

# 東海大学紀要

建築都市学部

Vol. 1, No. 1 2022

---

目次

## 論文

高流動高靱性コンクリートと鉄筋間の付着特性に及ぼす材齢の影響

..... 宮野勇太・渡部憲..... 01

2023年3月31日発行

# 高流動高靱性コンクリートと鉄筋間の付着特性に及ぼす材齢の影響

宮野勇太\*<sup>1</sup> 渡部憲\*<sup>2</sup>

## Effect of Material Age on Bond-Slip Properties between High-Fluidity Ductile Fiber-Reinforced Concrete and Rebar

by

Yuta MIYANO\*<sup>1</sup> Ken WATANABE\*<sup>2</sup>

(Received on Nov. 15, 2022 and accepted on Jan. 23, 2023)

### Abstract

Ductile fiber-reinforced cementitious composites (DFRCC) have been developed so far, but there are still few examples of application to buildings due to problems such as workability. In view of the above background, one of the authors has been investigating high-fluidity ductile fiber-reinforced concrete using fly ash and recycled aggregate (R-HFDFRC) for the purpose of improving the fluidity of DFRCC and expanding the use of recycled aggregate. In the application of materials mentioned above to reinforced concrete structures, it is necessary to investigate the bond-slip properties between R-HFDFRC and rebar. Therefore, the authors have previously reported the bond-slip model between R-HFDFRC and rebar established using the test results obtained from material age at 28 days. The mechanical properties of R-HFDFRC change with the passage of material age, similar to general concrete. Some of the authors have previously investigated the time dependence in compressive and flexural properties of R-HFDFRC, and clarified the development of compressive and flexural strength up to material age of 91 days. In this study, we conducted the pull-out tests of rebar embedded in R-HFDFRC, for material age at 7, 28 and 91 days, to investigate the effect of aging to the bond-slip properties. As a result, by improving the existing bond-slip model, we proposed a bond-slip model between R-HFDFRC and rebar considering material aging.

**Keywords:** Recycled aggregate, DFRCC, High-Fluidity, Pull-out test, Bond stress

## 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、実際に DFRCC を使用した施工例は報告されているものの<sup>2)</sup>、その数は未だに少ないのが現状である。その理由として、施工性の問題や、他の材料と比較してコストが高い、マトリックスとして主にモルタルやセメントペーストを使用しているため、一般的なコンクリートと比較して水和熱や乾燥収縮による影響が大きい等の問題が挙げられる。

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、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<sup>3)</sup>。

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 を用いて解析を行う場合、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)が必要である。そのため、筆者らは、R-HFDFRC に挿入した異形鉄筋の引抜き試験を材齢

28 日で実施し、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<sup>4)</sup>。R-HFDFRC の力学特性は、一般的なコンクリートと同様に、材齢の経過とともに変化する。筆者らの一人らは、これまでに R-HFDFRC の圧縮および曲げ特性の経時変化について検討を行い、材齢 91 日までの圧縮および曲げ強度発現等について明らかにした<sup>5)</sup>。

そこで、本研究では、R-HFDFRC と鉄筋間の付着特性の経時変化について検討を行うため、引抜き試験を材齢 7, 28 および 91 日で実施した。そして、得られた結果への、文献<sup>4)</sup>に示されている付着モデルの適用性について検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

#### (1) 使用材料

再生骨材の物性一覧を、Table 1 に示す。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/cm<sup>3</sup>)を使用し、繊維は PVA 繊維(V, 径:0.2mm, 長さ:18mm, 弾性係数:27kN/mm<sup>2</sup>,

\*1 工学研究科建築土木工学専攻修士課程

\*2 建築都市学部建築学科教授

引張強度:975N/mm<sup>2</sup>および鋼繊維(S, 径:0.55mm, 長さ:30mm, 弾性係数:210kN/mm<sup>2</sup>, 引張強度:1145N/mm<sup>2</sup>)を使用した. 混和材料は高性能 AE 減水剤, 分離低減剤およびフライアッシュII種(密度:2.33g/cm<sup>3</sup>)を使用した.

(2) 調査

引抜き試験に使用した R-HFDFRC の配(調)合の概略を, Table 2 に示す. 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.

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(材齢:7, 28 および 91 日)および 3 等分点曲げ試験(材齢:28 日)を実施した. また, 鉄筋の強度確認のため, 鉄筋の引張試験を実施した.

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 D16(SD490), 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 3 体とした.

1 軸圧縮試験は試験方法を文献<sup>6)</sup>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載荷盤間変位とした. なお, 圧縮破壊エネルギー(G<sub>FC</sub>)は, 文献<sup>6),7)</sup>に示す手法により算出した(文献<sup>6),7)</sup>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<sup>8)</sup>に準じて行い, 計測項目を荷重, スパン中央部のたわみ(δ<sub>tb</sub>)および曲率とした. また, 試験後に, 純曲げ区間内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<sub>2b</sub>)は, 文献<sup>9)</sup>に示す手法により算出した(文献<sup>9)</sup>中の, δ<sub>tb</sub> 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<sup>10)</sup>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.

R-HFDFRC の材料特性一覧を, Table 3 に示す. また, 使用した鉄筋の外観および材料特性一覧を, Photo. 1 および Table 3 に示す.

Fig. 1 に, 1 軸圧縮試験により得られた R-HFDFRC の圧縮応力-縦ひずみ関係を示す. また, Fig. 2 に, 3 等分点曲げ試験により得られた R-HFDFRC の荷重-たわみ関係を示す. ここに示す材料特性を有する R-HFDFRC および鉄筋を使用し, 引抜き試験を実施した.

Table 3 Mechanical properties.

Specimen	Material age (days)	R-HFDFRC					Rebar		
		Compression			Bending		Yield strength (σ <sub>y</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	Yield point strain (ε) (×10 <sup>-6</sup> )	Young's modulus (E) (kN/mm <sup>2</sup> )
		Compressive strength (F <sub>c</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	Young's modulus (E) (kN/mm <sup>2</sup> )	Compressive fracture energy (G <sub>FC</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	Flexural strength (f <sub>1b</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )	Flexural toughness (f <sub>2b</sub> ) (N/mm <sup>2</sup> )			
RHC40	7	29.1	13.6	43.9					
RHC50		17.0	11.1	31.5					
RHC60		11.6	8.6	24.1					
RHC40	28	44.0	17.5	57.6	9.31	5.56	7	576	
RHC50		32.1	15.4	45.4	7.01	4.06	6		
RHC60		21.3	11.8	35.8	6.16	3.77	6		
RHC40	91	59.3	20.3	70.7				2949	
RHC50		46.3	18.9	61.9					
RHC60		33.6	16.5	45.5					



Photo. 1 Rebar appearance.

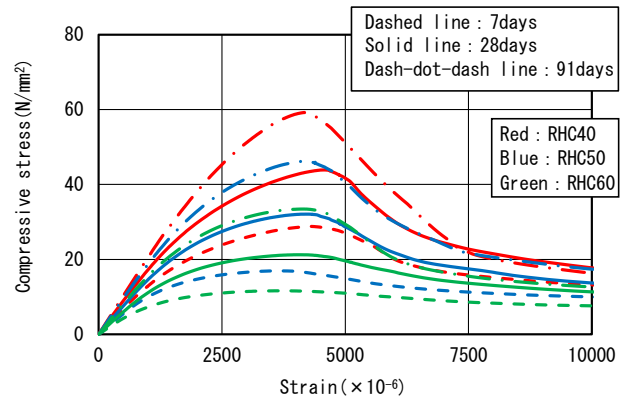


Fig. 1 Compressive stress-strain relationship.

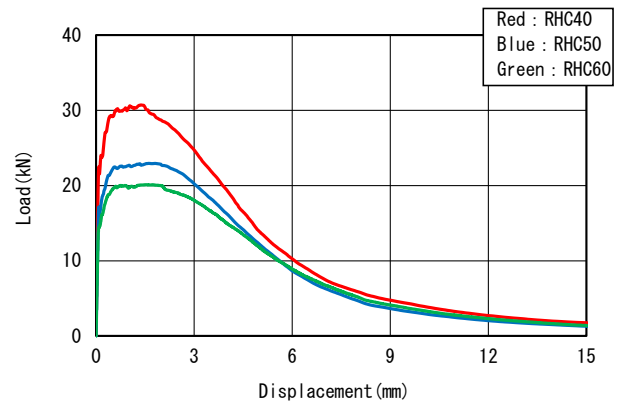


Fig. 2 Load-displacement relationship.

Table 1 Physical properties of aggregate.

Aggregate	Maximum size (mm)	Density in saturated surface-dry condition	Density in oven-dry condition	Percentage of absorption	Fineness modulus	
		(g/cm <sup>3</sup> )	(g/cm <sup>3</sup> )	(%)		
Recycled	Coarse	10	2.54	2.46	3.07	5.91
	Medium fine	2.5	2.58	2.49	3.37	2.52
	Very fine	0.6	2.54	2.43	4.47	1.22

Table 2 Mix proportions of R-HFDFRC.

Mix proportions	Water-binder ratio (W/B) (%)	Sand-binder ratio (S/B) (%)	Sand-total aggregate ratio (s/a) (%)	Fiber volume fraction (V <sub>f</sub> ) (vol.%)	Fiber volume mixig ratio (V <sub>m</sub> ) V:S	Replacement ratio of fly ash (%)
RHC40	40	40	85	3	7:3	20
RHC50	50	65				
RHC60	60	90				

### 2.3 引抜き試験

引抜き試験体の概要を、Table 4 に示す。また、引抜き試験の概要を、Fig. 3 に示す。引抜き試験は試験方法を文献<sup>11)</sup>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、載荷速度を文献<sup>11)</sup>に準じて鉄筋の引張応力が毎分 49N/mm<sup>2</sup> 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( $\tau$ )が毎分 0.6N/mm<sup>2</sup> 程度で低下するように制御した。試験体は、D16 を挿入した 100×100×100mm の角柱試験体とした。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:7, 28

Table 4 Outline of pull-out test specimen.

Specimen	Water-binder ratio (W/B) (%)	Rebar diameter	Test Body Dimensions (mm)	Cover thickness/rebar diameter	Bond length (mm)	Non-bond length (mm)
RHC40	40	D16	100×100×100	2.63	64	36
RHC50	50					
RHC60	60					

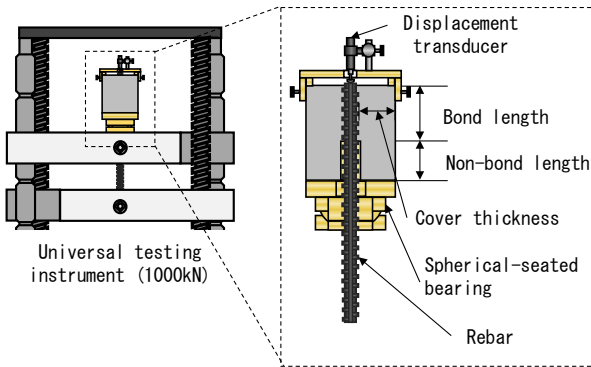


Fig. 3 Pull-out test overview.

Table 5 Pull-out test specimen.

Specimen	Material age (days)	Bond strength results		Slip at Bond strength results	
		Bond strength (N/mm <sup>2</sup> )	Standard deviation	Slip at Bond strength (mm)	Standard deviation
RHC40	7	9.98	0.402	0.479	0.0362
RHC50		6.31	0.811	0.613	0.0240
RHC60		4.10	0.254	0.630	0.0562
RHC40	28	14.1	0.854	0.349	0.0332
RHC50		11.3	0.575	0.541	0.0454
RHC60		7.54	0.731	0.593	0.0347
RHC40	91	16.5	0.326	0.299	0.0892
RHC50		14.9	1.05	0.339	0.0597
RHC60		11.6	0.596	0.512	0.110

および 91 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<sup>11)</sup>に準じた。

### 3. 結果と考察

Table 5 に、引抜き試験により得られた付着強度( $\tau_{max}$ )、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、Fig. 4 に、引抜き試験により得られた付着応力( $\tau$ )ーすべり( $s$ )関係を示す。さらに、Fig. 5 に、異形鉄筋の模式図を示す。なお、Fig. 4 中の  $\tau$ - $s$  関係は、同一水準の結果を平均化したものである。また、Fig. 6 中の黒破線は、使用した鉄筋のふし斜面の幅(Fig. 5 中の a)を示しており、1.65mm(実測値)である。さらに、Fig. 4 中の黒一点鎖線は、使用した鉄筋のふし間隔(Fig. 5 中の b)を示しており、10.50mm(実測値)である。

Fig. 4 によれば、 $\tau_{max}$  以降の  $\tau$ - $s$  関係の形状は、W/B および材齢の相違に係らず、 $\tau_{max}$  直後、やや急激に  $\tau$  が低下し、黒破線付近の  $s$  から  $\tau$ - $s$  関係の負勾配が緩やかとなり、黒一点鎖線付近の  $s$  以降  $\tau$  が一定となる傾向を示している。また、 $\tau_{max}$  以降～黒破線付近の  $s$  までの  $\tau$ - $s$  関係の負勾配および黒破線付近の  $s$  ~黒一点鎖線付近の  $s$  までの  $\tau$ - $s$  関係の負勾配は、W/B の低下および材齢の経過に伴い、急となる傾向を示している。材齢を変化させた場合の引抜き試験により得られた  $\tau$ - $s$  関係の  $\tau_{max}$  以降の形状は、文献<sup>4)</sup>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、Fig. 4(b)中には、骨材を天然骨材(細骨材:山砂および砕砂、粗骨材:砕石)とした普通コンクリートを使用した場合(NC, W/C=56%,  $F_c=41.7\text{N/mm}^2$ , 材齢 28 日)および高流動高靱性コンクリートを使用した場合(NHC50, W/B=50%,  $F_c=31.3\text{N/mm}^2$ , 材齢 28 日)の引抜き試験結果も示している。

Fig. 4(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、 $\tau_{max}$  以降の破壊靱性を著しく改善できることがわかる。R-HFDFRC と鉄筋間の付着モデルを定める場合、前述の靱性改善効果を適切に導入する必要があり、文献<sup>4)</sup>では、R-HFDFRC に挿入した異形鉄筋の引抜き試験を材齢 28 日で実施し、その結果から付着モデルを構築した。

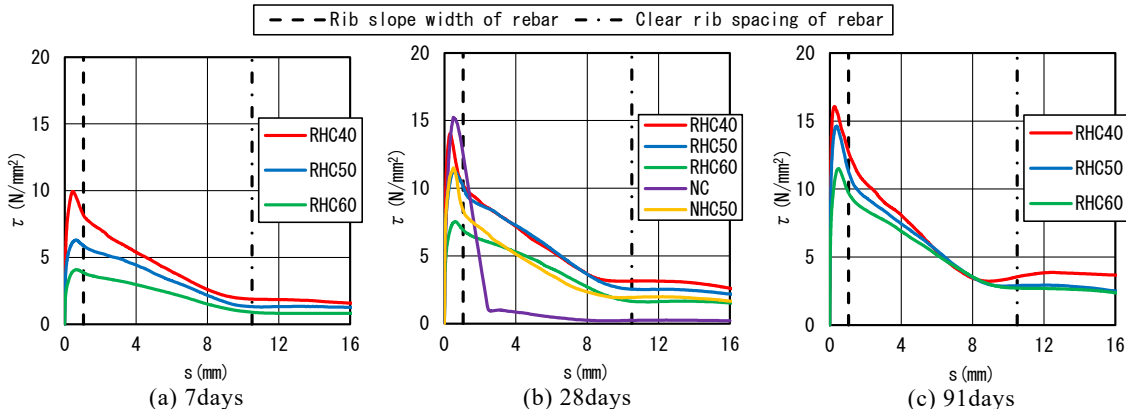


Fig. 4  $\tau$ - $s$  relationship.

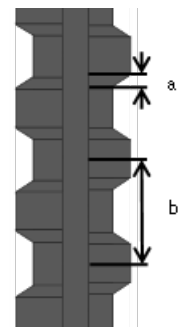


Fig. 5 Schematic diagram of rebar.

また、NHC50 の  $\tau_{max}$ (11.8N/mm<sup>2</sup>)は、R-HFDFRC を使用した場合(材齢 28 日とした RHC50 の  $\tau_{max}$ =11.3N/mm<sup>2</sup>)と大差ない。しかし、 $\tau_{max}$  直後における NHC50 の  $\tau$ - $s$  関係の負勾配は、材齢 28 日とした RHC50 と比較して、やや急になっており、骨材の影響と思われる。次のステップでは、骨材の影響について詳細に検討する予定である。

Fig. 6 に  $\tau_{max}$ -材齢関係を、Fig. 7 に  $s_0$ -材齢関係を示す。

まず、Fig.6 および前掲、Table5 によれば、同一材齢における  $\tau_{max}$  は W/B の低下に伴い増大している。また、 $\tau_{max}$  は同一 W/B であれば、材齢の経過に伴い増大している。

次に、Fig. 7 および前掲、Table 5 によれば、同一材齢における  $s_0$  は W/B の低下に伴い減少している。また、 $s_0$  は同一 W/B であれば、材齢の経過に伴い減少している。

以上の結果を踏まえ、 $\tau_{max}$ 、 $s_0$  および  $\tau_{max}$  以降の  $\tau$ - $s$  関係に及ぼす材齢の影響を、文献<sup>4)</sup>に示される付着モデルに反映する必要がある。

#### 4. 付着応力-すべりモデルに及ぼす材齢の影響

##### 4.1 モデル概要

Fig. 8 に文献<sup>4)</sup>に示される付着モデルの概要を示す。

Fig. 8 における  $\tau_{max}$  までの  $\tau$ - $s$  関係は、文献<sup>4)</sup>と同様、CEB-FIP Model Code1990<sup>12)</sup>(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。

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

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

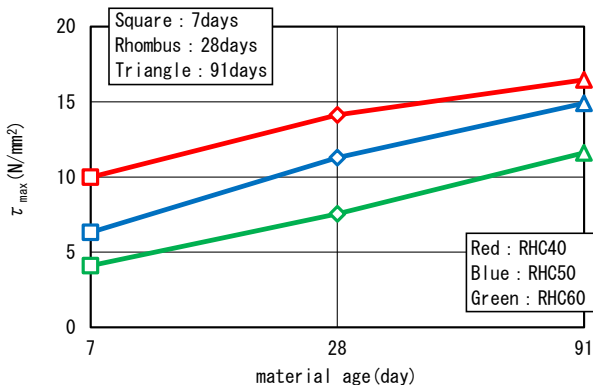


Fig. 6  $\tau_{max}$ -material age relationship.

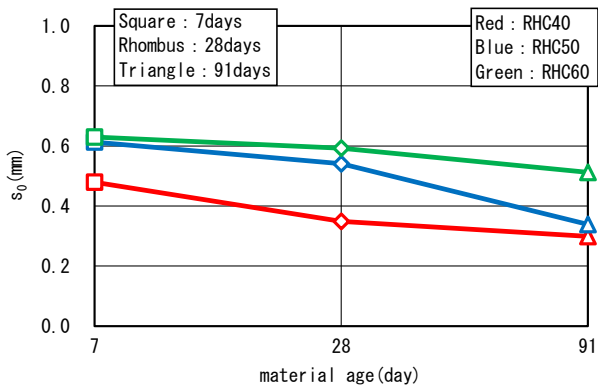


Fig. 7  $s_0$ -material age relationship.

ここに、 $\tau$ :付着応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\tau_{max}$ :付着強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $s$ :すべり(mm)、 $s_0$ :付着強度時すべり(mm)、 $\alpha$ :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<sup>0.5</sup>/mm)、 $F_c$ :圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)である。

また、 $\tau_{max}$  以降の  $\tau$ - $s$  関係は、文献<sup>4)</sup>と同様、3 直線で表現できるものとし、第 1 折れ点の  $s(s_1)$  はふし斜面の幅、第 2 折れ点の  $s(s_2)$  はふし間隔とした。第 2 折れ点以降は、第 2 折れ点における残留応力( $\tau_{f2}$ )の一定値とした。

##### 4.2 $\tau_{max}$ までの $\tau$ - $s$ 関係

Fig. 9 に、 $\tau_{max}$ - $F_c^{0.5}$  関係を示す。なお、Fig. 9 中の灰色破線は、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式(W/B および公称鉄筋径の相違に係らず、1 つの直線で近似した結果)を示している。

Fig. 9 によれば、 $\tau_{max}$  は  $F_c^{0.5}$  の増加に伴い直線的に増大している。W/B に係らず 1 つの直線で近似すると、Fig. 9 中に示す近似式 1(近似式の傾きが、式(2)中の A)が得られる。ここで得られた A(1.98:材齢 7~91 日の試験結果に対する近似結果)と文献<sup>4)</sup>に示される A(2.01:材齢 28 日の試験結果に対する近似結果)は、同程度の値であった。ただし、 $F_c$  が 45N/mm<sup>2</sup> 程度以上および 21N/mm<sup>2</sup> 程度以下における  $\tau_{max}$  に注目すると、試験結果と近似結果とのかい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(Fig. 9 中の Approximation2)。その結果、前述の問題は概ね解消した。

以上、材齢 7~91 日における  $\tau_{max}$  は、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式で概ね推定可能である。ただし、 $\tau_{max}$  に及ぼす材齢の影響をさらに精度よく反映するためには、本研究で提案した近似式 2 の使用が妥当である。

Fig. 10 に、 $s_0$ - $F_c$  関係を示す。なお、Fig. 10 中の灰色

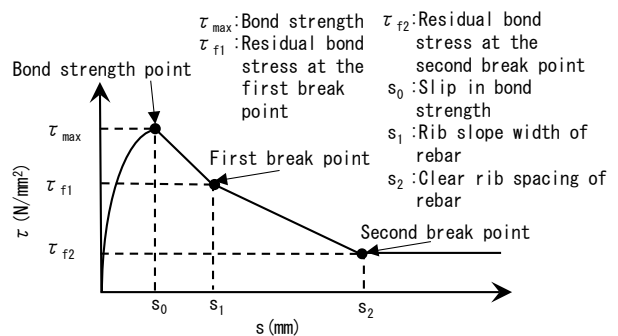


Fig. 8 R-HFDFRC bond stress-slip model overview.

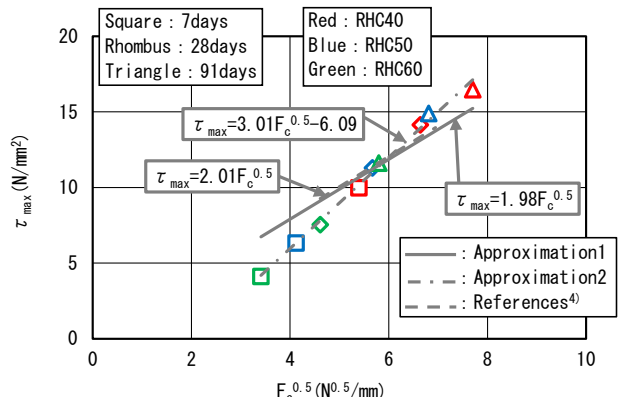


Fig. 9  $\tau_{max}$ - $F_c^{0.5}$  relationship.

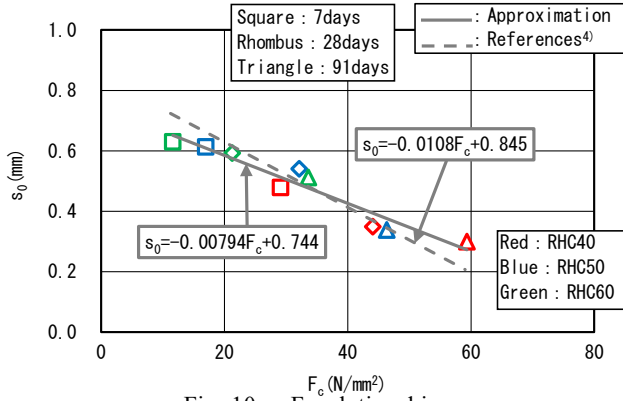


Fig. 10  $s_0$ - $F_c$  relationship.

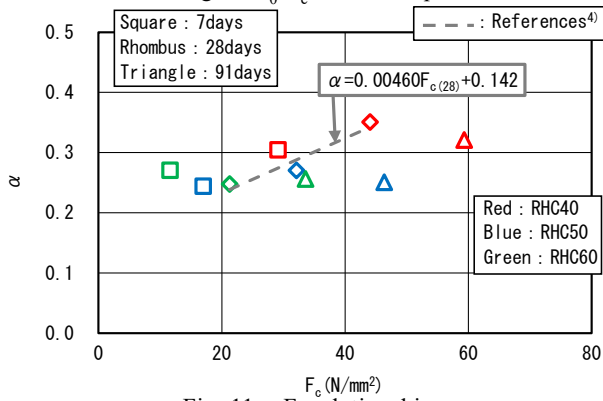


Fig. 11  $\alpha$ - $F_c$  relationship.

破線は、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式(材齢を28日、R-HFDFRCのW/Bを40, 50および60%, 公称鉄筋径をD16とした場合の直線近似結果)を示している。

Fig. 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、W/Bに係らず1つの直線で近似すると、Fig. 10中に示す近似式が得られる。

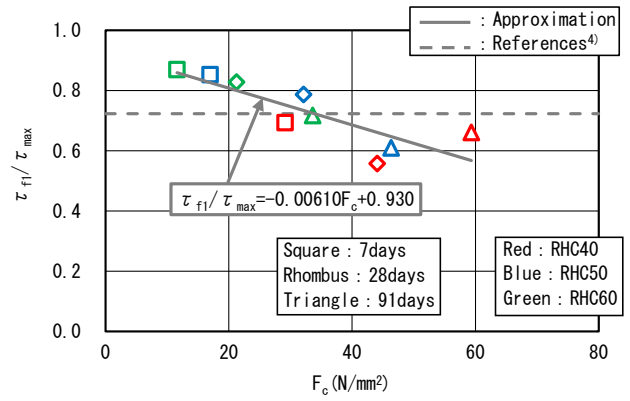
以上、材齢7~91日における $s_0$ は、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式で概ね推定可能である。しかし、 $\tau_{max}$ 同様、 $s_0$ に及ぼす材齢の影響をさらに精度よく反映するためには、本研究で提案した近似式の使用が妥当である。

Fig. 11に、 $\alpha$ - $F_c$ 関係をW/B別に示す。なお、Fig. 11中の灰色破線は、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式(材齢を28日、R-HFDFRCのW/Bを40, 50および60%, 公称鉄筋径をD16とした場合の直線近似結果)を示している。

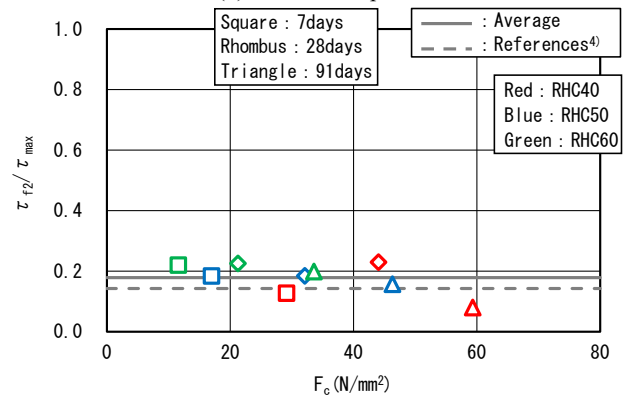
各 $\alpha$ は文献<sup>4)</sup>に準じて、以下の手法で求めた。まず、式(1)の両辺を $\tau_{max}$ で除して対数を取り、式(3)とする。次に、式(3)の両辺に引抜き試験結果を当てはめる。その後、左辺の値をy軸、右辺の値をx軸の座標値として、最小二乗法により原点を通る直線で近似することで $\alpha$ を求めた。

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

Fig. 11によれば、材齢の経過に伴い $F_c$ が上昇しても、同一調合であれば $\alpha$ の値はほぼ一定となっている。そのため、多少大胆ではあるが、材齢の相違に係らず、文献<sup>4)</sup>に示されている近似式に材齢28日の $F_c$ を代入して、 $\alpha$ を求めることとする。



(a) First break point



(b) Second break point

Fig. 12 Residual bond stress ratio- $F_c$  relationship.

Table 6 Parameter list.

$\tau_{max}(N/mm^2)$	$\tau_{max}=3.01F_c^{0.5}-6.09$
$s_0(mm)$	$s_0=-0.00794 \times F_c+0.744$
$\alpha$	$\alpha=0.00460 \times F_{c(28)}+0.142$
First break point	$\tau_{f1}(N/mm^2)$ $s_1(mm)$
	$\tau_{f1}=(-0.00610F_c+0.930) \times \tau_{max}$ Rib slope width of rebar
Second break point	$\tau_{f2}(N/mm^2)$ $s_2(mm)$
	$\tau_{f2}=0.178 \times \tau_{max}$ Clear rib spacing of rebar
After the second break point	Residual bond stress
	Constant value of $\tau_{f2}$

#### 4.3 $\tau_{max}$ 以降の $\tau$ - $s$ 関係

Fig. 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、文献<sup>4)</sup>と同様、直線近似をした場合に、前掲、Fig. 4の $s_0$ から $s_1$ までの $\tau$ - $s$ 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( $\tau_{f1}$ )を、 $\tau_{max}$ 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、文献<sup>4)</sup>と同様、直線近似をした場合に、前掲、Fig. 4の $s_1$ から $s_2$ までの $\tau$ - $s$ 曲線下の面積と等しくなるように定めた $\tau_{f2}$ を、 $\tau_{max}$ で除した値である。

Fig. 12(a)によれば、第1折れ点における残留付着応力比は、 $F_c$ の増加に伴い概ね直線的に減少していることから、第1折れ点における残留付着応力比は $F_c$ の関数で表すことが可能であると思われ、W/Bに係らず1つの直線で近似すると、Fig. 12(a)中に示す近似式が得られる。

一方、Fig. 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 $F_c$ の影響がある程度確認できるものの、MC90では $\tau_{max}$ 以降の残留付着応力比は付着条件により一定値(横拘束なしで0.15, 横拘束ありで0.4)として

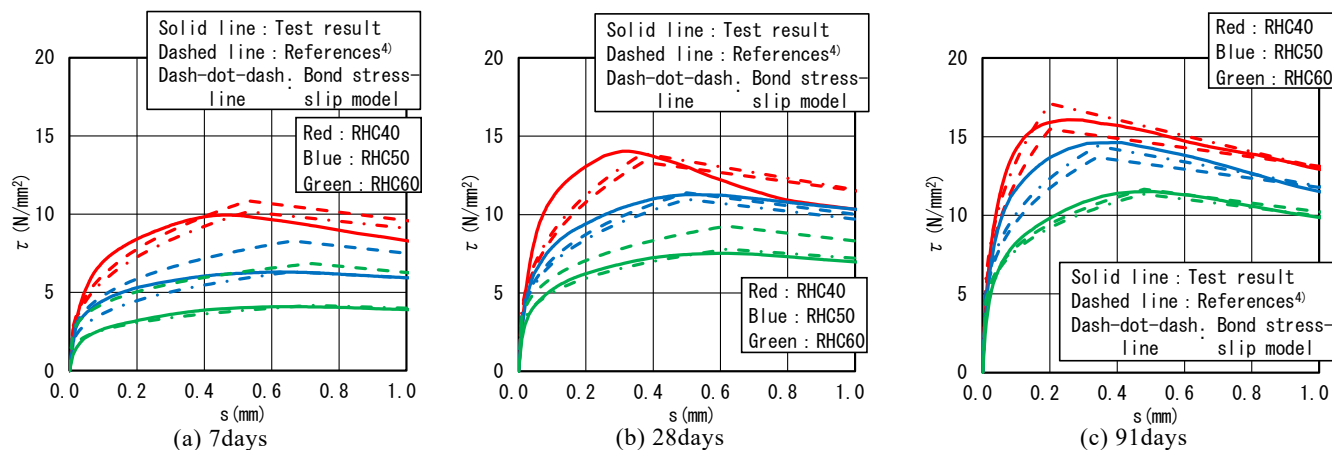


Fig. 13  $\tau$ - $s$  relationship (up to  $s=1\text{mm}$ ).

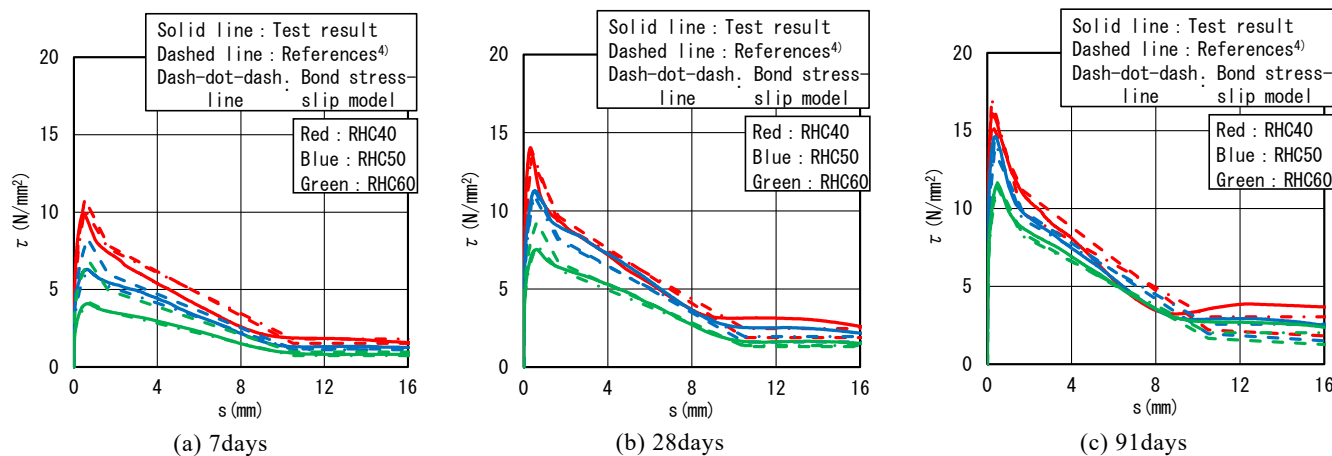


Fig. 14  $\tau$ - $s$  relationship (overall).

おり、本研究においても第2折れ点における残留付着応力比を一定値(各水準で得られた値の平均値 0.178)とする。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(0.178)は、文献<sup>4)</sup>に示される第2折れ点における残留付着応力比の平均値(0.142)と同程度の値を示した。

以上、材齢7~91日における第1折れ点および第2折れ点の残留付着応力比として、文献<sup>4)</sup>に示される値が適用可能である。ただし、各残留付着応力比に及ぼす材齢の影響をある程度精度よく反映するためには、本研究で示した近似式や定数の使用が妥当である。

#### 4.4 引抜試験結果との比較

Table 6 に、経時変化を踏まえた 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 Table 6 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  $\tau$ - $s$  関係(Fig. 13 および 14 中の一点鎖線)と引抜き試験により得られた  $\tau$ - $s$  関係(Fig. 13 および 14 中の実線)の比較を、Fig. 13 および 14 に示す。なお、Fig. 13 および 14 中には、文献<sup>4)</sup>に示される、材齢28日の試験結果から構築した付着モデルによって推定された  $\tau$ - $s$  関係(Fig. 13 および 14 中の破線)も併せて示す。

Fig.13 および 14 によれば、文献<sup>4)</sup>に示される付着モデルによって推定された  $\tau$ - $s$  関係は、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、特に材齢7日の RHC50 および 60、材齢28日の RHC60 については、 $\tau_{\max}$  付近における  $\tau$ - $s$  関係の形状を踏まえると、別モデルの適用が妥当であると思われる。一方、本研究で提案した付着モデルによって推定された  $\tau$ - $s$  関係を使用すれば、上記の点を、概ね解消できている。

即ち、経時変化を踏まえた付着モデルを構築しようとする場合、本研究で提案した付着モデル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) 材齢を変化させた場合の引抜き試験により得られた  $\tau$ - $s$  関係の  $\tau_{\max}$  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。
- 2) 経時変化を踏まえた R-HFDFRC と鉄筋間の付着モデルを構築しようとする場合、本研究で提案した付着モデルの適用が妥当である。

## 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, (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) 渡辺健, 渡部憲:再生骨材を使用した高流動繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.271-276, (2017.7).
  - 4) 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).
  - 5) 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).
  - 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.28, No.1, pp.485-490, (2006.7).
  - 7) 渡部憲, 大岡督尚, 白井伸明, 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) 日本産業規格: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間も付着強さ試験方法(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).