

筑波大学大学院博士課程  
理工情報生命学院  
システム情報工学研究群修士論文

鉄筋腐食による軸方向ひび割れ性状が  
コンクリートと鉄筋の付着性能に及ぼす影響

栗原 朋久

修士（工学）

（構造エネルギー工学学位プログラム）

指導教員 金久保利之

2026年 3月

## 論文概要

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の劣化の代表的な要因として、鉄筋腐食とそれによるコンクリートのひび割れが挙げられる。コンクリートのひび割れは鉄筋の拘束力を減少させ、コンクリートと鉄筋の付着性状を大きく劣化させる。鉄筋腐食による部材表面のひび割れ幅は容易に計測可能であり、ひび割れ幅と付着性状の劣化の関係を把握することで RC 部材の付着性状を評価できる。

既往の研究では、破砕剤充填パイプを導入し鉄筋腐食ひび割れを発生させた試験体において、平均加力前ひび割れ幅と付着性状の関係が検討されている。しかしながら、実部材において鉄筋腐食によるひび割れ幅は必ずしも一様ではなく、ひび割れ幅分布が付着性状に与える影響を検討することが必要である。

本研究では、鉄筋腐食ひび割れ幅の軸方向分布がコンクリートと鉄筋の付着性状に与える影響を検討することを目的とし、破砕剤充填パイプにより、鉄筋軸方向に分布する鉄筋腐食ひび割れを模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を実施した。試験体は、断面中央に鉄筋を 1 本配し、破砕剤充填パイプを用いて鉄筋腐食ひび割れを模擬した。実部材と同様に、付着応力の分布が一様でない場合の付着性状に着目するために、試験体の付着長は鉄筋径の 20 倍とした。自由端側を下にして破砕剤を充填すること、および荷重端側から全長の約 5 分の 4 の範囲に破砕剤を充填することで、自由端側に向けて幅が大きいひび割れ、および荷重端に向けて幅が大きいひび割れを模擬した。

自由端側に向けて大きいひび割れを模擬した試験体、荷重端側に向けて大きいひび割れを模擬した試験体のいずれにおいても、加力前ひび割れ幅が増加するにつれて、最大平均付着応力は減少する傾向が見られた。両者の最大平均付着応力ー加力前平均ひび割れ幅関係に大きな差異はなく、加力前ひび割れ幅の分布が付着性状に及ぼす影響は小さいことが示唆された。

加力前ひび割れ幅の軸方向分布を考慮した付着解析を行った結果、ひび割れ幅分布がコンクリートと鉄筋の付着性状に与える影響は小さく、平均ひび割れ幅を用いることで付着性状の劣化を評価することが可能であると考えられる。

# 目次

第1章 序論	3
1.1 研究背景	3
1.2 研究目的	4
1.3 破砕剤充填パイプによる鉄筋腐食模擬	5
第2章 自由端側ひび割れが大きい試験体の付着性状	6
2.1 はじめに	6
2.2 実験概要	7
2.2.1 試験体	7
2.2.2 使用材料	8
2.2.3 破砕剤の充填方法	10
2.2.4 加力・計測方法	11
2.3 実験結果	12
2.3.1 試験体ひび割れ発生状況	12
2.3.2 鉄筋引抜き試験結果	15
2.4 まとめ	19
第3章 荷重端側ひび割れが大きい試験体の付着性状	20
3.1 はじめに	20
3.2 実験概要	21
3.2.1 試験体	21
3.2.2 使用材料	22
3.2.3 破砕剤の充填方法	22
3.2.4 加力・計測方法	23
3.3 実験結果	24
3.3.1 試験体ひび割れ発生状況	24
3.3.2 鉄筋引抜き試験結果	27
3.4 まとめ	33
第4章 ひび割れ幅分布を考慮した付着解析	34
4.1 はじめに	34
4.2 解析方法	35
4.2.1 局所付着応力-荷重端すべり量モデル	35
4.2.2 計算方法	38
4.3 解析結果	39
4.4 まとめ	48
第5章 結論	49
謝辞	50
参考文献	51

# 図表目次

図 1.1.1	付着強度比－鉄筋質量減少率関係 <sup>[1]</sup> .....	3
図 1.3.1	EAFP による鉄筋腐食ひび割れの模擬 .....	5
図 2.2.1	試験体形状 .....	7
図 2.2.2	試験体名称 .....	7
図 2.2.3	破砕剤充填状況 .....	10
図 2.2.4	加力前ひび割れ幅計測位置 .....	11
図 2.2.5	加力方法 .....	11
図 2.3.1	加力前ひび割れ状況 .....	13
図 2.3.2	加力前後のひび割れ状況(左：加力前、右：加力後) .....	14
図 2.3.3	平均付着応力－荷重端変位関係 .....	16
図 2.3.4	最大平均付着応力－平均ひび割れ幅関係 .....	18
図 3.2.1	試験体名称 .....	21
図 3.3.1	加力前ひび割れ状況 .....	25
図 3.3.2	引抜き加力前後のひび割れ状況(左：加力前、右：加力後) .....	26
図 3.3.3	平均付着応力－荷重端変位関係 .....	29
図 3.3.4	最大平均付着応力－加力前平均ひび割れ幅 .....	31
図 3.3.5	最大平均付着応力比－加力前平均ひび割れ幅 .....	32
図 4.2.1	短い付着長の試験体における付着応力－荷重端すべり量関係 <sup>[3]</sup> .....	36
図 4.2.2	付着応力－荷重端すべり量関係のトリリニアモデル <sup>[3]</sup> .....	36
図 4.2.3	各パラメータと加力前ひび割れ幅の関係 <sup>[3]</sup> .....	37
図 4.3.1	F-SD295 試験体付着解析結果 .....	40
図 4.3.2	F-SD345 試験体付着解析結果 .....	42
図 4.3.3	L-SD345 試験体付着解析結果 .....	45
表 2.2.1	コンクリートの配合表 .....	8
表 2.2.2	コンクリートの材料試験結果 .....	8
表 2.2.3	検討用コンクリート強度 .....	8
表 2.2.4	SD295 の引張試験結果 .....	9
表 2.2.5	SD345 の引張試験結果 .....	9
表 2.3.1	F-SD295 試験体実験結果 .....	17
表 2.3.2	F-SD345 試験体実験結果 .....	17
表 3.2.1	コンクリートの配合表 .....	22
表 3.2.2	コンクリートの材料試験結果 .....	22
表 3.2.3	検討用コンクリート強度 .....	22
表 3.3.1	L-SD345 試験体実験結果 .....	30

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物の劣化の代表的な要因として、鉄筋腐食とそれによるコンクリートのひび割れが挙げられる。コンクリートのひび割れは鉄筋の拘束力を減少させ、コンクリートと鉄筋の付着性状を大きく劣化させる。既往の研究<sup>[1]</sup>で報告されている、付着強度比—鉄筋質量減少率関係を図 1.1.1 に示す。鉄筋腐食初期段階では、腐食生成物の膨張圧により腐食していない状態よりも付着強度が増加する。しかし、腐食が進行し鉄筋質量減少率が増加すると、膨張圧によりコンクリートにひび割れが発生することで、鉄筋とコンクリートの付着強度の低下を引き起こす。供用中の RC 構造物において、鉄筋質量減少率の測定は一般に困難であるが、鉄筋腐食による部材表面のひび割れ幅は容易に計測可能であり、ひび割れ幅と付着性状の劣化の関係を把握することで RC 部材の付着性状を評価できる。

既往の研究<sup>[2]</sup>では、コンクリートひび割れ幅と付着性状の関係を検討することを目的として、破砕剤充填パイプ（Expansion Agent Filled Pipe：以下 EAFP）を導入して鉄筋腐食ひび割れを模擬した、鉄筋引抜き試験が行われた。加力前ひび割れ幅が大きくなるにつれて最大付着応力が低下することが報告されており、EAFP を用いることで付着性状の劣化を模擬できることが確認されている。また、既往の研究<sup>[3]</sup>では、EAFP を導入した付着長が長い試験体の鉄筋引抜き試験が行われた。

これらの研究では、鉄筋腐食ひび割れ幅に大きなばらつきが見られない場合を想定し、平均ひび割れ幅を変動因子として付着性状を評価している。しかしながら、実際の RC 部材に発生する鉄筋腐食ひび割れ幅は一様ではなく、鉄筋軸方向にばらつきが生じるため、鉄筋軸方向のひび割れ幅分布が鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響を検討することが重要である。

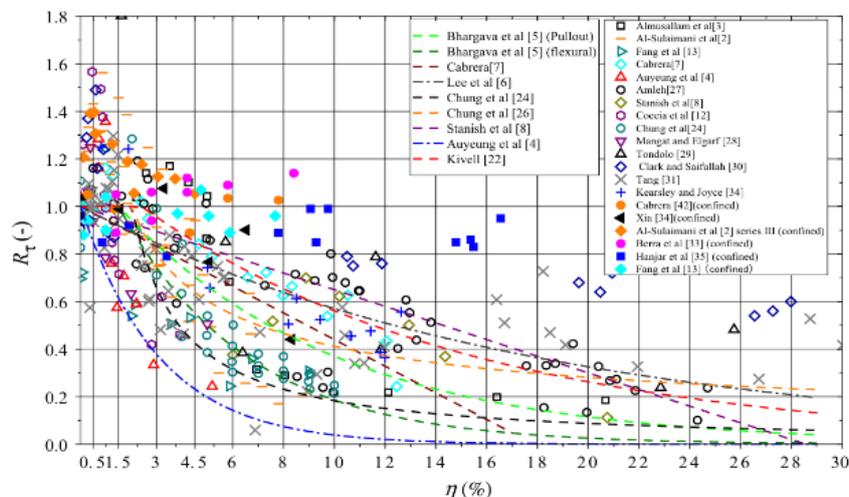


図 1.1.1 付着強度比—鉄筋質量減少率関係<sup>[1]</sup>

## 1.2 研究目的

本研究では、鉄筋軸方向のひび割れ幅分布がコンクリートと鉄筋の付着性状に与える影響を検討することを目的とし、EAFPにより鉄筋腐食ひび割れを模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を実施する。実部材と同様に、付着応力の分布が一様でない場合の付着性状に着目するために試験体の付着長は鉄筋径の20倍とする。

第2章では、自由端側に向けて大きいひび割れ幅を模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を行う。実験より得られる平均付着応力-荷重端変位関係から、加力前ひび割れ幅が鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響の検討を行う。

第3章では、荷重端側に向けて大きいひび割れ幅を模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を行う。本実験および第2章の実験により得られる平均付着応力-荷重端変位関係から鉄筋軸方向のひび割れ幅分布が付着性状に与える影響を検討する。

第4章では、試験体と同一条件の加力前ひび割れ幅分布を考慮した付着解析を行い、実験で得られた平均付着応力-荷重端すべり量関係との比較検討を行う。

### 1.3 破砕剤充填パイプによる鉄筋腐食模擬

既往の研究<sup>[4]</sup>において、鉄筋腐食ひび割れを模擬する手法として EAFP が提案されている。試験体に埋設したアルミパイプに、コンクリートの解体等で使用される静的破砕剤を充填し、コンクリート内部に膨張圧を発生させることで、鉄筋腐食ひび割れを模擬する（図 1.3.1）。破砕剤充填後、時間経過によってひび割れ幅を制御する。

既往の研究<sup>[3]</sup>では、EAFP を用いて鉄筋腐食ひび割れを模擬した、付着長が鉄筋径の 4 倍程度および 20 倍程度の試験体について、加力前ひび割れ幅を変動因子とする鉄筋引抜き試験が行われている。加力前ひび割れ幅の増加に伴って最大付着応力が低下することが確認されている。

本研究においても EAFP を用いて鉄筋腐食ひび割れを模擬し、加力前ひび割れ幅を変動因子とした鉄筋引抜き試験を実施する。

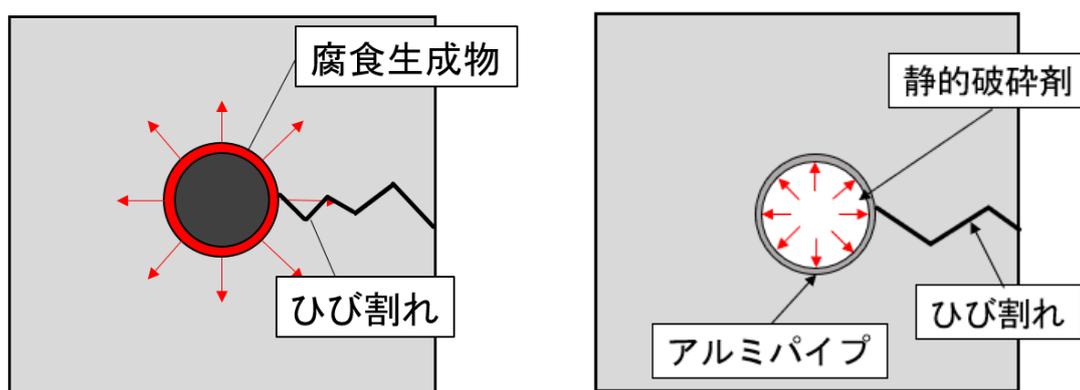


図 1.3.1 EAFP による鉄筋腐食ひび割れの模擬

# 第2章 自由端側ひび割れが大きい試験体の付着性状

## 2.1 はじめに

EAFP を導入し鉄筋腐食ひび割れを模擬した既往の研究<sup>[2]、[3]</sup>では、軸方向に生じるひび割れ幅の分布に関する検討は行われていない。本研究では、鉄筋軸方向のひび割れ幅分布を有する試験体に対して鉄筋引抜き試験を実施し、軸方向ひび割れ幅の分布が付着性状に与える影響を検討する。

本章では、自由端側に大きいひび割れ幅を発生させた試験体を対象に鉄筋引抜き試験を実施する。実験により得られる平均付着応力-荷重端変位関係から、加力前ひび割れ幅と付着性状の関係を検討する。

## 2.2 実験概要

### 2.2.1 試験体

試験体形状を図 2.2.1 に示す。試験体の中央に異形鉄筋 D16 を 1 本配し、付着応力の分布が一樣でない試験体の付着性状に着目するために、付着区間は鉄筋径の 20 倍の 320mm とした。鉄筋両端部に 40mm の非付着区間を設けた。鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れを模擬するために、外径 22mm、厚さ 1mm のアルミパイプを 2 本配し、破砕剤を充填することで膨張圧を発生させた。実験因子は加力前ひび割れ幅と鉄筋降伏強度とし、目標加力前ひび割れ幅は 0.0mm (破砕剤充填なし)、0.1mm、0.2mm、0.3mm、0.6mm、0.9mm の 6 種類とした。また、鉄筋降伏強度が付着性状に与える影響を検討するために、鉄筋降伏強度は SD295、SD345 の 2 種類とし、試験体は各実験因子について 2 体ずつ計 24 体作製した。

試験体名称を図 2.2.2 に示す。自由端側に大きいひび割れを模擬した試験体を F シリーズとした。

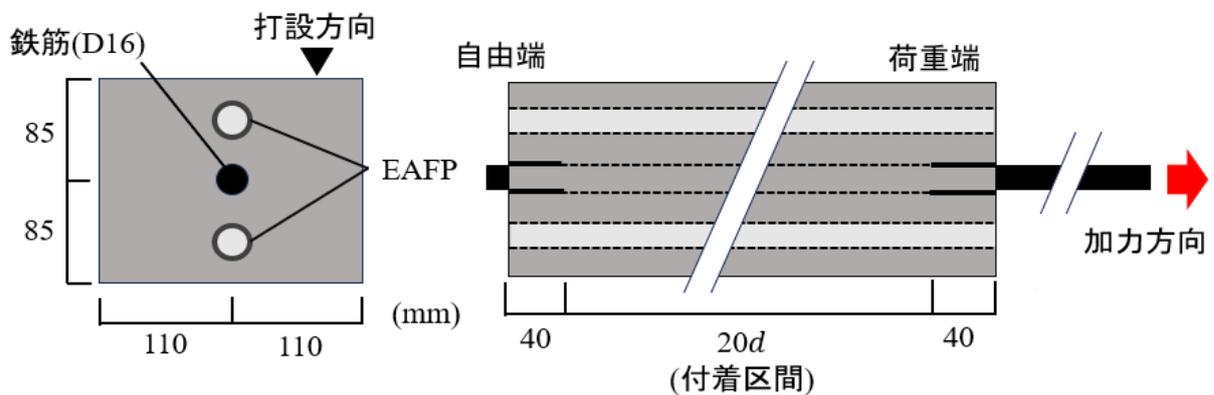


図 2.2.1 試験体形状

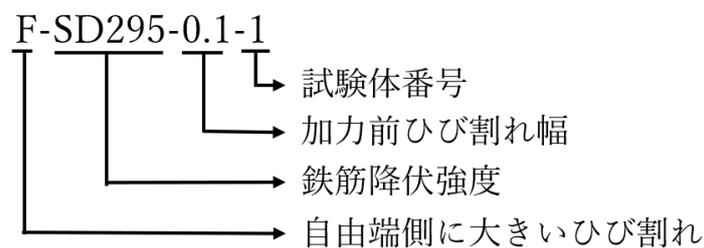


図 2.2.2 試験体名称

## 2.2.2 使用材料

### (1) コンクリート

コンクリートには、目標強度 18MPa、粗骨材の最大寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。コンクリートの配合を表 2.2.1 に示す。

表 2.2.1 コンクリートの配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	C	W	S	G	Ad
78.5	248	195	930	840	2.48

コンクリートの材料試験には、φ100 mm×200 mm の円柱供試体を使用した。材齢 29 日、63 日に計 2 回の試験を実施した。加力には 500 kN 万能試験機を用い、圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。得られた材料試験結果を表 2.2.2 に示し、また本実験における検討用コンクリート強度を表 2.2.3 に示す。なお、検討用コンクリート強度は 2 回の材料試験結果の平均値を用いた。

表 2.2.2 コンクリートの材料試験結果

材齢	番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
29 日	1	15.7	18.1	1.92
	2	15.0	16.0	2.13
	3	15.9	17.1	1.90
	平均	15.5	17.1	1.98
63 日	4	19.0	15.9	1.88
	5	17.5	15.5	1.95
	6	19.3	16.4	1.92
	平均	18.6	15.9	1.92

表 2.2.3 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	17.1	16.5	1.95

## (2) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD295、SD345) を用いた。鉄筋の材料試験には、500kN 万能試験機を用いて引張試験を実施した。SD295 の材料試験結果を表 2.2.4 に、SD345 の材料試験結果を表 2.2.5 に示す。

表 2.2.4 SD295 の引張試験結果

番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
1	331	187	467
2	334	184	467
3	333	196	470
平均	333	189	468

表 2.2.5 SD345 の引張試験結果

番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
1	379	180	554
2	379	189	552
3	376	188	553
平均	378	186	553

### 2.2.3 破砕剤の充填方法

破砕剤の充填状況を図 2.3.3 に示す。試験体は自由端側を下にして設置し、上側となる荷重端側から破砕剤を充填した。破砕剤は試験体全長に渡って充填した。



図 2.2.3 破砕剤充填状況

## 2.2.4 加力・計測方法

加力前ひび割れ幅計測位置を図 2.2.4 に示す。ひび割れ幅は、クラックスケールを用いて打設面および打設底面のそれぞれにおいて、自由端側から 50 mm 間隔で7か所計測し、その平均値を加力前ひび割れ幅とした。なお、打設面または打設底面のいずれかで計測値が目標値に達した時点で加力を開始した。

加力方法を図 2.2.5 に示す。試験体荷重端側にテフロンシートを介して反力板を設置し、センターホールジャッキにより単調引抜き加力を行った。計測項目はロードセルによる引抜き荷重、変位計による鉄筋荷重端変位および鉄筋自由端変位である。

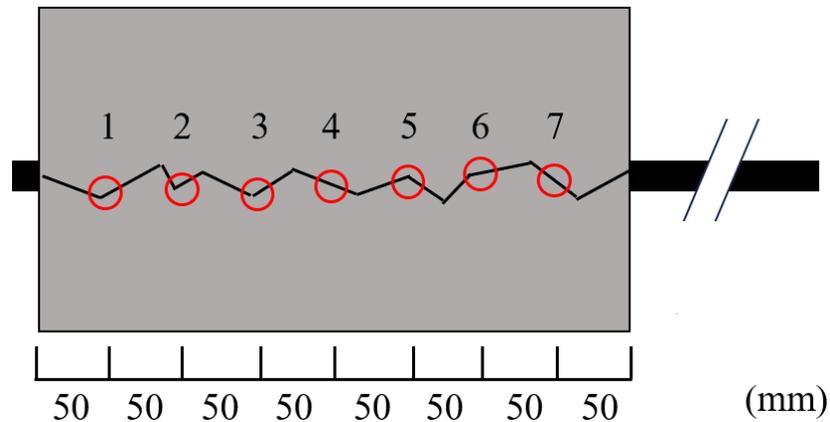


図 2.2.4 加力前ひび割れ幅計測位置

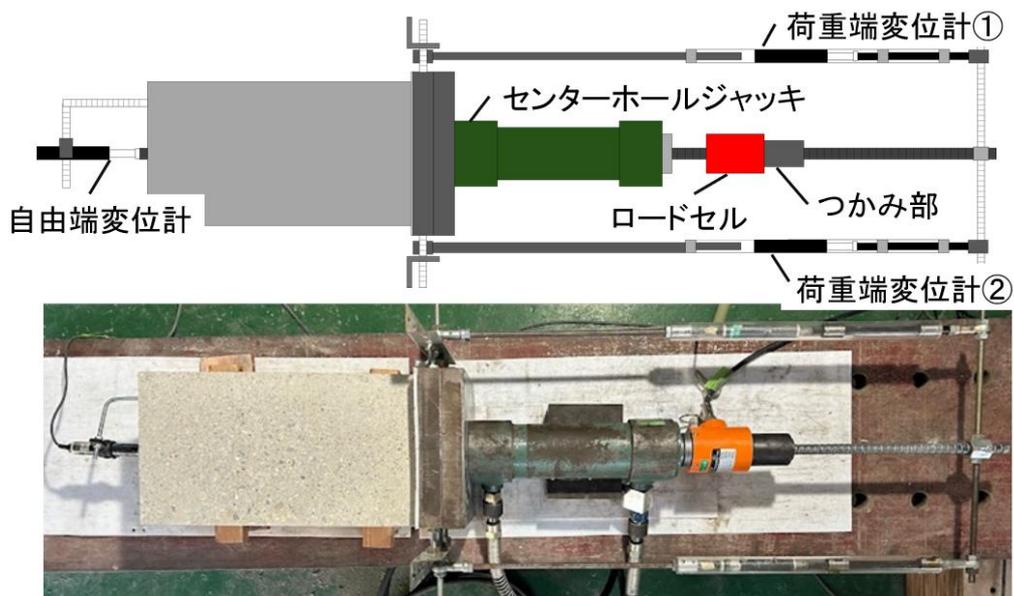


図 2.2.5 加力方法

## 2.3 実験結果

### 2.3.1 試験体ひび割れ発生状況

各試験体の加力前ひび割れ状況を図 2.3.1 に示す。自由端側 3 点（自由端から 50mm、100mm、150mm 位置）の加力前ひび割れ幅平均値を一点鎖線、荷重端側 3 点（自由端から 250mm、300mm、350mm 位置）の加力前ひび割れ幅平均値を二点鎖線で示す。荷重端側から破砕剤を充填することで自由端側に大きいひび割れが生じた。破砕剤充填後、アルミパイプ周囲からひび割れが発生し、鉄筋方向および試験体表面方向に進展することで、サイドスプリット型のひび割れが発生した。

加力前後のひび割れ状況を図 2.3.2 に示す。多くの試験体で、加力前ひび割れおよび加力により新たに発生したひび割れが加力により拡幅することで、最終的な破壊に至った。加力前ひび割れ幅が 0.3mm 以下の一部の試験体では、鉄筋つかみ部にずれが生じたため、加力を終了した。これらの試験体の実験結果は、検討から除外する。

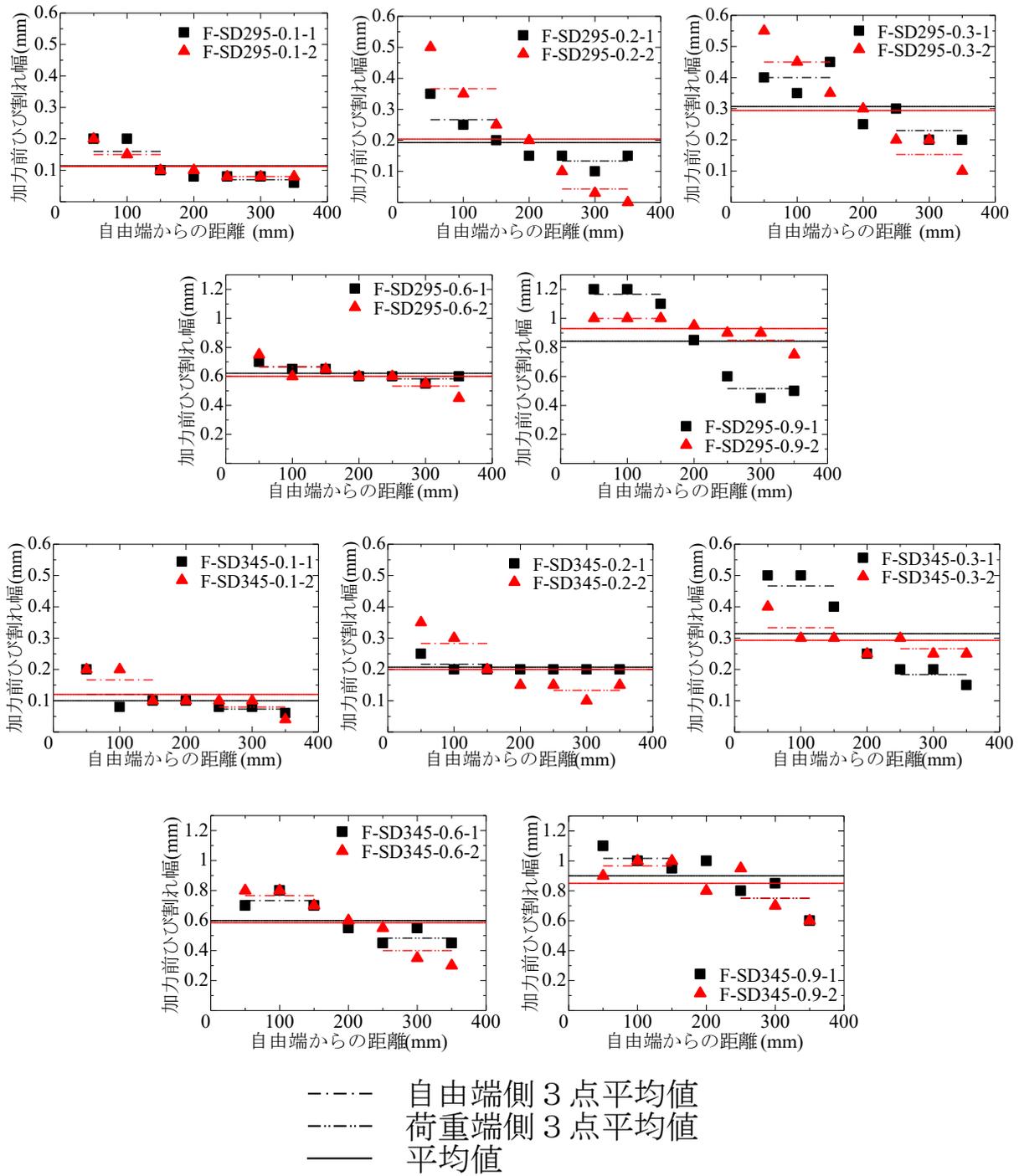


図 2.3.1 加力前ひび割れ状況

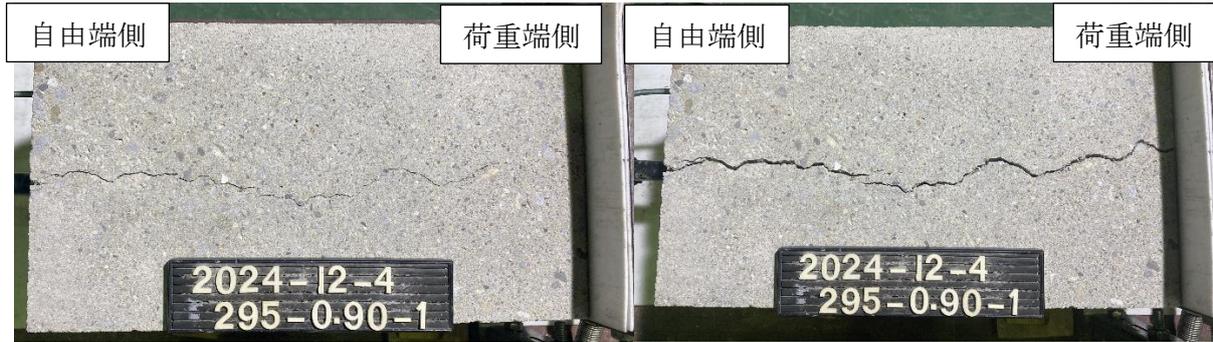


図 2.3.2 加力前後のひび割れ状況(左：加力前、右：加力後)

### 2.3.2 鉄筋引抜き試験結果

#### (1) 付着応力－荷重端変位関係

鉄筋引抜き試験によって得られた平均付着応力－荷重端変位関係を図 2.3.3 に示す。平均付着応力は、引抜き荷重を鉄筋付着区間の表面積で除して求めた。荷重端変位は、図 2.2.5 に示す 2 つの荷重端変位計の計測値の平均である。鉄筋が降伏せずに引抜きが発生した試験体、鉄筋降伏後引抜きが発生した試験体、鉄筋降伏後鉄筋つかみ部がずれ加力を終了した試験体がある。F-SD295 試験体および F-SD345 試験体の破壊状況および最大平均付着応力を、それぞれ表 2.3.1 および表 2.3.2 に示す。鉄筋が降伏せず引抜きが発生した試験体において、平均付着応力－荷重端変位関係は、鉄筋降伏強度の違いによる影響が小さく一定の傾向を示さなかった。また、加力前ひび割れ幅が大きくなると、最大平均付着応力が小さくなる傾向が見られた。

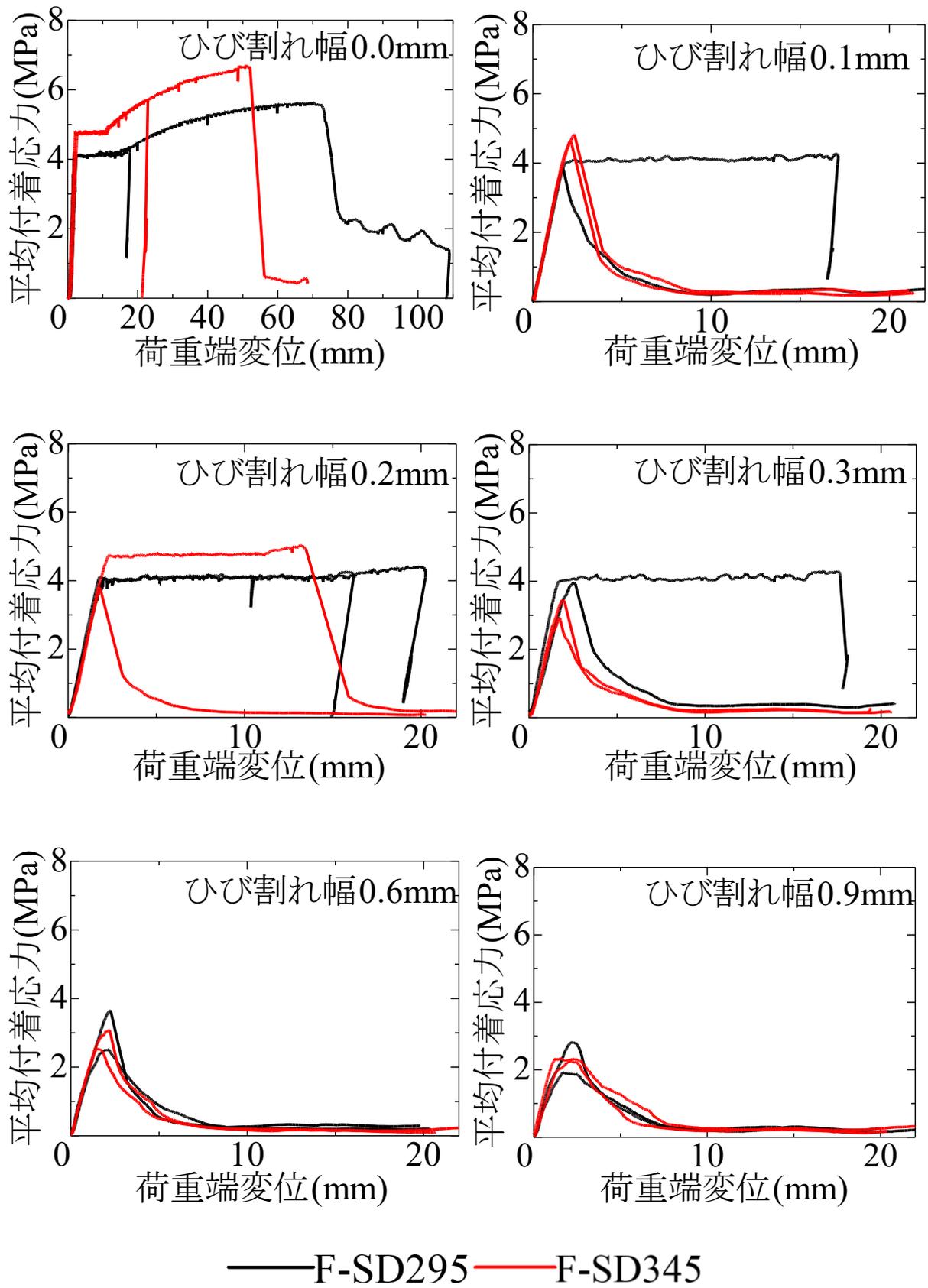


図 2.3.3 平均付着応力-荷重端変位関係

表 2.3.1 F-SD295 試験体実験結果

F-SD295	破壊状況	最大平均付着応力 (MPa)
0.0-1	降伏→引抜き	5.64
0.0-2	降伏→※	4.38
0.1-1	引抜き	3.86
0.1-2	降伏→※	4.26
0.2-1	降伏→※	4.43
0.2-2	降伏→※	4.26
0.3-1	引抜き	3.95
0.3-2	降伏→※	4.29
0.6-1	引抜き	2.51
0.6-2	引抜き	3.65
0.9-1	引抜き	1.92
0.9-2	引抜き	2.83

※：つかみ部ずれにより加力終了

表 2.3.2 F-SD345 試験体実験結果

F-SD345	破壊状況	最大平均付着応力 (MPa)
0.0-1	降伏→引抜き	6.71
0.0-2	降伏→※	5.72
0.1-1	引抜き	4.82
0.1-2	引抜き	4.64
0.2-1	引抜き	3.80
0.2-2	降伏→引抜き	5.03
0.3-1	引抜き	2.93
0.3-2	引抜き	3.45
0.6-1	引抜き	2.54
0.6-2	引抜き	3.08
0.9-1	引抜き	2.35
0.9-2	引抜き	2.25

※：つかみ部ずれにより加力終了

F-SD295 試験体および F-SD345 試験体の引抜きおよび降伏後引抜きが発生した試験体の最大平均付着応力－加力前平均ひび割れ幅関係、およびこれらの関係の回帰分析の結果を図 2.3.4 に示す。F-SD295 試験体および F-SD345 試験体の回帰分析の結果、それぞれ式(2-1)、(2-2)を得た。

$$P_{(W_{cr})} = P_0 e^{-1.0W_{cr}} \quad (2-1)$$

$$P_{(W_{cr})} = P_0 e^{-1.5W_{cr}} \quad (2-2)$$

ここで、 $P_{(W_{cr})}$ ：ひび割れの入ったコンクリートの最大平均付着応力(MPa)、 $P_0$ ：健全試験体(加力前ひび割れ幅 0.0mm)の最大平均付着応力(MPa)、 $W_{cr}$ ：加力前ひび割れ幅(mm)である。

これらの結果より、鉄筋降伏強度が加力前ひび割れ幅の増加に伴う最大平均付着応力の低下に与える影響は小さいことが示唆される。

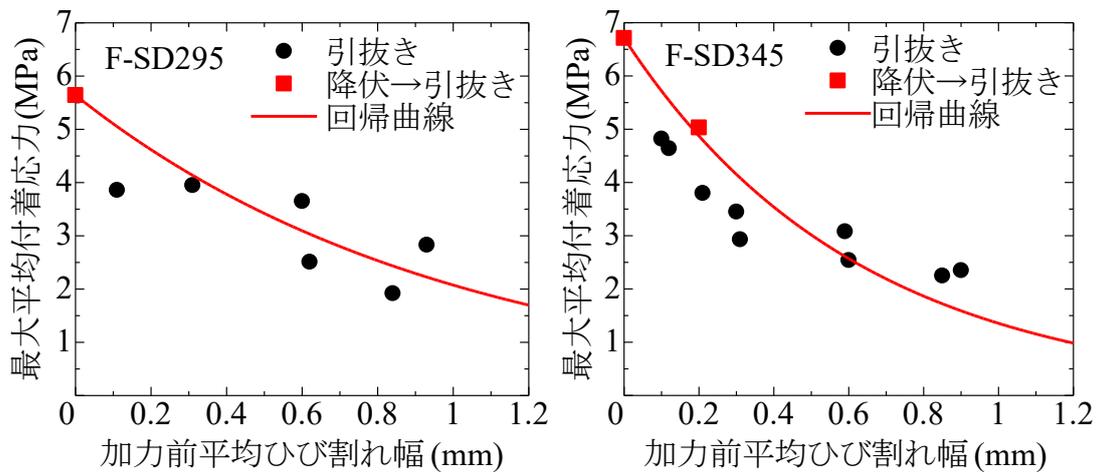


図 2.3.4 最大平均付着応力－平均ひび割れ幅関係

## 2.4 まとめ

EAFP を用い、自由端側に大きい鉄筋腐食ひび割れを模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を実施した。実験より得られた付着応力－荷重端変位関係から、自由端側の大きいひび割れが鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響の検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① EAFP による鉄筋腐食ひび割れ模擬の結果、加力端側から破砕剤を充填した影響により、自由端側でひび割れ幅が大きくなる傾向が確認された。
- ② 加力前ひび割れ幅の増加に伴い、最大付着応力は低下する傾向を示した。
- ③ 鉄筋が降伏する前に引抜きが生じる試験体の平均付着応力－荷重端変位関係においては、鉄筋降伏強度の違いによる影響は小さいことが分かった。

# 第3章 荷重端側ひび割れが大きい試験体の付着性状

## 3.1 はじめに

第2章では、自由端側のひび割れ幅が大きい試験体の鉄筋引抜き試験を実施し、自由端側の大きいひび割れが鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響を検討した。

本章では、荷重端側のひび割れ幅が大きい試験体の鉄筋引抜き試験を実施し、本実験および第2章の実験により得られた平均付着応力-荷重端変位関係から、鉄筋腐食ひび割れ幅の軸方向分布が鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響の検討を行う。

## 3.2 実験概要

### 3.2.1 試験体

試験体形状は第 2 章と同一である。試験体名称を図 3.2.1 に示す。荷重端側に大きいひび割れを模擬した試験体を L シリーズとした。試験体には SD345 の鉄筋を用いた。実験因子は加力前ひび割れ幅とし、目標加力前ひび割れ幅を 0.0mm（破砕剤充填なし）～0.9mm とし、試験体を計 11 体作製した。

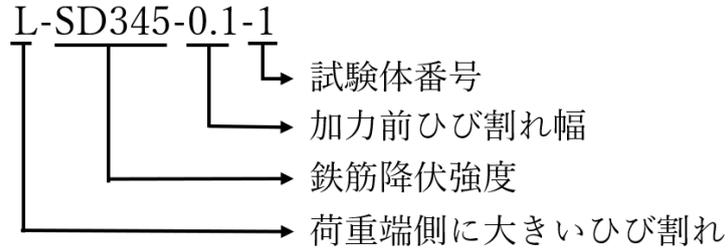


図 3.2.1 試験体名称

### 3.2.2 使用材料

#### (1) コンクリート

コンクリートには、目標強度 18MPa、粗骨材の最大寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。コンクリートの配合を表 3.2.1 に示す。第 2 章のコンクリートの配合と同一である。

表 3.2.1 コンクリートの配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	C	W	S	G	Ad
78.5	248	195	930	840	2.48

コンクリートの材料試験には、φ100 mm×200 mm の円柱供試体を使用した。材齢 28 日に 1 回の試験を実施した。加力には 500 kN 万能試験機を用い、圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。得られた材料試験結果を表 3.2.2 に示し、また本実験における検討用コンクリート強度を表 3.2.3 に示す。なお、検討用コンクリート強度は、材料試験結果の平均値とした。

表 3.2.2 コンクリートの材料試験結果

材齢	番号	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
28 日	1	16.3	19.6	2.02
	2	15.5	16.0	1.72
	3	15.9	15.6	1.82
	平均	15.9	17.1	1.86

表 3.2.3 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	15.9	17.1	1.86

#### (2) 鉄筋

主筋には第 2 章で用いた異形鉄筋 D16 (SD345) を使用した。力学性状は表 2.2.5 に示すとおりである。

### 3.2.3 破砕剤の充填方法

自由端側を下にして置き、荷重端側から破砕剤を充填した。すきまテープを用いて破砕剤を荷重端側から全長の約 5 分の 4 の範囲にのみ充填することで、荷重端側に大きなひび割れを発生させた。

### 3.2.4 加力・計測方法

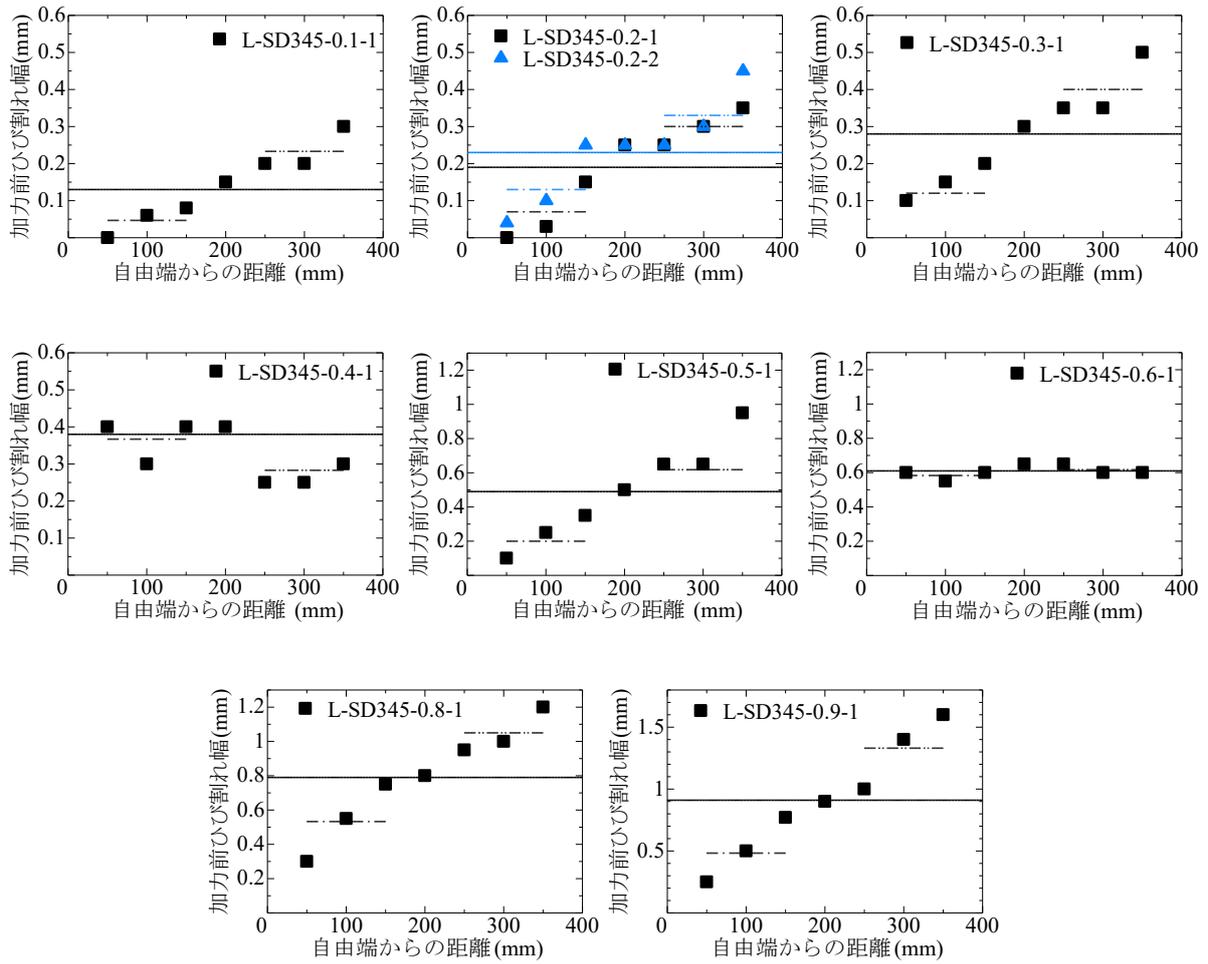
加力前ひび割れ計測位置および加力方法はそれぞれ図 2.2.4 および図 2.2.5 と同一とした。計測項目はロードセルによる引抜き荷重，変位計による鉄筋荷重端変位および鉄筋自由端変位である。

## 3.3 実験結果

### 3.3.1 試験体ひび割れ発生状況

各試験体の加力前ひび割れ状況を図 3.3.1 に示す。自由端側 3 点（自由端から 50mm、100mm、150mm 位置）の加力前ひび割れ幅平均値を一点鎖線、荷重端側 3 点（自由端から 250mm、300mm、350mm 位置）の加力前ひび割れ幅平均値を二点鎖線で示す。破碎剤充填後、アルミパイプ周囲からひび割れが発生し、鉄筋方向および試験体表面方向に進展することで、サイドスプリット型のひび割れが発生した。

加力前後のひび割れ状況を図 3.3.2 に示す。F シリーズの試験体と同様に、多くの試験体において、加力前ひび割れおよび加力により新たに発生したひび割れが加力により拡幅することで、最終的な破壊に至った。加力前ひび割れ幅が 0.2mm 以下の一部の試験体では、鉄筋つかみ部にずれが生じたため、加力を終了した。これらの試験体の実験結果は、検討から除外する。



- - - 自由端側 3 点平均値  
 - · - 荷重端側 3 点平均値  
 ——— 平均値

図 3.3.1 加力前ひび割れ状況

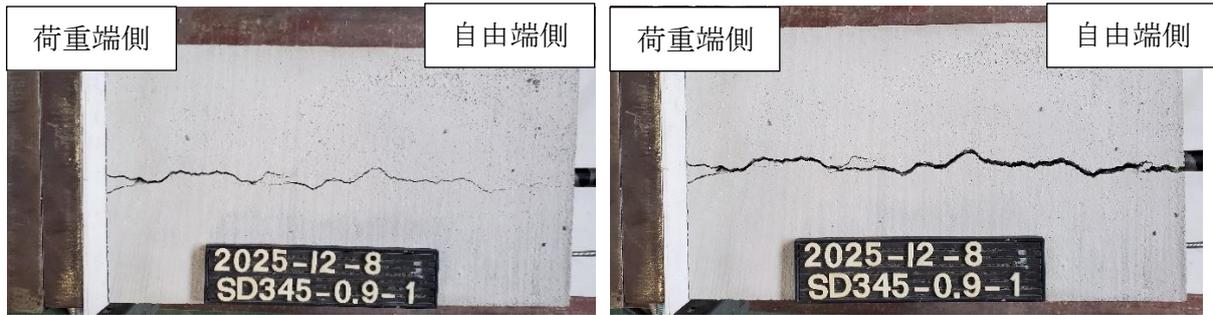
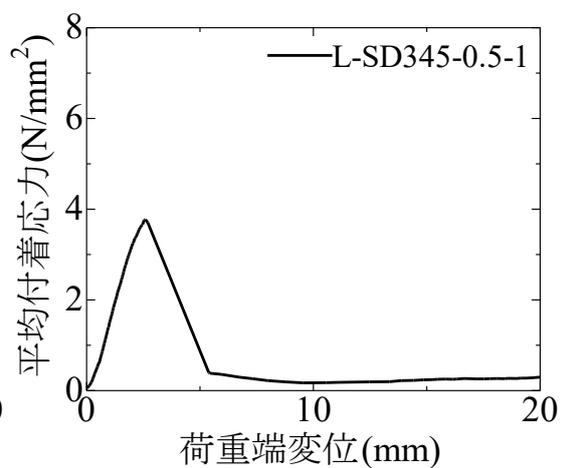
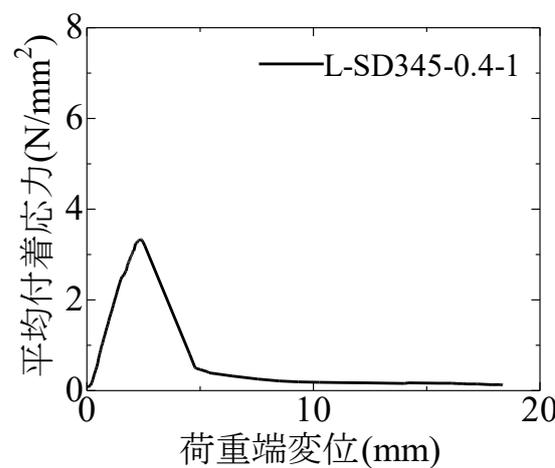
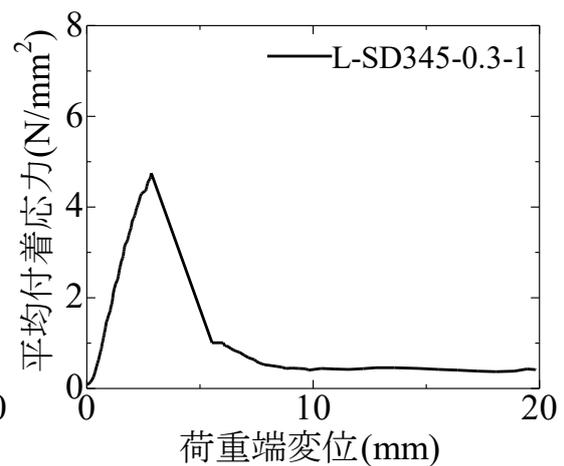
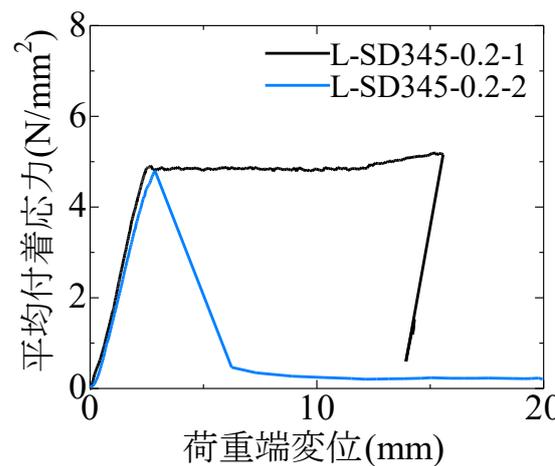
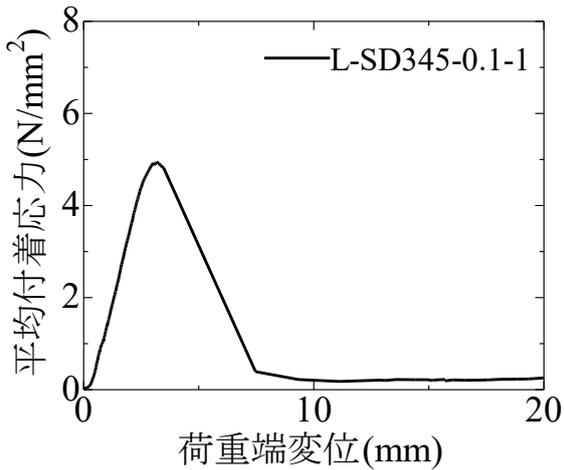
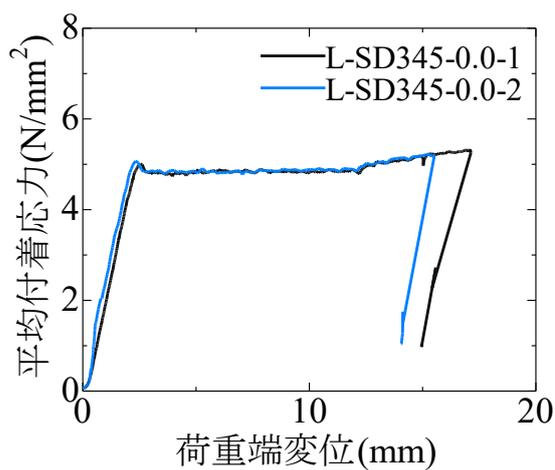


図 3.3.2 引抜き加力前後のひび割れ状況(左 : 加力前、右 : 加力後)

### 3.3.2 鉄筋引抜き試験結果

#### (1) 付着応力－荷重端変位関係

鉄筋引抜き試験によって得られた付着応力－荷重端変位関係を図 3.3.3 に示す。平均付着応力、荷重端変位の導出方法は第 2 章と同一である。鉄筋が降伏せずに引抜きが発生した試験体、鉄筋降伏後鉄筋つかみ部がずれ加力を終了した試験体がある。破壊状況および最大平均付着応力を表 3.3.1 に示す。第 2 章の実験結果と同様に、加力前ひび割れ幅が大きくなると、最大平均付着応力が小さくなる傾向が見られた。



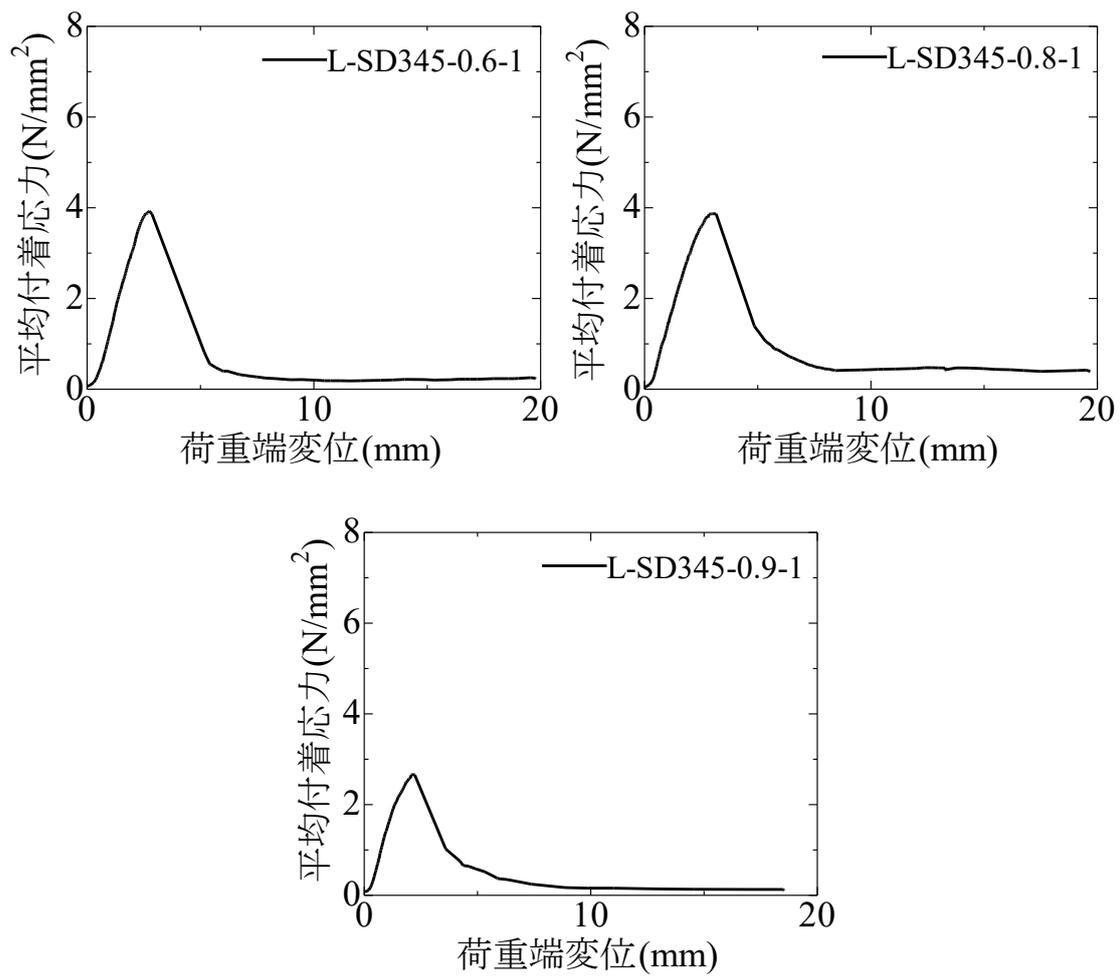


図 3.3.3 平均付着応力-荷重端変位関係

表 3.3.1 L-SD345 試験体実験結果

L-SD345	破壊状況	最大平均付着応力 (MPa)
0.0-1	降伏→※	5.26
0.0-2	降伏→※	5.22
0.1-1	引抜き	4.63
0.2-1	降伏→※	5.19
0.2-2	引抜き	4.80
0.3-1	引抜き	4.75
0.4-1	引抜き	3.34
0.5-1	引抜き	3.77
0.6-1	引抜き	3.93
0.8-1	引抜き	3.87
0.9-1	引抜き	2.67

※：つかみ部ずれにより加力終了

引抜きが発生した試験体の最大平均付着応力ー加力前ひび割れ幅関係、およびこれらの関係の回帰分析の結果を図 3.3.4 に示す。鉄筋つかみ部のずれにより加力を終了したひび割れ幅 0.0mm 試験体の最大平均付着応力については、F-SD345 試験体の最大平均付着応力と同一と仮定し、回帰分析を行った。回帰分析の結果、式(3-1)を得た。

$$P_{(W_{cr})} = P_0 e^{-1.1W_{cr}} \quad (3-1)$$

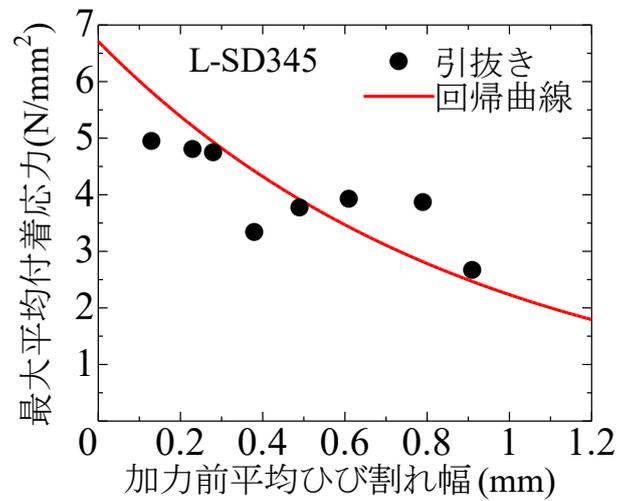


図 3.3.4 最大平均付着応力ー加力前平均ひび割れ幅

(2) ひび割れ幅分布が付着性状に与える影響

式(2-1)、(2-2)、(3-1)で表される最大平均付着応力を、それぞれ $P_0$ で基準化し、得られた最大平均付着応力比—加力前平均ひび割れ幅関係の回帰曲線の比較を図 3.3.5 に示す。自由端側のひび割れ幅が大きい試験体と荷重端側のひび割れ幅が大きい試験体との間では、加力前平均ひび割れ幅の増加に伴う最大平均付着応力の低下に大きな差異は見られない。鉄筋腐食ひび割れ幅の分布が最大平均付着応力の低下に与える影響は小さいことがわかった。

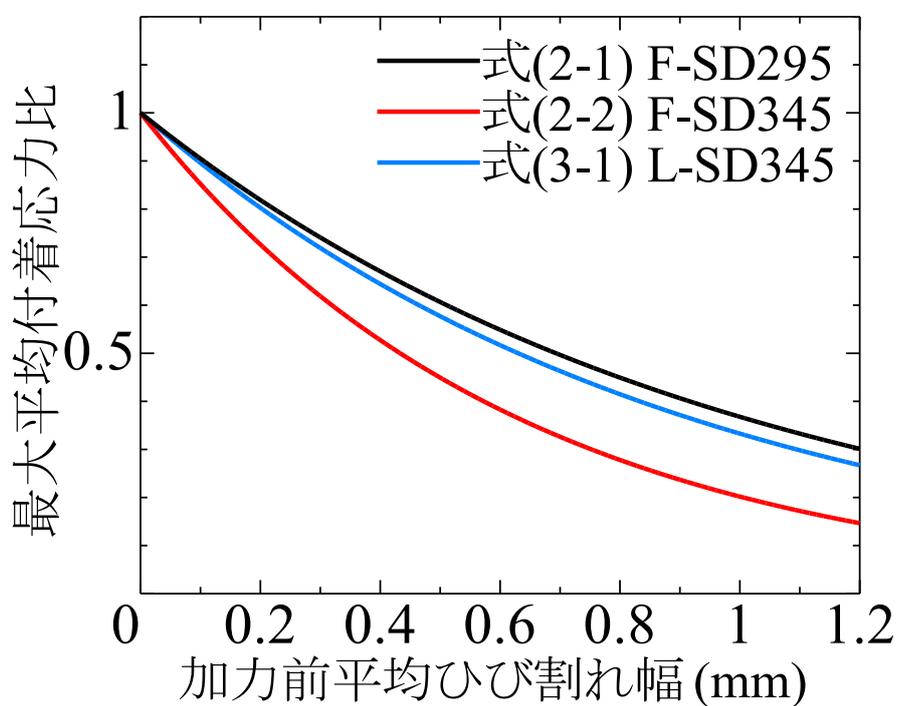


図 3.3.5 最大平均付着応力比—加力前平均ひび割れ幅

## 3.4 まとめ

EAFP 導入により、荷重端側に大きい鉄筋腐食ひび割れを模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を実施した。実験より得られた平均付着応力－荷重端変位関係から鉄筋腐食ひび割れが鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響の検討を行った。また、第 2 章の F シリーズ試験体の引抜き試験結果と比較検討を行い、鉄筋軸方向のひび割れ幅分布が付着性状に与える影響の検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 加力前ひび割れ幅の増加に伴い最大平均付着応力は減少する傾向が見られた。
- ② F シリーズ試験体および L シリーズ試験体の最大平均付着応力－加力前平均ひび割れ幅関係に大きな差異はなく、鉄筋軸方向のひび割れ幅分布が鉄筋とコンクリートの付着性状に与える影響は小さい。

## 第4章 ひび割れ幅分布を考慮した付着解析

### 4.1 はじめに

本章では、逐次積分を用いた付着解析を行い、ひび割れ幅の局所的な分布が平均的な付着性状に及ぼす影響について検討する。実際に試験体に発生したひび割れ幅分布を想定した付着解析を行い、各試験体の付着応力-荷重端すべり量関係との比較を行う。

## 4.2 解析方法

### 4.2.1 局所付着応力-荷重端すべり量モデル

既往の研究<sup>3)</sup>で得られた、EAFPにより鉄筋腐食ひび割れを模擬した短い付着長を有する試験体の付着応力-荷重端すべり量関係を図 4.2.1 に示す。これらの付着応力-荷重端すべり量関係は、図 4.2.2 に示す最大付着応力 $\tau_{max}$ 、最大付着応力時の荷重端すべり量 $S_{max}$ 、荷重端すべり量が 0.2mm の時の付着応力 $\tau_1$ をパラメータとするトリリニアモデルにより表現されている。また、各パラメータは、図 4.2.3 に示されるように加力前ひび割れ幅を変数とする関数で表現されている。 $\tau_{max}$ 、 $\tau_1$ は加力前ひび割れ幅の増加に伴って減少する一方、 $S_{max}$ はひび割れ幅の増加とともに増加する。これらの回帰式を用いて、任意の加力前ひび割れ幅の付着応力-荷重端すべり量関係を決定し、これを鉄筋微小要素に用いる局所付着応力-荷重端すべり量モデルとした。

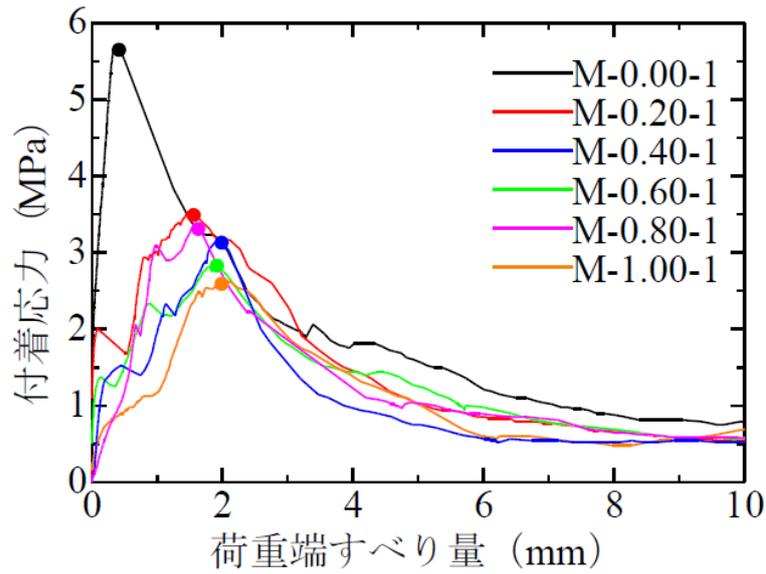


図 4.2.1 短い付着長の試験体における付着応力-荷重端すべり量関係<sup>[3]</sup>

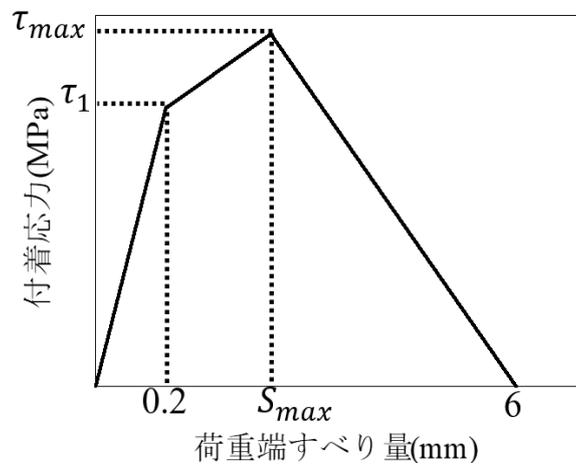


図 4.2.2 付着応力-荷重端すべり量関係のトリリニアモデル<sup>[3]</sup>

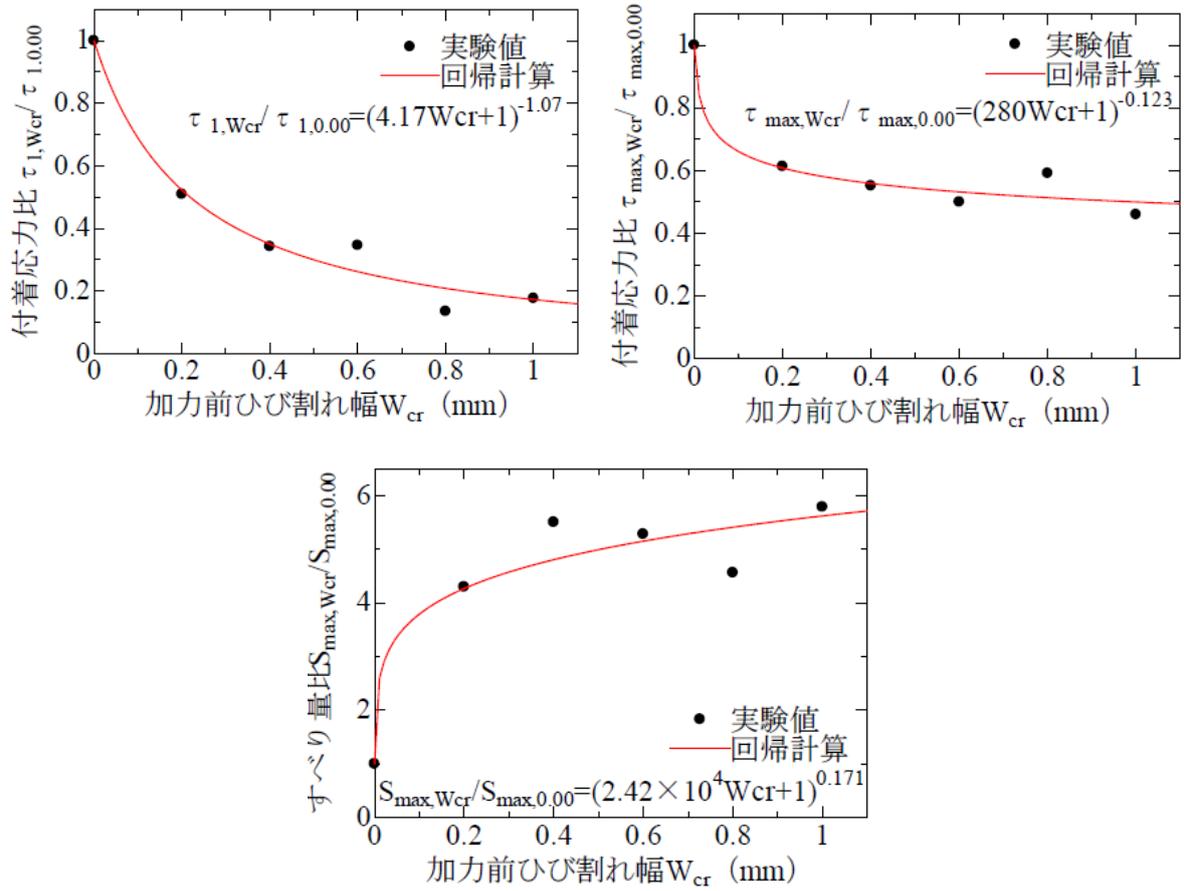


図 4.2.3 各パラメータと加力前ひび割れ幅の関係<sup>[3]</sup>

## 4.2.2 計算方法

本研究の解析は、既往の研究<sup>5)</sup>で示されている、鉄筋とコンクリート間の力の釣り合い条件およびすべり量と変形の適合条件に基づく逐次積分により行った。

試験体の自由端を原点として鉄筋およびコンクリートを微小区間に分割し、自由端すべり量 $S_0$ を与え、その位置の加力前ひび割れ幅における局所付着応力-すべり量関係モデルから付着応力 $\tau_{bi}$ を求める。本解析では微小区間の長さを $\Delta x=1\text{mm}$ とした。各区間の局所付着応力-荷重端すべり量関係モデルは、図 4.2.3 に示す回帰式にその区間の加力前ひび割れ幅を代入し、モデルの各パラメータを決定した。ひび割れ幅計測位置間の微小区間における加力前ひび割れ幅は、ひび割れ幅が直線的に変化すると仮定した。境界条件として、自由端に作用する引張力 $P_0$ は 0 とした。次に、隣接する微小区間の引張力 $P_i$ 、すべり量 $S_i$ を、コンクリートの変形を無視して式(4-1)、(4-2)から算出する。

$$P_i = P_{i-1} + \tau_{bi} \cdot \Delta x \cdot \varphi \quad (4-1)$$

$$S_i = S_{i-1} + \left( \frac{P_{i-1}}{E_s A_s} + \frac{\Delta P_{i-1}}{2E_s A_s} \right) \Delta x \quad (4-2)$$

ここで、 $\varphi$ は鉄筋の公称周長、 $E_s$ は鉄筋の弾性係数、 $A_s$ は鉄筋の断面積、 $\Delta P_{i-1}$ は $P_i$ の $P_{i-1}$ に対する増分である。

以上の計算を自由端から繰り返すことで、荷重端における引張力およびすべり量を算出できる。また、本解析における平均付着応力は荷重端引張力を付着区間の鉄筋表面積で除することで求められる。

本解析では鉄筋軸方向のひび割れ幅分布による影響を検討するため、以下の 5 種類のひび割れ幅分布を仮定して付着解析を行った。

1. 実際に発生・計測したひび割れ幅分布 (Observed)
2. 自由端側と荷重端側の分布を反転させたもの (Reverse)
3. 実際に発生したひび割れ幅の平均値を一様に分布させたもの (Average)
4. 実際に発生したひび割れ幅の最大値を一様に分布させたもの (Maximum)
5. 実際に発生したひび割れ幅の最小値を一様に分布させたもの (Minimum)

それぞれのひび割れ幅分布で付着解析を行い、付着性状を比較した。本解析では、鉄筋が降伏する前に引抜きが生じた試験体を対象とした。

## 4.3 解析結果

F-SD295 試験体および F-SD345 試験体の解析結果を、それぞれ図 4.3.1 および図 4.3.2 に示す。また、L-SD345 試験体の解析結果を図 4.3.3 に示す。左図は最大引張荷重時における付着応力分布の解析結果を、右図は平均付着応力ー荷重端すべり量関係の解析結果と実験結果の比較を示している。実験における荷重端すべり量は、荷重端変位から付着区間外の鉄筋の伸びを引くことで算出した。L-SD345-0.1-1 試験体については、ひび割れ幅分布を **Minimum** と仮定した解析において鉄筋が降伏すると判断できるため、解析結果を除外した。

**Observed** の解析結果は、最大付着応力および平均付着応力ー荷重端すべり量関係のいずれにおいても実験結果と良好に一致している。**Observed** と **Reverse** を比較すると、ひび割れ幅分布の違いが平均付着応力ー荷重端すべり量関係に及ぼす影響は小さいことが分かる。また、当然ではあるが **Maximum** の最大付着応力は最も小さく、**Minimum** の最大付着応力は最も大きい。**Observed** および **Reverse** の結果は、平均ひび割れ幅を一様に仮定した **Average** の解析結果とほぼ一致しており、付着長が鉄筋径の 20 倍までの範囲では、加力前ひび割れ幅の鉄筋軸方向分布にかかわらず、平均ひび割れ幅を用いることで付着性状を評価することが可能であると考えられる。

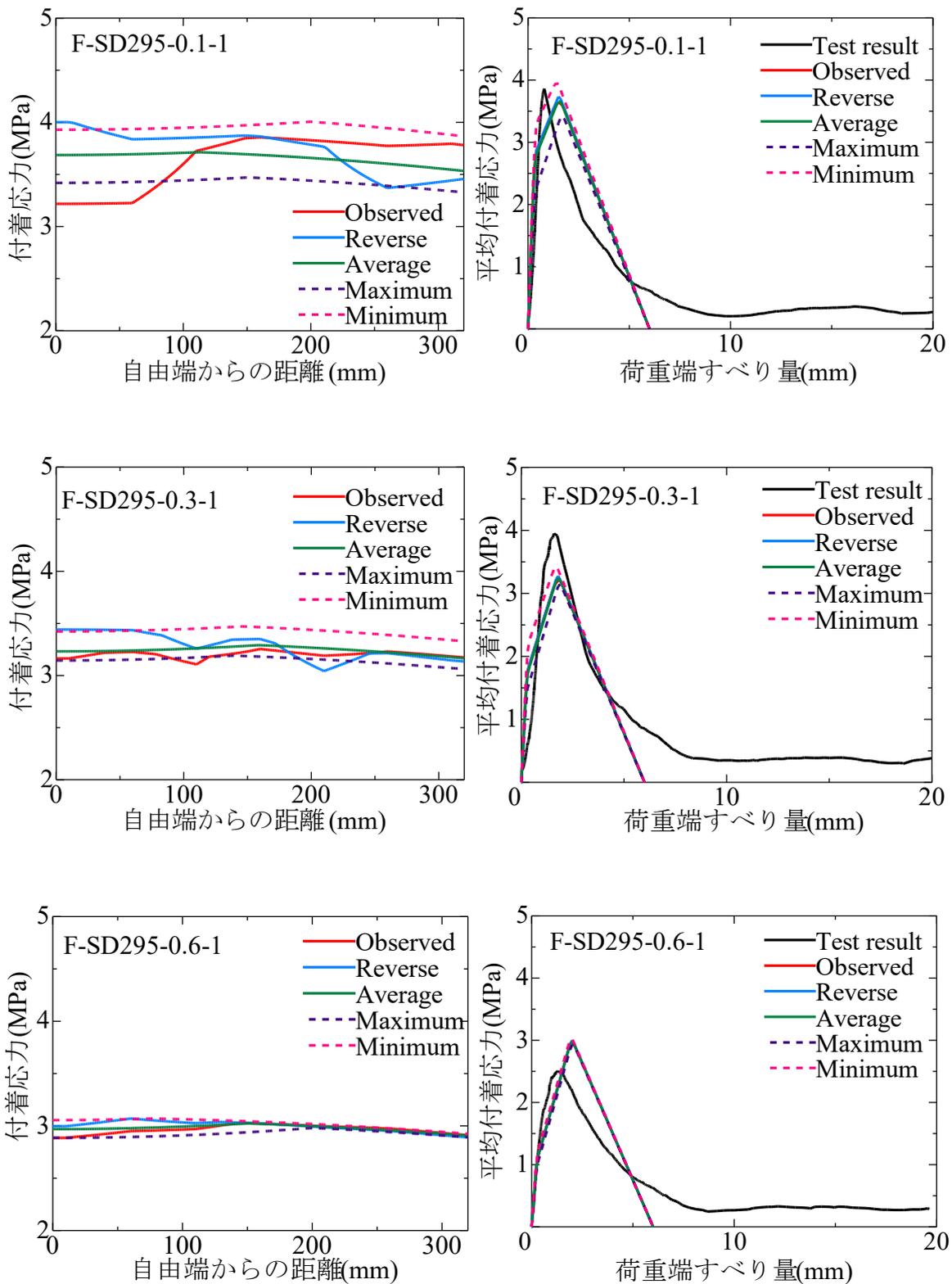
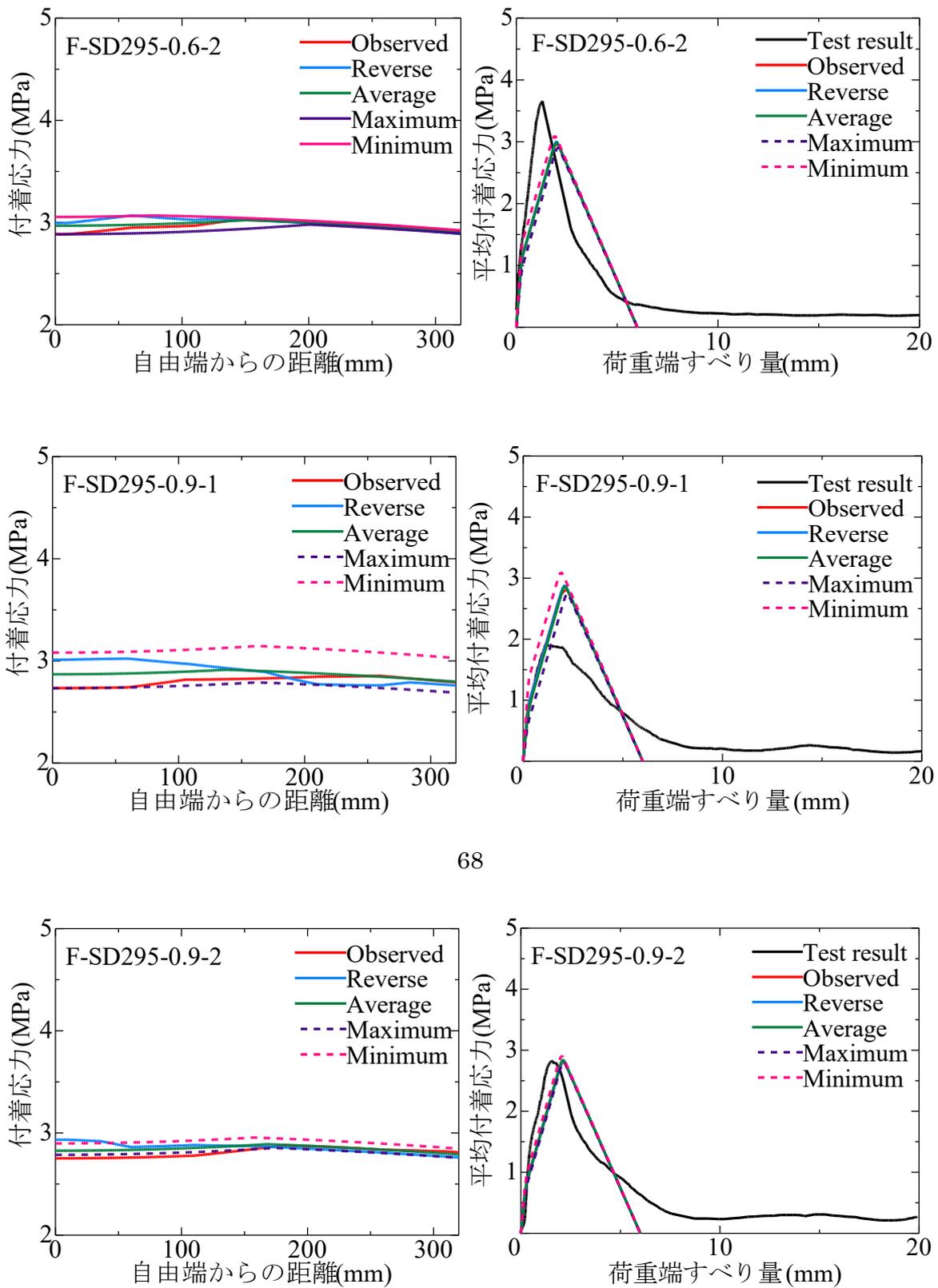


図 4.3.1 F-SD295 試験体付着解析結果



68

図 4.3.1 F-SD295 試験体付着解析結果 (続き)

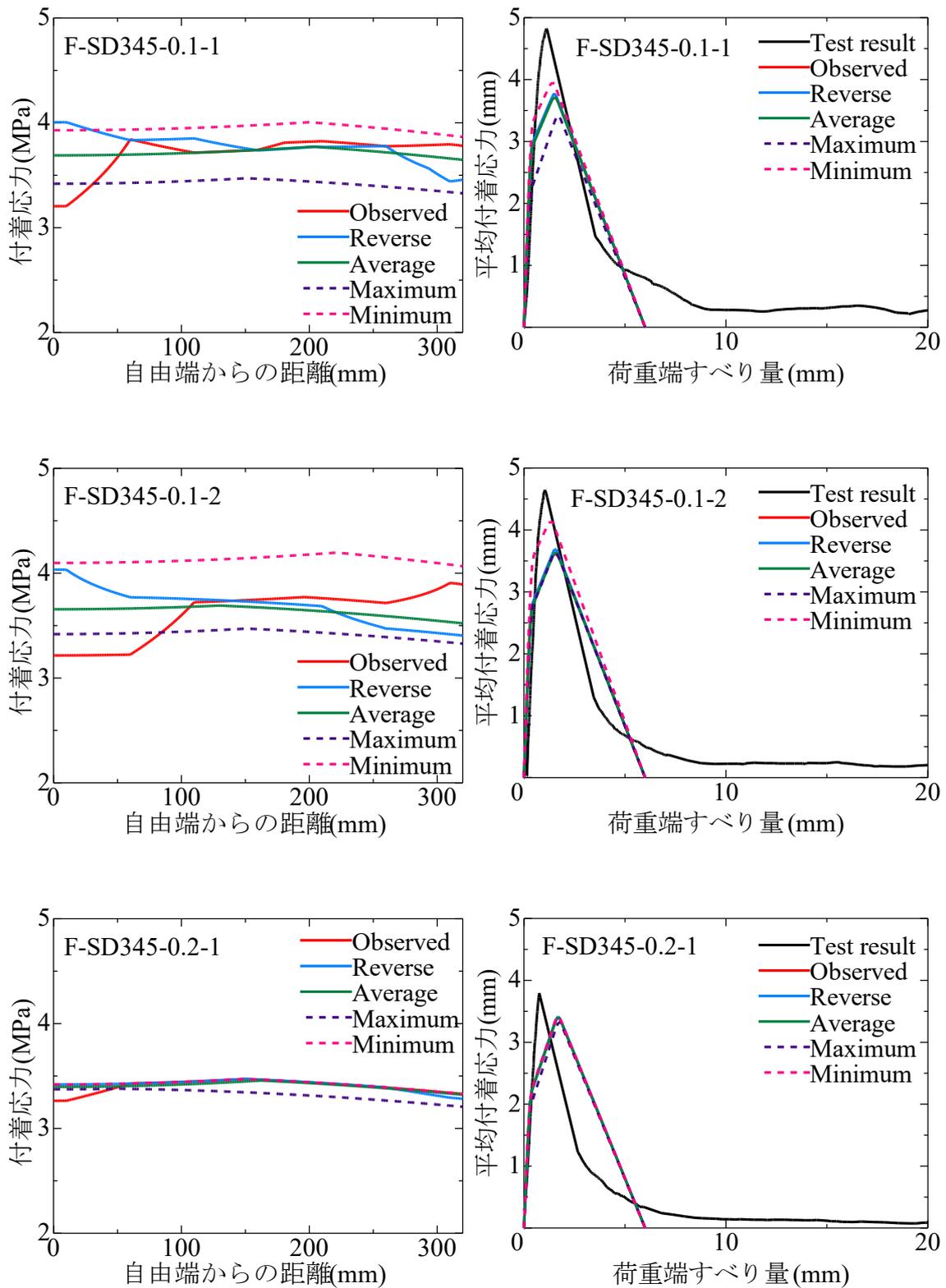


図 4.3.2 F-SD345 試験体付着解析結果

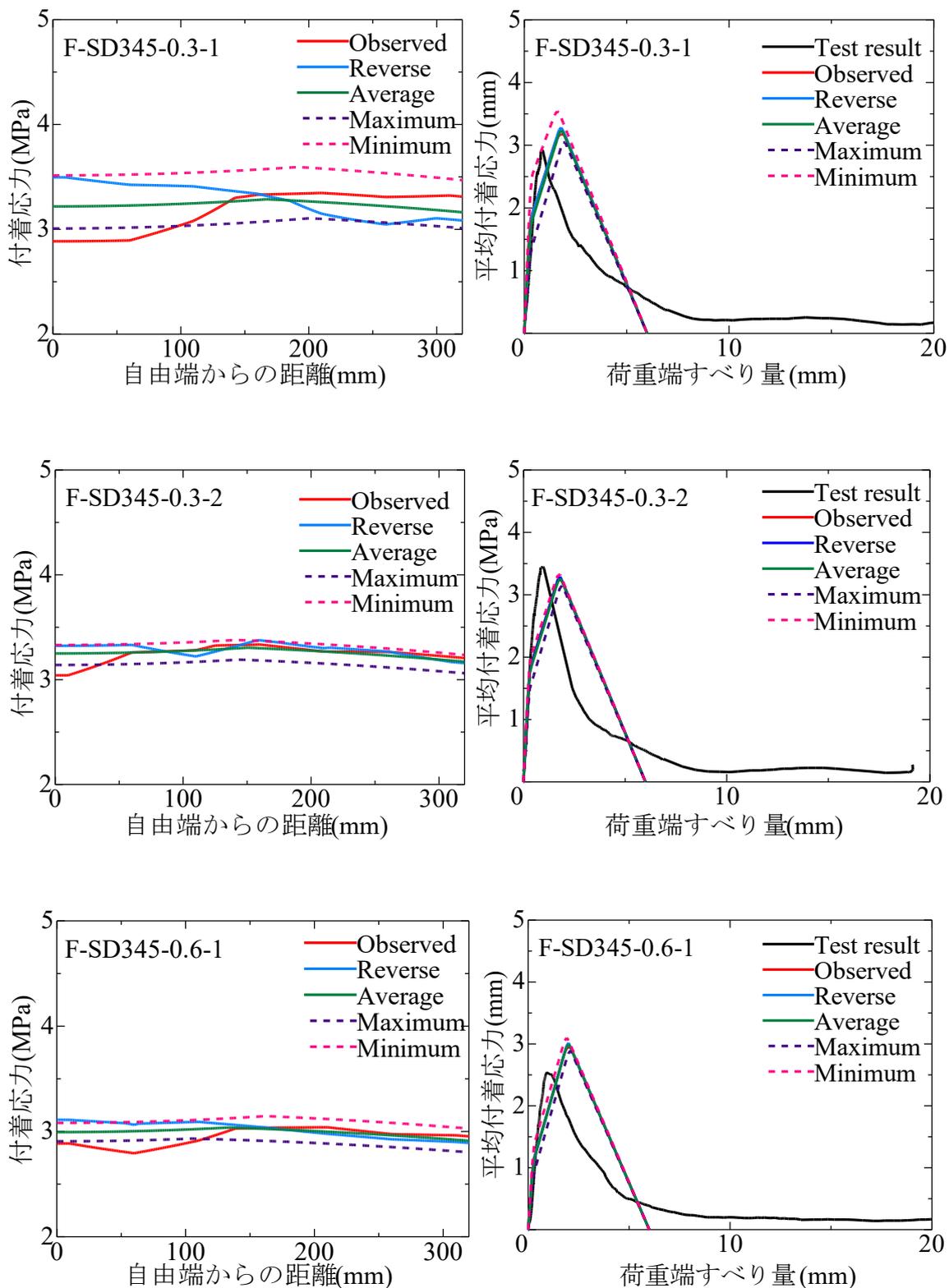


図 4.3.2 F-SD345 試験体付着解析結果 (続き)

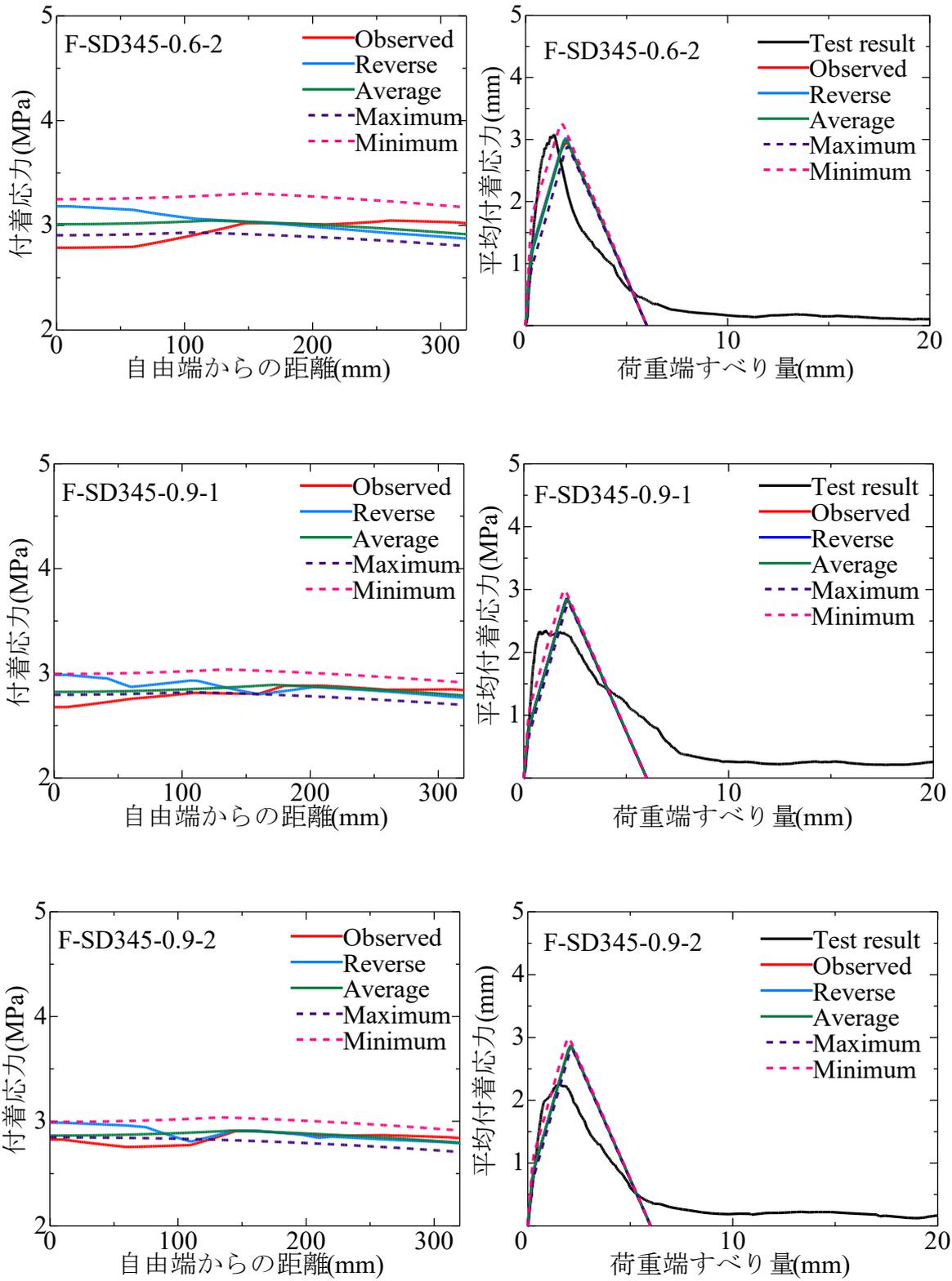


図 4.3.2 F-SD345 試験体付着解析結果 (続き)

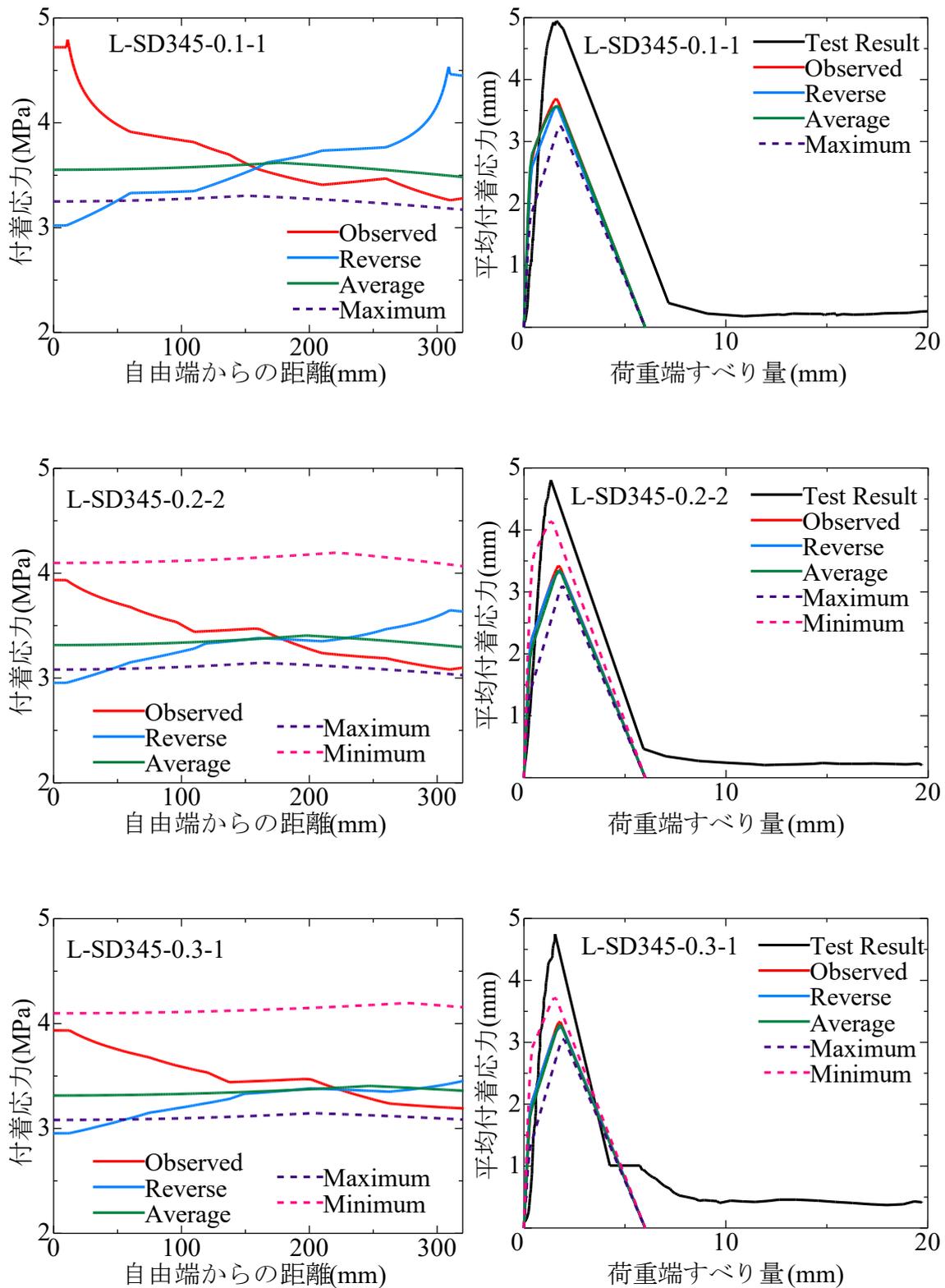


図 4.3.3 L-SD345 試験体付着解析結果

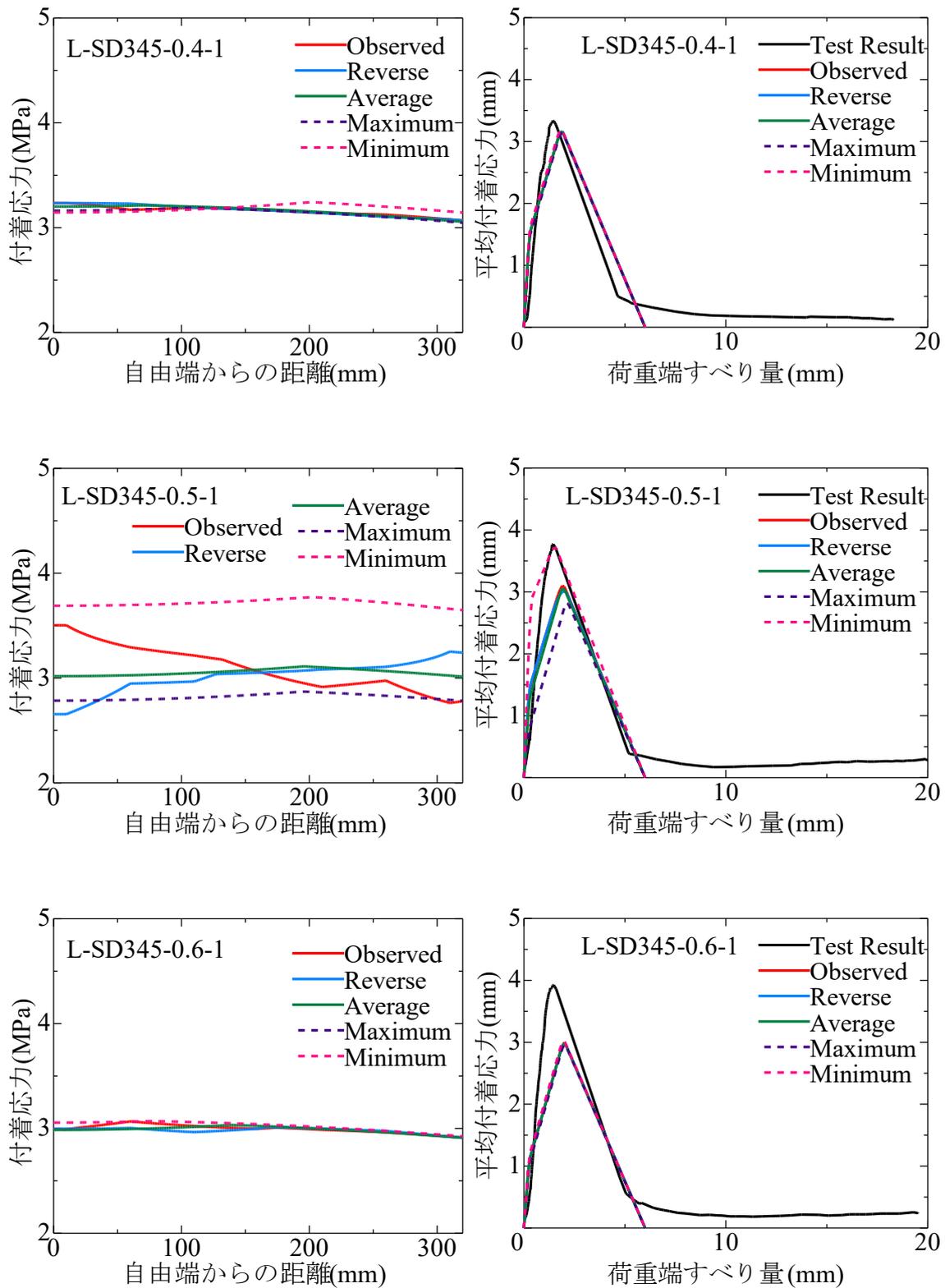


図 4.3.3 L-SD345 試験体付着解析結果 (続き)

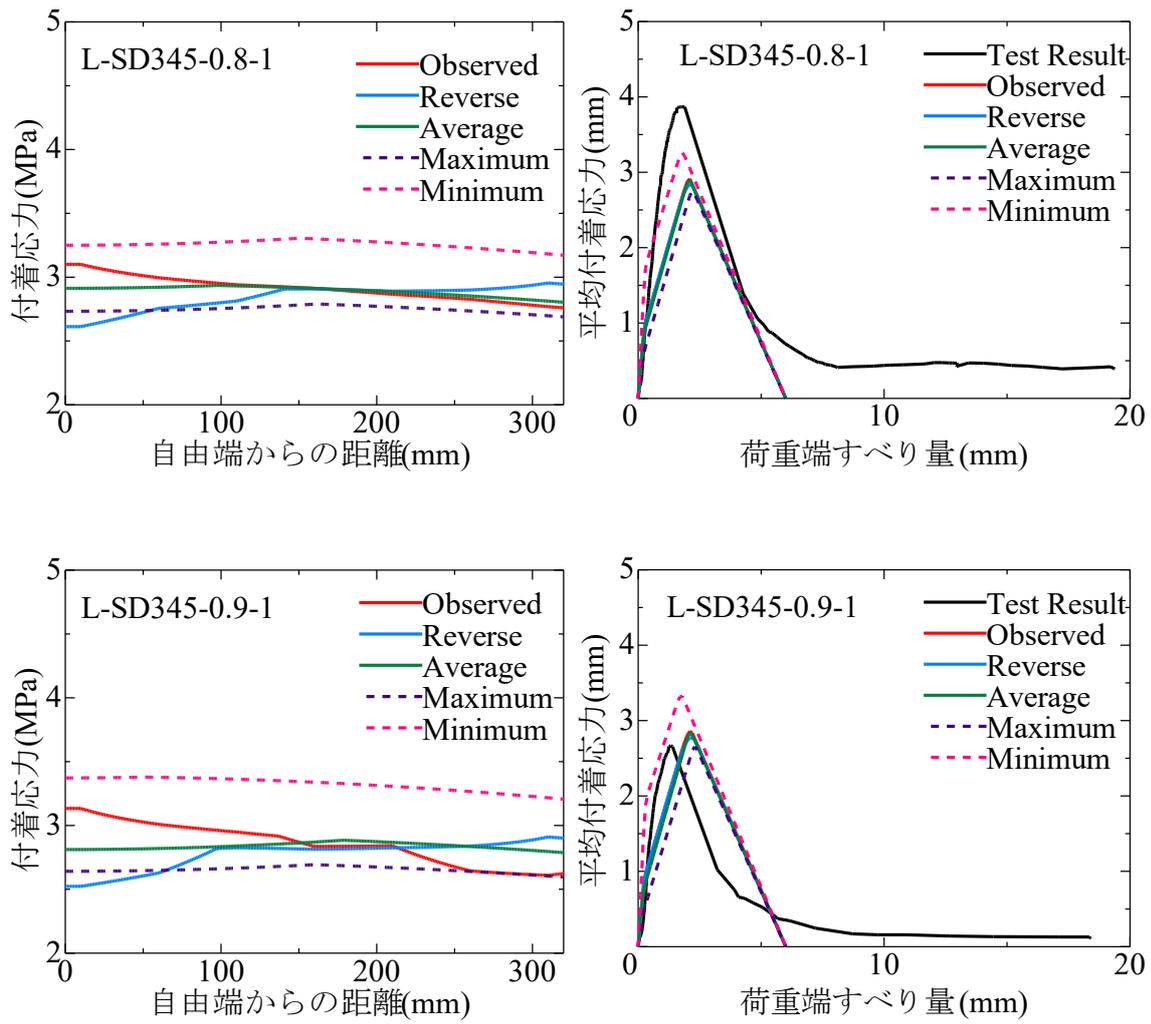


図 4.3.3 L-SD345 試験体付着解析結果 (続き)

## 4.4 まとめ

第 2 章および第 3 章で鉄筋引抜き試験を実施した試験体のひび割れ幅分布に加え、その他 4 種類のひび割れ幅分布を仮定し、ひび割れ幅分布を考慮した付着解析を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- ① 鉄筋軸方向分布を考慮した付着解析の結果は、F シリーズ試験体および L シリーズ試験体の実験結果と良好に一致した。
- ② 鉄筋軸方向に 5 種類のひび割れ幅分布を仮定した付着解析の結果、ひび割れ幅分布の違いが平均付着応力-荷重端すべり量関係に及ぼす影響は小さいことが示された。付着長が鉄筋径の 20 倍程度までの範囲では、ひび割れ幅分布が付着応力分布に与える影響は小さく、平均ひび割れ幅を用いることで付着挙動を評価できる可能性が示唆された。

## 第5章 結論

本研究では、鉄筋腐食ひび割れ幅の軸方向分布がコンクリートと鉄筋の付着性状に与える影響を検討することを目的とし、破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食ひび割れを模擬した試験体の鉄筋引抜き試験を実施した。

自由端側に向けて大きいひび割れを模擬した試験体、荷重端側に向けて大きいひび割れを模擬した試験体のいずれにおいても、加力前ひび割れ幅が増加するにつれて、最大平均付着応力は減少する傾向が見られた。両者の最大平均付着応力ー加力前平均ひび割れ幅関係に大きな差異はなく、加力前ひび割れ幅の分布が付着性状に及ぼす影響は小さいことが示唆された。

加力前ひび割れ幅の軸方向分布を考慮した付着解析を行った結果、ひび割れ幅分布がコンクリートと鉄筋の付着性状に与える影響は小さく、平均ひび割れ幅を用いることで付着性状の劣化を評価することが可能であると考えられる。

## 謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々にご指導およびご協力を頂きました。

指導教員であります筑波大学システム情報工学系教授 金久保利之先生には本研究における研究テーマの相談から、実験の実施および論文の遂行などに至るまでご指導ご鞭撻を賜りました。

副指導教員であります筑波大学システム情報工学系教授 庄司学先生、同じく副指導教員であります筑波大学システム情報工学系准教授 八十島章先生には、研究活動や学生生活全般において丁寧なご指導を賜りました。

また、筑波大学金久保研究室の学生、特に、先輩である三谷龍世氏、後輩である西澤和輝氏、三浦遥人氏には研究における相談から試験体の作製、実験の補助や論文指導など多岐にわたり多くの支援を頂きました。

皆様に心より感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Hongwei Lin, Yuxi Zhao : Effects of confinements on the bond strength between concrete and corroded steel bars, *Construction and Building Materials*, Vol.118, pp.127-138, 2016
- [2] Syll, A.S., Aburano, T., Kanakubo, T. : Bond strength degradation in concrete cracked by expansion agent filled pipes, *Structural Concrete*, 22(5), pp.3156-3172, 2021
- [3] 三谷龍世、西澤和輝、栗原朋久、金久保利之：破砕剤充填パイプにより鉄筋腐食ひび割れを模擬したコンクリートと鉄筋の付着性状、*日本建築学会技術報告集*、第 31 巻、第 79 号、p.1307-1312、2025
- [4] 川村佳弘：破砕剤充填パイプによるコンクリートの鉄筋腐食時ひび割れの模擬、*筑波大学大学院博士課程システム情報工学研究科修士論文*、2018.3
- [5] 金久保利之、小島浩一、米丸啓介、福山洋：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究（その 2：横補強のない場合の性状に与える構造因子の影響）、*日本建築学会構造系論文集*、第 506 号、pp.163-169、1998