論文　繊維補強材を用いた軽量骨材コンクリートの適用性に関する基礎的研究

野島　昭二[*1]・小野　聖久[*2]・紫桃　孝一郎[*3]・上平　謙二[*4]

要旨：軽量骨材を用いたコンクリートは，普通コンクリートと比べ引張強度やせん断耐力が低下するため，短繊維で補強して使用する場合がある。この繊維補強軽量コンクリートの配合および力学的性状は，軽量骨材だけでなく繊維の種類や混入率にも影響を受ける。そこで，幾つかの軽量骨材と繊維を組み合わせて，配合試験，強度試験，凍結融解試験などを実施した。その結果，軽量骨材および繊維の種類や混入量による配合時の留意点や，力学的性状に与える特徴などが確認された。

キーワード：軽量コンクリート，短繊維補強材，配合，凍結融解抵抗性

1.　はじめに

近年，良質な天然骨材の枯渇や環境問題の深刻化により，人工軽量骨材の利用が見直されている。軽量骨材を用いたコンクリートは，構造物の死荷重や地震時の慣性力の低減により，建設コストの削減が見込まれる。

しかし，人工軽量骨材を用いたコンクリートは，普通コンクリートに比べ一般的にせん断耐力が低下するため [1)]，繊維補強材を用い補強することが有効であるといわれている [2)]。

そこで，本研究では，人工軽量骨材 3 種類と繊維補強材 3 種類を組み合わせた繊維補強軽量コンクリートの配合試験や強度試験などを行い，基礎的な性状を把握することを目的に試験を行った。

2.　材料および試験方法

2.1　使用材料

本試験で使用した材料を**表－1** に示す。骨材は粗骨材のみ軽量骨材を使用した。使用した軽量骨材は，近年開発された低吸水タイプの軽量骨材ＡおよびＢと，吸水率の高い軽量骨材Ｃである。軽量骨材の品質は，いずれも JIS A 5002 および JSCE-C101 の規格を満足するものであった。

繊維補強材は，非金属繊維として多く使用されているポリビニルアルコール（以下，PVA）とポリプロピレン（以下，PP）を素材とした繊維と，鋼繊維の 3 種類とし，繊維の長さはいずれも 30mm とした。

2.2　配合条件

今回の試験に使用した配合条件を**表－2** に示す。目標強度は，PC 橋の設計基準強度でよく用いられる 40N/mm^2 を考慮して，目標強度を 50N/mm^2 とした。スランプはポンプ圧送や施工性を考えて 12±1cm，空気量は凍結融解抵抗性を考慮して 5.5±0.5%とした。

2.3　試験方法

(1) 材料調整および練混ぜ

細骨材は表乾状態に調整して使用した。軽量骨材は，入荷時の含水状態がそれぞれ異なるため，実施工で使用する場合とあわせる必要がある。そこで，軽量骨材ＡおよびＢは入荷状態のまま使用し，**3.1** に示す初期吸水量（10 分吸水量）分の水量を練混ぜ時に添加した。軽量骨材Ｃは，24 時間以上吸水させた後，表面水をふき

*1　日本道路公団　試験研究所　橋梁研究室　(正会員)
*2　日本道路公団　試験研究所　橋梁研究室　工修　(正会員)
*3　日本道路公団　試験研究所　橋梁研究室室長　(正会員)
*4　プレストレスト・コンクリート建設業協会　工博　(正会員)

表－１　使用材料

		種類	物性値等
ｾﾒﾝﾄ		早強ﾎﾟﾙﾄﾗﾝﾄﾞｾﾒﾝﾄ	密度 3.13g/cm^3
細骨材		陸砂	栃木県鬼怒川水系，表乾密度 2.59 g/cm^3，粗粒率 2.93
粗骨材	A	高強度ﾌﾗｲｱｯｼｭ人工骨材	表乾密度 1.89 g/cm^3，粗粒率 6.45，実積率 61.2%，吸水率 1.3%
	B	堆積粘土系人工骨材	表乾密度 1.17 g/cm^3，粗粒率 6.45，実積率 63.0%，吸水率 2.1%
	C	膨張頁岩系人工骨材	表乾密度 1.59 g/cm^3，粗粒率 6.30，実積率 64.7%，吸水率 29.9%
繊維材	PVA	ﾎﾟﾘﾋﾞﾆﾙｱﾙｺｰﾙ繊維	密度 1.30 g/cm^3，直径 0.66mm，ﾔﾝｸﾞ係数 23kN/mm^2
	PP	ﾎﾟﾘﾌﾟﾛﾋﾟﾚﾝ繊維	密度 0.91 g/cm^3，断面 1.17×0.38mm，ﾔﾝｸﾞ係数 3.7kN/mm^2
	SF	鋼繊維	密度 7.85 g/cm^3，直径 0.6mm，ﾔﾝｸﾞ係数 210kN/mm^2
混和剤		高性能 AE 減水剤	標準形，ﾎﾟﾘｶﾙﾎﾞﾝ酸ｴｰﾃﾙ系化合物
		AE 減水剤	変成ｱﾙｷﾙｶﾙﾎﾞﾝ酸化合物系ｴｰﾃﾙ界面活性剤
水		飲用地下水	

取って使用した。

練混ぜは JSCE-F551 に準拠し，ミキサは 55L 練の二軸強制練ミキサを使用し，１バッチは 40L とした。練混ぜ時間は，ベースコンクリートが 90 秒，繊維投入後 30 秒とした。

(2) フレッシュ性状試験

スランプは JIS A 1101 に, 空気量は JIS A 1116（質量方法）に準拠した。このとき，単位容積質量の算出には，軽量骨材の使用時含水量，初期吸水量を考慮して求めた。

(3) 硬化性状試験

強度試験および凍結融解試験に使用した供試体は，JSCE-F552 に準拠し作成した。締固めはテーブルバイブレータで 10 秒間行い, 翌日脱型後，20℃水中養生で所定の材齢まで養生した。

圧縮強度試験は JIS A 1108，静弾性係数試験は JIS A 1149 に準拠し，変位はコンプレッソメータにより測定した。曲げタフネス試験は，JSCE-G552 に準拠し，たわみ量 5mm まで測定した。また，凍結融解試験は，JIS A 1148 の A 法に準拠し，試験開始は材齢 28 日とした。

3.　配合試験結果

3.1　軽量骨材の初期吸水率

今回使用した軽量骨材は，入荷時の含水状態がそれぞれ異なり, 軽量骨材 A はほぼ絶乾状態, B は気乾状態，C は表乾状態であった。軽量骨材は多孔質であるため，気乾または絶乾状態でコンクリートの練混ぜを行うと，練混ぜ水の一部が軽量骨材に吸水されてしまう。そのため，事前に骨材に吸水する水量を測定しておき，練混ぜ水に加算しておく必要がある。

表－２　配合条件

粗骨材の最大寸法	15mm
繊維補強材の長さ	30mm
スランプ	12±1cm
空気量	5.5±0.5%
目標強度	50N/mm^2
高性能 AE 減水剤	Ｃ×0.9wt.%

測定方法は，以下の手順で行った。

①適当な容器に 20℃の水を溜め, 約 1500g の試料を浸漬し，t 分後に試料を全量取り出し，表面水をふき取り表乾状態の質量 W_1 を測定

②105℃で 24 時間乾燥させ，絶乾質量 W_2 を測定し，式(1)にて t 分浸漬後含水率 Q_t を算出

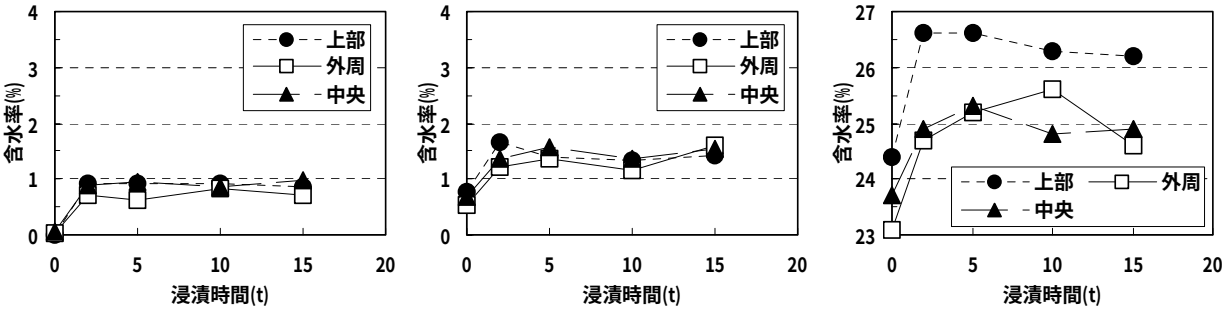
$$Q_t = \frac{W_1 - W_2}{W_2} \times 100 \quad \% \qquad (1)$$

③入荷時含水率 Q_0（水に浸漬せずに測定した含水率）との差を初期吸水率とする

今回の軽量骨材の荷姿は，1m^3 程度のフレキシブルコンテナであり，その上部，外周部，中央部から試料を採取した。浸漬時間と含水率の関係を**図－１**に示す。軽量骨材Ｃは，入荷時の含水状態や初期吸水率に少しばらつきがあるが, A および B はほとんどばらつきはなく，実施工での練混ぜについても，今回同様の方法で問題ないと思われる。

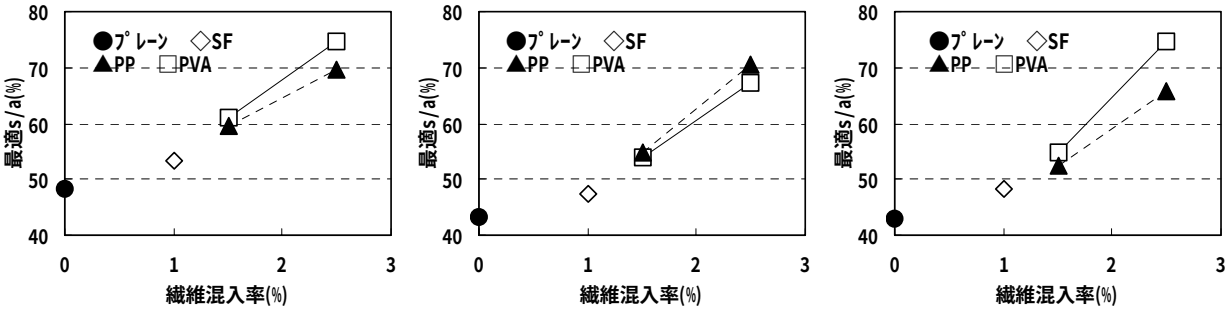
3.2　繊維混入率の影響

普通骨材を使用したコンクリートにおいては,



(a)骨材 A　(b)骨材 B　(c)骨材 C

図－１　軽量骨材の初期吸水率



(a)骨材 A　(b)骨材 B　(c)骨材 C

図－２　繊維混入率が最適 s/a に及ぼす影響

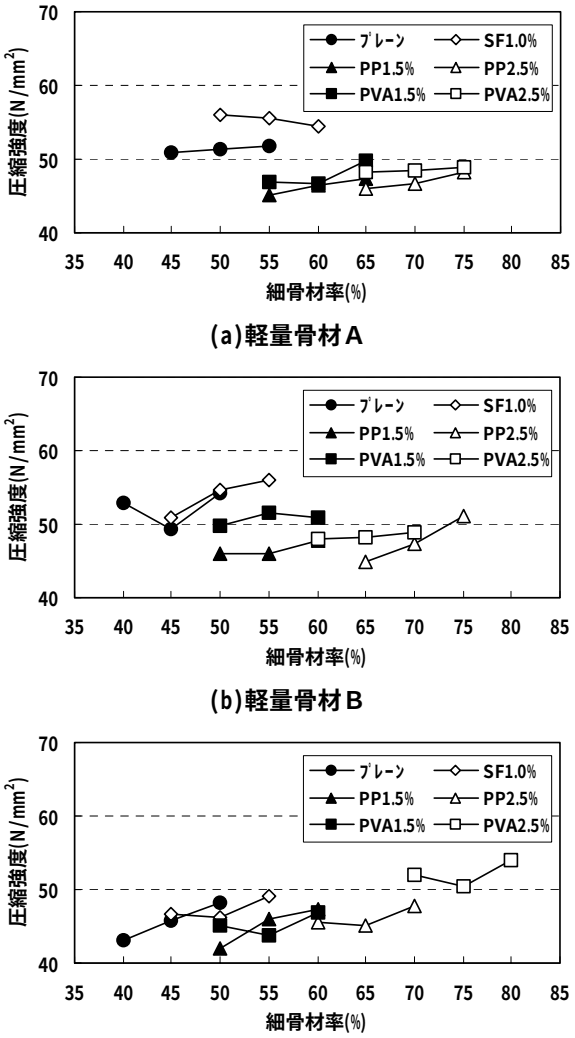
繊維の種類や混入量を変化させても，圧縮強度に及ぼす影響は比較的小さいといわれている。しかし，繊維混入量等の変化により細骨材率が変化するため，本試験のように軽量骨材を使用している場合には，軽量骨材量の変化により圧縮強度が大きく変化することが考えられる。そこで，繊維材の混入量が最適 s/a に及ぼす影響と，それに伴う圧縮強度の変化について確認を行った。

(1) 細骨材率

予備試験の結果を基に軽量骨材ごとに仮定した W/C（A：50%, B および C：45%）において，各繊維の混入量毎に s/a を 3 点以上変化させ，最大となるスランプを二次式で近似して最適 s/a を求めた。各軽量骨材ごとの結果を**図－２**に示す。繊維種類によらず，繊維の混入量が増加するに従い最適 s/a も増加し，今回の配合条件では，繊維の混入率が 2.5%で最適 s/a が約 70%であった。

(2)圧縮強度

(1)における細骨材率を変化させた場合の,圧縮強度の変化について**図－３**に示す。本試験では，意図的に細骨材率を変化させているため，

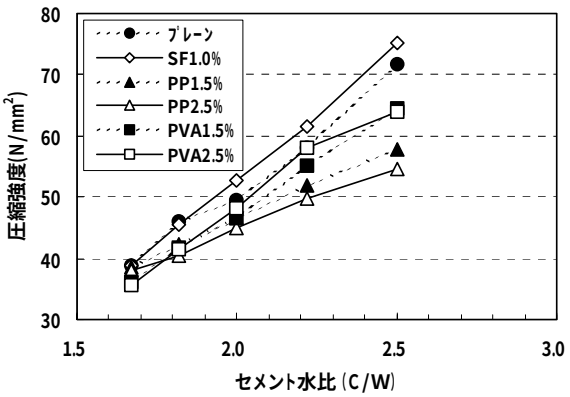


(a)軽量骨材A

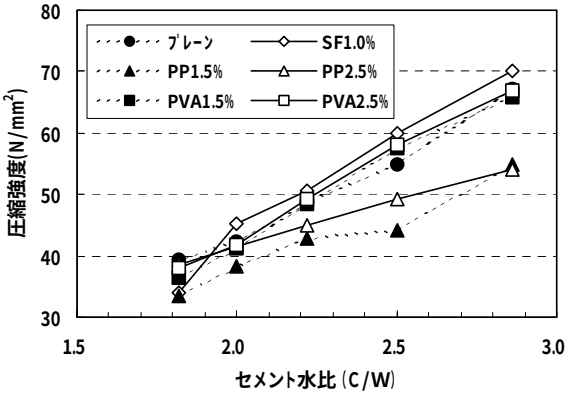
(b)軽量骨材B

(c)軽量骨材C

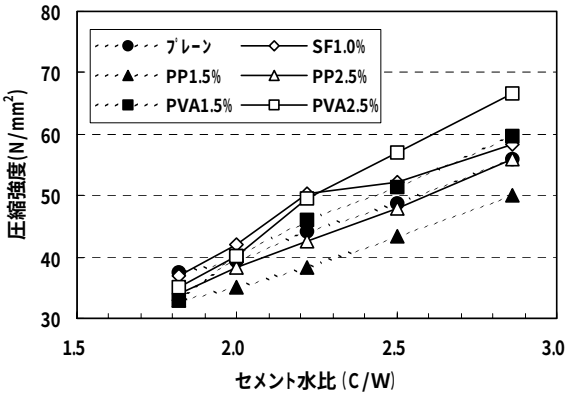
図－３　細骨材率と圧縮強度の関係



(a)軽量骨材A



(b)軽量骨材B



(c)軽量骨材C

図－４　セメント水比と圧縮強度の関係

スランプが異なることや，それに起因する供試体の締固め状態の差異による誤差も含まれていると思われるが，細骨材率を数パーセント変化させる程度では，圧縮強度に及ぼす影響はそれほど見られなかった。

3.3　W/Cの影響

想定したW/Cでの細骨材率が決定した後，スランプと空気量の調整を行い，基本配合とした。この基本配合に対してW/Cを-10%, -5%, +5%, +10%と変化させた計 5 水準の圧縮強度試験を行った。強度試験の結果を**図－４**に示す。なお，W/C の変化に伴い，細骨材率をそれぞれ+2%, +1%，-1%，-2%と変化させ，さらに繊維を混入したコンクリートについては，単位水量を-6kg/m^3，-3kg/m^3，+3kg/m^3，+6kg/m^3 に変化させた。ただし，これでもスランプが目標値と異なる配合も見受けられたが，空気量についてはAE 剤で調整し目標値とした。

表－３　決定配合

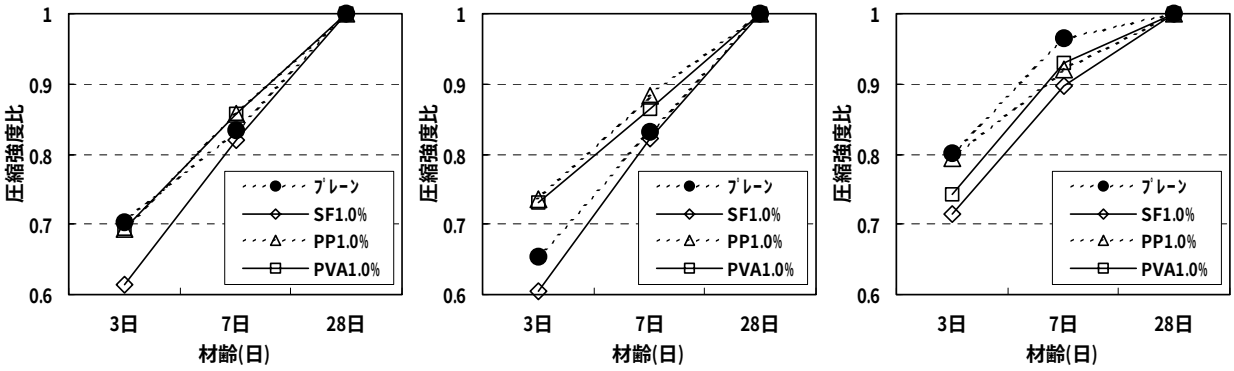
骨材	繊維	混入率	単位量(kg/m^3)				
			W	C	S	G	繊維
A	―	―	150	295	766	761	0
	SF	1.0	170	328	927	568	79
	PP	0.5	167	338	903	595	5
		1.0	175	365	917	544	9
		2.0	193	425	1067	346	18
	PVA	0.5	164	328	934	584	7
		1.0	167	339	887	597	13
		2.0	188	389	1003	424	26
B	―	―	144	326	778	456	0
	SF	1.0	160	356	863	377	79
	PP	0.5	152	362	773	430	5
		1.0	163	410	823	372	9
		2.0	185	483	901	273	18
	PVA	0.5	150	366	762	436	7
		1.0	158	385	783	405	13
		2.0	177	432	889	307	26
C	―	―	147	375	715	503	0
	SF	1.0	158	376	812	429	79
	PP	0.5	155	411	825	419	5
		1.0	163	452	787	405	9
		2.0	188	512	855	304	18
	PVA	0.5	153	384	778	455	7
		1.0	164	406	845	394	13
		2.0	183	432	982	281	26

各骨材とも C/W の小さい範囲, では繊維の種類および混入量が強度に及ぼす影響は少ないが, C/W の大きい，いわゆる高強度では PP 繊維はプレーンコンクリートの強度を大きく下回る。これは，各繊維のヤング係数の違いが影響しているものと考えられる。

また，軽量骨材 C は C/W を大きくしても強度増加は小さい。これは，骨材強度が影響していると考えられるが，このような場合，繊維の種類による影響はあまり見られない。

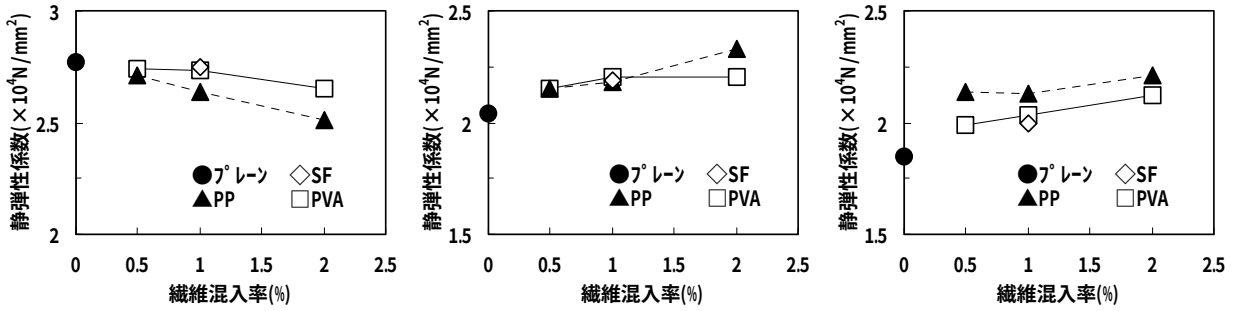
4.　強度試験結果

3.の配合試験結果を基に，**表－２**に示す配合



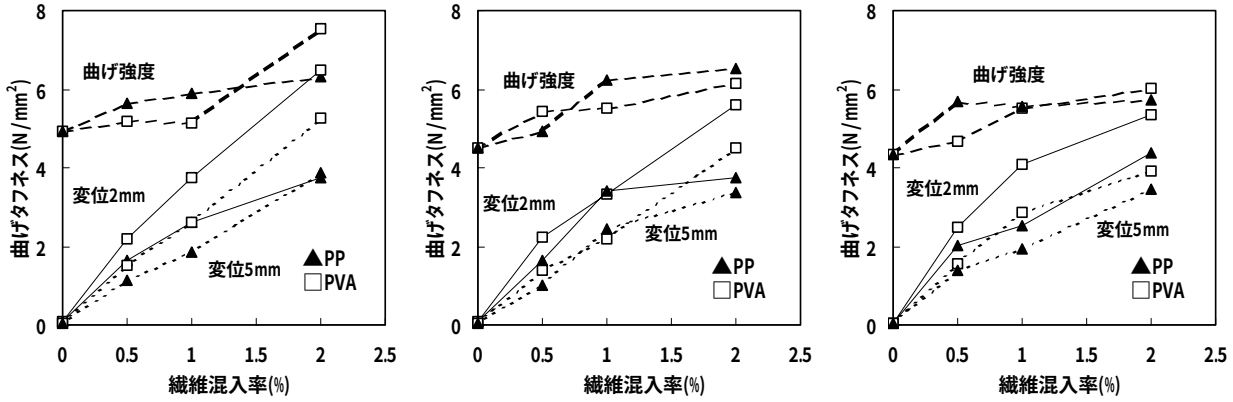
(a)骨材 A　(b)骨材 B　(c)骨材 C

図－５　強度発現



(a)骨材 A　(b)骨材 B　(c)骨材 C

図－６　静弾性係数



(a)骨材 A　(b)骨材 B　(c)骨材 C

図－７　曲げタフネス

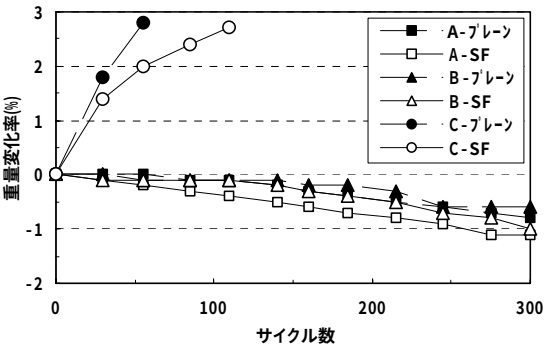
条件に合うように再度配合を決定し，硬化後の性状の確認を行った。決定した配合を**表－３**に示す。なお，繊維の混入率は 0.5%，1.0%，2.0%とした。

4.1　強度発現

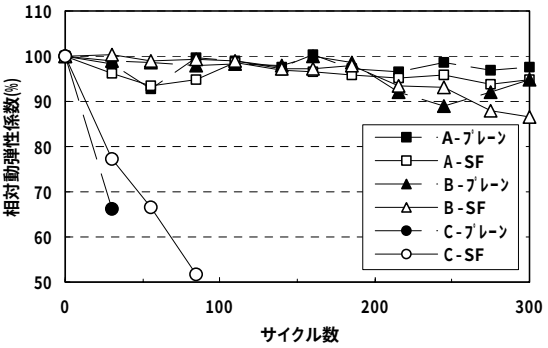
繊維混入率 1.0%での材齢 3 日，7 日の圧縮強度の，それぞれの 28 日強度に対する比を**図－５**に示す。いずれの骨材でも，SF1.0%の 3 日強度が低めの傾向を示した。この理由としては，今回使用した鋼繊維の形状が両端フック型であり，局所的な応力が発生しているなどの理由が考えられる。また，軽量骨材 C では材齢 7 日から 28 日の間の強度増加の割合が低いが，これは骨材強度が低いことによるものと思われる。

4.2　静弾性係数

各骨材ごとの材齢 28 日の静弾性係数を**図－６**に示す。静弾性係数は軽量骨材 A が最も大きく，続いて B，C の順であった。軽量骨材 B，C に関しては，繊維を混入することにより，プレーンコンクリートより静弾性係数は大きくなったが，もともと静弾性係数の大きい軽量骨材 A では，繊維の混入量の増加に伴い静弾性係数は



(a)　重量減少率



(b)　相対動弾性係数

図－８　凍結融解試験結果（鋼繊維）

低下した。

4.3　曲げタフネス

各配合について,曲げタフネス試験を行った。プレーンコンクリートとPVAおよびPP繊維の,最大曲げ強度とたわみが2mmおよび5mm時の曲げ強度を**図－７**に示す。

繊維の混入量の増加に伴い，最大曲げ強度は斬増したが，2mmおよび5mmたわみ時の曲げ強度は大きく増加した。しかし，骨材と繊維の組合せによっては，混入率の増加による曲げタフネスの向上効果があまりない場合もあった。

5.　凍結融解試験結果

繊維補強軽量コンクリートの凍結融解抵抗性を確認するために，軽量骨材A，BおよびCについて鋼繊維混入（SF1.0%）の有無の計6種について凍結融解試験を実施した。凍結融解試験の結果として，各サイクルでの重量変化量と相対動弾性係数を**図－８**に示す。

吸水率の高い軽量骨材Cは，試験初期からひび割れは発生し，ひび割れ部の吸水により重量が増加した。また相対動弾性係数も急激に低下し測定不能となった。鋼繊維で補強されたものは，鋼繊維によるひび割れ抑制効果が多少みられたが，100 サイクル程度で相対動弾性係数の測定が困難となった。

軽量骨材AおよびBでは,大きな重量変化や相対動弾性係数の変化は見られなかった。鋼繊維を混入したものが多少重量の減少が大きいが,これは，鋼繊維は比重が大きいため，表面のスケーリングとともに鋼繊維が剥離することにより，重量変化に与える影響が大きいためと思われる。また，軽量骨材Bでは所々にポップアウトがみられ，ポップアウトの箇所は軽量骨材が割れているのが確認できた。

6.　まとめ

本研究は，軽量骨材を用いたコンクリートの弱点である引張強度やせん断強度を補うために,短繊維で補強する場合の，配合特性や，強度耐久性について，試験を行った。結果として以下の知見を得ることができた。

・低吸水タイプの軽量骨材は，初期吸水率を練混ぜ水に加算することにより，入荷時の含水状態で使用でき，繊維の種類と混入率を一定にすれば，通常と同様の方法で配合設計は可能である。

・強度や曲げタフネス特性は,軽量骨材の種類,繊維材の種類や混入率により特性が異なるため,目的に合わせて，軽量骨材と繊維材を組み合わせる必要がある。

・低吸水タイプの軽量骨材は，凍結融解抵抗性に問題は見られない。

参考文献

1)喜多俊介ほか,短繊維補強されたRC部材の力学的性状,コンクリート工学年次論文集,Vol.15,No.2,pp.1717-1722,2003

2)伊藤始ほか,ビニロン短繊維の混入がRCはりのせん断耐力に与える影響,コンクリート工学論文集,Vol.25,No.2,pp1723-1728,2003