

論文 PVA 太径短繊維の付着性能に及ぼす繊維の埋込長，角度ならびに本数の影響

米山 翔太^{*1}・坂井 悟^{*2}・小林 孝一^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：ダンベル型引張供試体を用いて太径の PVA 繊維の付着試験を行い，繊維の付着性能に及ぼす繊維の埋込長，角度ならびに本数の影響を明らかにし，繊維補強コンクリートの引張試験の結果と比較した。付着試験において，繊維の埋込本数が 1 本の場合，埋込角度が変わっても，最大荷重は 100N 程度であった。埋込本数が複数本（9～25 本）の場合，繊維 1 本当たりの最大荷重は，80N 程度となった。繊維引抜エネルギーと総引抜長との間には高い相関が認められた。繊維補強コンクリートの引張試験において，2 番目のピーク引張荷重から求めた繊維 1 本当たりの荷重は約 90N となり，付着試験で得られる値と同程度であった。

キーワード：繊維補強コンクリート，PVA 繊維，付着試験，引張試験，埋込長，埋込角度

1. はじめに

短繊維補強コンクリートには，鋼繊維，ポリビニールアルコール（PVA）繊維，ポリプロピレン（PP）繊維などが，引張性能の向上，ひび割れの制御，コンクリート片の剥落防止，火災時の爆裂防止などの様々な目的で用いられている。繊維の太さは，0.01mm 程度のものから 0.5mm 以上の太径のものまで様々である。

短繊維とマトリックスとの付着性能は，引張強度，引張靱性，ひび割れ幅などの引張性能に大きな影響を及ぼし重要である。

本研究においては，ダンベル型引張供試体¹⁾を用いて，太径の PVA 繊維とマトリックスとの付着試験を行い，繊維の付着性能に及ぼす繊維の埋込長，角度ならびに本数の影響を，繊維の引抜や破断，最大荷重，繊維引抜エネルギーなどを用いて明らかにした。さらに，PVA 繊維を体積で 1% 混入した繊維補強コンクリートの引張試験の結果と付着試験の結果とを比較し，関連づけた。

2. 試験概要

2.1 試験の種類と概要

(1) 試験の種類

本研究においては，PVA 繊維とマトリックスとの付着

に関する下記の試験 A～D と，PVA 繊維を体積で 1% 混入した繊維補強コンクリートの引張試験を行った。試験 A，B については，既発表²⁾の内容であるが，理解しやすいので合わせて記載した。

- ・試験 A：埋込長の影響
- ・試験 B：埋込角度の影響
- ・試験 C：繊維長，埋込長の影響
- ・試験 D：繊維本数，埋込長，埋込角度の影響

(2) 使用材料，配合ならびに養生

用いた PVA 繊維の物性のカタログ値は，直径 0.66mm，長さ 30mm，引張強度 900N/mm²，切断伸度 9.0%，ヤング係数 23GPa，密度 1.3g/cm³である。長さ 20mm の PVA 繊維は，長さ 30mm の繊維をカットして作製した。

表－1 に，「繊維補強コンクリート」と，繊維を含まない「マトリックス」の配合を示す。短繊維混入時にスランプフローが 65±10cm となるように配合を決めた³⁾。セメントには早強ポルトランドセメント，骨材には石灰石砕砂（2.5mm 以下）と石灰石碎石 7 号（5.0～2.5mm）を用いた。繊維補強コンクリートには長さ 30mm の PVA 繊維を体積比で 1% 混入した。

付着，引張，圧縮試験とも，原則として供試体の脱型は打設 3 日後に行い，試験 A は試験材齢 18～19 日まで，

表－1 コンクリートの配合

配合名	単位量 (kg/m ³)							
	水	セメント	石灰石粉	石灰石砕砂	石灰石碎石 7 号	PVA 繊維	高性能 AE 減水剤	AE 剤
繊維補強コンクリート	187	623	84	1225	245	13	16.8	0.028
マトリックス	189	629	85	1237	247	0	16.8	0.028

*1 岐阜大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻 博士前期課程（学生会員）

*2 昭和コンクリート工業（株） 営業本部 開発課

*3 岐阜大学工学部社会基盤工学科 教授 博（工）（正会員）

*4 岐阜大学工学部社会基盤工学科 名誉教授 工博（正会員）

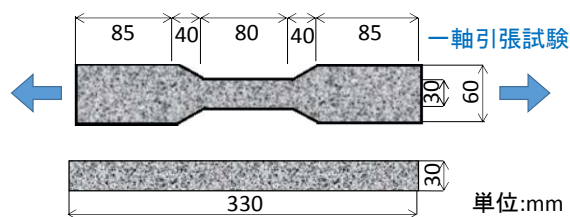


図-1 ダンベル型供試体の形状寸法

試験 B～D は試験材齢 28 日～29 日まで 20℃の恒温室内で湿潤養生を行った。圧縮強度試験には、直径 50mm、高さ 100mm の円柱供試体を 1 条件あたり 3 個用いた。

2.2PVA 短繊維の付着試験

(1) 供試体の作製

短繊維の付着試験では、表-1 の「マトリックス」の配合で製造したコンクリートに PVA 繊維を埋め込んだダンベル型供試体（図-1）を作製した。供試体の引張試験領域（検長区間 80mm）の中央に、コンクリートが付着しないようにセパレータ（厚さ 0.1mm の OHP フィルム、PET 樹脂製）を配置した。

表-2 に付着試験の条件と供試体数を、図-2 に型枠と短繊維の配置を示す。試験 B～D では、供試体作製時に繊維の配置等を容易にするため、図-3 に示すように繊維の両端部とセパレータ位置に油性マジックで印を付

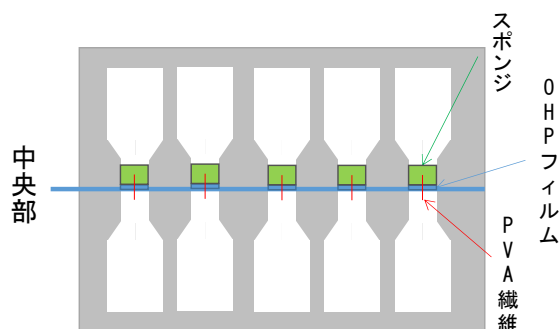


図-2 型枠と短繊維の配置

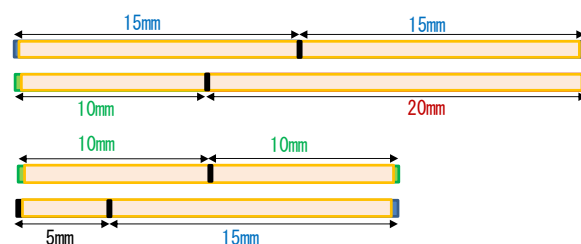


図-3 繊維の着色方法

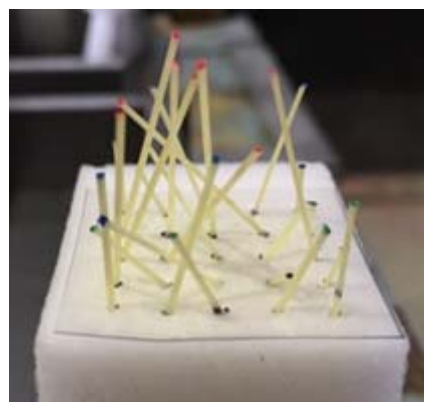


図-4 スポンジに PVA 繊維を埋め込んだ様子
（埋込繊維本数 25 本の組合せ）

けた。図-2、4 に示すように、スポンジを配置して、繊維を所定の埋込長と埋込角度で埋め込んだ。型枠の片側にコンクリートを打設し、翌日スポンジを取り除き、OHP フィルムを残して、反対側にコンクリートを打設した。

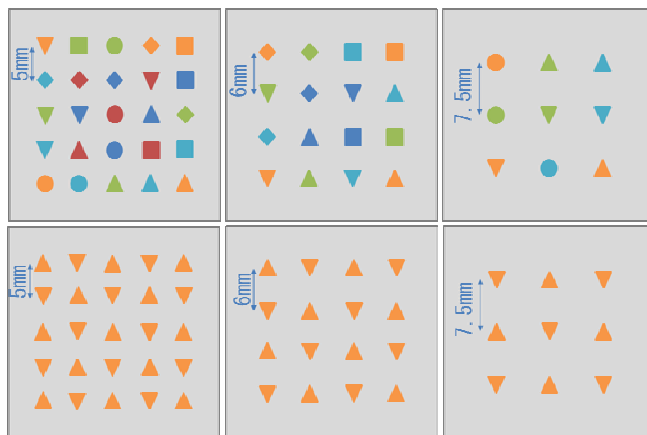
(2) 繊維の配置

表-2 に示すように、主に長さ 30mm の繊維を用いた。試験 A では、埋込本数を 1, 2, 4 本とし、埋込長を 5～15mm とした。試験 B では、埋込本数を 1 本、埋込長を 15mm とし、埋込角度を 0°（フィルムに直角）～75°とした。試験 C では、繊維長を 20, 30mm とした。試験 D では、埋込本数を 9, 16, 25 本とし、埋込長が 15mm のもの、埋込長が 10mm ならびに 20mm のもの、埋込長と埋込角度を変えて組合せたもの（以下、

表-2 付着試験の条件と供試体数

	主な要因	繊維長 (mm)	埋込本数	埋込長 (mm)	埋込角度 (°)	供試体数
試験 A	埋込長	30	1	5, 7.5, 10, 15	0	各 3 計 12
			2	7.5×2, 7.5+15, 15×2	0	各 3 計 9
			4	7.5×4, 7.5×2+15×2, 15×4	0	各 3 計 9
試験 B	埋込角度	30	1	15	0, 15, 30, 45 60, 75	各 3 計 18
試験 C	繊維長と埋込長	20	1	5, 10	0	各 3 計 6
		30	1	15	0	3
試験 D	繊維本数と埋込長と埋込角度	30	9	15×9	0	各 3 計 9
				10×5+20×4	0	
				10×3+15×3+20×3	0+15+30	
			16	15×16	0	各 3 計 9
				10×8+20×8	0	
				5×4+10×4+20×4+25×4	0+15+30+45	
			25	15×25	0	各 3 計 9
				10×12+20×13	0	
				5×5+10×5+15×5+20×5+25×5	0+15+30+45+60	

※埋込長、埋込角度は図-5 を参照



図－5 繊維の配置ならびに凡例

組合せ)を作製した。試験 D における繊維の配置ならびに凡例を図－5 に示す。繊維が供試体の外に出るのを防ぐため、埋込角度が大きい繊維はスポンジの中心付近に配置した。

(3) 付着試験方法

付着試験では、供試体を引張載荷試験機に設置し、高感度変位計を取付け、供試体中央部の開き（繊維の引抜量）を計測した。供試体掴み具間の変位速度が毎秒 0.05～0.1mm 程度となるように載荷した。

繊維へのダメージを防ぐため、脱型直後に供試体中央部の 4 側面に養生テープを貼って固定した。載荷試験時にテープを剥がす際に、供試体がしっかり固定されていたことを確認した。

2.3 繊維補強コンクリートの引張試験

表－1 の「繊維補強コンクリート」の配合を使用し、付着試験で用いるものと同じ形状寸法のダンベル型供試体（図－1）を 3 個作製した。

引張試験では、付着試験と同様に、ダンベル型供試体を引張載荷試験機に設置し、供試体に取り付けた高感度変位計により、検長区間（80mm）の変形を計測した。

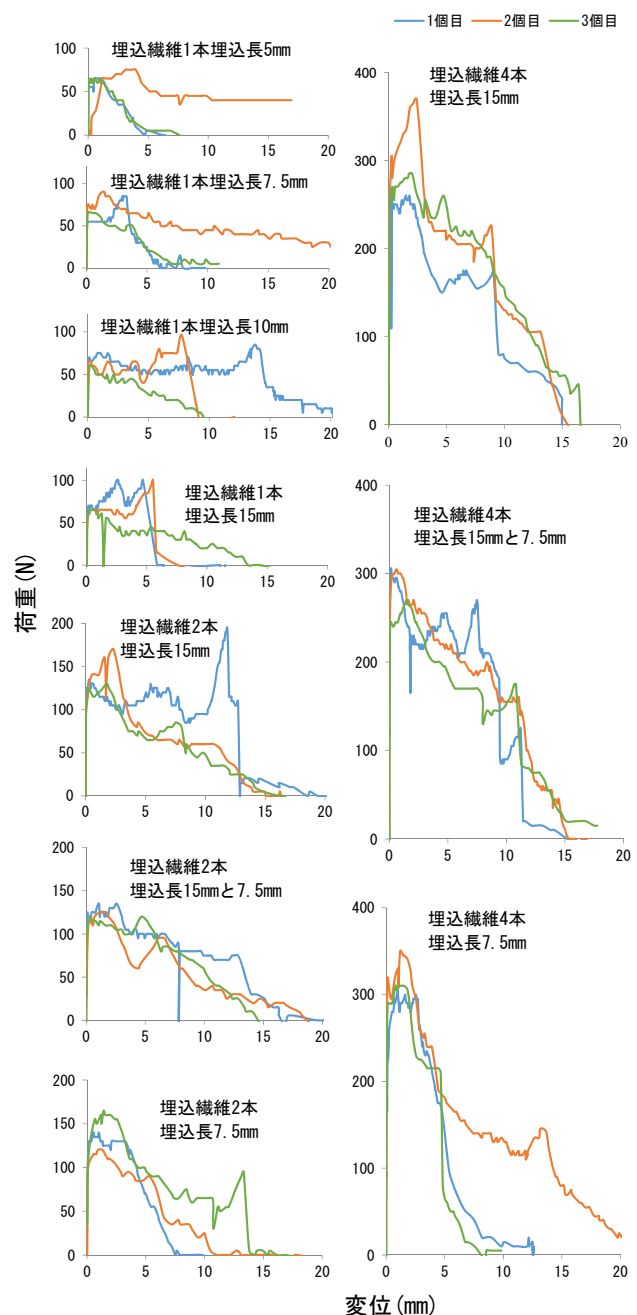
3. 結果と考察

3.1PVA 繊維の付着試験の結果

付着試験用ダンベル供試体では、前述のように 2 回に分けてコンクリートを打設した。コンクリートの圧縮強度は、試験 A では、70.3N/mm²と 73.4N/mm²、試験 B～D では、59.8N/mm²と 64.2N/mm²、であった。

(1) 試験 A：埋込長の影響²⁾

図－6 に、繊維の埋込角度 0°で、埋込長 5, 7.5, 10, 15mm の場合の荷重引抜曲線を示す。埋込繊維が 1 本の場合、埋込長 5, 15mm の最大荷重はそれぞれ 70, 95N となり、埋込長が大きくなると最大荷重も大きくなった。埋込繊維数が 2 本, 4 本の場合には、最大荷重はそれぞれ 150N, 300N 程度であり、埋込繊維数 1



図－6 埋込角度 0° の各埋込長における荷重引抜曲線²⁾

本の場合の最大荷重（60～90N 程度）に比べ、埋込長の違いによる最大荷重の差は小さかった。一旦荷重が上昇し、その後荷重が 100N 程度急激に低下した場合には、繊維が破断したと判断した。繊維が破断したと考えられるいずれの供試体でも、繊維の破断はマトリックス中で生じており、供試体断面の片側でしか繊維を確認できなかった。

(2) 試験 B：埋込角度の影響²⁾

図-7 に、埋込長を 15mm とし埋込角度を変化させて行った付着試験の荷重引抜曲線を示す。各条件 3 個の供試体の結果と、各条件の代表的な結果のものを 1 個ずつ示す。埋込角度 0° の場合、繊維は引き抜けることが多かったが、15°以上の埋込角度では繊維は破断した。埋込角度が 15°～75° の場合の最大荷重は 100N 程度であり、埋込角度 0° の場合と比較して差は見られなかった。埋込角度 15°、30° の場合は、他の埋込角度と比較して僅かではあるが最大荷重が大きくなった。埋込角度 75° の場合は 15°～60° の場合より変位が大きくなった。この原因として 75° の場合には、繊維が破断する前にマトリックスの厚さが薄い部分に欠けが生じるためと考えられる。

(3) 試験 C：繊維長、埋込長の影響

図-8 に、繊維の埋込本数 1 本、埋込角度 0° で、繊維長と埋込長を変えた場合の荷重引抜曲線を示す。繊維長 30mm で埋込長 15mm の供試体の最大荷重は 102N であり、繊維長 20mm で、埋込長 5mm の場合の最大荷重は 72N、埋込長 10mm の場合の最大荷重は 80N となった。これらの結果は、試験 A の結果（図-6）と同じく、最

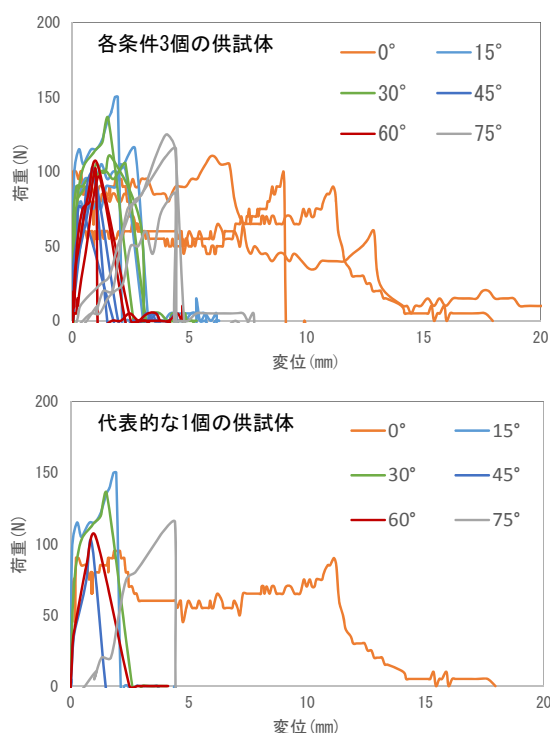


図-7 埋込角度 0° ～75° の荷重引抜曲線²⁾

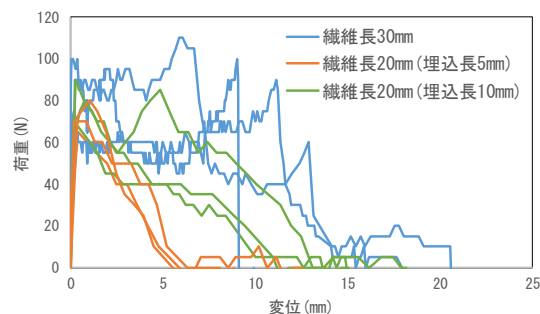


図-8 埋込繊維本数 1 本、埋込角度 0° で繊維長と埋込長を変化させた荷重引抜曲線

大荷重は繊維の短い方の埋込長に支配され、繊維長の影響は認められなかった。

(4) 試験 D：繊維本数、埋込長、埋込角度の影響

図-9 に繊維の埋込本数が複数本（9 本、16 本、25 本）の場合の荷重引抜曲線を示す。この図では、埋込角度 0°、埋込長 15mm の荷重引抜曲線を青色、埋込角度 0°、埋込

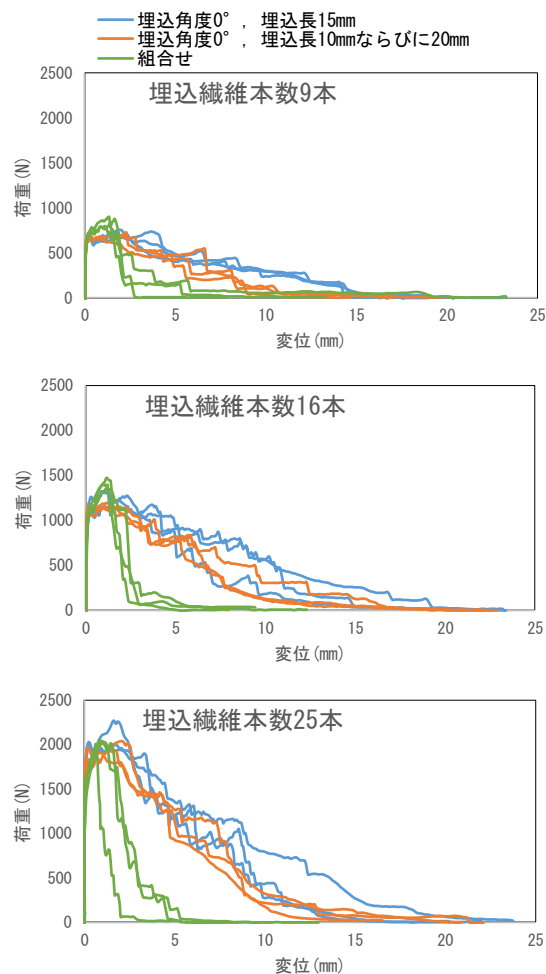


図-9 繊維の埋込本数が複数本（9 本、16 本、25 本）の場合の荷重引抜曲線

長 10mm ならびに 20mm を橙色，埋込角度と埋込長を組合せたもの（以下，組合せ）を緑色で示す。

埋込角度 0°（フィルムに直角）で繊維を配置した場合，繊維が 1 本のときの最大荷重（約 100N）に比べ，埋込繊維本数が複数本（9 本，16 本，25 本）のときには，いずれの条件においても 1 本当たりの最大荷重は 80N 程度で小さかった。

繊維の埋込本数 9 本，16 本の場合，組合せの最大荷重は，埋込角度 0°の場合の最大荷重よりも少し大きくなったが，埋込繊維本数 25 本の場合には，同程度であった。

（5）繊維引抜エネルギーと繊維引抜長

繊維の付着試験で得られる荷重引抜曲線下の面積（靱性）の大部分は，繊維の引抜に使われたエネルギー（以下，繊維引抜エネルギー）である。繊維長が 30mm で，埋込繊維本数が 1 本の場合（図-8）と，9 本，16 本，25 本の場合（図-9）の繊維引抜エネルギーを表-3 に示す。

埋込繊維本数が 9 本，16 本，25 本の場合，繊維引抜エネルギーは埋込角度 0°で埋込長 15mm のとき最大となり，組合せのときに最小となった。組合せのときに繊維引抜エネルギーが小さくなった理由として，繊維埋込角度があるため破断しやすく，引抜量が小さくなったためと考えられる。

表-3 から，埋込角度 0°で埋込長 15mm の場合，繊維引抜エネルギーを埋込繊維本数で除した値は，繊維の埋込本数が 9，16，25 本と増えても同程度であった。埋込角度 0°で埋込長 10mm ならびに 20mm の場合も同様であった。しかし，組合せの場合には，繊維の埋込本数が増

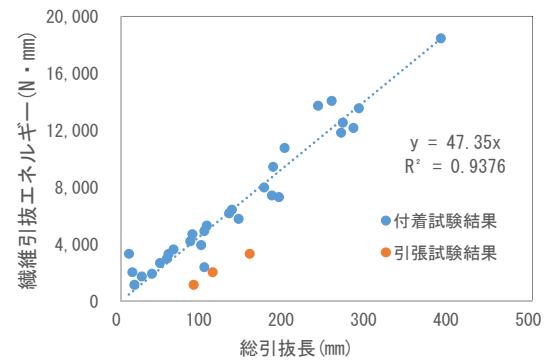


図-10 総引抜長と繊維引抜エネルギーとの関係

えると，埋込角度 0°の繊維の割合が小さくなるため，繊維引抜エネルギーを埋込繊維数で除した値は，小さくなった。

表-4 に，付着試験後の断面（供試体中央部の 2 面）に現れている繊維の長さの合計（総引抜長）を示す。いずれの繊維埋込本数の場合でも，総引抜長の平均は，埋込角度 0°で埋込長 15mm のときが最も大きく，組合せでは最も小さかった。

総引抜長 (x) と繊維引抜エネルギー (y) との関係を図-10（青色）に示す。総引抜長と繊維引抜エネルギーの間には，高い相関 ($y=47x$, $R^2=0.94$) があることが分かる。

3.2 繊維補強コンクリートの引張試験の結果

長さ 30mm の PVA 繊維を 1% 混入した繊維補強コンクリート（圧縮強度：71.6 N/mm²）で作製したダンベル型供試体の荷重変位曲線を図-11 に，最初（＝最大）と 2

表-3 繊維引抜エネルギー（N・mm）

	埋込繊維 本数 1 本	埋込繊維本数 9 本			埋込繊維本数 16 本			埋込繊維本数 25 本			繊維を 1% 混入した 繊維補強コンクリート
	埋込長 15mm	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	
1 個目	3320	6176	3940	3304	7970	7298	2672	13710	13540	4923	3320
2 個目	1146	6415	4696	1931	10740	9426	3624	18440	12520	5301	1146
3 個目	2034	5777	4202	1741	11820	7411	2980	14060	12160	2381	2034
平均	2166	6123	4279	2325	10180	8045	3092	15400	12740	4202	2167
平均/ 繊維 本数	-	680.3	475.5	258.4	636.0	502.8	193.3	616.0	509.6	168.1	62.40

表-4 総引抜長（mm）

	埋込繊維 本数 1 本	埋込繊維本数 9 本			埋込繊維本数 16 本			埋込繊維本数 25 本			繊維を 1% 混入した 繊維補強コンクリート
	埋込長 15mm	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	埋込長 15mm	埋込長 10mm ならびに 20mm	組合せ	
1 個目	10.0	132	97.5	58.0	174	192	47.5	240	289	102	157
2 個目	16.5	135	87.0	38.0	199	185	64.0	389	270	105	88.5
3 個目	14.0	143	84.5	25.5	268	184	56.0	256	283	102	112
平均	13.5	137	89.7	40.5	214	187	55.8	295	280	103	119

番目のピーク引張荷重，破断面に観察された繊維の総本数，総引抜長ならびに繊維引抜エネルギー（≒荷重引抜曲線下の面積）を表－5 に示す。最初のピーク引張荷重は主にマトリックスコンクリートの引張抵抗によるものであり，2 番目のピーク引張荷重は，ひび割れ部では繊維の抵抗によるものである。

2 番目のピーク引張荷重は，繊維本数が多いと大きく，繊維 1 本当たりの荷重は約 90N となり，付着試験で得られる値と同程度であった。また，総引抜長が長いものは繊維引抜エネルギーが大きくなった。総引抜長と繊維引抜エネルギーとの関係を図－10（橙色）に示す。付着試験結果（青色）に比べ，引張試験結果（橙色）では，総引抜長に対応する繊維引抜エネルギーが 1/3～1/2 と小さかった。この理由として，複数本が集まった繊維や型枠付近にある繊維では，繊維引抜エネルギーが小さくなることなどが考えられる。埋込繊維本数 25 本で組合せの付

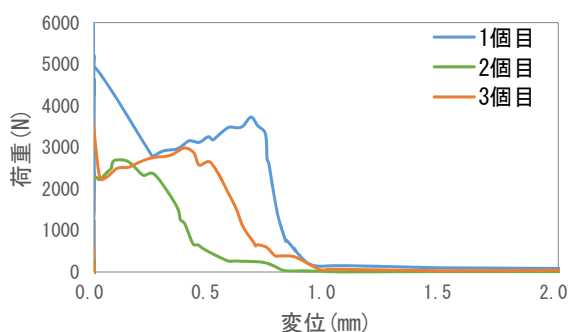


図-11 PVA 繊維を 1%混入した繊維補強コンクリートの荷重変位曲線

表-5 PVA 繊維を 1%混入した繊維補強コンクリートの引張試験結果

	最大引張荷重 (N)	2 番目のピーク引張荷重 (N)	繊維の総本数 (本)	総引抜長 (mm)	繊維引抜エネルギー (N・mm)
1 個目	6220	3730	38	157	3320
2 個目	2690	2690	30	88.5	1146
3 個目	3975	2985	33	112	2034
平均	4295	3135	34	119	2167

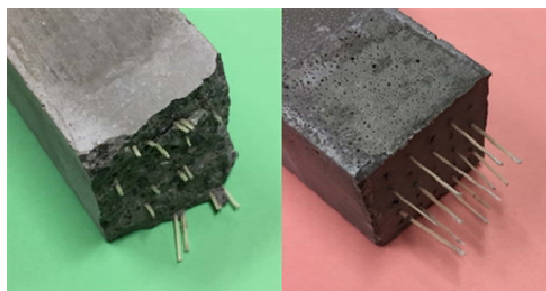


図-12 引張試験後のダンベル型供試体の断面（左）と付着試験後のダンベル型供試体の断面（右）

着試験（図－9）では，変位 2～5mm 程度まで荷重を検出できたのに対して，引張試験（図－11）では 3 個の供試体とも変位 1mm 程度までしか荷重を検出できなかった。この理由として，引張試験供試体の場合，繊維の配向方向がランダムであり，引抜けやすい引張方向の繊維本数が少なく，引抜量が小さいことが考えられる。参考として，図－12 に引張試験後のダンベル型供試体と，付着試験後のダンベル型供試体の断面の写真を示す。

4. おわりに

本研究においては，ダンベル型引張供試体を用いて太径の PVA 繊維とマトリックスとの付着試験を行い，繊維の付着性能に及ぼす繊維の埋込長（5～15mm），角度（0～75°）ならびに本数（1～25 本）の影響を，繊維の引抜や破断，最大荷重，繊維引抜エネルギーなどに関連づけて明らかにした。PVA 繊維を体積で 1%混入した繊維補強コンクリートの引張試験の結果と付着試験の結果とを比較した。

- (1) 付着試験において，繊維の埋込角度が 0°の場合，繊維の引抜け時の最大荷重は，埋込長が大きくなると大きくなり，繊維長の影響は認められなかった。
- (2) 付着試験において，繊維の埋込本数が 1 本の場合，埋込角度が変わっても，最大荷重は 100N 程度であった。埋込本数が複数本（9～25 本）の場合，繊維 1 本当たりの最大荷重は，80N 程度となった。
- (3) 付着試験において，繊維引抜エネルギー（≒荷重引抜曲線下の面積，靱性）と総引抜長との間には高い相関が認められた。
- (4) PVA 繊維を 1%混入した繊維補強コンクリートの引張試験において，繊維の抵抗による 2 番目のピーク引張荷重から求めた繊維 1 本当たりの荷重は約 90N となり，付着試験で得られる値と同程度であったが，繊維の総引抜長に対応する繊維引抜エネルギーは付着試験で得られる値よりも小さかった。

参考文献

- 1) 複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー127，土木学会，2007.
- 2) 米山翔太，坂井悟，小島巧，小林孝一，六郷恵哲：PVA 太径短繊維の埋込長や角度が繊維補強コンクリートの引張性能に及ぼす影響，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 16 巻，pp.461-466，2016.
- 3) 宮澤聡，坂井悟，草野昌夫，上原伸郎：短繊維補強コンクリートの大型プレキャスト無筋コンクリート製品への適用に関する研究，コンクリート工学論年次文集，Vol.37，No.1，pp.247-252，2015.