

論文 複数の補強繊維を用いた FRCC の単繊維引き抜きによる力学的性能の評価

三浦 大樹*1・西脇 智哉*2・菊田 貴恒*3

要旨: 様々なサイズの補強繊維を用いることを想定した繊維補強セメント系複合材料 (FRCC) の材料設計に当たり、基礎的なデータベース構築を目的として、メゾ・マイクロ・ナノサイズの繊維を用いたモルタルマトリックスにフックエンド型鋼繊維を埋設しての単繊維引き抜き試験を行った。埋め込み角度を 0°と 45°の 2 種類として、その影響を確認した。その結果、繊維の使用による引抜抵抗性及び靱性の向上、複数種類の繊維が各サイズのひび割れを架橋することによる複合効果が確認された。また、角度をつけたものに関してはその傾向がより顕著に表れており、繊維の配勾による強度や靱性への影響がより大きくなることが確認された。

キーワード: FRCC, 補強繊維, 多段階繊維補強, 単繊維引き抜き, 複合効果

1. はじめに

繊維補強セメント系複合材料 (Fiber Reinforced Cementitious Composites, 以後 FRCC) とは、補強繊維とマトリックスを組み合わせることで引張強度の改善や高靱性を狙った複合材料である。マトリックス中に分散された補強繊維がひび割れを架橋して引張応力下の脆性的な破壊を抑制する。特に、高強度モルタルを用いる高強度高靱性セメント系複合材料 (Ultra-High Performance FRCC, 以後 UHP-FRCC) は、圧縮強度 150 MPa 以上、ひび割れ発生強度 4 MPa 以上、引張強度 5 MPa 以上という優れた力学特性と、ひずみ硬化による高い靱性を持つことが知られている。

FRCC が高い引張性能を示すには、拡大したひび割れに対する繊維架橋が健全である必要がある。また、適切な補強繊維とマトリックスの組み合わせでは、荷重の増加に従い、複数微細ひび割れが発生することで、より高い荷重に抵抗する擬似ひずみ硬化が生じる²⁾。このような性能を得るためには、マトリックスにひび割れが発生した後の、補強繊維の力学的な挙動の理解が必要である。すなわち、FRCC に用いる各繊維の補強メカニズムや、各繊維の性能の定量化により、複合使用の際の合理的で統一性のある設計手法を確立する必要がある。

これらの背景から、本研究はマクロレベルの鋼繊維から、セルロースナノファイバー (以後 CNF)、カーボンナノチューブ (以後 CNT) といったナノレベルまでスケールの異なる各種のひび割れ補強繊維を対象とした検討を行う。メゾ、マイクロ、ナノサイズの繊維を併せて混入した場合の複合効果を明らかにすることを目的として、最も大きなひび割れ補強繊維であるマクロレベルの鋼繊維の引き抜き特性に着目した実験を行う。特に、スケールの異なる複数の繊維でモルタルマトリックスを補強した場合における繊維の組み合わせおよび埋め込み繊維の配勾角 (0°, 45°) が鋼繊維の引き抜き特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験概要

ここでは、FRCC におけるモルタルマトリックスと、補強繊維としてフックエンド型鋼繊維 (HDR 繊維) の付着特性の確認のための単繊維引き抜き試験を行う。この際に、圧縮試験など基本的な力学特性も併せて取得する。

2.1 使用材料

使用材料、繊維の物性、調査表を表-1~3 に示す。

表-2 に示すように、本研究では大きさと形状の異なる 6 種類の補強繊維を用いた。また、表-3 に示すように、各試験体の調査は水結合材比を 16% で一定とした。各補強繊維について、HDR 繊維をマクロサイズの繊維として位置づけ、引き抜き試験の際の埋め込み繊維として用いた。また、HDR 繊維と比較して、大きさの小さい残り 5 種類の繊維については、OL についてはメゾサイズ、以下 Wo, Ar についてはマイクロサイズ、CNT, CNF についてはナノサイズの補強繊維として、モルタルマトリックスの一部として用いた。また、これら各サイズの補強繊維を組み合わせ、複合的に用いることによる効果について検討を行った。

2.2 単繊維引抜試験

引抜試験体は、表-3 に示す調査について作製した。図-1(a)及び図-1(c)に示すように、図-1(e)に示すようなフック型の鋼繊維の片側を切り落とした繊維を垂直 (0°) 及び 45°の角度をつけて、縦 30 mm, 横 30 mm, 高さ 15

表-1 使用材料

名称	略称	備考
セメント	C	シリカフェーム混合セメント (低熱ポルトランドセメント: 82%, シリカフェーム: 18%) 密度: 3.01 g/cm ³
細骨材	S	珪砂 6 号 密度: 2.61 g/cm ³ , 最大粒径: 0.212 mm
高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸ポリマー, 密度 1.05 g/cm ³
消泡剤	D	ポリエーテル系, 密度: 1.00 g/cm ³

*1 東北大学 工学部 建築社会環境工学科 (学生会員)

*2 東北大学 大学院工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博士 (工学) (正会員)

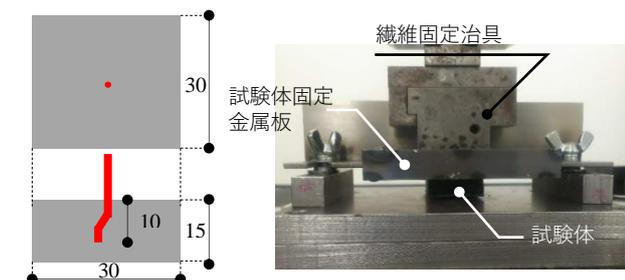
*3 日本工業大学 建築学部 建築学科建築コース 准教授 博士 (工学) (正会員)

表-2 使用材料 (カタログデータ)

名称	略称	備考
フック型鋼繊維	HDR	形状：両端フック，密度：7.85 g/cm ³ ，長さ：30 mm，直径：0.38 mm，アスペクト比：78.9
ストレート鋼繊維	OL	形状：ストレート，密度：7.85 g/cm ³ ，長さ：6 mm，直径：0.16 mm，アスペクト比：37.5
ワラストナイト	Wo	形状：針状結晶，密度：2.90 g/cm ³ ，長さ：0.05~2 mm，アスペクト比：3~20
アラミド	Ar	密度：1.39 g/cm ³ ，繊維長：0.8 mm，繊維径：0.012 mm
カーボンナノチューブ	CNT	集束型，繊維長：0.03~0.6 mm，繊維径：10 nm
セルロースナノファイバー	CNF	セルロース短繊維，粘度：6000 mPa·s (2 wt.%ゲル)，比表面積：120 m ² /g，重合度：650

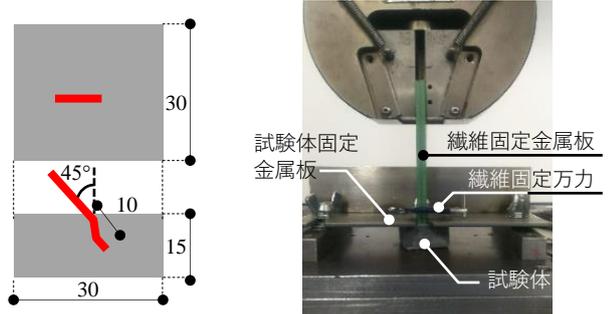
表-3 調合表(wt.%)

シリーズ	試験体数		C	W	SP	D	S	OL (vol.%)	Wo	Ar (vol.%)	CNT	CNF		
	0°	45°												
NF	3	3	100	14.8	1.2	0.02	35	-	-	-	0.005	-		
OL	6	6		14.8	1.2			1.0	-	-				
Wo	12	6		13.8	2.2			-	13	-				
Ar	6	8		14.0	2.0			-	-	0.05				
CNT	8	8		14.8	1.2			-	-	-			0.005	
CNF	4	6		14.8	1.2			-	-	-			-	0.005
OL-Wo	9	5		13.8	2.2			1.0	13	-			-	
OL-Ar	5	8		14.3	1.7			-	-	0.05			-	
OL-CNT	7	7		14.8	1.2			-	-	-			0.005	
OL-CNF	4	9		14.8	1.2			-	-	-			-	0.005
OL-Wo-CNT	5	9	13.8	2.2	-	-	13	-	0.005	-				



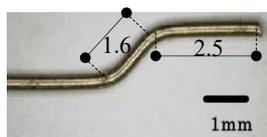
(a) 試験体形状(0°)

(b) 引抜試験方法(0°)



(c) 試験体形状(45°)

(d) 引抜試験方法(45°)



(e) HDR 繊維の形状³⁾



(f) 45°試験体の表面剥離(拡大図)

図-1 試験方法概要

mm の試験体に 10 mm 埋め込んだ角柱試験体を用いた。HDR 繊維先端の寸法は松坂³⁾によって示された平均値を参考にした。打ち込みから材齢 2 日で脱型し、蒸気養生 (90 °C, 48 時間) を行った。その後は、試験開始まで恒温室 (温度 20 °C, 相対湿度 60±10%) で気中養生を行った。また、CNT 及び CNF は超音波ホモジナイザー (出力 70 W) で予め分散を行った。CNT では、他の材料と混ぜ合わせる前に、1 wt.%の水溶液に対して 30 分間分散を行った。CNF では、使用する水、減水剤、消泡剤に 2 wt.%の CNF ゲルを混ぜ合わせた状態で 10 分間分散を行った。引抜試験は、図-1(b)及び図-1(d)に示すように試験体に埋め込んだ繊維の片側を治具、繊維固定金属板及び万力でそれぞれ固定し、モルタル部分を試験体上部の金属板に押し当てて固定し、繊維を鉛直方向に引き抜いた。試験機クロスヘッド変位を繊維の引抜量とし、引抜速度は 1.0 mm/min とした。また、図-1(f)のように 45°試験体表面に剥離が見られたため、この部分についても破壊靱性の指標として考察した。各シリーズの圧縮強度、ヤング係数は、JIS A 1108 及び JIS A 1149 を参考に直径 50 mm, 高さ 100 mm の円柱試験体を 3 体ずつ計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度試験

圧縮強度に関して、表-4に示すように、概ね同程度となり、繊維を混入させることによる明らかな影響は見られなかった⁴⁾。ヤング係数についても同様の傾向であった。

表-4 試験データ

	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	最大荷重 (平均) (N)		曲線下面積 (平均) (N・mm)	
			0°	45°	0°	45°
			NF	229.9	26.5	210.5
OL	229.7	27.4	209.6	214.4	671.4	833.6
Wo	228.4	28.0	209.9	220.7	657.7	846.3
Ar	244.8	27.4	219.2	223.3	688.6	837.6
CNT	224.5	25.8	215.6	217.6	676.0	910.4
CNF	223.0	26.4	209.2	213.0	630.9	890.1
OL-Wo	245.0	30.1	227.9	227.9	692.6	885.0
OL-Ar	240.1	27.4	215.0	221.1	678.2	865.5
OL-CNT	217.3	26.6	219.8	231.6	715.1	917.0
OL-CNF	225.6	27.2	204.6	196.4	648.1	765.8
OL-Wo-CNT	244.3	29.7	219.2	260.6	713.7	1046.6

3.2 単繊維引き抜き試験 (繊維無混入, 単独種類繊維)

単繊維引抜試験の結果について、引き抜き荷重と引抜量の関係を、埋め込み角度0°について図-2に、45°については、それぞれ図-4に示す。ここで、これらの図-2、図-4中の黒線は各試験体における計測結果を、赤線はこれらの平均値を示す。また、図-4中の×印はHDR繊維が破断したことを示す。表-4には、各試験体に用いたモルタル部分の圧縮強度、ヤング係数と、引き抜き試験の結果として得た最大荷重と、靱性指標として変位6 mmまでの平均曲線下部分の面積を示す。各シリーズの最大荷重及び曲線下面積の比較を図-6、図-7に示す。

引き抜き試験結果について、図-2、図-6および表-4に示す埋め込み角度 0°における平均曲線の最大荷重は、OL, Wo, CNF はNFと同程度となり、補強効果は見られなかった。一方で、各シリーズで最も大きな荷重を示した試験体に着目すると、いずれもNFで最も大きい引抜荷重を示した試験体よりも大きくなった。各シリーズにおいてばらつきが見られるものもあるが、引抜強度が増加しているものは補強繊維が適切に混練され、繊維の性能が発揮されたと考えられる。その他のシリーズはNFと比較して最大荷重が大きくなる傾向を示し、繊維混入による引抜強度の増大が確認された。図-4に示す埋め込み角度45°については、0°の結果と比較すると、NFを除いたいずれのシリーズについても、最大荷重は同等以上となっている。また、各シリーズともNFよりも最大荷重は大きくなる傾向を示した。これは、繊維混入及び埋め込み繊維の配勾によるスナビング効果の影響⁹⁾で引抜強度が増大したものと考えられる。次に各試験体の靱性を表す、平均曲線下の面積について考える。0°については図-2および図-7からは、Wo, CNFを除くシリーズについてはNFよりも大きな値を示し、上記2つのシリーズについても最大値についてはNFよりも大きな値を示している。マトリックス中に補強繊維を混入させることにより、靱性の向上が確認された。また、45°については繊維を混入させたシリーズ全てにおいてNFよりも大きな値を示していた。

3.3 単繊維引き抜き試験 (複数種類繊維)

引き抜き荷重と引抜量の関係を、埋め込み角度 0°について図-3に、45°については、それぞれ図-5に示す。図中の黒線、赤線、×印は3.2と同様である。

引き抜き試験結果について、図-3および表-4に示す埋め込み角度0°における平均曲線の最大荷重は、OL-CNFはNFと同程度となった。また、3.2の結果と比較したモルタルマトリックス中に混練した繊維の複合使用による相乗効果については、図-6から、OL-Wo, OL-CNT, OL-Wo-CNTについてはメゾ・ミクロ・ナノサイズ繊維をそれぞれ単独で用いた場合と比較して引抜強度の平均値の増加が見られる。これらの結果は、繊維の複合使用による相乗効果によるものと考えられる⁹⁾。しかし、OL-CNFとOL-ArについてはCNF, Arと比較して引抜強度の低下が見られた。図-5に示すように、45°についても概ね同様の傾向が見られたが、OL-Wo-CNTについては最大荷重が平均値で260.6 Nと、NFの1.34倍と特に大きく、また、試験体数9個のうち、8個でHDR繊維が破断している。すなわち、全サイズの繊維を用いることで、より複合使用による相乗効果や埋め込み繊維の配勾によるスナビング効果が大きくなることが確認できた。

また、図-5において、試験中に埋め込み繊維が破断した試験体が図-4中のシリーズよりも多く見られた。このような破断は、荷重のピークに近い、変位が3 mm程度で生じており、最大荷重はいずれの場合も平均曲線での最大値よりも大きく、250 N付近である。このときに生じる引張応力は、約2200 MPaで、これは埋め込み繊維の引張強度である2610 MPa(カタログの最低保証値)よりも小さいが、埋め込み角度をつけたことによる応力集中や、マトリックスとの摩擦によると考えられる。FRCCとしての靱性的な挙動を考える場合には、このような繊維の破断は必ずしも好ましくはない。一方で、繊維先端のフック形状が完全に抜け出す約3 mmの引き抜け変位は、部材の変形量としては極めて大きく、この状態に至るまで繊維強度を十分に利用可能であると考えられる。すなわち、マトリックス中に用いたメゾレベル以下の繊維の補強効果により、マクロサイズの繊維の性能をより引き出すことが可能と考えられる。

また、平均曲線下の面積について、0°についてはOL-CNFを除くシリーズについてはNFよりも大きな値を示し、OL-CNFについても最大値はNFよりも大きな値を示していた。45°については全シリーズにおいてNFよりも大きな値を示していた。複合使用による相乗効果に関してはOL-Arを除くシリーズについては確認された。また45°についてはOL-CNFを除くシリーズで相乗効果が確認され、各繊維とも0°よりも大きな値を示しており、最大荷重と同様にOL-Wo-CNTが最も大きな値を示していた。

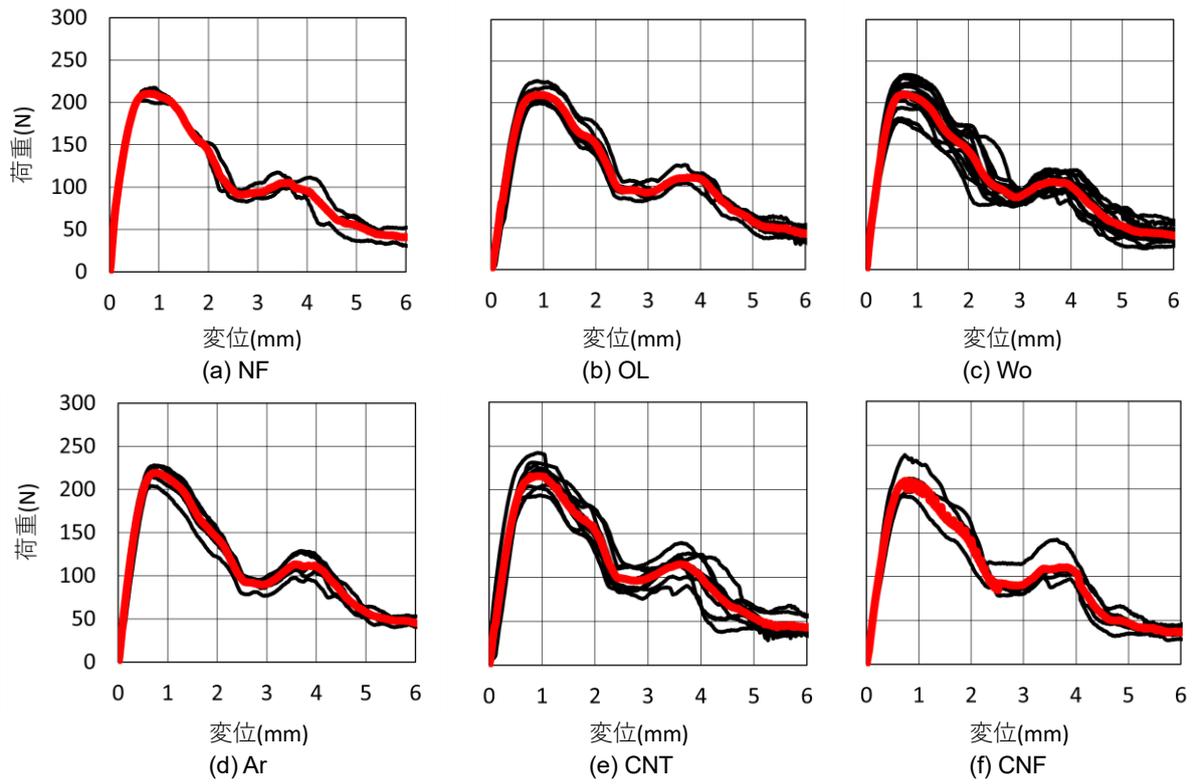


圖-2 試驗結果(0°, 纖維無混入, 单独混入)

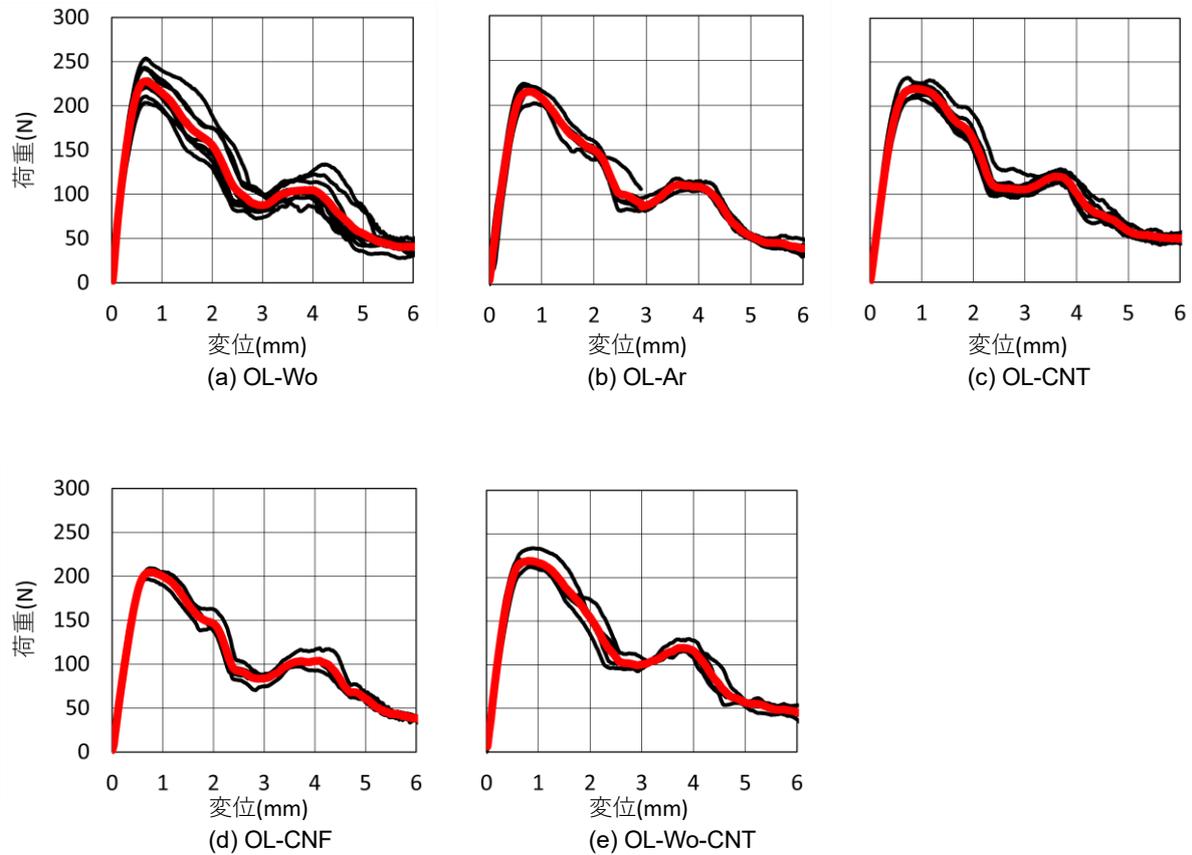


圖-3 試驗結果(0°, 複數纖維混入)

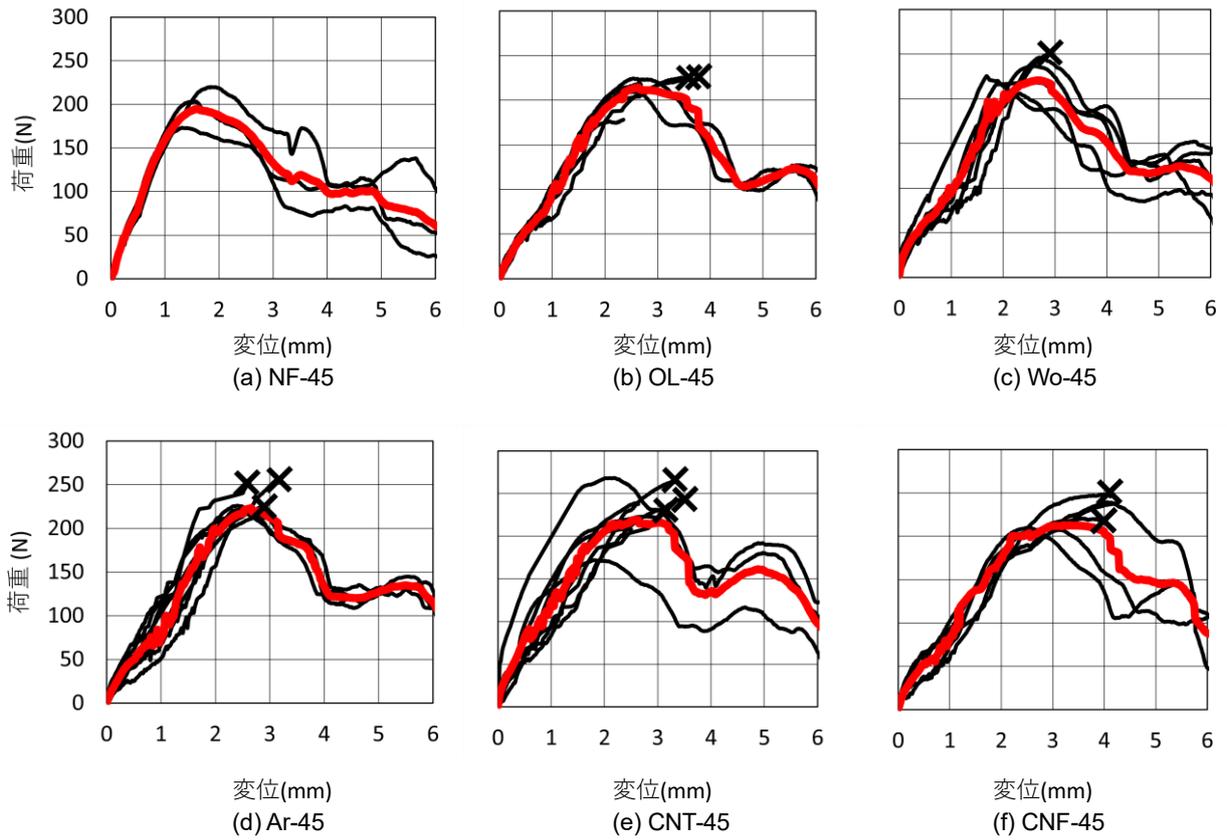


図-4 試験結果(45°, 繊維無混入, 単独混入)

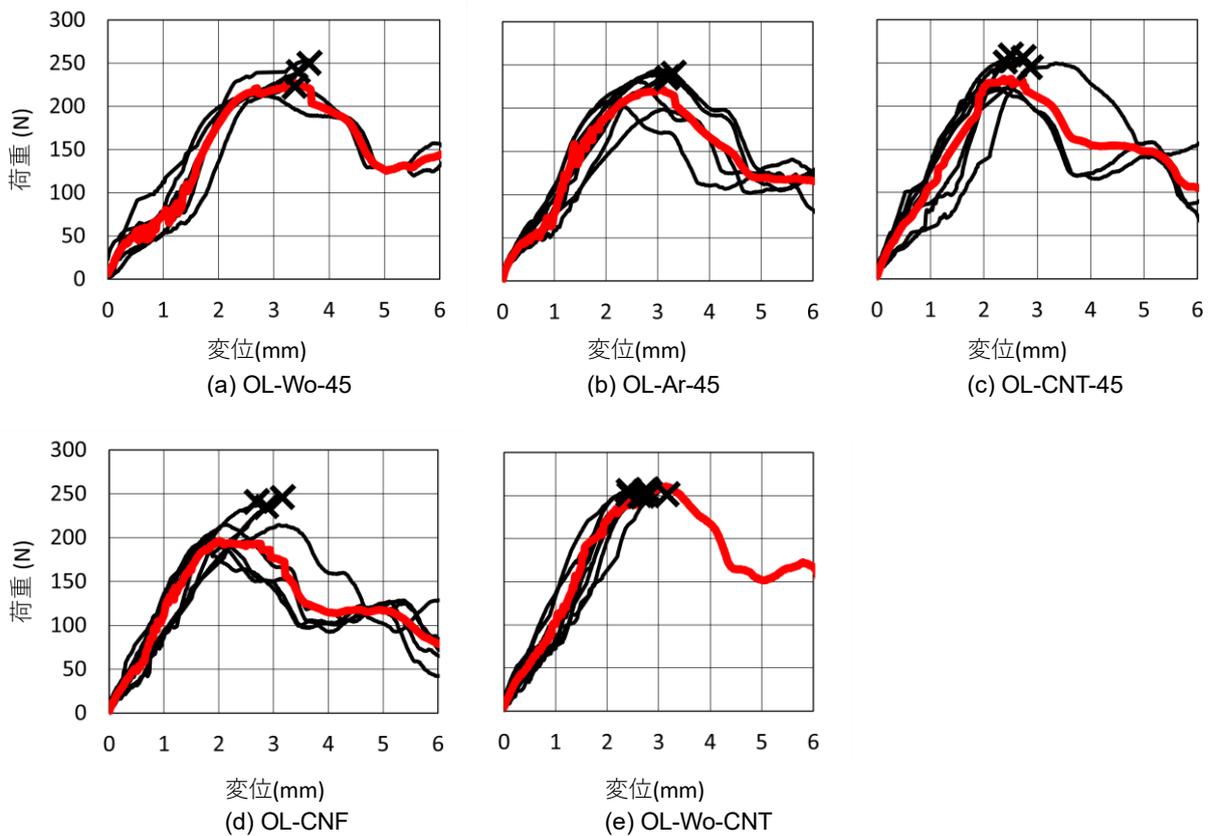


図-5 試験結果(45°, 複数繊維混入)

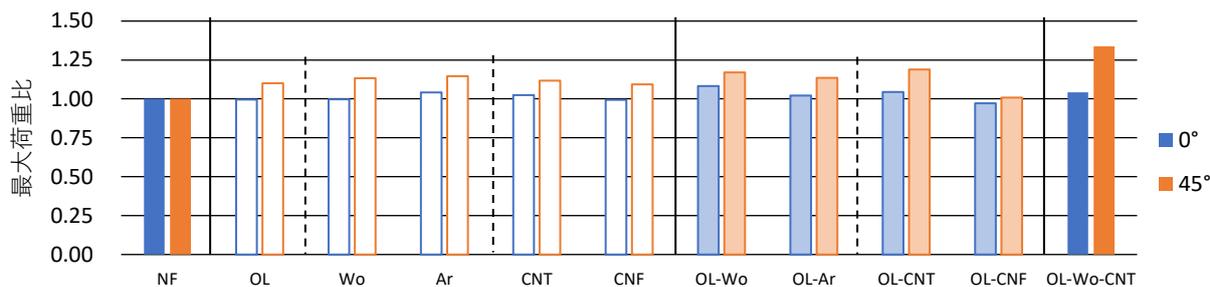


図-6 最大荷重のNFとの比

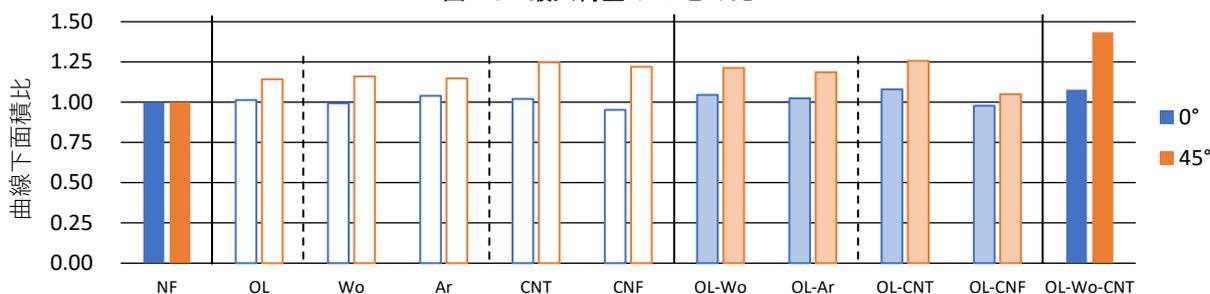


図-7 曲線下面積のNFとの比

3.4 試験体表面はく離の評価

図-8は、引き抜き試験後の試験体表面の一例を示す。図-8(a)に示されるように、埋め込み角度を0°とした場合は引き抜け部分に損傷は生じていない。一方、埋め込み角度を45°とした場合には、引き抜け部分でマトリックスの損傷が生じている。NFシリーズでは、図-8(b)に示されるように損傷範囲が大きいのにに対して、図-8(c)のようにWoを用いた場合には損傷範囲が限定される傾向となり、3段階の補強繊維を複合的に使用したOL-Wo-CNTでは図-8(d)のように表面の損傷面積が更に小さくなる傾向が見られた。また、表-5に示すように引抜荷重が小さかったCNFを除き、繊維補強を施したシリーズにおいて剥離面積の減少が確認された。これについても、繊維を複合的に用いることによる引抜抵抗性の向上により損傷が抑制されたためと考えられる。

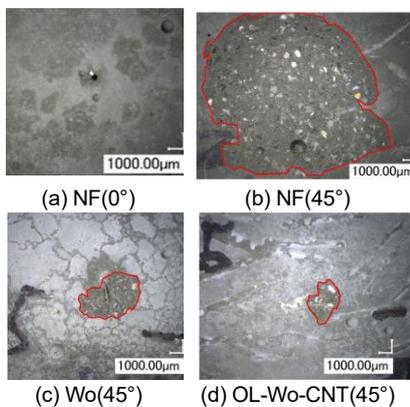


図-8 試験体写真

表-5 剥離面積

シリーズ名	剥離面積 (mm ²)
NF	51.7
OL	14.8
Wo	19.9
Ar	13.5
CNT	18.0
CNF	60.5
OL-Wo	18.1
OL-Ar	12.2
OL-CNT	28.2
OL-CNF	32.4
OL-Wo-CNT	15.3

4. まとめ

(1) 繊維混入による圧縮強度への影響は小さい。

- (2) メゾ、マイクロ、ナノのサイズの補強繊維の単独混入による引抜抵抗性及び靱性の向上が確認された。
- (3) サイズの異なる複数種類の繊維混入の相乗効果によるマトリックスの損傷の抑制により、引抜抵抗性及び靱性の向上が確認され、埋め込み繊維の配勾によりその効果がさらに大きく発揮されることが確認された。

謝辞

本検討は、JSPS科研費基盤研究B・17H03337（研究代表者：西脇智哉）の一部として実施されたものである。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会 コンクリート委員会編:超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), p.1, 2004
- 2) 三橋博三, 六郷恵哲, 国枝稔:コンクリートのひび割れと破壊の力学, 技報堂出版株式会社, p.189, 2010
- 3) 松坂直樹, 西脇智哉, 三橋博三: FRCC の高強度・高靱性化に資する補強鋼繊維の設計, 日本建築学会東北支部研究報告集, 構造系, Vol.77, pp.127-130, 2014
- 4) Neves, R.D., Fernandes de Almeida, J.C.O.: Compressive behavior of steel fibre reinforced concrete, Struatal Concrete, Vol.6, No.1, pp.1-8, 2005
- 5) Li, V.C., Wang, Y., Backer, S.: Effect of Inclining Angle, Bundling, and Surface Treatment on Synthetic Fiber Pull-Out from a Cement Matrix, Journal of Composites, J. Composites, Vol.21, No.2, pp.132-140, 1990.
- 6) Kwon, S., Nishiwaki T., Kikuta T., Mihashi H.: Development of Ultra-High-Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites, ACI Materials Journal, Vol.111, No.3, pp.309-318, 2014.