

論文 マトリクスと繊維の違いが FRCC はりのせん断破壊挙動に及ぼす影響に関する実験的研究

上田 尚史*1・谷口 拓峰*2・鶴田 浩章*3

要旨: マトリクスと補強用繊維の違いが FRCC はりのせん断破壊に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、マトリクス種類、補強用繊維の種類および混入量の違いをパラメータとした FRCC はりの載荷試験を行った。その結果、鋼繊維を混入した FRCC はりのせん断耐力は、マトリクス種類に依らず繊維混入率に伴い増大するのに対して、PVA 短繊維を混入した FRCC はりでは、マトリクスがモルタルの場合にせん断耐力の増加が顕著となることが確認された。また、補強用繊維が FRCC はりのせん断耐力に及ぼす影響は、コンクリート供試体よりもモルタル供試体の方がより顕著であることが確認された。

キーワード: 繊維補強セメント系複合材料, 鋼繊維, PVA 短繊維, せん断破壊, せん断伝達特性

1. はじめに

近年、繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composite, 以下 FRCC) の利用が拡大しつつあり、従来の鋼繊維補強コンクリートに加えて、補強用繊維の種類やマトリクス強度の違いにより種々の FRCC が開発されている。FRCC は、これまで主に補修材料や補強材料として利用されてきたが、材料の引張性能が大幅に向上していることから、それらを有効に活用した構造部材としての適用も検討されている¹⁾。

FRCC を用いた構造部材の設計法に関しては、これまでに土木学会より 3 つの設計指針^{2), 3), 4)}が提示されている。しかし、それらの指針では、それぞれ対象とした FRCC が異なっているため適用範囲が限定されている。さらに、せん断耐力に関する設計式においては、耐荷機構に関する考え方自体もそれぞれ異なったものとなっている。FRCC の構造部材への適用を考える上では、より適用範囲の広い評価手法が求められており、そのためには、FRCC のせん断破壊メカニズムを明らかにする必要があると考えられる。とりわけ、FRCC のせん断伝達挙動において、マトリクスと繊維がそれぞれどの程度貢献しているのかを明らかにすることができれば、数値解析における構成則の開発においても有用な情報を与えることができると思われる。

これまでに、FRCC はりのせん断破壊を対象とした研究は多数行われている⁵⁾。しかし、それらの研究においては、せん断耐力の評価方法に主眼を置いており、必ずしも上述のような、マトリクスや繊維のせん断伝達特性に及ぼす影響を明確にはしていないと思われる。

そこで本研究では、マトリクスと補強用繊維の違いが

FRCC はりのせん断破壊に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、せん断破壊する FRCC はりの載荷試験を行った。FRCC のせん断伝達特性としては、骨材のかみ合い作用と繊維の架橋力が影響していると考えられる。そこで、せん断伝達特性の異なるコンクリートとモルタルをマトリクスとして使用するとともに、繊維の種類や混入量を変化させることで、せん断伝達特性における繊維の架橋力を変化させることを試みた。

2. 使用した FRCC の特徴

2.1 使用材料および配合

本研究では、マトリクスのせん断伝達特性、補強用繊維の種類および混入量の違いをパラメータとして、FRCC はりの載荷試験を行う。そこで、使用する FRCC としては、以下の材料を用いることとした。マトリクスには、粗骨材最大寸法 20mm のコンクリートとモルタルを用いた。補強用繊維としては、寸法は同一で力学特性のみ異なる繊維を使用することとし、本研究では、鋼繊維 (以下、SF) とポリビニルアルコール (以下、PVA) 短繊維を選定した。表-1 に使用した SF および PVA 短繊維の物性を示すが、寸法はほぼ同一であり弾性係数が

表-1 使用した短繊維の物性値

	SF	PVA 短繊維
直径 (mm)	0.62	0.66
長さ (mm)	30	30
密度 (g/cm ³)	7.85	1.30
引張強度 (N/mm ²)	1080	900
弾性係数 (kN/mm ²)	210	23.0
繊維形状	両端フック	直線

*1 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科助教 博士 (工学) (正会員)

*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科

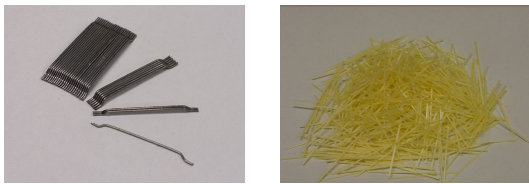
*3 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 FRCC の配合

	繊維混入率 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
				W	C	S	G ^{*2}	SF	PVA
NC	0	50.0	56.1	200	400	904	733	-	-
SF0.5C	0.5		55.7			891	733	39	-
SF1.0C	1.0		55.4			878	730	79	-
SF1.5C	1.5		55.0			866	730	118	-
PVA0.5C ^{*1}	0.5		55.7			891	733	-	6.5
PVA1.0C ^{*1}	1.0		55.4			878	730	-	13
PVA1.5C ^{*1}	1.5		55.0			866	730	-	19.5
NM	0	42.4	-	291	686	1140	-	-	-
SF0.5M	0.5		-			1127	-	39	-
SF1.0M	1.0		-			1115	-	79	-
SF1.5M	1.5		-			1102	-	118	-
PVA0.5M ^{*1}	0.5		-			1127	-	-	6.5
PVA1.0M ^{*1}	1.0		-			1115	-	-	13
PVA1.5M ^{*1}	1.5		-			1102	-	-	19.5

*1 PVA 使用時のみ、AE 減水剤をセメントの 0.31% 添加

*2 粗骨材の最大寸法は 20mm



(a) SF (b) PVA 短繊維

図-1 使用した短繊維

大きく異なる。また、図-1 に使用した SF および PVA 短繊維を示すが、SF は両端がフック加工されているのに対して、PVA 短繊維は直線形状である。

表-2 に、本研究で用いた FRCC の配合を示す。繊維の混入量は、体積混入率で 0, 0.5, 1.0, 1.5% とした。なお、ひび割れ面における骨材のかみ合い作用の影響が繊維混入率の違いに依らないようにするため、コンクリートにおいては繊維を細骨材置換で混入することとし、単位粗骨材体積は一定とした。

なお、FRCC のスランブおよび空気量は、コンクリートにおいては、それぞれ 6.4~11.8cm および 2.7~4.6%、モルタルにおいては、それぞれ 17.2~19.2cm および 1.7~3.6% であった。

2.2 FRCC の力学特性

表-3 に、円柱供試体 (寸法 $\phi 100 \times 200$ mm) の圧縮試験より得られた FRCC の弾性係数 E_c と圧縮強度 f'_c を示す。コンクリート供試体においては SF を混入することにより圧縮強度が若干低下する傾向が見られたが、モルタル供試体においては、繊維の混入による弾性係数ならびに圧縮強度への影響は確認されなかった。なお、いずれの供試体においても、繊維混入率が増加するに従い、ポストピーク領域における荷重低下が緩やかになる傾向が見られた。

図-2 に、切欠きを有する角柱供試体 (寸法 100×100

表-3 FRCC はりの材料特性とせん断耐力

供試体名 ^{*1}	E_c (kN/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	2^*V_{exp} ^{*3} (kN)
NC1 ^{*2}	32.9	47.9	92.4
NC2 ^{*2}	28.2	43.0	80.4
SF0.5C	32.1	44.7	116
SF1.0C	29.4	43.8	144
SF1.5C	27.2	41.1	140
PVA0.5C	30.7	43.4	90.5
PVA1.0C	28.9	42.2	112
PVA1.5C	28.0	44.2	131
NM1 ^{*2}	26.7	55.3	76.2
NM2 ^{*2}	26.6	59.4	78.0
SF0.5M	25.3	53.4	106
SF1.0M	24.1	45.2	115
SF1.5M	25.0	55.9	148
PVA0.5M	25.9	55.6	103
PVA1.0M	25.3	55.2	151
PVA1.5M	26.5	60.1	168

*1 供試体名最後尾の C と M は、コンクリートとモルタルを意味する

*2 NC1, NC2, NM1 および NM2 はそれぞれ繊維混入率 0% の供試体である

*3 V_{exp} はせん断耐力を表す

$\times 400$ mm) の 3 点曲げ試験から得られた荷重-CMOD 関係を示す。図には、各供試体 3 体の結果をそれぞれ示している。図より、いずれの場合においても、繊維混入率が増加するに従ってひび割れ発生後の残存応力が大きくなる傾向にあることが分かる。図-2(a), (b) を比較すると、マトリクスがコンクリートの場合には、SF を混入した場合の方が PVA 短繊維を混入した場合よりも、残存応力が大きくなる結果となっており、その傾向は繊維混入率が大きいほど顕著であった。

一方、図-2(c), (d) より、マトリクスがモルタルの場合には、ひび割れ発生後の残留応力は SF, PVA 短繊維ともに同程度であった。ただし、最大荷重時のひび割れ幅に着目すると、PVA 短繊維を混入した場合は 3mm 程度であったのに対して、SF を混入した場合は 1mm 程度であ

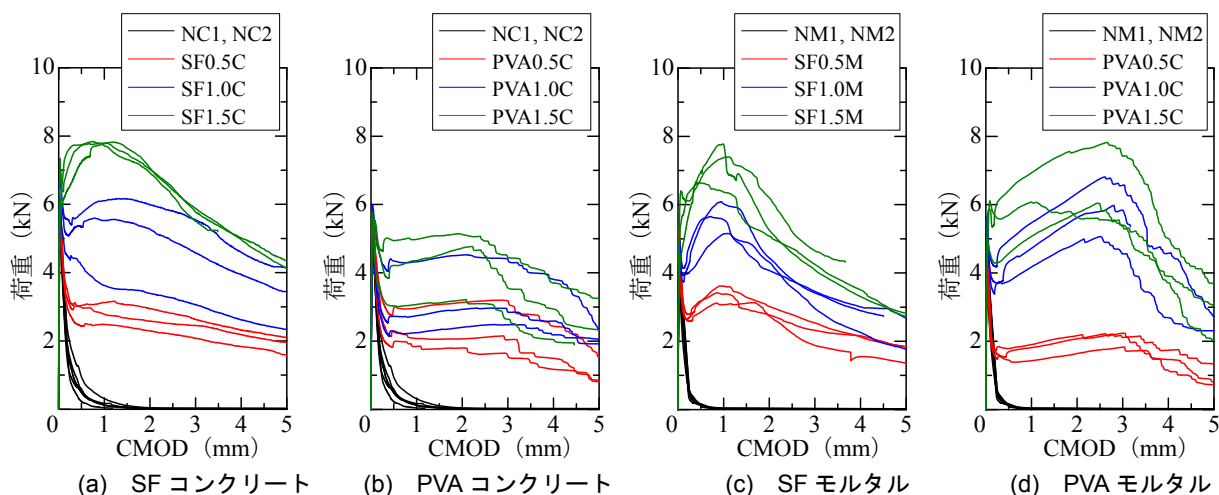


図-2 FRCCの荷重-CMOD関係

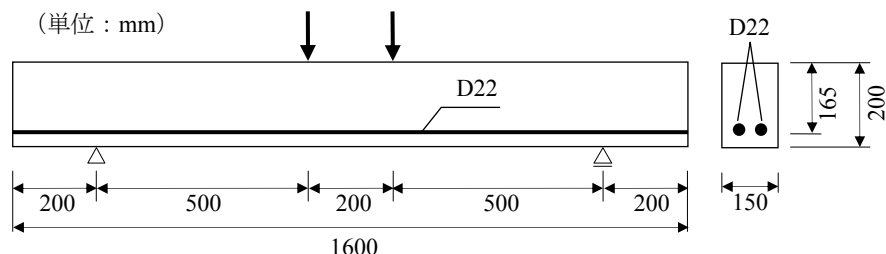


図-3 供試体寸法および配筋図

った。この違いは、繊維そのものの剛性や繊維とマトリクスの付着特性の違いから生じたものと推察される。なお、試験終了後に破断面を確認したところ、SFを混入した供試体では繊維の引き抜けが生じていたのに対して、PVA短繊維を混入した供試体では繊維の破断が生じていたことが確認された。

また、同一の繊維種類に対してマトリクスを変化させた場合で比較すると、SFを混入した場合は、マトリクスがコンクリートの方がモルタルの場合と比較して軟化勾配が緩やかとなっており、わずかではあるが引張軟化特性が優れているといえる。一方、PVA短繊維を混入した場合は、マトリクスがモルタルの方が引張軟化特性は大きく改善される結果となった。

3. FRCC はりのせん断破壊試験

3.1 供試体概要および荷重方法

図-3にFRCCはり供試体の寸法および配筋図を示す。供試体の寸法は、幅 150mm、高さ 200mm であり、主鉄筋として D22 ($f_y=380\text{N/mm}^2$) を上縁から 165mm の位置に 2 本配置した。すなわち、有効高さは 165mm であり、鉄筋比は 3.13% である。鉄筋の端部は、曲げ加工や鋼板等による機械的な定着は行っておらず、支点外側に 200mm の定着区間を設けることで定着を図った。なお、実験を通して鉄筋の引抜けは生じていないことを確認し

ている。荷重は、せん断スパン 500mm、等曲げ区間 200mm の 2 点荷重で行った。せん断スパン比は 3.03 であり、繊維混入率 0% の場合には斜め引張破壊するはりである。

実験は、補強用繊維の種類、繊維混入率、マトリクスの違いに対してそれぞれ 1 体ずつ行った。ただし、繊維混入率 0% の供試体については、それぞれ 2 体ずつ荷重を行った。

3.2 最大荷重およびひび割れ発生状況

表-3 に、各 FRCC はりの最大荷重を示す。詳細は次節以降で述べるが、コンクリート供試体、モルタル供試体ともに、繊維を混入することにより最大荷重が増加する結果となった。

図-4 に、各 FRCC はりの終局時のひび割れ発生状況図を示す。なお、繊維混入率 0% の供試体はそれぞれ 1 体のひび割れ発生状況のみを示している。図より、コンクリート供試体、モルタル供試体ともに、繊維の混入による曲げによるひび割れ発生への影響は認められない。一方、繊維を混入することでせん断スパン内には複数本の斜めひび割れが生じていることが確認できる。これは、斜めひび割れ発生後に繊維がひび割れ開口を抑制することで、新たなひび割れが生じたためである。なお、繊維の架橋効果による複数の微細なひび割れの発生は見られなかったため、FRCC はりのせん断破壊はあくまでもマクロなひび割れ面におけるせん断伝達挙動に支配されて

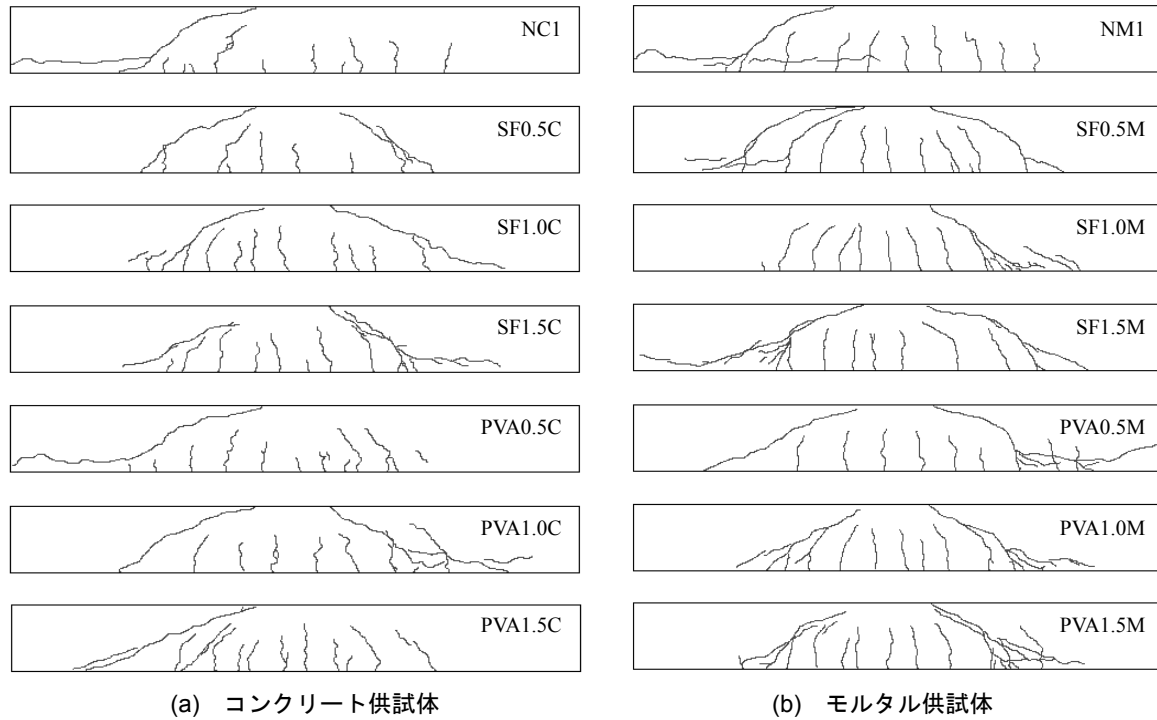


図-4 FRCC はり供試体の終局時のひび割れ発生状況

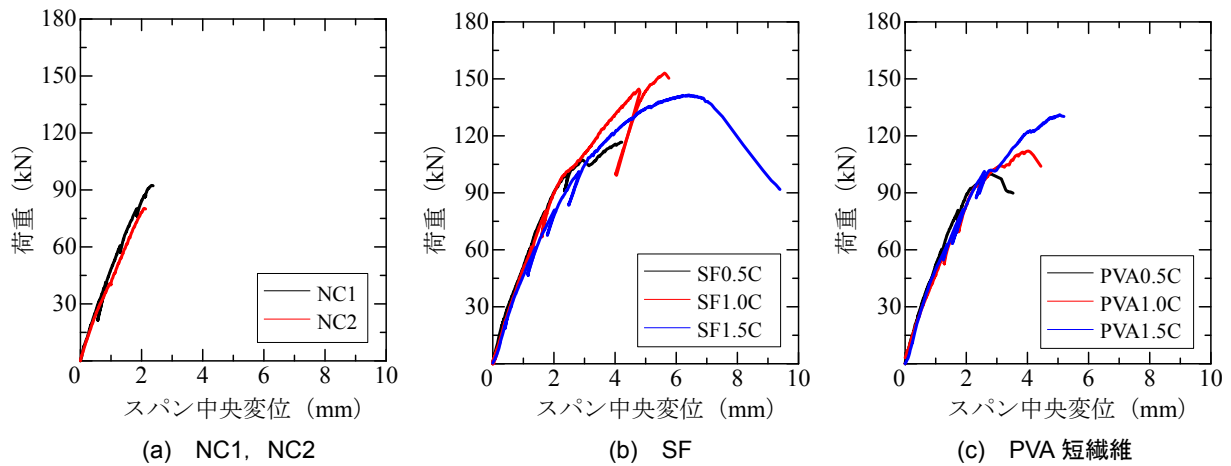


図-5 荷重-変位関係 (コンクリート供試体)

いるものと考えられる。

3.3 コンクリート供試体の荷重-変位関係

図-5 に実験より得られたコンクリート供試体の荷重-スパン中央変位の関係を示す。繊維混入率 0% の場合は、2 体の供試体で最大荷重に若干の違いはあったものの、NC1 供試体、NC2 供試体ともに斜め引張破壊により終局を迎えた。最大荷重の平均値は、86.4kN であった。また、SF1.5C を除いて、いずれの供試体においても、終局時には斜めひび割れが開口し急激に荷重が低下する挙動を呈した。

図-5(c)より、PVA 短繊維を混入した供試体では、繊維混入率が増加するとともに最大荷重も増加する結果となった。一方、図-5(b)より、SF を混入した供試体は、繊維混入率 1.5% の供試体は 1.0% の供試体よりも最大荷

重が低下する結果となった。なお、SF1.5C の終局時の挙動は、変形を伴いながら徐々に荷重が低下するといったものであった。このことから、他の供試体とは耐荷機構が変化した可能性があるといえる。

繊維種類の違いに着目すると、図-5 より明らかなように、SF を混入した供試体の方が PVA 短繊維を混入した供試体よりも、最大荷重が増大する傾向が認められた。これは、2.2 節で示したように、SF を混入した供試体の方が PVA 短繊維を混入した供試体よりも引張軟化特性が優れているためであると考えられる。一方、終局時の挙動に着目すると、SF を混入した供試体では、最大荷重の直後に急激に荷重が低下する挙動を呈したが、PVA 短繊維を混入した供試体では、最大荷重後において緩やかな荷重の低下を生じた後に、急激に耐力を失う挙動を示

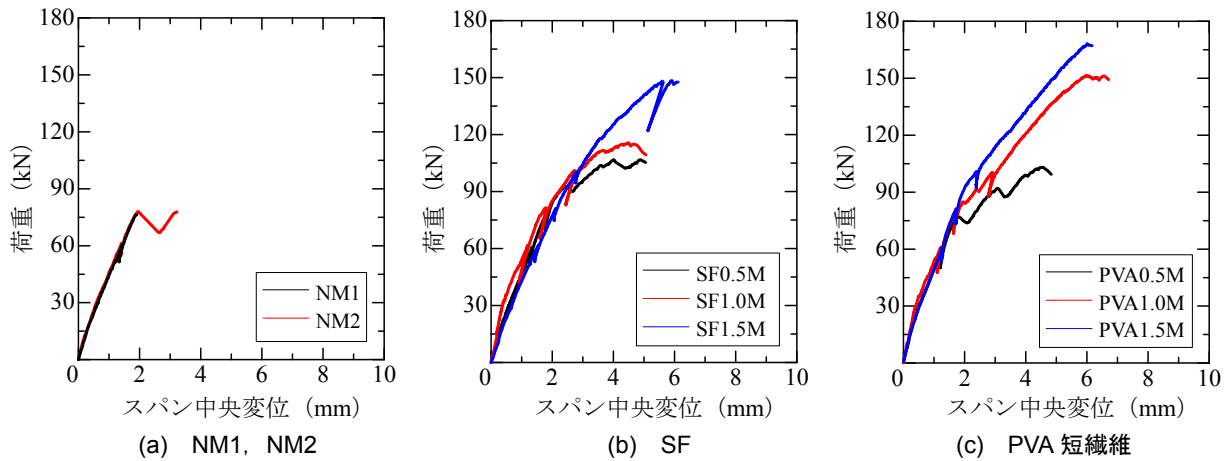


図-6 荷重-変位関係 (モルタル供試体)

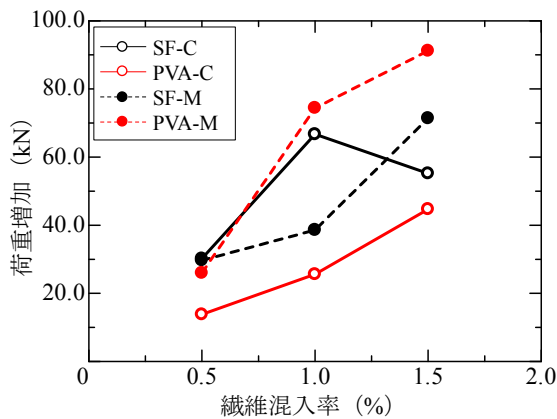


図-7 繊維の影響による荷重増加量の比較

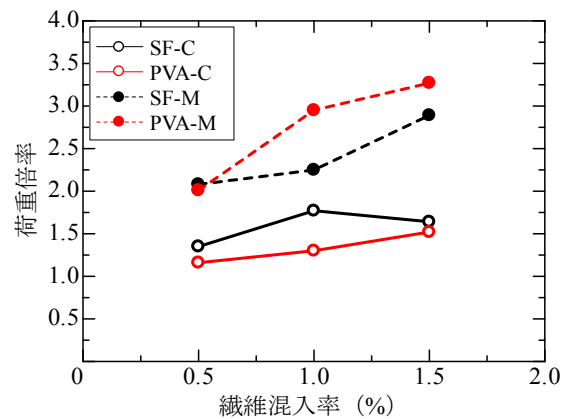


図-8 荷重倍率の比較

す傾向があった。なお、破壊後にひび割れ面を確認したところ、SFを混入した供試体では、繊維の引抜けが生じていたのに対して、PVA短繊維を混入した供試体では、主に繊維の破断が生じていた。

3.4 モルタル供試体の荷重-変位関係

図-6に実験より得られたモルタル供試体の荷重-スパン中央変位の関係を示す。繊維混入率0%の場合は、NM1供試体、NM2供試体ともに斜め引張破壊により終局を迎えた。特に、モルタル供試体では、コンクリート供試体と比較してひび割れ面が平滑であるため、斜めひび割れの発生とともに急激な荷重低下を呈した。なお、NM2供試体については、片側スパンにおいて斜めひび割れが生じ荷重が低下した後、再度荷重が増加したが、他方のスパンにおいて新たに斜めひび割れが発生、進展したことにより終局を迎えた。NM1供試体およびNM2供試体の最大荷重の平均値は、77.1kNであった。

図-6(b), (c)より、モルタル供試体においては、SFならびにPVA短繊維を混入した供試体のいずれも、繊維混入率の増加に伴い最大荷重も増加する結果となった。繊維種類の違いに着目すると、繊維混入率0.5%の場合、繊維種類に依らず最大荷重は同程度増加する結果となっ

た。また、繊維混入率1.0%ならびに1.5%の場合は、SFを混入した供試体よりもPVA短繊維を混入した供試体の方が、最大荷重の増加が顕著に認められた。なお、モルタル供試体においても前述のコンクリート供試体と同様に、SFを混入した供試体においては、終局時に斜めひび割れ面において繊維の引抜け挙動が卓越するのに対して、PVA短繊維を混入した供試体においては、繊維の破断により終局を迎えたことが確認された。

モルタル供試体において、PVA短繊維を混入した供試体の方がSFを混入した供試体よりもせん断耐力が増大したことに關しては、コンクリート供試体の場合と同様に、2.2節で示したFRCCの引張軟化特性の違いに關係していると考えられる。

3.5 繊維がFRCCのせん断耐力に及ぼす影響

繊維を混入することでせん断耐力がどの程度増加したかを明確にするために、繊維混入率0%のせん断耐力の平均値からの荷重増加量を求めた。図-7に、それぞれのFRCCにおける繊維混入率と荷重増加の関係を示す。なお、凡例におけるCとMはそれぞれコンクリート供試体およびモルタル供試体を意味している。図より、繊維混入率が0.5%の場合の荷重増加量は、PVA-Cではおよ

そ10kNであり、その他の供試体では30kN程度であった。また、SF-Cを除いた結果においては、限られた範囲内ではあるものの、繊維種類、マトリクス種類に依らず、繊維混入率が増加するに従って、荷重がほぼ線形的に増加している。このことは、FRCCのせん断耐力の評価においては繊維が負担できるせん断力を独立に評価できる可能性があることを示唆している。

図-8に、繊維混入率と荷重倍率の関係を示す。ここで、荷重倍率とは、FRCCのせん断耐力を繊維混入率0%のせん断耐力の平均値で正規化したものである。図より、モルタル供試体の方がコンクリート供試体と比較して荷重倍率が大きくなっていることが確認できる。すなわち、モルタル供試体においては、せん断伝達挙動に対して繊維がより有効に働くものと考えられる。

松永らの研究⁶⁾によれば、繊維がせん断伝達挙動に及ぼす効果としては、繊維がひび割れの開口を抑制することで、骨材のかみ合い作用が増加する点にあるとされている。一方、本研究で対象としたモルタル供試体においては、ひび割れ面が平滑であるため骨材のかみ合い作用は必ずしも小さくなく、ひび割れの開口を抑制したことがせん断耐力の増加に寄与したとは言い難いと考えられる。すなわち、FRCCのせん断伝達メカニズムは、繊維補強コンクリートにおいては、ひび割れの開口を繊維が抑制する挙動が支配的であるのに対して、繊維補強モルタルにおいては、ひび割れ面のずれ変形を繊維自身が抑制している可能性があると考えられる。この点については、今後より詳細な検討が必要である。

4. 結論

本研究では、FRCC部材のせん断破壊に影響を及ぼす要因として、マトリクスと補強用繊維の違いを取り上げ、せん断破壊するFRCCはりの載荷試験を行った。本研究の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) SFを混入したFRCCはりのせん断耐力は、マトリクス種類に依らず、繊維混入率に伴い増大する。
- (2) PVA短繊維を混入したFRCCはりのせん断耐力は、マトリクス種類の影響を受け、特に、モルタル供試体の場合に、せん断耐力の増加が顕著となる。
- (3) 補強用繊維がFRCCはりのせん断耐力に及ぼす影響は、コンクリート供試体よりもモルタル供試体の方が顕著となることが確認された。モルタル供試体に

においては、繊維がひび割れ面のずれ変形を抑制する働きを有している可能性があると考えられる。

今後は、マトリクスのせん断伝達挙動と混入繊維のせん断伝達挙動を独立に評価可能な構成モデル⁷⁾を用いた有限要素解析にて、FRCC部材のせん断破壊挙動のメカニズムについてより詳細な検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究は、科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）若手研究(B)（課題番号：25820205）の助成を受けて実施した。また、本研究の実験を行うにあたり、関西大学コンクリート工学研究室の学生にご協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法研究委員会報告書，JCI-C82，2012.
- 2) 土木学会：鋼繊維補強鉄筋コンクリート柱部材の設計指針（案），コンクリートライブラリー97，1999.
- 3) 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），コンクリートライブラリー113，2004.
- 4) 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），コンクリートライブラリー127，2007.
- 5) 例えば，Pitcha JONGVIVATSAKUL，松本浩嗣，二羽淳一郎：An Experimental Study on Shear Carried by Fibers of FRC Beams with Different Fiber Types and Combinations，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.1279-1284，2013.
- 6) 松永たかこ，脇坂文恵，鈴木士郎，牧剛史：ひび割れ面のせん断伝達特性に基づくPVA短繊維補強コンクリート梁のせん断耐力評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.1465-1470，2008.
- 7) Ueda, N., Zhang, Y. X., Nakamura, N. and Kunieda, M. : Analytical Evaluation of Shear Failure Behavior of SHCC Beam by Considering Shear Transfer Behavior, Proceedings of the thirteenth East Asia-Pacific Conference on Structural Engineering and Construction (EASEC-13), F-6-1(CD-ROM), 2013.