

論文 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

森 浩二^{*1}・松下 和也^{*2}・佐藤 裕一^{*3}・金子 佳生^{*4}

要旨: 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を調べる実験を行った。対象とした材料は、モルタルに鋼繊維・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（精工鋼板の切削加工時に発生する切削屑）を投入したものと、モルタル硬化後に内部に定着した異形鉄筋を引き抜く方法で実験を行った。実験の結果、繊維補強またはスチールチップ補強試験体は典型的なリングテンションによる破壊性状を示し、補強によって付着割裂破壊時の強度が上昇すること、太径の鉄筋では表面付近の付着劣化が生じ、内部に比べて付着応力が低下することが確認された。

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, 付着割裂, 精工鋼板

1. はじめに

近年、多種多様な繊維補強セメント系複合材料が開発されており、建築構造物への適用も行われている。一方で、繊維補強セメント系複合材料の特性を生かした合理的な設計法については十分に検討されていないのが現状である¹⁾。特に、繊維補強セメント系複合材料が従来のRC構造部材と同様の可用性を持つためには、鉄筋との相互作用を明らかにすることが求められる。

ここ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（モルタルを用いた繊維補強セメント系複合材料）に定着した異形鉄筋に対する引抜き付着実験について述べる。RC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が行われている^{2), 3)}が、本研究では付着挙動に対する繊維補強の影響を調べることを主眼とし、横拘束筋のない試験体に対する引抜き付着実験⁴⁾を行うこととした。また、鉄筋の降伏による付着性状への影響を考慮し、異なる径の普通強度鉄筋を対象とした。モルタルに混入する繊維補強材は短繊維とし、鋼繊維、ハイブリッド繊維⁵⁾（鋼繊維とポリエチ

レン繊維の混合）、そして特殊な繊維状補強材として、スチールチップ⁶⁾を取り扱う。

2. 試験体の概要

2.1 使用した補強用繊維

(1) 鋼繊維 (SF)

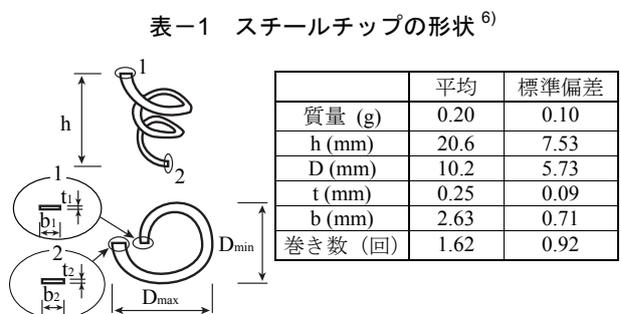
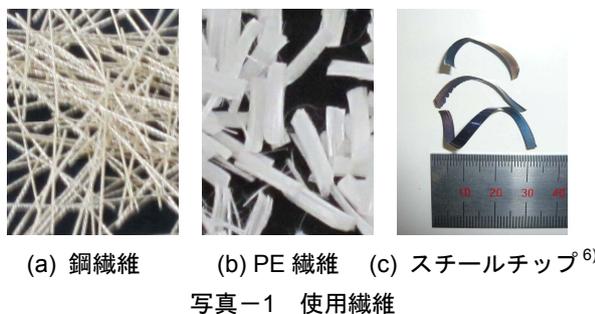
素線径 $\phi 0.15\text{mm}$ 、5本撚りの鋼ワイヤを切断し、コンクリート補強用鋼繊維として製造されたもので、長さ32mmのものを用いた（写真-1(a)）。

(2) ハイブリッド繊維 (HF)

ここ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⁵⁾に用いる繊維をハイブリッド繊維 (HF) と呼ぶ。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)）、体積比1:1の混合使用とした。

(3) スチールチップ (SC)

スチールチップは鋼材の切削時に発生する切削屑⁶⁾である。本実験では精工鋼板の表面切削加工時に生じた



*1 (株) 浅沼組 技術研究所 (正会員)

*2 ジェイアール東海コンサルタンツ (株)

*3 京都大学 大学院工学研究科助教 博士 (工学) (正会員)

*4 京都大学 大学院工学研究科教授 Ph. D. (正会員)

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

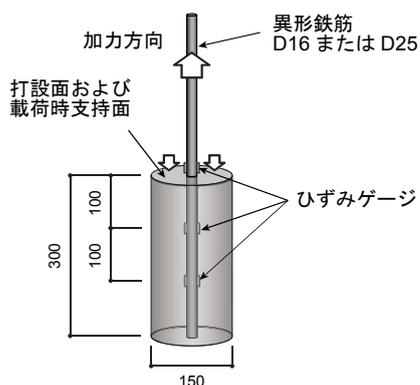


図-1 試験体概要

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

試験体に用いた繊維補強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), 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、シリカフェーム、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-1 のように円柱形のモルタル試

表-3 圧縮試験結果

補強繊維	繊維量 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

* 同一繊維量での段の上下はバッチの違いによる

表-4 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-5 曲げ試験結果

補強繊維	繊維量 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

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。

製作は引抜き付着実験用の試験体のほか、圧縮試験用、曲げ試験用の試験体について行い、いずれも打設後 7 日

表-6 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
	最終状況	破断	破断	破断	破断	破断	破断	中断	割裂	割裂	割裂	中断	割裂
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	—
	最終状況	破断	破断	中断	破断	破断	—	計測	破断	中断	破断	破断	—
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	—
	最終状況	破断	破断	中断	破断	破断	—	破断	破断	中断	破断	破断	—
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
	最終状況	破断	破断	中断	破断	破断	破断	割裂	破断	中断	破断	割裂	破断
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	中断	破断	中断	破断	破断	—	中断	破断	中断	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: 鉄筋降伏後に荷重を中断, 計測: 変位計測不良のため中断

で脱型し、気中で養生を行った。

2.4 圧縮試験・鉄筋引張試験結果

繊維補強モルタル試験体の圧縮試験結果を表-3 に、鉄筋の引張試験結果を表-4 に示す。圧縮試験は繊維を混入していないモルタルも含め、直径100mm高さ200mmの気中養生を行った試験体について行った。

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-5 に示す。曲げ試験はコンクリートカッターで中央に深さ 20mm の切欠きを設けた 100mm×100mm×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. 実験

3.1 載荷方法

500kN 万能試験機を用い、上下を逆にした円柱形試験



写真-2 加力状況



写真-3 割裂破壊状況

体の打設面を載荷支持面として、下方に鉄筋を引き抜く方法で載荷を行った（写真-2）。載荷支持面には平滑化のためモルタルを塗布した。載荷パターンは、単調載荷、1 回繰返し載荷、10 回繰返し載荷とし、1 回繰返し載荷では引き抜き量 1mm 毎に各 1 回の一方向載荷、10 回繰返し載荷では同様に各 10 回の一方向載荷とし、引抜き量 20mm 以降は単調載荷とした。また、各パラメータにつ

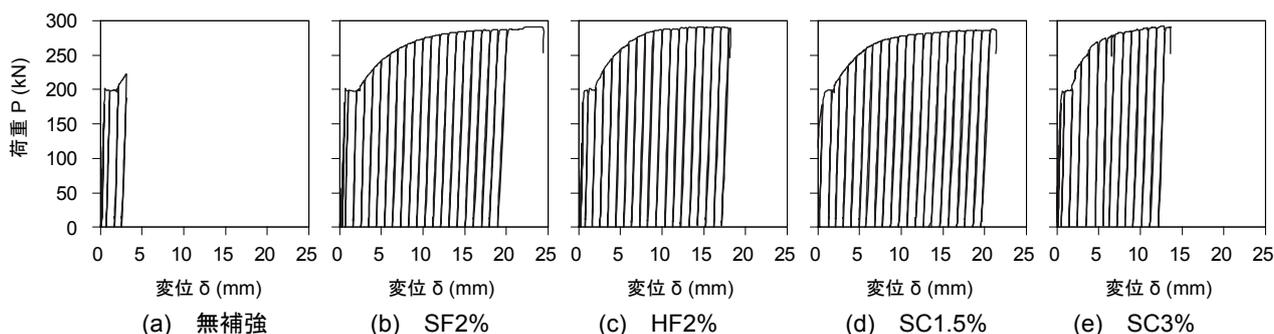


図-2 荷重-変位関係 (D25, 繰返し 1 回)



(a) SC1.5%, D25 (b) SC3%, D25
写真-4 ひび割れ発生状況

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、試験体載荷支持面と鉄筋上の計測点との相対変位 (δ_0)、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-6 に、D25 を使用した 1 回繰返し載荷試験体の荷重-変位関係を図-2 に示す。試験体には、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、載荷・計測が不安定となったため載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 に示すように載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 種が観察された。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する。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。

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が生じており、リングテンションによる付着割裂機構⁷⁾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。既往の研究で報告されているような微細な複数のひび割れ⁸⁾が生じていないのは、繊維量、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 の試験体の繊維量と強度との関係を図-3 に示す。図中に記載した試験体は破壊が観察されたもので、鉄筋の破断によるもの、および割裂破壊を生じたものが含まれる。無補強の試験体は割裂破壊となり、鉄筋引張強度を大きく下回った。繊維補強試験体では 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。

スチールチップ (SC) 1.5%, D25, 単調載荷の試験体で割裂破壊を生じ無補強の強度を下回っているものがある。同材料の繰返し載荷試験体ではいずれも鉄筋引張強度が得られているため、強度低下は試験体打設時に生じた何らかの欠陥が原因と考えられる。SC3%の試験体では強度低下は生じておらず、混入量 1.5%が過大であるとは言えないが、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。

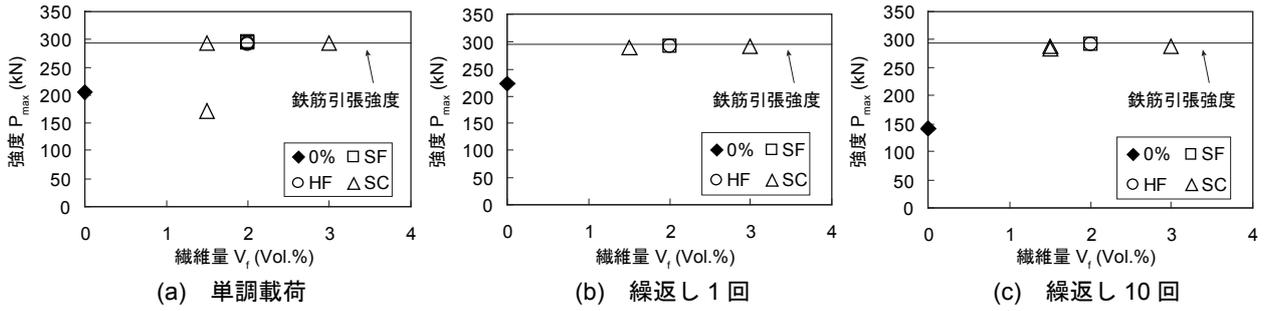


図-3 繊維量と強度の関係 (D25)

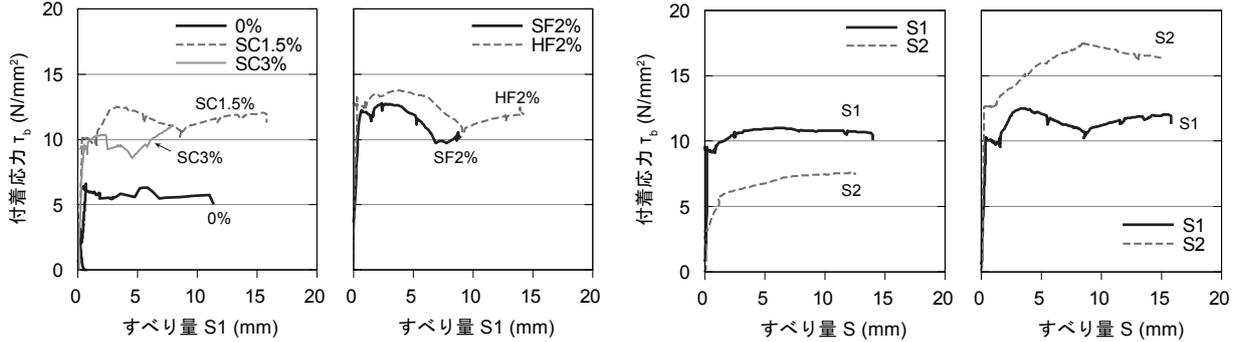


図-4 付着応力-すべり関係 (繊維種別による比較, D25, 単調荷重)

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

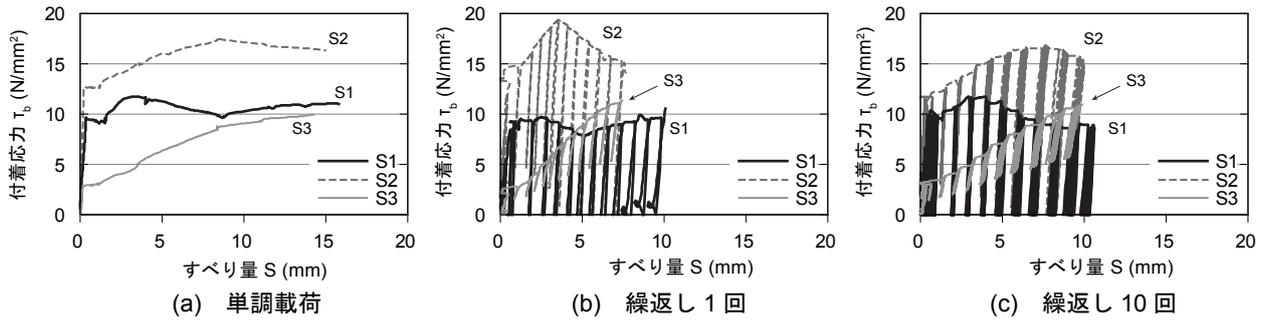


図-6 付着応力-すべり関係 (荷重パターンによる比較, SC1.5%, D25)

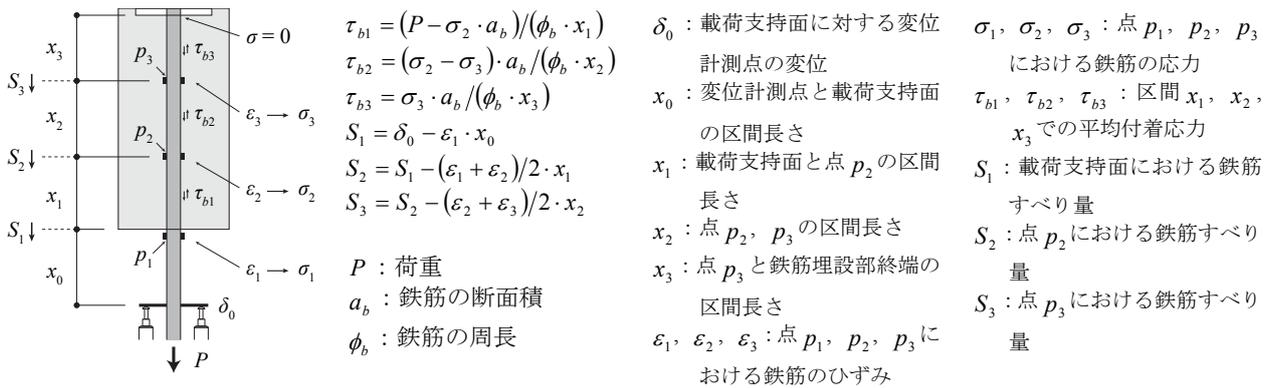


図-7 付着応力, すべり量の算定

4.3 付着応力-すべり関係

試験体の付着応力とすべり量の関係を図-4~6に示す。すべり量の算定にあたっては、鉄筋の露出部分は一樣なひずみ分布と仮定し、モルタル内部では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、鉄筋の繰返し荷重時の Bauschinger 効果を考

慮⁹⁾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。各記号の定義と算定式を図-7に示す。

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-4はD25, 単調荷重試験体における荷重支持面付近 (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。

付着応力の分布に関して、荷重支持面付近 (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-5 は SC1.5%の単調荷重試験体の比較である。D25 の試験体では D16 とは逆に、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。

荷重パターンの違いによる影響は明確には現れなかった。図-6 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荷重による応力低下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-8 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、繊維補強モルタルの付着性状について実験的な検討を行った。これらの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っていく必要がある。

謝辞

高性能 AE 減水剤は株式会社フローリックより、スチールチップは株式会社奥田と藤巻鋼材大阪株式会社より、ポリエチレン繊維は東洋紡績株式会社より提供いただいた

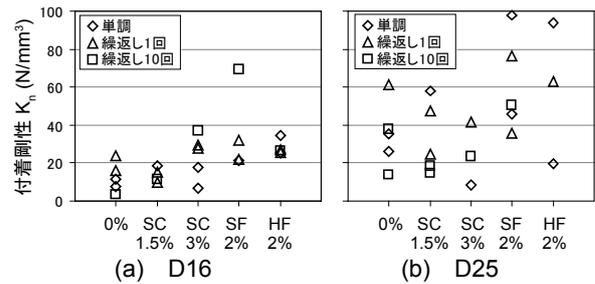


図-8 付着剛性の比較

た。関係各所に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム，委員会報告書，2012
- 2) 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
- 3) 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的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，2007
- 4) 岡村一臣，寺岡勝，横須賀誠一，清川博：鋼繊維補強鉄筋コンクリート材に関する実験的研究 第1報 鋼繊維補強コンクリート中の鉄筋の付着・定着試験，日本建築学会関東支部研究報告集，pp.241-244，1981
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリートと補強材の付着挙動と構成則に関するシンポジウム，委員会報告書，2011
- 8) 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, 2009
- 9) Vecchio, F. J.: Towards Cyclic Load Modeling of Reinforced Concrete, ACI Structural Journal, Vol.96, No.2, pp.193-202, 1999
- 10) 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.525-536, 1999