

論文 膨張材および再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートと鉄筋間の付着応力-すべりモデル

宮野 勇太*1・渡部 憲*2

要旨: 本研究では、再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(R-HFDFRC)と鉄筋間の付着特性に及ぼす単位膨張材量の影響について検討を行うため、単位膨張材量を80および160kg/m³としたR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験を行った。その結果、膨張材の使用は付着強度および付着強度時すべり等に影響を及ぼしており、膨張材を使用したR-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルを定めようとする場合、本研究で導出した付着モデルに必要な各パラメータの適用が妥当である等の知見が得られた。

キーワード: 膨張材, 再生骨材, 高靱性コンクリート, 高流動, 引抜き試験

1. はじめに

これまでに、既存の繊維補強コンクリートをはるかに上回る性能を有する高靱性セメント複合材料(以下、DFRCCと略記)が開発されており¹⁾、実際にDFRCCを使用した施工例は報告されているものの²⁾、その数は未だに少ないのが現状である。その理由として、施工性、材料コスト、水和熱や乾燥収縮等の問題が挙げられる。

ところで現在、地球環境問題に対する取り組みは重要な課題であり、コンクリートの分野においても、再生骨材コンクリートの研究が活発化している(例えば、³⁾)。今後、コンクリートのリサイクルを更に推進するためにも、再生骨材の新たな有効利用技術の開発が必要である。

以上のような背景から、筆者らの一人らは、DFRCCの流動性の改善、収縮ひずみの低減および再生骨材の用途拡大を目的に、混和材としてフライアッシュおよび膨張材、骨材として再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリート(以下、R-HFDFRCと略記)の力学特性について検討を行っている⁴⁾。

このような材料を鉄筋コンクリート構造物に適用した場合の補強効果を確認する手法として、有限要素法(以下、FEMと略記)が挙げられるが、FEM解析を行う場合、R-HFDFRCと鉄筋間の付着応力-すべりモデル(以下、付着モデルと略記)が必要となる。昨年度までに、筆者らは、膨張材不使用のR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験を行い、R-HFDFRCの圧縮強度(F_c)、鉄筋のふし斜面の幅およびふし間隔をパラメータとした付着モデルを構築した⁵⁾。

そこで、本研究では、膨張材を使用したR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験を行い、膨張材の使用がR-HFDFRCと鉄筋間の付着特性に及ぼす影響について検討を行った。また、得られた結果を基に、膨張材を使用したR-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルに必要な各パラメータの導出を試みた。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合概略

(1) R-HFDFRCの使用材料

再生骨材の物性一覧を、表-1に示す。なお、表中のR1は、比較対象として取り上げる既報⁵⁾で使用した再生骨材である。再生骨材はM相当(JIS A 5021:2018およびJIS A 5022:2018 附属書Aにより判断)の品質のものを使用し、再生細骨材の中目と細目の混合割合(質量比)は、水結合材比(W/B)が40および50%で4:6、W/Bが60%で1:9とした。セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm³)を使用し、繊維はPVA繊維(V, 径:0.2mm, 長さ:18mm, 弾性係数:27kN/mm², 引張強度:975N/mm²)および鋼繊維(S, 径:0.55mm, 長さ:30mm, 弾性係数:210kN/mm², 引張強度:1145N/mm²)を使用した。混和材料は高性能AE減水剤, 分離低減剤, フライアッシュII種(密度:2.33~2.34g/cm³)および膨張材(EX, 密度:3.14~3.15g/cm³)を使用した。

(2) R-HFDFRCの配(調)合の概略

表-1 骨材の物性一覧

骨材種類		最大寸法 (mm)	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率	
R1 ⁵⁾	再生粗骨材	10	2.54	2.46	3.07	5.91	
	再生細骨材	中目	2.5	2.57	2.49	3.35	2.54
		細目	0.6	2.54	2.43	4.52	1.22
R2	再生粗骨材	10	2.56	2.48	3.20	5.91	
	再生細骨材	中目	2.5	2.56	2.48	3.29	2.55
		細目	0.6	2.55	2.45	4.11	1.21

表-2 R-HFDFRCの配(調)合の概略

配(調)合名	使用骨材	水結合材比 W/B (%)	細骨材結合材比 S/B (%)	細骨材率 s/a	繊維体積混入率 V _f (vol.%)	繊維体積混合比 (V:S)	フライアッシュ置換率 (%)	単位膨張材量 (kg/m ³)
RHC40-EX0 ⁵⁾	R1 ⁵⁾	40	40	85	3	7:3	20	0
RHC50-EX0 ⁵⁾		50	65					
RHC60-EX0 ⁵⁾		60	90					
RHC40-EX80	R2	40	40	85	3	7:3	20	80
RHC50-EX80		50	65					
RHC60-EX80		60	90					
RHC40-EX160	R2	40	40	85	3	7:3	20	160
RHC50-EX160		50	65					
RHC60-EX160		60	90					

*1 東海大学大学院 工学研究科建築土木工学専攻 (学生会員)

*2 東海大学 建築都市学部建築学科教授 博士(工学) (正会員)

引抜き試験に使用したR-HFDFRCの配(調)合の概略を、表-2に示す。なお、表中のRHC**-EX0は比較対象であり、本研究と同様の試験体寸法および荷重条件とした、EX不使用のR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験⁵⁾に使用したR-HFDFRCの配(調)合である。R-HFDFRCは、W/Bを40、50および60%、細骨材率を85%、目標スランブフローを65cmとした。繊維はVとSを混合使用し、繊維体積混入率を3%、VとSの繊維体積混合比(V:S)を7:3とした。フライアッシュのセメント置換率は20%とした。EXは単位量で使用し、収縮ひずみを十分に低減させるため単位EX量を80および160kg/m³(EX80およびEX160)とした。

2.2 材料試験

本研究では、R-HFDFRCの強度管理のため、1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験を行った。また、鉄筋の強度確認のため、鉄筋の引張試験を行った。

試験体は、1軸圧縮試験では100φ×200mmの円柱試験体、3等分点曲げ試験では100×100×400mmの角柱試験体、鉄筋の引張試験ではD10(SD345)、D16(SD490)およびD25(SD345)、平行部長さを鉄筋径の10倍以上とした棒状試験体とした。試験体数は、1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験では各水準6体、鉄筋の引張試験では各鉄筋径3体とした。

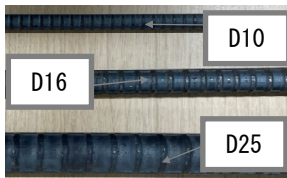


写真-1 使用した異形鉄筋の外観

表-3 鉄筋の材料特性一覧

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	降伏ひずみ (μ)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D10	388	2034	201
D16	582	3144	200
D25	372	1851	205

表-4 R-HFDFRCの材料特性一覧

配(調)合名	圧縮			曲げ		
	圧縮強度 F_c (N/mm ²)	ヤング係数 E (kN/mm ²)	圧縮破壊エネルギー G_{Fc} (N/mm)	曲げ強度 (f_{1b}) (N/mm ²)	曲げ靱性係数 (f_{2b}) (N/mm ²)	ひび割れ本数 (本)
RHC40-EX0 ⁵⁾	44.0	17.5	57.6	9.31	5.56	7
RHC50-EX0 ⁵⁾	32.1	15.4	45.4	7.01	4.06	6
RHC60-EX0 ⁵⁾	21.3	11.8	35.8	6.16	3.77	6
RHC40-EX80	41.0	16.9	62.4	8.42	5.77	6
RHC50-EX80	29.4	14.2	49.8	7.08	4.86	7
RHC60-EX80	19.7	11.7	37.6	4.82	3.32	6
RHC40-EX160	41.6	17.1	57.9	8.41	5.29	6
RHC50-EX160	26.7	13.3	51.5	6.36	3.65	6
RHC60-EX160	19.3	11.3	39.7	5.69	4.22	7

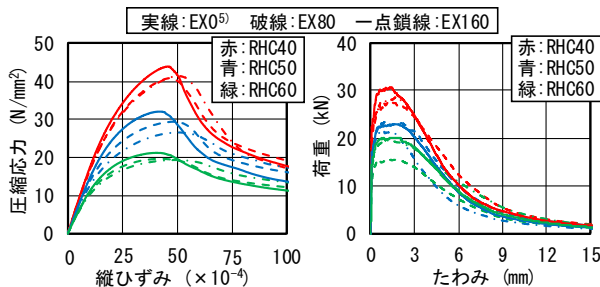


図-1 圧縮応力-縦ひずみ関係

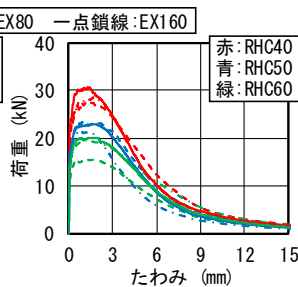


図-2 荷重-たわみ関係

1軸圧縮試験は試験方法を文献⁶⁾に準じて行い、計測項目を荷重、コンプレッソメータによる試験体中央部の縦・横ひずみおよび高感度変位計による荷重盤間変位とした。なお、圧縮破壊エネルギー(G_{Fc})は、文献^{6),7)}に示す手法により算出した(文献^{6),7)}中の、塑性変形が3.0mmまでの値)。

3等分点曲げ試験は試験方法を文献⁸⁾に準じて行い、計測項目を荷重、高感度変位計によるスパン中央部のたわみ(δ_b)およびパイ型変位計による曲率とした。また、試験後に、純曲げ区間に発生したひび割れ本数を目視により計測し、本研究ではこれをひび割れ本数とした。なお、曲げ靱性係数(f_{2b})は、文献⁹⁾に示す手法により算出した(文献⁹⁾中の、 δ_b が7.5mmまでの値とした)。

鉄筋の引張試験は試験方法を文献¹⁰⁾に準じて行い、計測項目を荷重、試験体中央の縦・横ひずみおよび伸び量とした。

なお、R-HFDFRC試験体は、W/B=40および50%の場合は打込み後2日、W/B=60%の場合は打込み後3日(いずれの場合も湿布養生)で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準養生とした。また、各材料試験の計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。

使用した鉄筋の外観および材料特性一覧を、写真-1および表-3に示す。また、R-HFDFRCの材料特性一覧を、表-4に示す。さらに、図-1および2に、1軸圧縮試験および3等分点曲げ試験により得られたR-HFDFRCの圧縮応力-縦ひずみ関係および荷重-たわみ関係を示す。EX不使用の場合と比較してEXを使用することにより、同一W/BにおけるR-HFDFRCの F_c および曲げ強度(f_{1b})は低下する傾向にあり、ここに示すR-HFDFRCおよび鉄筋を使用し、引抜き試験を行った。

2.3 引抜き試験

引抜き試験体の概要を、表-5に示す。また、引抜き試験の概要を、図-3に示す。

引抜き試験は試験方法を文献¹¹⁾に準じて行い、計測項目を荷重および鉄筋のすべり量とした。最大荷重までは、荷重速度を文献¹¹⁾に準じて鉄筋の引張応力が毎分

表-5 引抜き試験体概要

試験体名	水結合材比 W/B (%)	鉄筋の呼び名	試験体寸法 (mm)	かぶり厚さ/公称鉄筋径 (C/D)	付着長さ (mm)	非付着長さ (mm)				
RHC40-EX0 ⁵⁾	40	D16	100×100×100	2.64	64	36				
RHC50-EX0 ⁵⁾	50									
RHC60-EX0 ⁵⁾	60									
RHC40-EX80	40	D16	100×100×100	2.64	64	36				
RHC50-EX80 (D10)	D10						60×60×60	2.65	40	20
RHC50-EX80	50						100×100×100	2.64	64	36
RHC50-EX80 (D25)	D25	150×150×150	2.45	100	50					
RHC60-EX80	60	D16	100×100×100	2.64	64	36				
RHC40-EX160	40									
RHC50-EX160 (D10)	D10						60×60×60	2.65	40	20
RHC50-EX160	50	D16	100×100×100	2.64	64	36				
RHC50-EX160 (D25)	D25						150×150×150	2.45	100	50
RHC60-EX160	60	D16	100×100×100	2.64	64	36				

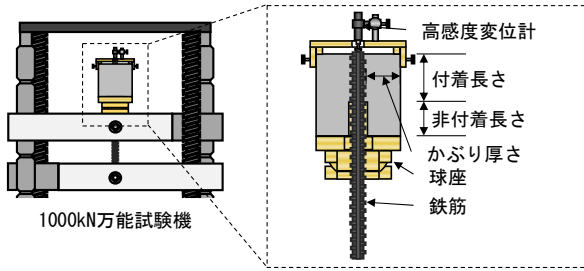


図-3 引抜き試験

49N/mm²程度で増加するように制御した。また、最大荷重以降、荷重の低下が概ね収まるまでは、載荷速度を付着応力(τ)が毎分0.6N/mm²程度で低下するように制御した。試験体は、D16(SD490)を挿入した100×100×100mmの角柱試験体とした。なお、W/B=50%においては、かぶり厚さ/公称鉄筋径(以下、C/Dと略記)がほぼ一定となるように、D10(SD345)を挿入した60×60×60mmおよびD25(SD345)を挿入した150×150×150mmの角柱試験体も作成した。試験体数は、各水準6体とした。なお、試験体は、W/B=40および50%の場合は打込み後2日、W/B=60%の場合は打込み後3日(いずれの場合も湿布養生)で脱型し、試験時(材齢28日)まで標準養生とした。また、引抜き試験の計測データはデータロガーを使用して取り込んだ。なお、計測間隔は文献¹¹⁾に準じた。

3. 結果と考察

表-6に、引抜き試験により得られた付着強度(τ_{max})、付着強度時すべり(s_0)および各値の標準偏差一覧を示す。また、図-4に $\tau_{max}-F_c$ 関係を、図-5に s_0-F_c 関係を示す。

まず、表-6および図-4によれば、鉄筋をD16とした場合、同一単位EX量における τ_{max} は F_c の増加(W/Bの低下)に伴い増大しており、その増大傾向は、単位EX量によって異なっている。また、前掲、表-4によれば、EX不使用の場合と比較してEXを使用することにより、同一W/Bにおける F_c は低下するが、 τ_{max} は同程度以上になっている。

なお、既報⁵⁾では、EX不使用の場合、 τ_{max} に及ぼすDの影響はW/B=40%以外不明瞭であった。しかし、表-6お

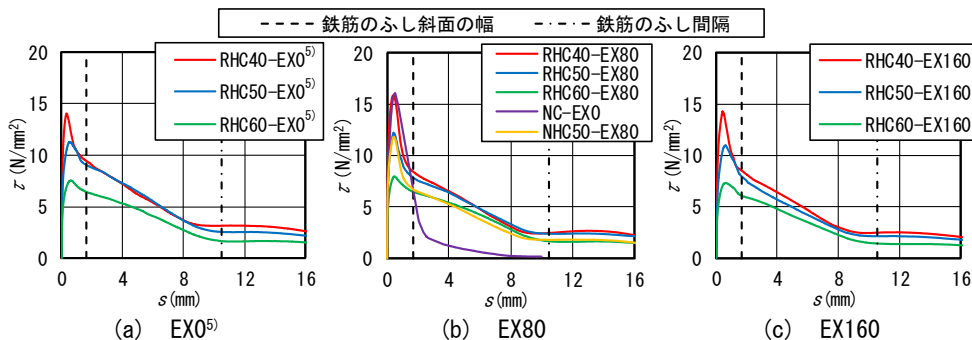


図-6 $\tau-s$ 関係

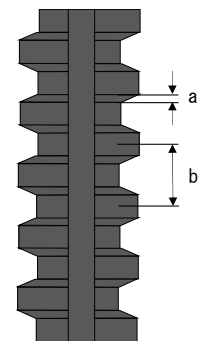


図-7 異形鉄筋の模式図

表-6 引抜き試験結果

試験体名	付着強度の結果		付着強度時すべりの結果	
	付着強度 (N/mm ²)	標準偏差	すべり (mm)	標準偏差
RHC40-EX0 ⁵⁾	14.1	0.854	0.349	0.0332
RHC50-EX0 ⁵⁾	11.3	0.575	0.541	0.0454
RHC60-EX0 ⁵⁾	7.54	0.731	0.593	0.0347
RHC40-EX80	16.0	0.731	0.394	0.0587
RHC50-EX80 (D10)	13.0	0.905	0.405	0.0743
RHC50-EX80	12.4	0.805	0.459	0.0450
RHC50-EX80 (D25)	11.2	0.737	0.463	0.0524
RHC60-EX80	8.01	0.306	0.483	0.0286
RHC40-EX160	14.5	0.846	0.450	0.0546
RHC50-EX160 (D10)	11.8	0.537	0.532	0.152
RHC50-EX160	11.1	0.512	0.633	0.113
RHC50-EX160 (D25)	9.05	0.555	0.574	0.102
RHC60-EX160	7.40	0.371	0.651	0.142

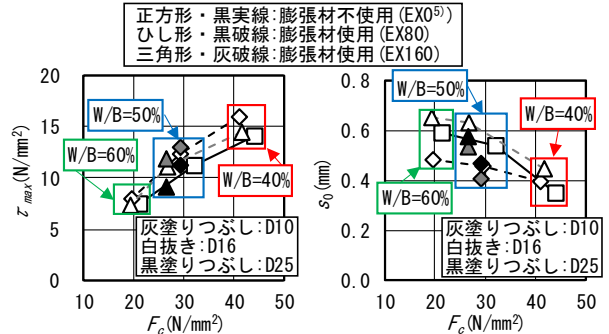


図-4 $\tau_{max}-F_c$ 関係

図-5 s_0-F_c 関係

よび図-4によれば、EXを使用した場合、同一 F_c (W/B=50%)における τ_{max} はDの影響を受けることがわかった。

次に、表-6および図-5によれば、鉄筋をD16とした場合、同一単位EX量における s_0 は F_c の増加(W/Bの低下)に伴い低下しており、その低下傾向は、単位EX量によって異なっている。また、同一W/Bにおける s_0 はEX不使用の場合と比較して、単位EX量が160kg/m³では増大し、単位EX量80kg/m³で一部(RHC40-EX80)を除き低下している。

なお、既報⁵⁾では、EX不使用の場合、 s_0 は一部を除き、Dの増加に伴い増大している。表-6および図-5によれば、EXを使用した場合においても、同一 F_c (W/B=50%)における s_0 はDの影響を受けることがわかった。

以上、EXの使用は τ_{max} および s_0 に影響を及ぼしており、その理由として、EXを使用したことによる内部組織構造(電子顕微鏡レベルで観察できる組織)の形成過程の相違、加えて、ケミカルプレストレスを含む、繊維に

よる補強効果および試験体寸法の相違(RHC50-EX80および160のみ)等が考えられ、今後詳細な検討を要する。

図-6に、引抜き試験により得られた、 τ -すべり(s)関係を示す。また、図-7に、異形鉄筋の模式図を示す。なお、図-6中の τ - s 関係は、同一水準の結果を平均化したものである。また、図-6中の黒破線は、使用した鉄筋のふし斜面の幅(図-7中のa)を示しており、D16で1.65mm(実測値)である。さらに、図-6中の黒一点鎖線は、使用した鉄筋のふし間隔(図-7中のb)を示しており、D16で10.50mm(実測値)である。

図-6によれば、 τ_{max} 以降の τ - s 関係の形状は、W/Bおよび単位EX量の相違に係らず、 τ_{max} 直後、やや急激に τ が低下し、黒破線付近の s から τ - s 関係の負勾配が緩やかとなり、黒一点鎖線付近の s 以降 τ が一定となる傾向を示している。EXを使用した場合の引抜き試験により得られた τ - s 関係の τ_{max} 以降の形状は、既報⁵⁾と同様に使用した鉄筋のふし斜面の幅およびふし間隔で特徴づけられることがわかった。

なお、図-6(b)中には、骨材を天然骨材(細骨材:山砂および砕砂、粗骨材:碎石)とした普通コンクリートを使用した場合(NC-EX0:W/C=56%, $F_c=35.9\text{N/mm}^2$)および単位EX量を 80kg/m^3 とした高流動高靱性コンクリートを使用した場合(NHC50-EX80:W/B=50%, $F_c=28.5\text{N/mm}^2$)の引抜き試験結果も示している。

図-6(b)によれば、普通コンクリートを使用した場合と比較して、R-HFDFRCを使用することで、 τ_{max} 以降の破壊靱性を著しく改善できていることがわかる。R-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルを定める場合、この靱性改善効果を適切に導入する必要があり、既報⁵⁾では、EX不使用のR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験を行い、その結果から付着モデルを構築した。なお、フライアッシュ使用の有無および単位粗骨材量等の相違により、NC-EX0の τ_{max} (16.4N/mm^2)はR-HFDFRCを使用した場合と比較して高くなったものと思われる。

また、NHC50-EX80の τ_{max} (12.0N/mm^2)は、R-HFDFRCを使用した場合(RHC50-EX80の $\tau_{max}=12.4\text{N/mm}^2$)と大差ない。しかし、 τ_{max} 直後におけるNHC50-EX80の τ - s 関係の

負勾配は、RHC50-EX80と比較して、やや急になっており、骨材の影響等が考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。

4. 付着応力-すべりモデル

4.1 モデル概要

以上の結果を踏まえ、既報⁵⁾に示される付着モデル(図-8)をベースとし、EXを使用したR-HFDFRCと鉄筋(本研究では、D16のみ)間の付着モデルに必要な各パラメータを定める。

図-8における τ_{max} までの τ - s 関係は、既報⁵⁾と同様、CEB-FIP Model Code1990¹²⁾(以下、MC90と略記)に示されている式(1)および(2)をベースとする。

$$\tau = \tau_{max}(s/s_0)^\alpha \quad (1)$$

$$\tau_{max} = A \cdot F_c^{0.5} \quad (2)$$

ここに、 τ :付着応力(N/mm²)、 τ_{max} :付着強度(N/mm²)、 s :すべり(mm)、 s_0 :付着強度時すべり(mm)、 α :諸条件によって定まる値(MC90では0.4)、 A :諸条件によって定まる値(N^{0.5}/mm)、 F_c :圧縮強度(N/mm²)である。

また、 τ_{max} 以降の τ - s 関係は、既報⁵⁾と同様、3直線で表現できるものとし、第1折れ点の $s(s_1)$ をふし斜面の幅、第2折れ点の $s(s_2)$ をふし間隔とした。第2折れ点以降は、第2折れ点における残留付着応力(τ_{r2})の一定値とした。

4.2 τ_{max} までの τ - s 関係

図-9に、 $\tau_{max}-F_c^{0.5}$ 関係を示す。なお、図-9中の黒実線は、既報⁵⁾に示されている近似式(Dの相違に係らず1つの直線で近似した、EX不使用の場合の結果)を示している。

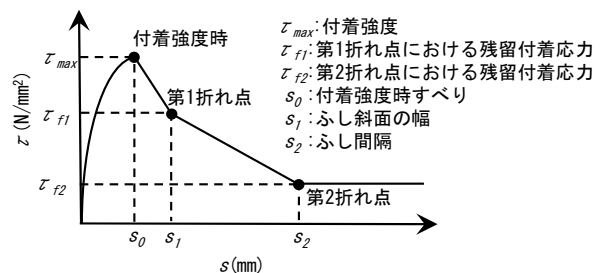


図-8 R-HFDFRCの付着モデル概要

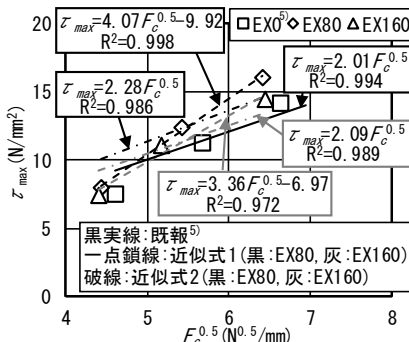


図-9 $\tau_{max}-F_c^{0.5}$ 関係

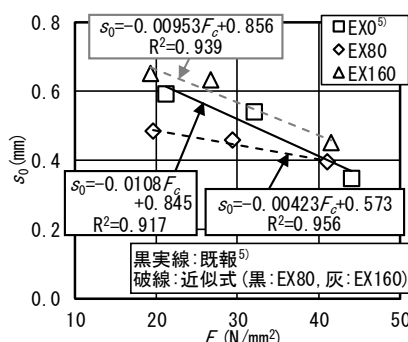


図-10 $s_0-F_c^{0.5}$ 関係

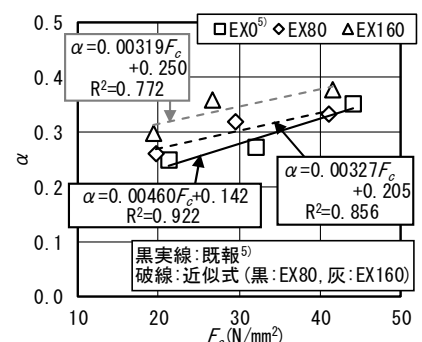


図-11 $\alpha-F_c^{0.5}$ 関係

前掲、図-4の傾向(τ_{max} は F_c の増加に伴い増大しており、その増大傾向は、単位EX量によって異なっている)を考慮して単位EX量別に直線近似すると、図-9に示す近似式1(傾きが、式(2)中のA)が得られる。しかし、 F_c が42N/mm²程度以上および21N/mm²程度以下における τ_{max} に注目すると、試験結果と近似結果との乖離が大きくなっている。そこで、式(2)に切片を加えた式として、再度近似を行った(図-9中の近似式2)。その結果、前述の問題は概ね解消した。

図-10に、 s_0 - F_c 関係を示す。なお、図-10中の黒実線は、既報⁵⁾に示されている近似式(鉄筋をD16とした、EX不使用の場合の直線近似結果)を示している。

図-10によれば、 s_0 は F_c の増加に伴い直線的に減少していることから、 s_0 は F_c の関数で表すことが可能であると思われる。また、前掲、図-5の傾向(s_0 は F_c の増加に伴い低下しており、その低下傾向は、単位EX量によって異なっている)を考慮して単位EX量別に直線近似をすると、図-10に示す近似式が得られる。

図-11に、 α - F_c 関係を示す。なお、図-11中の黒実線は、既報⁵⁾に示されている近似式(鉄筋をD16とした、EX不使用の場合の直線近似結果)を示している。

各 α は、既報⁵⁾と同様、以下の手順で求めた。まず、式(1)の両辺を τ_{max} で除して対数を取り、式(3)とする。次に、式(3)の両辺に引抜き試験結果を当てはめる。その後、左辺の値をy軸、右辺の値をx軸の座標値として、最小二乗法により原点を通る直線で近似することで α を求めた。

$$\log_{10}(\tau/\tau_{max}) = \alpha \cdot \log_{10}(s/s_0) \quad (3)$$

α は F_c の増加に伴い直線的に増大していることから、 α は F_c の関数で表すことが可能であると思われる。また、前掲、図-4および5で得られた τ_{max} および s_0 の傾向を考慮して単位EX量別に直線近似すると、図-11に示す近似式が得られる。

以上、図-8における τ_{max} までの τ - s 関係(同一 F_c であれば、EX不使用の場合と比較してEXを使用することにより τ_{max} が増大する傾向がある程度反映可能とする等)を表すためのパラメータが導出できた。

4.3 τ_{max} 以降の τ - s 関係

図-12に、第1折れ点および第2折れ点における残留付着応力比- F_c 関係を示す。なお、第1折れ点における残留付着応力比は、既報⁵⁾と同様、直線近似した場合に、前掲、図-6の s_0 から s_1 までの τ - s 曲線下の面積と等しくなるように定めた第1折れ点における残留付着応力(τ_{f1})を、 τ_{max} で除した値である。また、第2折れ点における残留付着応力比も、既報⁵⁾と同様、直線近似した場合に、前掲、図-6の s_1 から s_2 までの τ - s 曲線下の面積と等しく

なるように定めた τ_{f2} を、 τ_{max} で除した値である。なお、既報⁵⁾では、各折れ点における残留付着応力比を F_c およびDの相違に係らず各水準で得られた値の平均値(図-12中の黒実線、第1折れ点:0.723、第2折れ点:0.142)としている。

まず、図-12(a)によれば、EXを使用した場合の第1折れ点における残留付着応力比に及ぼす単位EX量の影響は不明瞭であるが、 F_c の影響が確認できたため、EXを使用した場合の結果を1つの直線で近似すると(図-12(a)中の黒破線)、 R^2 が0.912となった。

一方、図-12(b)によれば、第2折れ点における残留付着応力比に及ぼす F_c および単位EX量の影響は不明瞭である。そのため、既報⁵⁾と同様に、EXを使用した場合の結果の平均値(図-12(b)中の黒破線、0.172)とした。なお、得られた第2折れ点における残留付着応力比の平均値(0.172)は、既報⁵⁾に示されている第2折れ点における残留付着応力比の平均値(図-12(b)中の黒実線、0.142)と近い値を示した。

4.4 引抜き試験結果との比較

表-7に、R-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルのパラメータ一覧を示す。

式(1)および表-7に示すパラメータにより推定(R-HFDFRCの材料試験で得られた F_c 、実測した鉄筋のふし斜面の幅およびふし間隔を使用)された τ - s 関係と引抜き試験により得られた τ - s 関係の比較を、図-13および14に示す。なお、図-13および14中には、既報⁵⁾に示される、EX不使用の場合の試験結果から得られたパラメータによって推定された τ - s 関係(図-13および14中の細実線)も併せて示す。

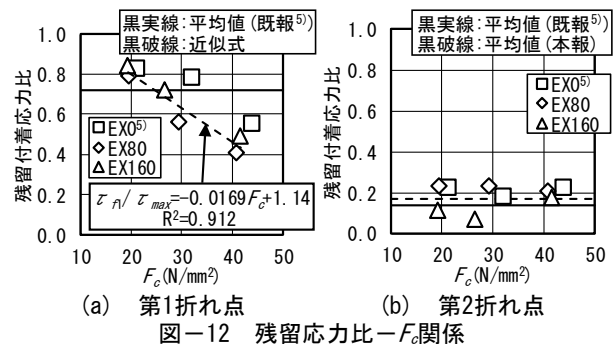


表-7 パラメータ一覧

τ_{max} (N/mm ²)	EX80	$\tau_{max} = 4.07 \times F_c^{0.5} - 9.92$
	EX160	$\tau_{max} = 3.36 \times F_c^{0.5} - 6.97$
s_0 (mm)	EX80	$s_0 = -0.00423 \times F_c + 0.573$
	EX160	$s_0 = -0.00953 \times F_c + 0.856$
α	EX80	$\alpha = 0.00327 \times F_c + 0.205$
	EX160	$\alpha = 0.00319 \times F_c + 0.250$
第1折れ点	τ_{f1} (N/mm ²)	$\tau_{f1} = (-0.0169 \times F_c + 1.14) \times \tau_{max}$
	s_1 (mm)	鉄筋のふし斜面の幅
第2折れ点	τ_{f2} (N/mm ²)	$\tau_{f2} = 0.172 \times \tau_{max}$
	s_2 (mm)	鉄筋のふし間隔
第2折れ点以降	残留付着応力	τ_{f2} の一定値

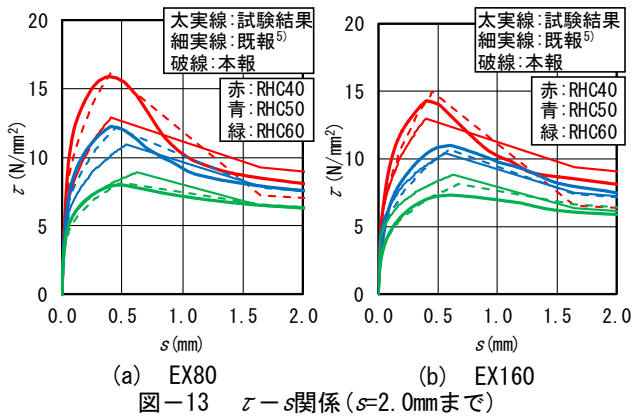


図-13 $\tau-s$ 関係 ($s=2.0$ mmまで)

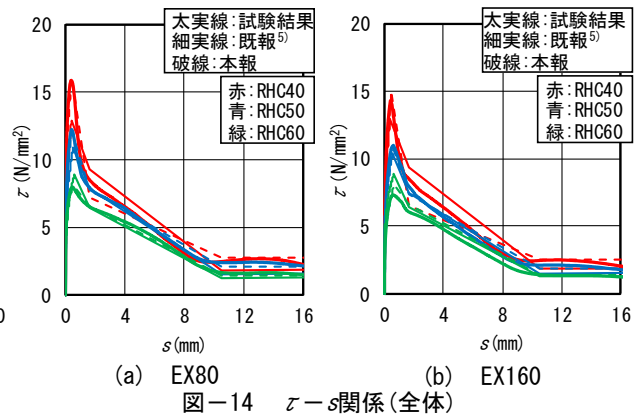


図-14 $\tau-s$ 関係(全体)

図-13および14によれば、既報⁵⁾に示されるパラメータにより推定された $\tau-s$ 関係は、EXを使用した場合の引抜き試験により得られた $\tau-s$ 関係の傾向をある程度再現できているものの、特に τ_{max} や τ_{max} 以降 \sim ふし斜面の幅(1.65mm)付近の s までの $\tau-s$ 関係の形状を踏まえると、付着モデルに必要な各パラメータの変更が妥当である。一方、表-7に示すパラメータにより推定された $\tau-s$ 関係では、上記の点を概ね解消できている。

即ち、EXの使用は τ_{max} 、 s_0 および τ_{max} 以降 \sim ふし斜面の幅(1.65mm)付近の s までの $\tau-s$ 関係の形状に影響を及ぼしており、EXを使用したR-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルを定めようとする場合、本研究で導出した付着モデルに必要な各パラメータの適用が妥当であることがわかった。

5. まとめ

本研究の範囲において、得られた知見を以下に示す。

- 1) EX不使用の場合と比較してEXを使用することにより、同一W/BにおけるR-HFDFRCの F_c は低下するが、 τ_{max} は同程度以上になる。
- 2) EXを使用したR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋(D16)の引抜き試験により得られた $\tau-s$ 関係の τ_{max} 以降の形状は、使用した鉄筋のふし斜面の幅およびふし間隔で特徴づけられる。
- 3) EXの使用は τ_{max} および s_0 等に影響を及ぼしており、EXを使用したR-HFDFRCと鉄筋間の付着モデルを定めようとする場合、本研究で導出した付着モデルに必要な各パラメータの適用が妥当である。

今後、本研究で検討していない単位EX量およびDでのR-HFDFRCに挿入した異形鉄筋の引抜き試験を行う予定である。

参考文献

- 1) 高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会：高靱性セメント複合材料を知る・作る・使う、高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用

研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.1-10, 37-42, 2002.1

- 2) 高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会：高強度・高靱性コンクリート利用研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.74-85, 2009.3
- 3) 日本建築学会：再生骨材を用いるコンクリートの設計・製造・施工指針(案)，211pp., 2014.10
- 4) 佐藤英和，渡部憲：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートの強度発現に及ぼす水結合材比および単位膨張材量の影響，コンクリート年次論文集，Vol.44, No.1, pp.904-909, 2022.7
- 5) 宮野勇太，渡部憲：再生骨材を使用した高流動高靱性コンクリートと鉄筋間の付着応力-すべりモデル，コンクリート年次論文集，Vol.44, No.1, pp.898-903, 2022.7
- 6) 渡部憲，大岡督尚，白都滋，加藤雄介：再生細骨材を使用した高靱性セメント複合材料の圧縮破壊挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.286, No.1, pp.485-490, 2006.7
- 7) 渡部憲，大岡督尚，白井申明，森泉和人：各種コンクリートの圧縮軟化挙動，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.2, pp.493-498, 2000.6
- 8) JCI規準：繊維補強セメント複合材料の曲げモーメント-曲率曲線試験方法(JCI-S-003-2007)，コンクリート工学協会，pp.1-8, 2007
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書[規準編]平成11年度版，JSCE-G552 繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げタフネス試験方法，pp. 217-219, 1999.11
- 10) 日本工業規格：金属材料引張試験方法(JIS Z 2241)，2011.2
- 11) 建材試験センター規格：引抜き試験による鉄筋とコンクリートとの付着強さ試験方法(JSTM C 2101)，建材試験センター，2005.2
- 12) CEB-FIP MODEL CODE 1990, Thomas Telford, pp.33-58, 1993.1