

論文 短繊維補強コンクリート用補強材に関する研究

伊藤 朋紀^{*1}・荒川 健^{*2}・栗原 哲彦^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：鉄筋あるいは連続繊維補強材を補強材とした鋼短繊維あるいはアラミド短繊維補強コンクリート（SFRCあるいはAFRC）はりの曲げ破壊性状の特徴と、望ましい破壊性状や材料の組合せについて検討した。通常の鉄筋でSFRCを補強した場合、鉄筋の降伏に伴ってひび割れ幅が拡大するため、鉄筋降伏時の荷重が最大荷重となり、最大荷重時の変位は小さくなった。降伏棚のない鉄筋でSFRCを補強した場合、ひび割れ幅の拡大が遅れ、最大荷重も最大荷重時の変位も大きくなった。AFRCと連続繊維補強材を組合せたはりの破壊性状が、本研究の範囲では、最も優れていた。

キーワード：短繊維補強コンクリート、連続繊維補強材、破壊性状、RCはり

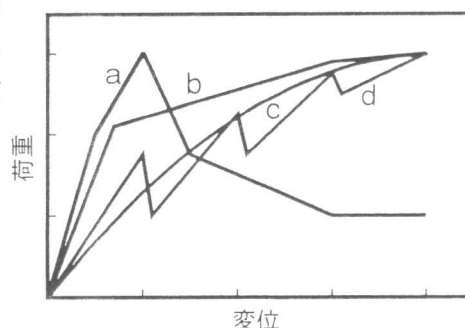
1. はじめに

コンクリートの欠点である脆性的な性質を改善し高靱性化する方法の一つに、鋼短繊維やアラミド短繊維などを混入する方法がある。また、コンクリート用の鉄筋やPC鋼棒の代替として、軽量で強度が高く、耐腐食性に優れた連続繊維補強材が利用され始めている。部材や構造物の耐荷力だけでなく、最大荷重時の前後を含めた破壊性状について関心が高まっている。本研究では、鋼短繊維あるいはアラミド短繊維補強コンクリートを使用し、補強材に通常の鉄筋のほか、降伏現象のない連続繊維補強材や、降伏棚のない鉄筋を補強材としたはり供試体を作製し、その破壊性状の比較検討を行い、短繊維補強コンクリートの補強に適した補強材について検討した。なお、こうした繊維補強コンクリートの用途としては、プレキャスト部材等が考えられる。

2. はり部材の望ましい破壊性状

コンクリート構造物が、地震力等の荷重や経年劣化などによりたとえ破壊する場合でも、人的被害が生じないようにすることが重要と考えられている。このためには、部材や構造物全体の望ましい壊れ方や、部材の破断と構造物全体の破壊の関係等についての検討が必要である。はり部材の場合、せん断破壊ではなく曲げ破壊させることが望ましいと考えられている。さらに、はりが曲げ破壊する場合の望ましい挙動としては、所要の耐荷力を有するだけでなく、一般的に次のようなものが挙げられている。

- ①最大荷重時の変位が大きい
- ②初期剛性が大きい
- ③荷重－変位曲線下の面積（靱性）が大きい
- ④終局にいたるまで荷重が滑らかに増加する
- ⑤最大荷重以降に破断しない



図－1 荷重－変位曲線の比較

図－1には最大荷重および最終変位が等しい4種類の荷重－変位曲線を示す。曲線bは曲線aよりも最大荷重時の変位および荷重－変位曲線下の面積が大きい点で優れている。荷重－変位曲線

*1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 岐阜大学 工学部土木工学科（正会員）

*3 岐阜大学助手 工学部土木工学科、工修（正会員）

*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

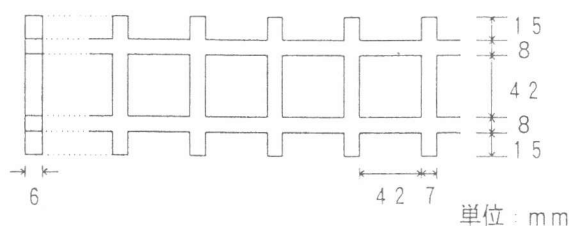
下の面積が大きいことは、その部材が破壊するまでにより多くのエネルギーが消費されることを示している。また、曲線bは曲線cよりも、初期剛性が大きい点で優れている。曲線dは、鋸の歯状に荷重が増減しており、このような荷重および変位の急激な変化は部材に衝撃荷重（例えば、振動など）を生じさせ、構造物全体で考えた場合、他の部材に悪影響を与える可能性がある。以上より、4種類の曲線のうちでは、曲線bが最も望ましい破壊性状を示していると考えられる。荷重の種類や、静定・不静定の関係等の各種の条件を考慮して、部材や構造物の望ましい破壊性状に関する議論を、今後さらに活発に行う必要があると考えられる。

3. 実験概要

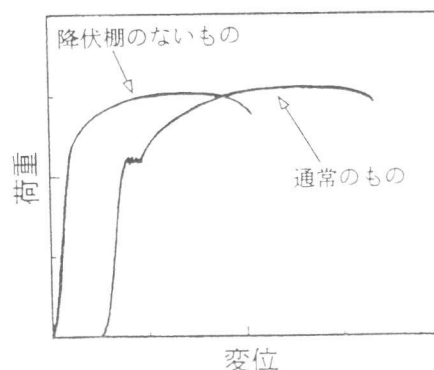
鋼短繊維補強コンクリート（SFRC）およびアラミド短繊維補強コンクリート（AFRC）を用い、補強材に異形鉄筋D10（SD295）と、表－1および図－2に示すような格子状連続繊維補強材（N社製、ガラス繊維）を使用したはり供試体を作製した。また、SFRCの補強材として引張試験機によりいったん降伏させた後取り出した図－3に示すような荷重－変位曲線を示す降伏棚のない鉄筋を使用したはり供試体も作製した。表－2に示すように、供試体は17種類（1種類につき2体、ただしS-AF14のみ1体）で、はり幅を一定としてはり高さを変化させた、あるいははり高さを一定としてはり幅を変化させた供試体を作製した。使用した鋼短繊維（インデント付ストレート鋼短繊維）およびアラミド短繊維の特性を表－3に示す。SFRCは、モルタルに高性能AE減水剤を混入し十分に練り混ぜた後、粗骨材、鋼短繊維の順に投入した。AFRCの場合、粗骨材を混入すると短繊維の分散が悪くなったためモルタル配合とし、モルタルに高性能AE減

表－1 連続繊維補強材の特性

筋番	引張強度 (kgf/cm ²)	引張弾性係数 (kgf/cm ²)	最大荷重 (tonf)	格子間隔 (cm)
G 6	6000	3.0×10^5	2.10	5



図－2 格子状連続繊維補強材の形状



図－3 鉄筋の引張試験時に得られる荷重－変位曲線の概形

表－2 供試体

供試体 シリーズ	コンクリート の種類	補強材 の種類	供試体寸法(cm)			引張鉄筋	
			幅	載荷スパン [モーメントスパン]	高さ	量	比 (%)
S-SF14 S-SF18 S-SF23 S-SF30	鋼	通常の 鉄筋	20	150 [50]	14 18 23 30	3D10	0.92 0.68 0.51 0.38
S-SF-B8 S-SF-B10 S-SF-B14.5			8 10 14.5	150 [50]	18	3D10	1.72 1.37 0.94
YS-SF18 YS-SF30	コンクリート	降伏棚の ない鉄筋	20	150 [50]	18 30	3D10	0.68 0.38
P-SF14 P-SF18			10	150 [50]	14 18	—	—
S-AF14 S-AF18	アラミド	通常の 鉄筋	20	150 [50]	14 18	3D10	0.92 0.68
P-AF8 P-AF14 P-AF18 P-AF23			10	150 [50]	8 14 18 23	—	—
	コンクリート	連続繊維	10	150 [50]	14 18 23	—	—

表－3 短繊維の特性

繊維 の種類	繊維径 円換算 (mm)	繊維 長 (mm)	比重	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
鋼	0.6	30	7.85	1.1×10^4	2.1×10^5
アラミド	0.4	30	1.39	3.0×10^4	7.0×10^5

表－4 コンクリートの配合

供試体 シリーズ	単位量 (kg/m ³)					
	W	C	S	G	F	Ad
S-SF, S-SF-B YS-SF, P-SF	137	492	874	761	156	14.8
S-AF, P-AF	183	652	1304	—	27.0	26.0

セメントC：早強ポルトランドセメント、比重3.12
細骨材S：比重2.59、粗粒率 F.M. 3.21
粗骨材G：比重2.58、粗骨材最大寸法15mm
短繊維F：混入率2%
混和剤Ad：高性能AE減水剤

水剤を混入し十分に練り混ぜた後、アラミド短繊維を投入した。コンクリートの配合を表-4に、強度試験結果を表-5に示す。SFRCおよびAFRCのマトリックスは、繊維との付着を良くするため、高強度にしている。鉄筋を使用したS-SFシリーズ、S-SF-Bシリーズ、YS-SFシリーズ、S-AFシリーズはかぶりを2cmとし、連続繊維補強材を使用したP-SFシリーズ、P-AFシリーズではかぶりを1cmとした。

供試体は試験直前まで、20℃または25℃の恒温室内において湿布養生し、供試体が湿潤状態の下で載荷試験した。図-4に示すように、支点をローラー支持とし、モーメントスパン50cmの3等分点曲げ載荷を行い、荷重および変位を計測した。

表-5 コンクリートの強度試験結果

供試体 シリーズ	強度(kgf/cm ²)			弾性係数 (kgf/cm ²)	材齢 (日)
	圧縮	引張	曲げ		
S-SF	888	89.6	119	4.05×10^5	22
S-SF-B	875	86.7	131	3.92×10^5	23
S-SF-B8	863	90.4	114	3.98×10^5	14
YS-SF, P-SF	975	93.3	124	4.30×10^5	18
P-SF14	902	92.0	119	3.99×10^5	12
S-AF, P-AF18	663	105	148	3.32×10^5	12
P-AF	801	103	156	3.36×10^5	23

4. 実験結果と考察

実験により得られたはりの荷重-変位曲線を、載荷試験後に目視により確認できたはり側面のひび割れ図とともに図-5~9に示す。ひび割れ発生荷重、最大荷重、最終変位(多くの場合補強材の破断点)までの荷重-変位曲線下の面積等を表-6に示す。また、この表における測定荷重は、はりの自重やロードセル、載荷ビーム等の重量を考慮し、補正済みのものである。

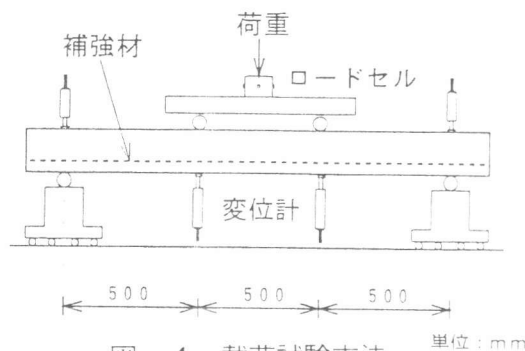


図-4 載荷試験方法

表-6 実験結果

供試体 シリーズ	コンクリート の種類	補強材 の種類	ひびわれ 発生荷重 P _{cr} (tonf)	最大荷重 P _u (tonf)	補強材 の破断 の有無	荷重-変位 曲線下の 面積 A (kgf・m)
S-SF14-1 S-SF14-2 S-SF18-1 S-SF18-2 S-SF23-1 S-SF23-2 S-SF30-1 S-SF30-2	鋼 短繊維 補強 コンクリート	通常の 鉄筋	1.85 2.06 3.85 3.84 6.11 6.43 9.39 9.33	5.40 6.11 8.46 8.88 11.5 11.9 18.4 19.5	破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断	211 250 311 313 353 253 263 250
S-SF-B8-1 S-SF-B8-2 S-SF-B10-1 S-SF-B10-2 S-SF-B14-1 S-SF-B14-2 S-SF-B14-5-1 S-SF-B14-5-2			1.47 1.77 2.42 2.66 3.16 3.26	5.82 5.98 8.46 6.73 7.66 7.41	破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断	298 313 381 381 425 384 384 383
YS-SF18-1 YS-SF18-2 YS-SF30-1 YS-SF30-2	アラミド 短繊維 補強 コンクリート	降伏棚の ない鉄筋	3.66 3.76 11.8 11.5	9.75 9.65 21.7 21.1	破断 破断 破断 破断	141 120 193 150
P-SF14-1 P-SF14-2 P-SF18-1 P-SF18-2		連続繊維	0.78 0.77 1.43 1.79	2.83 2.73 3.32 3.27	破断 破断 破断 破断	67.5 64.2 47.0 39.8
S-AF14-1 S-AF18-1 S-AF18-2	アラミド 短繊維 補強 コンクリート	通常の 鉄筋	2.09 3.04 3.22	6.82 8.08 8.48	破断 破断 破断	303 246 216
P-AF8-1 P-AF8-2 P-AF14-1 P-AF14-2 P-AF18-1 P-AF18-2 P-AF23-1 P-AF23-2		連続繊維	0.39 0.41 1.18 1.22 1.55 1.50 2.77 2.97	1.50 1.51 3.41 3.52 3.85 4.43 5.97 7.18	破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断 破断	75.8 76.6 82.5 101 101 124 124 126

4. 1 鉄筋で補強した供試体

SFRCと通常の鉄筋を使用したS-SFシリーズ(はり高さを变化)、S-SF-Bシリーズ(はり幅を变化)の場合、図-5(a)に示す荷重-変位曲線から分かるように降伏荷重に達した後に急激に荷重が低下しており、はり高さが高いほど、つまり引張鉄筋比が小さいほど、荷重低下の割合が著しい。これは鉄筋の降伏により、それまでに発生していた複数ひび割れのうち、1本のひび割れが急激に拡大するためと考えられる。降伏棚のない鉄筋

はり側面のひびわれ図（載荷試験後）

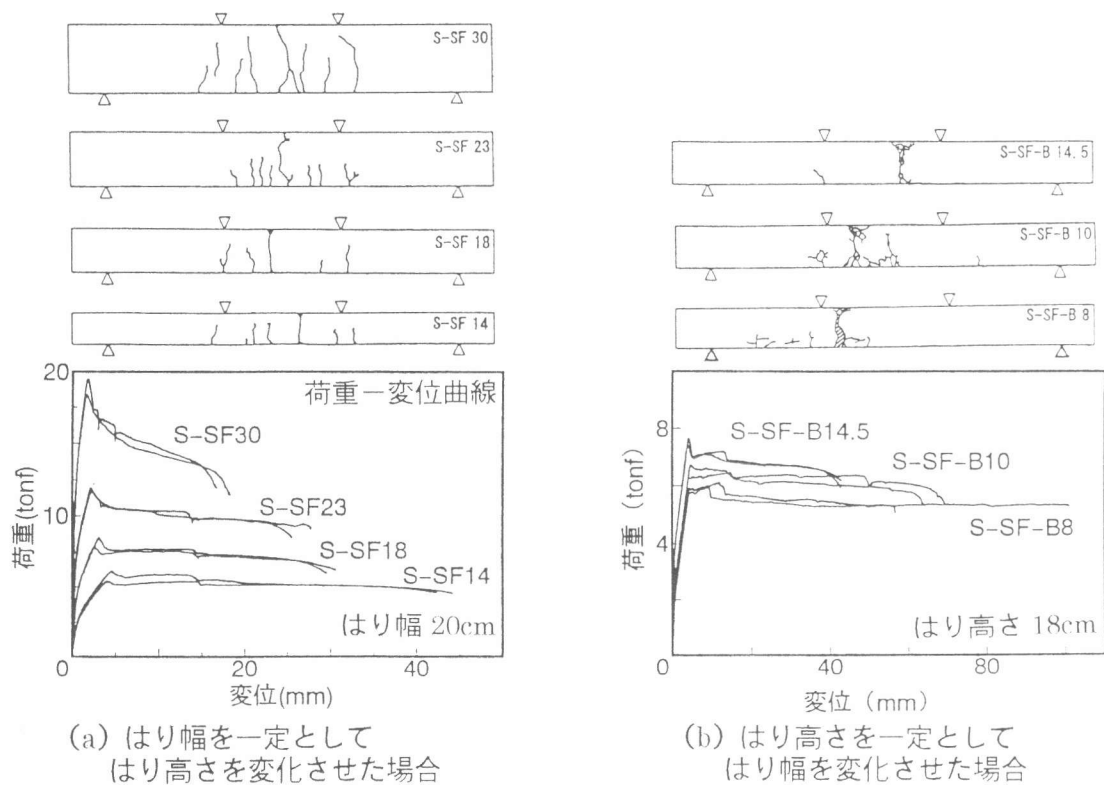


図-5 鉄筋でSFRCを補強したはりの結果

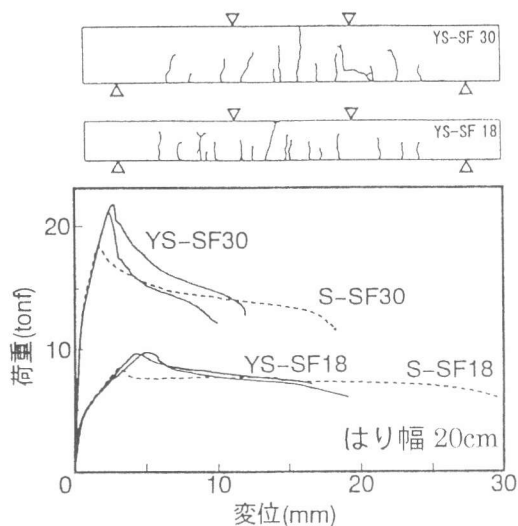


図-6 降伏棚のない鉄筋でSFRCを補強したはりの結果（破線は降伏棚がある場合）

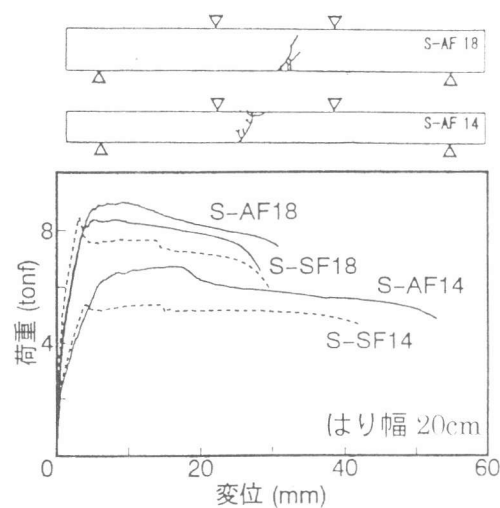


図-7 鉄筋でAFRCを補強したはりの結果（破線はSFRCの場合）

を使用したYS-SFシリーズでは、鉄筋降伏による急激なひび割れ幅の拡大がなく、SFRCの受け持っている引張力の急激な低下が遅れるため、図-6から分かるように同じはり高さのS-SFシリーズのりと比べ、最終変位（鉄筋破断時の変位）は減少するが、最大荷重は10%以上大きくなり、最大荷重時の変位も50%以上大きくなった。鉄筋が破断に至るまでの荷重-変位曲線下の面積は、大部分が鉄筋の塑性変形に消費されるエネルギーに関係づけられるものであり、降伏棚のない鉄筋はいったん塑性域まで荷重を加えられ、エネルギーを吸収しているため、YS-SFシリーズの面積は、同じはり高さのS-SFシリーズと比べて70%程度まで減少している。図-5 (b)

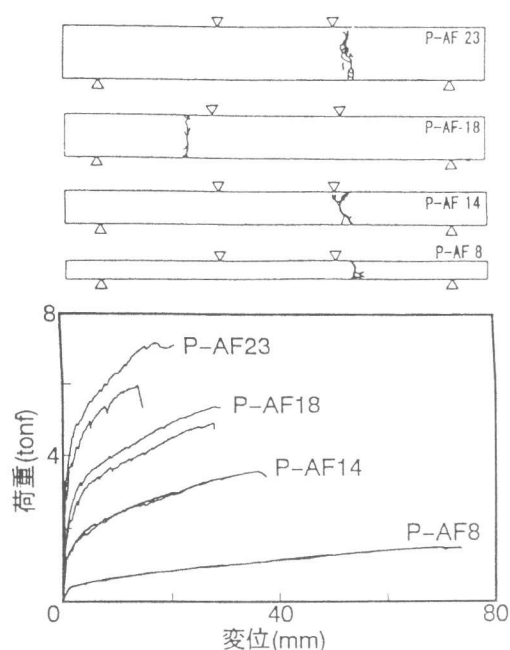


図-8 連続繊維補強材 AFRC を補強した
はりの結果

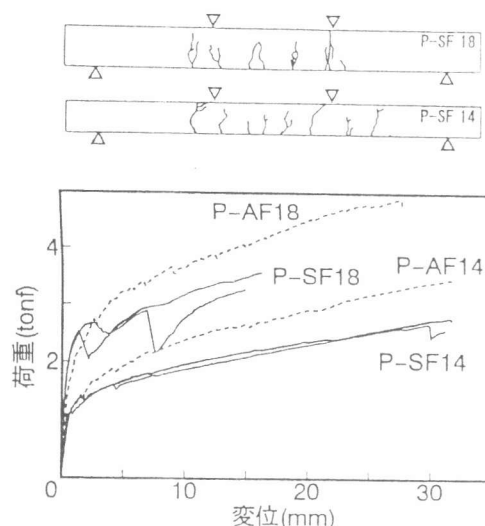


図-9 連続繊維補強材で SFRC を補強した
はりの結果 (破線は AFRC の場合)

に示すようにはり幅を変化させた S-SF-B シリーズでは、S-SF-B8 (引張鉄筋比 $p=1.72$)、S-SF-B10 ($p=1.37$) の場合には、鉄筋降伏後の急激な荷重低下は見られず、特に S-SF-B8 の場合には降伏荷重後も荷重が増加し、最終変位も 100mm 程度まで増大した。したがって、降伏荷重直後の急激な荷重の低下を防ぎ、大きな変形を得るためには、本研究で用いた SFRC の場合、引張鉄筋比を約 1% より大きくする必要があると考えられる。

AFRC と鉄筋を使用した S-AF シリーズでは、図-7 で示すように S-SF シリーズに比べ、最大荷重時の変位は大きくなり、荷重-変位曲線下の面積も増加していた。また AFRC を使用したはりでは、載荷試験中に微細なひび割れが広い範囲にわたって発生しているのが確認されたが、試験後、荷重を除荷するとひび割れは閉じた。このため載荷試験後に目視により確認されるひび割れは少なくなった。

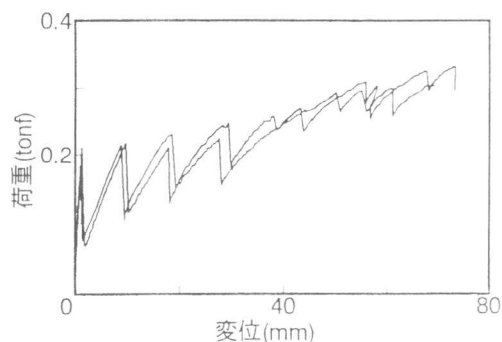
4. 2 連続繊維補強材で補強した供試体

AFRC と連続繊維補強材を使用した P-AF シリーズの場合、図-8 から分かるように荷重-変位曲線は滑らかに単調増加し、最大荷重に達したと同時に補強材が破断するため、最大荷重時の変位は非常に大きくなった。また、図-9 から分かるように SFRC を使用した P-SF シリーズでは、AFRC を用いた P-AF シリーズに比べて、最大荷重および荷重-変位曲線下の面積が小さくなったが、これは鉄筋を使用した供試体においても同様な傾向が見られた。連続繊維補強材は鉄筋に比べ弾性係数が小さく格子部以外の部分の付着が弱いため、補強材の量が少ない場合、特に P-SF18 では、ひび割れが進展するたびに荷重が急激に低下し、P-AF23 においても荷重-変位曲線は細かな鋸の歯状の曲線となった。筆者らは以前に、高強度コンクリートの補強材として連続繊維補強材を使用した場合、図-10 に示すように荷重-変位曲線は鋸の歯状になると報告している [1] が、短繊維補強コンクリートの場合には、適切な量の連続繊維補強材を使用すれば曲線は滑らかになり、望ましい破壊性状を示すと考えられる。

4. 3 短繊維補強コンクリートの補強に適した補強材

短繊維補強コンクリートの補強材として鉄筋を使用した場合、鉄筋の降伏によりひび割れの拡

大が一箇所に集中し、荷重が低下するため、最大荷重時の変位は非常に小さくなった。特にSFRCに降伏棚のある通常の鉄筋を使用した場合には、その傾向が著しい。短繊維補強コンクリートに連続繊維補強材を使用した場合、荷重は補強材が破断するまで滑らかに増加し、最大荷重に達したと同時に補強材が破断するため、最大荷重時の変位が大きく、特にAFRCの場合には、ひび割れが広い範囲に分散し荷重－変位曲線下の面積が大きくなり、より望ましい破壊性状を示したと考えられる。



図－10 高強度コンクリートを連続繊維補強材で補強したはりの荷重－変位曲線 [1]

以上に述べたことから本研究で用いた短繊維補強コンクリートの補強には、連続繊維補強材のように降伏現象がない、引張強度が高い等の性質を持つ補強材が適していると考えられる。今後、同じはり高さの供試体において、補強材に鉄筋を使用した場合と連続繊維補強材を使用した場合の各供試体の最大荷重が等しくなるようにそれぞれ補強材を配置し、変形性状、荷重－変位曲線の形状、荷重－変位曲線下の面積等の検討を行う必要があると考える。

5. まとめ

本研究においては、鉄筋あるいは連続繊維補強材で補強した繊維補強コンクリートはりの曲げ破壊性状の特徴と望ましい破壊性状や材料の組合せについて検討し、次のような結論を得た。

(1) 通常の鉄筋でSFRCを補強したはりの場合、鉄筋の降伏に伴ってひび割れ幅が拡大しひび割れ域における伝達引張応力が急速に減少するため、鉄筋降伏時の荷重が最大荷重となった。したがって、最大荷重時の変位は小さく、鉄筋比が1%未満の場合には最大荷重点後に荷重が急速に低下した。本研究で用いたSFRCの場合、最大荷重点後の荷重の急激な低下を避けるためには、鉄筋比は1%以上が望ましい。

(2) 降伏棚のない鉄筋でSFRCを補強したはりの場合、鉄筋に降伏時の塑性変形がないためにひび割れ幅の拡大が遅れ、降伏棚がある場合に比べ、最大荷重は10%以上大きくなり、最大荷重時の変位も50%以上大きくなった。

(3) 連続繊維補強材でSFRCあるいはAFRCを補強したはりの場合、鉄筋で補強した場合に比べ、最大荷重時に補強材の破断は生じるものの、最大荷重時の変位は2～3倍以上大きくなった。はりの最大荷重時の変位が大きくなる点で、繊維補強コンクリートの補強材としては、鉄筋よりも、降伏棚がない連続繊維補強材の方が優れていた。

(4) 補強材が鉄筋あるいは連続繊維補強材のいずれの場合にも、AFRCの方がSFRCよりも、最大荷重、最大荷重時の変位、補強材破断までの荷重－変位曲線下の面積が大きくなった。材料の組合せについては、AFRCと連続繊維補強材を組合せたはりの破壊性状が、本研究の範囲では、最も優れていた。

参考文献

[1]伊藤朋紀・栗原哲彦・内田裕市・六郷恵哲：格子状連続繊維補強材を用いたコンクリートはりの最小補強材量、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16、No.1、pp.1197-1202、1994。