

論文 集束型ビニロン短繊維の軽量コンクリート中での分散状態が コンクリートの材料特性に及ぼす影響

柿沢忠弘*1 · 大野定俊*2 · 阪西 康*3 · 米澤敏男*4

要旨：集束タイプのビニロン短繊維を用いたコンクリートを製造する場合、コンクリートの練り混ぜ中に短繊維の分散・集束状態が大きく変化し、フレッシュコンクリートの性状と硬化コンクリートの特性に影響を及ぼす。短繊維の分散・集束状態の変化を促す要因はベースとなるモルタルの粘性や細骨材率、練り混ぜ時間などであり、これらの要因を調整することにより、ワーカビリティや強度特性などを最適にコントロールすることが可能になる。

キーワード：短繊維、集束、分散、軽量コンクリート、細骨材率、練り混ぜ時間

1. はじめに

外装用の建築 2 次部材においては、建築物の重量を低減する目的から軽量コンクリートを使用するケースが多い。この場合、ひびわれ発生後の剛性を確保し、かつひびわれ分散性状を改善する目的から短繊維をコンクリート中に分散させる方法が有効であるが、軽量コンクリートのメリットを活かすためにも、炭素繊維やビニロン繊維など比重のより小さい繊維を用いることが望ましい。[1]

繊維補強コンクリートでは、繊維の補強効果を活かすために粗骨材最大寸法の 2 倍以上の長さの繊維を用いることが一般的であるが、練り混ぜ時の流動性を確保する目的から単位セメント量、単位水量とも大きな割合となり、複合体の乾燥収縮が非常に大きくなる傾向にある。そこで収縮低減剤や特殊なセメントを使用し、乾燥収縮を低減する方法が採られている。

最近、セメント補強用として製造されている高弾性ビニロン繊維は、モノフィラメントタイプや、10 数 μm の繊維を集束剤によって集束したものなどが商品化されている。集束タイプの繊維を用いる場合、集束を強固にし、練り混ぜ中にその集束状態が変化しないようにすれば、モノフィラメントタイプや鋼繊維と同様な補強効果が期待できる。しかし、繊維束を強固に集束すると繊維とマトリックスの付着面積を低下させるので、十分な補強効果を期待できない場合もある。繊維の補強効果を活かすためには、集束した繊維束がコンクリートの練り混ぜ中にバラけて細かい繊維に分散するか、あるいは繊維束が部分的にバラけて広がり、マトリックスとの接触面積を大きくする必要がある。

以上のような観点から、本研究では、高弾性・集束タイプのビニロン繊維を用いた軽量コンクリートにおいて、練り混ぜ中の繊維束の集束状態の変化がコンクリートの材料特性に及ぼす影響について検討するとともに、繊維束の集束状態をコントロールする要因についても検討を加えた。

2. 実験概要

2. 1 使用材料とコンクリートの調合、および練り混ぜ方法

表-1 にコンクリートの使用材料を示す。耐火性と凍結融解抵抗性を確保する目的で、人工軽量骨材

*1	(株) 竹中工務店	技術研究所	生産研究開発部	担当研究員、工修 (正会員)
*2	(株) 竹中工務店	技術研究所	生産研究開発部	主任研究員、Ph.D. (正会員)
*3	(株) 竹中工務店	技術研究所	生産研究開発部	研究員 (正会員)
*4	(株) 竹中工務店	技術研究所	生産研究開発部	主任研究員、Ph.D. (正会員)

は絶乾状態で使用した。集束型の高弾性ビニロン繊維は、直径13 μ mの単繊維を750本引き揃えて1800デニールとしたものを集束剤によって集束処理を施している。コンクリートは表-2に示す調合を基本とするが、絶乾骨材がコンクリートの練り混ぜ中に周囲のペーストから吸水すると推定される量の水を補正水として、練り混ぜ直前に骨材に吸水させた。ビニロン繊維は、ベースとなるコンクリートを練り混ぜた(90秒)後に投入して練り混ぜた。

2. 2 実験の要因と水準、および実験方法

実験の要因と水準を表-3に示す。実験はビニロン繊維補強軽量コンクリートに用いる繊維の混入率と長さの影響を把握する実験(実験1)と、練り混ぜ中の繊維束の集束状態がコンクリートの材料特性に及ぼす影響を検討する実験(実験2)に分けて行った。

実験1では、基本調合をベースに、混入する繊維の体積混入率と長さを要因として強制式パン型ミキサー(定格容量100リットル)を用いて80リットルのコンクリートを練り混ぜ、そのスランプと空気量を測定するとともに、蒸気養生後に封緘養生した試験体3本(10 \times 10 \times 40cm)によって材令28日に強度試験を行った。

実験2では、繊維投入後の練り時間を15~90秒に変化させて練り混ぜ、ミキサーからコンクリートを排出した後に練り返さない状態

で無作為に5ヶ所から試料を採取して、スランプと空気量を測定した。また、3ヶ所から一定容積のコンクリート(ϕ 10 \times 20)を5本ずつ採取した後に5mmフルイでウェットスクリーニングし、フルイに残ったビニロン繊維を静水で洗ってから乾燥させ、その重量を測定すると同時に集束状態の変化を観察した。実験1と同様、蒸気養生後に封緘養生した試験体9本(10 \times 10 \times 40cm)によって材令28日に曲げ強度試験を行った。さらに繊維束の集束状態をコントロールする要因として、細骨材率、シリカヒューム添加率を採り上げ、その影響を検討した。

3. 実験結果と考察

3. 1 繊維混入率、繊維長さとコンクリートの材料特性の関係(実験1)

図-1に繊維混入率、繊維長さが繊維補強コンクリートの曲げ強度に及ぼす影響を示す。長さ30mmの繊維の混入率を0.5~1.25%に変化させた場合、曲げ強度は繊維量が多いほど大きくなる傾向にあるが、その効果は1%以上では大差ない。また、繊維混入率を1%として10~30mmの長さの繊維を練り混

表-1 使用材料

材料名	記号	種類	特性・成分
セメント	C	早強ポルトランドセメント	比重 3.16
シリカヒューム	SF	非顆粒タイプ	比重 2.2、 比表面積 200,000cm ² /g
細骨材	S	人工軽量細骨材	絶乾比重 1.68、膨張頁岩
粗骨材	G	人工超軽量粗骨材	絶乾比重 0.95、膨張頁岩
ビニロン繊維	V	高弾性・ 集束タイプ	比重 1.3、織度 1800デニール 引張強度 1570MPa ヤング率 36.3GPa
混和剤	Ad	高性能AE減水剤	特殊カルボン酸塩系

表-2 ビニロン繊維補強軽量コンクリートの基本調合

W/ (C+SF) (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						
		W	C	SF	S	G	V	Ad
38	60	236	560	60	518	174	13	C \times 1%

SF/(C+SF)=10%

人工軽量細骨材(S)および人工超軽量粗骨材(G)は絶乾重量

表-3 要因と水準

シリーズ	No.	要因と水準	
		要因	水準
実験1 (s/a60%) (SF10%)	1	繊維混入率Vf(%) (Vl=30mm)	0.5、0.75、1.0、1.25
	2	繊維長さVl(mm) (Vf=1%)	10、20、30
実験2 (Vl=30mm) (Vf=1.0%)	3	繊維投入後の 練り混ぜ時間(秒)	15、30、60、90
	4	細骨材率 (%) s/a	0、45、55、60、70、100
	5	シリカヒューム添加率(%) SF/(C+SF)	5、7.5、10

ぜた場合でも、粗骨材最大寸法を越える20mm以上になると曲げ強度の増進は小さくなる。一方、フレッシュコンクリートの状態は、特に長さ30mmの繊維を1.25%混入する場合には繊維が凝集し、コンクリートの流動性が大きく低下する結果となった。これらのことから、ビニロン繊維補強コンクリートでは、長さ30mmのビニロン繊維を1%混入する調合を基本としている。

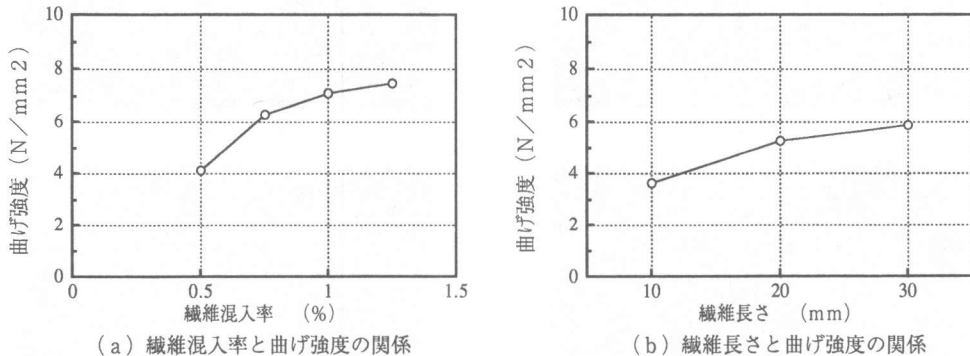


図-1 繊維混入率、長さが曲げ強度に及ぼす影響

3. 2 繊維束の集束状態の変化がフレッシュコンクリートの性状に及ぼす影響 (実験 2)

(1) 練り混ぜ中の繊維束の集束状態の変化

実験 2-No.3において、繊維投入後の練り混ぜ時間によるコンクリートのスランプ変化の一例と、繊維束の集束状態の変化をそれぞれ図-2、写真-1に示す。コンクリートのスランプは練り混ぜ後30秒程度までは約20cmとほぼ一定であるが、練り混ぜ90秒では10cm程度にまで低下して流動性は失われる傾向にある。練り混ぜ時間60秒までは繊維束同士が極端に絡み合うこともなく練り混ぜは正常に行われたが、60~90秒にかけては繊維が絡み合い、90秒以降では繊維束が凝集して均一な練り混ぜは不可能であった。

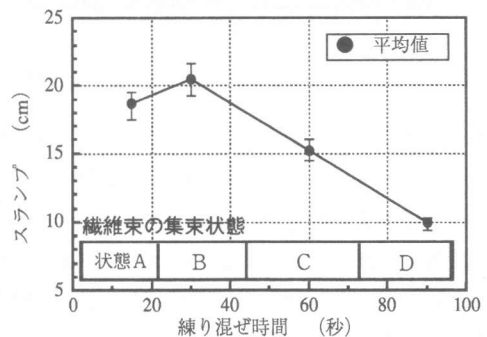


図-2 繊維束の集束状態とスランプの変化

繊維投入後の混ぜ時間毎にコンクリート中から洗い出した繊維束を観察した結果、繊維束の集束状態は次の4つの状態に大別できる。

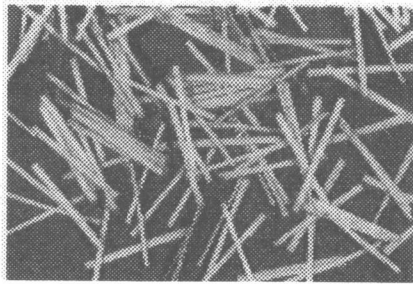
状態A：一部の繊維束には表層の繊維のバラケがわずかながら見られるが、ほとんどの繊維束はバラケていない。また繊維束自身も変形しておらず、投入した繊維束がほぼそのままの状態を維持している。(この実験では繊維投入後の練り混ぜ時間15秒程度に相当)

状態B：ほぼすべての繊維束が、部分的にバラケた状態になっている。繊維束には大きな変形は見られない。(練り混ぜ30秒程度)

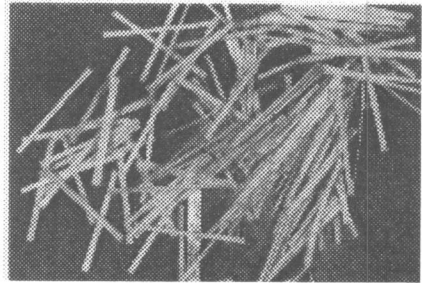
状態C：状態Bの繊維束と、単糸状態にバラケた繊維束が混在している。単糸に近い状態にバラケた繊維束は大きく湾曲して変形しており、しかも繊維束同士が絡み合っている。(練り混ぜ60秒程度)

状態D：ほとんどの繊維束が単糸に近い状態にバラケており、湾曲変形して凝集している。凝集した繊維の中に細骨材が相当量巻き込まれている。(練り混ぜ90秒程度以上)

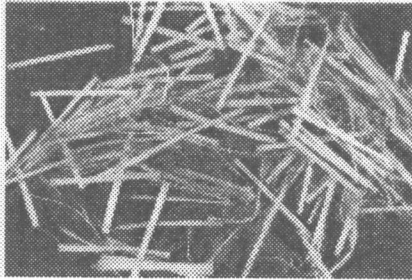
繊維束のバラケを促進させる主な原因は、練り混ぜ中の粗骨材と繊維束との接触であると思われる



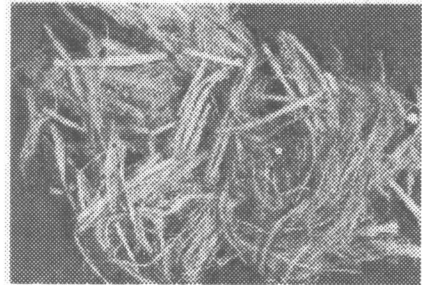
(a) 状態A



(b) 状態B



(c) 状態C



(d) 状態D

写真-1 繊維束の集束状態の変化

る。つまり、繊維束が粗骨材と衝突したり粗骨材間に挟み込まれることによって繊維束表層の繊維がほぐれ始める。その後は粗骨材との衝突に加えて、バラけた繊維が絡み合う過程で細骨材を一部巻き込み、繊維束と細骨材の擦れ合わせにより繊維束のバラケが一層進むと考えられる。

繊維束がほとんどバラけていないか、あるいは部分的にバラけている状態（状態A、B）では繊維束が絡み合うことなく、コンクリート中では独立して動くことができるので特にコンクリートの流動性を阻害する現象は起きない。しかし、バラケの状態が大きく（状態C～D）なる練り混ぜ時間では、高性能AE減水剤の減水効果によってモルタルの流動性は増していると考えられるにも拘わらず、バラけた繊維束同士がお互いに絡み合って凝集し、それがコンクリートの流動に対する抵抗になると考えられる。バラケが状態Dになると細骨材が凝集した繊維に捕捉されるとともに粗骨材が分離し、コンクリートの均一性は大きく失われる。

(2) コンクリート中の繊維束の分散状態

一定容積のコンクリート中の繊維量は、図-3から明らかなように繊維束があまりバラけていない練り混ぜ時間（状態A、B）では大きくばらつき、そのバラツキは状態BからCにかけて小さくなる傾向にある。このことは、本実験の範囲内では、繊維束を部分的にバラけさせる（状態B）練り混ぜ時間まででは練り混ぜが不十分であり、コンクリート中で繊維束の分布に偏りが生じている可能性があることを意味している。これはコンクリート強度を大きく変動させる要因となる。繊維重量のバラツキが小さくなる状態BからCにいた

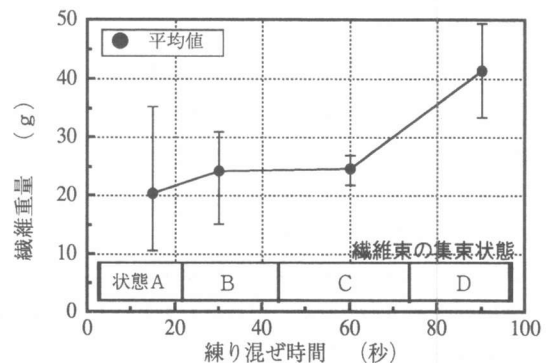


図-3 繊維束の集束状態の変化と繊維重量のバラツキ

る練り混ぜ時間において、コンクリートは均一に練り混ぜられていると考えられる。

以上のことから、フレッシュコンクリートの十分な流動性と均一性を確保できる繊維束の集束状態は、繊維束が部分的にバラけた状態BないしCであると判断される。なお、繊維束の集束状態が変化するコンクリートにおいてその品質を評価する場合は、スランブ試験の他に繊維束の集束状態とコンクリートの流動性、均一性を定量的に評価できる新たな手法が必要である。

(3) 繊維束の集束状態に影響を及ぼす要因

繊維束の集束状態は、練り混ぜ時間のみによって支配されるのではなく、細骨材率やシリカヒューム添加量によっても大きく影響を受ける。図-4には単位ペースト量を一定にして、細骨材率を0～100%に変化させて練り混ぜた(60秒)コンクリートのスランブを示すが(実験2-No.4)、繊維束の集束状態は細骨材率0%で状態D、細骨材率100%では状態A、細骨材率45～70%では状態B、Cに近いことが観察された。このことは、細骨材率を上げてモルタルの粘性を増し、かつ繊維束と接触する粗骨材量を低減すれば、繊維束のバラケを緩和できることを示している。

一方、シリカヒュームをはじめとするポズラン材料は、コンクリート中の骨材と繊維束に対してボールベアリング効果を発揮し、両者の接触を緩和することが期待できる。シリカヒューム添加率を粉体量(620kg/m³)の内割りで5～10%に変化させた(実験2-No.5)場合のスランブの変化を図-5に示す。この図から明らかなように、練り混ぜ時間が一定の場合、シリカヒュームを10%程度添加することによって繊維束は部分的にバラけた状態Bを保持し、流動性に富んだコンクリートとなることがわかる。

また、繊維束と粗骨材の接触の程度は、使用するミキサー形式や練り混ぜ量によっても影響を受けると予想される。同じ調査・練り混ぜ条件でも、例えば実機の大型ミキサーなどを使用する場合には、コンクリートの性状は異なると推察される。

3.3 繊維束の集束状態の変化が強度特性に及ぼす影響(実験2)

繊維束の集束状態と曲げ強度の関係(実験2-No.3)を図-6に示す。集束状態がA、Bでは強度のバラツキは大きいですが、状態BからCにかけてはバラツキは比較的小さくなる傾向にある。これは前述したように、繊維投入後の練り混ぜ時間が短いとコンクリート中で繊維束の分布に偏りが生じているためである。曲げ試験後の試験体の破断面を詳細に観察した結果、状態Aでは集束したまま引き抜けたと思われる繊維束が多数存在しており、しかも繊維束と粗骨材の偏が見られる。状態Bでは引き

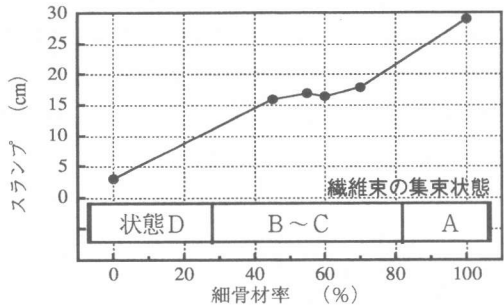


図-4 細骨材率による繊維束の集束状態の変化

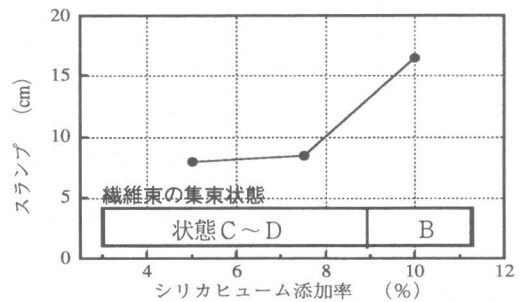


図-5 シリカヒューム添加率による繊維束の集束状態の変化

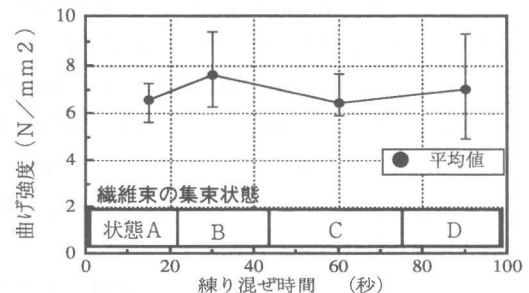


図-6 繊維束の集束状態による曲げ強度の変化

抜けたと思われる繊維束がケバ立った状態で確認できるが、繊維束のバラケによってマトリックスとの付着面積は大きくなっていると予想される。状態C、Dに特徴的なことは、細かくバラけた繊維が湾曲した状態で、破断面に平行してモルタル中に見られることである。引き抜けたと思われる繊維束は状態Cの破断面上でわずかに見られる程度であり、状態Dでは細かくバラけた繊維が引き抜けたか、あるいは破断したと思われる。状態Dでは強度のバラツキも大きい。

状態B、Dの試験体について、曲げ試験時の荷重-変形曲線の一例を図-7に示す。この場合、強度はいずれも同じレベルにあるが、状態Bでは最大荷重に到達した後は繊維の引き抜けにより変形が進行し、靱性に富んだ破壊状況になっている。それに対し、状態Dでは最大荷重に達した後に急激に荷重が低下し、脆性的な破壊に近い。これらの破壊状況は、破断面で観察される繊維束の集束状態をほぼ反映していると考えられる。

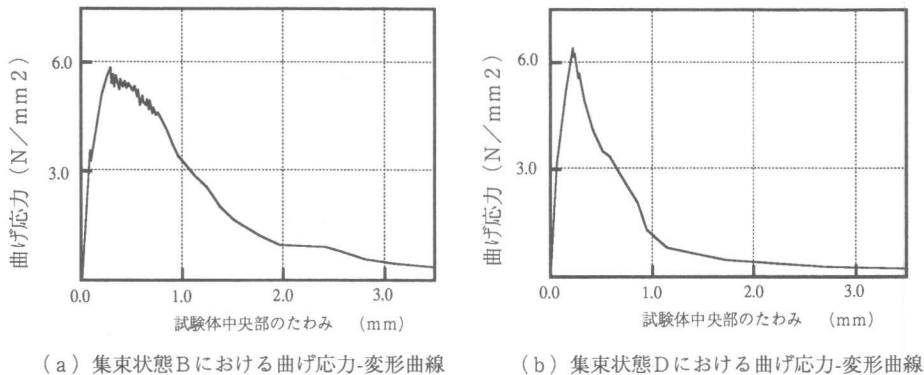


図-7 繊維束の集束状態による曲げ試験時の破壊性状の差

4. 結論

ビニロン繊維束の集束状態とコンクリートの材料特性を検討した結果、本実験の範囲内で言えることは以下のようにまとめられる。

- (1) 繊維束の集束状態は練り混ぜの過程において、部分的にバラけた状態から単糸に近い状態に変化する。集束状態を変化させる主な原因は、繊維束と粗骨材の接触である。
- (2) 繊維束と粗骨材の接触状態は、練り混ぜ時間によって一義的に支配されるのではなく、細骨材率やシリカヒューム添加率などによって制御できる。
- (3) フレッシュコンクリートの特性から考えると、繊維束の集束状態は部分的にバラけた状態に制御することが望ましい。この状態では繊維束の凝集も起こらず、コンクリートは流動性に富み、かつ均一に練り混ぜられている。
- (4) 曲げ強度のバラツキは、コンクリート中での繊維束の分散状態によって変動する。バラツキが小さくなる練り混ぜ時間においてコンクリートは均一に練り混ぜられたと考えられるが、この段階では繊維束は部分的にバラけた状態にある。
- (5) 硬化コンクリートは繊維束の集束状態に応じた強度特性を示す。

参考文献

- [1] 大野等：短繊維補強軽量コンクリートを用いたRC部材の曲げ特性、コンクリート工学年次論文報告集、1997、6