

高じん性コンクリートの開発

— ビニロン繊維補強コンクリートの基礎物性 —

Development of Ductile Fiber Reinforced Concrete

— Basic Physical Properties of PVA Fiber Reinforced Concrete —

谷口 秀明	HIDEAKI TANIGUCHI
三上 浩	HIROSHI MIKAMI
浅井 洋	HIROSHI ASAI
樋口 正典	MASANORI HIGUCHI
藤田 学	MANABU FUJITA

本研究では、ビニロン繊維を用いた短繊維補強コンクリートの基礎物性を確認した。実験には、普通粗骨材を用いたコンクリートと人工軽量粗骨材を用いたコンクリートを用いた。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 $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ 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 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 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コンクリートの力学的特性は、短繊維混入率に伴う単位粗骨材絶対容積の変化の影響を受け、その影響は、使用する粗骨材の種類によって大きく異なる傾向を示すこと、④水セメント比 40%以上でビニロン繊維を用いると、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こと等がわかった。

キーワード：繊維補強コンクリート、ビニロン繊維、人工軽量骨材コンクリート、曲げタフネス

This study describes the examination results to confirm the basic physical properties of PVA fiber reinforced concrete. As a result, the followings were obtained; 1) As the fiber content increases by 0.1% per concrete volume, unit volume of coarse aggregate of $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ should be decreased. 2) By using chemical admixture, the influence on the quality of the concrete is not significant even in the case that the unit water content is $175\text{kg}/\text{m}^3$ or less. 3) Changing unit volume of coarse aggregate exerts the influence on the specific characteristics of concrete. Moreover, the influence shows different tendencies depending on the kind of coarse aggregate used. 4) Flexural strength and flexural toughness of PVA reinforced concrete increase when the water cement ratio is designed to 40% or more.

Key Words: Fiber Reinforced Concrete, PVA Fiber, Lightweight Aggregate Concrete, Flexural Toughness

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、ひび割れに対する抵抗性、じん性、せん断強度、疲労強度、耐衝撃性などのさまざまな性能を改善できる。最近では、ごく少量の合成繊維を混入して、プラスチック収縮の低減や乾燥収縮ひび割れの防止、さらにははく落の防止¹⁾、火災時の爆裂防止などの用途にも使用されている。

鋼繊維補強コンクリートは、力学特性の改善効果が大きいいため、構造部材としても使用されている。たとえば、無筋コンクリートでは舗装の厚さやトンネルライニングの巻厚などを減ずること、鉄筋コンクリートでは部材のせん断耐力の増加、曲げタフネスの向上による衝撃荷重や爆発荷重に対する抵抗性の増加等が期待できる。また、最近では、設計基準強度 $180\text{N}/\text{mm}^2$ の高い強度を持ち、鋼繊維を多量に混入することで高いひび割れ発生強度と引張強度を付与した超高強度繊維補強コンクリー

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.M6.65	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 (ビニロン) 短繊維, $0.66\text{mm}\times 30\text{mm}$, 密度 1.3g/cm^3	VF



写真-1 ビニロン繊維

ト(モルタル)が開発され、道路橋等への適用も始まっている²⁾。

一方、合成繊維を用いた場合には、曲げじん性などの力学特性が改善できるほか、繊維の密度が小さく変形しやすいために施工が容易で、コンクリート表面にさびが浮き出ることもない。筆者の一人³⁾は、軽量コンクリートの静的、動的せん断耐力が普通コンクリートよりも小さいことに着目し、これを改善する目的である種のPVA短繊維(以下、一般的な呼称であるビニロン繊維と呼ぶ)を使用した結果、静的、動的のいずれのせん断耐力も大幅に改善すること等を確かめている。しかし、ビニロン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等、ビニロン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。

本論文では、さまざまなタイプの高じん性コンクリート・モルタルの開発をすすめるなかで最も基本となり、通常の工事にも展開しやすい、ビニロン繊維を使用した短繊維補強コンクリートを対象とし、その基礎物性を把握して配合設計の基礎データを得ることとした。

2. 普通粗骨材を用いた高じん性コンクリート

(1) 目的

この章では、普通粗骨材を用いたコンクリートを対象とし、これにビニロン短繊維を添加した場合の配合条件とコンクリートのフレッシュ性状および力学的特性との関係を確認した。

メーカー資料によれば、ビニロン繊維を使用した場合にも、鋼繊維を使用したコンクリートの配合設計方法^{4),5)}を参考にすることになっている。鋼繊維を使用する

場合、短繊維混入率が大きくなるほど単位水量と細骨材率を大きくしなければならない。しかし、それらを過度に大きくすると、コンクリートとしての基本的な物性(収縮量, 発熱量, ヤング係数等)が悪くなる可能性が大きい。そこで、ビニロン繊維を用いた本実験では、所定のフレッシュ性状が得られる範囲で、単位水量と細骨材率を小さく(単位粗骨材絶対容積を大きく)することとした。

(2) 実験方法

使用材料を、表-1に示す。コンクリートは設計基準強度が $36\sim 60\text{N/mm}^2$ 程度のPC部材に適用できるものを想定した。水セメント比は33%, 40%, 50%の3水準とし、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に示す過去の研究³⁾でも使用したビニロン繊維である。なお、ビニロンとはポリビニルアルコール(PVA)をアセタール化して得られる合成繊維の総称である。

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33%, 40%, 50%に対するスランブは、それぞれ、18~21cm程度, 12cm程度, 10cm程度となった。

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。ビニロン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。ビニロン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。

ビニロン繊維を混入しない場合の単位水量は、高性能AE減水剤の使用量がメーカーの推奨する標準量(C×

1.0%)程度とした結果、 165kg/m^3 となった。ビニロン繊維を混入したコンクリートでは、配合計算方法^{4),5)}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、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 175kg/m^3 と、JASS 5 が定める 185kg/m^3 である。

ビニロン繊維の短繊維混入率 (1m^3 中に占める容積百分率)は0, 0.5, 1.0, 1.5%とし、内割(コンクリート 1m^3 中に含める方法)で計算することとした。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。ビニロン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。

(3) 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 193kg/m^3 まで増やす必要があった。ビニロン繊維を使用した場合においても、鋼繊維の場合と同様に短繊維混入率を 0.5%増やすごとに単位水量が 10kg/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 193kg/m^3 から 175kg/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。高性能 AE 減水剤の使用量を過剰に増加させると、凝結の遅延等を生じるが、今回の実験で定めた使用量は、メーカーの推奨範囲(0.5~5.0%)の最大値よりも相当に小さいものであり、そのような問題を生じる可能性は低い。

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、かつ適度なプラスティシティーを得る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。ビニロン繊維の混

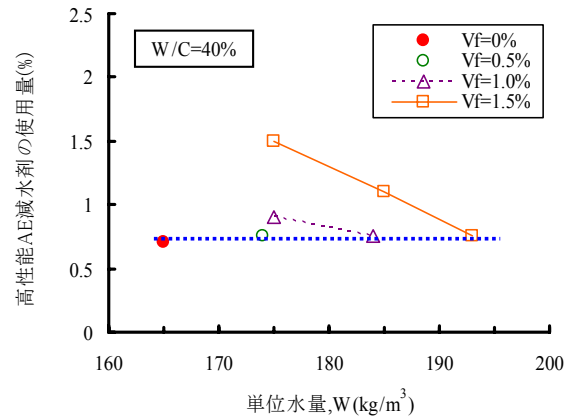


図-1 所定のスランプを得るための短繊維混入率、単位水量および高性能 AE 減水剤の使用量の関係

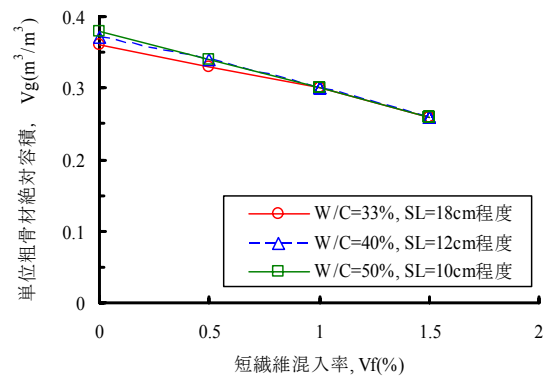


図-2 ビニロン繊維の混入に対して良好なフレッシュ性状が得られる単位粗骨材絶対容積の最大値

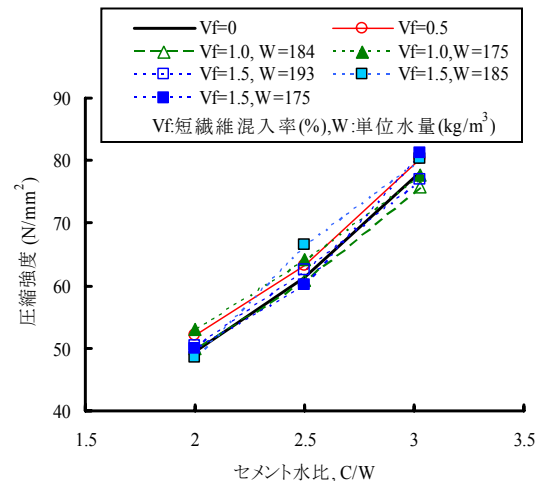


図-3 短繊維混入率および単位水量がセメント水比と圧縮強度の係に及ぼす影響

入によって必要となる単位粗骨材絶対容積の減少量は、短繊維混入率 0.1% (ビニロン繊維 $0.001\text{m}^3/\text{m}^3$) 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。

(4) 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³⁾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、いずれにしろ、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、ビニロン繊維の混入が圧縮強度に及ぼす影響は小さいと言える。

(5) ヤング係数

図-5 に示すとおり、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-6 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、筆者の一人が実施したビニロン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とヤング係数の関係を調べた実験結果⁶⁾であるが、ビニロン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、良好なフレッシュ性状を得るためには、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、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。なお、ヤング係数には単位水量の影響は認められない。

(6) 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。そこで、図-6 に示すとおり、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、100×100×400mmの角柱供試体を用いて3等分点

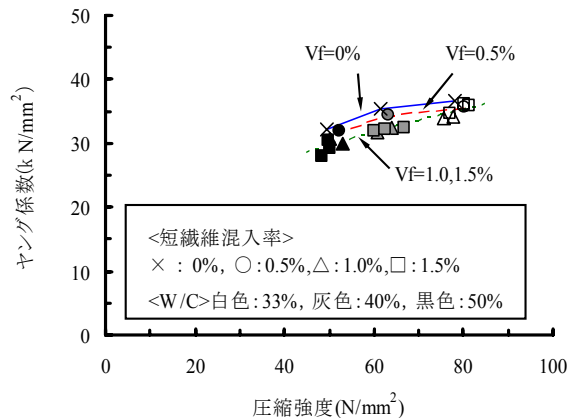


図-4 圧縮強度とヤング係数の関係

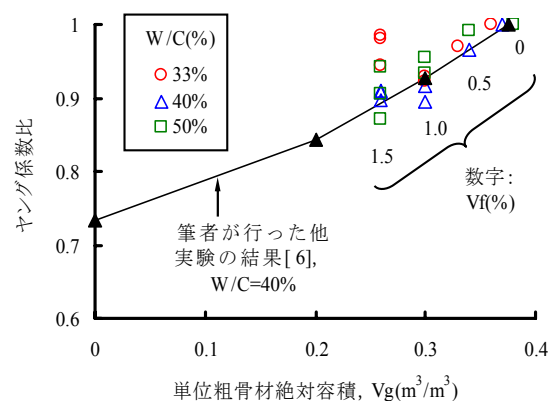


図-5 単位粗骨材絶対容積とヤング係数の関係

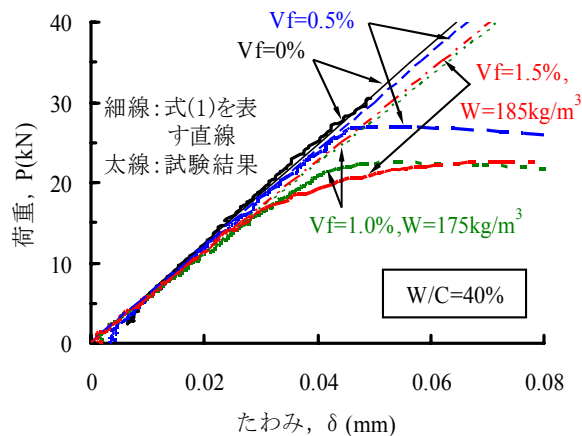


図-6 曲げタフネス試験における荷重-たわみ曲線 (曲げひび割れ発生荷重付近まで)

載荷により曲げ強度試験を行った場合の荷重 P(kN)、たわみ δ (mm)およびヤング係数 $E_c(kN/mm^2)$ の関係式(1)を表したものである。

$$P = 17.5 E_c \delta \tag{1}$$

図-4 に示すように短繊維混入率が高いほど、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異なる直線になる。ビニロン繊維を混入しない場合には、試験値は荷重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、その後は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、ビニロン繊維の増加に伴い、最大荷重が低下しているが、これについては、曲げひび割れ発生荷重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。ビニロン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、ビニロン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、ビニロン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持している。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。

使用したビニロン繊維の引張強度は 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、コンクリートと同程度である。また、ビニロン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。

ビニロン繊維を使用した場合のひび割れ発生荷重は、ビニロン繊維を使用しない場合と同等もしくは配合変化(図-2参照)により若干低くなり、ひび割れが発生し

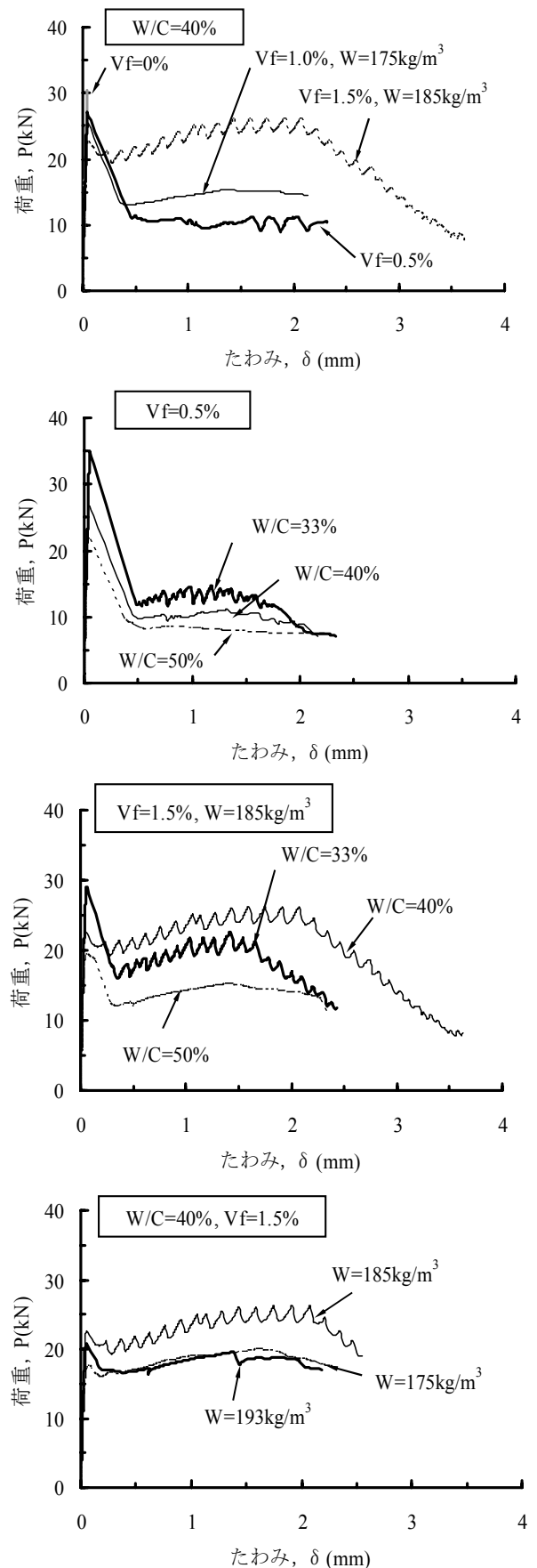


図-7 曲げタフネス試験における荷重-たわみ曲線 (曲げタフネスの計算に用いるたわみ2mmを超える領域まで)

た時点でビニロン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ビニロン繊維が荷重を負担することができず、その後、ビニロン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、ビニロン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。

(7) 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応力比, 短繊維混入率と曲げ強度比の関係を表したものである。曲げひび割れ発生応力比および曲げ強度比とは、各水セメント比においてビニロン繊維を含まないコンクリート (Vf=0%) の曲げひび割れ発生応力および曲げ強度を基準とし、ビニロン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。曲げひび割れ発生応力は、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り、最大繊維架橋応力という言い方もできる。

図-8 に示すとおり、曲げひび割れ発生応力比は、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%あたり平均で 18.5%となる。これは、(3) で述べたとおり、良好なフレッシュ性状を得るため、短繊維混入率の増加に伴って単位粗骨材絶対容積を減じていることに起因するものと考えられる。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応力と同値になるので、図-9 に示す短繊維混入率と曲げ強度比の関係は、曲げひび割れ発生応力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応力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/m³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、曲げひび割れ発生応力および曲げ強度は、ビニロン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ビニロン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。なお、曲げじん性係数とは、式(2)により求めた値である。

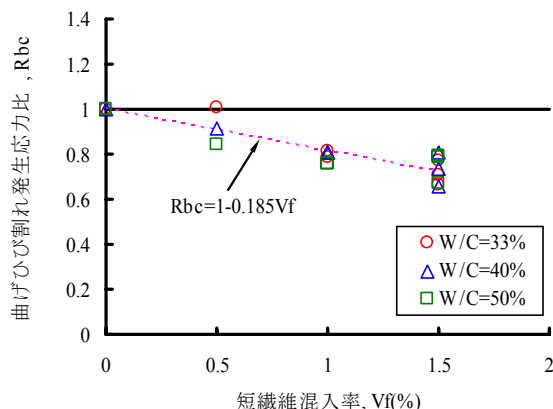


図-8 短繊維混入率と曲げひび割れ発生応力比の関係

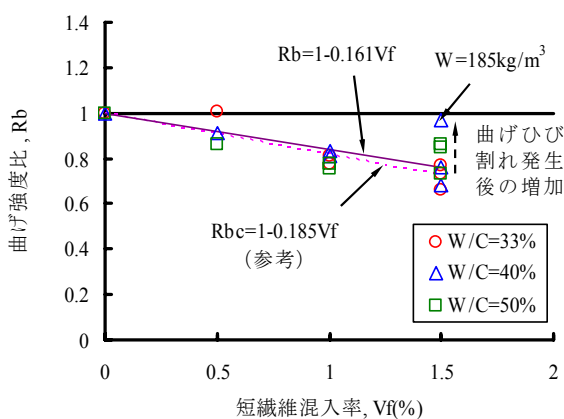


図-9 短繊維混入率と曲げ強度比の関係

$$\bar{f}_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \cdot \frac{l}{bh^2} \quad (2)$$

ここに、

\bar{f}_b : 曲げじん性係数(N/mm²)

T_b : 荷重-たわみ曲線における原点から δ_{tb} までの面積(N・mm)

δ_{tb} : スパンの 1/150 のたわみ(mm), $l=300$ mm 時には 2mm

l : スパン(mm)

b : 破壊断面の幅(mm)

h : 破壊断面の高さ(mm)

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/mm²程度の曲げじん性係数を確保できる。これ

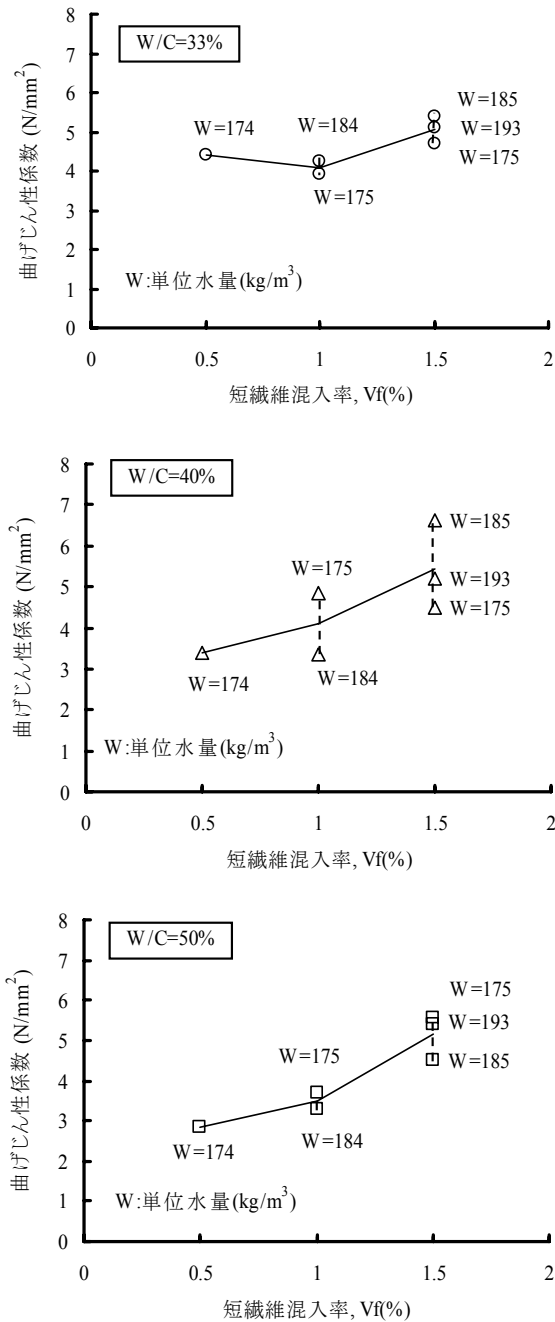


図-10 短繊維混入率と曲げじん性係数の関係

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。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/mm²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でも所要の曲げじん性係数を確保できる。

3. 人工軽量粗骨材を用いた高じん性コンクリート

(1) 目的

人工軽量骨材を用いたコンクリート（以下、軽量コンクリートと呼ぶ）は、通常のコンクリートよりも引張強度やせん断強度が小さく、これを用いた部材は、斜めひび割れや鉄筋に沿った付着割裂ひび割れを発生しやすい。このため、コンクリート標準示方書では、軽量コンクリートを用いた RC 部材のせん断耐力は普通コンクリートを用いた場合の 70%に低減している。筆者の一人は、ビニロン繊維を混入することで、軽量コンクリートを用いた RC 部材の静的あるいは衝撃時の耐荷性能が大幅に改善できることを確認している³⁾。このように、軽量コンクリートに対して高じん性コンクリート技術を組み合わせることにより、軽量コンクリートの弱点を補い、新たな性能を付与できる。しかし、ビニロン繊維等の短繊維を使用した軽量コンクリートの組合せに関する研究（例えば、3),6),7),8)は、主に部材の曲げ、せん断、押し抜きせん断等の力学的性能に着目したものがほとんどであり、前章と同様にビニロン繊維を混入した軽量コンクリートの物性について検討したものは少ない。

そこで、この章では、軽量コンクリートを対象とし、前章と同様の方法によりビニロン繊維を混入した場合の基礎的な物性を確認した。

(2) 実験方法

実験方法は、基本的に前章と同じである。また、人工軽量粗骨材以外の材料は表-1 に示すものである。人工軽量粗骨材は、市販の非増粒型の骨材で、表乾密度は 1.64g/cm³、吸水率は 34.0%であり、生コン工場用の高含水状態（吸水率相当まで含水させた飽和状態）で使用した¹⁰⁾。軽量コンクリートの単位水量は普通粗骨材を使用した場合よりも少なくなる傾向があるので、ビニロン繊維を使用しない場合の単位水量を 160kg/m³とした。前章において単位水量の影響が認められなかったため、ビニロン繊維を混入したコンクリートの単位水量の上限は 175kg/m³とした。なお、空気量は 5.0±1.0%とした。

(3) 圧縮強度およびみかけの密度

図-11 に示すとおり、軽量コンクリートのセメント水比と圧縮強度の関係では、一部のデータを除き、短繊維混入率の大きいほど、圧縮強度が若干高くなる傾向がある。これは、良好なフレッシュ性状を得るため、短繊維混入率の増加に伴い、コンクリート中から強度の小さい人工軽量粗骨材の絶対容積が少なくなったことに起因す

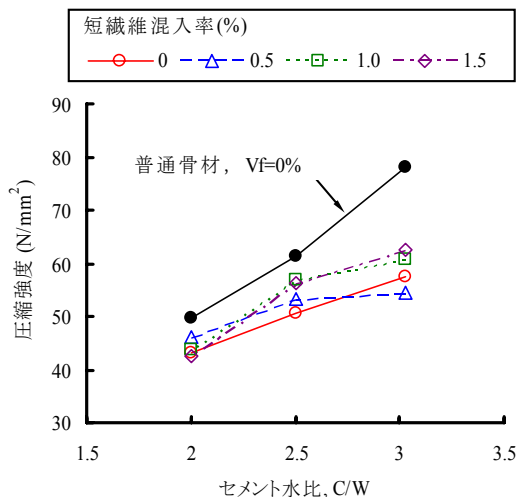


図-11 セメント水比と圧縮強度の関係

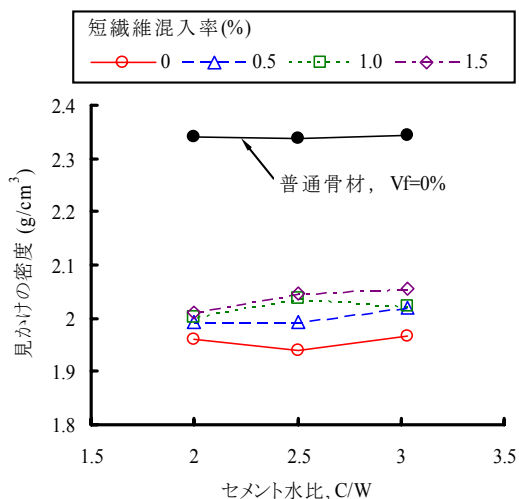


図-12 セメント水比と圧縮強度供試体のみかけの密度の関係

る。なお、人工軽量粗骨材の強度が小さいことは、図中の普通粗骨材を用いた場合との強度差や、水セメント比 33%において圧縮強度の頭打ちを生じていることから容易に理解できる。

軽量コンクリートの主たる目的は、コンクリートの軽量化である。しかし、良好なフレッシュ性状を得るためには、単位粗骨材絶対容積を減らす必要がある。図-12に示すとおり、短繊維混入率が高いほど、圧縮強度供試体によって測定した硬化コンクリートの見かけの密度は大きくなることに注意し、配合計画を行う必要がある。

(4) ヤング係数

図-13は、短繊維混入率とヤング係数の関係を表したものである。前述のとおり、短繊維混入率の増加が単位粗骨材絶対容積の減少を招くことにより、弾性係数の小さい人工軽量粗骨材が減少し、結果としてコンクリート

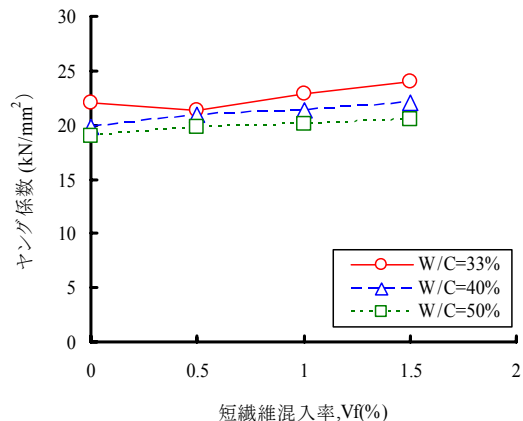


図-13 短繊維混入率とヤング係数の関係

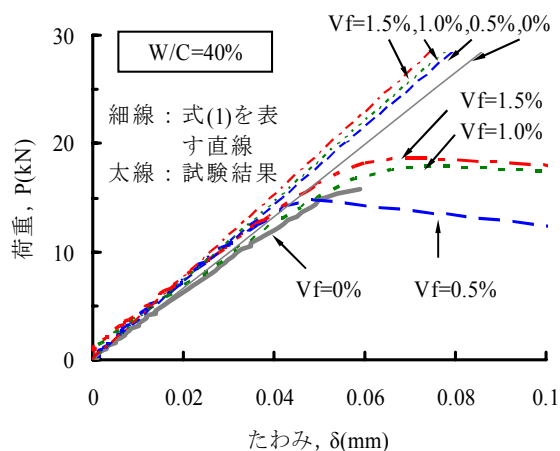


図-14 曲げタフネス試験における荷重－たわみ曲線 (曲げひび割れ発生荷重付近まで)

のヤング係数は、短繊維混入率が高いほど、若干高い値を示している。

(5) 曲げ強度試験における荷重－たわみ曲線

軽量コンクリートの曲げ強度試験における荷重－たわみ曲線を、図-14および図-15に示す。図-14に示すとおり、普通粗骨材を使用した場合とは反対に、短繊維混入率の増加に伴い、弾性域の傾きは大きくなっている。ビニロン繊維を混入した場合には、式(1)の直線と角柱供試体による測定値がほぼ一致している。短繊維混入率0%の測定値では、式(1)の直線よりも傾きが若干小さいが、これは、式(1)のヤング係数には円柱供試体により測定された値を代入しているため、供試体作製時の軽量骨材の不均一性等により角柱供試体と円柱供試体でヤング係数の相違が若干生じたことに起因するものと思われる。短繊維混入率が高くなると、普通粗骨材の場合と同様にひび割れ発生荷重 (図中の最大荷重) に達するまで

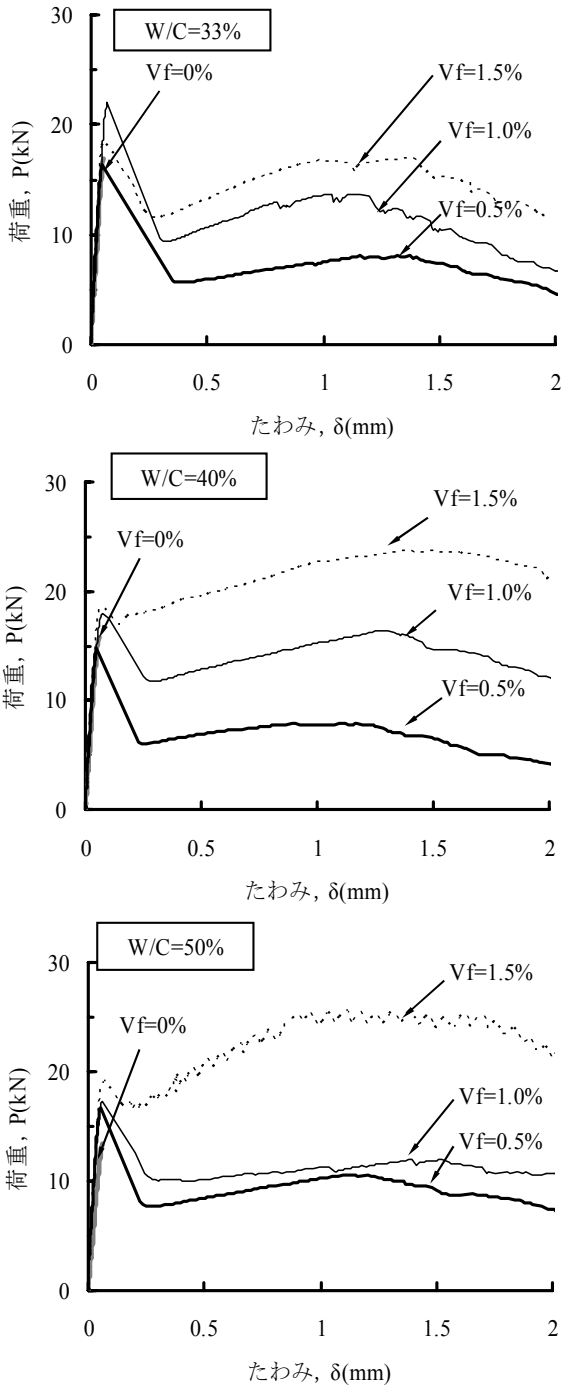


図-15 曲げタフネス試験における荷重-たわみ曲線 (曲げタフネスの計算に用いるたわみ2mmを超える領域まで)

のたわみは、式(1)の直線よりも大きくなる傾向がある。

図-15に示すとおり、水セメント比にかかわらず、曲げひび割れ発生後は、短繊維混入率を増加すれば、より高い荷重を保った状態で大変形を可能し得ることがわかる。ただし、水セメント比が33%と40%の測定値を比較すると、短繊維混入率が0.5%では両者には大差はないものの、1.0%以上では水セメント比40%におけるビ

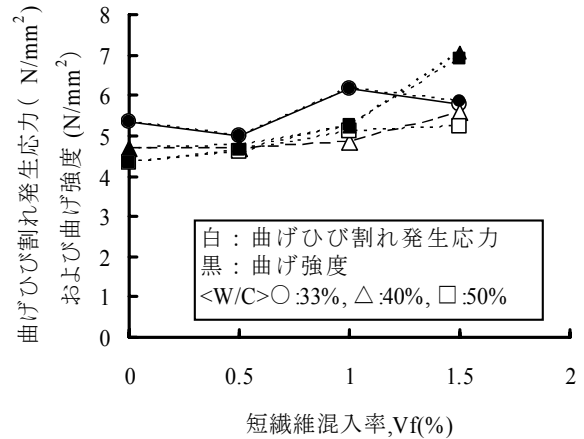


図-16 短繊維混入率と曲げひび割れ発生応力および曲げ強度の関係

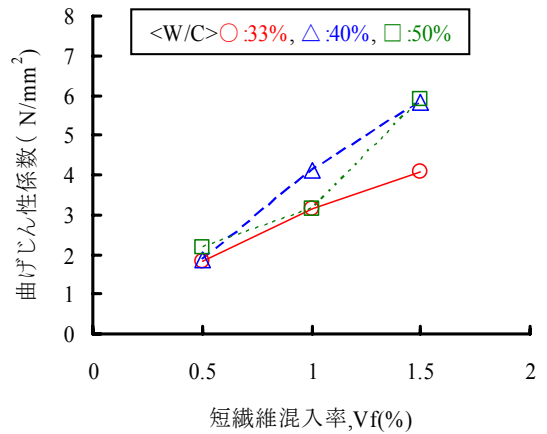


図-17 短繊維混入率と曲げじん性係数の関係

ニロン繊維の効果に比べ、水セメント比33%の効果はかなり小さい。普通粗骨材を用いた図-7においても、水セメント比33%よりも40%での効果が高い結果も確認されている。水セメント比50%に関しては、短繊維混入率が1.0%の曲げひび割れ発生後の荷重がやや小さいが、短繊維混入率が0.5%と1.5%では水セメント比40%と同等の効果が認められる。

(6) 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-16は、短繊維混入率と曲げひび割れ発生応力および曲げ強度の関係を示したものである。軽量コンクリートは、普通粗骨材を用いたコンクリートとは異なり、短繊維混入率が増加しても、曲げひび割れ発生応力は低下しない。これは、前述のとおり、人工軽量粗骨材の強度が小さく、絶対容積が減少することによってコンクリートの強度が高まることに起因するものである。

曲げ強度は、曲げひび割れ発生応力と同様に、短繊維

混入率の増加に伴って大きくなる傾向があるが、水セメント比 40%、50%では急激な増加が見られるのに対し、水セメント比 33%では曲げひび割れ発生応力と同値である。これは、図-15 に示すように、水セメント比 40%、50%では、曲げひび割れを発生した後の荷重が曲げひび割れ発生時の荷重よりも高くなるが、水セメント比 33%においてはそのような効果が十分には期待できないことに起因するものである。

図-17 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。軽量コンクリートの曲げじん性係数は、水セメント比にかかわらず、短繊維混入率の増加に伴って増大するが、水セメント比 33%の曲げじん性係数は最も小さく、短繊維混入率が大きいほど、他の水セメント比との差異が顕著になることがわかる。

4. まとめ

ビニロン繊維補強コンクリートの基礎的な物性を把握するため、普通粗骨材を用いた場合と人工軽量粗骨材を用いた場合の2通りの実験を行った。実験の結果、以下のことがわかった。

- ① ビニロン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。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 $0.007\text{m}^3/\text{m}^3$ 程度である。
- 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 $175\text{kg}/\text{m}^3$ 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 コンクリートの力学的特性は、短繊維混入率に伴う単位粗骨材絶対容積の変化の影響を受ける。また、コンクリートの力学的特性に与える影響は、使用する粗骨材が普通骨材であるか、それとも人工軽量骨材であるかによって大きく異なる。
- ④ 普通粗骨材、人工軽量粗骨材のいずれを用いた場合にも、水セメント比を 40%以上としてビニロン繊維を用いると、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。

なお、本研究の成果をもとに、今後、さまざまなタイプの高じん性コンクリート（あるいはモルタル）の検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 青木圭一，小室弥一郎，多田壽，中積健一：第二東名高速道路山切第1号高架橋の設計と施工，橋梁と

基礎，pp.2-12，2005.10

- 2) 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回プレスト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
- 3) 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，pp.1237-1248，2006.3
- 4) 鋼材倶楽部：鋼繊維補強コンクリート設計・施工指針（案），1995
- 5) 土木学会：鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），1983
- 6) 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
- 7) 岸徳光，三上浩，竹本伸一，栗橋祐介：PVA 短繊維混入による軽量コンクリート製 RC 版の押し抜きせん断耐力向上効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1381-1386，2006
- 8) 大野定俊，柿沢忠弘，阪西康，米澤敏男：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，Vol.19，No.2，pp.1527-1532，1997
- 9) 大滝晶生，河野克哉，二羽淳一郎：合成短繊維ならびに収縮低減剤を用いた高品質軽量コンクリートはり部材のせん断耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1495-1500，2006
- 10) 谷口秀明，三上浩，浅井洋，樋口正典，藤田学：人工軽量骨材コンクリートの品質向上に関する研究—基礎物性および自己充てん性—，三井住友建設技術研究所報告，第6号，2008（投稿中）