### 論文 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

大谷 俊浩\*1·蒋 海燕\*2·佐藤 嘉昭\*3·竹内 好雄\*4

要旨:本研究では、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の抑制効果について 検討するために、初期ひび割れ試験ならびに乾燥収縮ひび割れ試験として 4 辺拘束試験および一軸拘束試験 を実施した。さらに、既報の耐アルカリ性ガラス繊維の短繊維を用いた同様の実験結果と比較検討した。そ の結果、初期および乾燥収縮ひび割れ発生の遅延と進展の抑制が認められ、耐アルカリ性ガラス繊維ネット に収縮ひび割れの抑制効果があることが確認された。また、短繊維に比べ、ネットの方が効率的にひび割れ を抑制できることがわかった。

キーワード:耐アルカリ性ガラス繊維ネット、コンクリート、乾燥収縮ひび割れ、初期ひび割れ

## 1. はじめに

コンクリートの耐久性を増すためには、コンクリート のひび割れを抑制することが重要である。近年、そのひ び割れを抑制させるための様々な研究が行われている。 それらの手法は、大きく2つに分類でき、コンクリート の収縮を抑えるものと、短繊維をマトリックス中に分散 させるなどしてコンクリートに靭性を付与するものであ る。耐アルカリ性ガラス繊維(以下, ARG 繊維)は、後 者の方法で使用される代表的な繊維の一つであり、ガラ ス繊維補強セメント(GRC)として古くからコンクリー トやモルタルの補強材として利用されている。

筆者らは、これまで繊維長 13mm の ARG 繊維を用い たコンクリートの初期ひび割れ抑制効果<sup>1)</sup>および乾燥収 縮ひび割れ抑制効果について検討している2,その結果, 繊維ストランドが開繊するタイプと開繊しないタイプに よって,フレッシュ性状およびひび割れ抑制効果に及ぼ す影響は大きく異なるが、それぞれ適正量を混入するこ とで、打設に必要な流動性を確保しつつひび割れを抑制 できることを確認している。

一方で、最近、この ARG 繊維を連続繊維補強材とし てネット状にしたもの(以下, ARG 繊維ネット)が開発 された。この ARG 繊維ネットは、ひび割れが発生する 方向がある程度予測できる箇所での利用を想定しており, 写真-1 に示すように、ひび割れと直行方向(写真では 左右方向)の繊維量を増やすことでひび割れの抑制に効 果的に機能するように設計されている。この ARG 繊維 ネットは、コンクリート打設前に配筋に結束して用いら れる。そのため、作業工程が一つ増えるというデメリッ トがあるが、短繊維で補強する場合と異なり、コンクリ ートの物性、特にワーカビリティーに影響を与えないと いうメリットがある。また、比較的コンクリートの表面



A	・空気量		
	圧縮強度	7, 28日	$\phi$ 10 × 20cm
	初期ひび割れ	2 時間	$60 \times 60 \times 6$ cm
	スランプ・空気量		
	圧縮強度	7, 28日	$\phi$ 10 × 20cm
R	乾燥収縮ひび割れ	7 0	60×60×10cm
D	(4 辺拘束)	/ []	(開口 40×40cm)
	乾燥収縮ひび割れ	7 0	図_11
	(JISA1151) (一軸拘束)	/ []	8-11

付近に重点的に配置できるため、さらなるひび割れ抑制 効果が期待できるものである。本研究では、この ARG 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 を検討した結果について報告する。

### 2. 実験

### 2.1 実験計画

ARG 繊維ネットによるコンクリートの収縮ひび割れ の抑制効果を検討するために、表-1に示すような2つ の実験を計画した。実験Aでは初期ひび割れ(プラステ ィック収縮ひび割れ)を,実験Bでは乾燥収縮ひび割れ を検討した。両実験には写真-1 に示すような数千本の フィラメントを収束したストランドを 30mm 間隔で網状

\*1 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース准教授 博士 (工学) (正会員) (正会員)

<sup>\*2</sup> 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 修士 (工学) \*3 大分大学 工学部福祉環境工学科建築コース教授 工博 (正会員)

<sup>\*4</sup> 日本電気硝子(株)

に織り上げた,幅が150mm (5列)のネットを使用した。

# 2.2 初期ひび割れ試験(実験 A)

# (1) 実験方法

実験Aの調合および使用材料を表-2に示す。セメン トには普通ポルトランドセメントを使用した。また、実 験にはブリーディング量が少なく初期ひび割れが生じや すい水セメント比が27%と小さい高強度コンクリートを 用いた。

測定項目として、表-1 に示すように、初期ひび割れ の他に、フレッシュ性状と圧縮強度の測定を行った。本 実験で使用した初期ひび割れ発生用拘束装置は図-1 に 示すような600×600×60mmの4辺をボルトで拘束した 鋼製型枠である。コンクリートの収縮を4辺から拘束さ せるために,底板にはテフロンシートを敷き摩擦力の低 減を図った。ARG 繊維ネットは、図-1 に示すように 150 ×600mm のものを2枚用意し、かぶり厚15mm に配置し たメッシュ筋(φ3mm,間隔10cm)に十字に結束した。 ARG 繊維ネットを埋設した供試体と埋設していない供 試体を各2体ずつ製作し、実験を行った。打設後直ちに 表面を均し、湿布養生を行った。材齢2時間後、図-2 に示すように,各供試体に送風機により供試体中央が風 速 3~4m/s となるように一方向より送風し、乾燥を開始 した。なお,乾燥開始時の気温は24.6℃,湿度は63.4%RH であった。乾燥期間48時間までひび割れ長さおよびクラ ックスケールによりひび割れ幅の測定を行った。また, 供試体のひび割れ状況を写真に撮り、画像解析ソフトに よりひび割れ総長さとひび割れ総面積を算定した。

### (2) 実験結果および考察

表-3に使用したコンクリートの物性を示す。

表-4 に初期ひび割れ試験結果一覧を示す。ネットの 有無にかかわらずすべての供試体にひび割れが発生した。 表中のひび割れ長さの実測値は、 スケッチで直線と見な せる区間ごとに分割し,計測集計したものである。また, ひび割れ総面積は,各ひび割れ長さと最大幅の積を集計 して求めたものである。

表-2 調合および使用材料(実験 A)

W/C	s/a	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
, •	0/ 4	С	W	S	G	Ad			
27.0	45.5	685	185	718	860	5.48			

C:普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm<sup>3</sup>), W:水,S:混合砂(表乾密度:2.61g/cm<sup>3</sup>),

G:砕石(表乾密度:2.66g/cm<sup>3</sup>),

Ad:高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系)



表より、ネット無の供試体ではひび割れ発生期間が乾 燥開始後平均 1.78 時間, ネット有の供試体で平均 2.71 時間とネットを埋設した方がひび割れ発生期間が約1時 間遅延している。このことより ARG 繊維ネットによる 初期ひび割れの遅延効果があることが確認できた。

ひび割れ長さの経時変化を図-3 に、ひび割れ最大幅 の経時変化を図-4 に、ひび割れ総面積の経時変化を図 -5 に示す。これらの図に示されるように初期ひび割れ

表一3 コンクリートの物性(実験 A)											
スランプフロー	空気量	単位容積質量	温度 (℃)	圧縮強度	$(N/mm^2)$	ヤング係数 (×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )					
(mm)	(%)	(kg/L)		材齢7日	材齢 28 日	材齢7日	材齢 28 日				
700 × 680	4.0	2. 37	25	61.5	71.5	2.95	3.34				

#### 表-4 初期ひび割れ試験結果

	ひび割れ発生期間		24 時間後のひび割れ(実測値)					24 時間後のひび割れ(画像解析値)						
供試体	(時間)	平均	総長さ (cm)	平均	最大幅 (mm)	平均	総面積 (mm <sup>2</sup> )	平均	総長さ (cm)	平均	最大幅 (mm)	平均	総面積 (mm <sup>2</sup> )	平均
ネット有 No.1	3.00	2 71	127.7	177 8	0.20	0.23	229. 3	250 0	79.6	103 6	0.20	0 23	87.1	124 0
ネット有 No.2	2. 42	2.71	227.9	177.0	0.25	0.23	270. 7	230.0	127.5	105.0	0.25	0.25	160.9	124.0
ネット無 No.1	2.33	1 97	161.7	150 8	0.60	0.63	397.9	130 0	100.9	06.0	0.70	0 70	240.0	218 5
ネット無 No. 2	1. 41	1.07	139.8	150.0	0.65	463.9	430. 9	91.1	30.0	0.70	0.70	197.0	210.0	



の進展は全ての供試体において乾燥開始 12 時間でほぼ 横ばいとなり、ネットの有無による差は見られなかった。

ひび割れ総長さで比較すると、ネットの有無での差は 小さく、ネット有 No.2 の供試体が最も長い結果となり、 ひび割れ長さの抑制効果は確認できかなった。これは、 図-6に示す乾燥期間24時間の各供試体のひび割れの状 況(スケッチ)からわかるように、ひび割れがネットを 埋設した場所を避けて分散して発生しているためである。

ひび割れ最大幅では,ネット有の供試体が 0.25mm, ネット無の供試体では 0.6mm 以上あり,ネットによるひ び割れ幅の抑制が大きいことが確認できた。

ひび割れ総面積においてもネット有の方がネット無 より小さく,ひび割れ総長さが最も長かったネット有 No.2 の供試体もネット無の供試体よりもひび割れ総面 積が小さく,ネットがひび割れを抑制していることが認 められた。また,図-6より,ネット有 No.1 とネット無 No.2 の供試体ではネットを埋設した位置にほぼ同様に ひび割れが発生しているが,ネット有 No.1 のひび割れ幅 が小さいことからもネットによるひび割れ幅の抑制効果 が確認できた。

24 時間後に撮影した画像を画像解析ソフトを用いて ひび割れの解析を行った結果を図-7 に示す。また,ひ び割れ総面積の実測値と解析値の比較を図-8 に示す。 ひび割れ総面積は実測値に比べ,解析値が小さな値を示 していることがわかる。これは,図-6と図-7を比較す ることでわかるように,0.1mm以下の細かなひび割れを 認識できていないためである。そのため,このような画 像解析ソフトでひび割れを用いてひび割れ面積を検討す る場合は,このような認識できないひび割れの量につい て注意する必要がある。

# 2.3 乾燥収縮ひび割れ試験(実験 B)

### (1) 実験方法

**表-5** に調合および使用材料を示す。本実験では、レ ディーミクストコンクリート(27-18-20BB)を用いた。 乾燥収縮ひび割れ抑制効果を検討するために、**表-1** 







図-7 乾燥期間24時間のひび割れ状況(画像解析)



図-8 ひび割れ総面積の実測値と画像解析結果比較

に示す4辺拘束試験および一軸拘束試験(JIS A 1151 拘 束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法)の 2種類の試験を行った。

4 辺拘束試験は、大野らの研究 <sup>3)</sup>を参考に、開口部の ある実構造物を想定した図-9 に示すような 4 辺を拘束 鋼材(溝形鋼 [-100×50×5)で囲んだものを乾燥収縮ひ び割れ試験装置として用いた。試験装置は、コンクリー トと拘束鋼材とのずれを防止するために、拘束鋼材にφ 9mmの丸鋼を 50mm 間隔で溶接している。中央に 400× 400mmの開口部を設け、その四隅からコンクリートの収 縮によるひび割れが発生することを想定して、パイ型ゲ ージ(検長:50mm)を取り付けた。ARG 繊維ネットの 設置位置を図-10 に示す。ARG 繊維ネットは、隅角部 に配した開口部補強筋(D10・ダブル)に結束させ、か ぶり厚 15mm に設置した。材齢 7 日より底板を外し、 20℃・60%RHの恒温恒湿室内で供試体を立てた状態で 2 面乾燥とした。

ー軸拘束試験装置を図-11 に示す。供試体は JIS A 1151 に準拠して作製し、コンクリート内部に小型埋込み ゲージを埋設するとともに鋼材に表面ゲージを貼り付け ひずみを測定した。ARG 繊維ネットは、打設面およびそ の対面にかぶり厚 15mm の位置に設置した。一軸拘束試 験も同様に、材齢7日より底板を外し、20℃・60%RHの 恒温恒湿室内で供試体を立てた状態で2面乾燥とした。

### (2) 実験結果および考察

**表-6**に使用したコンクリートの物性を示す。

図-12に4辺拘束試験においてひび割れが発生した箇 所のひずみの経時変化を示す。図に示すように開口変位 からはひび割れ発生日数は明確ではなく,目視によりひ び割れの有無を確認した。表-7 にひび割れ発生時の測 定結果を示す。ひび割れ総長さおよび最大ひび割れ幅は, ひび割れの発生を確認した時点での測定値である。表よ り,ネット有がひび割れの発生は遅く,また,ひび割れ 総長さも短い結果となり,ARG 繊維ネットによるコンク リートの開口部のひび割れ発生の遅延効果が確認できた。

表-5 調合および使用材料(実験 B)

W/C	s/a	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )								
(%)	(%)	C	W	S	G1	G2	Ad			
51.0	46.3	353	180	787	469	469	3.53			
<u>51.0</u> 46.3 35.3 180 787 469 469 469 469 3.53 C:高炉セメントB種(密度:3.04g/cm <sup>3</sup> ), W:水, S:混合砂(表乾密度:2.58g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率:2.65), G1:砕石(表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率:59.0%), G2:砕石(表乾密度:2.65g/cm <sup>3</sup> , 実積率:60.0%), (15.55g/cm <sup>3</sup> , 実積率:60.0%), (25.55g/cm <sup>3</sup> , 実積率:59.0%), (25.55g/cm <sup>3</sup> , ҳ										



ー軸拘束試験におけるコンクリートひずみおよび鋼材ひずみの経時変化を図-13に、鋼材ひずみより算出した拘束応力<sup>4)</sup>の経時変化を図-14に示す。また、ひび割

表-6 フレッシュ性状および圧縮強度試験結果(実験 B)

コンクリート	スランプ	空気量	単位容積質量	温度	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )		ヤング係数(×10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup> )		
種類	(cm)	(%)	(kg/L)	(°C)	材齢7日	材齢 28 日	材齢7日	材齢 28 日	
27-18-20BB	16.0	4.8	2.28	32.0	23.3	36.8	2.35	3.11	

れ発生時の測定結果を表-8に示す。図-13では 図中の▲でひび割れが発生したことを示しており, ネット有 No.2 の片方の鋼材ひずみが測定期間 15 日前後で大きな挙動を示しているが,この時点で は目視ではひび割れの発生は確認できず,表-8 に示すように測定期間22.1日でひび割れが発生し たと判断した。以上の結果より,4 辺拘束試験と 同様にネット有がひび割れの発生が遅く ARG 繊 維ネットによるひび割れの遅延効果が確認できた。

最大ひび割れ幅はネット有が小さくなっており, ひび割れ抑制効果があることが確認できる。コン クリートのひずみでは ARG 繊維ネット有りが大 きな値を示しており, コンクリートの伸び能力の 向上にも効果があると考えられる。

図-14 の拘束応力の経時変化でも▲でひび割 れが発生したことを示している。ひび割れ発生時 の拘束応力に ARG 繊維ネットの有無による差は 見られなかった。

### 3. 短繊維との比較

以上のように, ARG 繊維ネットにも短繊維と同様にコンクリートの収縮ひび割れの抑制効果が確認されたため、ネット状の連続繊維で補強されている場合は、短繊維の場合よりも効果的であると思われるが、短繊維との比較を行うことで、繊維量による抑制効果について検討を行った。

比較するにあたり,今回使用したようなネット は2次元配置であるが,短繊維は3次元配置とな るため,一軸拘束試験の測定区間(100×100mm) の断面における繊維占有率で比較することにした。 比較対象は,筆者らが繊維長13mmの短繊維を用 いて同様に行った実験結果である<sup>2)</sup>。そのときの 繊維混入率は0.107vol%(3kg/m<sup>3</sup>)である。繊維の 配向係数を $\alpha$ とした場合,断面における単位面積 あたりの繊維が横切る本数である繊維密度は次式 で与えられる<sup>5)</sup>。

$$\rho = \alpha / a \cdot V_f / V_c \tag{1}$$

ただし, ρ: 繊維密度, Vf: 繊維の体積, Vc: コンクリートの体積, a: 配向係数, a: 繊維1本の断面積





表-7 ひび割れ発生時の測定結果(4辺拘束試験)

供試体	ひび割れ 発生期間 (日)	平均 (日)	ひび割れ 総長さ (cm)	平均 (cm)	最大 ひび割れ幅 (mm)	平均 (mm)	
ネット有 No.1	68	70	2.3	1 25	0.05	0.05	
ネット有 No.2	72	70	6.5	4. 20	0.05	0.05	
ネット無 No. 1	7	0	11.1	6 95	0.05	0.05	
ネット無 No.2	11	Э	1.6	0.35	0. 05	0.05	



仮に配向係数が 1, すなわち繊 維が断面と直行方向に均一に分散 した場合を考えると, 使用した ARG 繊維 1 本の断面積は 0.0257mm<sup>2</sup>であるため<sup>1)</sup>,繊維密 度は0.0416本/mm<sup>2</sup>, コンクリート の断面に占める繊維の断面積の割 合(以下, 占有率)は0.107%とな る。一方, 今回使用したネットの 断面積は12.2mm<sup>2</sup>であるため, 占

表-8 ひび割れ発生時の測定結果(一軸拘束試験)

供試体		ひび割れ 発生期間 (日)	平均 (日)	最大ひび 割れ幅 (mm)	平均 (mm)	コンクリート のひずみ (×10⁻⁰)	平均 (×10 <sup>-6</sup> )	拘束 応力 (N/mm <sup>2</sup> )	平均 (N/mm²)
ネット右	No. 1	14.1	18 1	0.15	0 20	120	122	0.88	1 08
インド有	No. 2	22. 1	10.1	0. 25	0.20	145	100	1.27	1.00
ナット毎	No. 1	5.0	12 6	0.30	0.20	66	106	0.87	1 07
イツト無	No. 2	22. 1	15.0	0.25	0.20	146	100	1.27	1.07
ARG 繊維 <sup>2)</sup>	No. 1	11.9	12 /	0.08	0 08	236	245	1.42	1 /19
0kg/m <sup>3</sup>	No. 2	12.9	12.4	0.07	0.00	253	243	1.54	1.40
ARG 繊維 <sup>2)</sup>	No. 1	11.4	11.2	0.05	0 05	272	247	1.63	1 20
3kg/m <sup>3</sup>	No. 2	16.9	14. 2	0.05	0.05	222	247	1.14	1.39

有率は0.122%となり、短繊維とほぼ同等である。

図-15 に短繊維ならびにネットを用いた場合の無混 入に対するひび割れ発生期間の差の比較を示す。図より, ほぼ同等の繊維占有率であるにもかかわらず、ひび割れ 発生期間の差が短繊維の1.8日に対してネットが4.5日と、 2.5 倍の遅延効果があり,ネットの方が効率的にひび割れ を抑制できることがわかる。これは、短繊維が3次元的 にランダム配置した場合、一般に配向係数は 0.5 程度で あり<sup>5)</sup>, また, 後藤ら<sup>6)</sup> によって繊維長 13mm の耐アル カリ性ガラス繊維を2次元にランダム配置した場合でも その補強効率(連続繊維が1軸方向に作用した場合を 100%としたときの補強割合)は26%程度であることが示 されているように、 短繊維の補強効率が悪いことが原因 と考えられる。さらに、この乾燥収縮ひび割れ試験では、 コンクリートの断面中央に比べて表面付近に極めて大き な引張応力が作用するが、ネットはその表面付近に存在 していることも大きく影響していると考えられる。

# 4. まとめ

ARG 繊維ネットによるコンクリートの初期および乾 燥収縮ひび割れ抑制効果について検討した結果,本研究 の範囲で以下の知見を得た。

- ARG 繊維ネットを混入することでコンクリートの初 期ひび割れの発生の遅延,進展および幅の抑制効果 がある。
- ARG 繊維ネットを混入することでコンクリートの乾 燥収縮ひび割れの発生の遅延効果がある。
- 3) 短繊維と比較して、コンクリート断面積に占める繊維の断面積の割合が同等であれば、ネットの方がひび割れ発生の遅延効果が高い。

### 謝辞

実験を実施するにあたり、山口福祉文化大学・濱永康 仁先生、本学客員研究員・清原千鶴さん、技術職員・遠 矢義秋氏、本学大学院生・吉川悟史君、同卒論生・桑原 健君をはじめコンクリート工学研究室の諸氏に多大の協 力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。



図-15 繊維種類によるひび割れ発生期間の差の比較 (一軸拘束試験, JIS)

### 参考文献

- 竹内好雄ほか:耐アルカリ性ガラス繊維によるコン クリートの初期ひび割れ抑制に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A-1, pp.447-448, 2001.9
- 佐藤嘉昭ほか:耐アルカリ性ガラス繊維補強コンク リートの乾燥収縮ひび割れ特性に関する実験的研究, セメント・コンクリート論文集, NO.60, pp.469-476, 2007.2
- 3) 大野俊夫,魚本建人:乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼ す拘束の形態,乾燥面数の影響,コンクリート工学 年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.649-654, 1998.6
- 4) 上田賢司ほか:コンクリート部材の乾燥収縮ひび割 れ実験における拘束鋼材のひずみ分布,コンクリー ト工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.703-708, 1997.6
- 5) 小林一輔ほか:鋼繊維補強コンクリートー一般的性 質・強化機構・繊維の配向と分散-, コンクリート 工学, Vol.15, No.3, pp.7-21, 1977.3
- 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、XXX, pp.439-442, 1976.12