

論文 各種繊維混入コンクリートの鉄筋付着性状およびひび割れ性状に関する研究

大谷 俊浩*¹・三島 剛*²・佐藤 嘉昭*³・蔣 海燕*⁴

要旨:本研究では、耐アルカリ性ガラス短繊維とネットおよびナイロン短繊維を混入したコンクリートの鉄筋付着性状およびひび割れ性状を検討するために鉄筋片引き試験および両引き試験を行った。その結果、ガラス短繊維およびナイロン短繊維を混入したコンクリートの圧縮強度は若干低下し、それが原因と考えられる鉄筋両引き試験におけるひび割れ発生までの付着すべり剛性の低下がみられた。また、ガラスネットを混入した場合、鉄筋片引き試験では最大付着応力の低下がみられたが、鉄筋両引き試験では逆に高くなる結果となった。この原因として、載荷方法の違いで生じるコンクリートの応力状態(圧縮と引張)の違いの影響が考えられた。

キーワード:耐アルカリ性ガラス繊維ネット, ナイロン繊維, 鉄筋付着, 片引き試験, 両引き試験

1. はじめに

筆者らはこれまで耐アルカリ性ガラス短繊維(以下、ガラス繊維)およびネット(以下、ガラスネット)、ならびにナイロン短繊維(以下、ナイロン繊維)によるコンクリートの初期ひび割れおよび収縮ひび割れ抑制効果について検討を行ってきた^{1), 2), 3), 4)}。コンクリートの収縮ひび割れには鉄筋との付着性状が大きく影響していることが知られているが、これらの繊維の混入による鉄筋との付着性状については明らかになっていない。ガラス繊維とナイロン繊維はコンクリートに少量混入するものでコンクリートの物性を大きく変化させるものではないが、鉄筋との付着性状に影響を与える可能性がある。一方、ガラスネットは写真-1に示すようなひび割れが発生する方向に対して直交方向(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、コンクリート打設前にこの中央部分を鉄筋に結束線で固定して使用される。したがって、ガラスネットはコンクリート自身の物性を変化させるものではないが、鉄筋と周辺のコンクリートとの力の伝達状況が変化し、こちらも同様に鉄筋との付着性状に何らかの影響を与えることが予想される。

そこで本研究では、これらの繊維を混入したコンクリートの鉄筋片引き試験および両引き試験を実施し、これらの繊維の混入が鉄筋との付着性状に及ぼす影響について実験的検討を行った。また、鉄筋両引き試験におけるひび割れ性状についても比較検討を行った。

2. 実験

2.1 実験計画

表-1に実験項目を示す。本実験では、ガラス繊維、

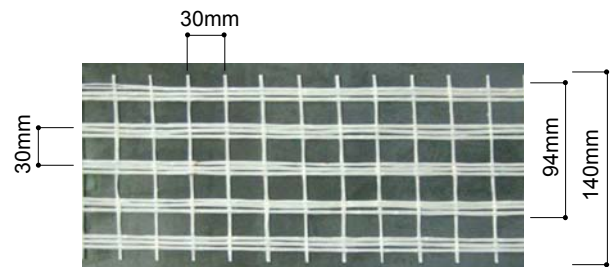


写真-1 耐アルカリ性ガラス繊維ネット

表-1 実験項目

シリーズ	実験項目	試験材齢	供試体寸法
I	鉄筋片引き試験 (JSCE-G 503)	28日	150×150×150mm (鉄筋:D13,D19,D25)
	圧縮強度試験 (ガラスネット除く)		φ100×200mm
	割裂引張強度試験		φ100×200mm
II	鉄筋両引き試験	28日	100×100×1080mm 125×125×1080mm* 150×150×1080mm* (鉄筋:D16)
	圧縮強度試験 (ガラスネット除く)		φ100×200mm
	割裂引張強度試験		φ100×200mm

* ガラスネットのみ

ガラスネットおよびナイロン繊維の混入が鉄筋との付着性状に及ぼす影響について検討するため、シリーズIとして鉄筋片引き試験、シリーズIIとして鉄筋両引き試験を実施することとした。また、コンクリートの素材試験として、圧縮強度および割裂引張強度試験を実施することとした。

2.2 実験方法

(1) 供試体作製

表-2にコンクリートの調合および使用材料を示す。

*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)

*2 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)

*4 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) (学生会員)

ガラスネットはストランドが 30mm 間隔で網状に織り上げられた幅 210mm (7 列) のものを、シリーズ I では 140mm 幅 (5 列) に、シリーズ II では 94mm 幅 (4 列) に切断して使用した。また、ナイロン繊維およびガラス繊維は曲げ補強を目的としたものではなく、少量混入により収縮ひび割れを抑制することを目的としたものであり、それぞれ繊維長 12mm および 13mm のものを使用した。コンクリートの水セメント比は、プレーンコンクリートの材齢 28 日における圧縮強度が 30N/mm² 程度となるように 65% とした。

コンクリートの練混ぜには二軸ミキサを用い、砕石、砂、セメントの順でミキサに投入して 15 秒空練り後、水を投入して 2 分練混ぜを行った。ナイロン繊維およびガラス繊維を混入したものは、練混ぜ 1 分 30 秒の時点でそれぞれの標準添加量の 300g/m³ および 500g/m³ を拡散させながら投入し、その後 30 秒間練混ぜを行い、トータルの練混ぜ時間を統一した。片引き試験用供試体は縦打ち、両引き試験用供試体は横打ちとした。また、シリーズ I では鉄筋径ごとに打設を行っている。

シリーズ I では材齢 1 日で脱型後、所定の材齢まで 20℃ 水中養生を行い、シリーズ II では材齢 2 日で脱型後、所定の試験材齢まで 20℃ で湿潤養生とした。

(2) コンクリート強度試験

圧縮強度試験および割裂引張強度試験は φ100×200mm の円柱供試体を用い、材齢 28 日にそれぞれ JIS A 1108 および JIS A 1113 に準じて行った。

(3) 鉄筋片引き試験

図-1 に供試体寸法を、図-2 に鉄筋片引き試験の概略図を示す。鉄筋片引き試験の供試体寸法は JSCE-G 503 を参考として 150×150×150mm とし、鉄筋には D13、D19 および D25 の竹節鉄筋を用い、鉄筋の付着区間は 102mm とした。ガラスネットは鉄筋の付着区間に 2 方向に配置し、コンクリート打設時に図-1 のようにネットが円弧状になるようにした。これは、実際の使用において、コンクリートの打込みの際にネットがこのように変形するため、それを模したものである。また、変位計 (感度 1/500mm) による自由端のめり込み量と、ひずみゲージ (測長 2mm) により 3 か所 (載荷端、付着区間中央、自由端) の鉄筋ひずみを測定した。載荷速度は鉄筋の引張応力度が毎分 50N/mm² 程度とした。

(4) 鉄筋両引き試験

鉄筋両引き試験は、図-3 に示すように、供試体寸法 100×100×1080mm の供試体を標準とした。ただし、ガラスネットについては片引き試験と同様に 2 方向に配置し、コンクリート打設時に円弧状になるようにしたが、ネットの先端でのかぶり厚さが薄くなり、それによるひび割れの誘発などの影響が懸念される。また、コンクリ

表-2 割合および使用材料

シリーズ	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S	G
I	65	50	285	185	884	904
II	65	49.1	277	180	864	924

C : 普通ポルトランドセメント (密度 : 3.16g/cm³) , W : 水,
S : 混合砂 (表乾密度 : 2.60g/cm³, 吸水率 2.67%) ,
G : 硬質砂岩砕石 (表乾密度 : 2.66g/cm³, 吸水率 0.69%)

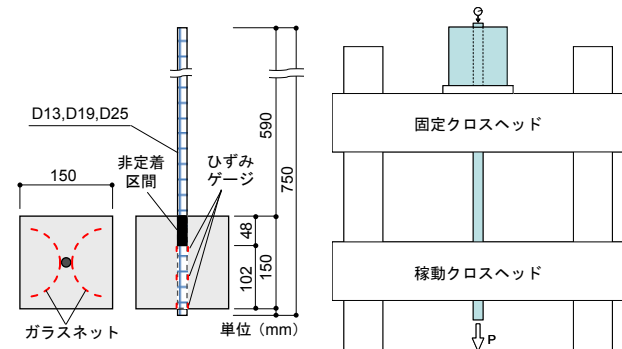


図-1 片引き試験用供試体 図-2 片引き試験外略図

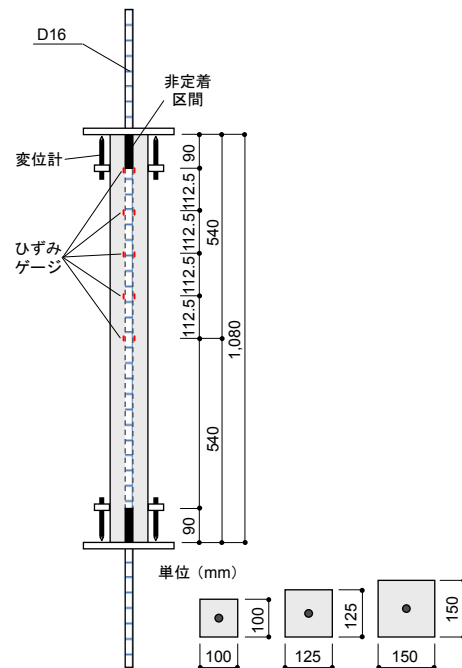


図-3 両引き試験用供試体

ート断面に対するネットの量の影響も考えられることから、ガラスネットのサイズは同一とし、コンクリートの断面が 125×125mm および 150×150mm の供試体も作製した。拘束鉄筋には D16 を用い、コンクリートの両端の 90mm は鉄筋との縁を切り、変位計 (感度 1/500mm) を取り付けて鉄筋の抜け出し量を測定した。また、鉄筋のひずみの測定は定着区間の半分に 112.5mm ピッチで 5 箇所貼付けたひずみゲージ (測長 2mm) で行った。載荷速度は約 5kN/s とし、変位計による抜け出し量が 2mm に達するまで載荷を行った。

表-3 コンクリート強度試験結果

シリーズ	鉄筋	繊維種類	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)
I	D13	—	30.3	2.93	2.17
		ナイロン	27.0	2.82	2.30
		ガラス	24.2	2.92	2.77
	D19	—	29.4	2.95	2.29
		ナイロン	25.4	2.89	2.14
		ガラス	25.8	2.79	2.30
D25	—	29.3	2.96	2.66	
	ナイロン	27.2	2.89	2.28	
	ガラス	25.6	2.88	2.00	
II	D16	—	31.3	2.77	2.69
		ナイロン	29.7	2.80	2.85
		ガラス	28.8	2.73	2.63

3. 実験結果および考察

3.1 圧縮強度および割裂引張強度試験

表-3 にコンクリートの強度試験結果を示す。圧縮強度は、ナイロンおよびガラス繊維を混入したものでそれぞれ約 10% および約 15% の低下が認められる。一方、割裂引張強度は D25 のときに繊維を混入することで低下しているが、全体的には強度低下はみられなかった。

3.2 鉄筋片引き試験

図-4 に平均付着応力-すべり量関係を示す。平均付着応力は式 (1) で算出した。また、すべり量は鉄筋ひずみ分布による積分値から変位計により計測した自由端めり込み量を差し引いて求めた。なお、D19 のナイロンおよび D25 のガラスネットの各 3 体中 1 体はひずみの計測不良のため示してない。破壊形態は、径が最も細い D13 の鉄筋が引抜き破壊であったことから付着応力の下降域までの計測ができていないが、その他の鉄筋径の場合はコンクリートの割裂破壊となったことから下降域までの計測はできていない。

$$\tau = \frac{P}{l\pi D} \quad (1)$$

ここに、 τ : 平均付着応力 (N/mm²)、 P : 引張荷重 (N)、 D : 鉄筋の公称直径 (mm)、 l : 付着区間長 (mm)

図-5 に最大付着応力の比較を示す。ここで言う最大付着応力は、引抜き破壊を生じたものは最大の付着応力時を、割裂破壊を生じたものは割裂破壊を生じた時点の付着応力を指す。図-4 および図-5 より、ガラス繊維およびナイロン繊維を混入したものの最大付着応力および付着応力-すべり量関係はプレーンと明確な差は認められないが、ガラスネットでは最大付着応力の低下と最大付着応力までの曲線の傾きが緩やかになっていることがわかる。また、図-4 における D13 の横軸のスケールは他の場合とは異なっているが、ピークまでの曲線の勾配

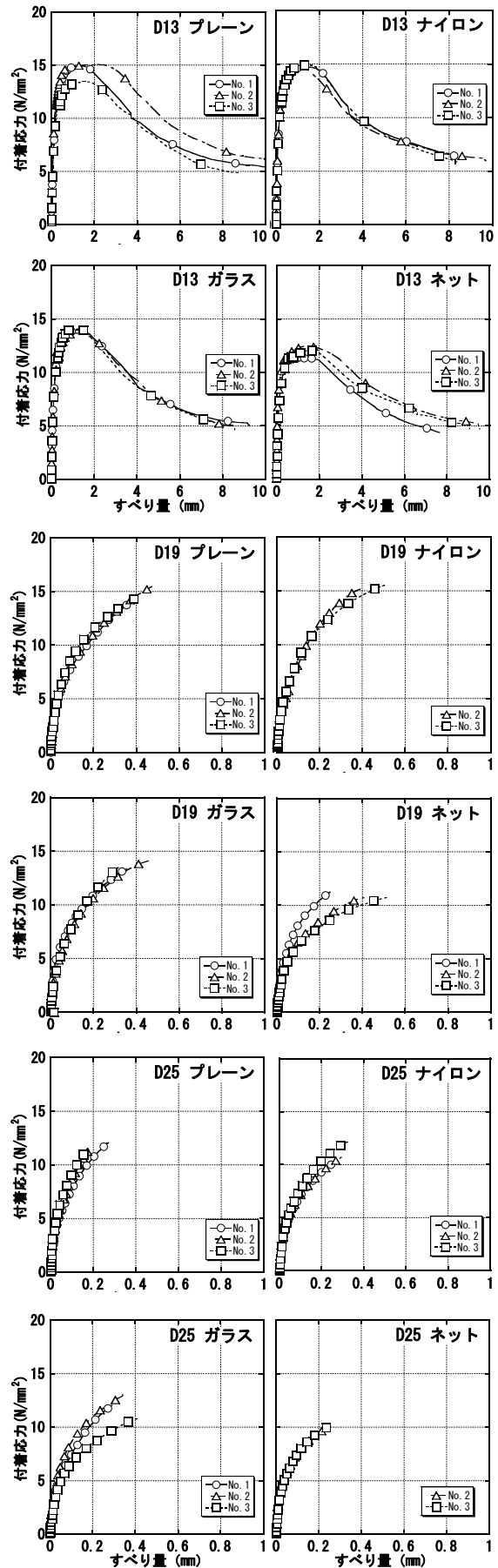


図-4 平均付着応力-すべり量関係 (シリーズ I)

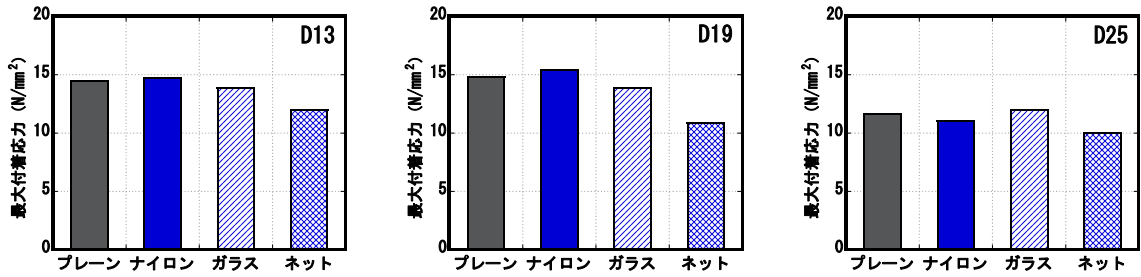


図-5 最大付着応力の比較 (シリーズ I)

は鉄筋径による差はほとんど認められず、最大付着応力はD25で大きな低下が認められる。これは、今回の実験ではコンクリート断面積を統一したため、鉄筋径が太くなるほどコンクリートの正味の断面積が減少し、D25においてその影響が明確になったためと考えられる。

3.3 鉄筋両引き試験

(1) ひび割れ性状

図-6 にひび割れ発生荷重を示す。ひび割れ発生荷重はナイロン繊維およびガラス繊維の混入による影響はみられずプレーンと同等となったが、ガラスネットは片引き試験と異なり、若干大きくなる結果となった。この原因として試験方法の違いにより生じるコンクリート応力状態の違いが考えられる。つまり、片引き試験では載荷点側で反力を取っているため、コンクリートの軸方向に発生する応力は圧縮力となるが、両引き試験では引張力が発生することになる。繊維はコンクリートの引張力に対して機能するため、両引き試験においてガラスネットの効果が明確に現れたものと考えられる。したがって、繊維を混入したコンクリートの鉄筋付着性状を検討する場合、試験方法に注意する必要があるといえる。

ガラスネットを埋設した供試体寸法の違いについては寸法が大きいほどひび割れ発生荷重が大きくなった。これは、ひび割れ発生荷重がほぼコンクリートの断面積に比例して増加していることから、ネットのかぶり厚さが小さいことによるひび割れの誘発等の影響は小さく、コンクリート断面積の違いによる負担荷重の増加が支配的要因であると考えられる。

図-7 に最大ひび割れ幅を示す。最大ひび割れ幅はナイロン繊維およびガラス繊維は若干大きくなったがガラスネットは大幅に小さくなり、ガラスネットのひび割れ幅抑制効果が明確である。また、コンクリートの断面寸法の影響は明確な傾向はみられなかった。

図-8 にひび割れ総長さを示す。ひび割れ総長さはナイロン繊維およびガラス繊維による影響はみられずプレーンと同等となったが、ガラスネットは大幅に短くなる結果となった。また、図-9 に示すように、ガラスネット以外では軸方向の鉄筋に沿った付着割裂ひび割れが多くみられるが、ガラスネットではそれが少なく、付着割

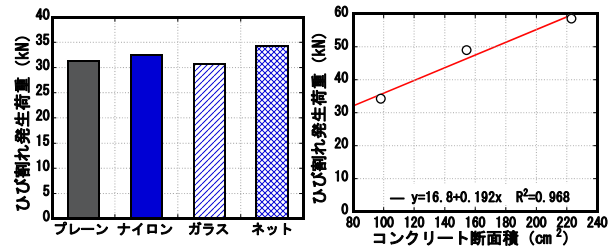


図-6 ひび割れ発生荷重 (シリーズ II)

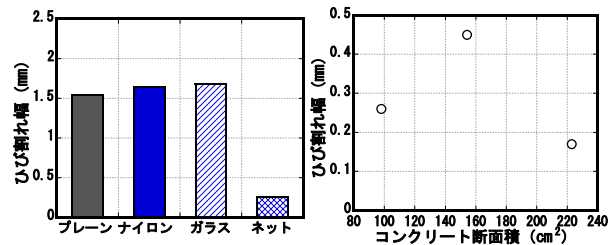


図-7 ひび割れ幅 (シリーズ II)

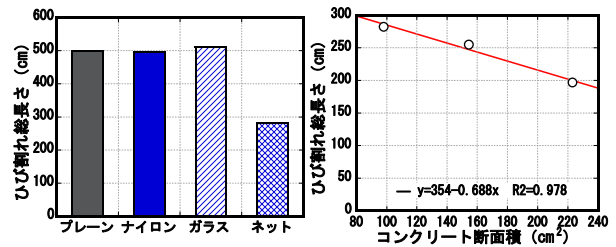


図-8 ひび割れ総長さ (シリーズ II)

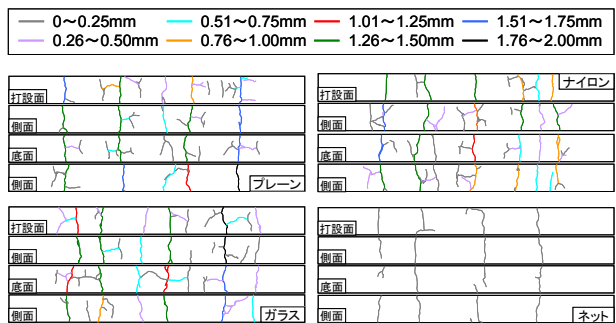


図-9 ひび割れ状況の一例 (シリーズ II, 10×10cm)

裂ひび割れの抑制効果があるものと思われる。コンクリート断面寸法の影響については、コンクリート断面積が増加するとともにひび割れ総長さは直線的に減少した。

(2) 付着応力-すべり量関係

両引き試験における付着応力 τ は、鉄筋ひずみ分布の

勾配から求める局所付着応力で検討されることが多いが、ここでは繊維混入による影響を比較することを目的に、式(2)によって求めた供試体中央から荷端までの450mmの間における平均付着応力とした。

$$\tau = \frac{P}{(L/2)\pi D} \quad (2)$$

ここに、 τ : 付着応力 (N/mm²)、 P : 引張荷重 (N)、 L : 付着区間の長さ (mm)、 D : 鉄筋の公称直径 (mm)

すべり量は変位計で計測した拔出量から非定着域の鉄筋の伸びを差し引くことで求めたすべり量を S_1 、鉄筋のひずみ分布を積分して求めたすべり量を S_2 とした。

図-10に付着応力-すべり量関係を示す。付着応力-すべり量曲線の形状は、変位計で測定した S_1 ではバイリニア型を示し、鉄筋ひずみより算出した S_2 ではトリリニア型を成している。それぞれ付着応力が 3N/mm² 付近での屈折は鉄筋の降伏によるものである。また、すべり量 S_2 における一つ目の曲線の屈折はコンクリートのひび割れによるものである。すべり量 S_1 ではナイロン繊維が同一すべり量における付着応力が高い値を示しているが、すべり量 S_2 では明確な差はみられない。さらにその曲線の形状も不安定であることから、再度確認実験が必要であるが S_1 のナイロン繊維は変位計に緩み等の不具合が発生していたものと考えられる。また、ガラスネットによる供試体寸法の違いについては、 S_1 では明確な差はみられないが、 S_2 ではコンクリートのひび割れ以降で同一すべり量における付着応力が供試体寸法が大きいほど大きい傾向を示している。

すべり量 S_2 におけるコンクリートのひび割れまでの傾きを初期剛性、ひび割れ発生後の傾きを2次剛性として⁵⁾、これらを各区間を直線近似して求めた。図-11に各供試体の剛性の比較をそれぞれ示す。繊維混入の影響について、初期剛性はブレン>ナイロン繊維>ガラス繊維の順になり、またブレンとガラスネットが同等の値を示していることからコンクリートの強度の影響がそのまま現れているものと考えられる。これは、吉村らの報告⁵⁾と同様の傾向を示すものである。2次剛性については明確な差はみられなかった。供試体寸法については初期剛性および2次剛性ともに供試体寸法の増加に伴って若干の値の低下がみられる。

(3) ひび割れ発生時のマトリックスに作用する応力

鉄筋両引き試験におけるマトリックス（ここではネットも含めたコンクリートと繊維との合成マトリックスを指す）に発生する引張応力の分布は荷端から中央に向かって増加し、中央部で最大値を示す⁶⁾。そこで、鉄筋

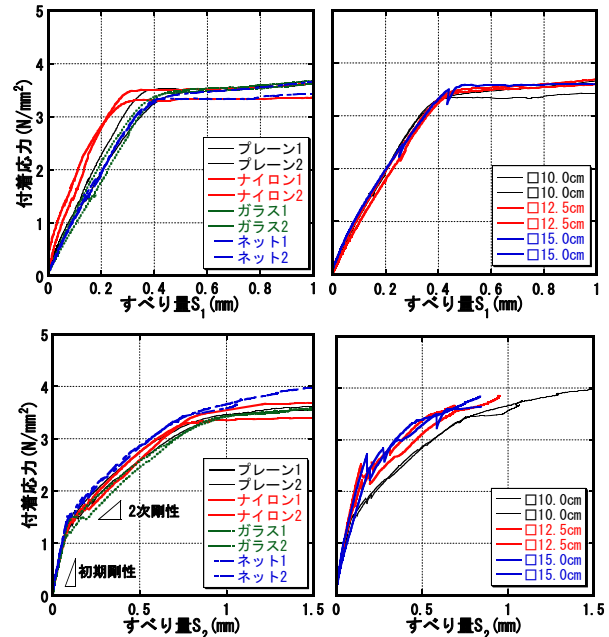


図-10 付着応力-すべり量関係 (シリーズ II)

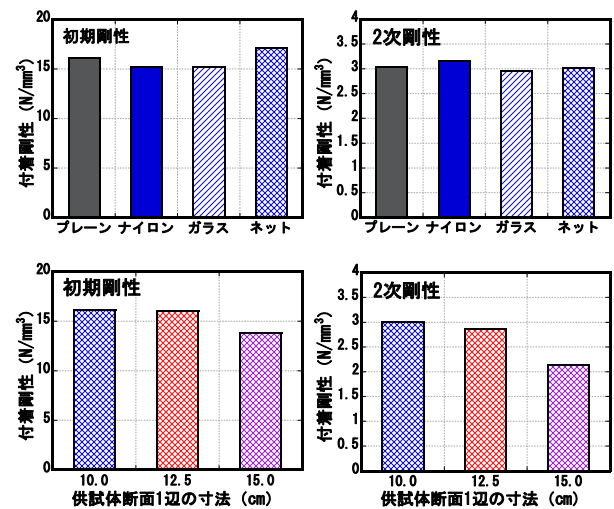


図-11 各付着剛性の比較 (シリーズ II)

中央のひずみより、ひび割れ発生時のマトリックスに作用する応力を式(3)を用いて算出した。

$$\sigma_m = \frac{P - E \cdot \epsilon_s \cdot A_s}{A_m} \quad (3)$$

ここに、 σ_m : マトリックスの応力 (N/mm²)、 P : 荷重 (N)、 ϵ_s : 供試体中央の鉄筋ひずみ (μ)、 A_s : 鉄筋公称断面積 (mm²)、 A_m : マトリックス断面積 (mm²)

図-12にひび割れ発生時のマトリックスに作用する応力を示す。真ん中の図は、そのひび割れ発生時のマトリックスの応力を割裂引張強度で除した強度比を示している。図より、応力ではガラスネットはブレンと比較

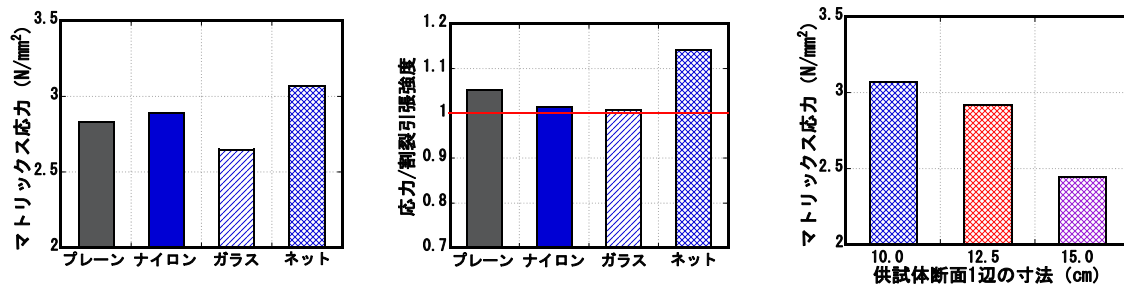


図-12 マトリックスに作用する応力（ひび割れ発生時）

して若干大きくなり、強度比ではプレーン、ナイロン繊維およびガラス繊維についてはほぼ引張強度でひび割れが発生しているのに対し、ガラスネットは15%程度応力が高くなっている。したがって、ガラスネットは供試体に作用する引張応力の一部を負担しているものと考えられる。また、供試体寸法による影響は供試体寸法が大きいほどマトリックスに作用する応力が小さく、小さな応力でひび割れが発生したことがわかる。これは、寸法効果の影響も考えられるが、今回の実験ではネットのサイズを同一としてコンクリートの断面積を変化させたため、引張応力を負担するネットの供試体断面に占める目付量が相対的に減少したことが原因と考えられる。

4. まとめ

本研究では、耐アルカリ性ガラスネットならびに少量混入タイプのガラス繊維およびナイロン短繊維を混入したコンクリートの鉄筋付着性状およびひび割れ性状を検討するために鉄筋片引き試験および両引き試験を行った。その結果、本研究の範囲で以下の知見が得られた。

- 1) ガラス繊維およびナイロン繊維を混入したコンクリートはコンクリート強度の低下によって両引き試験におけるひび割れ発生までの付着すべり剛性の低下がみられるが、その他の鉄筋付着性状に大きな影響を及ぼさない。
- 2) 鉄筋に固定するガラスネットを設置した場合、鉄筋片引き試験では最大付着応力の低下がみられるが、両引き試験では逆に高い値を示す。これは、試験の载荷方法の違いにより、コンクリートに発生する応力が片引き試験では圧縮であるのに対し、両引き試験では引張であることが要因の一つと考えられる。
- 3) ガラスネットの量を一定としてコンクリートの断面積を変化させた場合、ひび割れ発生時の応力はコンクリート断面積の増加にともなって増加するが、その増加はコンクリート正味の断面積の増加に比例しており、ネットのかぶり厚さが小さいことによるひび割れの誘発の影響は小さい。

以上のように、今回は平均付着応力で比較を行い、織

維を混入することで生じたコンクリート強度の低下に伴う初期剛性の低下以外に、付着性状に関して明確な影響は認められなかった。しかしながら、両引き試験では局所付着応力の分布等に違いが生じる可能性もあるため、今後、局所付着応力による詳細な検討を行っていく予定である。

謝辞

実験に使用したガラス繊維は日本電気硝子（株）に提供していただいた。また、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、技術職員・遠矢義秋氏、本学大学院生・吉川悟史君（当時）、金森慎治君をはじめコンクリート工学研究室の諸氏に多大な協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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) 大谷俊浩ほか：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, 第31巻, 第1号, pp.331-336, 2009.7
- 4) 星川健二ほか：ナイロン繊維を少量混入したコンクリートの特性に関する研究（その6 初期ひび割れ抑制効果），日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp.309-310, 2006.9
- 5) 吉村満ほか：鉄筋とコンクリート間の付着応力ーすべり関係に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.613-618, 2007.7
- 6) 森田司郎：鉄筋コンクリートにおける付着とひび割れに関する研究，京都大学学位論文, 1968.4