

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

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

三谷 龍世
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

2025年 3月

論文概要

鉄筋コンクリート構造物で起きる経年劣化の代表例として、鉄筋腐食による付着劣化が挙げられる。鉄筋に腐食が生じることで質量減少率が増加すると、腐食生成物の膨張圧によりコンクリートにひび割れが発生する。これにより拘束力が大幅に低下し、鉄筋とコンクリートの付着強度の低下を引き起こす。鉄筋腐食によって部材表面まで到達したひび割れは目視での観察が可能であり、部材表面のひび割れと付着劣化の関係を明らかにすることで、実部材における劣化状況の把握につなげることができると考えられる。既往の研究では破砕剤充填パイプを導入し腐食ひび割れを模擬し、試験体表面に発生した加力前ひび割れ幅を変動因子として鉄筋引抜き試験が行われた。実構造物においては地震力や風などに代表される繰返し荷重が発生するため、繰返し荷重が作用した場合における腐食ひび割れの付着劣化への影響を検討する必要がある。また、実構造物における付着長は鉄筋径の数十倍であり、実部材に近い条件下として付着長の長い試験体について検討を行う必要がある。

本研究では、腐食ひび割れ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単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を実施した。

付着長の短い試験体の単調、繰返し鉄筋引抜き試験では、付着応力－荷重端すべり量関係について検討を行った。加力前ひび割れ幅の増加に伴い、最大付着応力は減少する傾向が見られた。また、繰返し履歴モデルを構築し、実験結果との比較検討を行った。実験結果における付着応力－すべり量関係の挙動、加力前ひび割れ幅の増加に伴う付着応力の低下を概ねよく表現できた。

付着長の長い試験体の単調鉄筋引抜き試験においても、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。同一加力前ひび割れ幅における付着長の短い試験体と、付着長の長い試験体の付着応力の最大値は近い値となった。試験体と同一条件での付着解析を行い、実験結果との比較検討を行った。付着解析より得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係は、実験結果の平均付着応力－荷重端すべり量関係と良い適合が見られた。

目次

第 1 章	序論	1
1.1	はじめに	1
1.2	研究目的	2
1.3	破砕剤充填パイプによる腐食模擬	3
第 2 章	付着長の短い試験体による局所付着性状	4
2.1	はじめに	4
2.2	実験概要	5
2.2.1	試験体	5
2.2.2	使用材料	6
2.2.3	加力・計測方法	8
2.3	実験結果	10
2.3.1	試験体ひび割れ発生状況	10
2.3.2	単調加力試験結果	13
2.3.3	繰返し C1 加力試験結果	16
2.3.4	繰返し C2 加力試験結果	22
2.4	繰返し履歴モデル	29
2.4.1	包絡線モデル	29
2.4.2	繰返し履歴のモデル化方法	32
2.4.3	履歴モデルと実験結果の比較	36
2.5	まとめ	39
第 3 章	付着長の長い試験体の付着性状	40
3.1	はじめに	40
3.2	実験概要	41
3.2.1	試験体	41
3.2.2	使用材料	42
3.2.3	加力・計測方法	44
3.3	実験結果	46
3.3.1	試験体ひび割れ発生状況	46
3.3.2	単調加力試験結果	48
3.4	付着解析	53
3.4.1	解析方法	53
3.4.2	解析結果	55
3.5	まとめ	59
第 4 章	結論	60
謝辞		61
参考文献		62

図表目次

図 1.1.1	付着強度比－鉄筋質量減少率関係 ^[1]	1
図 1.3.1	最大付着応力－加力前ひび割れ幅関係 ^[3]	3
図 2.2.1	試験体形状	5
図 2.2.2	加力前ひび割れ幅計測位置	8
図 2.2.3	加力装置	9
図 2.2.4	加力履歴	9
図 2.3.1	ひび割れ拡幅状況	10
図 2.3.2	加力前ひび割れ状況	10
図 2.3.3	引抜き加力前後のひび割れ状況	12
図 2.3.4	付着応力－荷重端すべり量関係（単調加力）	13
図 2.3.5	付着応力－荷重端すべり量関係の比較（単調加力）	14
図 2.3.6	最大付着応力－加力前ひび割れ幅関係（単調加力）	15
図 2.3.7	付着応力－荷重端すべり量関係（C1-0.00、C1-0.20）	16
図 2.3.8	付着応力－荷重端すべり量関係（C1-0.40、C1-0.60）	17
図 2.3.9	付着応力－荷重端すべり量関係（C1-0.80、C1-1.00）	18
図 2.3.10	最大付着応力－加力前ひび割れ幅関係（繰返し C1 加力）	19
図 2.3.11	ピーク時付着応力の低下の例（繰返し C1 加力）	21
図 2.3.12	各サイクルピーク時付着応力の推移（繰返し C1 加力）	21
図 2.3.13	付着応力－荷重端すべり量関係（C2-0.00、C2-0.20）	22
図 2.3.14	付着応力－荷重端すべり量関係（C2-0.40、C2-0.60）	23
図 2.3.15	付着応力－荷重端すべり量関係（C2-0.80、C2-1.00）	24
図 2.3.16	最大付着応力－加力前ひび割れ幅関係（繰返し C2 加力）	25
図 2.3.17	ピーク時付着応力の低下の例（繰返し C2 加力）	27
図 2.3.18	各サイクルピーク時付着応力の推移（繰返し C2 加力）	27
図 2.3.19	各加力前ひび割れ幅ピーク時付着応力の推移	28
図 2.4.1	トリリニアモデル	29
図 2.4.2	特性値の比較	30
図 2.4.3	包絡線モデル形状	30
図 2.4.4	包絡線モデルと実験結果の比較	31
図 2.4.5	履歴モデル形状	32
図 2.4.6	ピーク時付着応力低減率	33
図 2.4.7	除荷勾配	34
図 2.4.8	除荷勾配（左図：全体、右図：横軸 10 までの拡大）	34
図 2.4.9	再載荷勾配	35
図 2.4.10	再載荷勾配（左図：全体、右図：横軸 10 までの拡大）	35
図 2.4.11	繰返し履歴モデルと実験結果の比較	37
図 2.4.12	加力前ひび割れ幅ごとの比較	38
図 2.4.13	履歴モデル（健全試験体）	38
図 3.2.1	試験体形状	41

図 3.2.2	加力前ひび割れ幅計測位置	44
図 3.2.3	加力装置	45
図 3.3.1	ひび割れ拡幅状況	46
図 3.3.2	加力前ひび割れ状況	46
図 3.3.3	引抜き加力前後のひび割れ状況	47
図 3.3.4	平均付着応力－荷重端すべり量関係	48
図 3.3.5	平均付着応力－荷重端すべり量関係の比較	49
図 3.3.6	平均付着応力－自由端すべり量関係	50
図 3.3.7	平均付着応力－自由端すべり量関係の比較	51
図 3.3.8	最大平均付着応力－加力前ひび割れ幅関係	52
図 3.4.1	微小区間の釣り合い	54
図 3.4.2	鉄筋引張応力分布	55
図 3.4.3	すべり量分布	55
図 3.4.4	付着応力分布	56
図 3.4.5	平均付着応力－荷重端すべり量関係の比較	57
図 3.4.6	最大平均付着応力比－加力前ひび割れ幅関係	58
表 2.2.1	試験体一覧	5
表 2.2.2	コンクリートの配合表	6
表 2.2.3	コンクリートの材料試験結果	6
表 2.2.4	検討用コンクリート強度	6
表 2.2.5	鉄筋の引張試験結果	7
表 2.3.1	経過時間（M、C1 試験体）	11
表 2.3.2	経過時間（C2 試験体）	12
表 2.3.3	最大付着応力の一覧（単調加力）	15
表 2.3.4	最大付着応力の一覧（繰返し C1 加力）	20
表 2.3.5	最大付着応力の一覧（繰返し C2 加力）	26
表 2.4.1	特性値一覧	29
表 2.4.2	ピーク時付着応力低減率	33
表 3.2.1	試験体一覧	41
表 3.2.2	コンクリートの配合表	42
表 3.2.3	コンクリートの材料試験結果	42
表 3.2.4	検討用コンクリート強度	42
表 3.2.5	鉄筋の引張試験結果	43
表 3.3.1	経過時間	47
表 3.3.2	最大平均付着応力の一覧	52
表 3.4.1	最大付着応力	56
表 3.4.2	最大平均付着応力の比較	58

第1章 序論

1.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物で起きる経年劣化の代表例として、鉄筋腐食による付着劣化が挙げられる。既往の研究^[1]で示された付着強度比—鉄筋質量減少率関係（図 1.1.1）に示されるように、鉄筋の腐食進行にともなって質量減少率が上昇し、質量減少率の小さい領域（ $\eta < 4.5\%$ ）では、腐食生成物の膨張圧により腐食が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。これにより膨張圧が大幅に低下し、鉄筋とコンクリートの付着強度の低下を引き起こす。鉄筋腐食によって部材表面まで到達したひび割れは目視での観察が可能であり、部材表面のひび割れと付着劣化の関係を明らかにすることで、実部材における劣化状況の把握につなげることができると考えられる。

腐食によるひび割れが付着劣化に与える影響を検討することを目的として、既往の研究^[2]では破砕剤充填パイプ（Expansion Agent Filled Pipe：以下 EAFP）を導入し腐食ひび割れを模擬し、試験体表面に発生した加力前ひび割れ幅を変動因子として鉄筋引抜き試験が行われた。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報告されており、破砕剤充填パイプを用いることで付着劣化を模擬できることが確認されている。

さらに既往の研究^[3]では、破砕剤充填パイプによってひび割れを模擬した鉄筋とコンクリートの付着長が短い試験体を対象に、単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験が実施された。単調加力および繰返し加力の両方において、加力前ひび割れ幅の増加に伴い最大付着応力が低下する傾向が確認された。しかし、実構造物に作用する繰返し荷重の履歴は様々であり、既往の研究^[3]と異なる繰返し履歴での検討が必要である。また、実構造物における付着長は鉄筋径の数十倍であり、実部材に近い条件下として付着長の長い試験体について検討を行う必要がある。

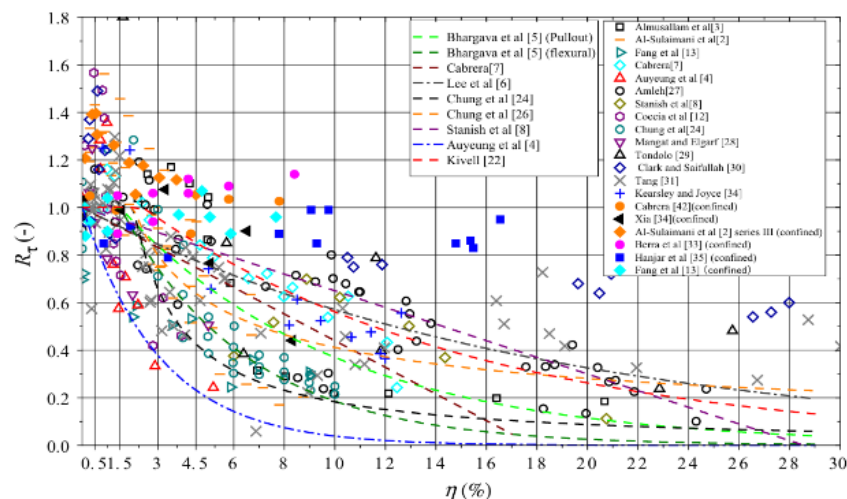


図 1.1.1 付着強度比—鉄筋質量減少率関係^[1]

1.2 研究目的

本研究では、鉄筋腐食ひび割れ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単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を実施する。

第 2 章では、付着区間が鉄筋径の数倍程度の付着長の短い試験体において、単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を行う。実験より得られる付着応力-すべり量関係から、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う。また、実験より得られる付着応力-すべり量関係の繰返し履歴について、履歴モデルの構築を行い、実験結果との比較検討を行う。

第 3 章では、付着区間が鉄筋径の数十倍程度の付着長の長い試験体において、単調鉄筋引抜き試験を行う。第 2 章と同様に、実験より得られた平均付着応力-すべり量関係から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う。また、試験体と同一条件での付着解析を行い、実験結果との比較検討を行う。

1.3 破砕剤充填パイプによる腐食模擬

腐食ひび割れを模擬する手法として破砕剤充填パイプを使用する。既往の研究^[4]において提案された同手法は、試験体に埋設されたアルミパイプに、コンクリートの解体等で使用される静的破砕剤を充填することで腐食ひび割れを模擬する方法である。静的破砕剤の化学反応による内部圧によってアルミパイプ周囲からコンクリートにひび割れを発生させ、静的破砕剤充填後の時間経過によりひび割れ幅を制御する。

既往の研究^[3]では、同手法を用いて腐食ひび割れを模擬し、試験体表面に発生した加力前ひび割れ幅を変動因子として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（図 1.3.1）することが報告されており、破砕剤充填パイプにより付着劣化を模擬できることが確認されている。

本研究においても破砕剤充填パイプにより腐食ひび割れを模擬し、試験体表面の加力前ひび割れ幅を実験の変動因子として設定し、試験体の単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を実施する。

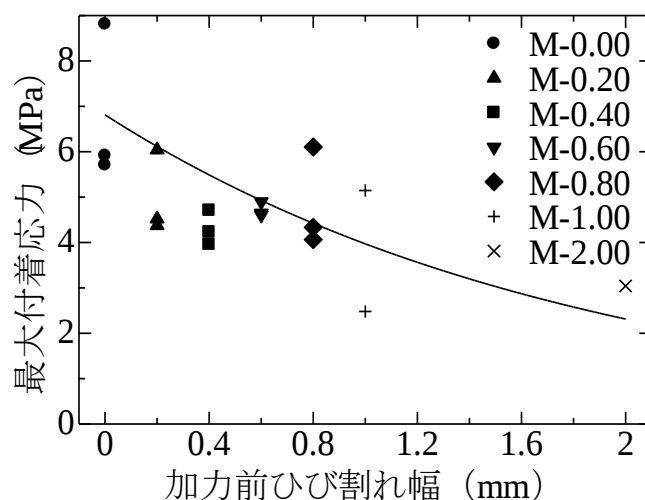


図 1.3.1 最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係^[3]

第2章 付着長の短い試験体による局所付着性状

2.1 はじめに

既往の研究^[3]では、破砕剤充填パイプ導入ひび割れにより付着劣化を模擬した試験体の単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験が実施され、加力前ひび割れ幅の増加に伴い最大付着応力が低下する傾向が確認された。本研究では、単調鉄筋引抜き試験に加えて、既往の研究^[3]と異なる 2 種類の繰返し履歴での繰返し鉄筋引抜き試験を実施する。

本章では、付着区間が鉄筋径の 4 倍の付着長の短い試験体を対象とする。付着長を短くすることで試験体内部の付着応力分布を一定とみなして評価できる。実験より得られる付着応力-すべり量関係から、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う。また、実験より得られる付着応力-すべり量関係の繰返し履歴について、履歴モデルの構築を行い実験結果との比較検討を行う。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体

試験体形状を図 2.2.1 に、試験体一覧を表 2.2.1 に示す。試験体の断面は 170mm×220mm の長方形とし、断面中央に異形鉄筋 D16 (SD345) を配した。試験体軸方向の長さは 112mm とし、鉄筋両端部に付着絶縁区間を 24mm ずつ設け、付着区間は鉄筋径の 4 倍の 64mm とした。鉄筋中央から 50mm 位置に外径 22mm、厚さ 1mm のアルミパイプを 2 本埋設し、腐食ひび割れを模擬する試験体においては、静的破砕剤を充填することで加力前にひび割れを発生させた。試験体は単調加力試験体が 6 体、後述する 2 種類の加力履歴（繰返し C1 履歴、繰返し C2 履歴）による繰返し加力試験体が 36 体の計 42 体である。コンクリートの目標強度は 18MPa で、加力方法ごとに健全試験体および 5 種類の加力前ひび割れ幅（0.20、0.40、0.60、0.80、1.00mm）を変動因子として単調、繰返し鉄筋引抜き試験を行った。

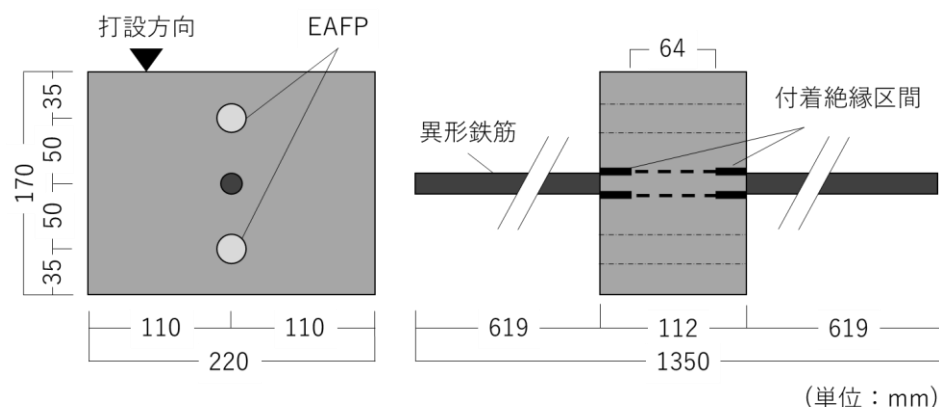


図 2.2.1 試験体形状

表 2.2.1 試験体一覧

試験体名	加力前ひび割れ幅 x.xx (mm)	試験体数	試験体名称
M-x.xx	0.00～1.00	6	M：単調加力
C1-x.xx	0.00～1.00	18	C1、C2：繰返し加力
C2-x.xx	0.00～1.00	18	x.xx：加力前ひび割れ幅 (0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00mm)

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表を表 2.2.2 に示す。

表 2.2.2 コンクリートの配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	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、φ100mm×200mm の円柱供試体を用い、材齢 39 日、66 日、101 日、127 日に計 4 回の材料試験を行った。加力には 500kN 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実施した。コンクリートの材料試験結果を表 2.2.3 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 2.2.4 に示す。検討用コンクリート強度は、計 4 回の材料試験結果の平均値とした。

表 2.2.3 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)
39 日	1	19.4	18.4	1.91
	2	18.9	18.0	2.00
	3	18.0	17.6	2.06
	平均	18.8	18.0	1.99
66 日	4	19.4	16.0	2.22
	5	20.2	18.5	2.21
	6	20.0	17.6	2.35
	平均	19.9	17.4	2.26
101 日	7	20.2	17.6	2.03
	8	20.3	17.3	1.98
	9	20.3	19.0	2.08
	平均	20.3	18.0	2.03
127 日	10	20.1	21.1	2.36
	11	18.9	17.4	2.20
	12	18.7	16.0	2.17
	平均	19.2	18.2	2.24

表 2.2.4 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性強度 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	19.7	17.9	2.13

(2) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (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。鉄筋の材料試験結果を表 2.2.5 に示す。

表 2.2.5 鉄筋の引張試験結果

番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
1	422	197	577
2	390	191	561
3	397	186	524
平均	403	191	554

2.2.3 加力・計測方法

加力前ひび割れ計測位置を図 2.2.2 に示す。破碎剤充填後に発生した試験体表面の加力前ひび割れ幅は、クラックスケールにより計測した。加力前ひび割れ幅は試験体軸方向の中央位置と両端から 10mm 位置の計 3 か所において、打設面および打設底面それぞれ計測を行い、各面の平均値を計測値とした。打設面、打設底面のいずれかの計測値が目標値に達した段階で加力を開始した。

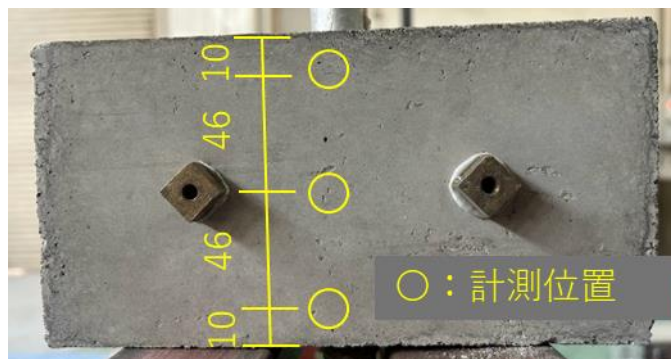


図 2.2.2 加力前ひび割れ幅計測位置

加力装置を図 2.2.3 に、加力履歴を図 2.2.4 に示す。試験体両端面にテフロンシートを介して 112mm 径の孔を設けた反力板を設置し、試験体を両側から挟み込むようにセンターホールジャッキを設置した。両側のセンターホールジャッキを個々に制御することで、正負交番の繰返し加力を行った。単調加力の場合は、加力方向正側に設置したセンターホールジャッキのみを用いて加力を行った。

計測項目はロードセルによる引抜き荷重、変位計による試験体側面と鉄筋端部間の相対変位およびπ型変位計による試験体表面のひび割れ幅である。加力方向と反対側に設置した変位計による相対変位を自由端すべり量とし、自由端すべり量に次式 ΔL により算出される試験体付着区間の鉄筋の伸び（付着応力は一様に分布していると仮定）を加算した変形を荷重端すべり量とした。

$$\Delta L = PL/2EA \quad (2-1)$$

ここで、

P ：引抜き荷重 (kN)

L ：付着長 (mm)

E ：鉄筋の弾性係数 (GPa)

A ：鉄筋の公称断面積 (mm^2)

繰返し加力の加力履歴は荷重端すべり量により制御し、加力方向正側で加力と除荷をした後に、加力方向負側で同様の加力と除荷を繰返す正負交番の履歴とした。加力履歴 C1 は荷重端すべり量 0.2mm で加力方向正負各 30 回繰返す正負交番繰返し履歴、加力履歴 C2 は荷重端すべり量 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、2.0、4.0mm で加力方向正負各 3 回ずつ繰返す正負交番漸増繰返し履歴である。

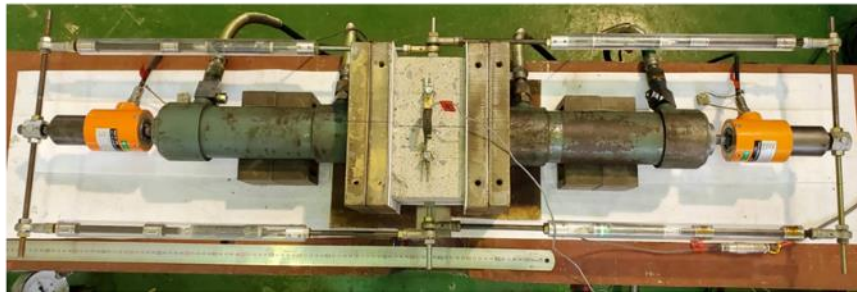
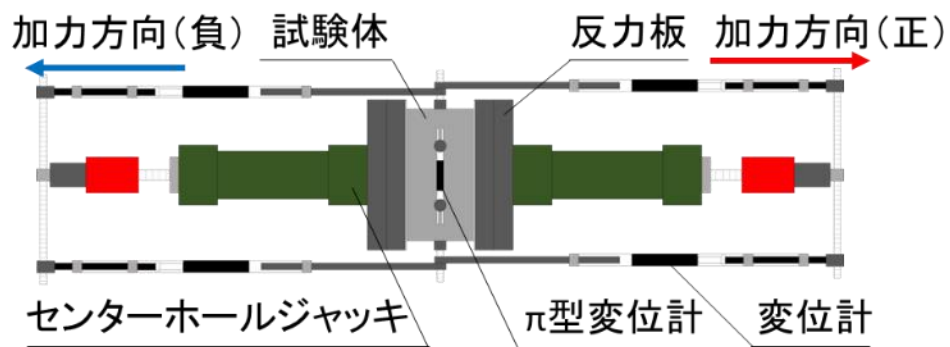


図 2.2.3 加力装置

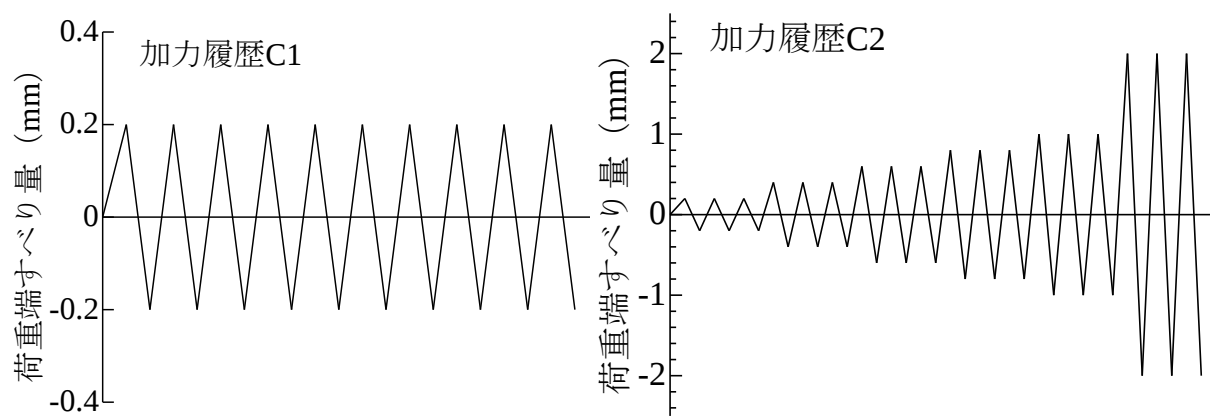


図 2.2.4 加力履歴

2.3 実験結果

2.3.1 試験体ひび割れ発生状況

破砕剤充填後の時間経過によるひび割れ拡幅状況を図 2.3.1 に、各試験体の加力前ひび割れ状況を図 2.3.2 に示す。また、静的破砕時充填後の経過時間を表 2.3.1 および表 2.3.2 に示す。アルミパイプに破砕剤を充填後、アルミパイプ周囲から鉄筋方向および試験体表面方向の 2 方向にひび割れが発生するサイドスプリット型のひび割れが発生した。その後、時間経過によりひび割れが進行することで、試験体打設上面および底面軸方向それぞれに 1 本の加力前ひび割れが確認された。破砕剤充填パイプにより C2-1.00-2 試験体において 117 時間 30 分で最大 1.20mm のひび割れが発生した。

引抜き加力前後のひび割れ状況を図 2.3.3 に示す。加力前に導入したひび割れが引抜き加力によって拡大し、数体の試験体において新たに軸方向ひび割れが発生する様子が確認された。加力過程においてこれらのひび割れが拡幅して最終的な破壊に至った。

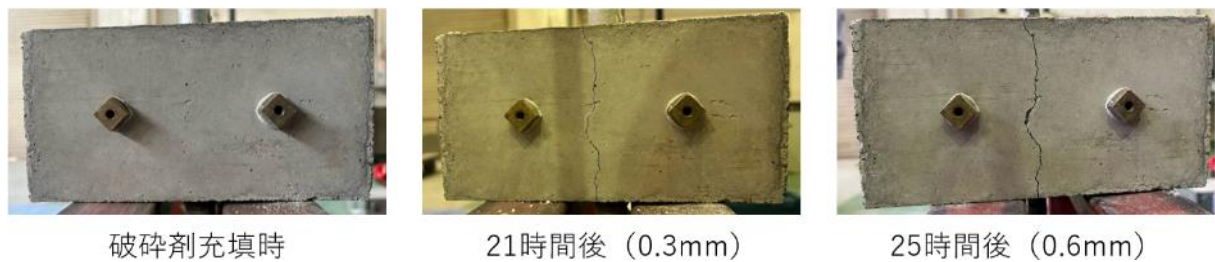


図 2.3.1 ひび割れ拡幅状況

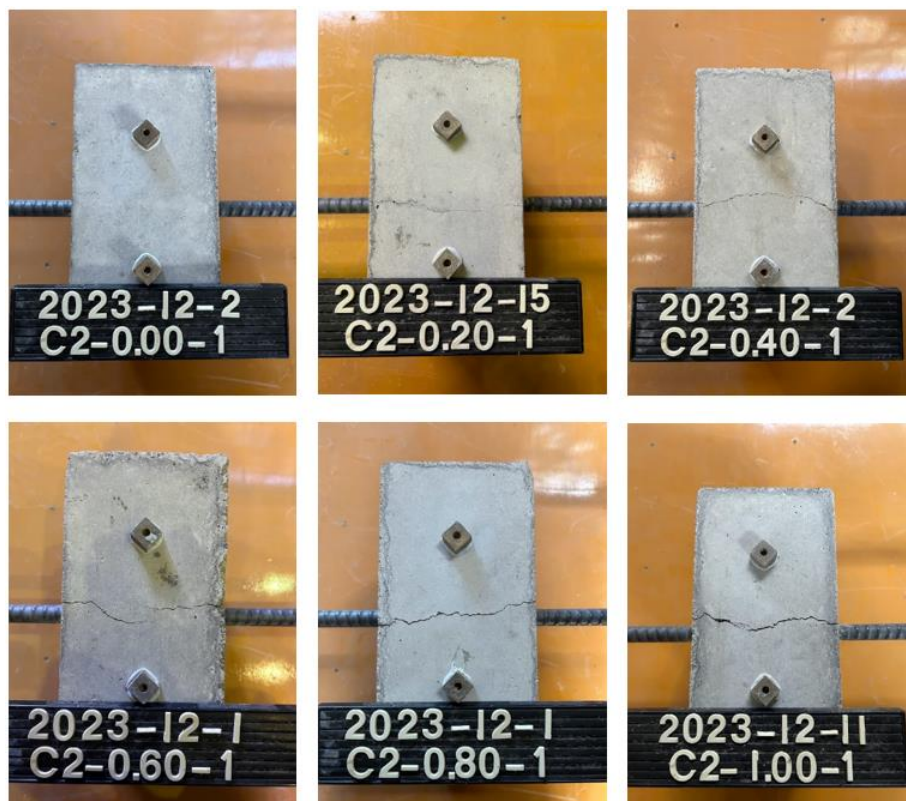


図 2.3.2 加力前ひび割れ状況

表 2.3.1 経過時間 (M、C1 試験体)

試験体名称	経過時間	加力前ひび割れ幅 (mm)		
		打設上面平均値	打設底面平均値	最大値
M-0.00-1	—	—	—	—
M-0.20-1	21 時間 25 分	0.00	0.20	0.20
M-0.40-1	48 時間 15 分	0.15	0.40	0.45
M-0.60-1	25 時間 10 分	0.28	0.60	0.65
M-0.80-1	54 時間	0.43	0.80	0.85
M-1.00-1	28 時間 15 分	0.05	1.00	1.00
C1-0.00-1	—	—	—	—
C1-0.00-2	—	—	—	—
C1-0.00-3	—	—	—	—
C1-0.20-1	44 時間 30 分	0.20	0.20	0.25
C1-0.20-2	45 時間	0.05	0.20	0.25
C1-0.20-3	52 時間 30 分	0.00	0.20	0.25
C1-0.40-1	44 時間 30 分	0.20	0.40	0.45
C1-0.40-2	97 時間 10 分	0.23	0.40	0.55
C1-0.40-3	48 時間	0.32	0.40	0.45
C1-0.60-1	69 時間 15 分	0.22	0.60	0.70
C1-0.60-2	71 時間 15 分	0.00	0.60	0.65
C1-0.60-3	45 時間 15 分	0.33	0.60	0.65
C1-0.80-1	88 時間 20 分	0.35	0.80	0.85
C1-0.80-2	118 時間 30 分	0.62	0.80	0.80
C1-0.80-3	52 時間 35 分	0.73	0.80	0.95
C1-1.00-1	67 時間	0.23	1.00	1.10
C1-1.00-2	56 時間 30 分	0.00	1.00	1.10
C1-1.00-3	98 時間	0.50	1.00	1.10

表 2.3.2 経過時間 (C2 試験体)

試験体名称	経過時間	加力前ひび割れ幅 (mm)		
		打設上面平均値	打設底面平均値	最大値
C2-0.00-1	—	—	—	—
C2-0.00-2	—	—	—	—
C2-0.00-3	—	—	—	—
C2-0.20-1	48 時間 20 分	0.07	0.20	0.25
C2-0.20-2	68 時間 30 分	0.00	0.20	0.20
C2-0.20-3	57 時間	0.00	0.20	0.25
C2-0.40-1	106 時間 45 分	0.22	0.40	0.45
C2-0.40-2	50 時間 45 分	0.17	0.40	0.45
C2-0.40-3	49 時間	0.35	0.40	0.50
C2-0.60-1	69 時間 40 分	0.28	0.60	0.70
C2-0.60-2	74 時間	0.43	0.60	0.75
C2-0.60-3	77 時間	0.06	0.60	0.70
C2-0.80-1	66 時間 30 分	0.16	0.80	0.90
C2-0.80-2	90 時間 15 分	0.32	0.80	0.80
C2-0.80-3	49 時間 15 分	0.57	0.80	0.80
C2-1.00-1	89 時間 10 分	0.33	1.00	1.00
C2-1.00-2	117 時間 30 分	0.63	1.00	1.20
C2-1.00-3	48 時間	0.00	1.00	1.10

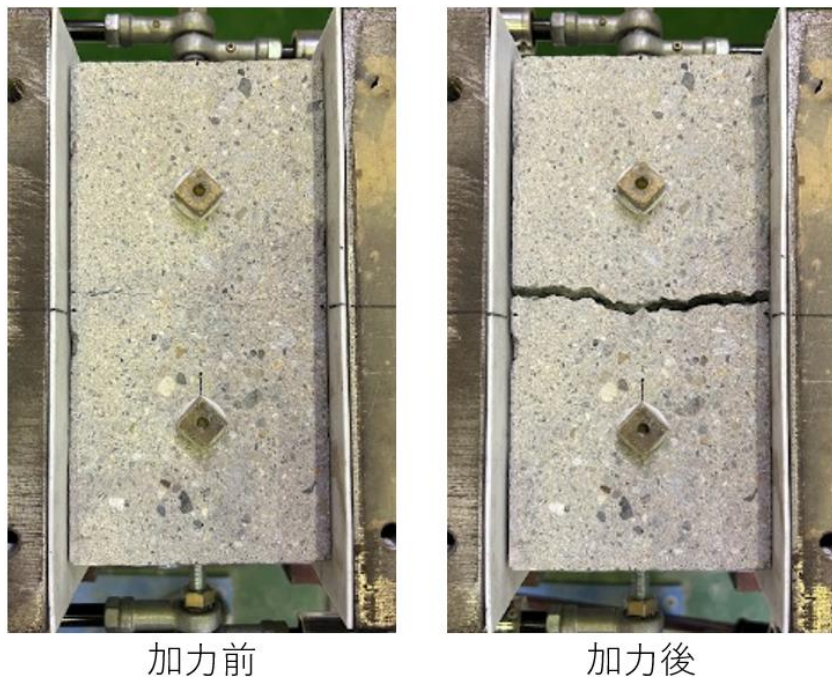


図 2.3.3 引抜き加力前後のひび割れ状況

2.3.2 単調加力試験結果

(1) 付着応力－荷重端すべり量関係

単調引抜き試験によって得られた付着応力－荷重端すべり量関係を図 2.3.4 に、各試験結果の比較を図 2.3.5 に示す。同図中に、最大付着応力点を示す。付着応力は、引抜き荷重を鉄筋付着区間の表面積で除することによって求めた。加力前ひび割れのない健全試験体において、ひび割れの発生とともに荷重が最大に達し、以降荷重が急激に低下した。加力前にひび割れを導入した試験体では、加力前ひび割れが拡幅しながら荷重が増加し、最大付着応力点以降は荷重が緩やかに低下する様子が確認された。

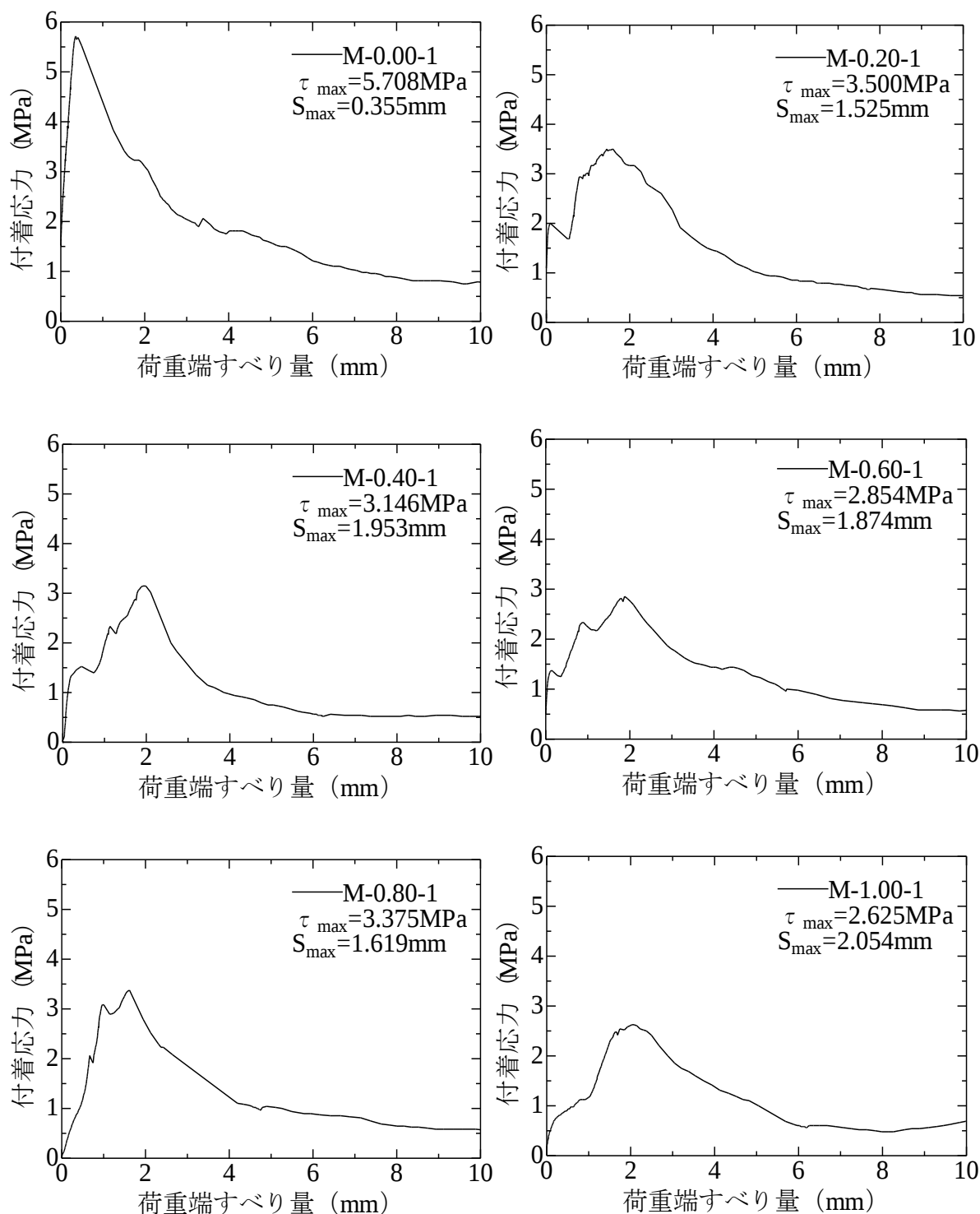


図 2.3.4 付着応力－荷重端すべり量関係（単調加力）

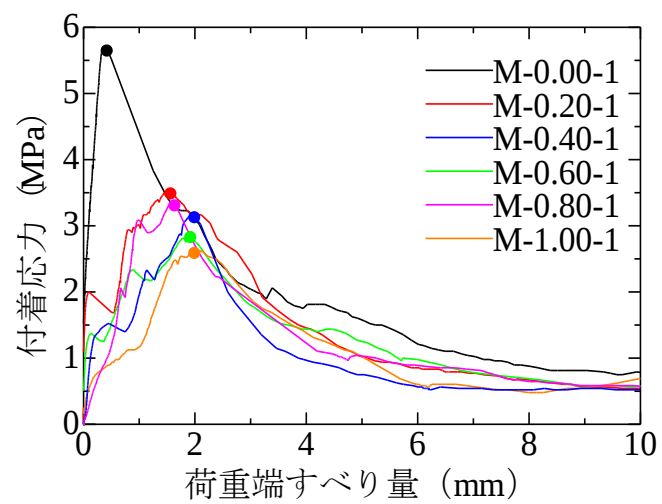


図 2.3.5 付着応力－荷重端すべり量関係の比較（単調加力）

(2) 最大付着応力

最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係を図 2.3.6 に、最大付着応力の一覧を表 2.3.3 に示す。加力前にひび割れを導入することで、健全試験体と比較して最大付着応力は大きく低下し、加力前ひび割れ幅が増加するほど最大付着応力は減少する傾向が見られた。

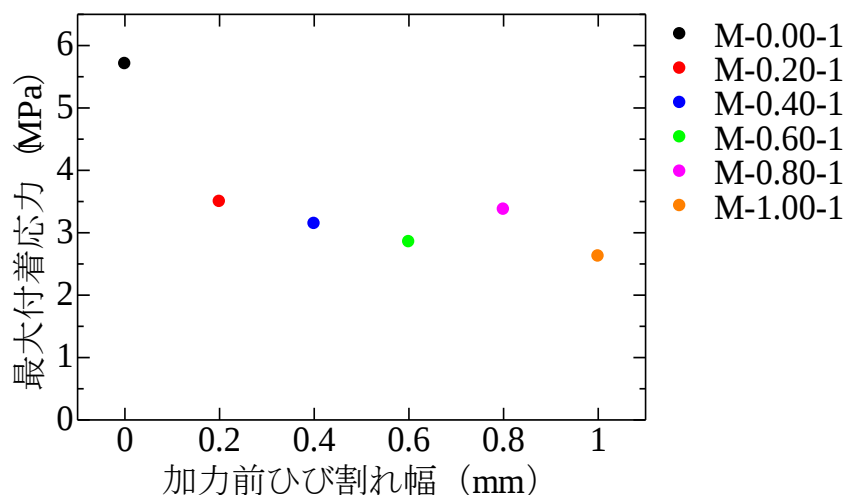


図 2.3.6 最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係（単調加力）

表 2.3.3 最大付着応力の一覧（単調加力）

試験体名称	最大付着応力 (MPa)	最大付着応力時の 荷重端すべり量 (mm)
M-0.00-1	5.708	0.355
M-0.20-1	3.500	1.525
M-0.40-1	3.146	1.953
M-0.60-1	2.854	1.874
M-0.80-1	3.375	1.619
M-1.00-1	2.625	2.054

2.3.3 繰返し C1 加力試験結果

(1) 付着応力－荷重端すべり量関係

繰返し履歴 C1 の引抜き試験によって得られた付着応力－荷重端すべり量関係を図 2.3.7～図 2.3.9 に示す。健全試験体において、1 サイクル目の正側、もしくは負側の加力中にひび割れが発生した。ひび割れ発生時に目標とする荷重端すべり量 $\pm 0.2\text{mm}$ を大きく超えるすべりが起きたため、その後除荷を行った。全ての試験体において、同一の荷重端すべり量で加力と除荷を繰返すことで付着応力が徐々に低下した。

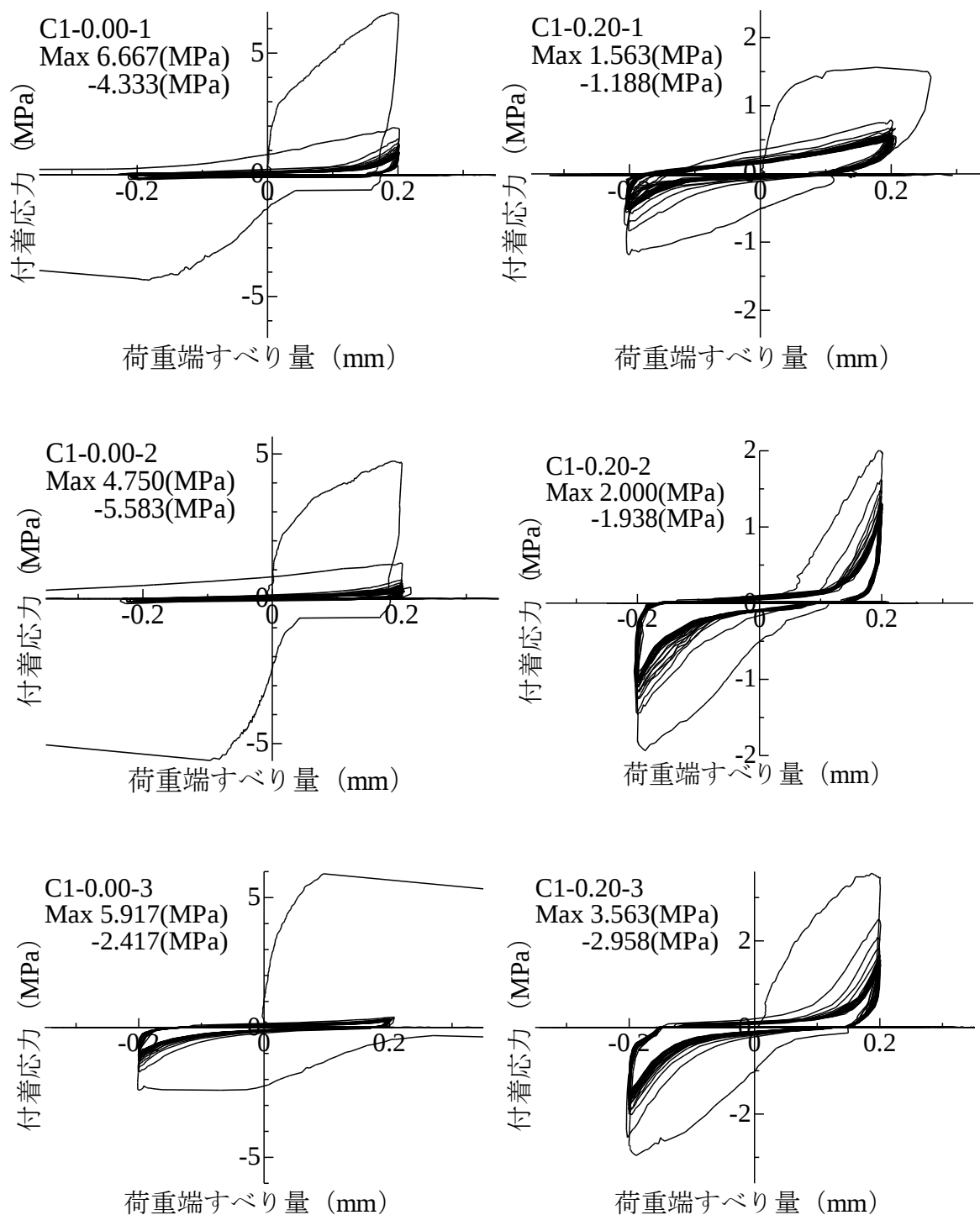


図 2.3.7 付着応力－荷重端すべり量関係 (C1-0.00、C1-0.20)

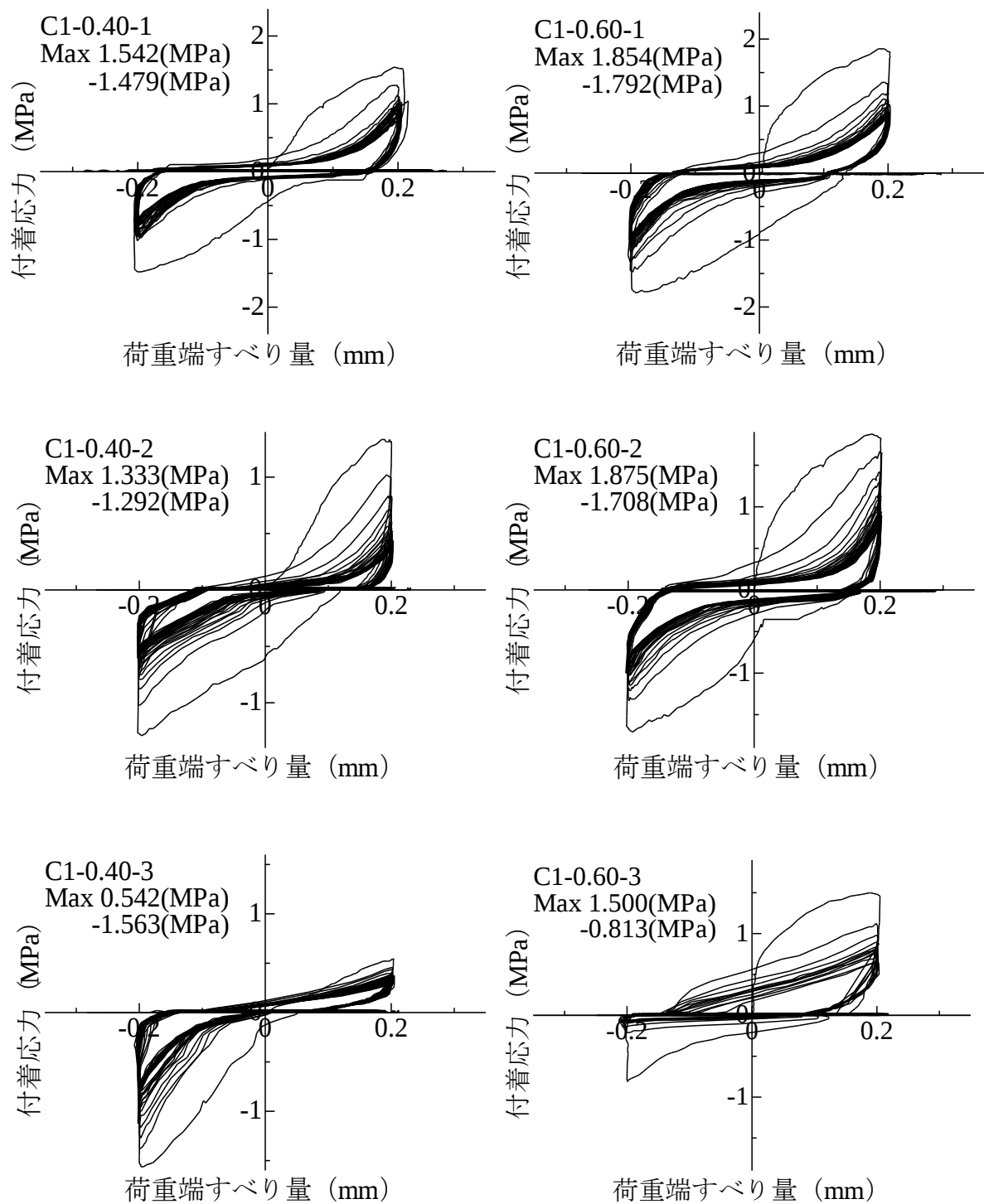


図 2.3.8 付着応力－荷重端すべり量関係 (C1-0.40、C1-0.60)

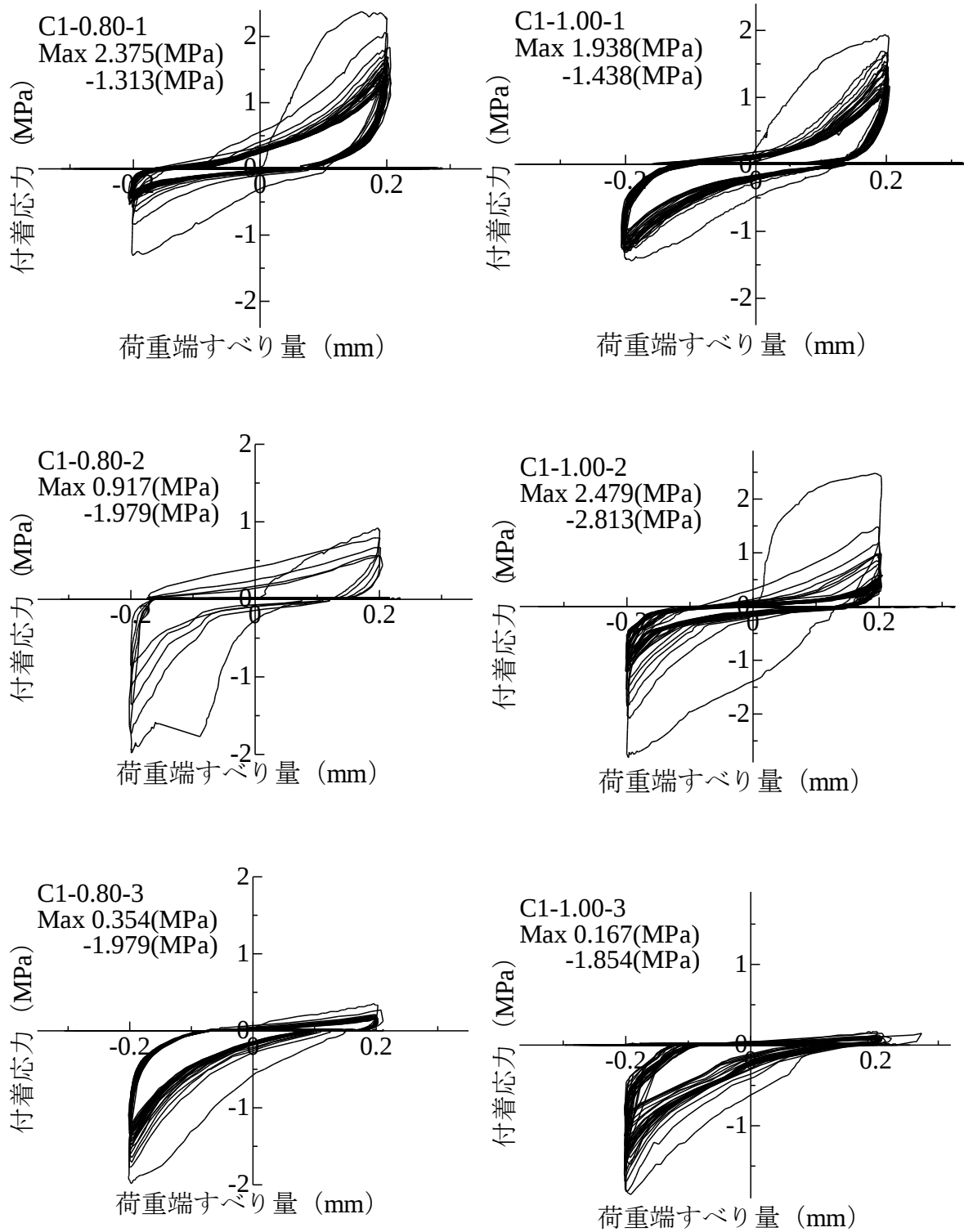


図 2.3.9 付着応力－荷重端すべり量関係 (C1-0.80、C1-1.00)

(2) 最大付着応力

最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係を図 2.3.10 に、最大付着応力の一覧を表 2.3.4 に示す。全ての健全試験体でひび割れが発生した。単調加力試験体と同様に、加力前ひび割れ幅が増加するほど最大付着応力は減少し、単調加力、繰返し加力正側、繰返し加力負側の順に最大付着力は大きくなった。繰返し加力正側よりも負側の最大付着応力が小さくなった要因として、1 サイクル目の正側の加力で鉄筋周囲のひび割れが拡幅してコンクリートの拘束力が低下したためであると考えられる。

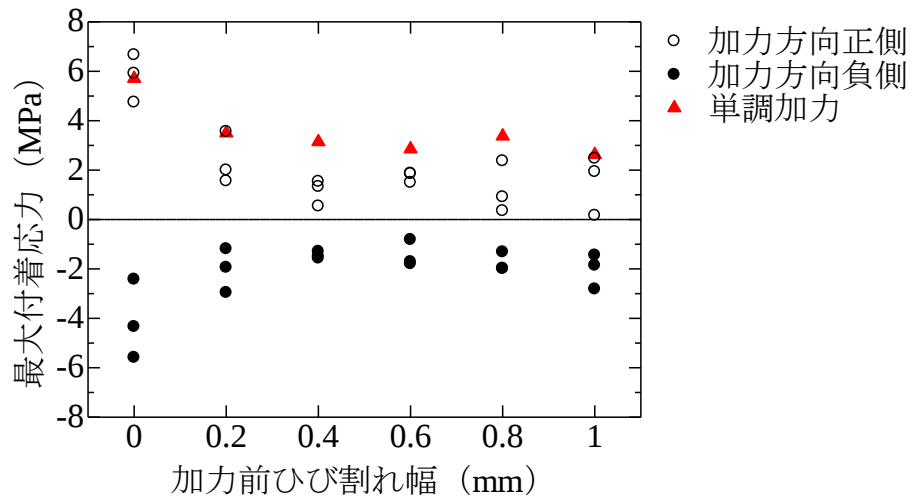


図 2.3.10 最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係（繰返し C1 加力）

表 2.3.4 最大付着応力の一覧（繰返し C1 加力）

試験体名称	最大付着応力 (MPa)		備考
	加力方向正側	加力方向負側	
C1-0.00-1	6.667	-4.333	ひび割れ発生
C1-0.00-2	4.750	-5.583	ひび割れ発生
C1-0.00-3	5.917	-2.417	ひび割れ発生
C1-0.00 平均	5.778	-4.111	
C1-0.20-1	1.563	-1.188	
C1-0.20-2	2.000	-1.938	
C1-0.20-3	3.563	-2.958	
C1-0.20 平均	2.375	-2.028	
C1-0.40-1	1.542	-1.479	
C1-0.40-2	1.333	-1.292	
C1-0.40-3	0.542	-1.563	
C1-0.40 平均	1.139	-1.445	
C1-0.60-1	1.854	-1.792	
C1-0.60-2	1.875	-1.708	
C1-0.60-3	1.500	-0.813	
C1-0.60 平均	1.743	-1.438	
C1-0.80-1	2.375	-1.313	
C1-0.80-2	0.917	-1.979	
C1-0.80-3	0.354	-1.979	
C1-0.80 平均	1.215	-1.757	
C1-1.00-1	1.938	-1.438	
C1-1.00-2	2.479	-2.813	
C1-1.00-3	0.167	-1.854	
C1-1.00 平均	1.528	-2.035	

(3) 各サイクルピーク時付着応力

繰返し C1 履歴の付着応力-荷重端すべり量関係において、図 2.3.11 の例に示すようにサイクル数の増加に伴い、各サイクルのピーク時の付着応力が低下した。各サイクルピーク時付着応力の推移を図 2.3.12 に示す。実線で加力方向正側、破線で加力方向負側のピーク時付着応力を示す。ピーク時付着応力は同一加力前ひび割れ幅の試験体の結果を平均し、1 サイクル目のピーク時付着応力で基準化した値である。

健全試験体では、1 サイクル目の加力の際に発生したひび割れの影響により 2 サイクル目以降のピーク時付着応力が急激に低下した。一方、加力前ひび割れを導入した試験体のピーク時付着応力は、加力前ひび割れ幅、加力方向正側負側の違いによる差はなく、30 サイクルの加力で 1 サイクル目の 4 割程度まで低下した。

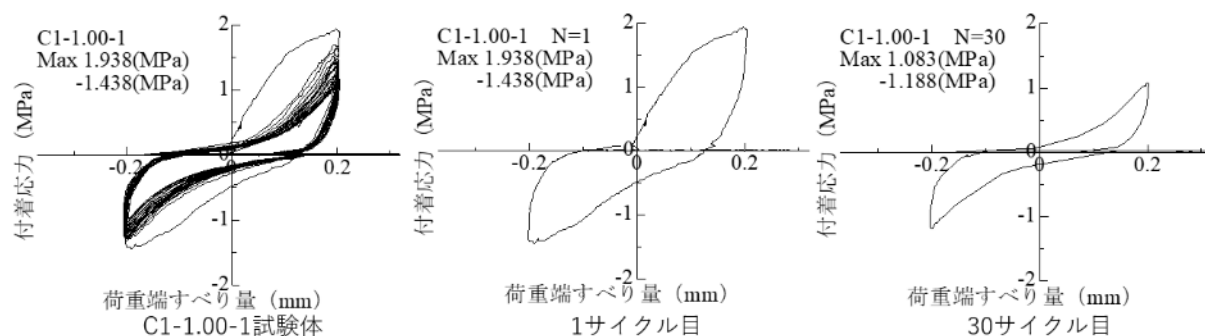


図 2.3.11 ピーク時付着応力の低下の例（繰返し C1 加力）

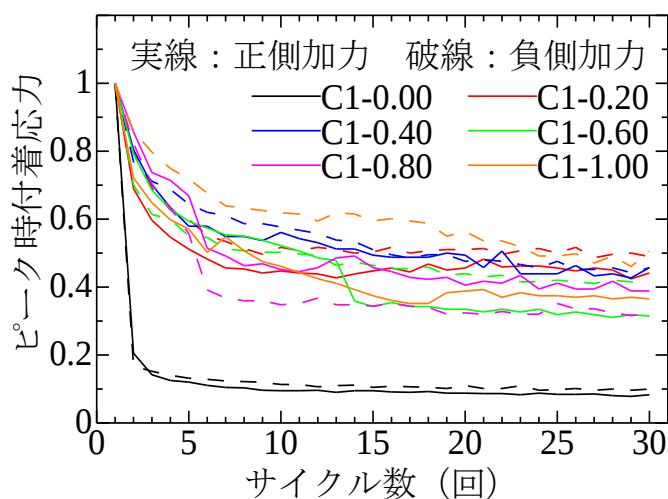


図 2.3.12 各サイクルピーク時付着応力の推移（繰返し C1 加力）

2.3.4 繰返し C2 加力試験結果

(1) 付着応力－荷重端すべり量関係

繰返し履歴 C2 の引抜き試験によって得られた付着応力－荷重端すべり量関係を図 2.3.13～図 2.3.15 に示す。繰返し C1 加力試験体と同様に、健全試験体において、1 サイクル目の正側、もしくは負側の加力中にひび割れが発生した。ひび割れ発生時に目標とする荷重端すべり量 $\pm 0.2\text{mm}$ を大きく超えるすべりが起きたため、その後除荷を行った。

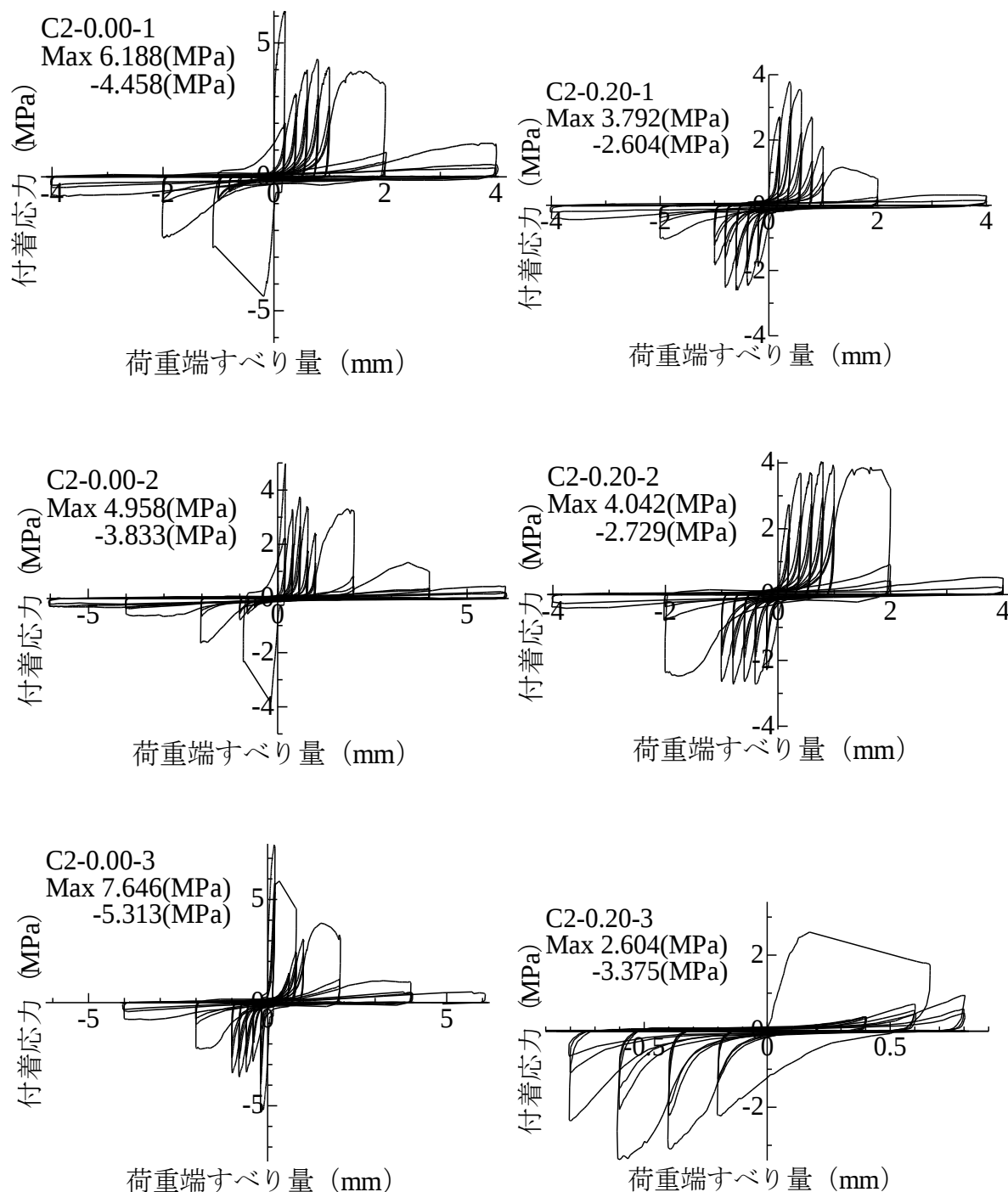


図 2.3.13 付着応力－荷重端すべり量関係 (C2-0.00、C2-0.20)

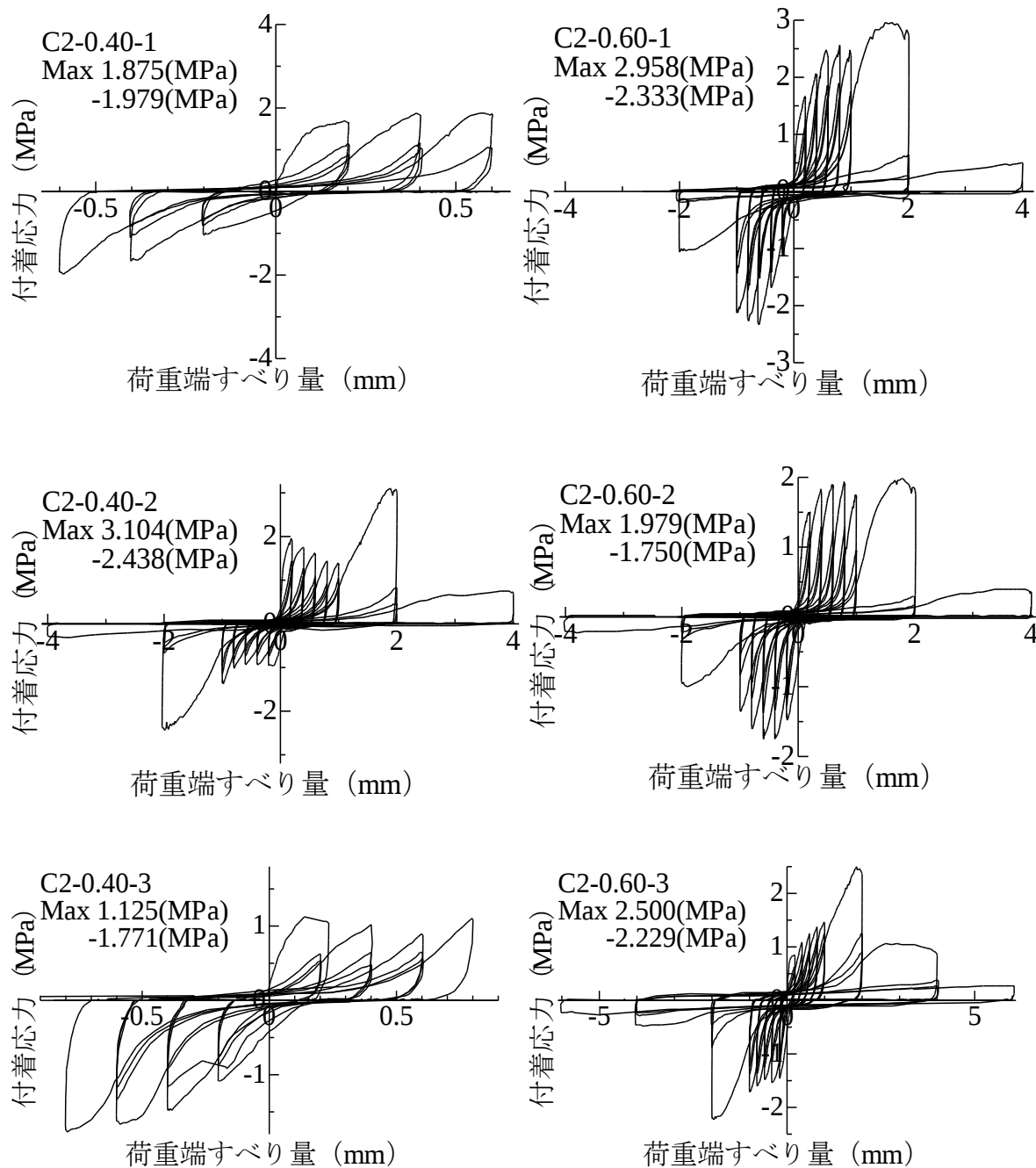


図 2.3.14 付着応力ー荷重端すべり量関係 (C2-0.40、C2-0.60)

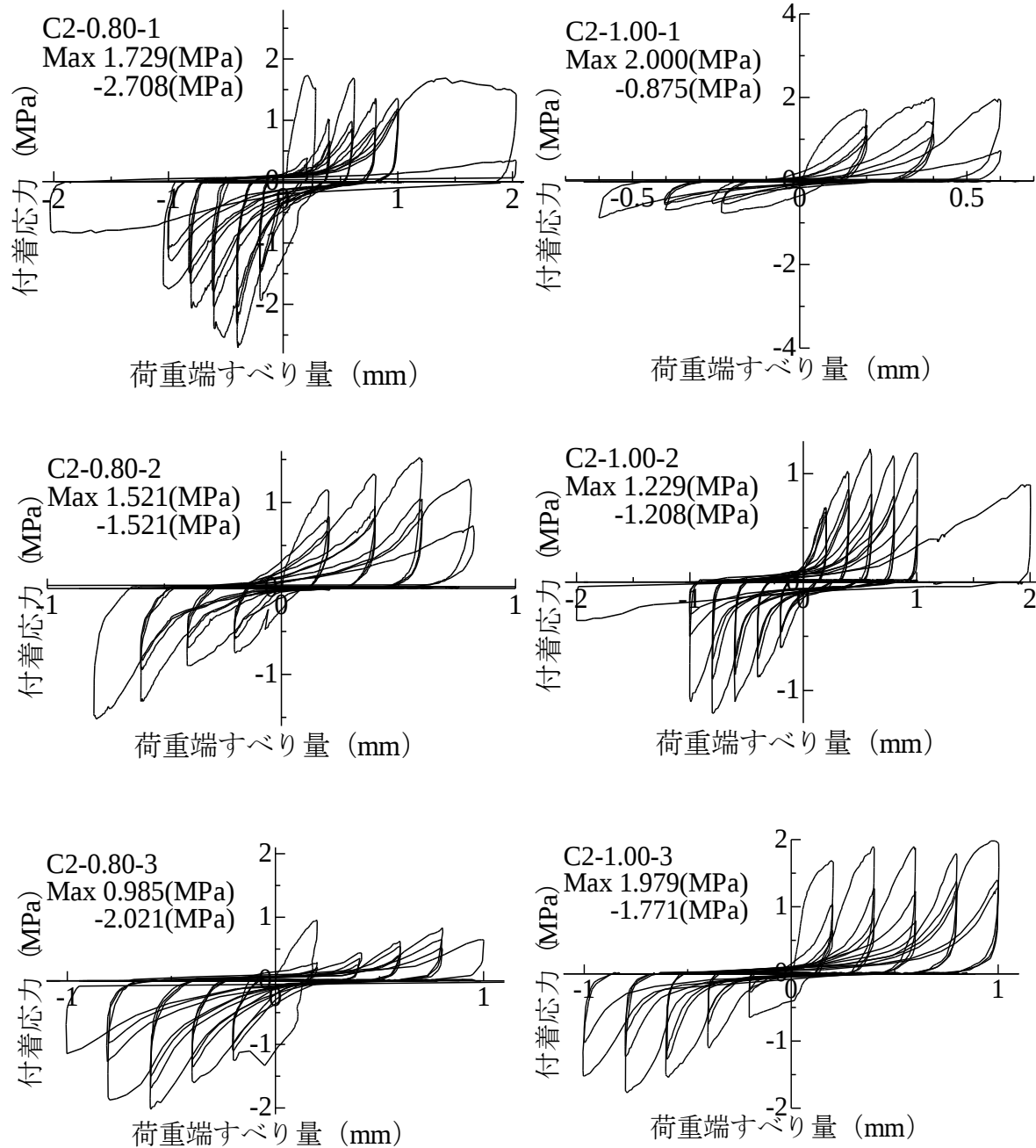


図 2.3.15 付着応力－荷重端すべり量関係 (C2-0.80、C2-1.00)

(2) 最大付着応力

最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係を図 2.3.16 に、最大付着応力の一覧を表 2.3.5 に示す。全ての健全試験体でひび割れが発生した。単調加力試験体、繰返し C1 加力試験体と同様に、加力前ひび割れ幅が増加するほど最大付着応力は減少し、単調加力、繰返し加力正側、繰返し加力負側の順に最大付着応力は大きくなった。

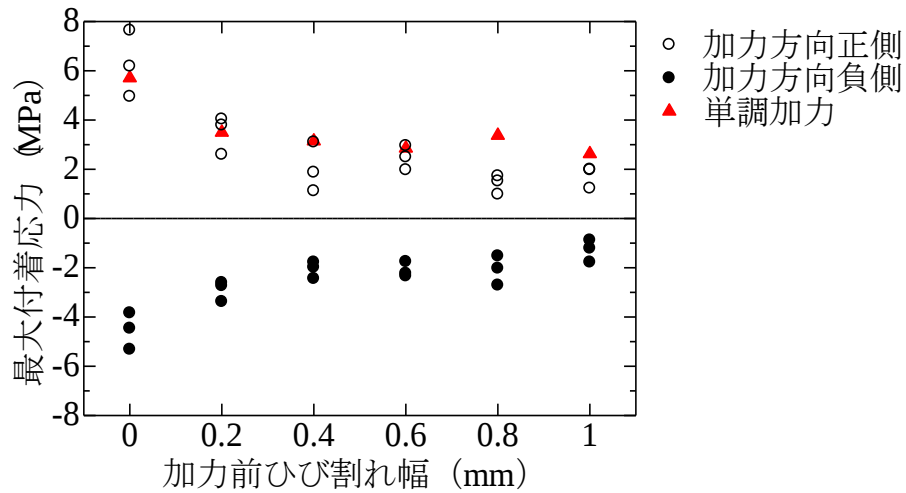


図 2.3.16 最大付着応力ー加力前ひび割れ幅関係（繰返し C2 加力）

表 2.3.5 最大付着応力の一覧（繰返し C2 加力）

試験体名称	最大付着応力 (MPa)		備考
	加力方向正側	加力方向負側	
C2-0.00-1	6.188	-4.458	ひび割れ発生
C2-0.00-2	4.958	-3.833	ひび割れ発生
C2-0.00-3	7.646	-5.313	ひび割れ発生
C2-0.00 平均	6.264	-4.535	
C2-0.20-1	3.792	-2.604	
C2-0.20-2	4.042	-2.729	
C2-0.20-3	2.604	-3.375	
C2-0.20 平均	3.479	-2.903	
C2-0.40-1	1.875	-1.979	
C2-0.40-2	3.104	-2.438	
C2-0.40-3	1.125	-1.771	
C2-0.40 平均	2.035	-2.063	
C2-0.60-1	2.958	-2.333	
C2-0.60-2	1.979	-1.750	
C2-0.60-3	2.500	-2.229	
C2-0.60 平均	2.479	-2.104	
C2-0.80-1	1.729	-2.708	
C2-0.80-2	1.521	-1.521	
C2-0.80-3	0.985	-2.021	
C2-0.80 平均	1.412	-2.083	
C2-1.00-1	2.000	-0.875	
C2-1.00-2	1.229	-1.208	
C2-1.00-3	1.979	-1.771	
C2-1.00 平均	1.736	-1.285	

(3) 各サイクルピーク時付着応力

繰返し C2 加力試験体において、図 2.3.17 の例に示すように除荷時のすべり量の違いにより 2 サイクル目、3 サイクル目のピーク時付着応力の低下の程度に違いが見られた。除荷時のすべり量の増加に伴う、サイクルごとのピーク時付着応力の低下の比較の一例として、C2-0.20-1 試験体における比較を図 2.3.18 に示す。図 2.3.17 に示すそれぞれ 1 サイクル目のピーク時付着応力を 1 として基準化し、図 2.3.18 において、実線が加力方向正側、破線が加力方向負側のピーク時付着応力を示す。除荷時のすべり量が増加するほどピーク時付着応力は大きく低下する傾向が見られ、すべり量 0.2mm では 8 割程度の低下であったのに対して、すべり量 2mm では 1 割程度まで低下した。

各除荷時のすべり量において、3 サイクル目のピーク時付着応力の低下率を加力前ひび割れ幅ごとに比較した結果を図 2.3.19 に示す。同一加力前ひび割れ幅の試験体の結果を平均した値であり、加力前ひび割れ幅 0.80mm、1.00mm の試験体は加力中に試験体が破壊したため、荷重端すべり量 2mm の値を除外している。加力前にひび割れを導入した試験体は、ひび割れ幅の違いによらず、すべり量 0.2mm では 6 割程度の低下、すべり量 2mm では 2 割程度まで低下した。すべり量が増加するほど、1 サイクル目の加力で鉄筋周囲のコンクリートが大きく損傷するためであると考えられる。

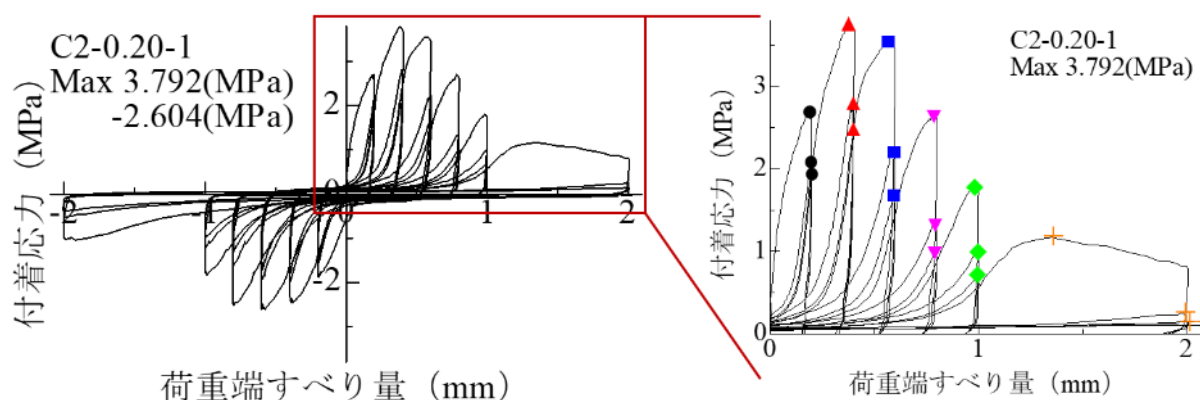


図 2.3.17 ピーク時付着応力の低下の例（繰返し C2 加力）

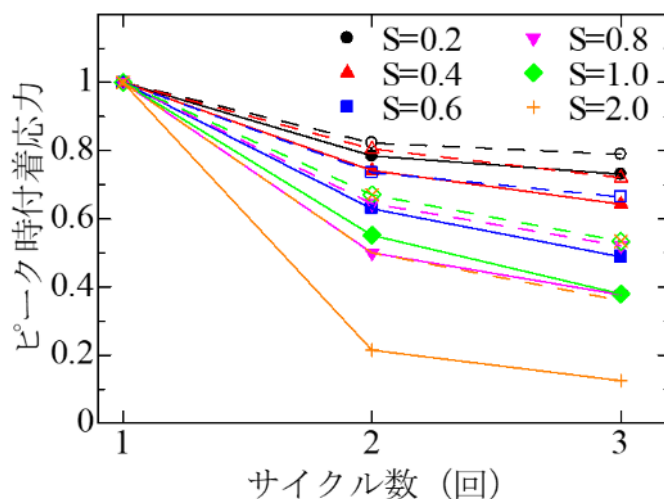


図 2.3.18 各サイクルピーク時付着応力の推移（繰返し C2 加力）

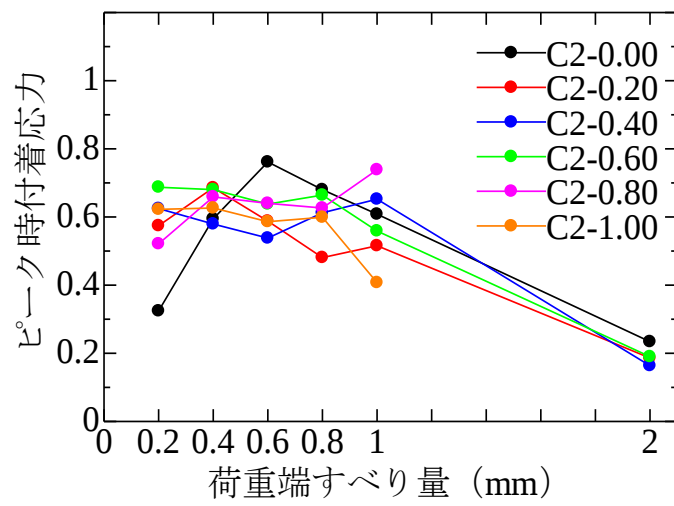


図 2.3.19 各加力前ひび割れ幅ピーク時付着応力の推移

2.4 繰返し履歴モデル

2.4.1 包絡線モデル

単調、繰返し鉄筋引抜き試験の結果より、付着応力－荷重端すべり量関係の繰返し履歴モデルを構築する。

包絡線モデルは単調加力試験結果の付着応力－荷重端すべり量関係を用い、図 2.4.1 に示す 3 種類の特性値により決定される 3 直線のトリリニアモデルとする。いずれの加力前ひび割れ幅の試験体においても荷重端すべり量 0.2mm までには剛性の低下がみられるため、 τ_1 は同 0.2mm 時における付着応力とした。 τ_{max} は最大付着応力、 S_{max} は最大付着応力時の荷重端すべり量である。最大付着応力以降は、単調加力試験体における軟化域を大略に捉え、荷重端すべり量 6mm で付着応力が 0MPa になるように軟化直線を決定した。各特性値は加力前ひび割れ幅ごとに決定し、それぞれ健全試験体における実験値を 1 として基準化し、回帰計算した値を使用した。特性値の一覧を表 2.4.1 に、各特性値の実験値と回帰計算値の比較を図 2.4.2 に示す。包絡線モデル形状を図 2.4.3 に、各加力前ひび割れ幅における包絡線モデルと実験結果の比較を図 2.4.4 に示す。全ての試験体において、包絡線モデルは実験結果と適合している。

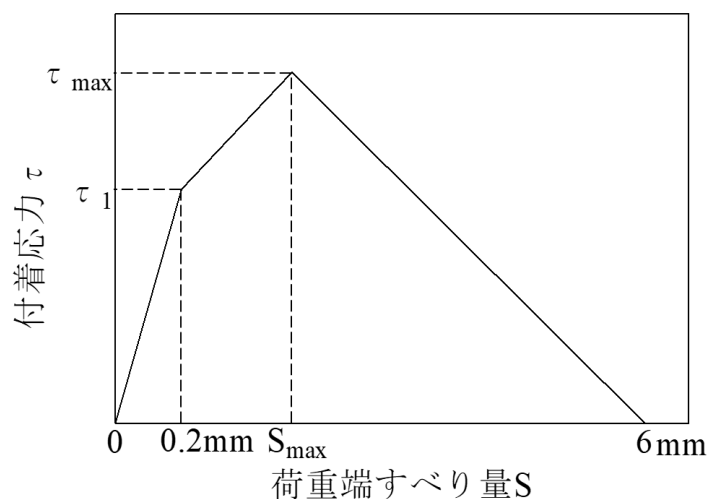


図 2.4.1 トリリニアモデル

表 2.4.1 特性値一覧

加力前 ひび割れ幅 W_{cr} (mm)	$\tau_{1,Wcr}/\tau_{1,0.00}$		$\tau_{max,Wcr}/\tau_{max,0.00}$		$S_{max,Wcr}/S_{max,0.00}$	
	実験値	回帰計算値	実験値	回帰計算値	実験値	回帰計算値
0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
0.20	0.51	0.52	0.61	0.61	4.30	4.28
0.40	0.34	0.35	0.55	0.56	5.50	4.82
0.60	0.35	0.26	0.50	0.53	5.28	5.16
0.80	0.13	0.21	0.59	0.51	4.56	5.42
1.00	0.18	0.17	0.46	0.50	5.79	5.63

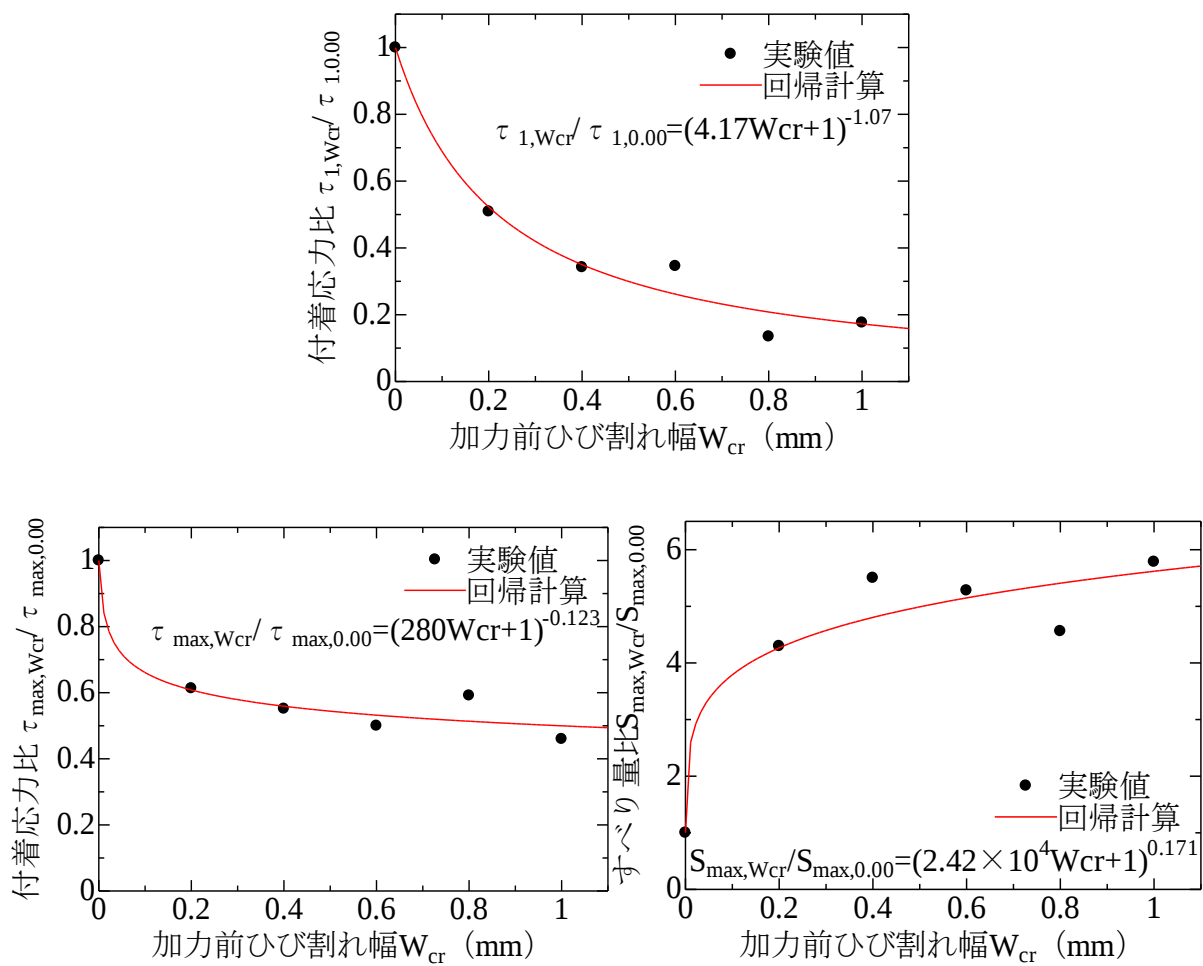


図 2.4.2 特性値の比較

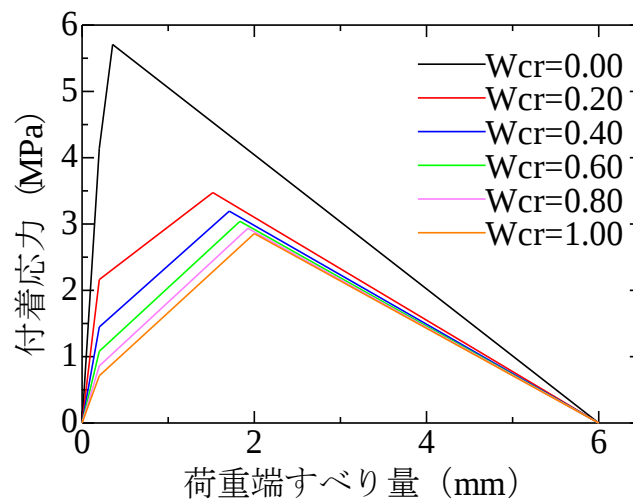


図 2.4.3 包絡線モデル形状

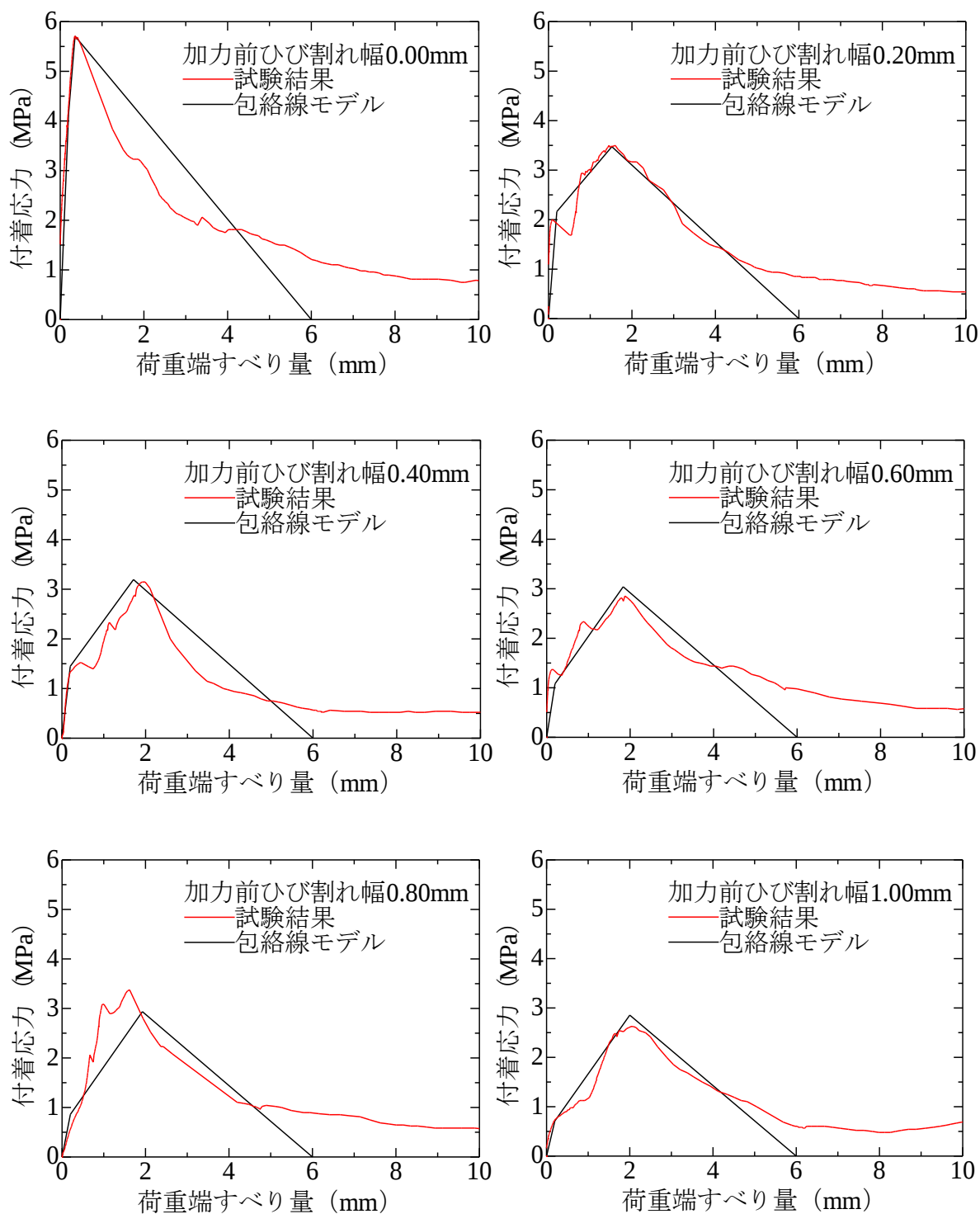


図 2.4.4 包絡線モデルと実験結果の比較

履歴モデルを図 2.4.5 に示す。図 2.4.3 に示す包絡線モデル、除荷直線、加力方向移行直線、再載荷直線によって構成される。1 サイクル目の加力時は加力開始後 $O \rightarrow A_1 \rightarrow B_1 \rightarrow P$ と移行し、加力方向負側での加力も同様の過程を経て点 Q を通る。2 サイクル目以降は $Q \rightarrow C_1 \rightarrow A_2 \rightarrow B_2 \rightarrow P \rightarrow \dots \rightarrow Q \rightarrow C_2 \rightarrow \dots \rightarrow A_4 \rightarrow R$ と移行する。各直線のモデル化方法を以下に示す。



C→A 間：再載荷直線

(1) ピーク時付着応力

同一すべり量 2 サイクル目以降のピーク点 (A) の付着応力をピーク時付着応力低減率 α 、 β により評価する。低減率 α は包絡線における最大付着応力点までの低減率で、繰返し C1 加力の実験結果から回帰計算をすることで算出した。低減率 β は包絡線における最大付着応力点以降の低減率で、繰返し C2 加力の実験結果から回帰計算をすることで算出した。ピーク時付着応力低減率の実験値と回帰計算の結果を図 2.4.6 に、第 4 サイクルまでのピーク時付着応力低減率を表 2.4.2 に示す。

$$\text{包絡線最大付着応力以前：}\tau_{p,N} = \alpha\tau_{p,1} \quad \alpha = N^{-0.311} \quad (2-2)$$

$$\text{包絡線最大付着応力以降：}\tau_{p,N} = \beta\tau_{p,1} \quad \beta = N^{-0.699} \quad (2-3)$$

ここで、

N ：同一すべり量における繰返しサイクル数

$\tau_{p,1}$ ：1 サイクル目のピーク時付着応力 (MPa)

$\tau_{p,N}$ ： N サイクル目のピーク時付着応力 (MPa)

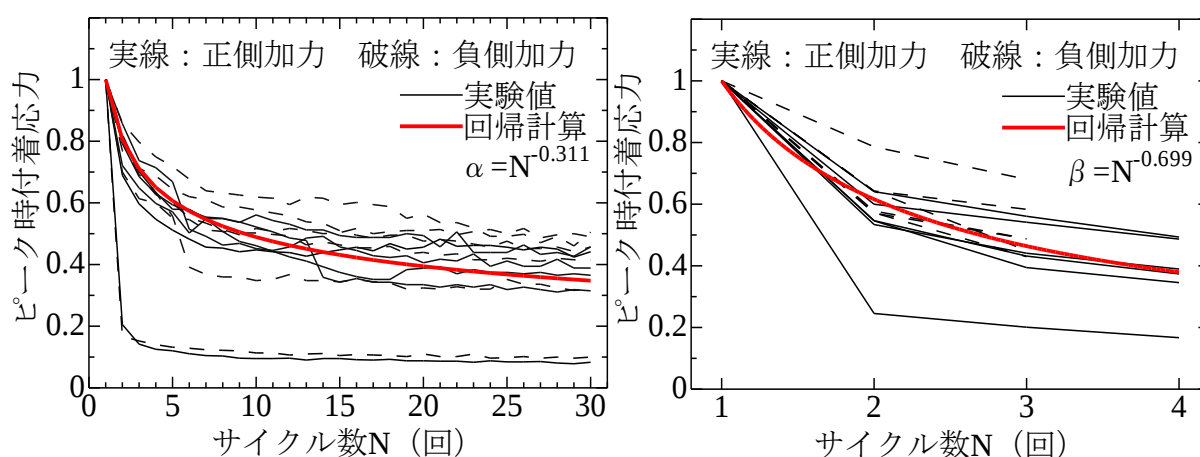


図 2.4.6 ピーク時付着応力低減率

表 2.4.2 ピーク時付着応力低減率

N	1	2	3	4
α	1	0.806	0.711	0.650
β	1	0.616	0.464	0.379

(2) 除荷直線

すべり量が減少に転じる点を除荷開始点 A (S_A, τ_A) とし、図 2.4.7 に示すように除荷開始点における付着応力の 0.6 倍、0.3 倍の点を結ぶ直線の勾配から除荷勾配 K を算出する。除荷時の荷重端すべり量 S_A は実験結果における最大付着応力時の荷重端すべり量 S_{max} で基準化する。繰返し C2 加力の実験結果から除荷勾配を算出し、回帰計算をすることで、次式によって除荷勾配 K を決定した。除荷勾配の実験値と回帰計算の結果を図 2.4.8 に示す。

$$K = 5.72(S_A/S_{max})^{-0.482} \quad (2-4)$$

ここで、

S_A : 除荷開始時の荷重端すべり量 (mm)

S_{max} : 最大付着応力時の荷重端すべり量 (mm)

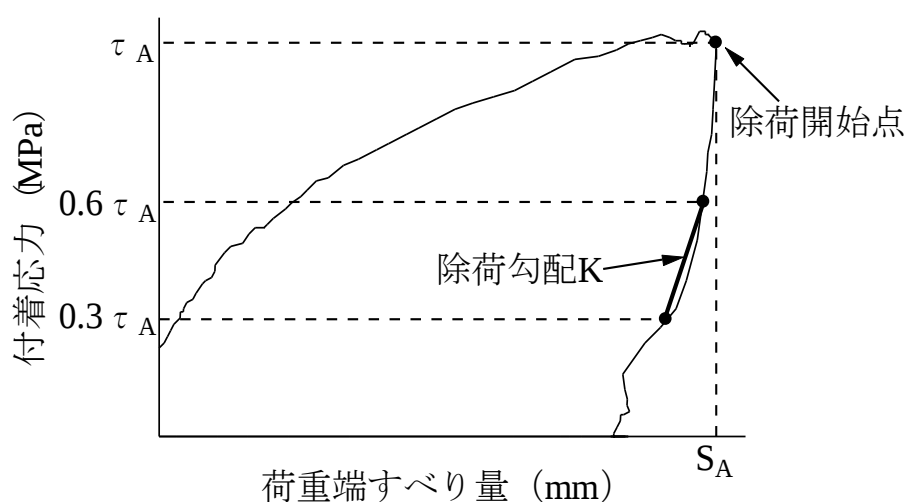


図 2.4.7 除荷勾配

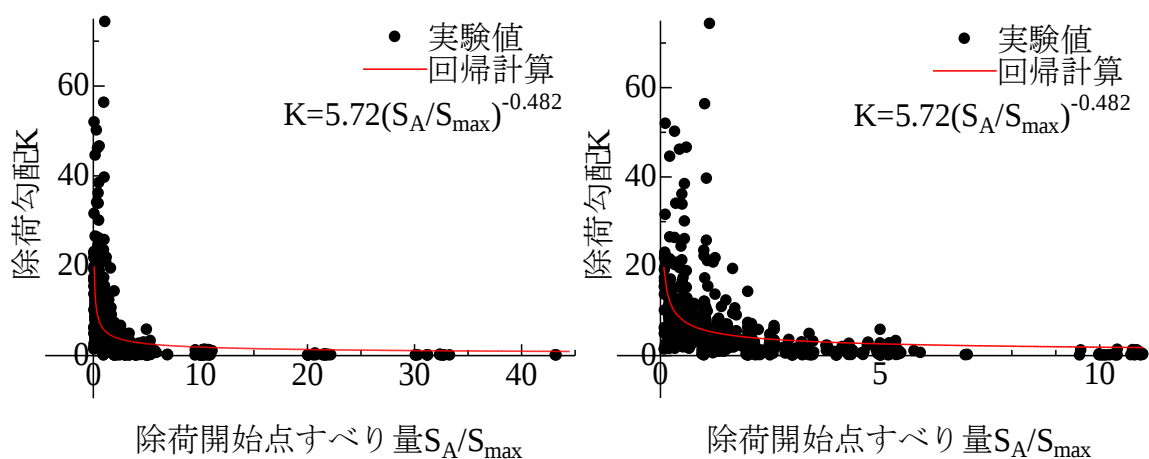


図 2.4.8 除荷勾配 (左図：全体、右図：横軸 10 までの拡大)

(3) 加力方向移行直線、再載荷直線

除荷終了点 B と点 P または点 Q を結ぶ直線により加力方向移行直線をモデル化する。点 P、点 Q は荷重端すべり量が 0mm における付着応力点とし、繰返し C1 加力の実験結果から平均値を求め、 $\tau_P = -0.098\text{MPa}$ 、 $\tau_Q = 0.098\text{MPa}$ と決定した。

再載荷勾配 L に関して、各サイクルにおいて付着応力が最大となった点をピーク時付着応力点 A (S_{PA}, τ_{PA}) とし、図 2.4.9 に示すようにピーク時付着応力点とその 0.5 倍の点を結ぶ直線の勾配から再載荷勾配 L を算出する。ピーク時荷重端すべり量 S_{PA} は実験結果における最大付着応力時の荷重端すべり量 S_{max} で基準化する。繰返し C2 加力の実験結果から再載荷勾配を算出し、回帰計算をすることで、次式によって再載荷勾配 L を決定した。再載荷勾配の実験値と回帰計算の結果を図 2.4.10 に示す。

$$L = 1.36(S_{PA}/S_{max})^{-0.444} \quad (2-5)$$

ここで、

S_{PA} : ピーク時荷重端すべり量 (mm)

S_{max} : 最大付着応力時の荷重端すべり量 (mm)

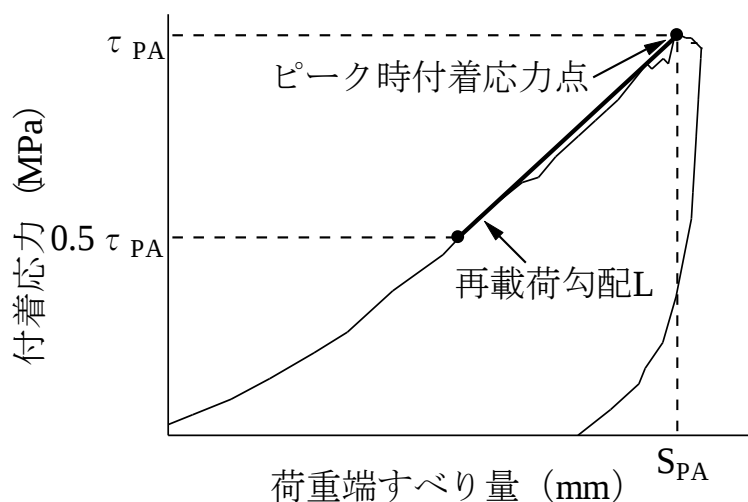


図 2.4.9 再載荷勾配

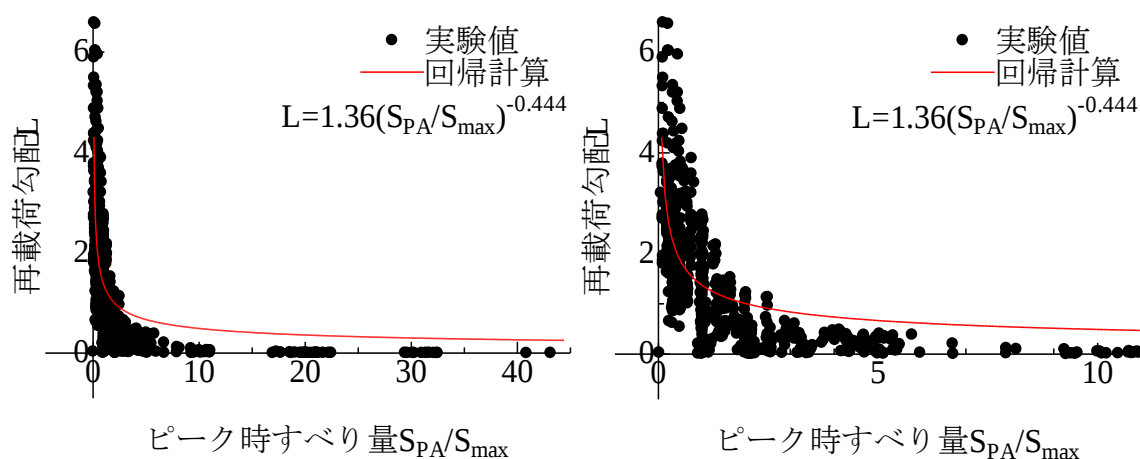


図 2.4.10 再載荷勾配 (左図：全体、右図：横軸 10 までの拡大)

2.4.3 履歴モデルと実験結果の比較

加力前にひび割れを導入した試験体において、繰返し履歴モデルと実験結果の比較を図 2.4.11 に、加力前ひび割れ幅ごとの履歴モデルの比較を図 2.4.12 に示す。実験結果は同一の加力前ひび割れ幅試験体 3 体分の平均化曲線である。

繰返し履歴モデルにおける各サイクルの付着応力のピーク値は、荷重端すべり量 0.2mm から 1mm までのサイクルではおおよそ一定、もしくは徐々に増加する傾向が見られる。一方で、荷重端すべり量 2mm のサイクルにおける付着応力のピーク値は、それ以前のサイクルにおける付着応力のピーク値を大きく超えた。加力前ひび割れ幅 1.00mm 試験体における荷重端すべり量 2mm のサイクルで実験結果と差が見られるが、他の試験体では実験結果における挙動を概ねよく表現できている。また、図 2.4.12 に示すように加力前ひび割れ幅の増加に伴い、付着応力が低下する傾向も履歴モデルにより表現できている。

加力前ひび割れのない健全試験体において、既往の研究^{[5][6]}のモデル化方法に基づいて繰返し履歴をモデル化した結果を図 2.4.13 に示す。繰返し履歴は既往の研究^{[5][6]}と同様に、荷重端すべり量により制御し、各荷重端すべり量を正負 1 回ずつ繰返す正負交番漸増繰返し加力である。

荷重端すべり量 0.4mm のサイクルで付着応力は最大となり、以降、各サイクルの付着応力のピーク値は減少した。図 2.4.11 の履歴モデルと比較すると、加力前ひび割れの有無により挙動に大きな違いが見られた。健全試験体はひび割れの発生に伴う鉄筋周囲のコンクリートの拘束力の顕著な低下により、鉄筋とコンクリートの新たな噛み合いが起こらず付着応力が低下すると考えられる。一方で、加力前にひび割れを導入した試験体は加力開始時から拘束力が小さい状態であるため、荷重端すべり量が小さい領域内の加力では各除荷開始すべり量における 1 サイクル目の付着応力のピーク値は大きな変化がない。しかし、鉄筋のすべりが大きくなることで鉄筋とコンクリートの間に新たな噛み合いが生じて付着応力が増加したと考えられる。

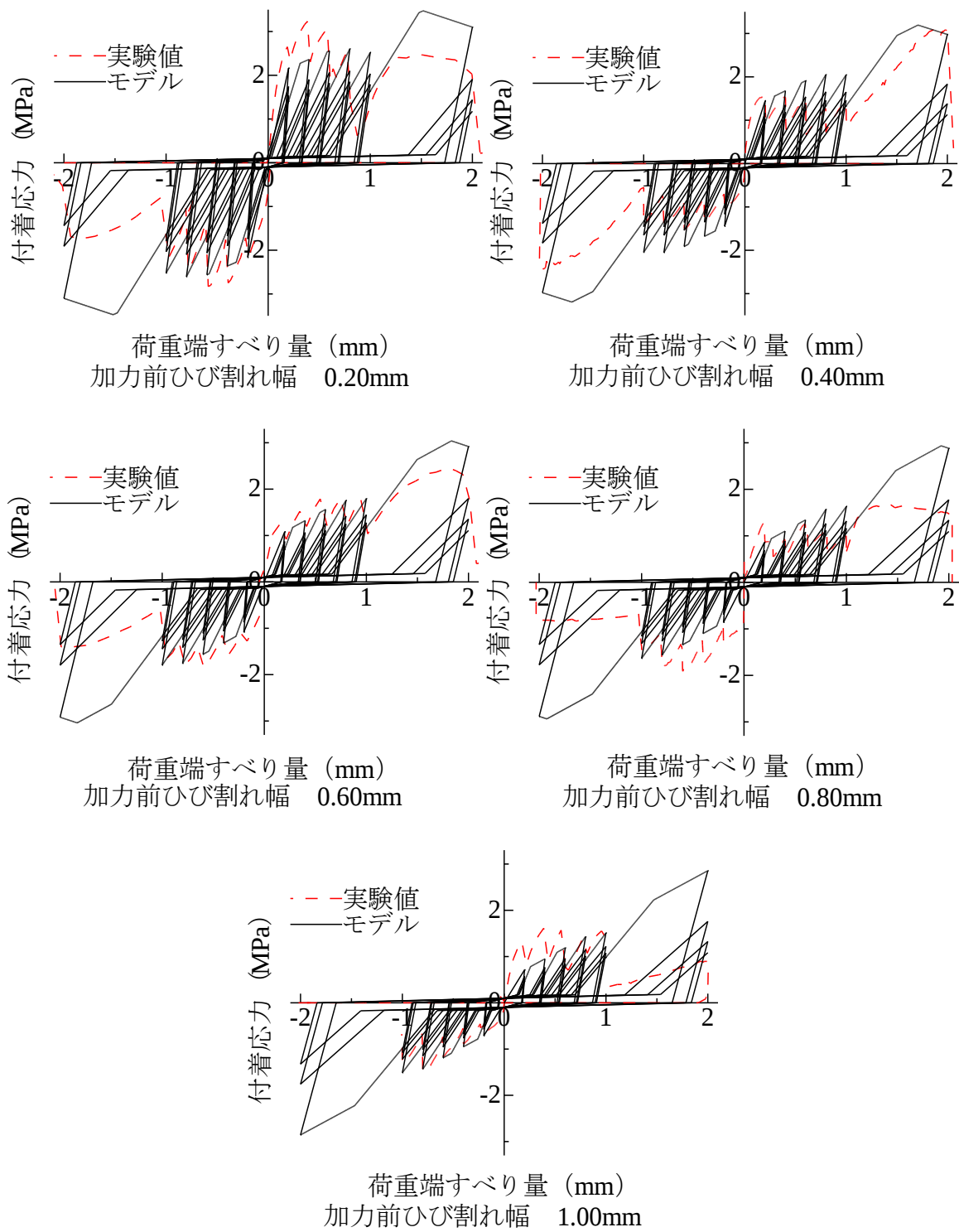


図 2.4.11 繰返し履歴モデルと実験結果の比較

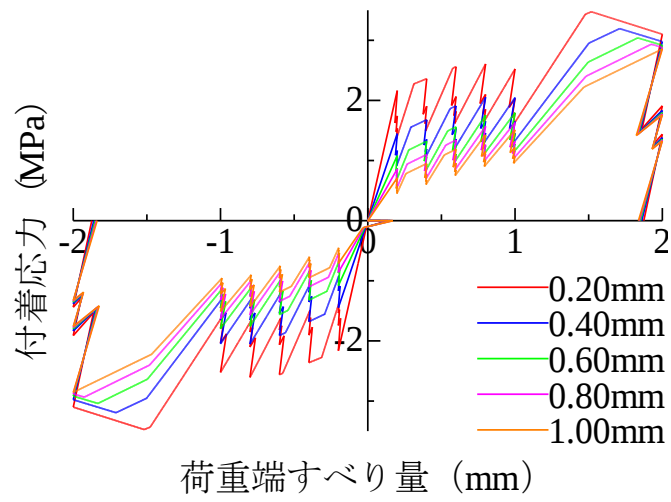


図 2.4.12 加力前ひび割れ幅ごとの比較

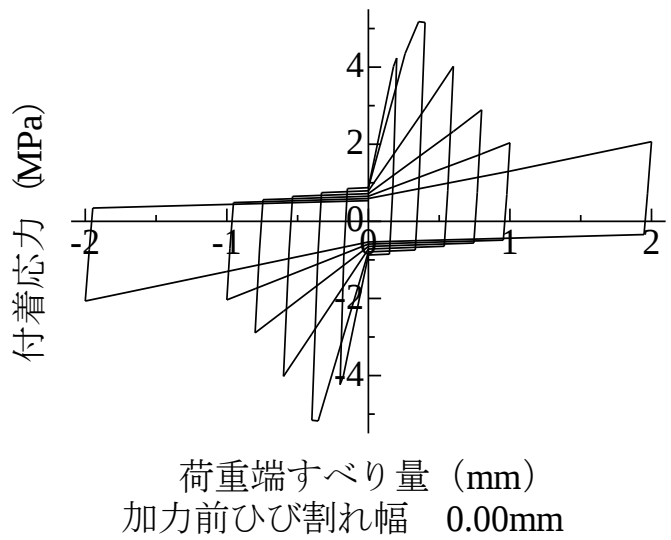


図 2.4.13 履歴モデル (健全試験体)

2.5 まとめ

破砕剤充填パイプ導入により鉄筋腐食ひび割れを模擬した、付着区間の長さが鉄筋径の 4 倍の付着長の短い試験体の単調、繰返し鉄筋引抜き試験を実施した。実験より得られた付着応力－荷重端すべり量関係から、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、繰返し履歴モデルの構築を行い、実験結果との比較検討を行った。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。これより、破砕剤充填パイプを用いて加力前にひび割れを導入することで、ひび割れ幅の大きさから鉄筋とコンクリートの付着性状を評価できる。
- ② 加力前にひび割れを導入した試験体の各サイクルピーク時付着応力は、同一すべり量での繰返し加力（加力履歴 C1）により低下した。30 回の繰返しで 1 サイクル目の 4 割程度まで低下した。
- ③ 繰返し C2 加力の結果より、除荷時のすべり量が増加するほど繰返し加力による最大ピーク時の付着応力は大きく低下した。加力前ひび割れ幅の違いによらず、すべり量 0.2mm では 6 割程度の低下、すべり量 2mm では 2 割程度まで低下した。
- ④ 鉄筋引抜き試験に基づいて構築した繰返し履歴モデルは、実験結果における付着応力－すべり量関係の挙動、加力前ひび割れ幅の増加に伴う付着応力の低下を概ねよく表現できている。

第3章 付着長の長い試験体の付着性状

3.1 はじめに

第2章では、付着長の短い試験体において単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を実施し、鉄筋とコンクリートの付着性状を検討した。しかし、実構造物における付着長は鉄筋径の数十倍であり、付着長の短い試験体に加えて実部材に近い条件下として、付着長の長い試験体について検討を行う必要がある。

本章では、付着区間が鉄筋径の20倍の付着長の長い試験体を対象とする。実験より得られた平均付着応力－すべり量関係から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う。また、試験体と同一条件での付着解析を行い、実験結果との比較検討を行う。

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

試験体形状を図 3.2.1 に、試験体一覧を表 3.2.1 に示す。試験体の断面は 170mm×220mm の長方形とし、断面中央に異形鉄筋 D16 (SD490) を配した。試験体軸方向の長さは 400mm とし、鉄筋両端部に付着絶縁区間を 40mm ずつ設け、付着区間は鉄筋径の 20 倍の 320mm とした。鉄筋中央から 50mm 位置に外径 22mm、厚さ 1mm のアルミパイプを 2 本埋設し、腐食ひび割れを模擬する試験体においては、静的破砕剤を充填することで加力前にひび割れを発生させた。試験体は付着劣化のない健全試験体が 1 体、静的破砕剤の充填により加力前に 5 種類のひび割れ幅 (0.20、0.40、0.60、0.80、1.00mm) を発生させる試験体が 5 体の計 6 体である。コンクリートの目標強度は 18MPa で、5 種類の加力前ひび割れ幅を変動因子として単調鉄筋引抜き試験を行った。

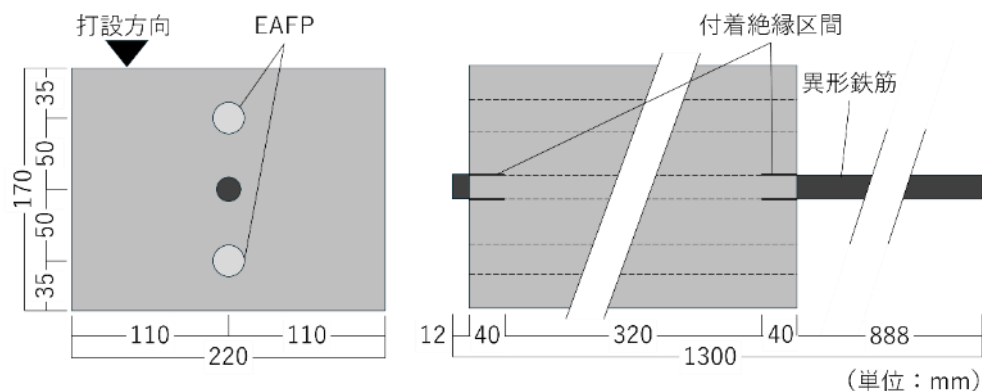


図 3.2.1 試験体形状

表 3.2.1 試験体一覧

試験体名	加力前ひび割れ幅 x.xx (mm)	試験体数	x.xx : 加力前ひび割れ幅 (0.00、0.20、0.40、0.60、0.80、1.00mm)
M-x.xx	0.00~1.00	6	

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表を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 コンクリートの配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	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、 $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用い、材齢 29 日に材料試験を行った。加力には 500kN 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実施した。コンクリートの材料試験結果を表 3.2.3 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 3.2.4 に示す。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 3.2.3 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

表 3.2.4 検討用コンクリート強度

目標強度	圧縮強度 (MPa)	弾性強度 (GPa)	割裂強度 (MPa)
18MPa	15.5	17.1	1.98

(2) 鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490) 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。鉄筋の材料試験結果を表 3.2.5 に示す。

表 3.2.5 鉄筋の引張試験結果

番号	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
1	511	185	695
2	514	180	691
3	517	201	695
平均	514	189	694

3.2.3 加力・計測方法

加力前ひび割れ計測位置を図 3.2.2 に示す。破碎剤充填後に発生した試験体表面の加力前ひび割れ幅は、クラックスケールにより計測した。加力前ひび割れ幅は、試験体軸方向の自由端側から 50mm 間隔の計 7 か所において打設面および打設底面それぞれ計測を行い、各面の平均値を計測値とした。打設面、打設底面のいずれかの計測値が目標値に達した段階で加力を開始した。

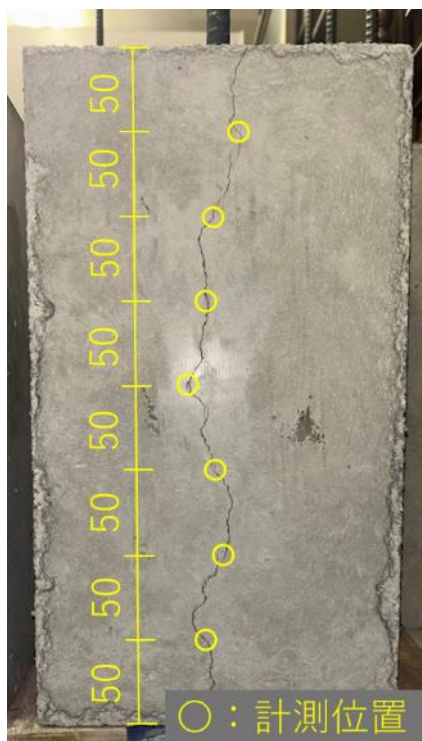


図 3.2.2 加力前ひび割れ幅計測位置

加力装置を図 3.2.3 に示す。試験体の荷重端にテフロンシートを介して 112mm 径の孔を設けた反力板を設置し、センターホールジャッキを設置した。

計測項目はロードセルによる引抜き荷重、自由端側に設置した変位計による自由端すべり量、試験体荷重端と鉄筋端部間に設置した変位計による相対変位である。荷重端側に設置した変位計による相対変位の平均を荷重端変位とし、荷重端変位量から ΔL により算出される鉄筋の伸びを差し引いた変形を荷重端すべり量とした。

$$\Delta L = PL/EA \quad (3-1)$$

ここで、

P : 引抜き荷重 (kN)

L : 試験体荷重端－鉄筋掴み位置間長さ (mm)

E : 鉄筋の弾性係数 (GPa)

A : 鉄筋の公称断面積 (mm²)

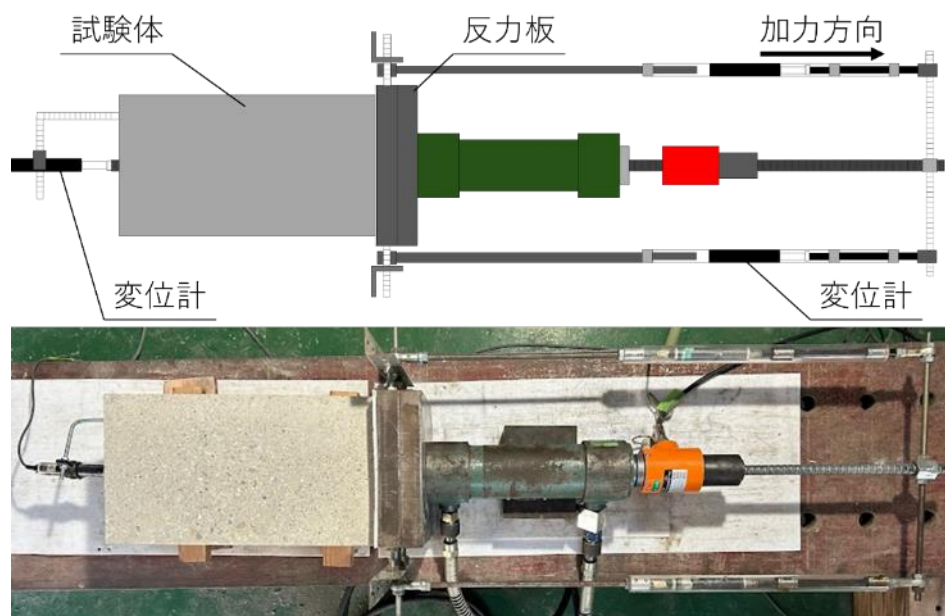


図 3.2.3 加力装置

3.3 実験結果

3.3.1 試験体ひび割れ発生状況

破砕剤充填後の時間経過によるひび割れ拡幅状況を図 3.3.1 に、各試験体の加力前ひび割れ状況を図 3.3.2 に示す。また、静的破砕剤充填後の経過時間を表 3.3.1 に示す。アルミパイプに破砕剤を充填後、アルミパイプ周囲から鉄筋方向および試験体表面方向の 2 方向にひび割れが発生するサイドスプリット型のひび割れが発生した。その後、時間経過によりひび割れが進行することで、試験体打設上面および底面軸方向にそれぞれ 1 本の加力前ひび割れが確認された。破砕剤充填パイプにより M-1.00 試験体において 431 時間で最大 1.10mm のひび割れが発生した。

引抜き加力前後のひび割れ状況を図 3.3.3 に示す。加力前に導入したひび割れが引抜き加力によって拡大し、数体の試験体において新たに軸方向ひび割れが発生する様子が確認された。加力過程においてこれらのひび割れが拡幅して最終的な破壊に至った。

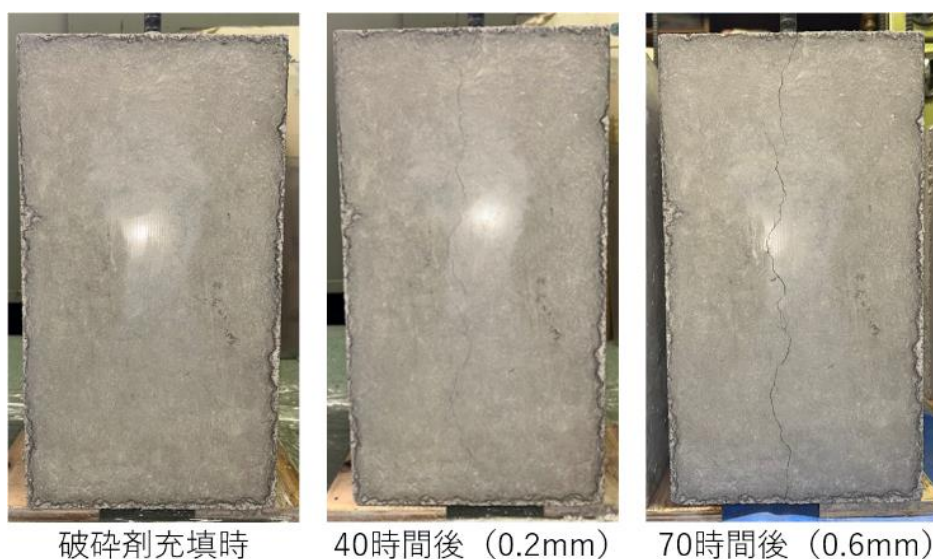


図 3.3.1 ひび割れ拡幅状況

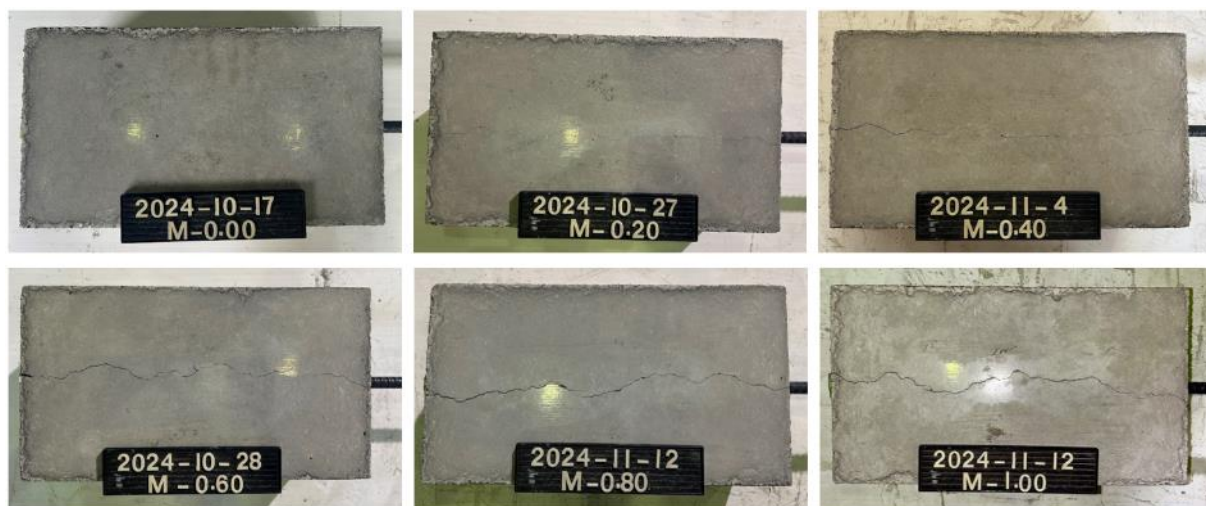


図 3.3.2 加力前ひび割れ状況

表 3.3.1 経過時間

試験体名称	経過時間	加力前ひび割れ幅 (mm)		
		打設上面平均値	打設底面平均値	最大値
M-0.00	—	—	—	—
M-0.20	53 時間 15 分	0.18	0.20	0.25
M-0.40	117 時間 30 分	0.19	0.40	0.55
M-0.60	74 時間 30 分	0.06	0.60	0.80
M-0.80	311 時間 15 分	0.36	0.80	1.00
M-1.00	431 時間	0.41	1.00	1.10



加力前



加力後

図 3.3.3 引抜き加力前後のひび割れ状況

3.3.2 単調加力試験結果

(1) 平均付着応力－荷重端すべり量関係

単調引抜き試験によって得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係を図 3.3.4 に、各試験結果の比較を図 3.3.5 に示す。同図中に、最大平均付着応力点を示す。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することによって求めた。加力前ひび割れのない健全試験体において、ひび割れの発生とともに荷重が最大に達し、以降荷重が急激に低下した。加力前にひび割れを導入した試験体では、全ての試験体において荷重が最大に達した時点で加力前ひび割れが急激に拡幅し、以降荷重が低下する様子が確認された。

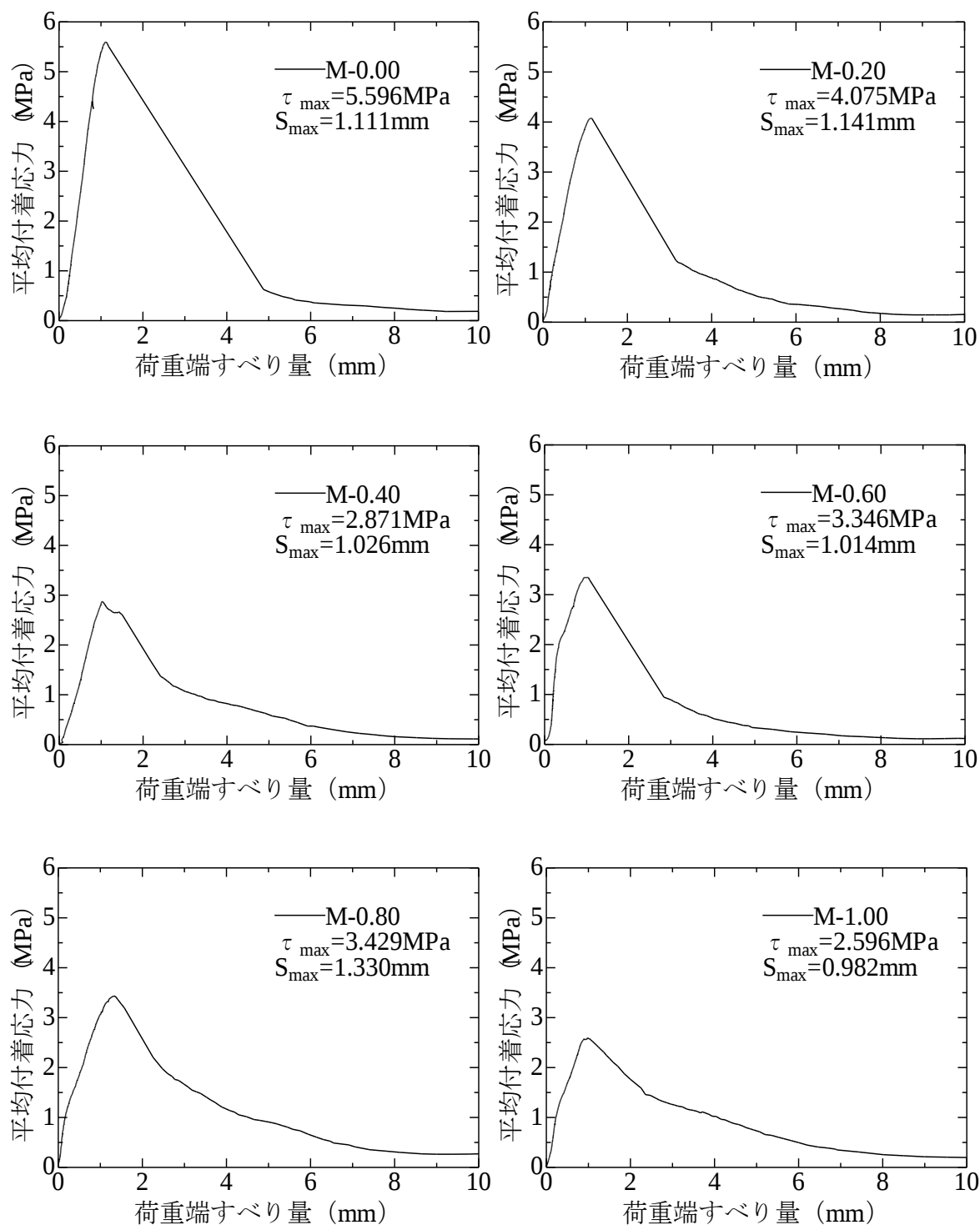


図 3.3.4 平均付着応力－荷重端すべり量関係

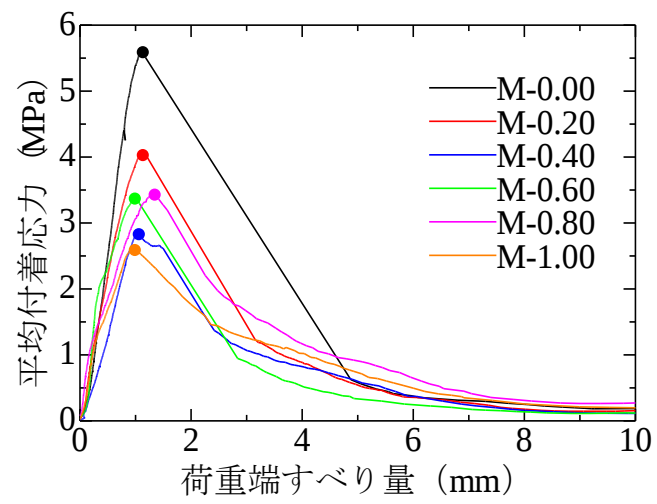


図 3.3.5 平均付着応力－荷重端すべり量関係の比較

(2) 平均付着応力－自由端すべり量関係

単調引抜き試験によって得られた平均付着応力－自由端すべり量関係を図 3.3.6 に、各試験結果の比較を図 3.3.7 に示す。同図中に、最大平均付着応力点を示す。加力初期において自由端でのすべりは発生せず、荷重のみ増加した。最大平均付着応力点における自由端すべり量は荷重端すべり量よりも健全試験体では 0.9mm 程度、加力前にひび割れを導入した試験体では 0.5mm 程度小さい値となった。

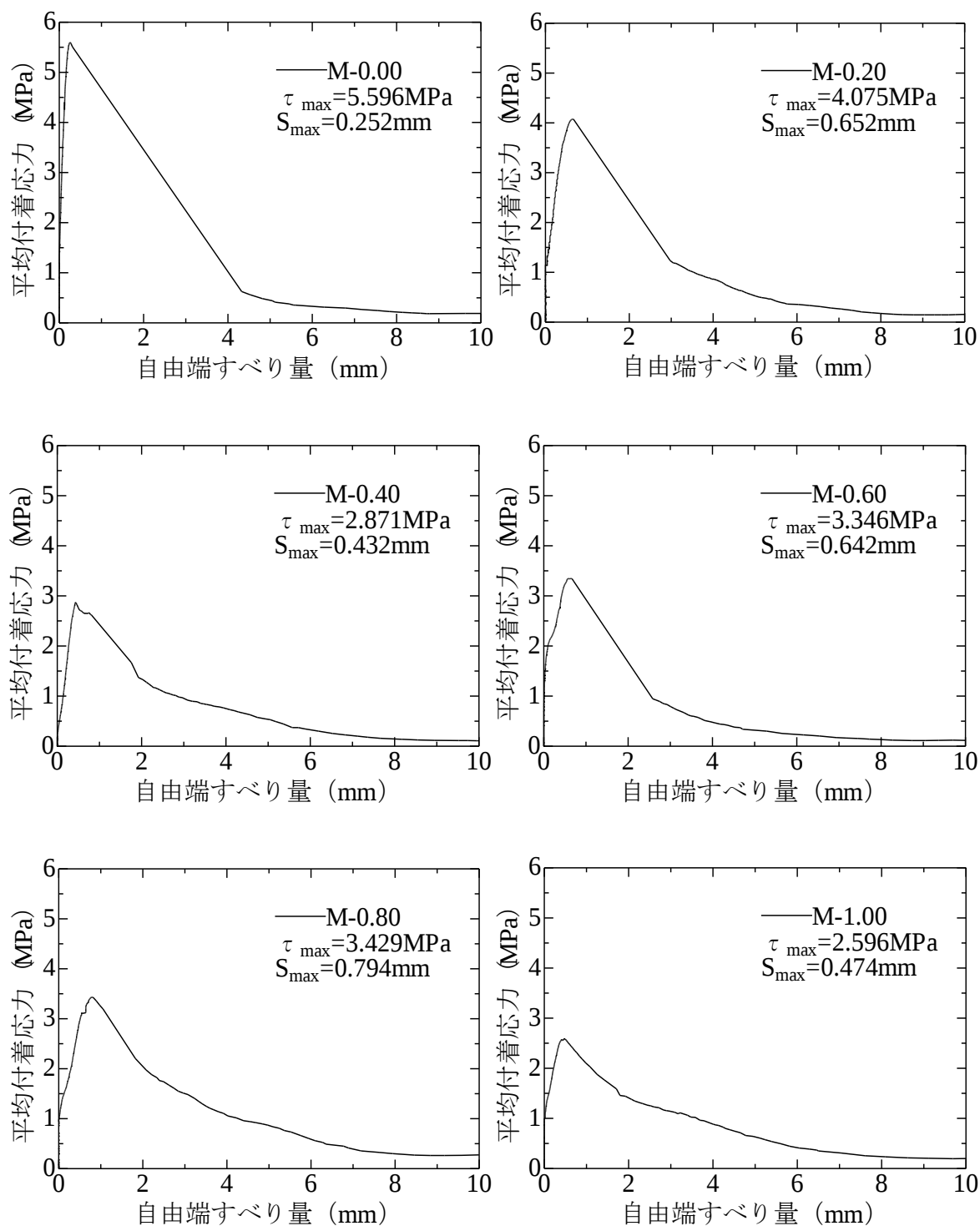


図 3.3.6 平均付着応力－自由端すべり量関係

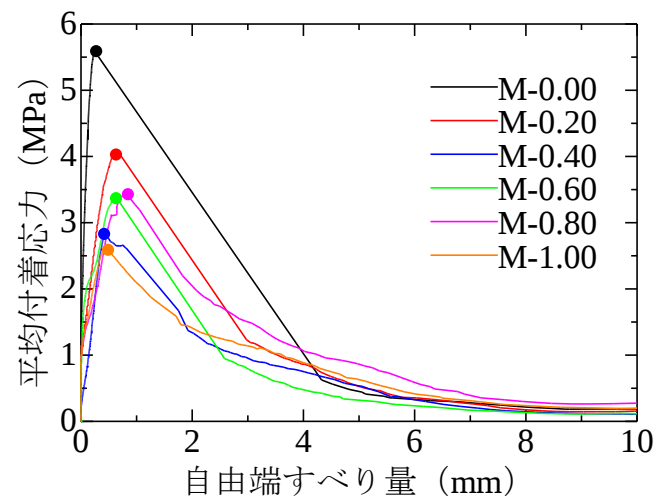


図 3.3.7 平均付着応力-自由端すべり量関係の比較

(3) 最大平均付着応力

最大平均付着応力－加力前ひび割れ幅関係を図 3.3.8 に、最大平均付着応力の一覧を表 3.3.2 に示す。図 3.3.8 において、第 2 章の付着長の短い試験体の単調引抜き試験の最大付着応力の結果を M-4d として示す。付着長の短い試験体の引抜き試験の結果と同様に、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。付着長の短い試験体の最大付着応力の結果（M-4d）と比較すると、同一加力前ひび割れ幅における最大付着応力に大きな差は見られなかった。

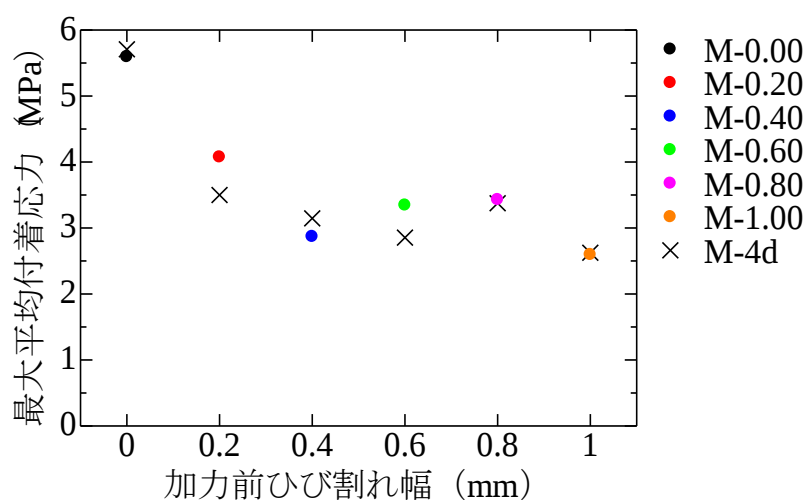


図 3.3.8 最大平均付着応力－加力前ひび割れ幅関係

表 3.3.2 最大平均付着応力の一覧

試験体名称	最大平均付着応力 (MPa)	最大平均付着応力時 の荷重端すべり量 (mm)	最大平均付着応力時 の自由端すべり量 (mm)
M-0.00	5.596	1.111	0.252
M-0.20	4.075	1.141	0.652
M-0.40	2.871	1.026	0.432
M-0.60	3.346	1.014	0.642
M-0.80	3.429	1.330	0.794
M-1.00	2.596	0.982	0.474

3.4 付着解析

3.4.1 解析方法

既往の研究^[7]では、局所付着性状を表す付着構成則を用い、付着長の長い試験体の付着性状を数値計算により付着解析を行っている。本研究では、第2章の繰返し履歴モデルの作成において用いた包絡線モデルを付着構成則として、逐次積分による引抜き試験の解析を行った。本研究における付着解析の計算条件、計算手順を以下に示す。

計算条件

- ・異形鉄筋 D16 (SD490) を配した付着長が鉄筋径の 20 倍の試験体を対象とする。
- ・引抜き試験における境界条件として、自由端における鉄筋引張力は 0 である。
- ・コンクリートの軸方向変形は考慮しない。

計算方法

- (1) 付着長 320mm の試験体の自由端を原点 $x = 0$ とし、図 3.4.1 に示す i 番目の微小区間 Δx (本解析では 0.64mm とする) を考え、任意の鉄筋引張力 P_{i-1} 、任意のすべり量 S_{i-1} を与える。
- (2) 微小区間 Δx において付着構成則よりすべり量 S_{i-1} から付着応力 τ_{bi} を求める。
- (3) 微小区間 Δx において付着応力を一定とみなし、微小区間での鉄筋引張力の変化量 ΔP_i 、すべり量の変化量 ΔS_i を次式により求める。

$$\Delta P_i = \tau_{bi} \cdot \Delta x \cdot \varphi_s \quad (3-2)$$

$$\Delta S_i = \left(\frac{P_{i-1}}{E_s A_s} + \frac{\Delta P_{i-1}}{2E_s A_s} \right) \cdot \Delta x \quad (3-3)$$

ここで、

φ_s : 鉄筋の周長 50mm

E_s : 鉄筋の弾性係数 189kN/mm²

A_s : 鉄筋の断面積 198.6mm²

- (4) 微小区間 Δx 終端における鉄筋引張力 P_i 、すべり量 S_i を次式により求める。

$$P_i = P_{i-1} + \Delta P_i \quad (3-4)$$

$$S_i = S_{i-1} + \Delta S_i \quad (3-5)$$

- (5) 試験体の自由端 $x = 0$ から荷重端 $x = 320$ までの各微小区間において、これら(1)~(4)の計算を順次繰返し、荷重端における鉄筋引張力、すべり量を計算する。

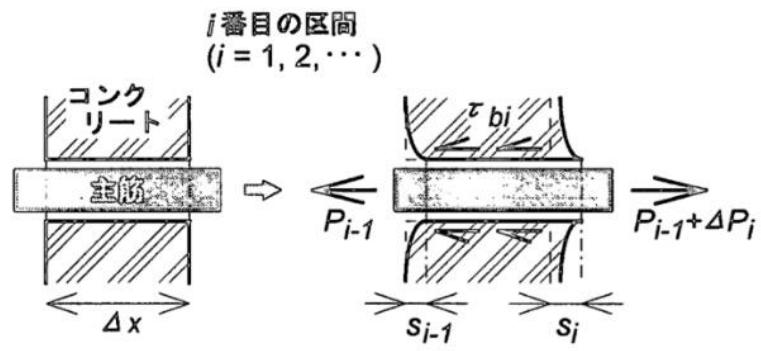


図 3.4.1 微小区間の釣り合い

3.4.2 解析結果

(1) 鉄筋引張応力分布、すべり量分布、付着応力分布

最大平均付着応力時の鉄筋引張応力分布、すべり量分布、付着応力分布を図 3.4.2～図 3.4.4 に、最大付着応力を表 3.4.1 に示す。鉄筋引張応力、すべり量は自由端から荷重端にかけて単調に増加し、荷重端において最大となる。付着応力は自由端から表 3.4.1 に示す自由端からの位置まで増加し、その後荷重端まで減少した。最大付着応力は実験結果と同様に、加力前ひび割れ幅の増加に伴って減少する。

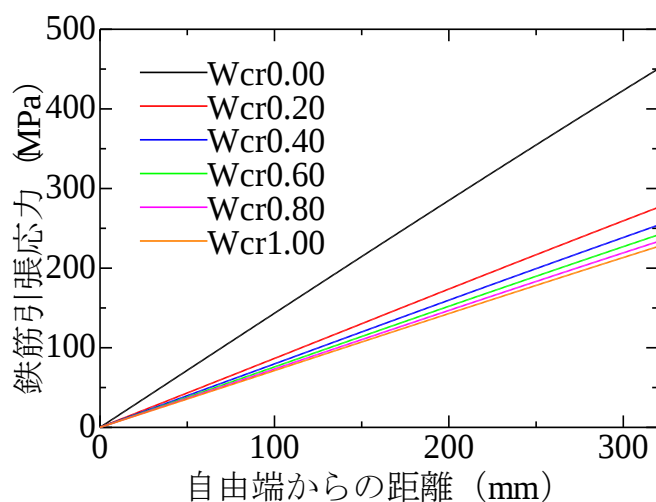


図 3.4.2 鉄筋引張応力分布

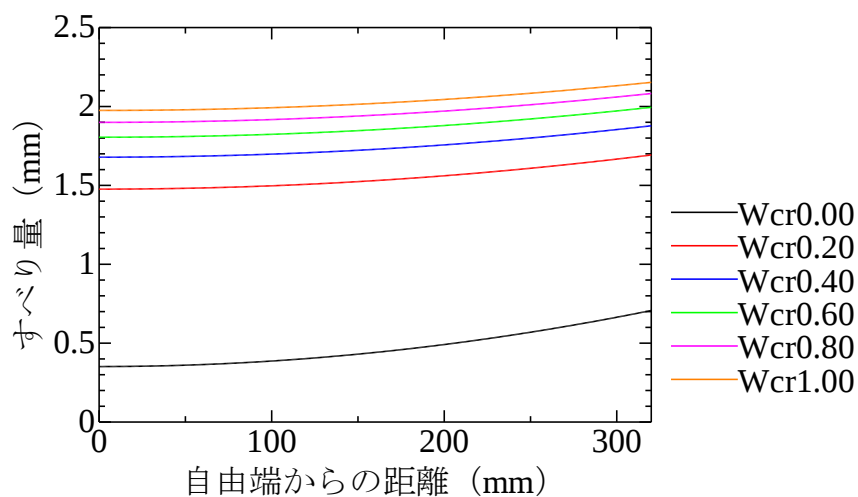


図 3.4.3 すべり量分布

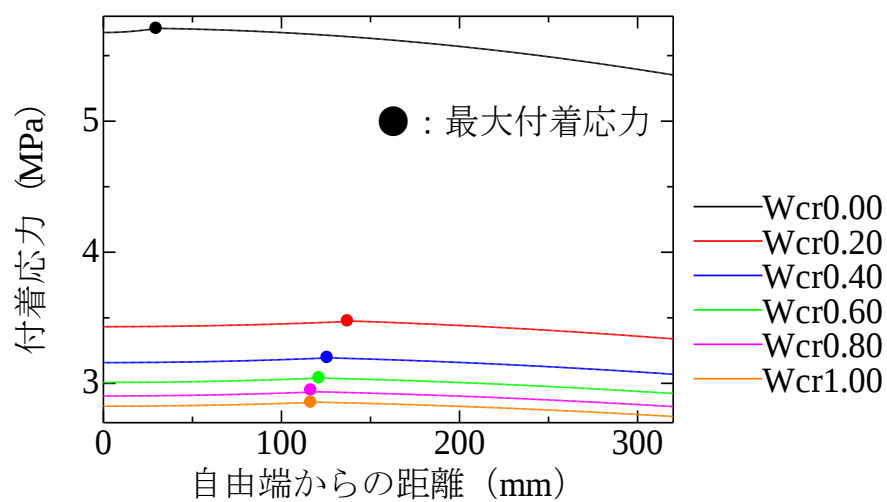


図 3.4.4 付着応力分布

表 3.4.1 最大付着応力

加力前ひび割れ幅 (mm)	最大付着応力 (MPa)	最大付着応力点の 自由端からの位置 (mm)
0.00	5.708	30.08
0.20	3.474	141.4
0.40	3.194	126.7
0.60	3.040	122.2
0.80	2.935	121.0
1.00	2.856	121.0

(2) 平均付着応力－荷重端すべり量関係の比較

付着解析により得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係と実験結果の比較を図 3.4.5 に、最大平均付着応力の解析値と実験値の比較を図 3.4.6 および表 3.4.2 に示す。全ての試験体において最大平均付着応力の解析値と実験値の比は 0.85～1.11 の範囲にあり、解析結果は実験結果と良く適合していると考えられる。

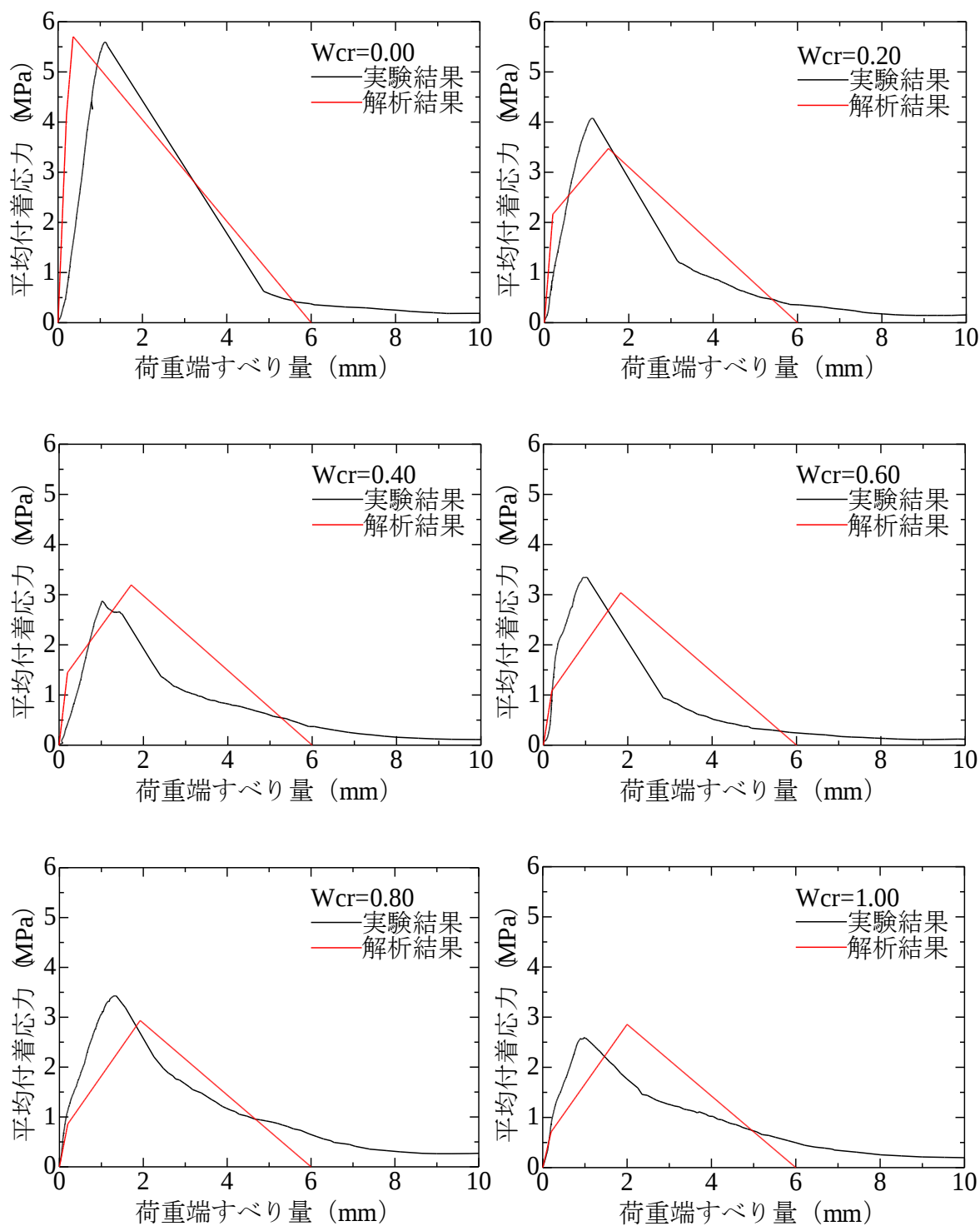


図 3.4.5 平均付着応力－荷重端すべり量関係の比較

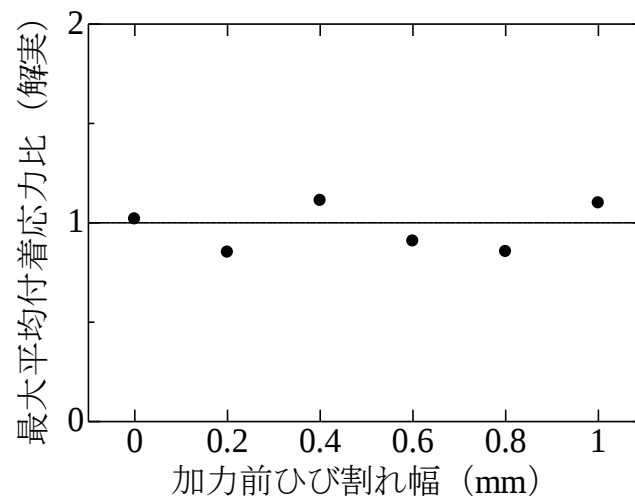


図 3.4.6 最大平均付着応力比－加力前ひび割れ幅関係

表 3.4.2 最大平均付着応力の比較

加力前ひび割れ幅 (mm)	最大平均付着応力 実験値 (MPa)	最大平均付着応力 解析値 (MPa)	解析値 / 実験値
0.00	5.596	5.703	1.019
0.20	4.075	3.473	0.852
0.40	2.871	3.194	1.112
0.60	3.346	3.037	0.908
0.80	3.429	2.932	0.855
1.00	2.596	2.856	1.100

3.5 まとめ

破砕剤充填パイプ導入により鉄筋腐食ひび割れを模擬した、付着区間の長さが鉄筋径の 20 倍の付着長の長い試験体の単調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－すべり量関係から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、試験体と同一条件での付着解析を行い、実験結果との比較検討を行った。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 同一加力前ひび割れ幅における付着長の短い試験体と、付着長の長い試験体の付着応力の最大値は近しい値となった。
- ③ 付着解析より得られた最大平均付着応力は実験値と同程度の値であり、実験結果の平均付着応力－荷重端すべり量関係と良く適合している。

第4章 結論

本研究では、腐食ひび割れ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単調鉄筋引抜き試験および繰返し鉄筋引抜き試験を実施した。

付着長の短い試験体の単調、繰返し鉄筋引抜き試験では、付着応力－荷重端すべり量関係について検討を行った。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。また、繰返し履歴モデルを構築し、実験結果との比較検討を行った。実験結果における付着応力－すべり量関係の挙動、加力前ひび割れ幅の増加に伴う付着応力の低下を概ねよく表現できた。

付着長の長い試験体の単調鉄筋引抜き試験では、平均付着応力－荷重端すべり量関係、平均付着応力－自由端すべり量関係について検討を行った。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、同一加力前ひび割れ幅における付着長の短い試験体と、付着長の長い試験体の付着応力の最大値は近しい値となった。また、試験体と同一条件での付着解析を行い、実験結果との比較検討を行った。付着解析より得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係は、実験結果の平均付着応力－荷重端すべり量関係と良い適合が見られた。

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。筑波大学技術職員 小島篤志氏には、試験体や加力装置の作製、実験の補助などの専門的な技術を必要とする場面において、ご協力を頂きました。

また、筑波大学金久保研究室の学生、特に、先輩である SYLLAMADOU SAKHIR 氏、下河邊大貴氏、後輩である栗原朋久氏、西澤和輝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、Syll Amadou Sakhir、金久保利之：破砕剤充填パイプ導入による腐食ひび割れ模擬 RC 部材の繰返し局所付着挙動、コンクリート工学年次論文集、Vol.45、No.2、pp.853-858、2023
- [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、麻生高行、大和伸行：繰返し荷重下における鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究（その 1 実験概要と実験結果）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、C-2 構造Ⅳ、pp.599-600、2009
- [6] 麻生高行、金久保利之、大和伸行：繰返し荷重下における鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究（その 2 履歴モデル構築）、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、C-2 構造Ⅳ、pp.601-602、2009
- [7] 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