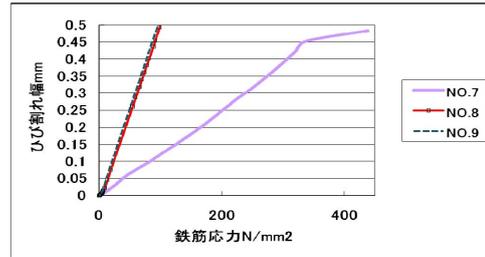


図-5 No. 7~No. 9 ひび割れ幅-鉄筋応力の関係

図-1のように、試験体中央部に曲げひび割れが一本のみ生じるように切り欠きを設けた試験体で試験を行い、HNのひび割れ幅の低減効果を評価した。無補強および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の低減効果を表す指標 W を算出した。

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

W : ひび割れ幅低減効果を表す指標

W_{HN} : HNを埋設した試験体に生じる曲げひび割れ幅

W_{PL} : 無補強の試験体に生じる曲げひび割れ幅

図-2, 4 に各ケースの荷重-ひび割れ幅の関係、図-3, 5 にひび割れ幅-鉄筋応力の関係を示す。基準試験体 No. 1 と No. 2 の比較から、同一荷重時に発生したひび割れの幅は無補強の No. 1 がHN配置の No. 2 より大きいことが分かる。また、同じひび割れ幅で鉄筋応力を見れば、No. 1 は No. 2 より、鉄筋の応力が大きいことも分かる。これは鉄筋応力の一部がHNに分担されるためと考えられる。圧縮強度 30N/mm^2 の No. 3 と No. 4 のケースは基準試験体と同じ傾向が確認できた。HNの形状が異なる No. 7 試験体も No. 2 とほぼ同じひび割れ幅低減効果を示している。

鉄筋とコンクリートの付着がない No. 8 と No. 9 は共に鉄筋応力は小さく、付着切れが明瞭に観察できた(図-5)。図-4 で同一荷重における No. 8 と No. 9 のひび割れ幅を比較すると、No. 9 の方が小さく、HNの高い引張強度で、ひび割れ幅を低減したと考えられる。かぶり厚 20mm の試験についてはまだ試験実施中であり、今回の報告には掲載していない。

表-5 にひび割れ発生時と鉄筋降伏時の荷重を示す。概ねHN有りのケースの方が荷重は大きくなっている。表-6 は鉄筋ひずみ 500μ 、 1000μ 、 1500μ 時点のひび割れ幅の平均測定値と、式(1)から算出されるひび割れ幅低減効果を表す指標の値を示す(ここに $\mu = 10^{-6}$ を示す)。すべてのケースでHNのひび割れ低減効果を確認できるが、コンクリートの圧縮強度が低くなると、HNによるひび割れ幅の低減効果は小さくなることが分かった。ただし、HNの繊維量が小さな No. 7 の方がひび割れ低減効

果は小さくなっている。鉄筋の付着を切った場合、ひび割れ低減効果は高くなることが分かった。

3.2 ひび割れ分散効果

試験体に等曲げモーメント区間を設け、複数のひび割れを発生させてHNによるひび割れ分散効果を評価した。荷重-変位曲線における最大荷重までの面積は等曲げモーメント区間に生じたひび割れ本数と関係のある³⁾ことが分かっており、本論文ではひび割れの分散性を評価する指標とした。

荷重は、図-1に示したように2点支持の2点荷重とした。ひび割れ幅は等曲げモーメント区間に設置したπ型変位計で測定した。π型変位計の取り付けは写真-4のように3断面に対して行い、同一断面内で2個(例えば写真-4の①と②)の合計6個とした。π型変位計の番号は写真-4に示すとおりである。

写真-5にNo.1試験体の荷重後のひび割れ状況を示す写真のように、等曲げモーメント区間に幾つかのひび割れが発生している。

HNによるひび割れ分散効果を評価するため、無補強およびHNを埋設した試験体の荷重-変位曲線において、鉄筋降伏までの面積を算出し、式(2)に示すひび割れ分散効果を表す指標Dで算出した。ここに鉄筋降伏までの面積を算出した理由は、本実験では最大荷重点が明確でないためであり、鉄筋ひずみ 2000 μ までの面積を算出することをした。

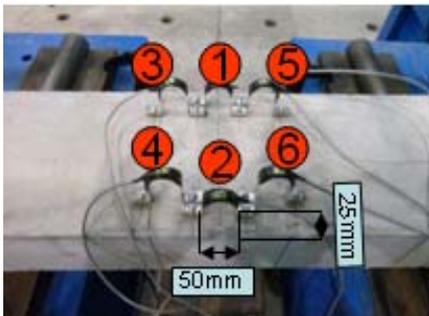


写真-4 π型変位計の取り付け位置(部材底面)



写真-5 2点荷重試験後の供試体(No.1)の状況

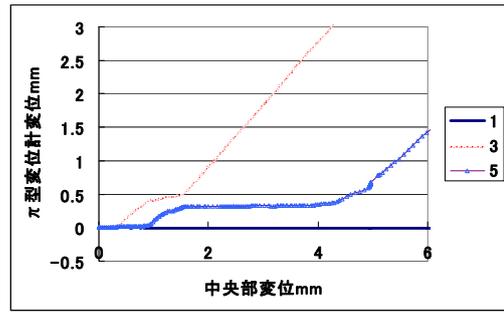


図-6 No.1 試験体π型変位計変位と部材中央部鉛直変位の関係

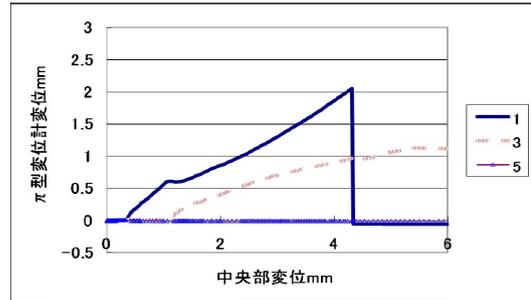


図-7 No.2 試験体π型変位計変位と試験体中央部の鉛直変位の関係

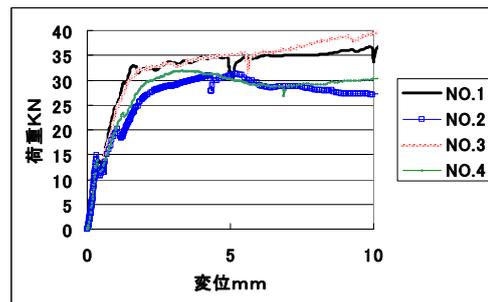


図-8 No.1~No.4の荷重-変位関係

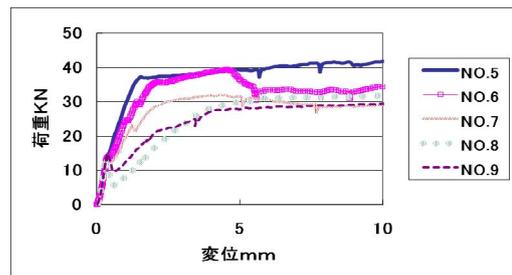


図-9 No.5~No.9の荷重-変位関係

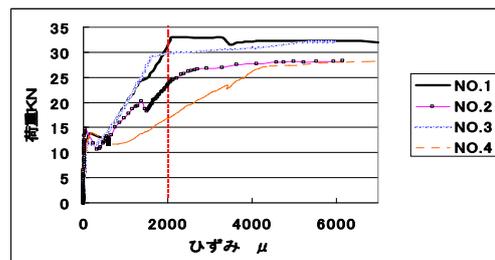


図-10 No.1~No.4の荷重-鉄筋ひずみ関係

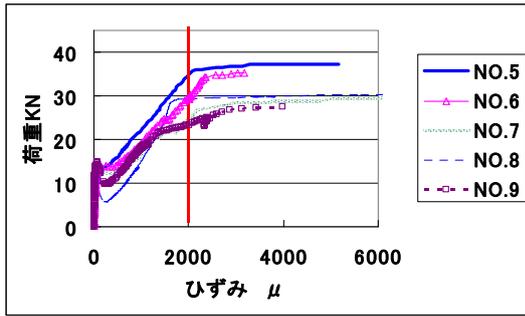


図-11 No. 5～No. 9 の荷重－鉄筋ひずみ関係

表-7 D_{PL} , D_{HN} , D の算出値

CASE	面積 (KN・mm)		$D = D_{HN} / D_{PL}$
No. 1	921.41	D_{PL}	1.12
No. 2	1110.33	D_{HN}	
No. 3	656.51	D_{PL}	1.88
No. 4	1233.66	D_{HN}	
No. 5	1383.51	D_{PL}	1.28
No. 6	1709.11	D_{HN}	
No. 7	1476.56	D_{HN-L}	1.60
No. 8	7849.83	D_{PL}	1.08
No. 9	8517.10	D_{HN}	

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

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

図-6, 7 は No.1 と No.2 試験体の π 型変位計変位と試験体中央部の鉛直変位の関係である。両図の比較から、HNを配置した試験体は無補強の試験体より、各変位計の値の差が小さいことが分かる。これは無補強の試験体は特定の部分にひび割れが集中しているのに対し、HNを配置した試験体はひび割れが分散しているからである。

なお、図-8, 9 に各ケースの荷重－変位関係を図-10, 11 は各ケースの荷重－鉄筋ひずみ関係である。

鉄筋降伏ひずみを 2000 μ とし、この時の荷重を図-10, 11 より、各試験体において読み取り、図-8, 9 から鉄筋降伏までの面積を計算すれば表-7 を得る。表-7 には、ひび割れ分散指標 D を併記している。No.7 の欄は No.7 と No.1 の比である。表-7 から明らかなように、基準試験体のケースと比べて、圧縮強度が 30N/mm² と低いケース、かぶり厚さが 20mm と小さいケース、およびHNの形状が違うケースはひび割れ分散効果が大きくなっているが鉄筋との付着がないケースでは分散効果が小さい。

3.3 ひび割れの抑制効果

ひび割れ幅低減効果指標 W は、HNを用いた場合のひび割れ幅の低減効果を、ひび割れ分散効果の指標 D は、ひび割れ本数の分散効果を示している。それぞれ、 W がより小さい値と D が 1 より大きい値が効果のあることで示しており、 W を D で割った指標 α (式(3)に示す) が小さいほど、ひび割れ抑制効果が高いことになる。

$$\alpha = W / D \quad (3)$$

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

表-8 に α の値を示す。表より、コンクリートの圧縮強度の影響が最も大きいことが分かる。これは、ひび割れ分散効果がコンクリート圧縮強度に寄与しやすいためだと推察される。他のパラメータであるHNの形状の違いについても、ひび割れ分散効果に影響を及ぼす可能性があることが分かる。しかし、鉄筋との付着の有無については、ひび割れ幅の低減効果は最も高いが、ひび割れ分散効果については、効果が小さいことが分かる。このことより、HNのひび割れ抑制メカニズムについては、ひび割れ幅の低減効果とひび割れ分散効果が大きく影響しており、それらの効果を適切に評価することが重要であることが分かる。

4. FEM による解析結果

2点載荷試験体に対し、FEM解析汎用コードFINAL⁷⁾を用いて解析を行った。表-9 は解析結果から式(2)中の D_{PL} , D_{HN} を求め、式(2)により算定した値である。

解析において、コンクリートはシェル要素、鉄筋はビーム要素を用いた。また、鉄筋とコンクリート要素内の付着は有る場合と無い場合の両方を考えた。要素分割と載荷点および支承を図-12 に示し、支承は X 方向変位と Z 軸まわりの回転が自由である。HNは引張強度が等価な鉄筋と見なした。したがって、HNは $\phi 4.668\text{mm}$ の鉄筋、HN-Lは $\phi 4.557\text{mm}$ の鉄筋として解析されている。コンクリートと鉄筋は材料非線形と幾何非線形が考慮されている。図-13, 14 は解析による荷重－わたみ関係を示す。

表-9 の結果を表-7 の結果を比較すると、No. 7 を除いて実験値とよく一致していることが分かる。基準試験体 No. 1 と No. 2、圧縮強度の低い試験体 No. 3 と No. 4、かぶり厚さの小さい試験体 No. 5 と No. 6、および鉄筋付着のない試験体 No. 8 と No. 9 の結果は、No. 8 と No. 9 のグラフが重なっているため、よく一致していることが分かった。また、図-12 に示すように卓越ひび割れが写真-5 とほぼ同じ位置で現れたことも分かった。HN-Lの鉄筋径の評価に再考の余地が残されている。

表-8 ひび割れ抑制効果指標 α の値

比較要因	W	D	α
基準試験体	0.86	1.12	0.77
圧縮強度	0.92	1.88	0.49
HNの形状	0.89	1.60	0.56
鉄筋との付着	0.70	1.08	0.65

表-9 FEM 解析によるひび割れ分散効果指標 D の値

CASE	$D = D_{HN} / D_{PI}$
NO. 1	1.09
NO. 2	
NO. 3	1.96
NO. 4	
NO. 5	1.36
NO. 6	
NO. 7	1.09
NO. 8	
NO. 9	1.0

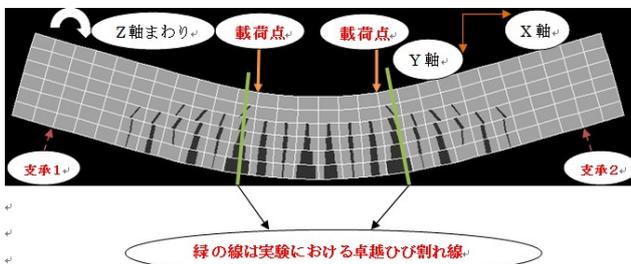


図-12 解析シミュレーション

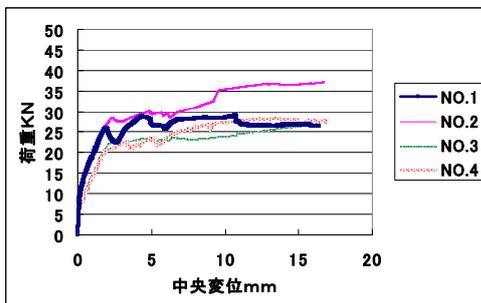


図-13 解析による No. 1~No. 4 の荷重-変位関係

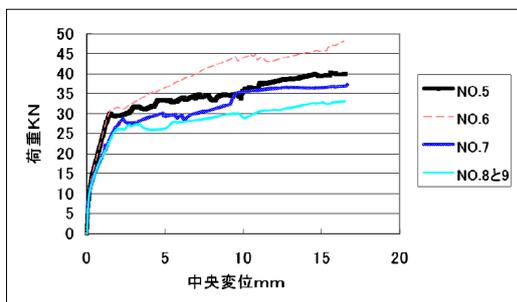


図-14 解析による No. 5~No. 9 の荷重-変位関係

5. まとめ

耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果を定量的に評価するため、ネットを埋設した RC 試験体の曲げ載荷実験を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 実験結果により、繊維ネットを配置したコンクリート部材においては、鉄筋に生じた応力の一部をネットが負担し、ひび割れ発生後のひび割れ幅の増加を抑制することが分った。また、その効果は鉄筋の付着の有無により顕著であった。
- (2) 繊維ネットを用いた RC 部材には、ひび割れ分散効果が認められた。コンクリート圧縮強度とHNの形状の違いが抑制効果に影響することと鉄筋の付着の有無の影響は相対的に小さいことが分かった。
- (3) 最終的なひび割れ抑制効果は、試験体の条件を変更すれば、ひび割れ抑制効果に影響すること、コンクリートの圧縮強度は最もひび割れ抑制効果に影響することが分かった。

参考文献

- (1) 栗原貢介・李春鶴・郭度連・辻幸和：連続繊維補強材による RC 梁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
- (2) 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
- (3) 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
- (4) 杉野雄亮・竹下永造・郭度連：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報告書
- (5) 村山・八洲雄・金 相昊・武田 絵里・西村 伸一：鉄筋の付着損失が RC 部材の曲げ耐荷性状に及ぼす影響報告書：コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 3, 2008
- (6) 株式会社大林組 技術研究所：有限要素法 (FEM) - ファイナル
- (7) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書「設計編」, 2008.3