

2. モルタルを用いた繊維補強セメント系複合材料およびスチールチップ補強セメント系複合材料に対する異形鉄筋の引抜き付着性状に関する実験的研究

Experimental Study on Pull-Out Bond Behavior of Deformed Bar Embedded in Mortar-based Fiber Reinforced Cementitious Composites and Steel Chip Reinforced Cementitious Composites

森 浩二*¹

要 旨

繊維補強セメント系複合材料を RC 構造部材へ適用し、その材料の特性を有効に活用した設計を行うためには、繊維補強セメント系複合材料と鉄筋との相互作用について明らかにする必要がある。本報では鉄筋との相互作用の一つとして付着性状に着目し、繊維補強モルタル（モルタルに繊維補強材料を混入したもの）に埋め込まれた異形鉄筋の引抜きに対する付着性状を調べる実験を行った。対象とした繊維補強材料は、鋼繊維、ハイブリッド繊維（鋼繊維とポリエチレン繊維の混合）、スチールチップ（精工鋼板加工時に発生する切削屑）の3種類とした。実験の結果、いずれの繊維補強材料を用いた試験体も、繊維を混入しない無補強モルタルの試験体と比べて付着割裂破壊時強度、最大付着応力、付着剛性が増加した。さらに、付着割裂によるひび割れの発生状況から、通常のコンクリートの場合に見られるものと同様の、リングテンション抵抗機構の成立が確認できた。

キーワード：付着応力-すべり関係／鋼繊維／ハイブリッド繊維／スチールチップ／付着割裂

1. はじめに

コンクリートやモルタルの性能向上を目的として繊維を混入した繊維補強セメント系複合材料には多種多様なものがある。混入する繊維材料として、鋼繊維や合成繊維を用いたものが 1970 年代後半より実用化されており、トンネルや法面の吹付け工事、二次製品などに使用されている^{1),2)}。また、近年では、さらなる高機能、高性能化を目指し、超高強度、高靱性、高耐久性を実現した材料が開発されている。

繊維に期待される役割は、初期ひび割れが生じた後の応力伝達を行い、引張強度の上昇やその後の強度低下の抑制である。ひび割れ幅に対する繊維による見かけの架橋応力のメカニズムについては数多くの研究があり、繊維の種類や混入量などといったパラメータに関する材料設計手法も一部の繊維補強セメント系複合材料では確立している³⁾。

しかし、繊維補強セメント系複合材料を RC 部材へ適用した場合の設計法については十分に検討されているとは言いがたく、効果的に使用できる領域の模索が課題とされている⁴⁾。その一因としては、繊維補強セメント系複合材料の長所が、引張強度の上昇、ひび割れ抑制、伸

び能力の向上などにあるのに対し、従来の建築構造部材の設計手法の延長ではそれらの特性を十分に評価できないことが考えられる。そうした背景を踏まえると、繊維補強セメント系複合材料の新たな設計手法を確立するためには、材料単体の特性のみならず、鉄筋との相互作用についても明らかにしていかなければならない。繊維補強セメント系複合材料の RC 部材としての曲げ耐力やせん断耐力に対しては既に多くの研究⁴⁾がなされているが、鉄筋の付着性能に関する研究は多くはない。

本報では、繊維補強セメント系複合材料と異形鉄筋との付着相互作用に着目し、繊維補強モルタルに定着した異形鉄筋に対する引抜き付着実験を行った結果⁵⁾について述べる。RC 部材の付着強度式との適合性については、横拘束筋を有する試験体のキャンティレバー型の引抜き実験^{6),7)}が行われることが多いが、本研究では付着挙動に対する繊維補強の効果を調べることを目的として、横拘束筋のない試験体を用いた引抜き付着実験としている。モルタルに混入した繊維補強材料は、鋼繊維、ハイブリッド繊維（鋼繊維とポリエチレン繊維を混合使用したもの）、および特殊な繊維補強材料としてのスチールチップである。

*¹ 技術研究所構造研究グループ

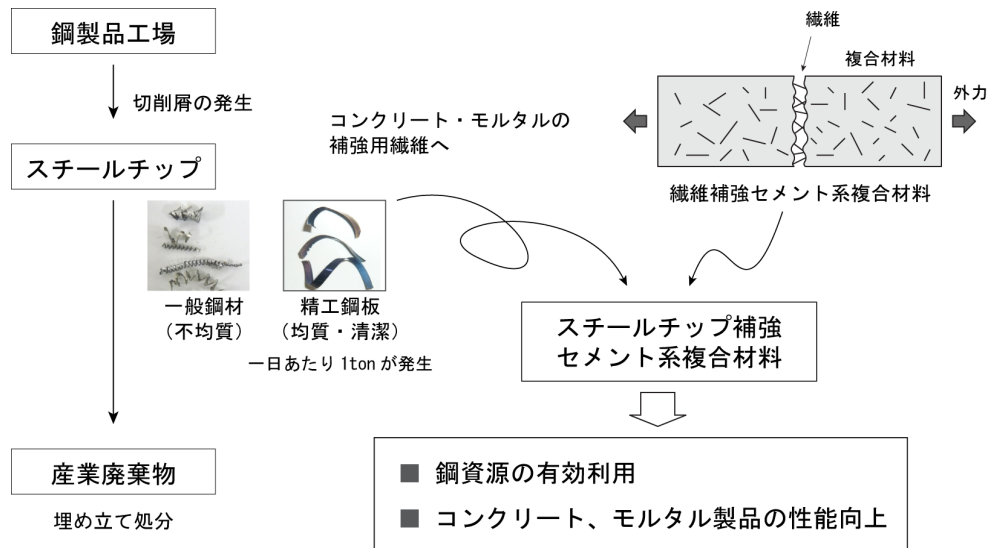


図-1 スチールチップの概要

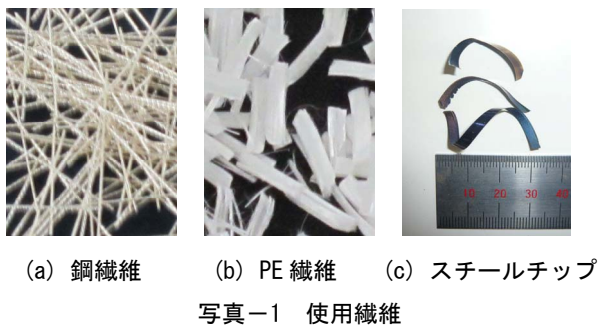


表-1 スチールチップの形状測定結果⁶⁾

	平均	標準偏差
質量 (g)	0.20	0.10
h (mm)	20.6	7.53
D (mm)	10.2	5.73
t (mm)	0.25	0.09
b (mm)	2.63	0.71
巻き数 (回)	1.62	0.92

2. 試験概要

2.1 繊維補強材料

(1) 鋼繊維 (SF)

素線径 $\phi 0.15\text{mm}$ の鋼線を 5 本撚りとした鋼ワイヤを、長さ 32mm に切断したものを用いた（写真-1(a)）。

(2) ハイブリッド繊維 (HF)

本報では、鋼繊維とポリエチレン (PE) 繊維を混合使用したハイブリッド型繊維補強系セメント複合材料⁸⁾に用いる繊維をハイブリッド繊維 (HF) と呼ぶこととする。鋼繊維は(1)で示したものを、ポリエチレン繊維は径 $\phi 12\mu\text{m}$ 、長さ 6mm の繊維が水溶性樹脂のバインダーで結合されているものを用い（写真-1(b)）、混合比率は体積比 1:1 とした。

(3) スチールチップ (SC)

スチールチップの概要を図-1 に示す。スチールチップは鋼材の切削時に発生する切削屑⁹⁾であり、通常は埋め立て処分されるが、繊維補強材料として転用使用が可能

となれば、鋼資源の有効利用とコンクリート・モルタル製品の性能向上の効果を期待することができる。

本実験では精工鋼板の表面切削加工時に生じた鋼種 SS400 のものを用いた（写真-1(c)）。一般鋼材切削時に発生するものと比較して、形状が均質、潤滑油が使用されていないといった特徴がある。表-1 にスチールチップの形状と測定結果を示す。見かけの平均径 (D) は 10.2mm、平均高さ (h) は 20.6mm である。スチールチップは厳密には繊維とは異なるが、ここでは低コストの繊維代替材料として繊維と同列に扱った。

2.2 モルタル調合

試験体に用いたモルタルの調合を表-2 に示す。結合材は普通ポルトランドセメント (C) とシリカフェーム (Si) の混合（混合比 4:1）とし、細骨材 (S) には川砂を用いた。また、混和剤 (SP) はポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。

繊維混入率 (V_f) は試験体の種類に応じ、体積比で 0%（無補強モルタル）、2.0%（鋼繊維、ハイブリッド繊維）、

表-2 モルタル調合

繊維種類	繊維混入率 V_f (Vol.%)	単位水量 W (kg/m ³)	セメント C (kg/m ³)	シリカ Si (kg/m ³)	細骨材 S (kg/m ³)	水結合材比 $W/(C+Si)$ (%)	シリカセメント比 Si/C	混和剤比 $SP/(C+Si)$ (%)
—	—	196	712	178	1121	22	0.25	2.2
SF (鋼繊維)	2.0	196	717	179	1075	22	0.25	2.2
HF (鋼繊維+PE)	2.0	196	721	180	1029	22	0.25	2.2
SC (スチールチップ)	1.5	197	713	178	1070	22	0.25	2.2
	3.0	198	713	178	1070	22	0.25	2.2

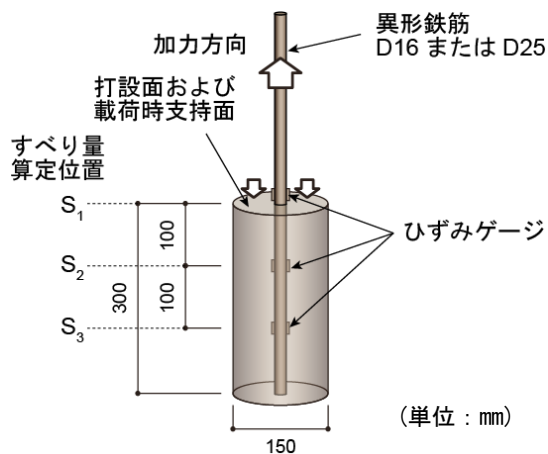


図-2 試験体概要

1.5 および 3.0%（スチールチップ）とした。混入率は内割として求め、繊維の混入量に応じて細骨材のみを減じる調合とした。スチールチップ試験体では試し練りの結果により、鋼繊維、ハイブリッド繊維の2%より小さい混入率である1.5%を標準とし、その2倍量の3%についても実験することとした。

2.3 試験体製作方法

ベースモルタルは、セメント、シリカフューム、細骨材を空練りしたものに水および混和剤を加え、ハンドミキサーによる練り混ぜを行った。その後、繊維またはスチールチップを投入し、手練りによって練り混ぜた。

試験体の形状は、図-2のように円柱形のモルタル試験体の中央に異形鉄筋を定着させたものとし、直径150mm高さ300mmの铸铁製テストピース用型枠の中央に異形鉄筋（D16、D25）を設置し、上方よりモルタルを流し込んで突き棒で締め固めた。

引抜き付着実験用の試験体のほか、圧縮試験用、曲げ試験用の供試体を製作した。いずれも打設後7日で脱型し、気中で養生を行った。

試験体のパラメーター一覧を表-3に示す。

表-3 試験体パラメータ

繊維種類	繊維混入率 V_f (Vol.%)	鉄筋径
—	0	D16
		D25
SF (鋼繊維)	2.0	D16
		D25
HF (ハイブリッド繊維)	2.0	D16
		D25
SC (スチールチップ)	1.5	D16
		D25
	3.0	D16
		D25

* 各パラメータに付き6体を製作し、2体ずつ荷重パターンの異なる実験を行った。

表-4 圧縮試験結果

補強繊維	繊維混入率 V_f (Vol.%)	材齢 d (日)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	圧縮強度時ひずみ ϵ_{peak} ($\times 10^{-3}$)	静弾性係数 E_c ($\times 10^4$ N/mm ²)
—	0	56	84.8	2.93	3.20
		42	76.4	3.06	2.70
SF	2.0	56	100.9	3.58	3.49
		42	75.1	3.34	3.43
HF	2.0	56	77.4	2.97	3.30
		42	93.0	3.18	3.66
SC	1.5	56	85.6	3.36	2.45
		42	76.9	2.74	2.93
	3.0	56	92.7	3.95	3.02
		42	90.2	3.76	3.25

* 同一繊維量における段の上下はバッチが異なる

2.4 圧縮試験・鉄筋引張試験結果

モルタルの圧縮試験結果を表-4に、鉄筋の引張試験結果を表-5に示す。圧縮試験はφ100mm×200mmの供試体を用いた。

2.5 曲げ試験結果

繊維補強モルタルの曲げ試験結果および曲げ試験より算定した引張強度を表-6に示す。曲げ試験はコンクリー

表－5 鉄筋引張試験結果

種類	降伏荷重 (kN)	最大荷重 (kN)	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_u (N/mm ²)	弾性係数 E_s ($\times 10^5$ N/mm ²)
D16	65.9	98.2	331.7	494.5	2.08
	68.1	99.1	342.7	498.8	1.95
D25	199.5	293.9	393.7	580.1	1.90

* D16 の段の上下はロットの違いを表す

表－6 曲げ試験結果

補強繊維	繊維混入率 V_f (Vol.%)	材齢 d (日)	最大荷重 P_{max} (kN)	引張強度 σ_t (N/mm ²)
—	0	69	4.6	4.3
SF	2.0	69	30.2	28.3
HF	2.0	69	17.5	16.4
SC	1.5	69	6.9	6.5
	3.0	69	9.6	9.0

トカッターで中央に深さ 20mm の切欠きを設けた 100mm $\times$ 100mm $\times$ 500mm の試験体に対する 3 点曲げ試験（支持点間距離 400mm）とし、最大荷重時の曲げモーメントから引張強度を推定した。

3. 引抜き付着実験

3.1 载荷方法

500kN 万能試験機を用い、上下を逆にした円柱形試験体の打設面を载荷支持面として、下方に鉄筋を引き抜く方法で载荷を行った（写真－2）。载荷支持面には平滑化のためモルタルを塗布した。载荷パターンは、単調载荷、1 回繰返し载荷、10 回繰返し载荷とし、1 回繰返し载荷では引き抜き量 1mm 毎に各 1 回の一方向载荷、10 回繰返し载荷では同様に各 10 回の一方向载荷とし、引抜き量 20mm 以降は単調载荷とした。また、各パラメータについて 2 体の実験を行った。

3.2 計測方法

鉄筋の引抜き荷重のほか、試験体载荷支持面と鉄筋上の計測点との相対変位、鉄筋の露出部分およびモルタル埋設部分のひずみを計測した。鉄筋計測点の変位から露出部部分の鉄筋伸び量相当を減じたものを、モルタルと鉄筋のすべり量とした。

3.3 実験結果

実験結果の一覧を表－7 に、D25 を使用した 1 回繰返し载荷試験体の荷重-変位関係を図－3 に示す。試験体には、



写真－2 加力状況



写真－3 割裂破壊状況



(a) SC 1.5%, D25



(b) SC 3%, D25

写真－4 ひび割れ発生状況

鉄筋の破断やモルタルの割裂により最終の破壊状況が確認できたもののほか、载荷・計測が不安定となったため载荷を中断したものもあった。

割裂破壊となった試験体では、写真－3 のように鉄筋を中心とした放射状のひび割れにより試験体全体が割裂する破壊性状となっている。破壊部分には、異形鉄筋の節の位置に相当する部分のモルタルに支圧破壊を生じた痕跡が観察された。また、割裂破壊が生ぜず鉄筋の破断に至った試験体の一部についても、写真－4 に示すように载荷支持面に鉄筋を中心とした放射状のひび割れが観察されたものがあった。

4. 考察

4.1 破壊形式

試験体の破壊形式は、異形鉄筋の破断によるものと、モルタルの割裂破壊によるものの、2 種類であった。ここでは、異形鉄筋が破断したときの最大荷重を鉄筋破断強度、割裂破壊したときの最大荷重を付着割裂破壊強度とした。鉄筋破断強度は、材料試験から得られる鉄筋引張強度と概ね一致するため、付着割裂破壊強度が鉄筋破断強度を下回る場合に割裂破壊を生じると考えられる。

表-7 実験結果

種別		D16						D25					
		単調載荷		1 回繰返し		10 回繰返し		単調載荷		1 回繰返し		10 回繰返し	
0%	P_{max}	97.3	98.1	96.9	98.2	97.3	99.4	234.4	203.9	260.6	222.7	223.3	140.7
	τ_{bmax}	11.9	11.4	12.5	11.4	10.0	11.2	15.0	11.8	12.5	14.4	11.2	10.3
	K_n	26.0	35.1	61.4	—	13.8	37.7	7.6	11.5	24.1	16.1	3.3	—
	材齢	34	51	35	49	55	52	34	51	35	49	57	51
	鉄筋降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	なし	降伏	降伏	降伏	なし
	ひび割れ	4 本	2 本	2 本	2 本	4 本	1 本	2 本	4 本	なし	4 本	3 本	4 本
SF2%	P_{max}	98.6	98.6	80.8	98.2	99.2	—	294.3	292.8	255.6	290.8	291.0	—
	τ_{bmax}	10.3	11.6	10.5	10.8	17.9	—	23.5	16.2	16.7	17.8	18.6	—
	K_n	45.7	98.0	35.6	76.5	50.2	—	140.5	21.3	21.7	31.9	69.3	—
	材齢	35	51	51	50	58	—	35	51	51	50	62	—
	鉄筋降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	—	—	降伏	降伏	降伏	降伏	—
	ひび割れ	なし	1 本	なし	なし	なし	—	—	1 本	なし	なし	なし	—
HF2%	P_{max}	98.9	99.3	71.2	97.0	97.8	—	290.3	292.9	271.0	291.4	290.6	—
	τ_{bmax}	10.3	10.9	11.1	10.4	不良	—	17.8	19.5	17.0	19.6	15.6	—
	K_n	93.7	19.6	63.0	—	—	—	34.5	25.0	26.9	25.8	26.6	—
	材齢	35	51	55	50	62	—	35	51	55	51	62	—
	鉄筋降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	—	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	—
	ひび割れ	なし	なし	なし	なし	なし	—	なし	2 本	2 本	2 本	なし	—
SC1.5%	P_{max}	97.5	98.5	98.3	97.5	96.6	98.1	171.9	293.6	255.9	288.4	282.8	289.2
	τ_{bmax}	12.0	11.0	12.2	11.9	11.0	11.5	16.9	17.5	14.2	19.4	不良	16.9
	K_n	57.8	73.4	24.7	47.6	18.6	14.8	—	18.4	15.0	9.6	—	11.4
	材齢	35	51	50	49	57	52	35	51	50	49	58	52
	鉄筋降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	なし	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏
	ひび割れ	なし	2 本	2 本	なし	なし	1 本	4 本	5 本	2 本	2 本	3 本	2 本
SC3%	P_{max}	75.7	98.5	83.4	96.6	98.5	—	263.5	292.9	239.6	291.8	288.7	—
	τ_{bmax}	8.4	11.4	11.9	11.9	11.6	—	18.7	20.1	12.9	19.5	18.7	—
	K_n	8.4	—	41.5	—	23.6	—	6.8	17.5	29.2	27.7	37.0	—
	材齢	31	51	51	49	59	—	31	51	51	50	59	—
	鉄筋降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	—	降伏	降伏	降伏	降伏	降伏	—
	ひび割れ	なし	2 本	なし	2 本	2 本	—	なし	1 本	なし	2 本	1 本	—
	最終状況	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断
		破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断
		破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断
		破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断
		破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断
		破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断	破断

P_{max} : 実験時の最大荷重(kN), τ_{bmax} : 実験時の最大付着応力(N/mm²), K_n : 付着応力-すべり関係の割線剛性(N/mm³), 材齢 (日)
 破断 : 鉄筋破断により終了, 割裂 : 付着割裂破壊により終了, 中断 : 鉄筋降伏後に載荷を中断, 計測 : 変位計測不良のため中断

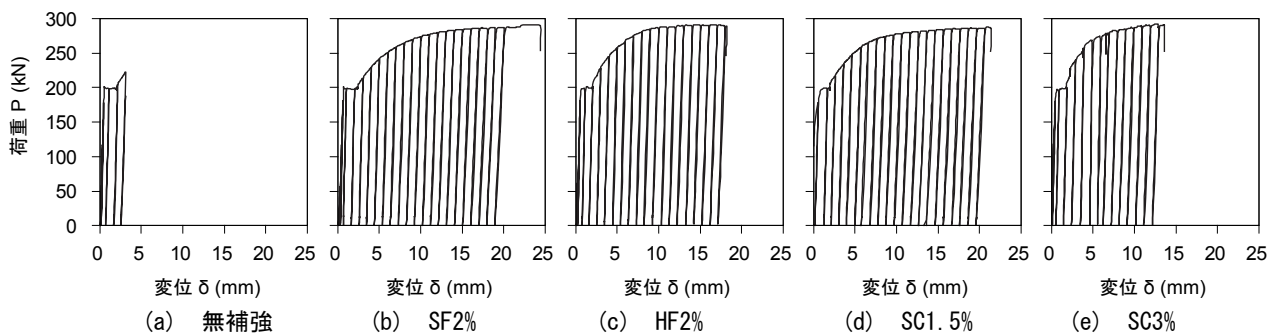


図-3 荷重-変位関係 (D25, 繰返し 1 回)

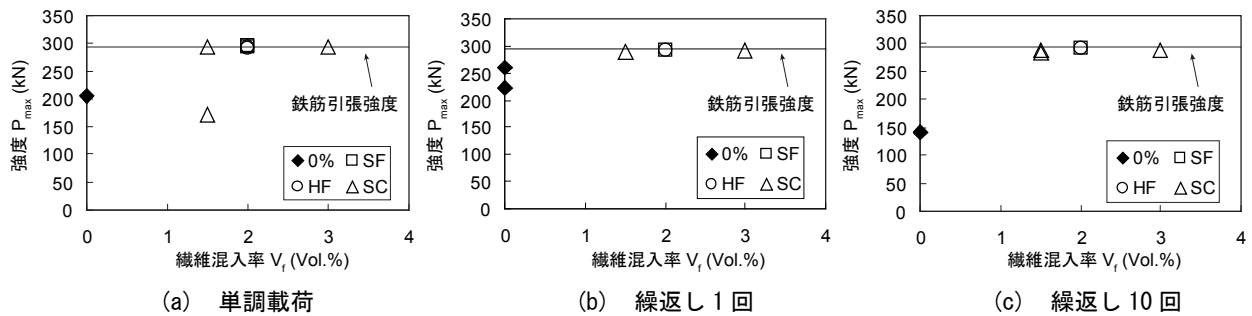


図-5 繊維混入率と強度の関係 (D25)

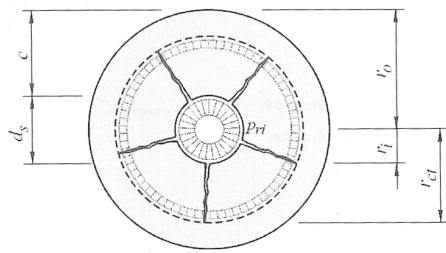


図-4 リングテンション抵抗機構

無補強モルタルで異形鉄筋に D16 を使用した試験体は全て異形鉄筋の破断が生じており、無補強モルタル試験体の付着割裂破壊強度は異形鉄筋 D16 の鉄筋破断強度を上回っている。逆に、D25 の試験体の結果によれば付着割裂強度は D25 の鉄筋破断強度を下回っている。

割裂破壊を生じた試験体、およびひび割れの発生した試験体は、いずれも鉄筋を中心とした放射状のひび割れを生じており、図-4 に示すようなリングテンションによる付着割裂機構¹⁰⁾を示した。無補強モルタルの試験体に比べ、鋼繊維 (SF)、ハイブリッド繊維 (HF)、スチールチップ (SC) 補強試験体ではひび割れの発生は少なく、繊維補強による引張強度の上昇が、付着割裂破壊強度の上昇につながったと考えられる。既往の研究では多数の細かなひび割れの発生が報告されている¹¹⁾が、本実験では見られなかった。繊維混入率、繊維の種類、実験方法の違いによるものと考えられる。

4.2 付着割裂強度

D25 の試験体の繊維混入率と強度との関係を図-5 に示す。図中には鉄筋の破断によって破壊した試験体の強度と、割裂破壊を生じた試験体の強度を示した。無補強の試験体はすべて割裂破壊であり、試験体の強度は鉄筋の引張強度を大きく下回った。繊維補強モルタル試験体では後述する 1 体を除いて、鉄筋破断であり、繊維補強によって付着割裂破壊強度が上昇したことがわかる。

図-5(a) に示した試験体のうち、スチールチップ (SC) 1.5%、D25、単調載荷の試験体 1 体が、割裂破壊を生じ無

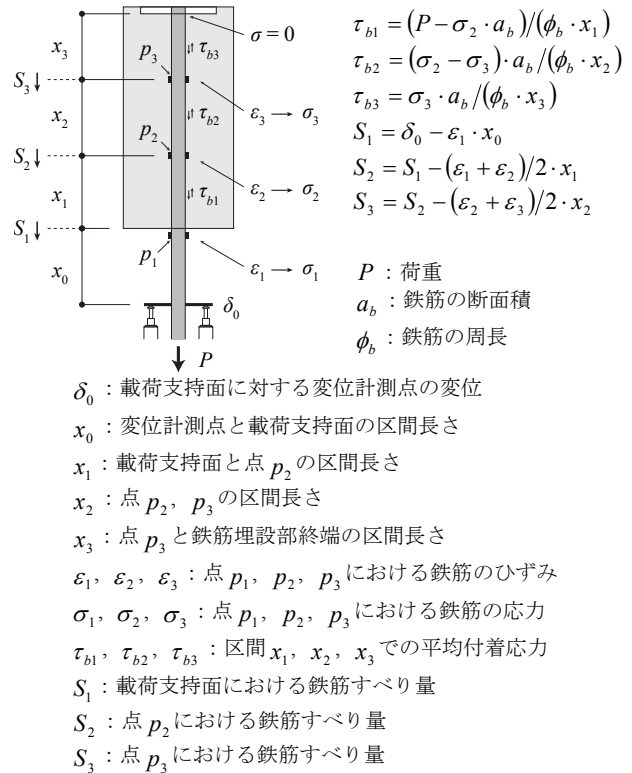


図-6 付着応力、すべり量の算定

補強の強度を下回っている。同条件の試験体や、同材料の繰返し載荷試験体では、鉄筋引張強度が得られているため、強度低下は材料に起因するものではなく、試験体打設時に生じた欠陥が原因と考えられる。一方、SC3%の試験体では強度低下は生じていないため、混入量 1.5% が過大であるために製造欠陥が生じたと結論づけられるものではないが、スチールチップ補強モルタルの品質確保のためには、打設方法や管理手法の改善が必要である。

4.3 付着応力-すべり関係

(1) 算定方法

図-6 に試験体のすべり量と付着応力の算定式と記号の定義を示す。すべり量の算定にあたっては、鉄筋の露出部分は一様なひずみ分布と仮定し、モルタル内部では

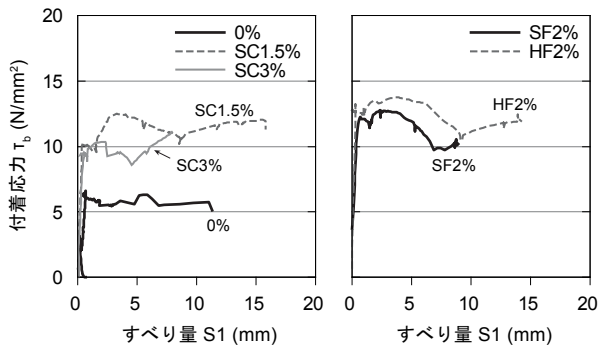


図-7 付着応力-すべり関係
(繊維種別による比較, D25, 単調載荷)

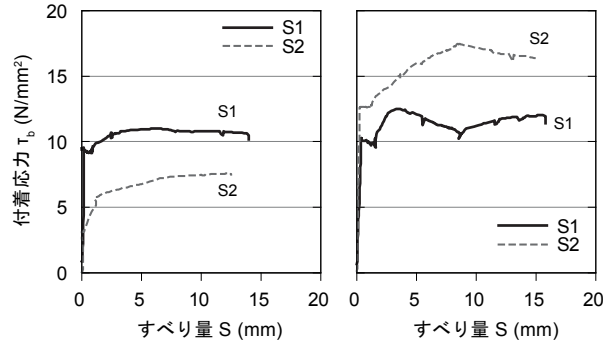


図-8 付着応力-すべり関係
(鉄筋径による比較, SC1.5%, 単調載荷)

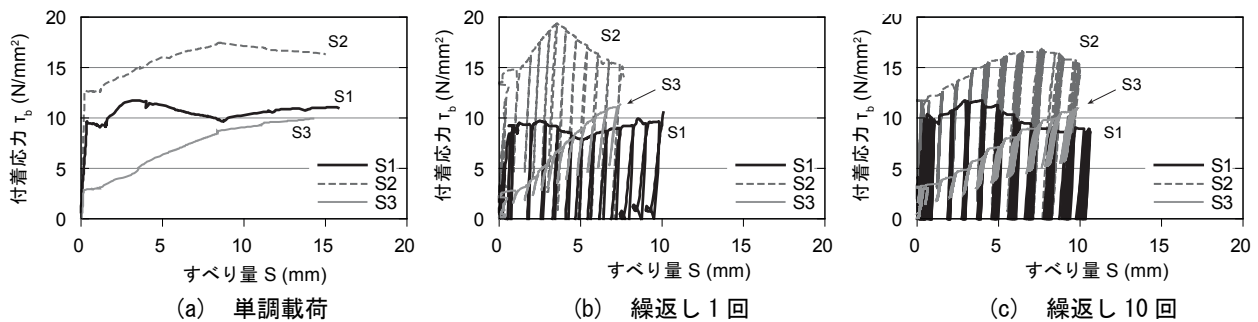


図-9 付着応力-すべり関係 (載荷パターンによる比較, SC1.5%, D25)

ひずみ計測を行った各区内のひずみ分布が線形であると仮定した。付着応力は鉄筋の繰返し載荷時のBauschinger 効果を考慮¹²⁾して求めた各計測点における鉄筋応力平均値より算定した。

(2) 繊維種別による比較

繊維補強の効果として付着応力が増大する傾向が見られた。図-7はD25、単調載荷試験体における載荷支持面付近 (S_1) の付着応力-すべり関係の比較である。すべり量が急増する時の付着応力は、繊維補強モルタル試験体が無補強試験体に比べて1.5~2.0倍程度と高くなっている。

(3) 鉄筋径による比較

付着応力の分布に関して、載荷支持面付近 (S_1) とモルタル内部 (S_2) では鉄筋径D16とD25の場合で傾向が異なった。図-8はSC1.5%の単調載荷試験体の比較である。D25の試験体ではD16とは異なり、表面に近い S_1 よりも内部である S_2 の付着応力が大きい。付着応力の分布が線形でなく、引抜き荷重が大きいD25の試験体の場合では、表面付近の付着劣化が先行して生じたと考えられる。鉄筋径や付着劣化が生じる区間長さとの関係などの検討が必要である。

(4) 載荷パターンによる比較

載荷パターンの違いによる影響は明確には現れなかつ

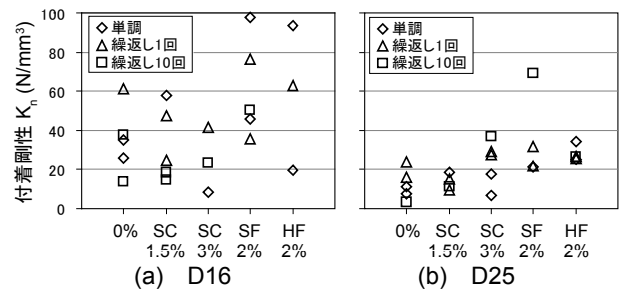


図-10 付着剛性の比較

た。図-9はSC1.5%、D25試験体における比較である。繰返し10回では繰返し1回に比べて S_1 と S_2 の差がやや小さくなっている。既往の研究に見られるような繰返し載荷による応力低下¹⁰⁾は見られないが、材料や実験方法の違いを含めた検討が必要である。

4.4 付着剛性

付着剛性の比較を図-10に示す。付着剛性は鉄筋降伏強度の1/3および2/3時の付着応力-ひずみ関係の割線剛性として求めた。ばらつきは大きいですが、繊維補強によって付着剛性は増大している傾向がわかる。また、スチールチップ(SC)1.5%、3%試験体よりも鋼繊維(SF)2%、ハイブリッド繊維(HF)2%の効果が高くなっている。繊維の違いによる差であると考えられるが、今後の検討が必要である。

5. まとめ

本研究では、繊維補強モルタルに定着した異形鉄筋の付着性状について実験的な検討を行った。実験から得られた知見を以下に示す。

- (1) 鋼繊維、ハイブリッド繊維、スチールチップともに繊維補強によって付着割裂破壊時強度、最大付着応力、付着剛性が増加した。
 - (2) 付着割裂によるひび割れの発生状況は、無補強モルタル、繊維補強モルタルともにリングテンション抵抗機構が成立することを示している。
 - (3) 鉄筋径が大きい試験体では引抜きに伴うモルタルの付着劣化が進行し、表面付近の付着応力が低下した。
- 今後の課題として、コンクリートを用いた場合の付着性状や横拘束がある場合の付着性状を明らかにし、付着挙動に関する解析モデルの検討や設計式の提案を行なっていく予定である。

[謝 辞]

本実験は京都大学大学院工学研究科環境材料学講座による研究の一環として行われたものである。実験に際し、金子佳生教授 (Ph.D.)、佐藤裕一助教 (博士(工)) を始めとする研究室の方々には多大なるご指導とご協力をいただいた。また、試験材料の提供をいただいた (株) フローリック、(株) 奥田、藤巻鋼材大阪 (株)、東洋紡績 (株) の関係者に深く感謝の意を表する。

[参考文献]

- 1) 日本コンクリート工学協会：繊維強化セメントコンクリート複合材料の技術の現状と将来，1986.
- 2) 六郷恵哲：高性能な繊維補強コンクリートの開発と将来展望，コンクリート工学，Vol.50，No.5，pp.404-409，2012.5.
- 3) 閑田徹志，坂田昇：繊維補強コンクリート材料の設計手法，コンクリート工学，Vol.50，No.5，pp.418-423，2012.5.
- 4) 日本コンクリート工学協会：「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，2012.
- 5) 森浩二，松下和也，佐藤裕一，金子佳生：モルタルを用いた繊維補強セメント系複合材料およびスチールチップ補強セメント系複合材料の引抜き付着実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.2，pp.523-528，2013.
- 6) 笠原美幸，中野克彦，松崎育弘：高靱性セメント材料が異形鉄筋の付着割裂性状に及ぼす影響，日本建

- 築学会大会学術講演梗概集，C-2，pp.129-130，2001.
- 7) 松林卓，竹内秀聡，原夏生，三島徹也：鋼繊維補強コンクリートによる鉄筋の付着性能向上に関する実験研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.607-612，2007.
- 8) 古城拓哉，佐藤裕一，金子佳生：HFRCC の材料構成モデルの構築と一面せん断実験に対する数値解析による検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1237-1242，2011.
- 9) 金田学，佐藤裕一，金子佳生：スチールチップ補強セメント系複合材料による露出柱脚の耐震補強，鋼構造年次論文報告集，Vol.19，pp.155-162，2011.
- 10) 日本コンクリート工学協会：「コンクリートと補強材の付着挙動と構成則の利用研究委員会」報告書，2011.
- 11) Chao, S.-H.; Naaman, A. E. and Parra-Montesinos, G. J.: Bond Behavior of Reinforcing Bars in Tensile Strain-Hardening Fiber-Reinforced Cement Composites, ACI Structural Journal, Vol.106, No.6, pp.897-906, 2009.
- 12) Vecchio, F. J.: Towards Cyclic Load Modeling of Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Vol.96, No.2, pp.193-202, 1999.
- 13) Hota, S. and Naaman, A. E.: Bond Stress-Slip Response of Reinforcing Bars Embedded in FRC Matrices under Monotonic and Cyclic Loading, ACI Structural Journal, Vol.94, No.5, pp.525-537, 1997.