論文　各種繊維の混入が高強度フライアッシュモルタルの力学的特性に及ぼす影響

松下　拓樹[*1]・横山　和昭[*2]・鈴木　正範[*3]・徳光　卓[*4]

要旨：近年，輪荷重による橋梁床版コンクリートの骨材化や橋面に散布された凍結防止剤の浸透などに伴うコンクリート床版の劣化が顕在化している。このような劣化はコンクリート表面から進行するため，補修にあたって緻密な薄板プレキャストコンクリート板をコンクリート表面に配置することは有効と考えられる。同様の工法および材料は種々開発されているが，筆者らは繊維を混入した高強度フライアッシュモルタル板の利用を考えている。本研究では代表的な 3 種類の繊維を用い，補強繊維の違いによる物理的特性の差の確認を行い，鋼繊維の優位性を確認した。

キーワード：フライアッシュ，繊維混入モルタル，力学的特性，高強度コンクリート

1. はじめに

近年，高度成長期に建設されたコンクリート床版の劣化が顕在化しており，一部には更新の時期を迎えたものもある。しかし，更新を迎えた構造物であっても，更新を一度に行うことは不可能であるため，補修により延命化する必要がある。劣化のうちコンクリート表面から進行する劣化に対して，コンクリートの表層を緻密な部材で置き換えることは劣化の抑制に有効であり，古くからポリマー含浸コンクリートの研究や実用化が図られている[1)]。筆者らは表層の補修に比較的安価で耐久性の高い高強度フライアッシュモルタル板を使用する工法を考案した。本研究では，ひび割れ抵抗性の向上や変形に対する追従を目的として，おのおの鋼繊維 1 種類，有機繊維 2 種類（ビニロン繊維とポリプロピレン繊維）を高強度フライアッシュモルタルに混入し物理的特性を確認した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

(1) 使用材料および繊維

試験に使用した材料を**表－1** に示す。セメントは JIS R 5210 の早強ポルトランドセメントを使用し，混和材として JIS A 6210 のフライアッシュⅡ種（苓北発電所産）を使用した。

使用した繊維を**表－2**，**表－3** に示す。繊維の選定は，繊維の入手のしやすさや繊維の投入の容易さ，特別な保護具を必要としない等の取扱いの容易さ，また，繊維混入後のモルタル価格が無補強のモルタル価格の 3 倍以下となるように考慮した。鋼繊維(以下，SF と略す)は 1 種類とした。SF は繊維の端部をフック状に加工することで繊維の引抜き抵抗性を高め，また，繊維束状にまとめることで練混ぜを容易にした汎用品である。有機繊維はビニロン(以下，PVA と略す)とポリプロピレン(以下，PP と略す)の 2 種類を用いた。PVA は有機繊維の中では比較的引張強度が高く，セメントとの親和性がよくモルタルとの付着力に優れるとされる。PP は近年コンクリートのひび割れの抑制を目的に使用されており，本実験では繊

表－1　使用材料

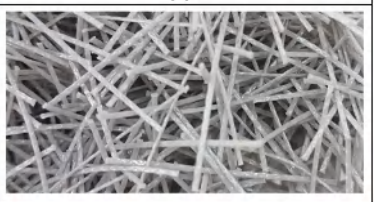
種類	記号	密度 (g/cm³)	備考
水	W	1	地下水
セメント	C	3.14	早強ポルトランドセメント (比表面積：4,430cm²/g, 強熱減量：1.46%)
混和材	FA	2.28	フライアッシュⅡ種 (比表面積：3,870 cm²/g, 強熱減量：1.40%, フロー値比：107%, 活性度指数：材齢 28 日　89%, 材齢 91 日　100%)
細骨材①	S1	2.61	除塩海砂 (吸水率：1.12%，粗粒率：2.16)
細骨材②	S2	2.68	硬質砂岩　砕砂 (吸収率：0.86%，粗粒率：2.73)
混和剤①	SP1	1.06	ポリカルボン酸系高性能減水剤
混和剤②	SP2	1.05	ポリカルボン酸系高性能減水剤
消泡剤	RE	1.07	空気量調整剤
鋼繊維	SF	7.85	汎用品，束状
有機繊維①	PVA	1.3	ビニロン
有機繊維②	PP	0.91	ポリプロピレン

表－2　使用繊維

種類	SF	PVA	PP
材質	鋼	ビニロン	ポリプロピレン
密度(g/cm³)	7.85	1.3	0.91
引張強度(N/mm²)	1,080	900	500
繊維長(mm)	30	30	30
繊維径(mm)	0.62	0.6	1.0
アスペクト比	48	50	30

*1 (株)富士ピー・エス　技術本部土木技術開発グループ　（正会員）
*2 西日本高速道路(株)中国支社　改築事業部技術計画課課長　工博　（正会員）
*3 西日本高速道路エンジニアリング中国(株)　土木事業本部土木保全部副部長　（正会員）
*4 (株)富士ピー・エス　技術本部副本部長　工博　（正会員）

表－3　使用繊維

種類	SF	PVA	PP
写真			

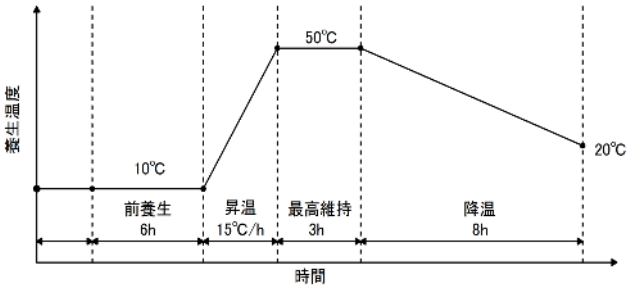
表－4　高強度フライアッシュモルタルの配合

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m³)									
		C	FA	W	S1	S2	SP1	SP2	RE	SF	PVA, PP
無補強	28	529	132	185	744	764	19.83	0	2.644	0	0
SF							0	14.542		117.75	
PVA							19.83	0		0	22.75
PP											13.65

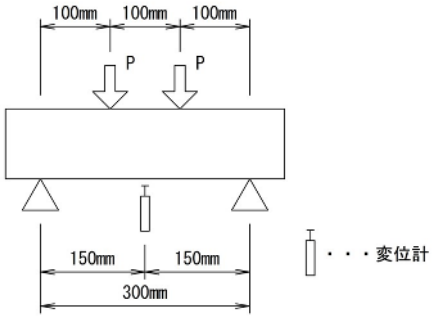
※Bは結合材を示し，結合材とはCとFAの合計とする。

表－5　実験に用いた供試体概要

	円柱供試体	角柱供試体	薄板供試体
形状	φ100×200mm	100mm×100mm ×400mm	250mm×25mm ×700mm
本数	蒸気養生　3本 標準養生　3本	蒸気養生　3体	蒸気養生　3体



図－1　蒸気養生のパターン



図－2　角柱供試体の載荷試験図

維の表面を凹凸に加工することでモルタルとの付着性を高めた汎用の製品を用いた。

本試験で使用したモルタルの配合を**表－4** に示す。使用したモルタルは W/B を 28%とし設計強度は 70N/mm² とした。フライアッシュは容積比でセメントの 20%を内割置換した。細骨材は海砂と砕砂の 2 種類を 1 : 1 でブレンドし使用した。モルタルに混入する繊維の混入方法は外割りとし，混入率は繊維のカタログやメーカーへのヒアリング結果を参考にして，モルタルに対する容積比で SF は 1.5%，PVA は 1.75%，PP は 1.5%とした。減水剤はモルタルの粘性の調整を行うために，減水率の異なる 2 種類を使用した。また，比較のためモルタルに繊維を混入しない配合(以下，無補強と略す)についても試験した。

(2) 供試体製作および養生

実験に用いた供試体の概要を**表－5** に示す。供試体は円柱供試体を養生条件別に 3 体，角柱供試体および薄板供試体を 3 体作製した。円柱供試体と角柱供試体の寸法は JIS A 1132 に則り決定した。薄板供試体の寸法は想定される構造物の鉄筋の純かぶり以下とするため厚さを 25mm とした。

フライアッシュモルタル板の製造は工場製作を想定している。蒸気養生のパターンを**図－1** に示す。蒸気養生の前養生時間はフライアッシュのポゾラン反応を考慮して一般的なコンクリート製品より長い 6 時間とした。標準養生は供試体作製後，材齢 1 日まで 20℃の室内で保管し，その後試験日まで 20℃の水中養生を行った。

2.2 試験方法

(1) 圧縮強度試験

円柱供試体の圧縮強度試験は，繊維長と配向性を考慮し，JIS A 1108 に則り φ100×200mm の供試体を用いて試験を行った。圧縮強度試験は蒸気養生および標準養生のいずれの養生を行った供試体においても材齢 35 日で行った。供試体は各配合とも養生条件ごとに 3 本採取し，3 本の圧縮強度の平均値をその配合の圧縮強度とした。

(2) 角柱供試体の曲げ試験

角柱供試体の載荷図を**図－2** に示す。角柱供試体の曲げ強度試験は，繊維長と配向性と考慮し，JIS A 1106 : 2006 に則り 100×100×400mm の供試体を用い，支点間距離を 300mm とした 3 等分点載荷で行った。曲げじん性試験の載荷速度は JSCE G 552:2013 に準拠した。角柱供試体の載荷時の変位の測定は支間中央の供試体下面で行った。角柱供試体の曲げ試験は材齢 35 日で行った。曲げ強度および曲げじん性係数は式(1)，式(2)により求めた。

$$\sigma_b = \frac{Pl}{bh^2} \tag{1}$$

ここに，σ_b : 曲げ強度(N/mm²)

P : 最大荷重(N)

l : 支間長(mm)

表－6　各配合の強度試験結果の平均値および供試体破壊時の繊維の状態

配合名	圧縮強度試験		角柱供試体の曲げ試験			薄板供試体の曲げ試験			
	JIS A 1108		JIS A 1106	JSCE G 552(一部準拠)	供試体破壊時の主な繊維の状態	JSCE G 552(一部準拠)			供試体破壊時の主な繊維の状態
	圧縮強度 (N/mm^2)		曲げ強度 (N/mm^2)	曲げじん性係数 (N/mm^2)		曲げ強度 (N/mm^2)	曲げじん性係数A (N/mm^2)	曲げじん性係数B (N/mm^2)	
	蒸気養生	標準養生		たわみが支間長/150になるまで考慮			たわみが支間長/150になるまで考慮	たわみが3cmになるまで考慮	
無補強	87.9	78.1	10.1	0.85	－	8.74	1.0	0.11	－
SF	92.4	90.4	13.7	9.5	破断と引抜けが混在	13.9	9.2	6.2	引抜け
PVA	84.9	85.6	9.65	6.4	破断	7.44	3.4	0.71	破断
PP	77.0	81.8	9.97	6.1	引抜け	8.32	2.9	2.5	引抜け

b：断面の幅(mm)

h：断面の高さ(mm)

$$\overline{\sigma_b} = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \times \frac{l}{bh^2} \qquad (2)$$

ここに，$\overline{\sigma_b}$：曲げじん性係数(N/mm^2)

T_b：δ_{tb} までの荷重-たわみ曲線の面積(N･mm)

δ_{tb}：支間長の 1/150 のたわみ(mm)

l：支間長(mm)

b：断面の幅(mm)

h：断面の高さ(mm)

(3) 薄板供試体の曲げ試験

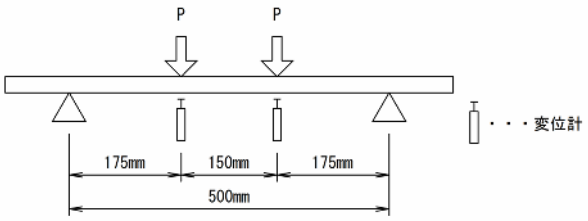
薄板供試体の載荷要領を**図－3** に示す。薄板供試体の曲げ強度試験および曲げじん性試験は共に JSCE G 552:2013 の載荷速度および計算式に準拠した。曲げ試験は支点間距離を 500 ㎜とし，載荷点間を 150 ㎜とした 2 点載荷で行った。薄板供試体の曲げ試験は材齢 35 日で行った。薄板供試体の載荷時の変位の測定は供試体の載荷点位置で行った。薄板供試体の曲げ強度および曲げじん性係数の計算式は角柱供試体と同様の式(1), 式(2)を用いた。本試験では標準のδ_{tb}を用いた曲げじん性係数(以下，曲げじん性係数 A と呼ぶ)に加えて，大変位時の曲げじん性を評価するため，δ_{tb}を標準である支間長の 1/150（3.333mm）の約 10 倍に相当する 3cm とした曲げじん性係数(以下，曲げじん性係数 B と呼ぶ)も合わせて算出した。

3. 試験結果

本試験で得られた各配合の強度試験結果の平均値および供試体破壊時の繊維の状態を**表－6** に示す。

3.1 フレッシュモルタルの性状試験

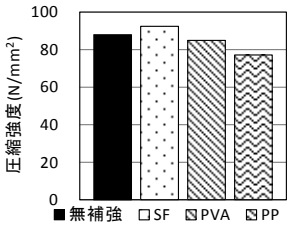
フレッシュモルタルの性状を**表－7** に示す。スランプフローについて無補強と繊維を混入した配合を比較すると，いずれの繊維を混入した配合でも 10%程度スランプフローが低下した。同様に空気量について無補強と繊維を混入した配合を比較すると，同じ減水剤を使用した PVA と PP は無補強よりも 20%程度減少し，種類の異なる減水剤を使用した SF は無補強よりも 40%程度減少した。フレッシュモルタル時の繊維の分散状況は多少の繊維の偏りが発生した配合もあるが，いずれの配合においてもファイバーボールが無く比較的良好であった。



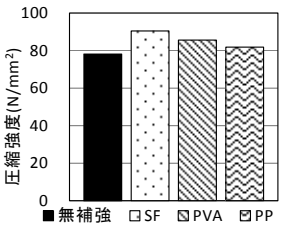
図－3　薄板供試体の裁荷試験図

表－7　各配合のフレッシュモルタルの性状

配合名	スランプフロー (cm×cm)	空気量 (%)	繊維の分散状況
無補強	74.5×75.5	4.3	－
SF	68.0×69.0	2.7	モルタル内に均等に分散
PVA	65.0×68.0	3.6	多少の繊維の偏りが生じた
PP	67.5×69.0	3.5	多少の繊維の偏りが生じた



図－4　蒸気養生



図－5　標準養生

3.2 圧縮強度試験

圧縮強度試験結果を**図－4**, **図－5** に示す。無補強の圧縮強度は蒸気養生と標準養生共に 80N/mm^2 程度となった。蒸気養生を行った供試体の圧縮強度を繊維を混入した供試体と無補強の供試体で比較すると，無補強に対してして SF は 5%程度増加し, PVA はほぼ同等, PP は 10%程度低下した。標準養生を行った供試体の圧縮強度を繊維を混入した供試体と無補強の供試体で比較すると，無補強に対して SF は 10%程度増加し，PVA および PP は 5%程度増加した。

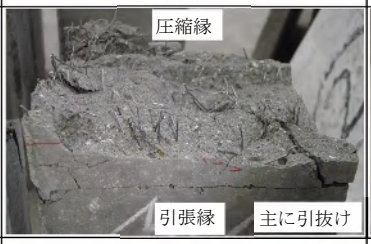
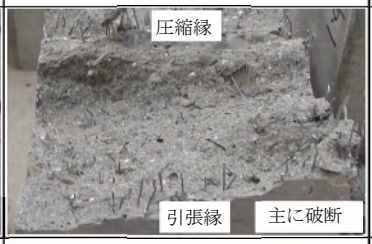
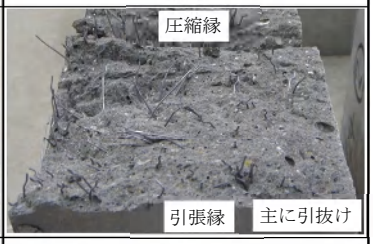
3.3 角柱供試体の曲げ試験

角柱供試体の曲げ試験結果を**表－8**, 代表的な供試体の荷重-たわみ曲線を**図－6** に示す。

(1) 曲げ強度

角柱供試体の曲げ強度試験結果を**図－7** に示す。繊維を混入した供試体と無補強の供試体の曲げ強度を比較す

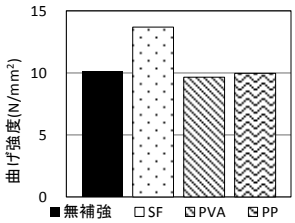
表－9　SF を混入した角柱供試体断面

種類	No.1	No.2	No.3
写真			
曲げ強度 (N/mm²)	15.0	14.6	11.5
曲げじん性係数 (N/mm²)	9.7	10.5	8.5

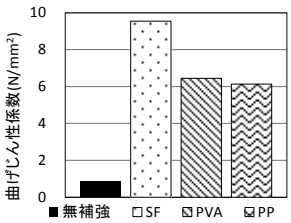
表－8　角柱供試体の曲げ試験結果

配合名	No	曲げ強度 (N/mm²)		曲げじん性係数 (N/mm²)		供試体破壊時の主な繊維の状態
無補強	1	10.8	10.1	0.94	0.85	－
	2	10.2		0.90		－
	3	9.37	(1.00)	0.72	(1.00)	－
SF	1	15.0	13.7	9.7	9.5	引抜け
	2	14.6		10.5		破断
	3	11.5	(1.36)	8.5	(11.2)	引抜け
PVA	1	9.22	9.65	6.0	6.4	破断
	2	10.4		6.6		破断
	3	9.30	(0.97)	6.7	(7.53)	破断
PP	1	10.0	9.97	6.3	6.1	引抜け
	2	10.1		6.2		引抜け
	3	9.73	(0.99)	5.9	(7.18)	引抜け

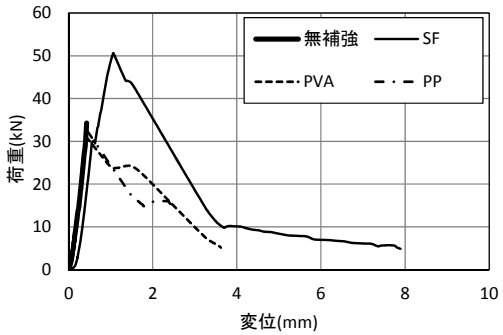
※・・・( )内の数値は無繊維に対する比率を示す。



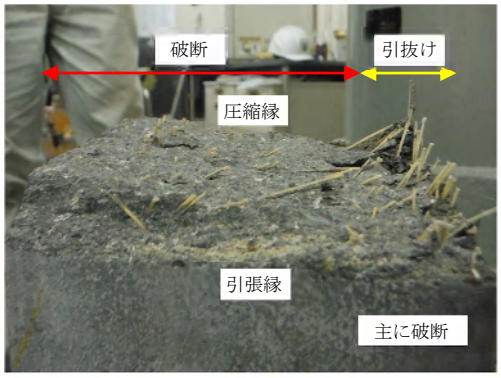
図－7　曲げ強度



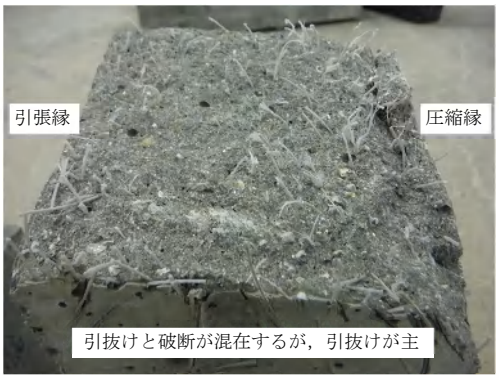
図－8　曲げじん性係数



図－6　角柱供試体の代表的な荷重-たわみ曲線



写真－1　PVA を混入した角柱供試体の代表的な断面



写真－2　PP を混入した角柱供試体の代表的な断面

ると，無補強よりも SF は 35%程度増加し，PVA および PP はほぼ同等となった。

(2) 曲げじん性係数

角柱供試体の曲げじん性試験結果を**図－8** に示す。無補強の供試体と繊維を混入した供試体の曲げじん性係数を比較すると，無補強よりも SF が 11 倍程度増加し，PVA および PP は 7 倍程度増加した。

(3) 角柱供試体の断面の観察

SF の角柱供試体の断面を**表－9**，PVA および PP の角柱供試体の断面を**写真－1**，**写真－2** に示す。角柱供試体の破壊断面に突出している繊維の状態を観察すると，SF は破壊断面に突出する繊維の状態が供試体毎に異なり，繊維の破断が主であった供試体が 1 体(No.2)，残りの 2 体(No.1，3)の供試体は引抜けが主であった。PVA は供試体の断面に突出する繊維の状態は破断が主であり，PP では供試体の破壊断面に突出している繊維の状態は引抜けが主であった。

3.4 薄板供試体の曲げ試験

薄板供試体の曲げ試験結果を**表－10**，荷重-たわみ曲線を**図－9** に示す。

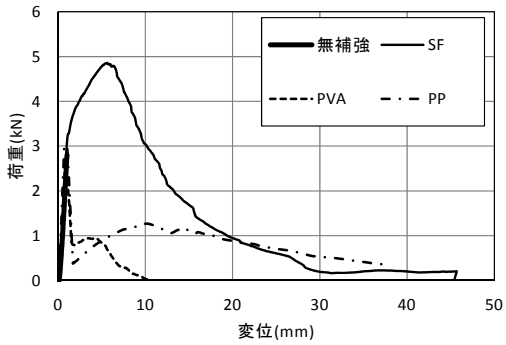
(1) 曲げ強度

薄板供試体の曲げ強度試験結果を**図－10** に示す。繊維

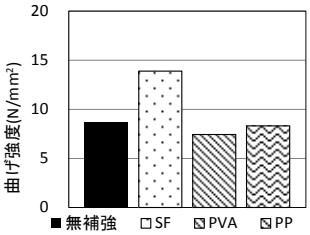
表－10　薄板供試体の曲げ試験結果

配合名	No	曲げ強度 (N/mm^2)		曲げじん性係数A (N/mm^2)		曲げじん性係数B (N/mm^2)		供試体破壊時の主な繊維の状態
無補強	1	6.48		0.59		0.065		－
	2	9.17	8.74	1.1	1.0	0.124	0.11	－
	3	10.6	(1.00)	1.4	(1.00)	0.155	(1.00)	－
SF	1	15.4		9.7		6.6		引抜け
	2	13.4	13.9	9.0	9.2	7.1	6.2	引抜け
	3	12.8	(1.59)	8.8	(8.84)	4.9	(53.93)	引抜け
PVA	1	5.90		3.0		0.65		破断
	2	8.25	7.44	3.4	3.4	0.71	0.71	破断
	3	8.18	(0.85)	3.8	(3.26)	0.78	(6.22)	破断
PP	1	8.63		3.3		2.71		引抜け
	2	7.64	8.32	2.3	2.9	1.99	2.5	引抜け
	3	8.69	(0.95)	3.2	(2.81)	2.71	(21.54)	引抜け

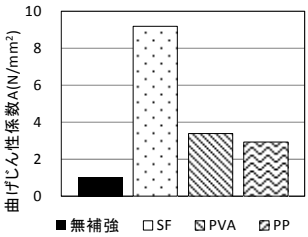
※・・・( )内の数値は無繊維に対する比率を示す。



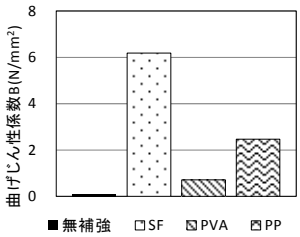
図－9　薄板供試体の代表的な荷重-たわみ曲線



図－10　曲げ強度



図－11　曲げじん性係数 A



図－12　曲げじん性係数 B

を混入した供試体と無補強の供試体の曲げ強度を比較すると，繊維を混入した供試体の曲げ強度が増加した。また，無補強の供試体に対する繊維の混入による曲げ強度の増加傾向は角柱供試体と同様であった。薄板供試体による SF の曲げ強度は 14N/mm^2 程度であり角柱供試体と同等であったが，無補強，PVA および PP の薄板供試体の曲げ強度は 8N/mm^2 程度となり，角柱供試体よりも 2N/mm^2 程度低下した。

(2) 曲げじん性係数

薄板供試体の曲げじん性係数 A を**図－11**，曲げじん性係数 B を**図－12** に示す。繊維を混入した供試体の曲げじん性係数 A は無補強に比較して SF は 9 倍程度増加し，PVA および PP は 3 倍程度増加した。配合別に角柱供試体の曲げじん性係数と薄板供試体の曲げじん性係数 A を比較すると，無補強と SF は角柱供試体の曲げじん性係数と薄板供試体の曲げじん性係数 A がほぼ同等であったが，PVA と PP の薄板供試体の曲げじん性係数 A は角柱供試体の曲げじん性係数の約半分であった。同様に曲げじん性係数 B について比較すると，無補強に比較して SF は 50 倍程度，PVA は 6 倍程度，PP は 20 倍程度増加した。

4. 考察

4.1 力学的特性

(1) 圧縮強度

繊維の混入が圧縮強度へ与える影響は繊維の種類によって異なった。SF の圧縮強度はいずれの養生条件においても無補強より増加した。有機繊維混入時の圧縮強度は，PVA，PP のいずれも蒸気養生では無補強と同等，もしくは低下し，標準養生では無補強よりも増加した。有機繊維混入時に圧縮強度が低下した原因は明確ではないが，圧縮荷重の作用時にモルタル内の有機繊維の面で滑りが生じ，破壊が進行した可能性が考えられる。

本研究で対象とする高強度フライアッシュモルタル板は工場での蒸気養生を用いた製造を考えているため，蒸気養生により圧縮強度が低下しないことが望ましい。そのため，繊維を混入した高強度フライアッシュモルタルの圧縮強度を確保する面では SF が高強度フライアッシュモルタルの補強に適していると考えられる。

(2) 曲げに関する特性

試験に用いた繊維毎に曲げ特性をみると，SF は曲げ強度，曲げじん性係数，曲げじん性係数 A，B ともに，無補強に比べて大きく，有機繊維である PVA と PP に比べても大きくなった。PVA は曲げ強度が無補強の 90%程度まで低下したが，曲げじん性係数と曲げじん性係数 A，B はともに改善した。PP は曲げ強度が無補強と同等であったが，曲げじん性係数と曲げじん性係数 A，B はともに改善した。

SF 供試体の曲げ強度と破壊性状について考察する。角柱供試体の破断面の繊維の状態は引抜けと破断が混在した。曲げ強度について比較すると，繊維の破断を生じた No.2 供試体は 14.6N/mm^2 であり，引抜けを生じた No.1 供試体は 15.0N/mm^2 とほぼ同等である。このことから，繊維端部のフック加工による定着を含んだ付着強度と繊維の引張強度が本配合においてはほぼ釣り合った状態にあると考えられる。これを曲げじん性係数についてみる

と，No.2 供試体は 10.5N/mm^2，No.1 供試体は 9.7N/mm^2 となり，繊維が破断した No.2 供試体の方が上回っている。曲げじん性係数に繊維の破断による影響が生じなかった理由は，No.2 供試体は 2mm 以上の変位が生じた際に繊維の破断が生じ，試験体が破壊したためである。

薄板供試体での破壊形態は角柱供試体とは異なり，全て繊維の引抜けとなり破断は生じなかった。薄板供試体で繊維が破断しなかった原因は不明である。しかしながら，**図－9** に示した荷重-たわみ曲線において，最大荷重に達したあとも変位の増加と共に荷重がなだらかに減少しており，薄板供試体においても繊維が有効に機能し，脆性的な破壊形態とならなかった。

次に，有機繊維を用いた供試体の曲げ強度と破壊形態について考察する。角柱供試体，薄板供試体の破断面の繊維の状態は，PVA を用いた供試体では共に破断，PP を用いた供試体では共に引抜けであった。PVA と PP を比較すると，材料の引張強度では PVA が上回り，繊維の混入率も PVA が多かったのに対して，PVA は繊維が破断しており，曲げ強度も低かった。また，薄板供試体でも**図－9** の荷重-たわみ曲線に示したとおり，PVA では最大荷重に達したあとの変位の増分に対する荷重の低下が大きく，変位が 10mm となった時点で耐荷性が失われた。

この理由は明確でないが，PVA はペーストとのなじみが良く，かつ，鋼繊維が破断するほどの付着力を有するモルタルを使用しているため，ほとんど繊維の抜出しを生じず，ひび割れ幅が拡大することで繊維の破断が生じやすくなったと考えられる。一方，PP では**図－9** の荷重-たわみ曲線に示したとおり，最大荷重に達したあとの変位の増分に対する荷重の低下がゆるやかであり，ほぼ一定の付着応力を保持したまま引抜けが生じていると推察される。

(3) プレキャスト板への適用性

本研究の目的である，コンクリートの表層の補修に用いるプレキャスト板への各種繊維の適用性について考察する。プレキャスト板は工場製品を想定しているため，蒸気養生により性能低下しないことが求められる。PVA と PP は圧縮強度が低下するのに対し，SF は増加しており，この点からは補強繊維として SF が優れている。また，曲げなどの作用に対しては，ひび割れを生じにくく，かつ，ひび割れ発生後もできるだけ耐荷性を保持することが求められる。SF は曲げ強度が大きく，薄板供試体ではひび割れ発生後も明らかな曲げ耐力の増加が認められたのに対して，PVA と PP は無補強の供試体に比べても曲げ強度が低下していることから，SF が優れている。さらに，補修対象となるプレキャスト板の背面のコンクリートにひび割れが発生し，経時的にその幅が増加することを想定した場合，比較的大きな変形に対してもできるだけ耐力を保持しつつ変形に追随できることが求められる。この点に関しても，本研究で使用した材料の中では SF が優れている。鋼繊維には強度や形態が異なる種々の材料も存在するが，角柱供試体と薄板供試体の曲げ破壊特性からみて，試験に用いた配合の場合，今回使用した鋼繊維材料は比較的適合性が良いと考えられる。

一方，繊維補強モルタルではモルタル表面に繊維が露出することは避けられない。そのため SF を用いた場合，特に塩化物イオンの作用を受ける環境において鋼繊維の塩害腐食が懸念され，一般環境においても錆汁発生等の美観低下が懸念される。前者に関して，小林らは鋼繊維の混入を行った鉄筋コンクリート梁の 5 年間にわたる海洋暴露試験結果から，鋼繊維の腐食はコンクリートのごく表層にとどまり，内部にある鉄筋は電気化学的機構により腐食から保護されると結論付けている [2)]。また，フライアッシュコンクリートでは塩化物イオン浸透の停滞現象が確認されており [3)]，筆者らが行った研究においても同様の現象を確認している [4)]。これらの既往の研究結果から，プレキャスト板の補強に鋼繊維を用いても構造物の耐久性を低下させることはないと考えられる。美観が問題となる場合は，プレキャスト板の表面に塗装を行うか，腐食を生じにくいステンレス繊維を用いるなどの対応も考えられるが，さらなる研究が必要である。

5. まとめ

本研究では，80N/mm^2 クラスの圧縮強度を持つ高強度フライアッシュモルタルに代表的な 3 種類の繊維を混入し，物理的特性について繊維種別に比較を行った。

本研究の範囲では，補強用の繊維としては鋼繊維が適切であるとの結論が得られた。

参考文献

1) 小林一輔：ポリマー含浸コンクリート，生産研究，Vol.25，No.4，pp.143-147，1973.4
2) 小林一輔，星野富夫，辻恒平：海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果，土木学会論文集，No.414，V-12，pp.195-203，1990.2
3) 高橋佑弥，井上翔，秋山仁志，岸利治：実構造物中のフライアッシュコンクリートへの塩分浸透性状と調査時材齢の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集， Vol.32，No.1，pp.803-808，2010
4) 正木守，徳光卓，橋本紳一郎，渕上翔平：フライアッシュ混和コンクリートの PC 部材への適用性に関する検討，プレストレストコンクリート，Vol.57，No.3，pp.60-67，2015