

[83] 高性能な鋼繊維補強コンクリートと鉄筋コンクリートはりへの利用

正会員 小 柳 治 (岐阜大学工学部)

正会員 〇六 郷 恵 哲 (岐阜大学工学部)

正会員 内 田 裕 市 (岐阜大学大学院)

正会員 岩 瀬 裕 之 (岐阜大学大学院)

1. まえがき

鋼繊維補強コンクリートに関してこれまでに数多くの研究が行われ、その特性の解明もかなりの程度まで進み、また施工例も年々増加している。しかしながら、今後さらに鋼繊維補強コンクリートの利用を拡大するためには次の2つの課題について検討する必要があると考えられる。その1つは経済性であり、鋼材量をできるだけ低減させることである。すなわち通常の鋼繊維補強コンクリートと同様の性能を持ちながら鋼繊維混入量の少ないコンクリートを開発する必要があると考えられる。もう1つの課題は高性能化である。曲げ強度ならびに引張強度が高く靱性に富むという鋼繊維補強コンクリートの特性をなお一層高めることによって利用範囲を広げる必要があると考えられる。

本研究は後者の課題をとりあげ、高曲げ強度と高靱性を有する高性能な鋼繊維補強コンクリートを開発することを目的として、このようなコンクリートを製造するために必要な条件を明らかにすることを試みたものである。また高性能な鋼繊維補強コンクリートをRCはりとして利用した場合のはりの破壊性状についても検討を行った。

2. 実験方法

(a) 概要 高曲げ強度と高靱性を有する鋼繊維補強コンクリートを得るためには、マトリックスとなるコンクリート自体の強度を高めるとともに鋼繊維が受けもつことのできる荷重を大きくする必要があると考えられる。

本実験では、マトリックスとなるコンクリートの強度を高めるために高性能減水剤を用い水セメント比を小さくした。また、鋼繊維が受けもつ荷重を大きくするため、鋼繊維の混入量を増やすとともに断面積の大きい繊維を用いた。すなわち、本実験では、アスペクト比の小さい各種の形状・寸法をした鋼繊維を最大限混入し、鋼繊維補強コンクリートの強度ならびに靱性におよぼすそれらの効果について検討した。

さらにRCはりの試験においては、圧縮靱性の大きい鋼繊維補強高強度コンクリートをRCはりに利用した場合のはりの破壊性状を、高強度コンクリートのRCはりおよび鋼繊維補強普通強度コンクリートのRCはりの破壊性状と比較検討した。

(b) 鋼繊維補強コンクリート供試体と試験方法 マトリックスを高強度にして各種の形状・寸法の鋼繊維を混入した鋼繊維補強高強度コンクリート8種(D~Kシリーズ)、およびこれらと比較するための普通強度コンクリート(Aシリーズ)、高強度コンクリート(Bシリーズ)、鋼繊維補強普通強度コンクリート(Cシリーズ)の計11種類について試験した。セメントはすべて早強ポルトランドセメントを使用した。細骨材には比重2.59~2.60 F.M.2.76~2.85の川砂を使用し、粗骨材には比重2.59~2.62の砕石を使用した。なお、比重等が一定でないのは入手時期の異なる骨材を使用したためである。粗骨材の最大寸法は15mmとした。混和剤は、BおよびD~Kシリーズには高性能減水剤を、Cシリーズには通常の減水剤を使用した。コンクリートの配合を表-1に示し、鋼繊維の詳細を表-2に示す。なお、E~Kシリーズの鋼繊維混入率は、予備実験の結果から定めた。鋼繊維のアスペクト比が小さい場合(F~Kシリーズ)には練り混ぜ時にファイバーボールはまったく生じなかったが、混入量が増大するにつれてセメントペースト分が不足する傾向にあった。

曲げ試験には10×10×40cmの角柱供試体を、圧縮試験にはφ10×20cmの円柱供試体を用いた。同一試験条件に対しては原則として5個の供試体を用い、結果はこれらの平均値によって示した。材令は原則として2週間と

し、試験時まで水中養生を行った。圧縮試験では、検長 18 cm で計測した圧縮変位（変形）と荷重との関係を X-Y レコーダに記録した。曲げ試験ではスパン 30 cm で 3 等分点に載荷し、載荷点直下の変位（たわみ）と荷重との関係を X-Y レコーダに記録した。

(c) RC はり供試体と試験方法 鋼繊維補強高強度コンクリートの RC はり（HF シリーズ）、鋼繊維補強普通強度コンクリートの RC はり（NF シリーズ）および高強度コンクリートの RC はり（HP シリーズ）をそれぞれ 2 体ずつ、計 6 体の RC はりを作成した。コンクリートの配合を表-1 に併記する。使用した主鉄筋はいずれのはりも高強度鉄筋（ $\phi 11\text{mm}$, $\sigma_{sy}=7400\text{ kgf/cm}^2$ ）であり、鉄筋比はすべて 2.4 % とした。いずれのはりにもせん断破壊をしないようにせん断スパンにスターラップを配筋した。図-1 に RC はりの形状寸法ならびに載荷位置を示す。試験は、ある変位または荷重まで載荷を行い除荷する過程を繰返す漸増繰返し載荷によった。

3. 鋼繊維補強高強度コンクリートの強度と靱性

(a) 強度 曲げ強度ならびに圧縮強度試験の結果を表-3 に示す。通常の鋼繊維補強コンクリートである C シリーズの曲げ強度は普通コンクリート（A シリーズ）のほぼ 1.5 倍であり、またマトリックスとなるコンクリートの強度だけを高くした D シリーズの曲げ強度も高強度コンクリート（B シリーズ）のほぼ 1.5 倍である。このことから、通常の鋼繊維を 2 % 程度混入した場合には、マトリックスコンクリートの強度を高めても曲げ強度の増加率は大差ないことがわかる。D シリーズと E シリーズでは、鋼繊維の形状は異なるが、曲げ強度に差はみられなかった。

一方、マトリックスを高強化するとともに鋼繊維のアスペクト比を小さくして混入率を高めた F, H, I, J シリーズでは、 200 kgf/cm^2 ないしそれ以上の曲げ強度が得られた。特に H シリーズでは 253 kgf/cm^2 という高い曲げ強度が得られた。これは繊維混入率が高いことに加え、鋼繊維の断面積が大きくかつ繊維長が長いために繊維とコンクリートとの間に十分な付着力が得られるとともに繊維のもつ強度が十分生かされたためと考えられる。また、 $\phi 0.7 \times 3.0\text{ mm}$ の鋼繊維を使用した F シリーズでは 4 % の混入率で 220 kgf/cm^2 の曲げ強度が得られた。これら

らの結果から高い曲げ強度をもつコンクリートを得るためには、マトリックスを高強度化し 太い鋼繊維を多量に混入する方法が有効なことがわかる。これに対して 非常に短い鋼繊維を用いた K シリーズにおいては、混入率が高いにもかかわらずあまり高い曲げ強

表-2 鋼繊維の種類

Series	Size d x ℓ (mm)	Aspect Ratio	Shape
C, D, HF, NF	0.5 x 30	60	indent
E	0.5 x 30	60	crimped
F	0.7 x 30	43	crimped
G	0.5 x 20	40	crimped
H	1.0 x 40	40	indent
I	1.0 x 40	40	straight
J	1.0 x 30	30	indent
K	0.5 x 10	20	crimped

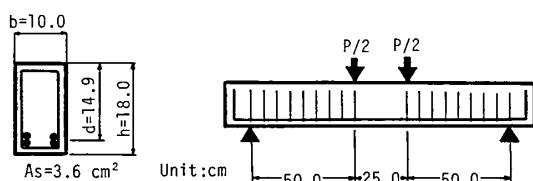


図-1 RC はりの形状

表-1 コンクリートの配合

Series	Water-Cement Ratio	Sand-Aggr. Ratio	Fiber Content (%)	Unit Weight (kg/m³)					Admixture (Cement x %)	Slump (cm)
				Water	Cement	Sand	Gravel	Fiber		
A	0.52	0.51	-	182	344	892	885	-	-	12
B	0.32	0.49	-	166	527	827	895	-	3.0*	13
C	0.50	0.51	2.0	210	420	824	820	160	0.25**	12
D	0.28	0.50	2.0	177	639	767	763	159	3.0*	5
E	0.28	0.50	2.0	177	639	769	763	157	3.0*	6
F	0.28	0.53	4.0	183	653	764	673	312	4.0*	2
G	0.28	0.55	5.0	187	668	769	636	393	5.5*	0
H	0.28	0.56	6.0	189	674	766	593	469	5.0*	1
I	0.28	0.56	6.0	189	675	767	593	470	5.0*	0
J	0.28	0.56	6.0	189	675	767	593	470	5.0*	6
K	0.28	0.60	8.0	197	706	769	501	628	5.0*	11
HF	0.28	0.50	2.0	176	639	764	761	157	3.0*	6
HP	0.28	0.38	-	154	553	647	1052	-	3.0*	22
NF	0.54	0.69	2.0	184	351	1074	481	152	1.0**	8

*Pz.NL-4000

**Pz.No.5L

表-3 試験結果

Series	Flexural Strength σ_b (kgf/cm²)	Compressive Strength σ_c (kgf/cm²)	Absorbed Energy in Flexure (kgf.cm)				Absorbed Energy in Compression (kgf.m)			
			W_{bp}	W_{bq}	W_{bq}/W_{bp}		W_{cp}	W_{cq}	W_{cq}/W_{cp}	
A	64 (4.9)	440 (3.3)	5.2	11.6	2.2		9.8	21.1	2.2	
B	109 (5.8)	847 (4.5)	9.0	8.6	0.96		19.7	31.8	1.6	
C	109 (8.1)	488 (3.3)	72.0	446.	6.2		12.9	74.8	5.8	
D	156 (7.1)	930 (2.2)	144.	684.	4.8		25.6	86.0	3.4	
E	158 (6.6)	903 (2.3)	49.5	913.	18.4		28.6	142.	5.0	
F	220 (11.8)	1014 (3.2)	243.	1610.	6.6		41.8	275.	6.6	
G	190 (15.0)	1055 (2.9)	70.5	1310.	18.6		50.3	308.	6.1	
H	253 (15.2)	1017 (3.3)	289.	2380.	8.2		49.4	225.	4.6	
I	219 (7.8)	1015 (3.2)	157.	2130.	13.6		49.3	122.	2.5	
J	204 (10.4)	1001 (1.7)	158.	1480.	9.4		43.1	300.	7.0	
K	159 (9.5)	952 (1.7)	11.5	508.	44.1		28.6	132.	4.6	

(): Coefficient of Variation

度は得られなかった。これは繊維長が短いために十分な付着力を得られなかったためと考えられる。

Cシリーズの圧縮強度はAシリーズの約1.1倍であり、D,Eシリーズの圧縮強度もBシリーズの約1.1倍であった。すなわち、鋼繊維混入率が2%程度の場合、圧縮強度に対する鋼繊維の混入効果は1割増し程度であった。また、鋼繊維の混入率を高くしたF～Jシリーズの圧縮強度は、混入率が2%のD,Eシリーズの約1.1倍であり、このことから、圧縮強度に対する鋼繊維混入率の増加の効果が小さいことがわかる。

(b) 靱性 本研究においては、曲げあるいは圧縮荷重下におけるコンクリートの靱性を、最大耐力点および最大耐力点以降に耐力が最大耐力の $1/3$ に低下した点にいたるまでの吸収エネルギーによって評価することとした。吸収エネルギーは荷重変位曲線によって囲まれる面積から算定した。最大耐力点および耐力が最大耐力の $1/3$ まで低下した点に対応する吸収エネルギーを、曲げ試験の場合にはそれぞれ W_{bp} , W_{bq} とし、圧縮試験の場合にはそれぞれ W_{cp} , W_{cq} とする。

各シリーズの曲げ強度ならびに圧縮強度試験時の荷重変位曲線を図-2～5に、Fシリーズを基準として示す。吸収エネルギー W_{cp} , W_{cq} , W_{bp} , W_{bq} およびエネルギー比 W_{cq}/W_{cp} , W_{bq}/W_{bp} は表-3に示す。

まず曲げ靱性について、通常の鋼繊維補強コンクリートであるCシリーズを基準として比較検討する。マトリ

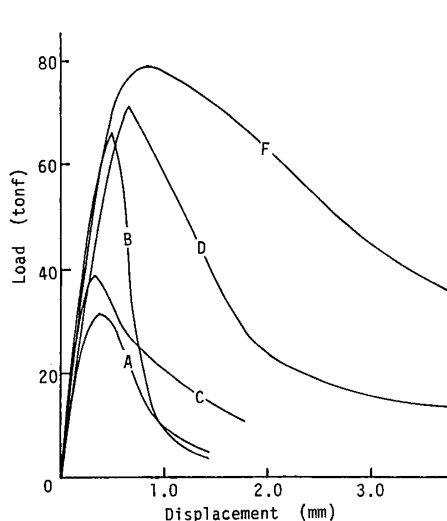


図-2 各種コンクリート圧縮供試体の荷重変位曲線

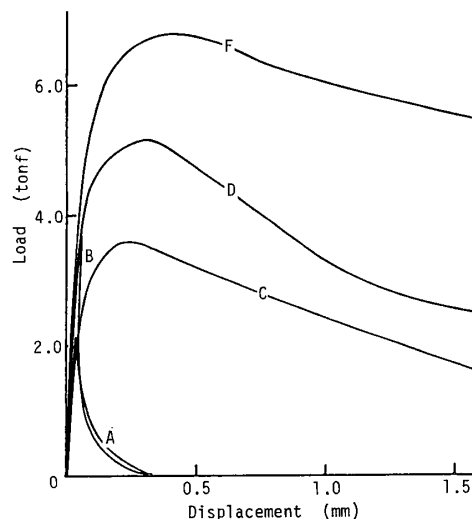


図-4 各種コンクリート曲げ供試体の荷重変位曲線

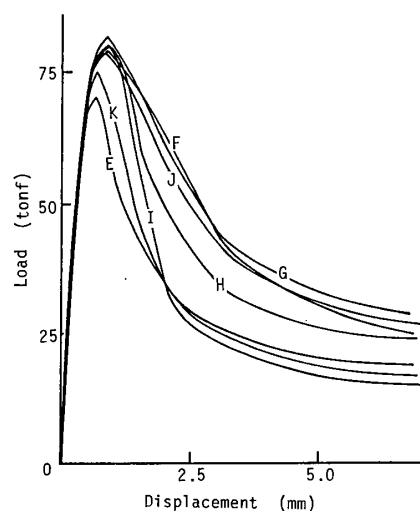


図-3 鋼繊維補強高強度コンクリート圧縮供試体の荷重変位曲線

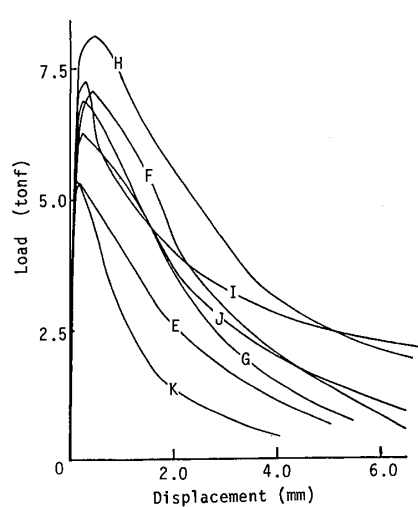


図-5 鋼繊維補強高強度コンクリート曲げ供試体の荷重変位曲線

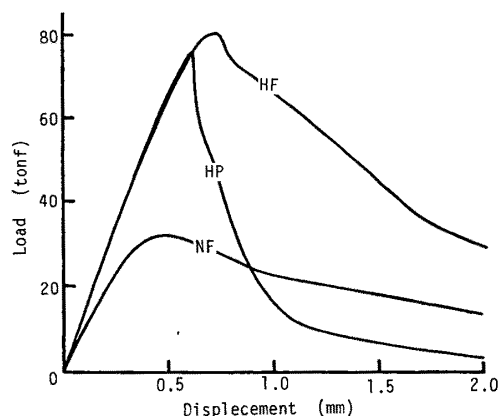


図-6 R Cはりに使用したコンクリートの圧縮荷重変位曲線(φ10×20 cm)

ックスを高強度コンクリートとした鋼繊維補強高強度コンクリートのE～Jシリーズでは、荷重変位曲線の形状からも明白のように、 W_{bq} はCシリーズに比べ飛躍的に増大した。とくにH、Iシリーズでは W_{bq} はCシリーズの5倍以上となった。エネルギー比 W_{bq}/W_{bp} は最大耐力点以降に耐力が急激に失われるかどうかを示すパラメタ¹⁾の1つと考えられるが、この値も鋼繊維補強高強度コンクリートのE～JシリーズではCシリーズより大きく

なっており、これらのコンクリートが最大耐力点以降に耐力の低下の度が小さくねばり強いことを示している。

一方、E～Jシリーズの圧縮吸収エネルギー W_{cp} 、 W_{cq} は、曲げ吸収エネルギー W_{bq} の場合と同様に、Cシリーズに比べ飛躍的に増大した。しかしながら、E～Jシリーズの圧縮破壊時のエネルギー比 W_{cq}/W_{cp} は、通常の鋼繊維補強コンクリートであるCシリーズのものと同程度であった。

4. 鋼繊維補強高強度コンクリートを使用したRCはりの破壊性状

図-6に、使用したコンクリートの圧縮試験時の荷重変位曲線を示す。表-4には、コンクリートの強度ならびに圧縮吸収エネルギーを示す。

図-7に、各RCはりの荷重たわみ曲線を示す。HPシリーズのRCはりは、最大耐力点付近においてコンクリートの圧壊が急激に進み耐力の低下が生じた。しかしながら、高強度鉄筋と鋼繊維補強高強度コンクリートとを組合わせて使用したHFシリーズのRCはりの場合、最大耐力点以降も大きな耐荷力を維持し、通常のRCはりと同様のねばりのある破壊性状を示した。なお、高強度鉄筋と通常の鋼繊維補強コンクリートとを組合わせて使用したNFシリーズのRCはりは、計算上は過鉄筋ではあったが、最大耐力点以降急激に耐力を失うことなく、かなりねばりのある破壊を生じた。

5. 結論

高性能な鋼繊維補強コンクリートの開発とそのRCはりへの利用について検討し、次の結果を得た。

- (1) 通常の鋼繊維よりも断面積が大きく、アスペクト比が小さい鋼繊維を高い混入率で混入し、マトリックスを高強度コンクリートとすることによって、曲げ強度が200 kgf/cm以上あり、しかも曲げ靱性ならびに圧縮靱性に非常に優れた高性能な鋼繊維補強コンクリートを製造することができた。
- (2) 高強度鉄筋と鋼繊維補強高強度コンクリートとを組合わせて使用することにより、高い耐力を有ししかも通常のRCはりと同様のねばりのある破壊性状を示すRCはり部材が得られた。

《参考文献》 1) 小柳ほか：各種コンクリートの強度とじん性，材料，Vol. 32，No. 353，1983年2月。

表-4 RCはりに使用したコンクリート

Series	Compressive Strength σ_c (kgf/cm ²)	Flexural Strength σ_b (kgf/cm ²)	Tensile Strength σ_t (kgf/cm ²)	Absorbed Energy in Compression (kgf·m)		
				W_{cp}	W_{cq}	W_{cq}/W_{cp}
HF	1024	126.	92.1	30.7	104.5	3.4
HP	957	78.5	55.3	26.0	37.1	1.4
NF	406	99.3	44.0	9.5	44.5	4.5

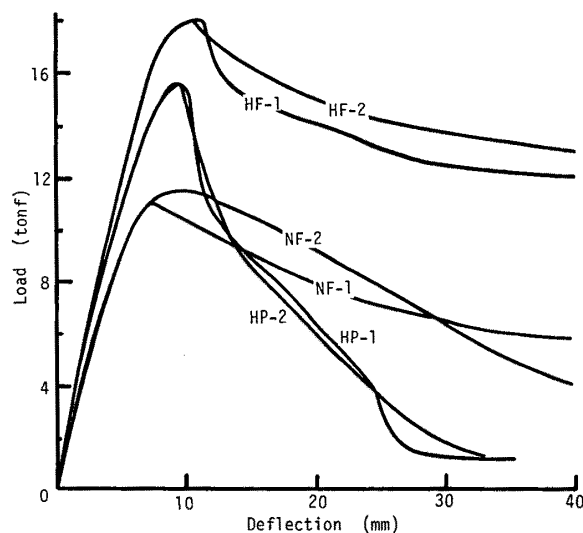


図-7 RCはりの荷重たわみ曲線