

論文 PVA 短繊維を用いた早強コンクリートの特性

佐々木 亘^{*1}・谷口 秀明^{*2}・樋口 正典^{*3}

要旨: 本研究では PC 部材を対象とした早強コンクリートに対する PVA 短繊維の影響を確認した。実験の結果, ①単位粗骨材絶対容積は, 短繊維混入率 0.1%の増加に対して 0.007m³/m³程度減じる必要があること, ②高性能 AE 減水剤により単位水量を 175kg/m³に抑えても, コンクリートの品質には影響を及ぼさないこと, ③ PVA 繊維の混入率の増加に伴って単位粗骨材絶対容積が減少することにより, コンクリートのヤング係数が低下する傾向にあること, などがわかった。

キーワード: 短繊維補強コンクリート, PVA 繊維, 圧縮強度, ヤング係数, 曲げタフネス

1. はじめに

短繊維をコンクリートやモルタル中に均一に分散させると, 引張強度, 曲げ強度, せん断強度, ひび割れの抑制, じん性, 耐衝撃性などの様々な性能を改善できることは古くから知られており, 盛んに研究が行われてきた¹⁾。最近では, 少量の合成繊維を混入して剥落の防止, 火災時の爆裂防止などにも使用されている。その一方で, 設計基準強度 180N/mm²という高い圧縮強度を持ち, 鋼繊維を比較的多量に混入することにより高い引張強度やじん性を付与したセメント系材料である超高強度繊維補強コンクリート (UFC)²⁾や, 有機繊維を多量に混入することにより一軸直接引張応力下において微細で高密度な複数ひび割れを形成し, 疑似ひずみ硬化特性を示す複数微細ひび割れ型セメント複合材料 (HPFRCC)³⁾といった高性能なセメント系材料が開発され, 道路橋等への適用^{4),5)}も始まっている。

UFC や HPFRCC は, 優れた性能を有するセメント系繊維補強材料ではあるが, 特殊な養生が必要であるなど用途は限定される。短繊維補強コンクリートが広く普及するためには, 一般のレディミクストコンクリート工場でも容易に製造できることが重要である。有機繊維の一種である PVA 繊維はこれまでも一部の用途に使用されており, 構造性能の改善等の検討^{たとえば, 6)}もなされてはいるものの, 十分に実部材に適用されているとはいえない。これは, 繊維の効果まで見込んだ設計法が確立されていないことや, PVA 繊維を使用したコンクリートはこれを使用しないコンクリートに比べて強度が小さくなり, 水セメント比を小さく設定する必要がある⁹⁾等, PVA 繊維を使用したコンクリートの配合設計方法は必ずしも確立していないことによるものと考えられる。

有機繊維を用いた短繊維補強コンクリートの配合設計についての指針等は整備されておらず, 鋼繊維を使用し

たコンクリートの指針^{7),8)}を準用している状況である。しかし, これらの指針 (案) は比較的古いデータに基づいており, PC 部材に用いるコンクリートのような強度域の高いコンクリートにも適用できるかどうかは定かではない。そこで本論文では, PC 部材に適用できる比較的強度域の高い, PVA 繊維を用いた短繊維補強コンクリートを対象として, フレッシュ性状, 力学特性の検討を行った。

2. 実験概要

使用材料を, 表-1 に示す。コンクリートの水セメント比は 33%, 40%, 50%の 3 水準を基本とし, セメントには早強ポルトランドセメントを使用した。短繊維は, 写真-1 に示す直径 0.66mm, 長さ 30mm の一般的な PVA 繊維である。

スランブは, 対象構造物の条件に応じて検討する必要があるが, 一般的な打込み方法で充てんできる範囲を定めることとした。試験練りの結果, 水セメント比が小さくなるほどスランブを大きくする必要があり, 水セメント比が

表-1 使用材料

材料名	種類, 物性, 成分	記号
水	水道水	W
セメント	早強ポルトランドセメント(密度 3.13g/cm ³)	C
細骨材	鬼怒川産川砂(表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.68%)と葛生産砕砂(硬質砂岩, 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.94%)の等量混合	S
粗骨材	葛生産砕石 2005A(硬質砂岩, 密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.60%, F.M.6.65)	G
混和剤	高性能 AE 減水剤(ポリカルボン酸系)	SP
	AE 剤	AE
短繊維	PVA 繊維, φ0.66mm×30mm, 密度 1.3g/cm ³	VF

*1 三井住友建設 (株) 技術開発センター 土木材料グループ 修 (工) (正会員)

*2 三井住友建設 (株) 技術開発センター 土木材料グループ 主任研究員 博 (工) (正会員)

*3 三井住友建設 (株) 技術開発センター 土木材料グループ グループ長 博 (工) (正会員)



写真-1 PVA 繊維

33%, 40%, 50%に対するスランプは、それぞれ、18cm, 12cm, 10cmとし、±2cm程度を目標範囲とした。

単位粗骨材絶対容積は、これらの条件で良好なフレッシュ性状が得られるなかで最も大きな値とした。ここで良好なフレッシュ性状とは、材料分離を生じない状態をいう。PVA 繊維を使用しない単位粗骨材絶対容積は、水セメント比 33%, 40%, 50%の順で、 $0.36, 0.37, 0.38\text{m}^3/\text{m}^3$ とした。PVA 繊維を使用する場合には、これらの値を基準とし、良好なフレッシュ性状が得られるまで単位粗骨材絶対容積を減じた。

PVA 繊維を混入しない場合の単位水量は、コンクリート標準示方書に示される標準範囲 ($155\sim 175\text{kg}/\text{m}^3$) の中心値である $165\text{kg}/\text{m}^3$ とし、スランプが目標範囲内となるよう高性能 AE 減水剤の使用量を設定した。PVA 繊維を混入したコンクリートでは、配合計算方法^{7),8)}に基づく単位水量が多い配合で良好なフレッシュ性状が得られることを確認した後、単位水量の上限を設け、単位粗骨材絶対容積一定のもとで高性能 AE 減水剤の使用量の増加により所定のスランプを確保した配合のフレッシュ性状を確認した。ここで、単位水量の上限とは、コンクリート標準示方書が定める $175\text{kg}/\text{m}^3$ と、JASS 5 が定める $185\text{kg}/\text{m}^3$ である。

PVA 繊維の短繊維混入率（短繊維補強コンクリート 1m^3 中に占める容積百分率）は 0, 0.5, 1.0, 1.5%とした。空気量は AE 剤により $4.5\pm 0.5\%$ に調整した。

コンクリートの製造には、公称容積 100 リットルの強制 2 軸ミキサを使用し、空練りを 10 秒、モルタル練りを 90 秒、コンクリート練りを 90 秒行った。PVA 繊維を使用する場合には、これを含まない状態のコンクリート練りを終えた後、短繊維を全量投入し、さらに 60 秒の練混ぜを行った。

硬化コンクリートの品質は、圧縮強度試験と曲げタフネス試験 (JSCE-G552) によって確認した。圧縮強度試験では圧縮強度とヤング係数、曲げタフネス試験では曲げひび割れ発生応力、曲げ強度および曲げじん性係数を測定した。

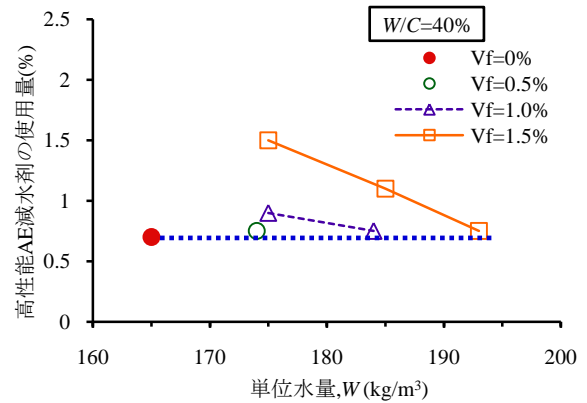


図-1 所定のスランプを得るための短繊維混入率、単位水量および高性能 AE 減水剤の使用量の関係

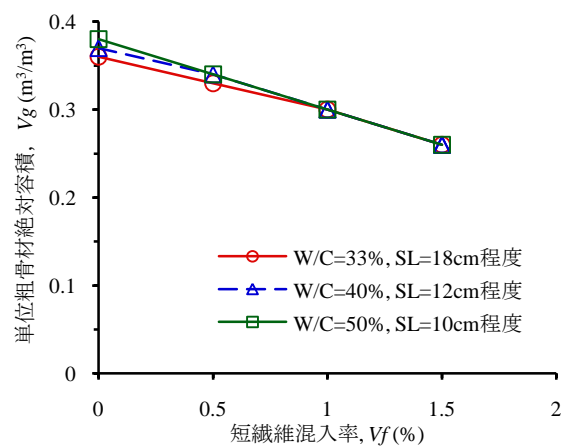


図-2 短繊維の混入に対して良好なフレッシュ性状が得られる単位粗骨材絶対容積の最大値

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状から定まるコンクリートの配合

図-1 は、水セメント比 40% のコンクリートにおいて、短繊維混入率を変化させた場合に、所定のスランプ (12cm 程度) を得るために必要となる単位水量と高性能 AE 減水剤の使用量の関係を示したものである。単位水量は、高性能 AE 減水剤の使用量を一定とし、短繊維混入率を 1.5% とした場合には $193\text{kg}/\text{m}^3$ まで増やす必要があった。PVA 繊維を使用した場合においても、鋼繊維の場合^{7),8)}と同様に短繊維混入率を 0.5% 増やすごとに単位水量が $10\text{kg}/\text{m}^3$ 程度増やす必要があることがわかった。短繊維混入率が 1.5% の場合には単位水量を $193\text{kg}/\text{m}^3$ から $175\text{kg}/\text{m}^3$ まで減じると、高性能 AE 減水剤の使用量は 2 倍にする必要があるが、この場合にも材料分離は生じず、フレッシュ性状としては良好な状態であることが確認された。

図-2 は、短繊維混入率を変化させた場合に、各水セメント比のコンクリートが所定のスランプを確保し、かつ材料分離を生じないための単位粗骨材絶対容積の最大値を示したものである。PVA 繊維の混入によって必要と

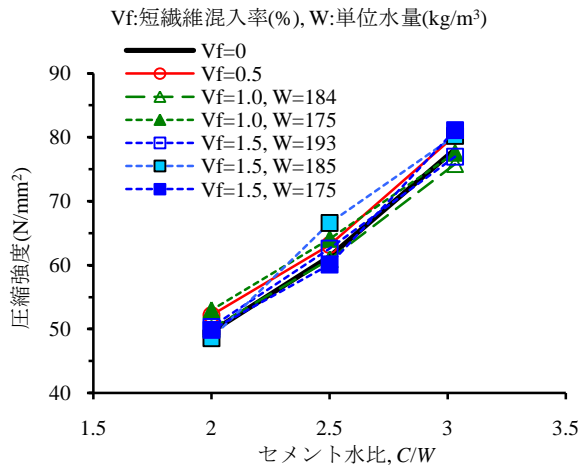


図-3 短繊維混入率および単位水量がセメント水比と圧縮強度の関係に及ぼす影響

なる単位粗骨材絶対容積の減少量は、短繊維混入率 0.1% (PVA 繊維 $0.001\text{m}^3/\text{m}^3$) の増加に対し、 $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ 前後となることが明らかになった。

3.2 圧縮強度

セメント水比と圧縮強度の関係を、図-3 に示す。既往の研究⁹⁾では、所定の圧縮強度を確保するためには短繊維混入率 0~1.5% の範囲でこれを増加させるごとに、水セメント比を小さくする必要があるとしている。しかし、実験結果によれば、短繊維混入率を増加させても、セメント水比と圧縮強度の関係は変化していない。また、短繊維混入率が 1.0、1.5% において高性能 AE 減水剤の使用量を増加させ、単位水量を上限まで減じても両者の関係に対する影響は小さい。圧縮強度のばらつきの原因としては、空気量が許容範囲内で供試体ごとに多少のばらつきがあることや、短繊維混入率によって型枠内への密実な充てんを得るために必要となる振動締固めの程度が異なり、これにより空気の抜け具合が異なること等が考えられるが、いずれにしても、圧縮強度のばらつきは小さい。したがって、適切に配合設計を行えば、短繊維混入率が 0~1.5% の範囲では、PVA 繊維の混入が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと言える。

3.3 ヤング係数

圧縮強度とヤング係数の関係を図-4 に、単位粗骨材絶対容積とヤング係数比の関係を図-5 に示す。ここでヤング係数比とは、各水セメント比において PVA 繊維を含まないコンクリートのヤング係数に対する比である。図-4 より、短繊維混入率を大きくすると、ヤング係数は小さくなる傾向がある。しかし、これは、図-5 に示すように短繊維混入率の増加に伴う単位粗骨材絶対容積の減少に起因するものであることがわかる。図中に示した実線は、筆者らの一人が実施した PVA 繊維を含まないコンクリート ($W/C=40\%$) において、単位粗骨材絶対容積

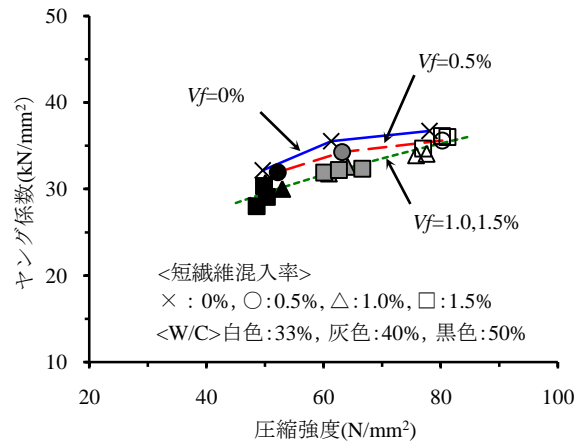


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

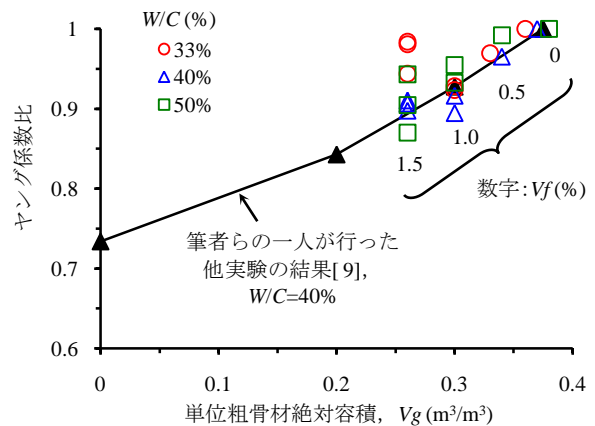


図-5 単位粗骨材絶対容積とヤング係数の関係

とヤング係数の関係を調べた実験結果⁹⁾であるが、PVA 繊維を使用した今回の実験結果とほぼ一致している。したがって、PVA 繊維を使用したコンクリートの材料分離を防ぐためには、図-2 に示すように、短繊維混入率の増加に伴い単位粗骨材絶対容積を減少させる必要があるが、単位粗骨材絶対容積の減少はヤング係数の低下を招くので、あらかじめ想定したヤング係数が得られることを確認しておく必要がある。ヤング係数は、短繊維混入率 0% の値に対し、短繊維混入率が 0.5% では 0.95 程度、1.5% では 0.9 程度となるが、水セメント比 33% のヤング係数については短繊維混入率が 1.5% であってもほとんど低下していないものも含まれる。

3.4 曲げ強度試験における荷重-たわみ曲線

短繊維を用いたコンクリートの曲げ強度試験では、たわみが 2mm に達するまでの荷重-たわみ曲線の面積から曲げタフネスを求める等、一般には載荷開始から大変形した状態までの全般的な挙動をとらえたものが多い。これに対し本検討では、図-6 に示すように、曲げ強度試験において曲げひび割れの発生付近までの挙動を調べた。図中の細線は、 $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の角柱供試体を用いて 3 等分点載荷により曲げ強度試験を行った場合の荷

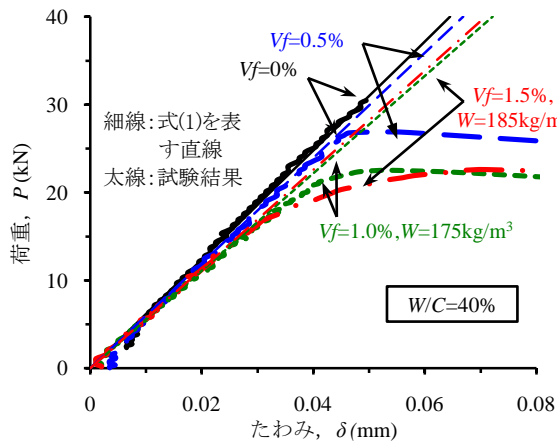


図-6 曲げタフネス試験における荷重-たわみ曲線（ひび割れ発生荷重付近まで）

重 P (kN), たわみ δ (mm)およびヤング係数 E_c (kN/mm²)の関係式(1)を表したものである。

$$P = 17.5E_c\delta \quad (1)$$

図-4 に示すように、短繊維混入率が大きいほどヤング係数は小さくなる傾向があるため、式を表す細線は、その変化に応じて傾きが異なる直線になる。PVA 繊維を混入しない場合には、試験値は載荷開始から曲げ破壊まで式(1)の直線に沿った挙動を示す。また、短繊維混入率が 0.5%の試験値も 0%の場合と同様に曲げ破壊を生じる最大荷重まで式(1)に沿った変化を示すが、その後の荷重はほぼ一定でたわみのみが増加している。一方、短繊維混入率が 1.0%または 1.5%になると、0.5%までの変化とは大きく異なり、最大荷重の 75~80%程度までは式(1)の直線に沿った変化を示すが、それよりも荷重が大きくなると、式(1)よりもたわみが大きくなり、短繊維混入率が大きいほど、緩やかな曲線を描く。すなわち、短繊維混入率の増加に伴い、弾性領域は小さくなり、その後の塑性変形が占める比率が大きくなる。なお、PVA 繊維の増加に伴い、最大荷重が低下しているが、これについては、曲げひび割れ発生強度に関する検討で触れることとする。

図-7 は、曲げタフネスの計算に用いるたわみ 2mm を超える領域までの荷重-たわみ曲線の一例を示したものである。PVA 繊維を使用しないコンクリートは、曲げひび割れが発生した時点で破壊に至るが、PVA 繊維を使用したコンクリートでは、曲げひび割れが生じた時点で一度荷重が急降下し、たわみが増大するものの、その後は、PVA 繊維によって粘りを見せて大きな変形を示す。また、短繊維混入率を大きくするほど、曲げひび割れが発生した後の荷重の低下量が小さく、その後のたわみの増加に伴い、荷重も増加する傾向がある。水セメント比が小さ

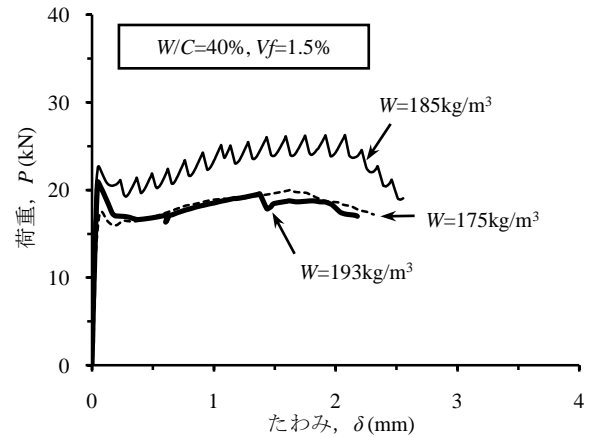
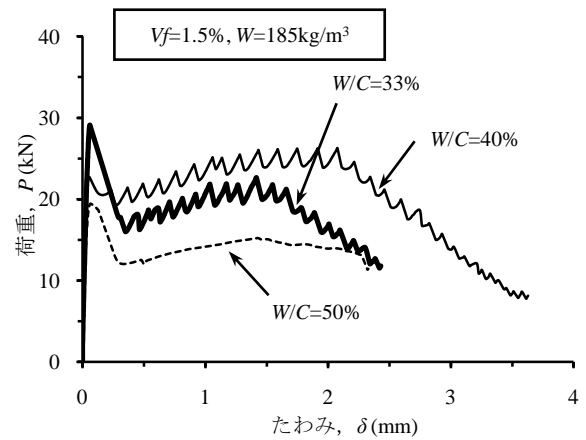
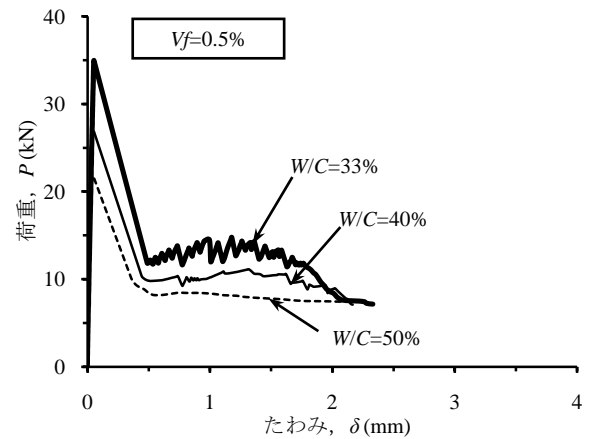
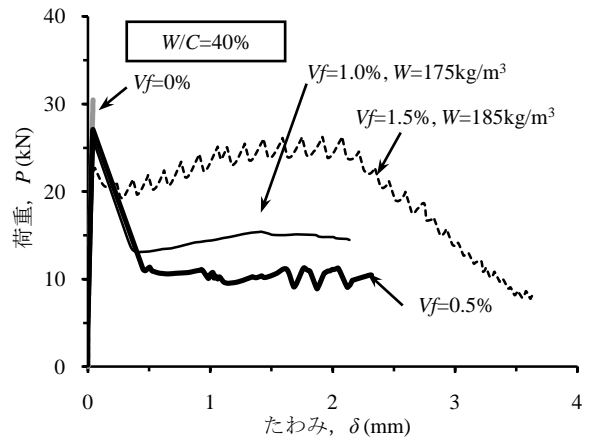


図-7 曲げタフネス試験における荷重-たわみ曲線（曲げタフネスの計算に用いるたわみ 2mm を超える領域まで）

いほど、曲げひび割れ発生荷重（強度）が高くなる。その後の急激な降下後の荷重は、短繊維混入率が 0.5% の場合には水セメント比と密接であるが、短繊維混入率を 1.5% とした場合には水セメント比が 33% よりも 40% のほうが高い荷重を保っている。水セメント比 40% において単位水量が異なる場合について荷重-たわみ曲線を調べた結果、単位水量が 185kg/m^3 以外では水セメント比が 33% よりも顕著に高くなる傾向は見られないが、33% とほぼ同等の荷重を保持している。

使用した PVA 繊維の引張強度は 880N/mm^2 とコンクリートに比べて相当に高いが、ヤング係数は 29.4kN/mm^2 であり、図-4 より、コンクリートと同程度、もしくは若干小さい。また、PVA 繊維のセメントマトリックスとの一体性は親水性による繊維表面の付着に依存し、表面の凹凸による機械的な付着に依存する鋼繊維とは異なる。

PVA 繊維を使用した場合のひび割れ発生荷重は、PVA 繊維を使用しない場合と同等もしくは配合変化（図-6 参照）により若干低くなり、ひび割れが発生した時点で PVA 繊維が引張応力を受け持つ。しかし、ヤング係数が小さいことと多少の抜けを生じることによって直ちに PVA 繊維が荷重を負担することができず、その後、PVA 繊維が伸長しながら耐力を回復して再び荷重が増加する現象を生じる。このような現象は、鋼繊維を用いたコンクリートでは見られず、PVA 繊維等の有機繊維を用いたコンクリートの特徴と言える。

3.5 曲げひび割れ発生強度、曲げ強度および曲げじん性係数

図-8 および図-9 は、それぞれ、短繊維混入率と曲げひび割れ発生強度比、短繊維混入率と曲げ強度比の関係を表したものである。曲げひび割れ発生強度比および曲げ強度比とは、各水セメント比において PVA 繊維を含まないコンクリート ($V_f=0\%$) の曲げひび割れ発生強度および曲げ強度を基準とし、PVA 繊維を含むコンクリートの各値との比を求めたものである。曲げひび割れ発生強度は、供試体に貼り付けたひずみゲージの変化から判定した。曲げ強度は、図-7 に示すように曲げひび割れ発生後にひずみの増加とともに荷重が増加した場合、その最大荷重を対象とし、ひび割れを発生していない全断面有効として求めたものである。

図-8 に示すとおり、曲げひび割れ発生強度比は、短繊維混入率の増加とともに低下する傾向があり、その低下率は短繊維混入率 1% 当たり平均で 18.5% となる。前節で述べたように PVA 繊維のヤング係数はコンクリートと同等以下である。そのような短繊維を混入しても、ひび割れ発生以前の弾性変形時には短繊維の荷重負担は小さいものと考えられる¹⁾。したがって、短繊維混入率が大きくなるほど短繊維を除いたコンクリートマトリク

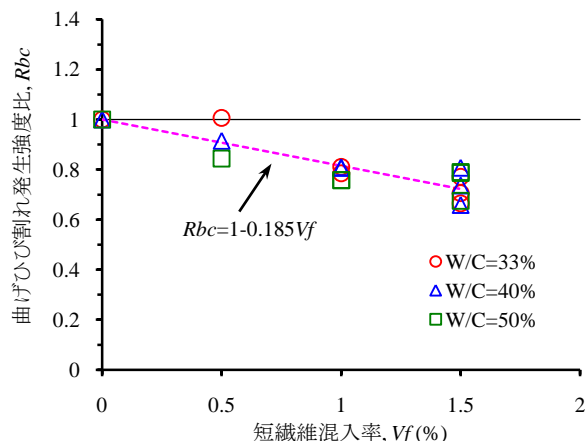


図-8 短繊維混入率と曲げひび割れ発生強度比の関係

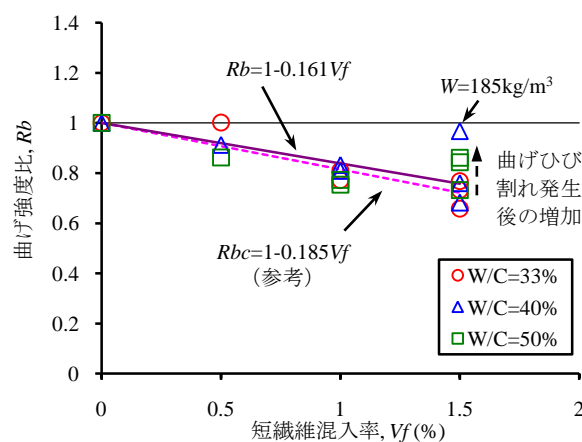


図-9 短繊維混入率と曲げ強度比の関係

ス部の荷重負担が大きくなるため、曲げひび割れ発生強度は短繊維混入率の増加とともに低下したものと考えられる。一方、曲げ強度は、短繊維混入率が小さい場合には曲げひび割れ発生強度と同値になるので、図-9 に示す短繊維混入率と曲げ強度比の関係は、曲げひび割れ発生強度比との関係と同様であるが、短繊維混入率を 1.5% まで高めると、図-7 に示す曲げひび割れ発生後の応力（荷重）の増加により、曲げ強度比の試験値は短繊維混入率と曲げひび割れ発生強度比の関係を表す回帰線よりも高くなるものが存在する。実験の範囲では、短繊維混入率 1.5%、水セメント比 40% および単位水量 185kg/m^3 とした場合には曲げ強度比が 1.0 近くまで増加している。ただし、短繊維混入率 1.5% までの範囲では、曲げひび割れ発生強度および曲げ強度は、PVA 繊維を混入しないコンクリートよりも低下するため、この結果を考慮して PVA 繊維を使用する必要がある。

図-10 は、短繊維混入率と曲げじん性係数の関係を表したものである。一般に短繊維混入率の増加に伴い、曲げじん性係数は増加する傾向があるが、水セメント比 33% に関しては、短繊維混入率が 0.5% と 1.0% ではほとんど変化がなく、1.0% から 1.5% の増加量も小さい。換言す

れば、水セメント比 33%においては、短繊維混入率が少なくても 4.5N/mm^2 程度の曲げじん性係数を確保できる。これに対し、水セメント比 40%および 50%の曲げじん性係数は、短繊維混入率の増加に伴う増加量が大きい。また、短繊維混入率が 0.5%では水セメント比は小さいほど、曲げじん性係数が大きいが、短繊維混入率を 1.5%とした場合には水セメント比の影響は認められず、曲げじん性係数はいずれの水セメント比においても 5N/mm^2 程度となる。単位水量が曲げじん性係数に及ぼす影響は明確ではなく、高性能 AE 減水剤の使用量を増やして単位水量を減じても所要の曲げじん性係数を確保できる。

4. まとめ

本実験で得られた知見を以下に示す。

- (1) PVA 繊維を使用する場合、良好なフレッシュ性状を得るためには短繊維混入率の増加とともに単位粗骨材絶対容積を減じる必要があるが、実験の範囲では、その減量は、短繊維混入率 0.1%の増加に対して $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ 程度であった。
- (2) 短繊維混入率が 1.5%までの範囲では、高性能 AE 減水剤の使用量を増やし、単位水量を 175kg/m^3 としても、コンクリートのフレッシュ性状および力学的特性に及ぼす影響は小さい。
- (3) 短繊維混入率の増加や単位水量の増減が圧縮強度へ及ぼす影響は小さい。
- (4) PVA 繊維の混入率の増加に伴って単位粗骨材絶対容積の減少することにより、コンクリートのヤング係数が低下する傾向にある。
- (5) 水セメント比を 40%以上として PVA 繊維を用いると、短繊維混入率に伴う曲げ強度および曲げじん性係数の増加が期待できる。

参考文献

- 1) 小林一輔：繊維補強コンクリート—特性と応用—，オーム社，1981
- 2) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004.9
- 3) 土木学会：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），2007.3
- 4) 石井精一，西村一博，児山裕樹，一宮利通：超高強度繊維補強コンクリートの道路橋への適用事例，第 15 回プレレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.13-16, 2006.10
- 5) 佐々木亘，尾原文宏，吉浦伸明，大城壮司，本山政司：低弾性高じん性セメント系複合体を用いた PC 桁連結床版の施工，土木学会第 65 回年次学術講演概要集，pp.911-922, 2010.9
- 6) 三上浩，岸徳光，栗橋祐介，竹本伸一：せん断破壊型軽量コンクリート製 RC 梁の耐衝撃性に及ぼす PVA 短繊維混入率の影響，構造工学論文集，Vol.52A, pp1237-1248, 2006.3
- 7) 鋼材倶楽部：鋼繊維補強コンクリート設計・施工マニュアル（トンネル編），1995.8
- 8) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983.3
- 9) 谷口秀明：テストハンマーによる構造体コンクリートの強度推定法に関する研究，筑波大学学位論文，2007.3

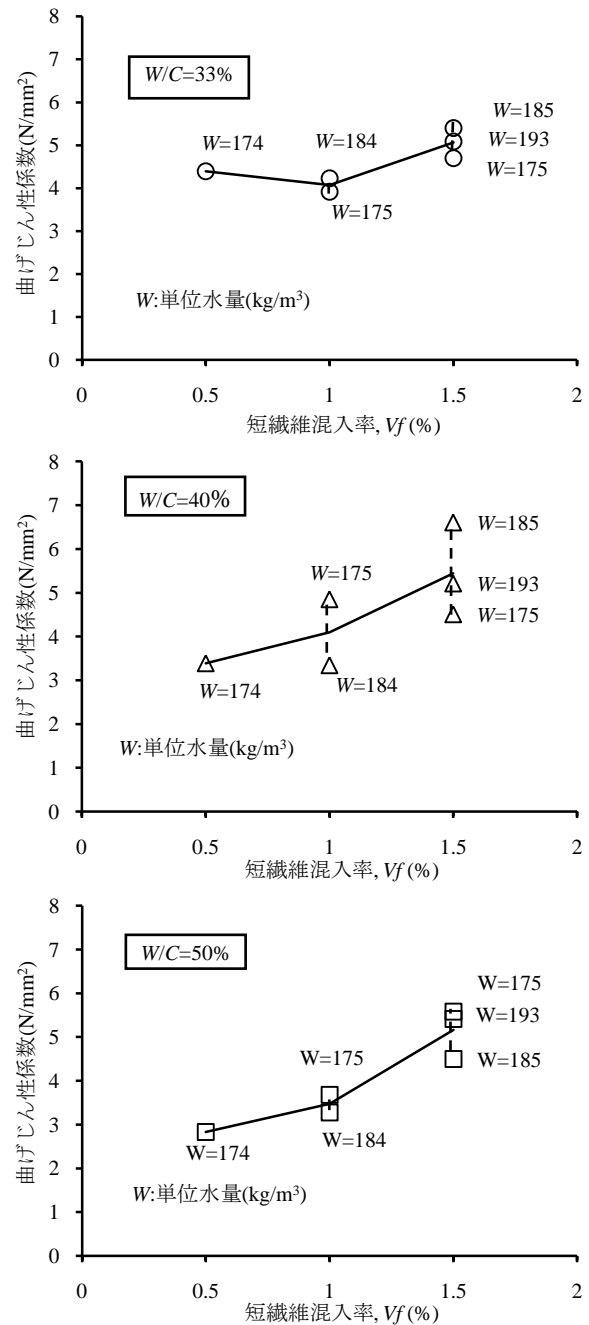


図-10 短繊維混入率と曲げじん性係数の関係