

論文 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

大野定俊*1・柿沢忠弘*2・阪西 康*3・米澤敏男*1

要旨:本研究では、比重1.0以下の超軽量粗骨材を用いた軽量コンクリートをビニロン繊維及び炭素繊維で補強したコンクリートを用いてRC部材を作成し、その曲げ載荷試験を行い、部材の変形特性及びひび割れ性状に及ぼす繊維の効果について検討した。その結果、繊維の添加は終局耐力及び剛性の増加、ひび割れ特性の改善に効果が高いことが明らかにされた。

キーワード:超軽量、ビニロン繊維、炭素繊維、曲げ特性、ひび割れ

1. はじめに

コンクリート部材の高強度軽量化及び高靱性化の潜在的なニーズは高く、建設分野では2次部材を中心に一層の軽量化のための検討が種々行われている。最近、比重1.0以下の超軽量粗骨材が市販されるようになり、比重1.4以下の超軽量コンクリートも従来の軽量2種コンクリートと同様に製造できるようになってきた。一般に、超軽量コンクリートでは圧縮強度は通常のコンクリートと同等のものが得られるが、弾性係数が比重に応じて低くなる傾向にあることや、曲げ強度あるいはひび割れ抵抗性がわずかに低下することが知られている。この特性変化を補う方法のひとつとして繊維補強コンクリートを用いることが考えられる [1]。鋼繊維補強コンクリートを用いたRC部材では終局モーメントの増加やひび割れ特性の改善などの面で効果があることが報告されている [2]。本研究では軽量化と補強効果の両者の観点から、集束タイプのビニロン繊維及び炭素繊維で超軽量コンクリートを補強することとし、この繊維補強超軽量コンクリートをRC曲げ部材に用いた場合の効果について実験的に検討することとした。従来のRC部材では、コンクリートの引張を無視して設計しているが、繊維補強コンクリートを用いる場合には、繊維と鉄筋の両者の補強効果や分担力を適切に評価することが重要であり、部材設計の上でも合理的である。本研究では繊維補強超軽量コンクリートを用いたRCはり部材の曲げ載荷実験を実施し、繊維補強が部材特性に与える影響について明らかにすることを目的とした。

2. 実験概要

2.1 使用材料及び材料試験方法

本研究では、比較用の軽量1種コンクリートと超軽量コンクリート及び、繊維の効果を検討するための超軽量コンクリートをビニロン繊維及び炭素繊維で補強した4種類のコンクリートを用いた。超軽量コンクリート及び繊維補強超軽量コンクリートの粗骨材には、比重0.9の膨張頁岩系の超軽量粗骨材(造粒タイプ)を用いた。また、細骨材及び比較用の軽量1種コンクリートの粗骨材には一般の膨張頁岩系の軽量骨材を用いた。超軽量コンクリートの補強用に用いた繊維はビニロン繊維と炭素繊維で、いずれも粗骨材を含むコンクリートを効率的に補強する点を考慮して、繊維長が30mmの集束タイプの繊維を用いた。補強繊維の物性を表-1に示す。繊維量(体積率)

*1 竹中工務店技術研究所、主任研究員、Ph.D (正会員)

*2 竹中工務店技術研究所、担当研究員 (正会員)

*3 竹中工務店技術研究所、研究員 (正会員)

は繊維の補強効果と練り混ぜ性能の両者を考慮し、ビニロン繊維が1.0%と1.5%、炭素繊維が0.75%と1.0%の各2水準とした。各コンクリートの配合を表-2に示す。練混ぜられたコンクリートはビニロン繊維補強のものがスランプ12cm、炭素繊維補強のものが5~7cmで、いずれも試験体打設に十分な流動性を示した。梁部材の実験に際し、軽量1種、超軽量コンクリート、ビニロン繊維補強超軽量コンクリート及び炭素繊維補強超軽量コンクリートの圧縮強度(ϕ 10x20)、曲げ強度(10x10x40cm)を実施した。圧縮、曲げの各強度試験はそれぞれJIS A 1108, A 1106に準じて実施した。また、各コンクリートの引張挙動を把握するために純引張強度試験を実施した。純引張試験は図-1に示すような形状の試験体を用い、試験体中央部に変位計(検長100mm)を取り付け、荷重-変位関係を測定した(写真-1)。梁試験体において、炭素繊維は鉄筋との接触により鉄筋を腐食させる可能性があるため、ここでは補強材としてステンレス製の異形鉄筋を使用した。炭素繊維補強の試験体と比較用の軽量1種コンクリートのうち一体には異形ステンレス鉄筋を、その他の試験体は全てSD35、D13の異形鉄筋を使用した。本ステンレス鉄筋は明確な降伏点を持たず、応力が増大すると緩かにひずみが増加する傾向にある。本ステンレス鉄筋の引張試験における0.2%ひずみ時の応力は402MPa、終局強度は513MPaであった。

2.2 部材試験概要

はりの曲げ載荷試験の実験計画表を表-3に示す。試験体は、比較用のコントロール試験体として軽量1種コンクリート梁と超軽量コンクリート梁とし、ビニロ

表-3 曲げ部材載荷実験計画表

名称	コンクリート種類	繊維量 (%)	鉄筋種類	引張鉄筋比
LWB-1	軽量1種	—	D13@2	0.96%
LWB-2			ステンスD13@2	
SLWB	超軽量	—	D13@2	
VFRB-1	VFRC	1.0	D13@2	
VFRB-2		1.5		
CFRB-1	CFRC	0.75	ステンスD13@2	
CFRB-2		1.0		

表-1 補強繊維の物性

繊維種類	ファイメント	繊維束	繊維長	引張強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	比重
ビニロン繊維	13 μ m	1800 テニール	30mm	1570	35	1.3
炭素繊維	7 μ m	12000本	30mm	3430	206	1.7

表-2 コンクリートの配合

種類	w/c (%)	s/a (%)	単位重量 (kg/m ³)					
			C	W	FA	CA	繊維	混和剤
軽量1種	45	45	351	158	800	618	—	*0.4%
超軽量					514	355		
VFRC-1	38	60	560	236	504	174	13	..
VFRC-1.5					499	172	20	1.3%
CFRC-0.75					506	175	13	..
CFRC-1					503	174	17	1.4%

*AE減水剤、**高性能AE減水剤 (いずれもセメントに対する重量比)

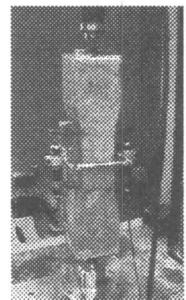
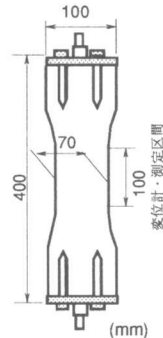


図-1 純引張試験体

写真-1 純引張試験

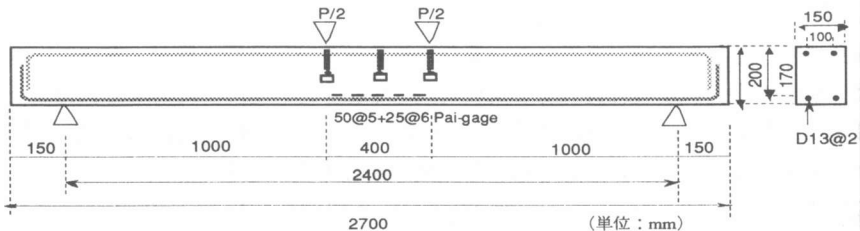


図-2 曲げ載荷試験体寸法と載荷状況

繊維補強コンクリート及び炭素繊維補強コンクリート梁については繊維体積率をそれぞれ2水準とし、各水準に対し2体づつの曲げ載荷試験を行った。RC梁試験体は図-2に示すような断面を有する複鉄筋長方形梁で、モーメントスパンを40cm、シヤースパンを100cmとした。曲げ載荷試験時の測定は荷重、変位と、引張及び圧縮縁のコンクリートひずみ、鉄筋ひずみとした。モーメントスパン内にパイゲージ(検長50mm)を鉄筋位置に沿って5個設置すると共に、目視によるひび割れ観察を併用して行い、ひび割れ幅の経時変化を測定した。

3. 実験結果

3.1 材料試験の結果

試験に用いた各コンクリートの圧縮強度、曲げ強度、引張強度の試験結果を表-4に示す。圧縮強度はいずれのコンクリートも33MPa～37MPaの範囲にあり大きな差はない。ただし、圧縮応力-ひずみ曲線の最大耐力以降の下降域は軽量コンクリートが急激に低下するのに対し、繊維補強コンクリートが緩やかに低下している。また、ヤング係数は軽量1種が18GPaに対し、その他は14～15GPa程度である。超軽量コンクリートに比べて、ビニロン及び炭素繊維補強コンクリートの方がわずかにヤング係数の値が高いようであるが、これは繊維の効果というよりは比重がやや大きいためと考えられる。一方、曲げ強度は軽量1種、超軽量コンクリートに比べ、繊維補強コンクリートの強度増加が大きく、ビニロン繊維補強超軽量コンクリートで6～6.5MPa、炭素繊維補強コンクリートで7～10MPaとなっている。曲げ強度試験におけるひび割れ発生強度は荷重変形曲線から判断すると、約2.5～3.0MPaである。これに対し、純引張試験では、純引張強度は軽量1種、超軽量、繊維補強超軽量コンクリートのいずれも大きな差は認められない。ただし、図-3に示す純引張時の応力-ひずみ関係から明らかなように、ビニロン及び炭素繊維補強超軽量コンクリートでは最大荷重(引張強度)に達した後、ある程度の応力を維持したまま変形が増加しており、一般に鋼繊維補強コンクリートで得られるような引張応力-ひずみ関係が得られた。また、ビニロン及び炭素繊維補強超軽量コンクリートを比較すると、炭素繊維の方が最大荷重直後の耐荷力の低下が少ないのに対し、ビニロン繊維のものは変形が大きなレベルでもわずかではあるが、ある程度の耐荷力を示している。

表-4 コンクリートの材料試験結果

種類	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)	純引張強度 (MPa)	比重
軽量1種	34.1	18.6	3.53	2.32	1.92
超軽量	32.5	13.9	2.55	2.16	1.39
VFRC-1	34.2	14.7	6.00	2.46	1.53
VFRC-1.5	33.8	15.3	6.47	2.50	1.57
CFRC-0.75	36.8	14.3	7.74	2.51	1.49
CFRC-1	36.8	14.8	10.01	2.65	1.52

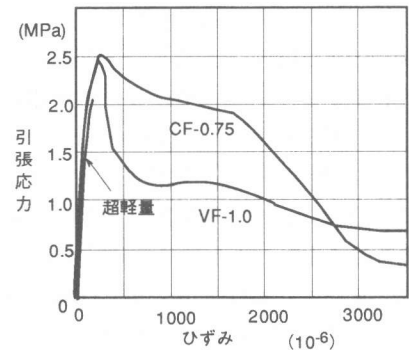


図-3 純引張時の応力-ひずみ関係

3.2 梁試験体の曲げ試験結果

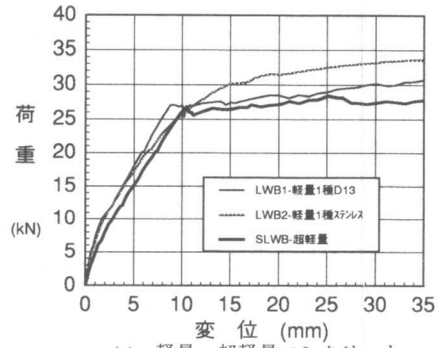
表-5に曲げ載荷試験の結果を示す。また図-4に各試験体の代表的な荷重-変位曲線を示す。図-4(a)はコントロール用の軽量1種LWB1(D13)とLWB2(ステンレス筋)及び超軽量コンクリートのSLWBの荷重-変位関係を比較したものであるが、SLWBの方がコンクリートのヤング係数が小さいために、変形がやや大きくなる傾向にある。ひずみゲージにより判定されたひび割れ発生荷重は表-

表-5 梁試験体の曲げ荷重試験結果

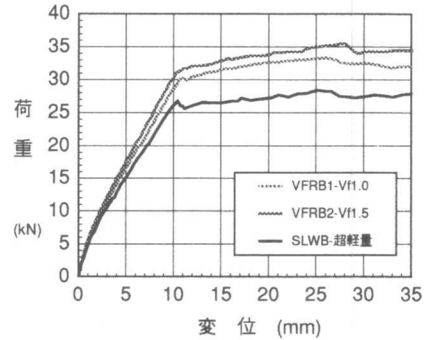
名称	コンクリート種類	ひびわれ発生荷重 (kN)	ひびわれ間隔 (mm)	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)
LWB-1	軽量1種	5	120	27.0	30.7
LWB-2		5	120	—	33.6
SLWB	超軽量	4	80~100	26.5	28.6
VFRB-1	VFRC	8	20~50	30.1	36.1
VFRB-2		8	20~40	31.6	33.7
CFRB-1	CFRC	12	40~60	—	40.1
CFRB-2		15	40~60	—	39.2

5に示すようにLWB1、LWB2が5kNでSLWBが4kNであり、これは自重を考慮した引張縁のコンクリート応力に換算すると、それぞれ2.9MPa及び2.4MPaとなり、材料試験結果とほぼ対応している。ひび割れ発生に伴う部材剛性の低下が明確となるのはLWB1が9~10kN、SLWBが7kN程度で超軽量コンクリートの方がわずかに低いが、その後の部材剛性（曲線の傾き）は両者ともほぼ同じである。一方、LWB1(D13)とLWB2（ステンレス筋）の比較では荷重が17~20kNまでの範囲ではほぼ同じ挙動を示すが、ステンレス鉄筋の特性を反映してLWB2の試験体では20kN以上の領域で変形がLWB1より大きくなると共に、明確な降伏点を示さずに変形及び荷重が増加している。最大荷重はLWB2の方がLWB1より3kN程大きくなった。

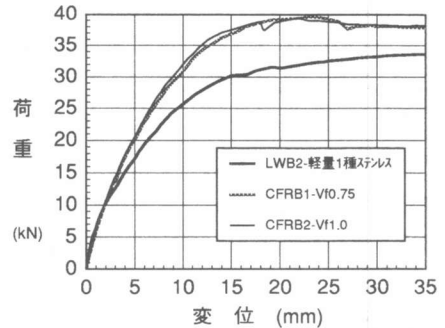
図-4(b)は超軽量SLWBとビニロン繊維補強VFRC-1、VFRC-2の荷重-変位関係を比較したものであるが、VFRC試験体はいずれもひび割れ発生に伴う部材剛性の低下が少なくなっている。これは、ひび割れ断面における繊維の架橋作用による応力負担によって中立軸の上昇が抑えられること、ひび割れ分散性の向上（ひび割れ間隔：SLWB;約10cm、VFRB-1及びVFRB-2;4~5cm）により、ひび割れ区間のコンクリートの引張剛性が大きくなったことなどによると考えられる。鉄筋降伏時の変位はいずれの試験体もほぼ同じであるが、耐荷力はVFRB-1で3kN、VFRB-2で4kN程度大きく上がっている。鉄筋が降伏後、変形が進行し変位が26~28mmに達した時点でコンクリートの圧壊が認められた。圧縮鉄筋が存在するため、いずれの試験体も耐荷力の低下はほとんどなく変位のみが進行している。軽量コンクリートや超軽量コンクリートでは、圧縮部のコンクリートの一部が剥離する現象がみられたが、繊維補強コンクリートでは繊維の拘束効果により圧壊部分でもコンクリートの一体性は失われなかった。しかし、鋼繊維補強コンクリートについても報告されているように、曲げ部材の靱性増加には圧縮鉄筋の効果が大きく、繊維の効果は副次的なものとなる。



(a) 軽量・超軽量コンクリート



(b) ビニロン繊維補強超軽量コンクリート



(c) 炭素繊維補強超軽量コンクリート

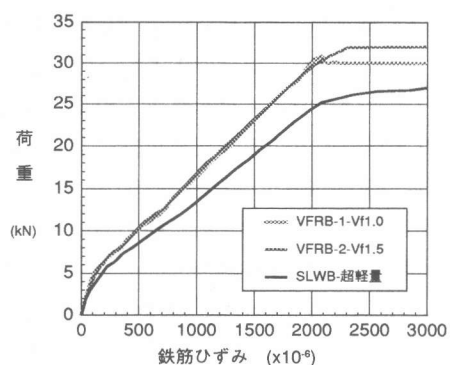
図-4 各はり試験体の曲げ荷重-変位関係

図-4(c)は軽量LWB2と炭素繊維補強CFRC-1、CFRC-2の荷重-変位関係を比較したものである。VFRB試験体同様にひび割れ発生に伴う部材剛性の低下がかなり少なくなっており、16kN～20kNまではほぼ直線的に荷重が増加している。CFRB試験体のひび割れ発生はひずみゲージによる測定では8kN～12kNであるが、その後のひび割れの進展は繊維の存在によりかなり押さえられていることが荷重変位関係からも推測することができる。また、ステンレス鉄筋を用いる場合、明確な降伏点を示さず通常の鉄筋を用いた場合に比べ、荷重が増加するに従って変形が増加する傾向にあるが、繊維の存在はこうした部材剛性の低下を防ぐのに有効に働いている。また、炭素繊維補強超軽量コンクリートはりの終局耐力は軽量のLWB-2や超軽量のSLWBに比べて6～10kN程度大きくなっている。

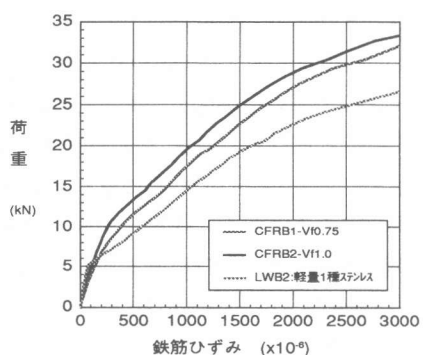
図-5(a)(b)にVFRB及びCFRB試験体の引張鉄筋ひずみと荷重関係の比較を示す。図-5に示されるように、繊維補強超軽量コンクリートでは鉄筋ひずみがコントロール試験体に比べ小さくなっている。VFRBの場合は、繊維量による差は大きくなく、VFRB-1、VFRB-2試験体の両者とも鉄筋ひずみはSLWBに比べ200～400 $\times 10^{-6}$ 程度小さくなっている。このひずみ差に相当

する部分をビニロン繊維が応力分担していると考えられる。この負担力は、荷重が大きくなるほど増加する傾向にある。CFRBの場合もVFRBと同様な傾向を示しており300～1000 $\times 10^{-6}$ 程度のひずみが小さくなっているが、VFRBと比べると比較的荷重が低いレベルでも繊維の負担力が大きいと考えられる。これは、炭素繊維補強超軽量コンクリートの純引張応力-ひずみ関係でひずみが500～2000 $\times 10^{-6}$ の範囲でビニロン繊維のものより荷重分担力が大きくなっているためと考えられる。一方、ひび割れ幅の変化は試験体の種類によって若干の差が見られるが、ほぼ鉄筋ひずみに比例しており、500 $\times 10^{-6}$ の鉄筋ひずみに対し0.04～0.06mm程度、1000 $\times 10^{-6}$ の鉄筋ひずみに対し約0.1mm程度のひび割れ幅に対応している。CFRB2等の試験体ではひび割れ幅はこれよりも小さくなる傾向にあった。表-5からも明らかなようにVFRBの方がCFRBに比べひび割れ間隔は小さくなっており、ビニロン繊維の付着特性は良好なことが窺われるが、炭素繊維の方が繊維のヤング係数が大きいために、ひび割れ幅の抑制には効果的であったものと考えられる。使用状態におけるひび割れ制御が重要となる部材では、繊維補強コンクリートを用いることにより使用荷重レベルを上げることが可能である。

以上の結果から明らかなように、複鉄筋の曲げ部材については超軽量コンクリートを繊維補強することにより、特に使用状態における荷重レベルの部材剛性の改善やひび割れ分散性、制御等に効果があることが認められる。また、終局荷重については繊維の添加により10～25%上昇することが明らかになった。部材の使用状態で繊維の補強効果を発揮させるためには、繊維が効果を期待する荷重レベルに相当するコンクリートのひずみ領域で補強効果を示す必要がある。



(a)ビニロン繊維補強軽量量コンクリート



(b)炭素繊維補強軽量量コンクリート

図-5 曲げ荷重-鉄筋ひずみ関係の比較

3.3 繊維補強RCはりの曲げ挙動の算定

繊維補強コンクリートを用いたRC部材では、コンクリートはひび割れ発生後も引張抵抗性を有しており、これを無視することは部材設計において断面力を過小評価し、正確な部材の挙動を予測できない。ここでは、繊維と補強鉄筋の相互作用を正確に評価するために、要素分割法を用いて部材断面の抵抗モーメントを算定することとした。要素分割法は梁部材断面を微小区間に分割し、各要素のひずみ分布から対応する応力を求め、断面の釣り合いから部材の抵抗モーメントを求める方法である。軽量

コンクリートと超軽量コンクリートの場合、コンクリートの引張剛性を考慮して解析を行った。また、ビニロン及び炭素繊維補強超軽量コンクリートの圧縮、引張時の応力-ひずみ関係と鉄筋、ステンレス筋の引張応力-ひずみ曲線は材料試験の実験結果を近似したものをを用いた。この方法によって計算された荷重-変位関係の実験値と計算値の比較を図-7に示す。計算値は全体的に実験結果に良く一致していることがわかる。この計算方法では荷重-変位関係のような部材の挙動の予測ばかりでなく、鉄筋ひずみや繊維の引張分担力の結果も同時に得られるので部材の設計に有効に活用できるものと考えられる。終局耐力の簡便な計算方法は、鋼繊維コンクリートに対してHenager等 [2] によって提案されているが、繊維の効果を l/d 及び付着の効果を考慮したパラメータの関数として求め、従来のRC部材の曲げ耐力算定式に付加する方法が取られている。このため彼らの式をビニロン繊維や炭素繊維の場合に単純に適用するには問題がある。むしろ、繊維補強コンクリートの純引張時のストレスブロックを単純化して求める方が妥当であると思われるが、適切な材料特性の評価方法やそのモデル化については今後検討を重ねてゆく必要がある。

4. まとめ

本研究では比重1.0以下の超軽量粗骨材を用いた超軽量コンクリートをビニロン繊維及び炭素繊維で補強したコンクリートを用いたRC部材の曲げ載荷試験を行い、部材の変形特性及びひび割れ性状に及ぼす繊維の効果について検討した。その結果、曲げ部材については超軽量コンクリートを繊維補強することにより、特に使用状態における部材剛性の改善やひび割れ分散性、ひび割れ幅の制御等に効果があることが認められた。また、終局荷重については繊維の添加により10～25%上昇することが確認された。繊維補強超軽量コンクリート部材の曲げ挙動は要素分割法によってかなり精度良く求めることができることが明らかになった。終局強度の簡易な設計式については今後検討する必要があるが、部材の使用状態で繊維の補強効果を発揮させるためには、効果を期待する荷重レベルに相当するひずみ領域で補強効果を示すような繊維補強とすることが重要であることが確認された。

参考文献

- [1] 柿沢等：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、コンクリート工学年次論文報告集、1997.6
- [2] ACI Committee 544 report: Design Considerations for Steel Fiber Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Sept-Oct., 1988, pp.563-580.

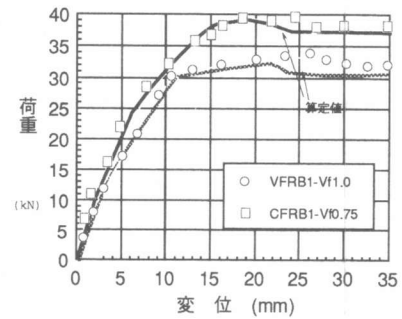


図-6 曲げ荷重-変位曲線の算定値の比較