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

ライフサイクル工学研究室
三浦 大樹

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、補強繊維とモルタル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靭性を狙った複合材料である。特に、高強度モルタルを用いる高強度高靭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[1)]という優れた力学特性と、ひずみ硬化による高い靭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。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)]。一方で、これは引張応力下でマトリックスに生じる微細ひび割れそのものを抑制するものではない。そのため、実構造物へ適用するためには、ひび割れ発生後の力学的挙動の理解、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、複合使用の際の合理的で統一性のある設計手法の検討が必要である。

これらの背景から、本研究はサイズの異なる各種の補強繊維を対象とした検討及び各サイズの繊維の複合効果の明確化を目的として、マクロレベルの鋼繊維の引抜特性に着目した実験を行う。特に、サイズ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配勾角（0°、45°）が鋼繊維の引抜特性に及ぼす影響を明らかにする。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントはシリカフューム混合セメント（C、低熱ポルトランドセメント：82 %、シリカフューム：18 %、密度：3.01 g/cm^3）、細骨材は珪砂6号（密度：2.61 g/cm^3、平均粒径：0.212 mm）、高性能減水剤（SP、ポリカルボン酸コポリマー、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）を用いた。調合表を表1に示す。水粉体比を16%で一定とし、大きさと形状の異なる5種類の補強繊維を用いた。HDR繊維（密度：7.85 g/cm^3、長さ：30 mm）を単繊維引き抜き試験の際の埋め込み繊維として用いた。OL（密度：7.85 g/cm^3、長さ：6 mm）はメゾサイズ、ワラストナイト（Wo、密度：2.90 g/cm^3、長さ：0.168 mm）、アラミド（Ar、密度：1.39 g/cm^3、長さ：0.8 mm）はミクロサイズ、カーボンナノチューブ（CNT、繊維長：0.03～0.6 nm）、セルロースナノファイバー（CNF、粘度：6000 mPa・s（2 wt.%ゲル））はナノサイズの繊維として、モルタルマトリックスに用いた。

2.2 単繊維引抜試験

表1に、本実験で用いた調合表を示す。試験体は、打ち込みから材齢2日で脱型し、蒸気養生（90 ℃、48時間）を行った。なお、CNT及びCNFは練り混ぜ前に超音波ホモジナイザーにより分散を行った。その後は、試験開始まで恒温室

表1　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		14.8	1.2			-	-			
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	100			0.02	35			-	-	0.005
OL-Wo	9	5		13.8	2.2				13		-	
OL-Ar	5	8		14.3	1.7					0.05		-
OL-CNT	7	7		14.8	1.2			1.0	-		0.005	
OL-CNF	4	9								-	-	0.005
OL-Wo-CNT	5	9		13.8	2.2				13		0.005	-

Evaluation of Mechanical Performance of FRCC using Multi-scale Reinforcing Fibers by Pull-out Test.　MIURA Daiki

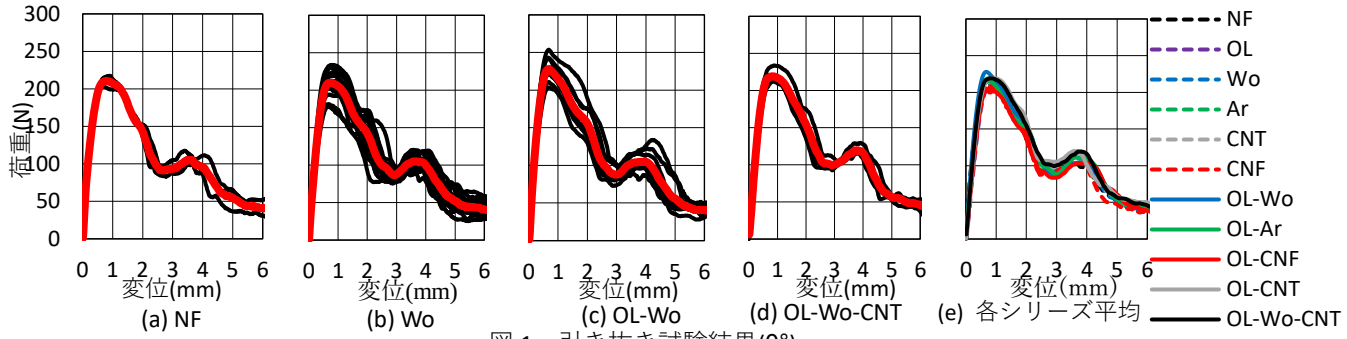

図 1　引き抜き試験結果(0°)

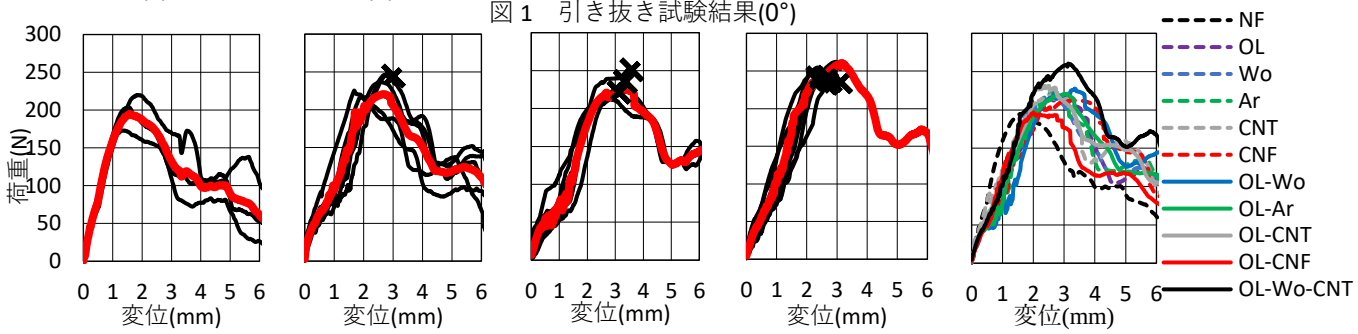

図 2　引き抜き試験結果(45°)(×は破断したもの)

（温度 20 ℃、相対湿度 60±10 %）で気中養生を行った。

引抜試験は、試験体に埋め込んだ繊維の片側を治具及び金属板で固定し、モルタル部分を試験体上部の金属板に押し当てる形で固定して、繊維を鉛直方向に引き抜いた。試験機クロスヘッドの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、ここで用いたモルタルマトリックスの圧縮強度及びヤング係数を、JIS A 1108 及び JIS A 1149 を参考にして計測した。

3.　実験結果と考察

圧縮強度は217.3～245.0 MPa、ヤング係数は25.75～30.10GPaと概ね同程度となった。繊維の混入による圧縮強度、ヤング係数への影響は小さいと考えられる[3]。圧縮強度と0°における引抜荷重は一部を除き正の相関が見られた。

次に単繊維引抜試験により得られた引き抜き変位と荷重の関係を図1、図2に示す。ただし、紙幅の都合により、一部の結果のみ示している。0°における平均曲線の最大荷重はNFとWoは同程度であり、複数繊維を混入させたOL-Wo、OL-Wo-CNTは繊維を単独で使用したWoよりも大きくなる傾向が確認された。Woについても試験結果における最大値を比較すると、NFよりも大きな値を示している。しかし、これらの差は微小であり、補強繊維による影響は比較的小さいと考えられる。また、各試験体の靭性の指標である平均の曲線下面積も同様の傾向を示した。45°については、NFを除いた各シリーズについて、最大荷重は0°の同等以上となっており、繊維混入及び繊維の配勾によるスナビング効果の影響[4]による引抜強度の増大が確認された。また、複数繊維を用いた場合について、最大荷重及び靭性が大きく増大しており、特に3種類の繊維を用いたOL-Wo-CNTについては最大荷重、靭性とも非常に大きな値を示し、繊維が破断するものが多く見られた。これより、繊維の配勾が複合使用による相乗効果[5]に大きく影響することが確認された。

4.　まとめ

本研究により以下のような知見が得られた。

1) 繊維混入による圧縮強度への影響は小さいが、圧縮強度と引抜強度の間には正の相関が確認された。
2) 繊維を混入させることによる引抜抵抗性及び靭性の向上が確認された。
3) 複数種類の繊維混入による引抜抵抗性及び靭性の相乗効果が確認され、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。

【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), pp. 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, pp. 189, 2010
3) Neves, R.D., Fernandes de Almeida,J.C.O.: Compressive behavior of steel fibre reinforced concrete, Strutual Concrete, Vol.6, No.1, pp.1-8, 2005
4) 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.
5) 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, 2014.