論文　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

竹下　永造[*1]・大塚　久哲[*2]・李　靖[*3]

要旨：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を作製し，曲げ載荷試験を行った。試験水準は，コンクリート強度，繊維ネットの取付け位置，鉄筋との付着の有無とした。試験の結果，耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果は，鉄筋との付着の有無による水準にて最も効果的であることが確認され，耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制メカニズムは，鉄筋との付着損失領域を改善する効果によるものと推察した。

キーワード：耐アルカリ性ガラス繊維ネット，ひび割れ，付着損失領域

1. はじめに

コンクリート構造物は，かつては限りなくメンテナンスフリーと考えられてきたが，最近では，塩害による鉄筋腐食やアルカリシリカ反応などによる早期劣化が見受けられるようになってきた。特に，高度経済成長期に大量に建設された構造物に集中的に劣化が発生しており，コンクリート構造物の維持管理が大きな社会的問題となっている。こうした中，コンクリートの高耐久性技術が注目を集めており，ひび割れ抑制へと向かう風潮が高まりつつあるのが現状である。

耐アルカリ性ガラス繊維ネット（以降 HN と略称）は，ひび割れ抑制材料として，近年注目を集めている[1)]。その理由として，施工前に鉄筋に結束することでひび割れを抑制できる簡易性と，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ことから，経済性に優れるといったことが挙げられる。しかし，そのひび割れ抑制メカニズムについては不明な点が多く，早急に解決すべき課題である[2)]。そこで，本論文は，ＨＮを設置した鉄筋コンクリート梁の曲げ載荷を行い，そのひび割れ抑制メカニズムを解明することを目的としたものである。

2. 試験概要

2.1 使用材料

コンクリートにおける使用材料一覧を**表－1** に，また，使用した鉄筋詳細を**表－2** に示す。付着損失領域を考慮した試験体には，丸鋼を主鉄筋として配筋した。**表－3** に使用したＨＮの詳細を示す。

表－1　使用材料

材料	記号	備考
セメント	C	普通ポルトランドセメント
細骨材	S	山砂，表乾密度 2.56g/cm^3，吸水率 2.0%
粗骨材	G	砕石，表乾密度 2.65g/cm^3，吸水率 0.6%
混和剤	AD	リグニンスルホン酸系 AE 減水剤

表－2　使用した鉄筋詳細

種類	直径	備考
SD295A	D16	主鉄筋用，降伏点強度 388 N/mm^2
SR235	R16	主鉄筋用，降伏点強度 347 N/mm^2
SD295A	D10	帯鉄筋用，降伏点強度 387 N/mm^2

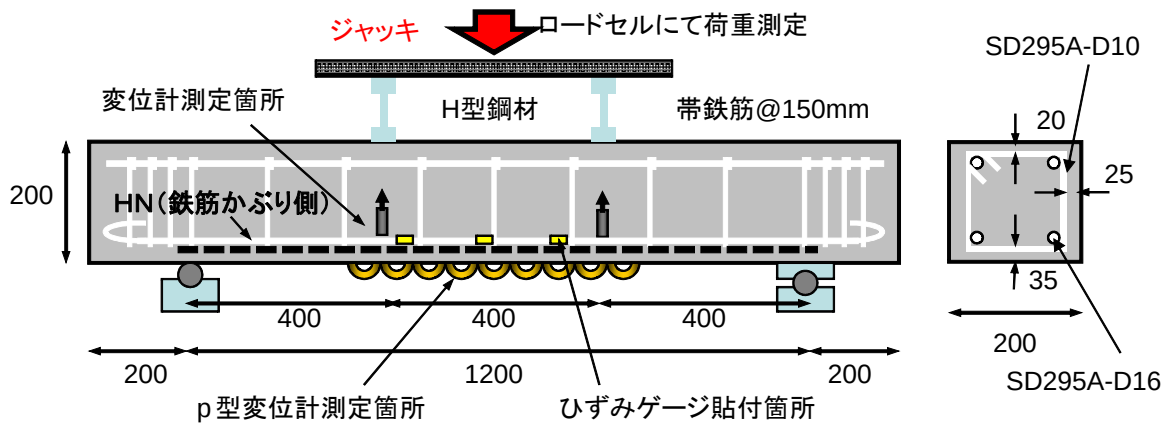
表－3　耐アルカリ性ガラス繊維ネット(HN)の詳細

項目	単位	特性値
引張強度	GPa	1.5
引張弾性率	GPa	74
破断時の伸び	%	2.0
軟化点	℃	800
密度	g/cm^3	2.8
熱膨張係数	×10^{-6}/K	9.0

表－4　コンクリートの配合

配合強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m^3)				
					W	C	S	G	AD
20N/mm^2	18.0	4.5	80	46.4	168	210	860	1022	1.68
40N/mm^2			55			305	824	980	3.36

*1 太平洋マテリアル（株）　開発研究所　工修　(正会員)
*2 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)
*3 九州大学　工学府　建設システム工学専攻　(学生会員)



図－1　試験体概要

2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を**表－4** に示す。配合強度は，20 N/mm^2 と 40N/mm^2 に設定した試験体を作製した。

2.3 試験体概要

図－1 に試験体概要を示す。断面は 200×200mm の正方形断面であり，長さは 1600mm である。ＨＮの設置は，かぶり側に位置する鉄筋表面に敷設し，結束線により固定した。固定間隔については，200mm ピッチとなっている。載荷は 2 点（3 等分点）載荷とし，曲げ降伏先行型破壊となるように鉄筋を配置した。載荷は，試験体上面に H 型鋼材を 2 個設置し，鋼板を介して 2 点載荷を行い，荷重をジャッキ先端に取り付けたロードセルにて測定した。試験体の変位は，載荷点下側に変位計を設置して測定した。主鉄筋にはひずみゲージを貼付し，鉄筋のひずみを測定し，試験体下面の当曲げ区間には，π型変位計を複数設置し，発生したひび割れ幅の伸展状況を測定した(※ π型変位計での測定データはひび割れ 1 本に対するものであったことは確認済みである)。**写真－1** に載荷風景を示す。

2.4 試験水準

試験水準を**表－5** に示す。ＨＮの効果を確認するため，HN の有無により，比較・評価を行い，各水準の影響度合いを確認した。比較水準は，HN のひび割れ抑制メカニズムを確認するにあたり，影響が大きいと予想された「コンクリート強度（20 N/mm^2 と 40N/mm^2)」，「HN 設置位置（かぶり側と鉄筋内側)」，「鉄筋との付着（異形鉄筋と丸鋼鉄筋)」とした。

3. 試験結果

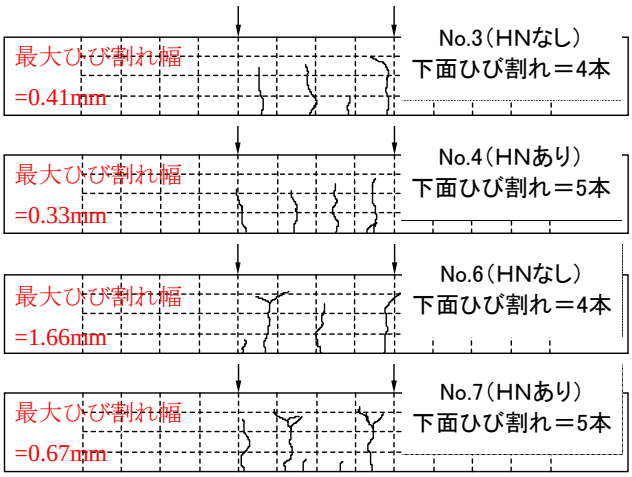
3.1 ひび割れ伸展状況

図－2 に最大鉄筋ひずみが 1500μ 到達時のひび割れ進展状況を示す。低強度である No.3 と No.4 の水準では，HN を用いた場合においてひび割れ本数が増加し最大ひび割れ幅が小さくなっていることが分かる。また，鉄筋種類が丸鋼の水準である No.6 と No.7 の試験

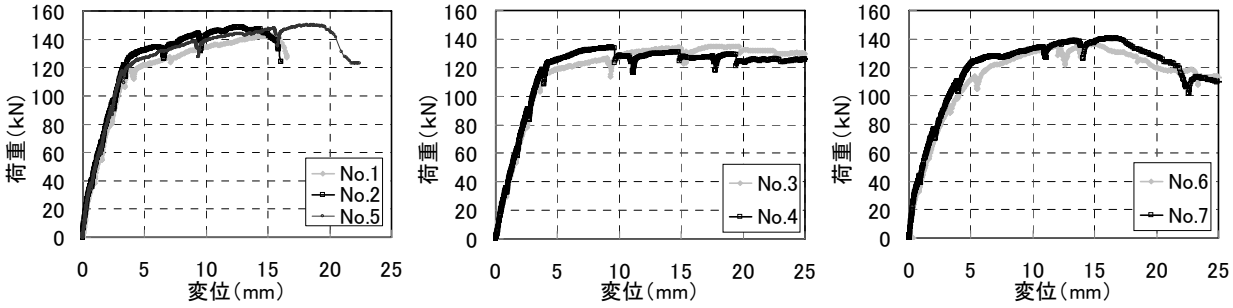
写真－1　載荷風景

表－5　試験水準

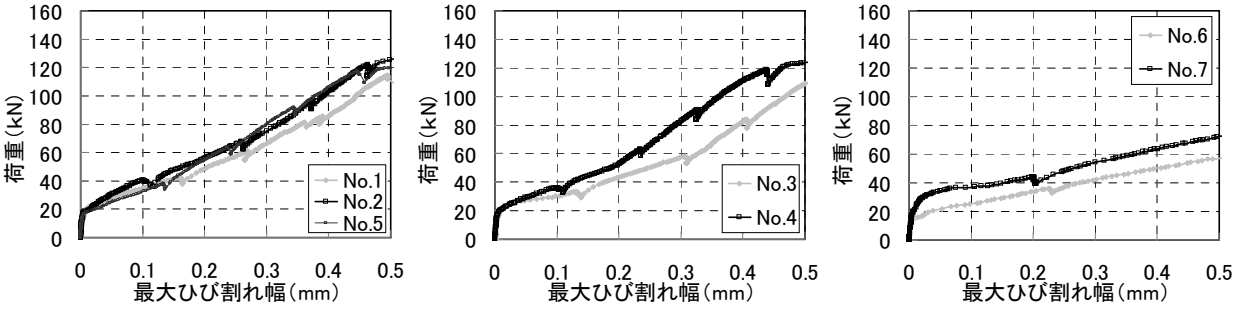
水準		配合強度 (N/mm^2)	かぶり (mm)	鉄筋種類	HN の有無
No.1	基準	40	35 かぶり側	異形	なし
No.2					あり
No.3	低強度	20			なし
No.4					あり
No.5	設置位置	40	35 鉄筋内側		あり
No.6	鉄筋種類		35 かぶり側	丸鋼	なし
No.7					あり



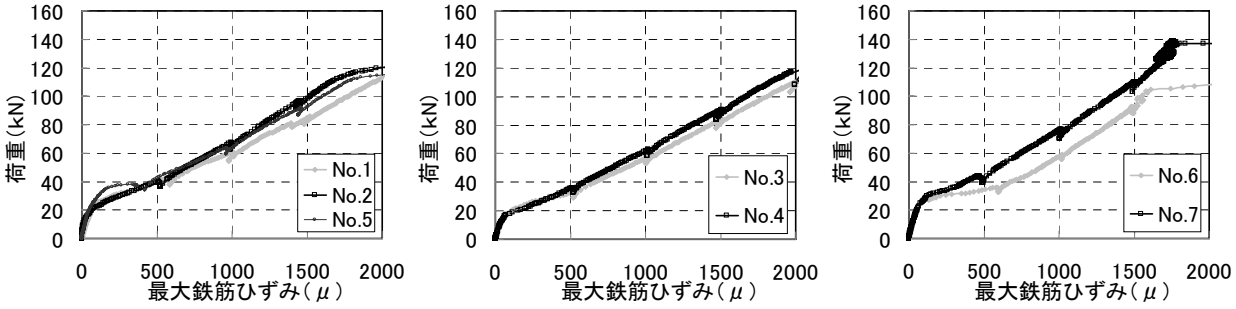
図－2　ひび割れ伸展状況



図－3　荷重－変位曲線



図－4　荷重－最大ひび割れ幅



図－5　荷重－最大鉄筋ひずみ

体での比較においても,同様であった。このことより，HN を用いることによりひび割れ分散性能が上がることが認められる。

3.2 荷重－変位関係

図－3 に各水準における荷重－変位曲線を示す。図より,各水準において,最大荷重の増加が確認された。これは，各グラフにおいて顕著に現れているひび割れ発生後の荷重－変位曲線の変曲点である断面降伏荷重の増加による効果であるものと推察される。このことより，HN を使用することによる効果は，鉄筋部材に影響を及ぼしている可能性が高いことが分かる。また，鉄筋種類が違う水準では,変位が 5mm 程度において，荷重－変位曲線の勾配変化の違いが顕著に現れており，No.7 に比べ, No.6 は勾配低下が早めに進行していることが分かる。このことより，鉄筋との付着が無い場合に，ＨＮの効果が顕著となることが分かる。

3.3 荷重－最大ひび割れ幅の関係

図－4 に各水準における荷重－最大ひび割れ幅の関係を示す。ここで，最大ひび割れ幅は，π型変位計にて測定されたデータの中で，最大となっているものを選定した。同一荷重時で比較すると HN の効果により，最大ひび割れ幅を抑制していることが分かる。それぞれの数値を比較すると，同一荷重 60kN 時において，No.1 は 0.26mm に対し，No.2 と No.5 は 0.21mm となり，No.3 は 0.33mm に対し，No.4 は 0.23mm となり，No.6 は 0.50mm に対し，No.7 は 0.35mm であった。このことより，HN のひび割れ抑制効果は，鉄筋との付着の有無やコンクリート強度の影響を受けており，特に,鉄筋付着の有無による影響が大きいことが分かる。

3.4 荷重－最大鉄筋ひずみの関係

図－5 に各水準における荷重－最大鉄筋ひずみの関係を示す。各水準において，荷重増加に伴い増大する鉄筋ひずみが HN により抑制されていることが分かる。特に，鉄筋種類が違う水準である No.6 と No.7 の比較において顕著であった。これまでの結果からも分かるように，HN のひび割れ抑制メカニズムは，鉄筋との付着に対し効果を及ぼしている可能性が高く，特に，鉄筋の付着損失領域を改善する効果があるものと推察される。その改善効果は，鉄筋に発生するひずみを抑制する効果や，ひび割れを分散させる効果による複合

効果によって生じている可能性が高いと考えられる。

4. 非線形有限要素解析

4.1 非線形有限要素解析のモデル

図－6 に解析で用いたモデルを示す。解析要素については，コンクリート要素は四辺形要素で表し，その大きさは 25×25mm とした。鉄筋と HN についてはトラス要素で表し，HN については，HN の断面繊維量を鉄筋の断面積に換算してトラス要素とした。帯鉄筋については，コンクリート要素に埋め込み鉄筋として設定した。載荷方法は，プッシュオーバー解析法にて行い，使用解析ソフトは，一般汎用解析ソフトである Final[3]を用いて行った。

4.2 材料モデル

(1) 圧縮コンクリート

式(1)に示す修正 Ahmad モデル [4]を用いた。

$$\sigma = \frac{\left[\left(AX + (D-1)X^2\right)\right]\sigma_p}{1 + (A-2)X + DX^2} \qquad (1)$$

上昇域（$\varepsilon \leqq \varepsilon_p$）

$$X = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_p},\ D = \frac{200}{\sigma_B} - \left(\frac{E_B}{E_p} - 1\right),\ E_B = \frac{\sigma_B}{\varepsilon_B},$$

$$A = \frac{E_0}{E_p},\ E_0 = (1.14\sqrt{\sigma_B} + 5.82) \times 10^4$$

下降域（$\varepsilon > \varepsilon_p$）

$$X = \left(1 + \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_p}\right)^n,\ n = 0.9 + 3.4\left(\frac{\sigma_B}{1000}\right)^2,$$

$$D = 1 + 1800 \times \frac{\left(\frac{\sigma_p}{\sigma_B} - 1\right)^2}{\sigma_B}$$

(2) 引張コンクリート

式(2)で示す出雲モデル [5]を用いた。

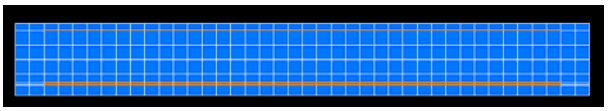
$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t}\right)^c \qquad (2)$$

(3) 鉄筋及びガラス繊維ネット

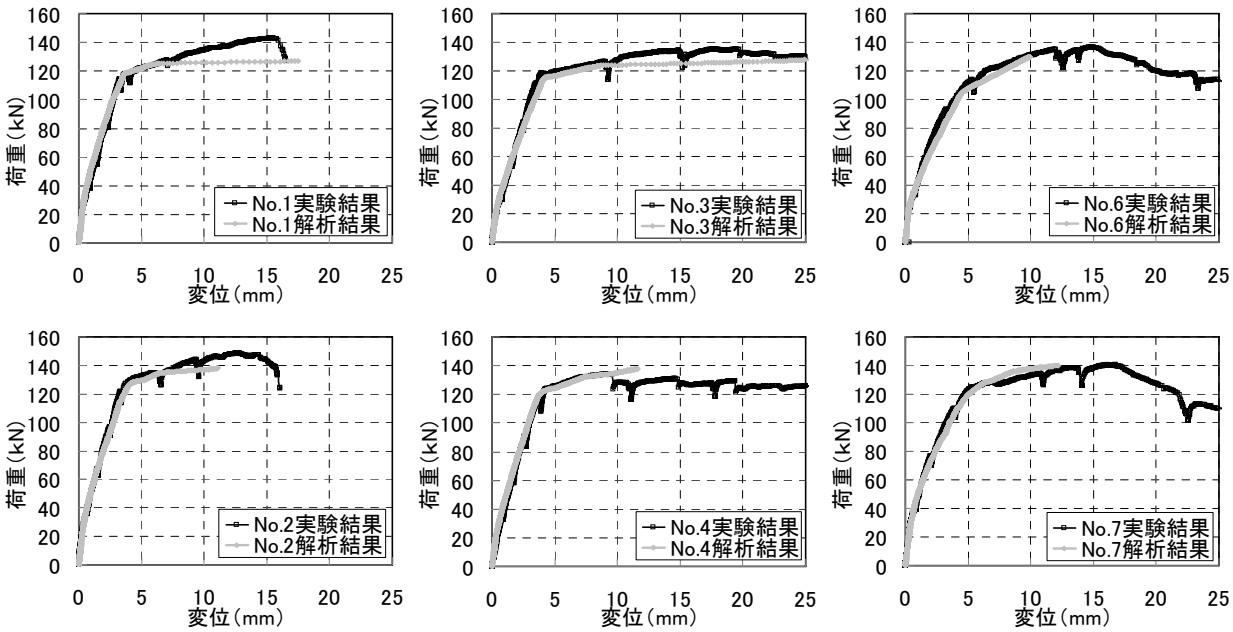
鉄筋と HN が設置されている場所に該当する節点同士を結び，トラス要素とした。各特性値は，**表－2**，**表－3** の通りである。丸鋼の試験体の解析モデルについては，鉄筋要素とコンクリート要素の間に接合要素を設け，鉄筋との付着切れを再現した。

4.3 解析結果

図－7 に HN を用いた試験体における荷重－変位関係の解析結果を示す。プッシュオーバー解析法のため，最大荷重までの解析となるが，図より，ある程度精度良く解析が可能であり，実験結果との整合性が確認された。また，鉄筋種類が違う No.7 においても，鉄筋付着の有無を精度良く再現していることが分かった。このことより，既存の構成則を用いて 2 次元非線形有限要素解析を行えば，HN を用いた鉄筋コンクリート梁の曲げ挙動を解析することは可能であることが分かる。さらに，HN をトラス要素とし，鉄筋と置き換えることで，HN の効果を解析に組み込むことが可能であることも分かった。



図－6　解析モデル
（青：コンクリート要素，オレンジ：鉄筋要素）



図－7　荷重－変位関係の解析結果

5. HN のひび割れ抑制効果に関する評価

5.1 ひび割れ幅の低減効果

HN の有無による試験体の評価において，同一鉄筋ひずみが同じ時の最大ひび割れ幅を比較することで，HN のひび割れ幅の低減効果 W を算出した。ひび割れ幅の低減効果 W は式(3)で計算される。**表－6** に実験における鉄筋ひずみが，それぞれ 500，1000，1500 μ 時の最大ひび割れ幅を示す。また，解析結果により評価を行った結果を**表－7** に示す。

$$W = \frac{C_{HN}}{C_{PL}} \tag{3}$$

ここで，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

表より，鉄筋種類が違う水準以外においては，実験値と解析値の差は小さく，実験結果の整合性が確認された。鉄筋種類が違う丸鋼を用いた水準においては，試験体に局所的な破壊が実験にて生じていたのに対し，解析では，局所的な破壊を表現出来なかったことが，実験値と解析値の差の原因であると考えられる。それぞれの水準において，ひび割れ幅の低減効果を確認すると，ひび割れ幅の低減効果が最も大きくなるのは，鉄筋種類が違う水準(No.6-7)であることが分かる。その値は，ベースとなる水準(No.1-2)に対し，2 割程度低減効果が増加するという結果であった。このことより，HN を用いることによるひび割れ幅の低減効果は，鉄筋との付着の影響を受け，付着がない場合により大きな効果を発揮することが分かる。また，圧縮強度が小さい水準(No.3-4)では，ベースとなる水準と比較して 1 割程度低減効果が増加することが分かった。これは，圧縮強度が小さい分，付着強度も小さくなるためであり，圧縮強度が低い試験体においては，HN を用いることで，鉄筋との付着強度の不足をより効果的に補うことができる。最後に，HN の設置位置については，鉄筋内側に配置している場合，ひび割れ低減効果が小さくなることが分かる。

5.2 ひび割れ分散効果

国枝ら [6]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，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 の有無による試験体の評価において，鉄筋降伏ひずみである 2000 μ 到達時までの荷重－変位曲線における面積を算出し，式(4)を用いて，ひび割れ分散効果 D を算出した。

$$D = \frac{A_{HN}}{A_{PL}} \tag{4}$$

表－6　実験によるひび割れ幅低減効果 W の評価

水準	最大ひび割れ幅 C(mm)				***W***
	種類	500 μ	1000 μ	1500 μ	(平均)
No.1	C_{PL}	0.138	0.268	0.386	**0.91**
No.2	C_{HN}	0.099	0.267	0.387	
No.3	C_{PL}	0.125	0.298	0.405	**0.78**
No.4	C_{HN}	0.094	0.230	0.325	
No.5	C_{HN}	0.152	0.248	0.356	**0.98**
No.6	C_{PL}	0.240	0.780	1.660	**0.65**
No.7	C_{HN}	0.210	0.540	0.655	

表－7　解析によるひび割れ幅低減効果 W の評価

水準	最大ひび割れ幅 C(mm)				***W***
	種類	500 μ	1000 μ	1500 μ	(平均)
No.1	C_{PL}	0.106	0.187	0.354	**0.92**
No.2	C_{HN}	0.106	0.187	0.268	
No.3	C_{PL}	0.130	0.232	0.334	**0.87**
No.4	C_{HN}	0.115	0.202	0.290	
No.5	C_{HN}	0.106	0.187	0.268	**0.92**
No.6	C_{PL}	0.119	0.211	0.304	**0.77**
No.7	C_{HN}	0.093	0.162	0.230	

表－8　実験によるひび割れ分散効果 D の評価

水準	面積(kN･mm)		***D***
No.1	A_{PL}	203.3	**1.12**
No.2	A_{HN}	228.7	
No.3	A_{PL}	211.1	**1.16**
No.4	A_{HN}	244.0	
No.5	A_{HN}	207.8	**1.02**
No.6	A_{PL}	343.6	**1.92**
No.7	A_{HN}	658.8	

表－9　解析によるひび割れ分散効果 D の評価

水準	面積(kN･mm)		***D***
No.1	A_{PL}	233..9	**1.16**
No.2	A_{HN}	271.4	
No.3	A_{PL}	233.5	**1.25**
No.4	A_{HN}	292.7	
No.5	A_{HN}	239.8	**1.03**
No.6	A_{PL}	507.0	**1.52**
No.7	A_{HN}	771.4	

表－10　ひび割れ抑制効果（実験値）

水準		W	D	α
No.1	基準	0.91	1.12	**0.81**
No.2				
No.3	低強度	0.78	1.16	**0.67**
No.4				
No.5	設置位置	0.98	1.02	**0.96**
No.6	鉄筋種類	0.65	1.92	**0.34**
No.7				

表－11　ひび割れ抑制効果（解析値）

水準		W	D	α
No.1	基準	0.92	1.16	**0.79**
No.2				
No.3	低強度	0.87	1.25	**0.69**
No.4				
No.5	設置位置	0.92	1.03	**0.90**
No.6	鉄筋種類	0.77	1.52	**0.51**
No.7				

ここで，A_{HN}：HN がある場合の鉄筋降伏までの面積

A_{PL}：HN がない場合の鉄筋降伏までの面積

表－8 に実験によるひび割れ分散効果の評価を，**表－9** に解析によるひび割れ分散効果の評価を示す。表より，ひび割れ分散効果についても，ひび割れ幅の低減効果と同様な傾向にあり，最も分散効果が高い水準は，鉄筋種類が違う水準(No.6-7)であることが分かる。その値は，ベースとなる水準(No.1-2)に対し，2 割程度分散効果が増加するという結果であった。また，圧縮強度が小さい水準(No.3-4)では, ベースとなる水準と比較して 1 割程度分散効果が増加することが分かった。

5.3 ひび割れ抑制効果

ひび割れ幅の低減効果 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，ひび割れ分散効果 D は，ひび割れ本数の増加を示している。従って，式(5)に示すように，W と $(1/D)$ を掛け合わせることで，無補強コンクリートに対する HN のひび割れ抑制効果を定量的に示すことができると考えられる [7]。

$$\alpha = \frac{W}{D} \tag{5}$$

表－10, 11 にひび割れ抑制効果の実験値と解析値を示す。表より，HN のひび割れ抑制効果は，鉄筋との付着が小さい場合において最も効果が高く，また，圧縮強度が小さい場合に効果が増加することが分かった。逆に，設置位置が鉄筋内側の場合，効果は減少することが分かった。HN のひび割れ抑制効果において，そのメカニズムの中枢を担っているのは，鉄筋とコンクリート間の付着損失領域の改善であり，HN を鉄筋に設置することで，鉄筋との付着損失領域が改善され，ひび割れ幅の低減効果が期待でき，また，ひび割れ分散効果も期待できるものと推察できる。

6. まとめ

耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制メカニズムを解明することを目的として，鉄筋コンクリート梁の曲げ載荷試験を行い，以下の結論を得た。

(1) 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 2 次元有限要素解析により，本実験の再現性を確認した。

(2) 耐アルカリ性ガラス繊維ネット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に効果が増加する。

(3) 耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制効果は，鉄筋の付着強度が小さい場合に効果が増加する。

(4) 耐アルカリ性ガラス繊維ネットのひび割れ抑制メカニズムは，鉄筋とコンクリート間の付着損失領域の改善によるものであると推察できた。

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 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

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) (株)大林組 技術研究所:有限要素法（FEM）－Final

4) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，No.474，pp.163-170，1995.8

5) 出雲淳一，島弘，岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル，コンクリート工学，Vol.25，No.9，pp.107-120，1987.9

6) 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靭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集，Vol.26，No.1，pp.285-290，2004

7) 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研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1847-1852, 2010