

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

鉄筋の腐食が RC 部材の付着性状に及ぼす影響

保坂 剛

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2010 年 3 月

鉄筋の腐食が RC 部材の付着性状に及ぼす影響

論文概要

鉄筋が腐食した RC 部材の力学性能に関して、腐食鉄筋とコンクリートの付着性状を把握することは非常に重要である。腐食鉄筋の付着性状に関する既往の研究では、自然暴露試験や電食試験等の方法を用いて鉄筋を腐食させた試験体の付着試験より付着強度の評価が試みられている。しかし、それらは鉄筋の質量減少率という腐食状況を平均的に捉えた指標で付着強度を評価するに留まっており、定量的な評価とは言いがたい。その原因として、腐食をコントロールすることの難解さ、また腐食による鉄筋の断面減少や内部ひび割れなど付着性状に影響を及ぼすと考えられる因子が複数存在することが挙げられる。

本研究では、鉄筋が腐食した RC 部材の付着性状を定量的に評価するための足掛かりとして、腐食により鉄筋および鉄筋周囲に生じる現象が付着性状に及ぼす影響を明確にすることを目的とし、鉄筋の断面減少や内部ひび割れを模擬的に再現した実験を行い、検討を行う。

第 2 章では、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが付着性状に及ぼす影響について、切削により断面減少のばらつきを表現した鉄筋を用いた試験体の片引き試験を行った。

鉄筋のひずみ分布の推移より、局所的に断面減少した位置での局所的なひずみの進行が付着応力の低下に寄与することが確認されたが、断面減少が極端に大きい場合に限定されており、一般的には鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状へ及ぼす影響は小さいことが確認された。また、局所付着応力-すべり量関係をモデル化して付着解析を行い、得られた平均付着応力-荷重端すべり量関係および鉄筋のひずみ分布の推移が実験結果と概ね良好な対応を示しており、解析結果からも同様の結果を確認した。

第 3 章では、腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状、特に付着割裂性状に及ぼす影響について、スリットを用いて内部ひび割れを模擬した試験体の片引き試験を行った。

Tepfers の付着割裂に関する考察をもとに、健全試験体の実験値より鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする力の鉄筋方向とのなす角を 40.9° と決定した。さらに、内部ひび割れの進展状況に応じて算出した付着割裂強度により実験値を概ね評価できることを確認した。また、Tepfers の考察が適応できない内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合の付着割裂強度を、ひび割れの開口に伴い健全部に生じる曲げにより付着応力が発生すると仮定して構築した算定式より求め、算定式が実験値を概ね評価可能であることを示した。

鉄筋の腐食が RC 部材の付着性状に及ぼす影響

目 次

第 1 章 研究の背景と目的.....	1
第 2 章 腐食による断面減少が付着性状に及ぼす影響.....	3
2.1 はじめに.....	3
2.2 試験体.....	4
2.2.1 試験体概略.....	4
2.2.2 模擬腐食鉄筋.....	4
2.3 材料試験結果.....	7
2.3.1 コンクリート.....	7
2.3.2 鉄筋.....	7
2.4 実験方法.....	10
2.5 実験結果.....	11
2.5.1 平均付着応力-荷重端すべり量関係.....	11
2.5.2 鉄筋のひずみ分布.....	13
2.6 付着解析.....	15
2.6.1 局所付着応力-すべり量関係のモデル化.....	15
2.6.2 解析方法.....	16
2.6.3 平均付着応力-荷重端すべり量関係の解析結果.....	17
2.6.4 鉄筋のひずみ分布の解析結果.....	19
2.6.5 腐食試験体の解析例.....	21
2.7 まとめ.....	23
第 3 章 腐食による内部ひび割れが付着性状に及ぼす影響.....	24
3.1 はじめに.....	24
3.2 試験体.....	25
3.3 材料試験結果.....	28
3.3.1 コンクリート.....	28
3.3.2 鉄筋.....	29
3.4 実験方法.....	30
3.5 実験結果.....	31

3.6	付着割裂強度の評価方法.....	34
3.6.1	Tepfers の付着割裂に関する考察.....	34
3.6.2	片側のかぶり面に腐食による内部ひび割れが達した試験体の付着割裂強度	37
3.7	付着割裂強度の解析値と実験値の比較.....	39
3.8	付着長が付着性状に及ぼす影響.....	41
3.9	まとめ.....	44
第 4 章	結論.....	45
4.1	研究結果のまとめ.....	45
4.2	今後の研究課題.....	46
	参考文献.....	47

第1章 研究の背景と目的

我が国では鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物は長期間に渡って十分な耐久性を有するものとして現在までに数多く建造されている。しかしながら、長期間に渡る RC 構造物の供用に伴う材料劣化は不可避であり、構造物の耐力等の力学性能の低下は少なからず生じている。このような構造物は増加し続けており、今後も供用し続ける限りはいかなる状態でも補修・補強を行い力学性能を確保することが不可欠である。

近年、RC 構造物の補修・補強は今後もその対象となる構造物の増加が見込まれることから、維持管理に要する費用の確保が懸案となっており、補修・補強のシステムを体系化し、ライフサイクルコストを削減する必要性が唱えられている。そのためには、劣化の程度を把握することに加え、現有性能を適切に評価し、補修・補強の要否を的確に判断することが求められている。

ここで、RC 構造物の耐久性の低下に寄与する劣化現象として、塩害、中性化、アルカリ骨材反応などに代表されるコンクリートの劣化と、これらの劣化現象に起因する鉄筋の腐食が挙げられる。特に、鉄筋の腐食は RC 構造物のかぶりコンクリートの剥落といった社会的な問題の発端にもなっていることから、力学性能の低下に大きく影響している劣化因子として種々の研究が進められている。

鉄筋の腐食が RC 部材の力学性能に及ぼす影響に関する研究に着目すると、それらは実際に RC 部材を作製し、自然暴露試験や電食試験等の方法を用いて鉄筋を腐食させた後に加力実験を行うことにより検討を行っている。文献 1)では、部材の曲げ剛性に関しては、腐食による引張鉄筋自体の力学性能の低下に加えて、腐食鉄筋の付着すべりを考慮する必要があることが明らかとなっている。また、せん断耐荷性能に関しては、腐食鉄筋の付着が失われることに伴ってせん断耐荷機構に占めるアーチ機構の卓越が生じるとされている。このような結果より、腐食した RC 部材の力学性能に関して、腐食鉄筋の付着性状を把握することは非常に重要である。

腐食鉄筋とコンクリートの付着性状を対象とした研究について概観すると、前述の方法で鉄筋を腐食させた RC 部材の片引き試験や両引き試験より付着強度の評価が試みられている^{例えば2)}。それらは、鉄筋の質量減少率（試験区間における元の質量に対する腐食による減少質量の比率）を腐食の評価指標として主に用い付着強度の評価を行っている。結果として、鉄筋の質量減少率の増加に伴い、付着強度が低下することは確認できている。しかし、質量減少率は試験区間の腐食状況を平均的に捉えた指標であり、軸方向に対して不均一に進行する鉄筋の腐食による付着性状への影響の解明に言及できているとは言いがたい。原因の一つとして、自然暴露試験や電食試験等の実際に鉄筋を腐食させる方法では、腐食の程度や位置をコントロールすることの難解さが挙げられる。また、図 1.1 に示すように、腐食による鉄筋の断面減少、節の欠損および腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れといった付着力低下の要因とされる因子に加え、横補強筋があり腐食が軽微な場合には、腐食膨張により横拘束力が生じプレストレス効果が得られるといった付着力増大の要因とされる因子など、付着性状への影響因子が複数考えられる。これらの因子が混在し鉄筋が腐食した場合の付着メカニズムが複雑になることも、質量減少率で付着強度を評価するに留まっている原因として挙げられる。

そこで本研究では、鉄筋が腐食した RC 部材の付着性状を定量的に評価するための足掛かりとして、図 1.1 に示した付着力低下の要因とされる断面減少および内部ひび割れについて、それぞれの因子のみが付着性状に及ぼす状況を模擬的に再現し、それぞれの因子の付着性状への影響を明確にすることを目的とする。

第 2 章では、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが付着性状に及ぼす影響について検討を行う。鉄筋を切削することにより腐食鉄筋の断面減少を模擬する。断面を平均的に切削する部分と局所的に切削する部分を設け、切削の程度や位置をパラメータとすることで腐食による鉄筋断面積のばらつきを表現する。これらの鉄筋に対し、試験体の付着長を鉄筋径の 15 倍として片引き試験を行い、鉄筋の断面減少のばらつき、特に局所的な断面減少が全体の付着性状に及ぼす影響について検討する。

第 3 章では、腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状、特に付着割裂性状に及ぼす影響について検討を行う。スリットを用いて内部ひび割れを模擬し、スリットの長さや位置をパラメータとして、内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合も含め、種々の腐食状況を表現する。試験体の付着長を鉄筋径の 4 倍として片引き試験を行い、内部ひび割れが局所での付着割裂性状に及ぼす影響について検討する。さらには、より実部材に近い付着長の試験体の付着割裂性状について解析的な検討を行う。

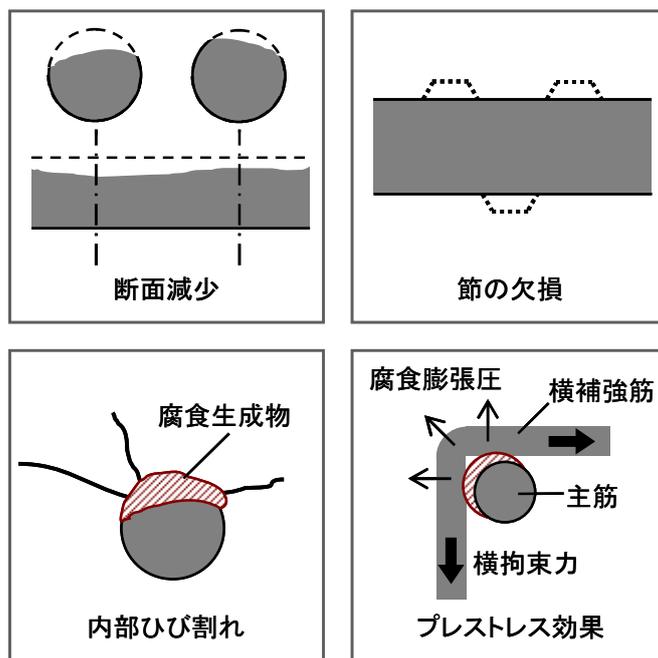


図 1.1 鉄筋の腐食による付着性状への影響因子

第2章 腐食による断面減少が付着性状に及ぼす影響

2.1 はじめに

前章で述べたように、鉄筋の腐食は軸方向に対して不均一に進行するため、質量減少率という試験区間の腐食状況を平均的に捉えた指標では付着性状の定量的な評価には結びついていないのが現状である。鉄筋の腐食による付着性状への影響因子である断面減少に着目すると、腐食により鉄筋軸方向に断面積のばらつきが生じた場合、腐食状況を平均的に捉えた指標での全体の付着性状の評価が可能か否かを把握することが重要となる。つまり、孔食のような局所的に著しい断面減少が生じた場合、その細部での現象が全体の付着性状にどの程度影響を及ぼすかを明らかにすることで、鉄筋が腐食した場合の付着性状を定量的に評価するための足掛かりになると考えられる。

そこで本章では、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが付着性状に及ぼす影響について検討を行う。鉄筋を切削することにより腐食鉄筋の断面減少を模擬する。断面を平均的に切削する部分と局所的に切削する部分を設け、切削の程度や位置をパラメータとすることで腐食による鉄筋断面積のばらつきを表現する。これらの鉄筋に対し、試験体の付着長を鉄筋径の15倍として片引き試験を行い、鉄筋の断面減少のばらつき、特に局所的な断面減少が全体の付着性状に及ぼす影響について検討する。

2.2 試験体

2.2.1 試験体概略

試験体の概略を図 2.1 に示す。試験体は断面が $128 \times 300\text{mm}$ 、高さが 288mm のコンクリートブロックの中心に異形鉄筋 D16 (SD345) を 1 本埋め込んだ片引き試験体である。かぶり厚は 56mm (鉄筋径の 3.5 倍)、付着長は 240mm (鉄筋径の 15 倍) とし、荷重端側および自由端側には付着絶縁区間として 24mm (鉄筋径の 1.5 倍) の塩ビ管を配置した。

試験体は全部で 11 体であり、1 体には健全鉄筋を用い、他の 10 体については、切削により腐食による鉄筋の断面減少を模擬した模擬腐食鉄筋を用いた。腐食状況の違いを表現するため、模擬腐食鉄筋の切削の程度や位置をパラメータとした。なお、模擬腐食鉄筋およびパラメータの詳細については次項に示す。

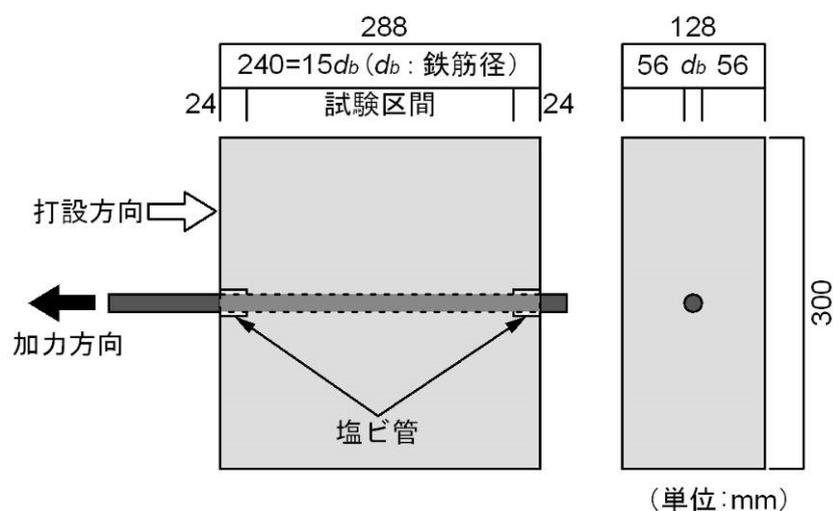


図 2.1 試験体概略

2.2.2 模擬腐食鉄筋

試験体に用いた模擬腐食鉄筋の概要を図 2.2 および写真 2.1 に示す。模擬腐食鉄筋は、試験区間全長を腐食想定区間として平面切削し、さらに局所的に曲面切削する部分を設けることで、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきを表現した。以後、平面切削により平均的な断面減少を模擬した部分を一次切削部、曲面切削により最大断面減少を模擬した部分を二次切削部と称する。なお、文献 1) の調査結果より、二次切削部の長さは腐食想定区間の約 15% となるように、 20mm 切削する区間を 2 ヶ所設けた。各試験体に用いた模擬腐食鉄筋は切削の程度や位置をパラメータとしており、各試験体に用いた鉄筋の諸元を表 2.1 に示す。なお、切削の程度については、鉄筋の公称断面積に対する断面積の減少率で計画した。

試験体 No.1 は健全鉄筋を、No.2 から No.4 は一次切削部のみを設けた鉄筋を用いた。一次切削部の断面減少率は 10%、20% および 30% の 3 水準とし、二次切削部については、文献 1) で調査された実構造物中の腐食鉄筋の断面積分布を基に、二次切削部の断面減少率 (最大断面減少率) が一次切削部の断面減少率 (平均断面減少率) の 2 倍となるものを基準とし、No.6 および No.7 については、それぞれ 4 倍および 6 倍とし、局所的な腐食の程度の違いが付着性状に及ぼす影響を

検討するようにした。また、二次切削部を設けた鉄筋については、No.5 から No.9 は試験区間の中央から荷重端側および自由端側それぞれに 40mm の位置が最深部となるように二次切削部を 2ヶ所設けた。また、片引き試験では荷重端側と自由端側では荷重の差が大きくなる。その荷重条件の違いを考慮するため、No.10 および No.11 は No.8 と断面減少率を統一し、二次切削部の位置を No.8 に対して、No.10 は荷重端側に 40mm、No.11 は自由端側に 40mm ずらした位置に設けた。

なお、腐食による付着切れを模擬するため、写真 2.2 のように切削面にはゴム製のテープを貼付し、切削による凹みを埋めることでコンクリートとの機械的な噛み合いを除去した。

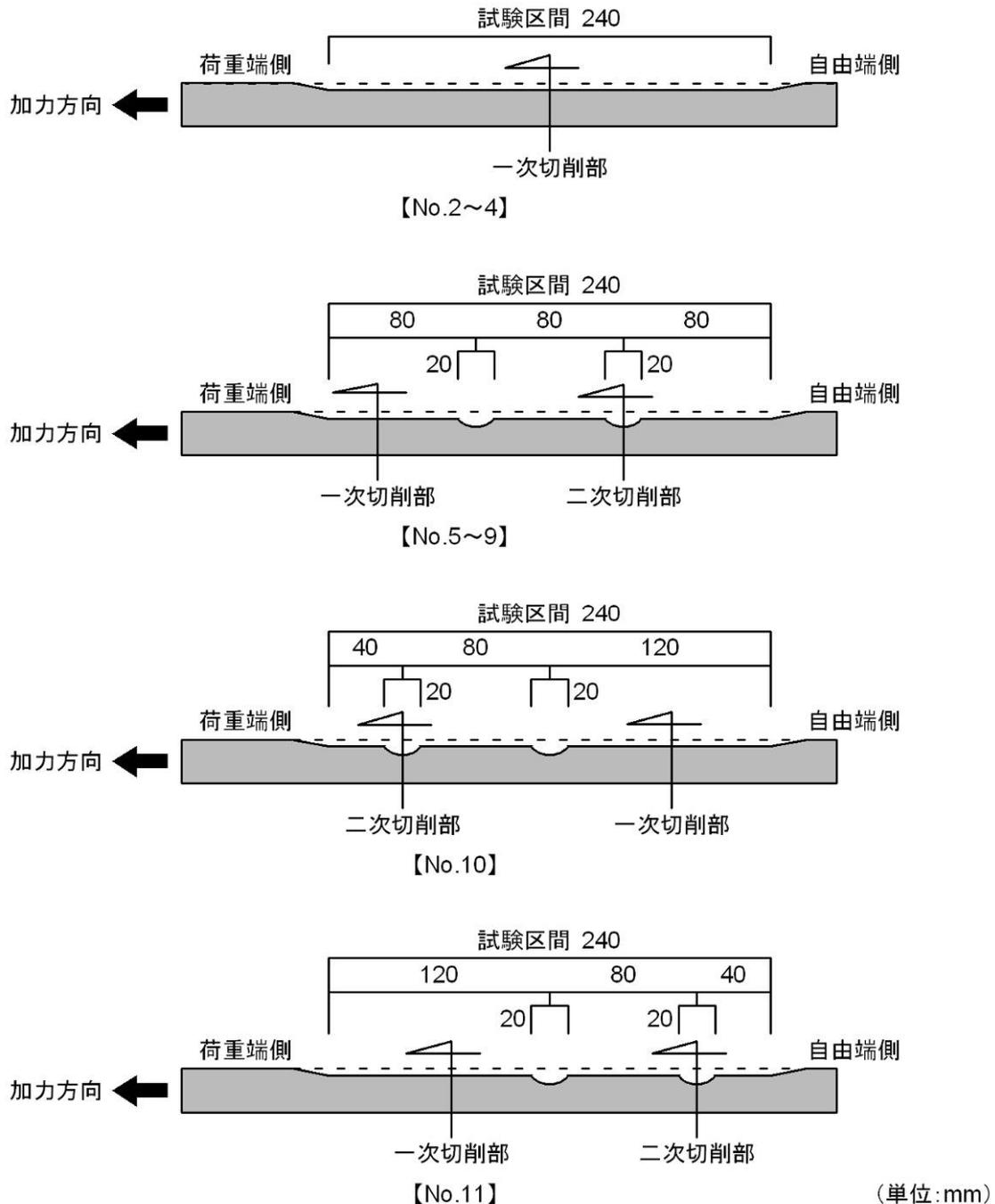


図 2.2 模擬腐食鉄筋概要

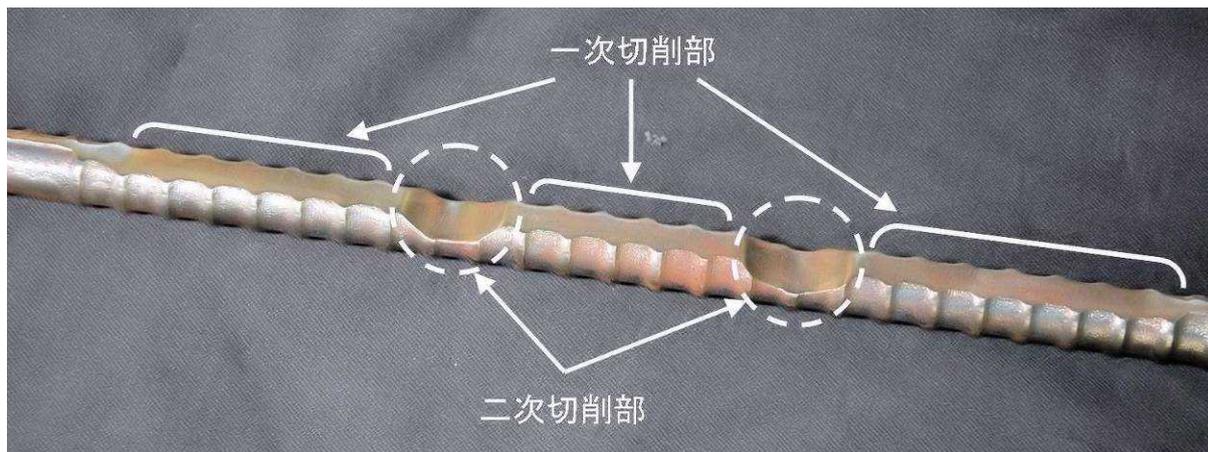


写真 2.1 模擬腐食鉄筋

表 2.1 各試験体に用いた鉄筋の諸元

試験体 No.	断面減少率		二次切削部の位置 (荷重端からの距離)
	一次切削部 (平均断面減少率)	二次切削部 (最大断面減少率)	
1	なし		
2	10%	なし	
3	20%	なし	
4	30%	なし	
5	10%	20%	中央部 (80mm, 160mm)
6	10%	40%	
7	10%	60%	
8	20%	40%	
9	30%	60%	
10	20%	40%	荷重端側 (40mm, 120mm)
11	20%	40%	自由端側 (120mm, 200mm)

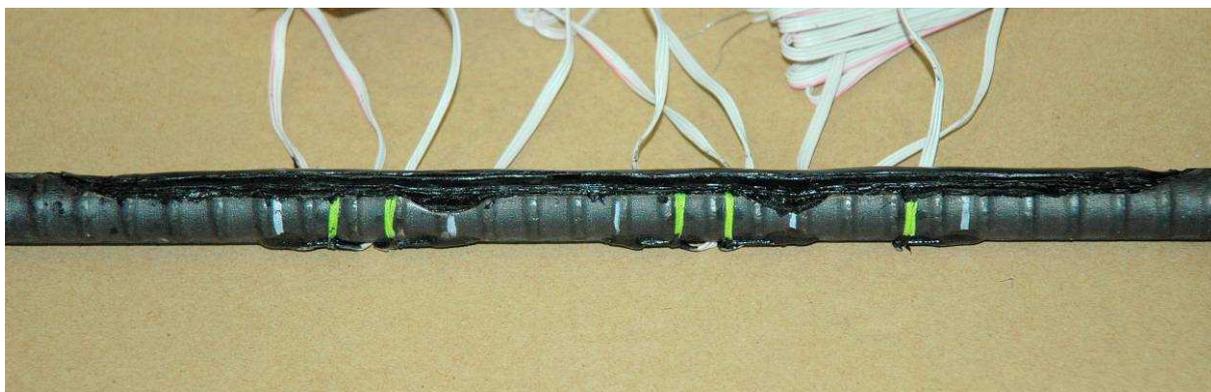


写真 2.2 切削面の付着切れ模擬

2.3 材料試験結果

2.3.1 コンクリート

コンクリートの配合計画およびフレッシュ性状を表 2.2 に示す。コンクリートの目標圧縮強度は 24N/mm^2 とした。コンクリートの材料試験の結果を表 2.3 に示す。材料試験は圧縮試験および割裂試験を加力試験の前後にそれぞれ 3 体ずつの計 6 体行った。なお、コンクリートの弾性係数は $1/3$ 割線係数とした。

表 2.2 コンクリートの配合計画およびフレッシュ性状

水セメント 比 (%)	単位量 (kg/cm^3)					スランプ (cm)	空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤		
72	185	257	924	881	2.57	15.8	4.5

表 2.3 コンクリートの材料試験結果

材齢	養生方法	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
50 日 (試験前)	現場封緘	23.6	2.52	26.3
		23.3	2.24	26.2
		22.9	2.35	26.4
56 日 (試験後)		23.5	2.50	26.1
		24.1	2.40	25.7
		25.4	2.15	20.8
平均		23.8	2.36	25.3

2.3.2 鉄筋

模擬腐食鉄筋の力学性状を評価するため、健全鉄筋および試験体 No.5 から No.9 に用いた模擬腐食鉄筋について引張試験を行った。試験方法を図 2.3 に示す。引張試験は試験区間と等しい間隔 (240mm) となるように鉄筋にターゲットを取り付け、変位計により区間伸びを計測した。また同時に、ゲージ長 2mm のひずみゲージにより局所ひずみの計測も行った。なお、ひずみゲージは健全鉄筋については、試験区間の中央部に表裏 1 枚ずつ計 2 枚貼付し、模擬腐食鉄筋については、図 2.4 に示すように、試験区間を 6 等分する位置に表裏 1 枚ずつ (切削面およびリブ上) 計 10 枚貼付した。

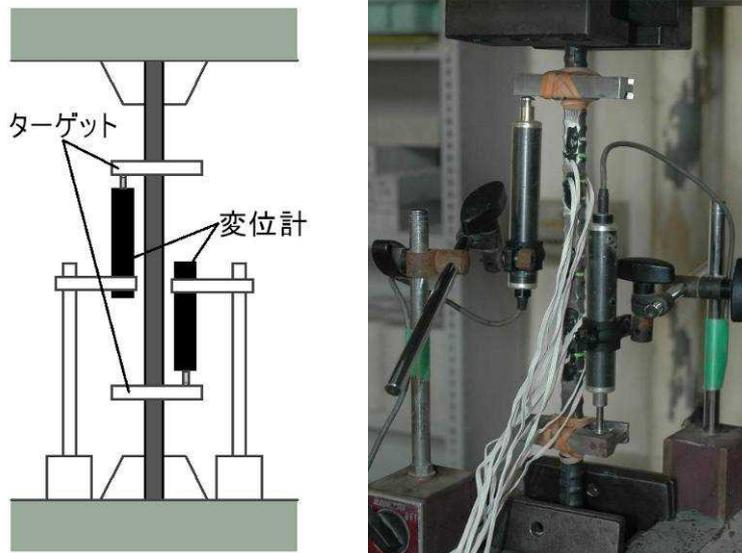


図 2.3 鉄筋の引張試験概要

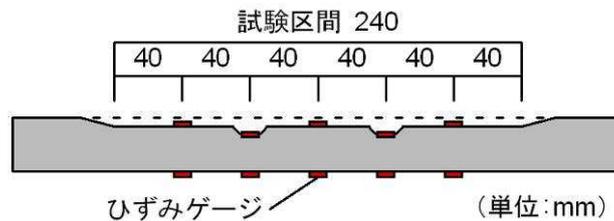


図 2.4 模擬腐食鉄筋のひずみゲージ貼付位置

健全鉄筋の引張試験の結果を表 2.4 に示す。また、引張試験より得られた模擬腐食鉄筋の応力-ひずみ関係（以下、 σ - ε 関係）を図 2.5 に示す。なお、縦軸は引張荷重を鉄筋の公称断面積で除した応力、横軸は変位計で計測した区間伸びを検長で除したひずみである。

また、図 2.5 では模擬腐食鉄筋の力学性状を解析的に評価することが可能かの考察も合わせて行った。解析には文献 1)の鉄筋の断面積分布を考慮した方法で行った。解析方法の概念を図 2.6 に示す。その解析方法では、微小区間 i の両端に引張力 P が作用した場合のひずみ ε_i を、素材自体の σ - ε 関係とその区間の断面積 A_i から求め、ひずみ ε_i と区間長 L_i （本論文では 1mm）の積から算出される微小区間での伸びを試験区間全体で積算して伸び ΔL を求められると仮定している。 ΔL を試験区間 L で除した値は、試験区間全体での平均ひずみとなる。1ヶ所でも局所的に引張強度に達した段階で、鉄筋が破断したと判断し解析を終了する。このモデルでは、弾性限界および引張強度は最小断面積に支配される。なお、素材自体の σ - ε 関係には、健全鉄筋の材料試験より得られた σ - ε 関係を適用した。

解析結果を図 2.5 に破線で示す。実験結果と比較すると、切削が大きくなるにつれて、弾性限界には差が見られてくる。模擬腐食鉄筋は片面を切削しているため、切削による断面減少が大きい部分では、断面の図心と加力軸がずれることにより曲げが生じ、同一断面内でも降伏している部分と弾性域にある部分が混在している。一方、解析では曲げの影響が考慮されないため弾性限界に差が生じたと考えられる。このように、若干の相違は見られるものの、全体としては解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示しており、模擬腐食鉄筋の力学性状を断面積分布を考慮して評価することが確認できた。

表 2.4 健全鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	公称断面積 (mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16 (SD345)	198.6	350.2	523.1	191.4
		354.5	506.6	191.4
		351.0	512.0	194.2
平均		351.9	513.9	192.3

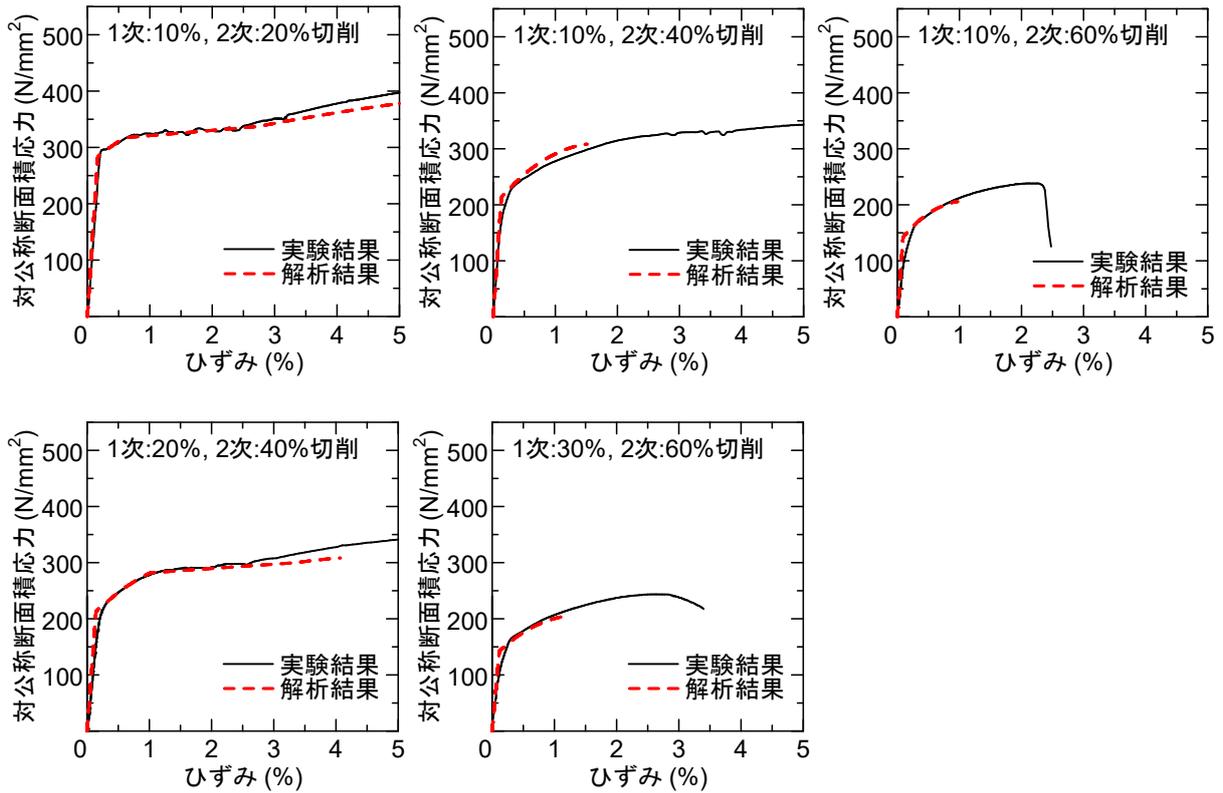


図 2.5 模擬腐食鉄筋の応力-ひずみ関係

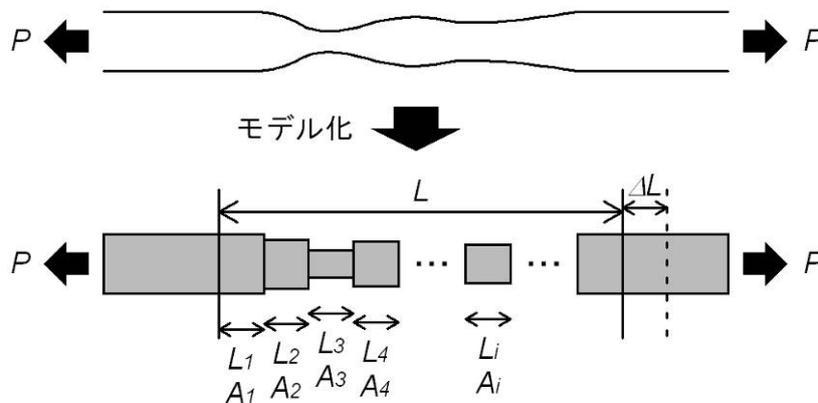


図 2.6 鉄筋力学性状の解析方法の概念

2.4 実験方法

加力方法を図 2.7 に示す。加力は試験体のかぶりを拘束しないようかぶりと同じ寸法の孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、鉄筋を単調に引抜くことにより行った。なお、試験体が割裂する際の横方向への変位を拘束しないようにするため、試験体と加力板の間にはテフロンシートを4枚に切って配置した。加力板およびテフロンシートの設置状況を写真 2.3 に示す。

計測項目は引張荷重、荷重端すべり量、自由端すべり量および鉄筋のひずみである。なお、鉄筋のひずみは、前節の図 2.4 で示した鉄筋の引張試験の際と同様に、ひずみゲージを貼付し計測した。

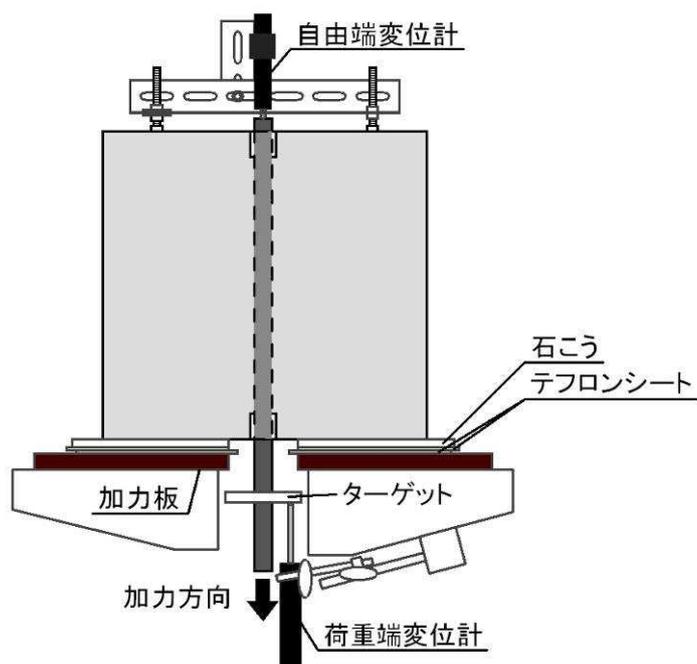
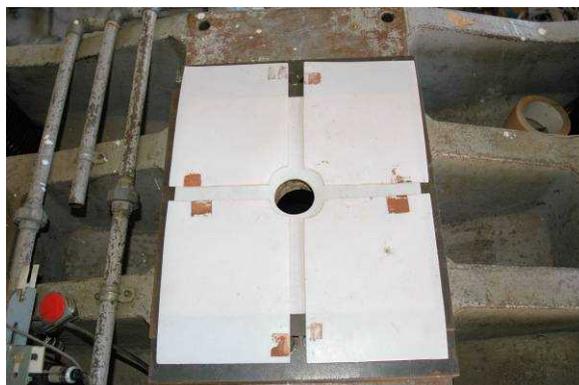


図 2.7 加力方法



【加力板】



【テフロンシート】

写真 2.3 加力板およびテフロンシート

2.5 実験結果

2.5.1 平均付着応力－荷重端すべり量関係

各試験体実験結果一覧を表 2.5 に、平均付着応力－荷重端すべり量関係を図 2.8 に示す。縦軸は引張荷重を公称周長と試験区間長で除した値であり、横軸は荷重端すべり量の計測値から試験区間外での鉄筋の伸びを除いた値である。なお、図中には平均付着応力 1N/mm^2 ごとにプロットを示しており、各プロット時点での試験区間の鉄筋ひずみ分布を次項にて示す。

各試験体の破壊形式について、No.1、No.7 および No.10 は付着割裂ひび割れが荷重端側から自由端側へ連鎖的に発生し、割裂破壊により試験を終了した。また、No.9 は二次切削部の鉄筋破断、その他の試験体は鉄筋の引抜けにより試験を終了した。なお、鉄筋の引抜けにより試験を終了した試験体の平均付着応力－荷重端すべり量関係については、鉄筋の引抜けにより荷重が低下し始めた時点までを示した。

実験結果に関して、平均的な断面減少が付着性状に及ぼす影響について No.1 から No.4 を比較すると、概ね断面減少率の増大に比例して、鉄筋の降伏が開始する付着応力の低下や初期剛性の低下が見られる。しかし、局所的な断面減少が付着性状に及ぼす影響について、二次切削部の断面減少率のみが異なる No.2、No.5、No.6 および No.7 を比較すると、No.2、No.5 および No.6 がほぼ同様の付着性状を示しているのに対し、二次切削部の断面減少率が最も大きい No.7 では付着応力の低下が顕著に見られる。したがって、付着応力が平均的な断面減少率に必ずしも依存しているとは言いがたい。また、二次切削部の位置のみが異なる No.8、No.10 および No.11 を比較すると、荷重端側に二次切削部を設けた No.10 の付着応力が他の 2 体に比べ低くなっており、断面分布の違いが全体の付着性状に影響を及ぼし得ることが確認できる。

表 2.5 実験結果一覧

試験体 No.	断面減少率		二次切削部 の位置	最大荷重 (kN)	付着強度 (N/mm^2)	破壊形式
	一次切削部	二次切削部				
1	なし		-	71.4	5.95	割裂破壊
2	10%	なし		83.3	6.94	鉄筋引抜け
3	20%	なし		68.5	5.71	鉄筋引抜け
4	30%	なし		67.1	5.59	鉄筋引抜け
5	10%	20%	中央部	81.8	6.81	鉄筋引抜け
6	10%	40%		73.3	6.11	鉄筋引抜け
7	10%	60%		55.1	4.60	割裂破壊
8	20%	40%		74.6	6.22	鉄筋引抜け
9	30%	60%		54.5	4.54	鉄筋破断
10	20%	40%	荷重端側	57.9	4.82	割裂破壊
11	20%	40%	自由端側	70.5	5.87	鉄筋引抜け

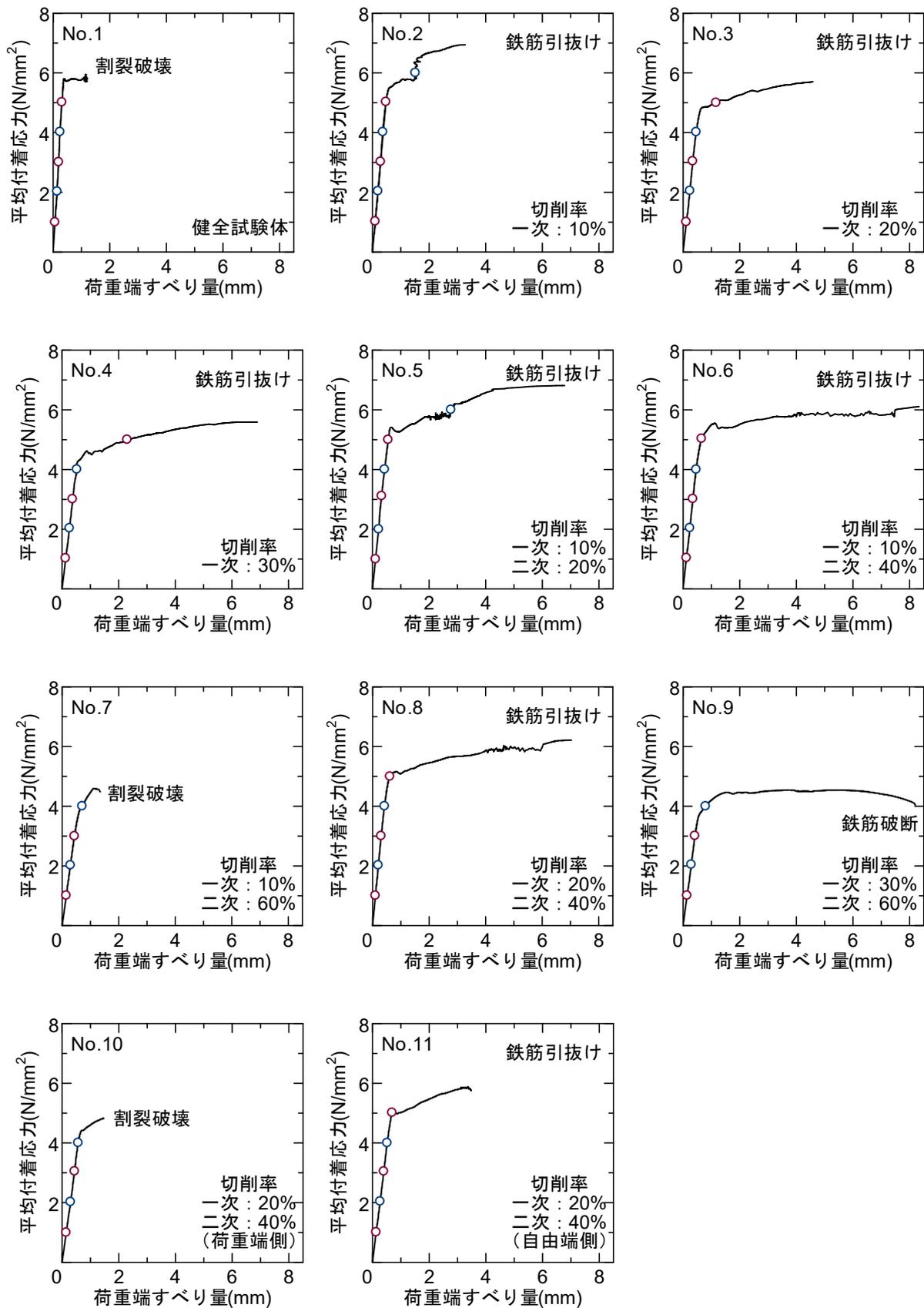


図 2.8 平均付着応力－荷重端すべり量関係

2.5.2 鉄筋のひずみ分布

前項の図 2.8 に平均付着応力 1N/mm^2 ごとにプロットを示した。各プロット時点での試験区間の鉄筋ひずみ分布の推移を図 2.9 に示す。ひずみは各計測位置の表裏に貼付したひずみゲージの計測値の平均値を用いた。なお、荷重端でのひずみはひずみゲージによる計測を行っていないため、引張荷重を荷重端の鉄筋断面積で除して鉄筋応力を求め、素材自体の σ - ϵ 関係より算出した値である。グラフの横軸は試験区間の位置を示し、左端が荷重端、右端が自由端である。また、図中の一点鎖線は鉄筋の降伏ひずみ (0.183%) を示している。

実験結果に関して、断面積が一様な No.1 から No.4 は荷重端側でのひずみの進行が顕著で、No.2 から No.4 は鉄筋が降伏している。また、同一の平均付着応力時のひずみは断面減少の増大に従い進行しており、すべりが生じやすくなることが示されている。断面積分布にばらつきのある試験体について、比較的断面減少の小さい No.5 や二次切削部が荷重端から離れた位置にある No.11 は、前述の No.1 から No.4 と同様に荷重端側でのひずみの進行が卓越し降伏に至っている。No.6 から No.10 については、二次切削部で鉄筋が降伏している。特に、二次切削部の断面減少の大きい No.7 および No.9、二次切削部が荷重端に近い位置にある No.10 については、他の試験体に比べ付着力が小さい段階で降伏し局所的にひずみが進行している。そのため、鉄筋が十分に引張力を負担できず、前項で述べたような他の試験体に比べ付着強度が低下したことに寄与したと考えられる。また、No.6 および No.8 については、付着力を十分に有した段階での降伏であり、また荷重端側のひずみも進行していることから、ひずみの進行が局所化せず付着強度は保持されたと考えられる。

これらの結果より、No.7 および No.9 のような局所的な断面減少が極端に進行した試験体については例外となるが、一般的には局所的な断面減少を有している試験体についても、ひずみの進行は際立って局所化はせず、付着強度の低下が見られなかった。よって、局所的に生じる断面減少、つまりは鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

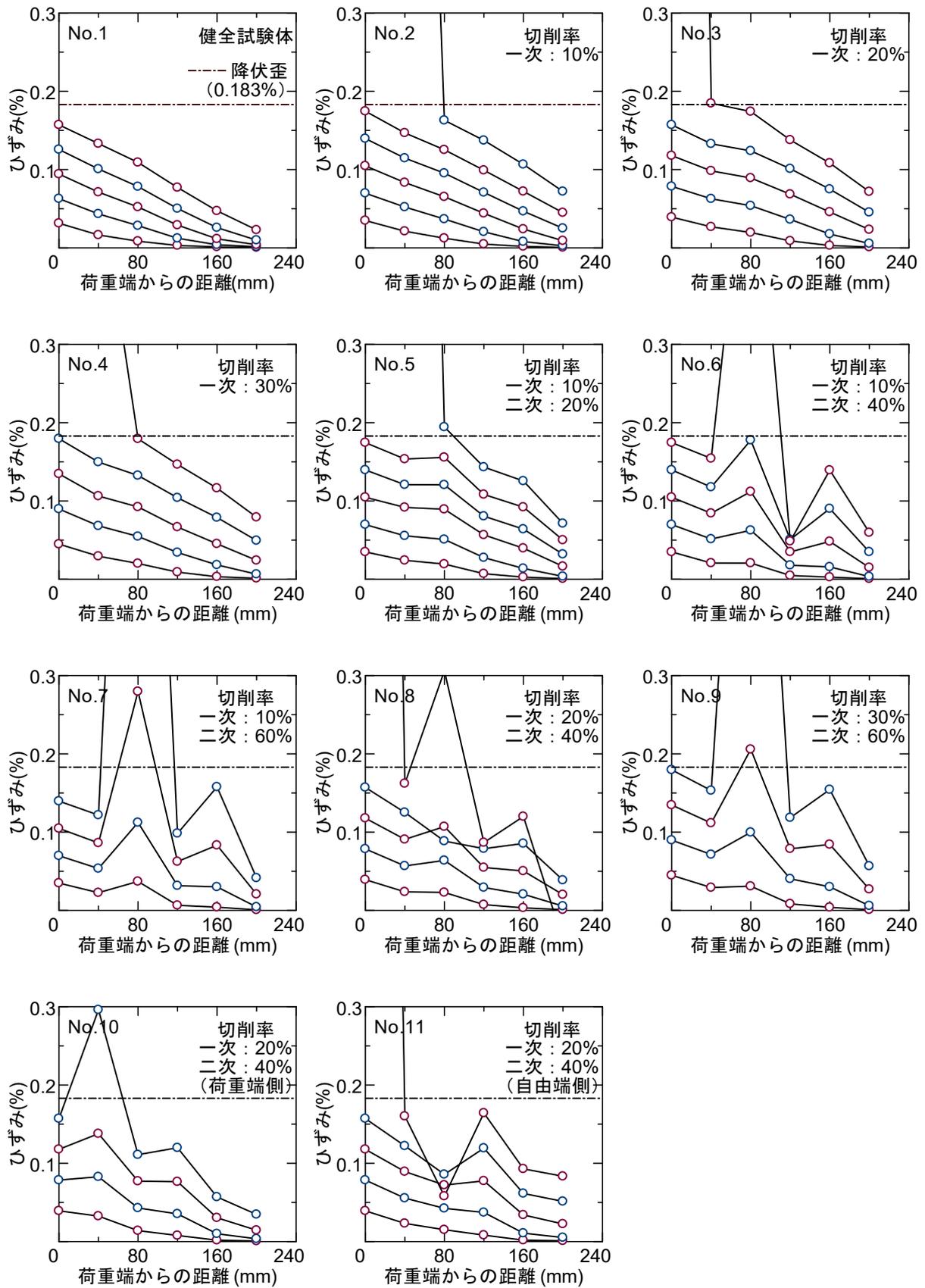


図 2.9 鉄筋のひずみ分布

2.6 付着解析

2.6.1 局所付着応力-すべり量関係のモデル化

健全試験体 (No.1) および模擬腐食試験体 (No.2 から No.4) について、鉄筋のひずみ分布より各ひずみゲージ位置で算出した局所付着応力-すべり量関係 (以下、 τ - s 関係) をそれぞれ図 2.10 に示す。なお、付着応力は以下の式(2.1)により求められる。鉄筋の応力分布は鉄筋ひずみと素材自体の σ - ε 関係を用いて算出しており、鉄筋降伏以後の付着応力の算出も可能となっている。

$$\tau = \frac{1}{\phi} A_s \frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\Delta x} \quad (2.1)$$

ここで、

τ : 付着応力

ϕ : 鉄筋の公称周長 (D16 : 50mm)

A_s : 鉄筋の公称断面積 (D16 : 198.6mm²)

$\frac{\sigma_i - \sigma_{i-1}}{\Delta x}$: 応力分布の勾配

また、すべり量は自由端から各ひずみゲージ位置までのひずみの積分値を自由端すべり量に加えることで算出した。

健全試験体の τ - s 関係について、最も自由端側のひずみゲージ位置 (荷重端から 200mm) での τ - s 関係は、他の位置での τ - s 関係よりも付着応力が大きく、軟化域に至っていなかった。また、最も荷重端側のひずみゲージ位置 (荷重端から 40mm) での τ - s 関係は、他の位置での τ - s 関係よりも付着応力が小さく、残りの 3 点 (荷重端から 80mm, 120mm および 160mm) での τ - s 関係はほぼ同様の傾向を示していた。

模擬腐食試験体の τ - s 関係については、各試験体ともに荷重端から 40mm の位置では明瞭なデータが得られず、また 200mm の位置では健全試験体と同様に付着応力が軟化域に至っていなかったため、図 2.10 には残りの 3 点 (荷重端から 80mm, 120mm および 160mm) での τ - s 関係のみを示しているが、試験体やひずみゲージ位置によって τ - s 関係にはばらつきが見られる。

付着解析を行う際に用いる健全試験体および模擬腐食試験体の τ - s 関係を図 2.10 に破線で示すようにそれぞれモデル化した。モデルには式(2.2)および式(2.3)に示す六車らのモデル³⁾を用いた。

$$\tau_{x1} = e \cdot \frac{\log[(e-1)s_{x1} + 1]}{(e-1)s_{x1} + 1} \quad (2.2)$$

$$\tau_{x1} = \frac{\tau_x}{\tau_{\max}}, \quad s_{x1} = \frac{s_x}{s_{\tau=\tau_{\max}}} \quad (2.3)$$

なお、付着強度 τ_{\max} および付着強度時のすべり量 $s_{\tau=\tau_{\max}}$ の値については、荷重端から 80mm, 120mm および 160mm のひずみゲージ位置での τ_{\max} および $s_{\tau=\tau_{\max}}$ の平均値を用いた。模擬腐食試験体については、試験体やひずみゲージ位置によりばらつきがあるが、模擬腐食鉄筋の τ - s 関係に鉄筋の断面減少の程度およびひずみは影響しないものと仮定して平均値を用いることとした。健全試験体および模擬腐食試験体の局所付着性状の諸元を表 2.6 に示す。

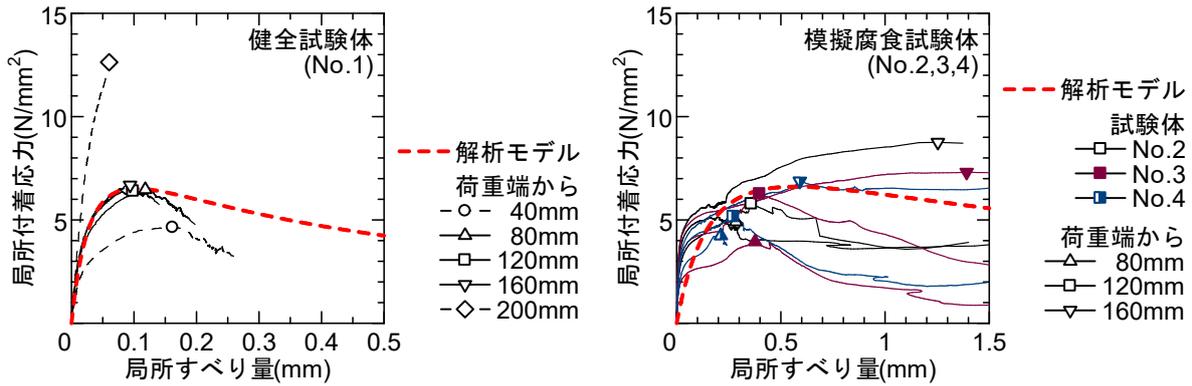


図 2.10 健全試験体および模擬腐食試験体の局所付着応力-すべり量関係

表 2.6 健全試験体および模擬腐食試験体の局所付着性状諸元

試験体種類	付着強度 τ_{max} (N/mm ²)	付着強度時すべり量 $s_{\tau=τ_{max}}$ (mm)
健全試験体 (No.1)	6.52	0.103
模擬腐食試験体 (No.2~No.4)	6.61	0.571

2.6.2 解析方法

付着解析の方法を以下に示す。

- ① 図 2.11 に示すように、鉄筋の任意の位置において、 i 番目の微小区間 Δx を考え、その区間の自由端側に任意のすべり量 s_{i-1} および任意の鉄筋引張力 P_{i-1} を与える。
- ② この区間での付着応力を前項でモデル化した τ - s 関係より求める。
- ③ 微小区間 Δx での付着応力は一定であるとみなし、その区間終端での鉄筋引張力 P_i を式(2.4)より求める。なお、鉄筋の周長 ϕ については、健全鉄筋は公称周長を用い、模擬腐食鉄筋はその区間の鉄筋断面が真円であると仮定し、算出した値を用いる。

$$P_i = P_{i-1} + \tau_{bi} \cdot \phi_i \cdot \Delta x \quad (2.4)$$

- ④ 式(2.5)より、その区間終端での鉄筋のひずみ ε_{bi} を求め、式(2.6)より、その区間終端でのすべり量 s_i を求める。なお、その区間の鉄筋の断面積 A_i は、健全鉄筋は公称断面積を用い、模擬腐食鉄筋は断面積分布に対応した値を用いる。また、鉄筋のひずみ ε_{bi} は、素材自体の σ - ε 関係より得られる値を用いる。

$$\varepsilon_{bi} = g(P_i / A_i) \quad (2.5)$$

$$s_i = s_{i-1} + \frac{\varepsilon_{bi} + \varepsilon_{b(i-1)}}{2} \Delta x \quad (2.6)$$

⑤ 次の区間について、②に戻り同様の計算を行う。

これを通常の片引き試験に適用させるためには、自由端での鉄筋引張力を $P_0=0$ 、鉄筋すべりを任意の値 $s_0=s_f$ とし、自由端から荷重端まで逐次計算を行えばよい。また、自由端の鉄筋すべり量 s_f を漸増させ、繰り返し計算を行うことで、平均付着応力－荷重端すべり量関係を得られる。なお、平均付着応力は荷重端の鉄筋引張力を鉄筋の公称周長と付着長で除すことで求められる。

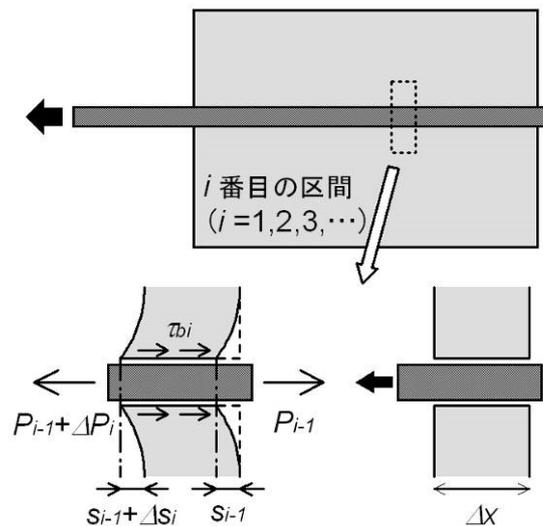


図 2.11 微小区間の力の釣り合い

2.6.3 平均付着応力－荷重端すべり量関係の解析結果

各試験体について、前項で示した方法により付着解析を行い、得られた平均付着応力－荷重端すべり量関係を図 2.12 に示す。解析結果を破線で、実験結果を実線で示してある。なお、解析については、力の釣り合いが保持できなくなった時点を鉄筋の引抜け、または鉄筋の一部が引張強度に達した時点を鉄筋の破断と判定し解析を終了した。No.7 および No.9 は二次切削部の鉄筋破断、その他の試験体は鉄筋の引抜けにより解析を終了した。

いずれの試験体においても、解析結果の剛性が実験結果の剛性よりもやや大きくなっているが、概ね解析結果と実験結果は良好な対応を示している。また、鉄筋の降伏以後の挙動については、解析では付着強度を示した時点で鉄筋の引抜けが生じている。一方、実験では、鉄筋がひずみ硬化域に達し、さらに付着応力が増加している試験体もありやや解析とは相違が見られる。本解析では鉄筋の降伏以前以後の区別をせずに τ - s 関係をモデル化したものを用いているが、降伏後も降伏前と同じ τ - s 関係を有しているかについては明らかではない。

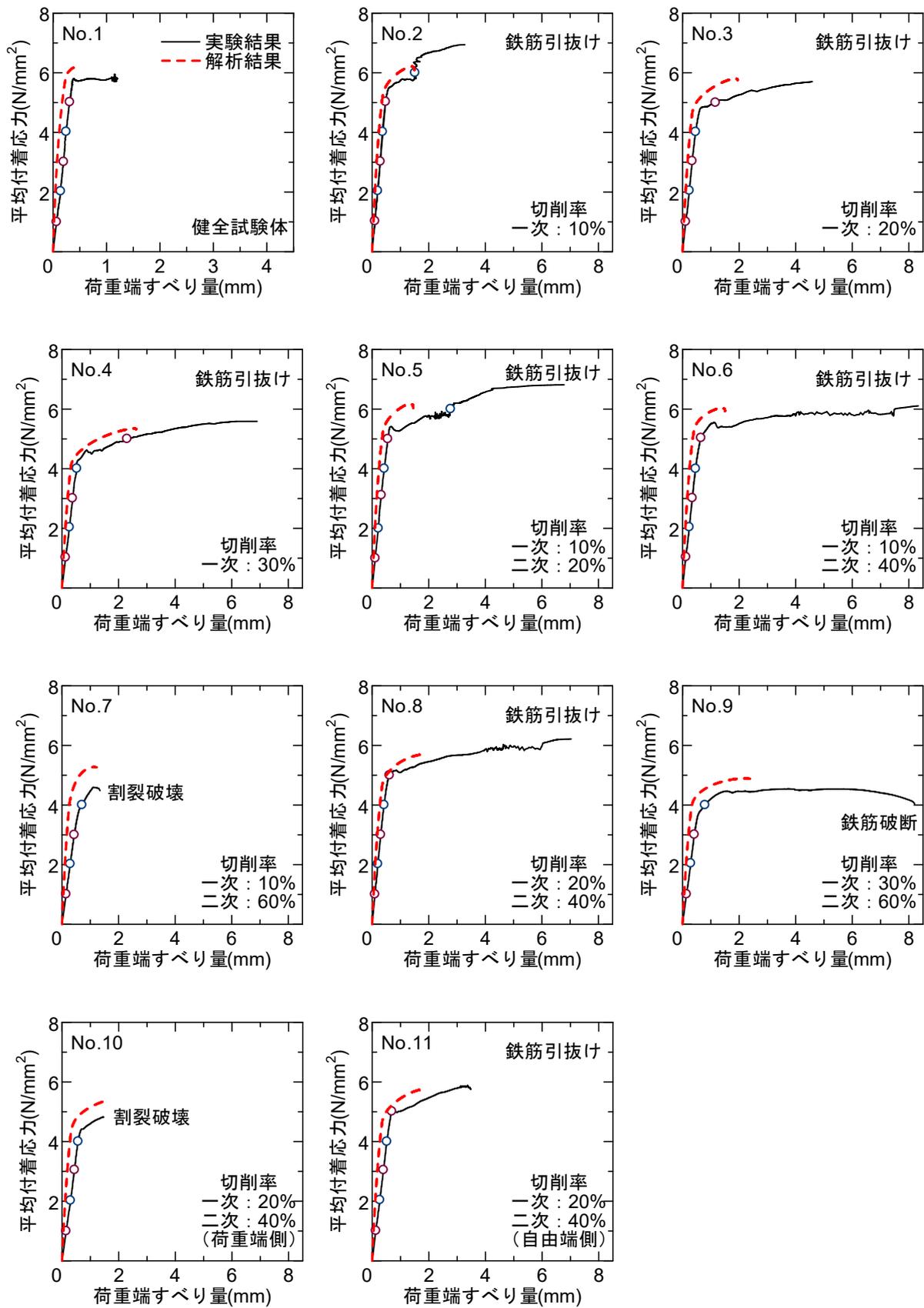


図 2.12 平均付着応力－荷重端すべり量

2.6.4 鉄筋のひずみ分布の解析結果

前項の図 2.12 の実験結果に示したプロット時点での鉄筋のひずみ分布の推移と、プロット時点と同じ付着応力時のひずみ分布の解析結果を図 2.13 に示す。実験結果はプロットで示し、解析結果は実線で示した。

一次切削部については、解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示している。一方、二次切削部については、段階が進むにつれ、解析結果よりも実験結果のひずみが大きくなる傾向が見られ、特に二次切削部の断面減少率の大きい試験体ほど顕著に見られる。これは模擬腐食鉄筋の引張試験の際と同様に、実験結果では曲げが生じることにより、同一断面内に降伏した部分と弾性域が存在するのに対し、解析結果には曲げの影響が反映されていないことが原因の一つとして考えられる。しかし、概ねの挙動は解析より追従することができており、No.7 や No.9 のように局所的な断面減少が大きい試験体では、二次切削部でのひずみの局所的な進行が解析からも示されており、付着強度の低下に寄与したと考えられる。また、その他の試験体については、荷重端側でひずみが顕著に進行しており、局所的な断面減少を有していても、ひずみの進行は局所化せず付着強度が保持されたことが示されている。

よって、局所的な断面減少が極端に進行した試験体については例外となるが、一般的には局所的な断面減少を有している試験体についても、ひずみの進行は際立って局所化はせず、付着強度の低下には寄与していないとの結果が得られた。よって、局所的に生じる断面減少、つまりは鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状に及ぼす影響は小さいことが解析的からも示された。

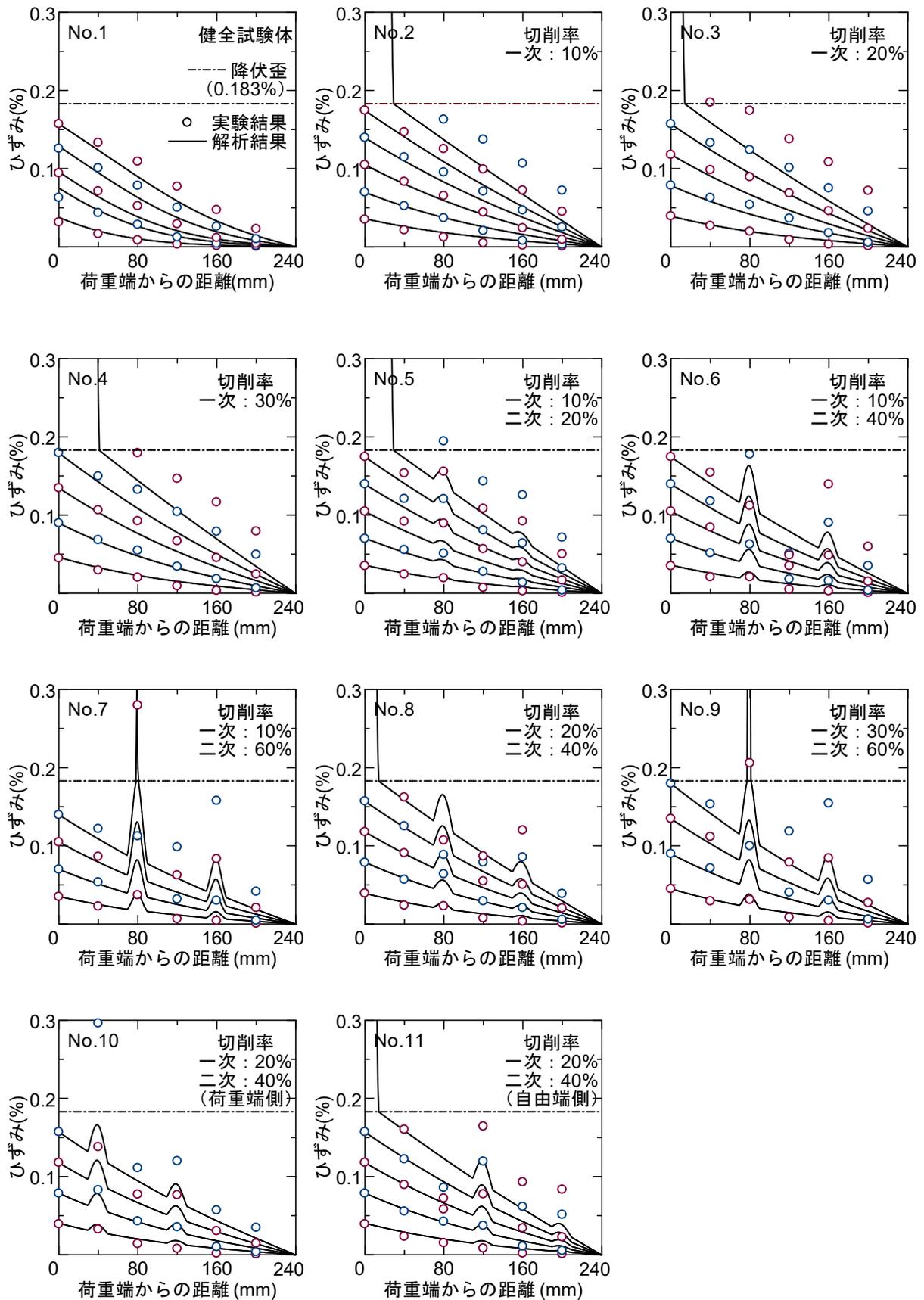


図 2.13 鉄筋のひずみ分布

2.6.5 腐食試験体の解析例

本解析を、実際に腐食により鉄筋の断面減少が生じている試験体について行った。解析の対象とした試験体には、文献 4)で電食試験により鉄筋を腐食させた試験体の中から、鉄筋の局所的な断面減少が顕著に見られた試験体を用いた。試験体の諸元を表 2.7 に、鉄筋の断面積分布を図 2.14 に示す。鉄筋の断面積は文献 1)に示すように 3D スキャナを使用して計測されており、平均断面減少率は 24.2%、最大断面減少率は 35.8%である。なお、計測装置は鉄筋を固定する部分の計測が不可能なため、鉄筋両端部のおよそ 30mm の区間は断面積分布のデータが計測されていない。そこで、図 2.15 に示すように、腐食区間の断面積分布の傾向を模擬し、且つ平均断面積に変化が生じないように、鉄筋両端部の断面積分布を仮定した。なお、 τ - s 関係には本節で前述のモデル化した模擬腐食鉄筋の τ - s 関係を適応させて解析を行った。

表 2.7 解析例の試験体諸元

付着長 (mm)	かぶり (mm)	コンクリート		鉄筋			
		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	鉄筋径 鉄筋規格	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
480	40	24.8	26.7	D16 SD490	529.0	709.6	201.0

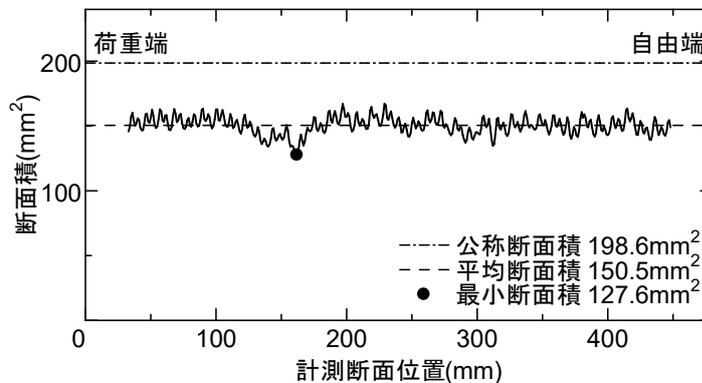


図 2.14 腐食した鉄筋の断面積分布

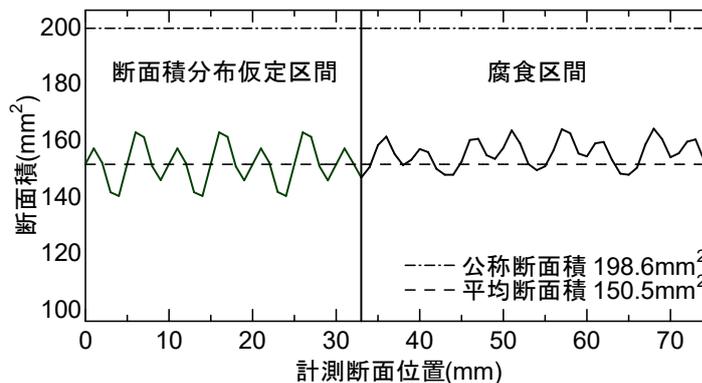
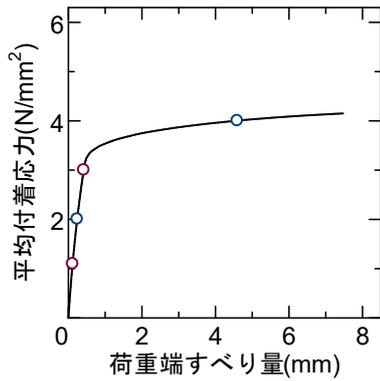


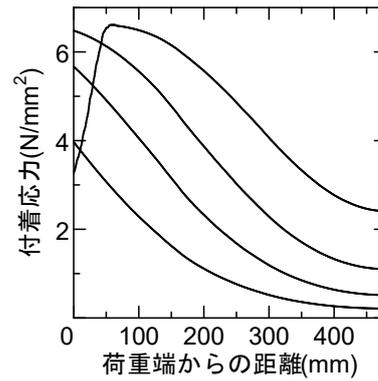
図 2.15 断面積分布の仮定

解析より得られた平均付着応力-荷重端すべり量関係を図 2.16 に示し、平均付着応力 $1\text{N}/\text{mm}^2$ ごとにプロットで示した時点での、試験区間内の付着応力分布、すべり量分布および鉄筋のひずみ分布の推移も合わせて示す。

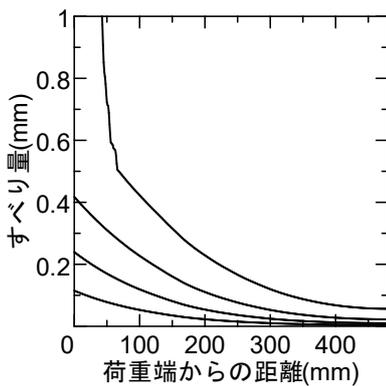
模擬腐食試験体より得られた結果と同様に、実際の腐食試験体においても、荷重端の鉄筋ひずみの進行によって全体の付着性状が支配されており、鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが付着性状に及ぼす影響が小さいことが確認できる。



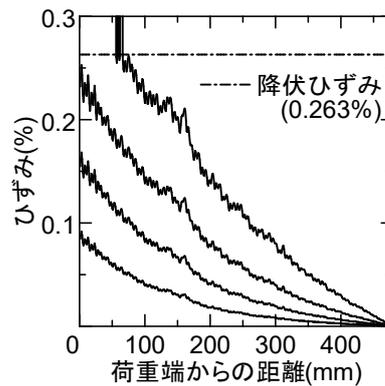
【平均付着応力-荷重端すべり量関係】



【付着応力分布】



【すべり量分布】



【鉄筋のひずみ分布】

図 2.16 腐食試験体の解析例

2.7 まとめ

腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつき、特に局所的な断面減少が全体の付着性状に及ぼす影響について検討を行った。鉄筋を切削することにより腐食鉄筋の断面減少を模擬した。断面を平均的に切削する部分と局所的に切削する部分を設け、切削の程度や位置をパラメータとすることで腐食による鉄筋断面積のばらつきを表現した。これらの鉄筋に対し、試験体の付着長を鉄筋径の15倍として片引き試験を行い、実験的および解析的な考察より得られた知見を以下に示す。

- (1) 模擬腐食鉄筋の断面積分布を考慮した解析と引張試験の結果を比較した結果、解析より模擬腐食鉄筋の力学特性を概ね把握できており、模擬腐食鉄筋の断面積分布を考慮した解析が付着解析へも適応可能であることを確認した。
- (2) 鉄筋のひずみ分布の推移より、局所的に断面減少した位置での局所的なひずみの進行が付着応力の低下に寄与することが確認されたが、断面減少が極端に大きい場合に限られており、一般的には鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状へ及ぼす影響は小さいことを確認した。
- (3) 健全試験体および模擬腐食試験体の局所付着応力ーすべり量関係をそれぞれモデル化して付着解析を行い、平均付着応力ーすべり量関係およびひずみ分布について、概ね実験結果と良好な対応を得た。
- (4) 実際の腐食試験体に対しても付着解析を行い、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状に及ぼす影響は小さいことを確認した。

以上より、腐食による鉄筋の断面減少が付着性状に及ぼす影響について、実験的および解析的な検討より、鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状に及ぼす影響は小さいことが示された。しかし、前章で述べたが、鉄筋の腐食による付着性状への影響因子は断面減少以外にも複数考えられる。特に、鉄筋周辺のコンクリートに生じる内部ひび割れは、腐食による鉄筋の断面減少に伴い生じる腐食生成物の膨張によって起こり、鉄筋に引張力が作用し、ひび割れがかぶり面へ進展することで割裂破壊を引き起こされることから、付着割裂性状へ及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。一概に、断面減少の増大に従い、内部ひび割れも進展するとは言いきれないが、本章で検討した断面減少との関連性は大きいと考えられる。

そこで次章では、腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状、特に付着割裂性状に及ぼす影響について検討を行う。スリットを用いて内部ひび割れを模擬する。スリットの長さや位置をパラメータとして、内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合も含め、種々の腐食状況を表現する。試験体の付着長を鉄筋径の4倍として片引き試験を行い、内部ひび割れが局所での付着割裂性状に及ぼす影響について検討する。さらには、より実部材に近い付着長の試験体の付着割裂性状について解析的な検討を行う。

第3章 腐食による内部ひび割れが付着性状に及ぼす影響

3.1 はじめに

前章では、腐食による鉄筋の断面減少が付着性状に及ぼす影響について、実験的および解析的な検討より、鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状に及ぼす影響は小さいことが示された。しかし、第1章でも述べたが、鉄筋の腐食による付着性状への影響因子は断面減少以外にも複数考えられる。特に、鉄筋周辺のコンクリートに生じる内部ひび割れは、腐食による鉄筋の断面減少に伴い生じる腐食生成物の膨張によって起こり、鉄筋に引張力が作用し、ひび割れがかぶり面へ進展することで割裂破壊が引き起こされることから、付着割裂性状に及ぼす影響は非常に大きいと考えられる。一概に、断面減少の増大に従い、内部ひび割れも進展するとは言いきれないが、前章で検討した断面減少との関連性は大きいと考えられる。

鉄筋の腐食による内部ひび割れに着目した研究⁴⁾では、割裂面に付着した鉄筋の錆汁を画像解析で読み取り、内部ひび割れの進展状況を調査している。その結果より、付着強度の評価を試みているが、実験結果との比較値の上限を示すに留まっており、定量的な評価がされているとはいえない。実際に鉄筋を腐食させる方法では、内部ひび割れの進展の制御が不可能であることや、画像解析による内部ひび割れの判断基準があいまいであることが定量的な評価に至っていない原因と考えられる。また、文献⁵⁾および⁶⁾では、内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した試験体が報告されている。このような試験体は、内部ひび割れの進展状況を考慮でき、付着割裂性状の評価に有用とされている Tepfers の付着割裂強度算定式⁷⁾（詳細は 3.6.1 で後述）で評価をすると、理論上付着応力を有していないことになるが、実験ではある程度の付着応力を有するという結果が得られている。したがって、内部ひび割れが付着性状に及ぼす影響の把握に加え、片側のかぶりが内部ひび割れで割裂した RC 部材の評価方法の構築が必要と考えられる。

そこで本章では、腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状、特に付着割裂性状に及ぼす影響の検討を行う。スリットを用いて内部ひび割れを模擬し、スリットの長さや位置をパラメータとして、内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合も含め、種々の腐食状況を表現する。試験体の付着長を鉄筋径の4倍として片引き試験を行い、内部ひび割れが局所での付着割裂性状に及ぼす影響について検討する。さらには、より実部材に近い付着長の試験体の付着割裂性状について解析的な検討を行う。

3.2 試験体

試験体の概略を図 3.1 に示す。試験体はコンクリートブロックの中心に異形鉄筋 D16 (SD390) を 1 本埋め込んだ片引き試験体である。付着長は 64mm (鉄筋径の 4 倍) とし、荷重端側および自由端側には付着絶縁区間として 24mm (鉄筋径の 1.5 倍) の塩ビ管を配置した。

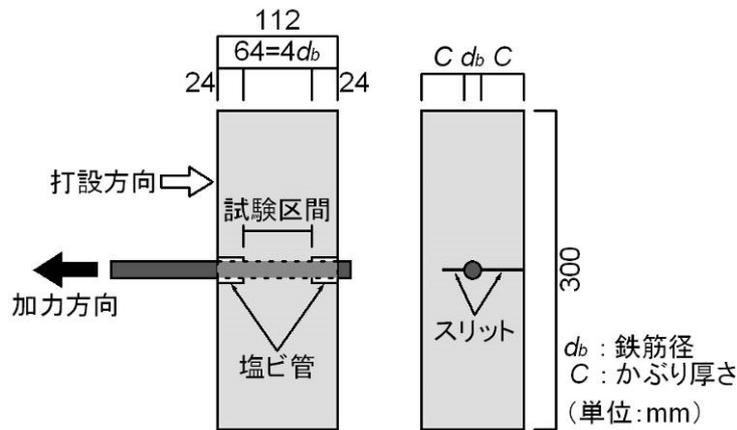


図 3.1 試験体概略

試験体の一覧を表 3.1 に示す。実験のパラメータは、鉄筋径に対するかぶり厚比 C/d_b 、腐食により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れを模擬したスリットの寸法および配置位置とし、表中には試験体断面のスリットの配置概略図も合わせて示した。なお、かぶり厚比 C/d_b は 1.5 (かぶり厚 C : 24mm)、2.5 (C : 40mm) および 3.5 (C : 56mm) の 3 水準としている。また、スリットの寸法および配置位置については、スリットを配置しない健全試験体 (以下、NS シリーズ)、片側のかぶりにのみスリットを配置した試験体 (以下、OS シリーズ) および両側のかぶりにスリットを配置した試験体 (以下、BS シリーズ) と分類した。

NS シリーズについては、かぶり厚比 C/d_b を 1.5、2.5 および 3.5 の 3 種類とした。

OS シリーズについては、かぶり厚比 C/d_b を 2.5 のみとし、鉄筋側からかぶり厚の半分の長さ (20mm) のスリットを配置した試験体 (OS1)、かぶり厚と同じ長さ (40mm) のスリットを配置し、片側のかぶりを分断した試験体 (OS2) およびかぶり面側からかぶり厚の半分の長さのスリットを配置した試験体 (OS3) の 3 種類とした。

BS シリーズについては、OS シリーズのスリットを両側のかぶりに組み合わせた試験体 (BS1 から BS4) と、割裂面に対して 30° の角度をなすように 2 方向にかぶり厚の半分の長さのスリットを配置した試験体 (BS5) とした。かぶり厚比 C/d_b については、BS3 試験体のみ 3 水準とし、その他の試験体は 2.5 のみとした。なお、BS3 試験体名の添え字 L および R については、OS1 試験体のスリットの配置を取り入れているかぶり側において、かぶり厚比 C/d_b が 2.5 の BS3_C25 試験体を基準試験体として、スリットを配置しない健全部分の長さ (20mm) が基準試験体と等しくなるように統一した試験体を L、鉄筋側から配置したスリットの長さがかぶり厚の半分の長さとなるように統一した試験体を R として分類した。また、BS5 試験体名の添え字 A および H については、図 3.2 に示すように、試験区間全長にスリットを配置した試験体を A、試験区間長の半分の長さのスリットを荷重端側と自由端側に交互に配置した試験体を H として分類した。

試験体はNSシリーズおよびOSシリーズは各3種類ずつ、BSシリーズは10種類の合計16種類で、各種3体ずつの合計48体の試験体を作製した。スリットの配置方法の例として、BS2_C25試験体の型枠写真を写真3.1に示す。スリットは写真のように、荷重端側および自由端側に設けた付着絶縁区間にも配置し、鉄筋側のスリットは鉄筋と底板、かぶり面側のスリットは側板と底板に接着剤で固定し、コンクリートの打設を行った。

表 3.1 試験体一覧

試験体名	C/d_b (かぶり厚)	試験体断面 (単位: mm)	試験体名	C/d_b (かぶり厚)	試験体断面 (単位: mm)
NS_C15	1.5 (24mm)		BS3_C15L	1.5 (24mm)	
NS_C25	2.5 (40mm)		BS3_C15R		
NS_C35	3.5 (56mm)		BS3_C25	2.5 (40mm)	
OS1_C25	2.5 (40mm)		BS3_C35L	3.5 (56mm)	
OS2_C25			BS3_C35R		
OS3_C25			BS4_C25	2.5 (40mm)	
BS1_C25			BS5_C25A		
BS2_C25			BS5_C25H		

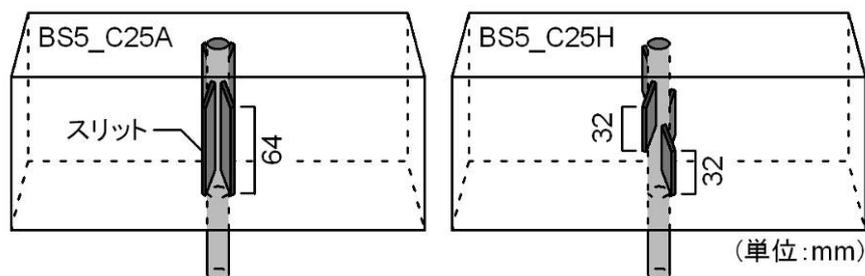


図 3.2 BS5 試験体のスリット配置



写真 3.1 型枠写真

3.3 材料試験結果

3.3.1 コンクリート

コンクリートの配合計画およびフレッシュ性状を表 3.2 に示す。コンクリートの目標圧縮強度は 21N/mm^2 とした。コンクリートの材料試験の結果を表 3.3 に示す。材料試験は圧縮試験，割裂試験および曲げ試験を加力試験の前後にそれぞれ3体ずつの計6体行った。曲げ強度については，写真 3.2 に示すように3点曲げ試験より算出した。なお，コンクリートの弾性係数は $1/3$ 割線係数とした。

表 3.2 コンクリートの配合計画およびフレッシュ性状

水セメント 比 (%)	単体量 (kg/cm^3)					スランプ (cm)	空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤		
72	185	257	924	881	2.57	18.0	4.5

表 3.3 コンクリートの材料試験結果

材齢	養生方法	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	曲げ強度 (N/mm^2)	弾性係数 (kN/mm^2)
68 日 (試験前)	現場封緘	23.5	2.62	5.17	22.1
		25.2	2.67	5.20	29.3
		25.2	2.63	5.73	30.4
79 日 (試験後)		24.8	2.53	4.98	22.4
		24.6	2.72	5.71	22.2
		24.4	2.64	5.36	22.1
平均		24.6	2.64	5.36	24.8



写真 3.2 曲げ試験方法

3.3.2 鉄筋

鉄筋には異形鉄筋 D16 (SD390) を用いた。鉄筋の引張試験の結果を表 3.4 に示す。

表 3.4 鉄筋の引張試験結果

鉄筋種類	公称断面積 (mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
D16 (SD390)	198.6	442.1	662.6	192.4
		443.3	664.1	190.8
		440.3	666.7	186.5
平均		441.9	664.5	189.9

3.4 実験方法

加力方法を図 3.3 に示す。加力は試験体のかぶりを拘束しないようかぶりと同じ寸法の孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、鉄筋を単調に引抜くことにより行った。なお、試験体が割裂する際の横方向への変位を拘束しないようにするため、試験体と加力板の間にはテフロンシートを4枚に切って配置した。加力板およびテフロンシートの設置状況を写真 3.3 に示す。計測項目は引張荷重および自由端すべり量である。

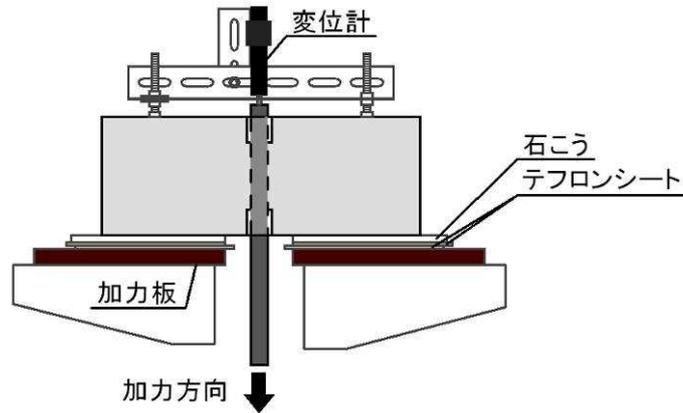


図 3.3 加力方法



【加力板】



【テフロンシート】

写真 3.3 加力板およびテフロンシート

3.5 実験結果

各試験体の付着応力-すべり量関係を図 3.4 および図 3.5 に示す。なお、グラフの付着応力は引張荷重を鉄筋の公称周長と付着長で除して求めており、すべり量は自由端すべり量に試験区間での付着応力分布を一定と仮定し、引張荷重に相当する試験区間の鉄筋の伸びの半分を加えて算出した値である。また、試験体各種 3 体の付着割裂強度、その平均値および変動係数を表 3.5 に示す。

全ての試験体でコンクリートの割裂による荷重の低下が見られた。健全試験体やスリットがかぶりを分断していない試験体は、かぶり面の割裂ひび割れが瞬時に荷重端側から自由端側まで発生して荷重が急激に低下した。一方、片側のかぶりがスリットにより分断された試験体 (BS3 シリーズおよび BS4) は、かぶり面の割裂ひび割れが荷重端側から自由端側へ徐々に進行し、それに伴って荷重が緩やかに低下しており、最大荷重後の挙動については試験体によって相違が見られた。OS2_C25 については、片側のかぶりがスリットにより分断されているが、前者と同様に割裂による急激な荷重の低下が見られた。なお、前者のグラフは荷重が低下する直前の最大荷重時までを示している。

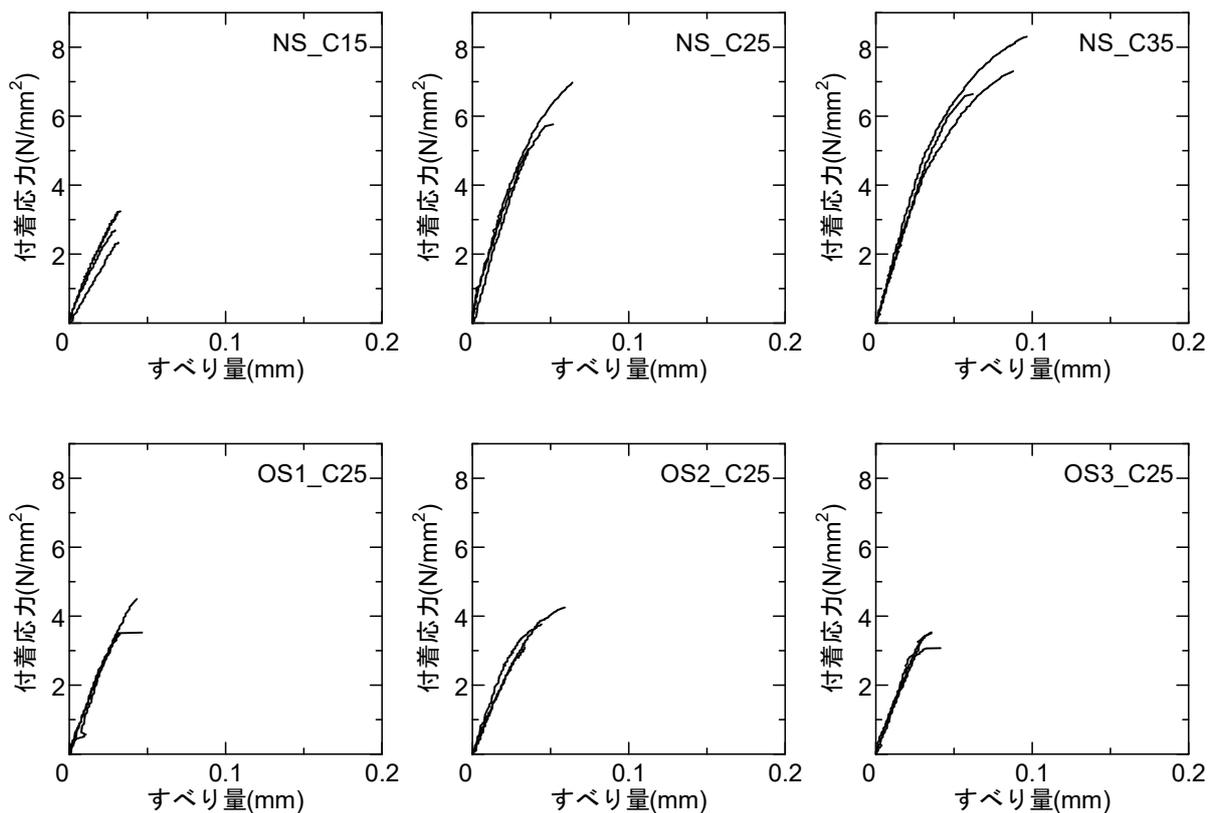


図 3.4 付着応力-すべり量関係 (NS シリーズおよび OS シリーズ)

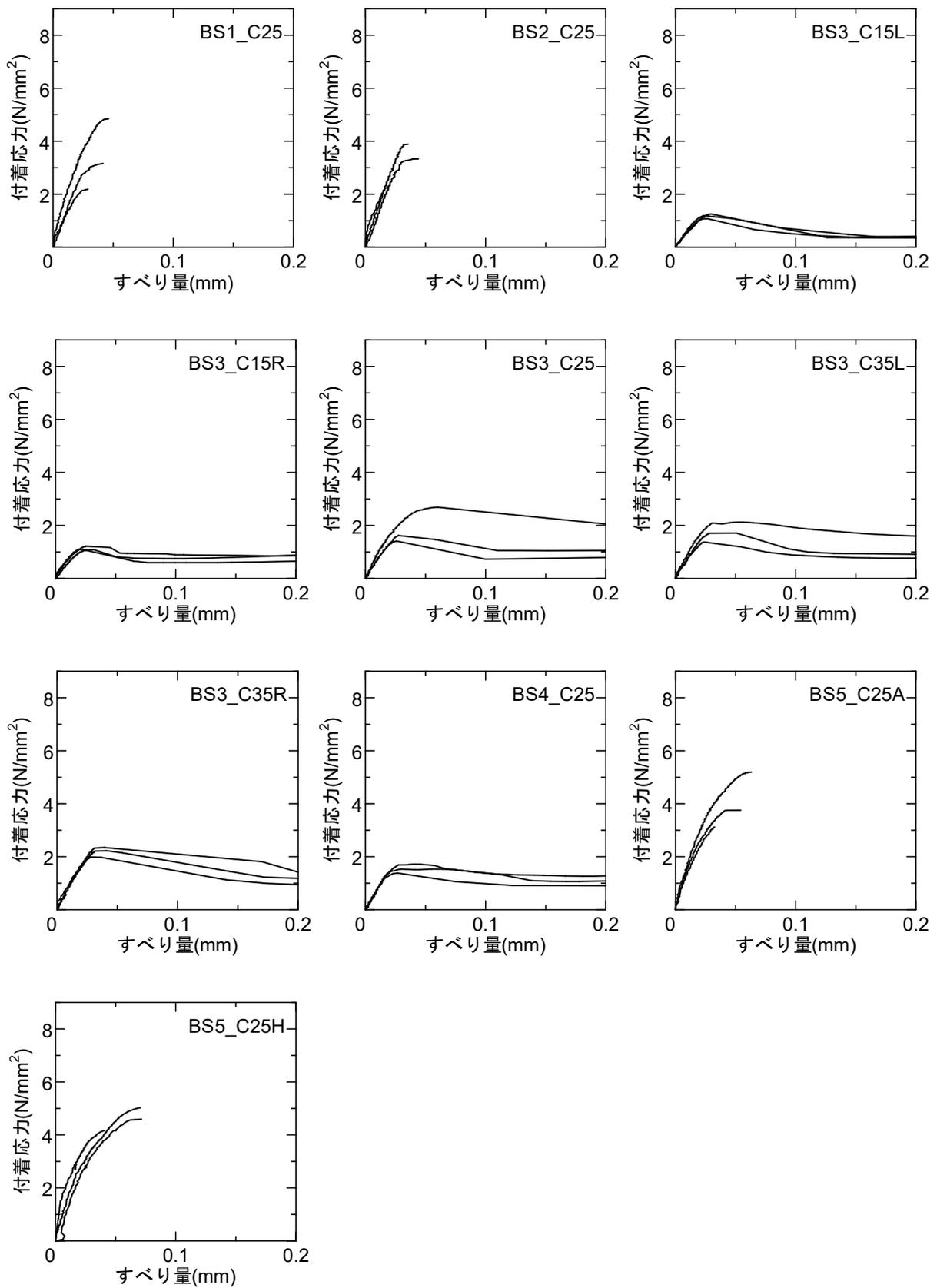


図 3.5 付着応力-すべり量関係 (BS シリーズ)

表 3.5 実験結果一覧

試験体名	付着割裂強度 (N/mm ²)				変動係数 (%)
	No.1	No.2	No.3	平均	
NS_C15	2.69	2.36	3.24	2.76	13.1
NS_C25	7.04	5.07	5.76	5.96	13.7
NS_C35	8.33	6.64	7.30	7.42	9.4
OS1_C25	4.50	3.50	3.52	3.84	12.2
OS2_C25	3.10	3.76	4.25	3.70	12.7
OS3_C25	3.50	3.07	3.53	3.37	6.2
BS1_C25	3.16	4.84	2.19	3.40	32.2
BS2_C25	2.34	3.33	3.89	3.19	20.1
BS3_C15L	1.19	1.27	1.07	1.18	7.0
BS3_C15R	1.09	1.22	1.06	1.12	6.2
BS3_C25	1.42	2.69	1.63	1.91	29.1
BS3_C35L	2.13	1.41	1.71	1.75	16.9
BS3_C35R	2.35	2.23	1.99	2.19	6.8
BS4_C25	1.41	1.53	1.72	1.55	8.2
BS5_C25A	3.76	5.19	3.13	4.03	21.4
BS5_C25H	4.16	5.03	4.59	4.59	7.7

3.6 付着割裂強度の評価方法

3.6.1 Tepfers の付着割裂に関する考察

Tepfers の付着割裂に関する考察⁷⁾は局所付着割裂性状の基本的理論となっており、内部ひび割れの状況に応じた付着割裂強度の算出が可能となっている。本章の実験結果について、この理論を用いて内部ひび割れ状況の違いが付着割裂性状に及ぼす影響についての検討を行う。

まず、Tepfers の付着割裂に関する考察の概要について整理する。Tepfers は、鉄筋が力を受けたときに生じる周辺コンクリートの応力状態を図 3.6 に示すような内圧を受ける中空シリンダーにモデル化し付着割裂強度を求めている。

内半径 r_i 、外半径 r_u のシリンダーに、内圧 σ が作用するときの半径 r の位置における引張応力 σ_θ は Timoshenko ら⁸⁾により求められており、次式で与えられる。

$$\sigma_\theta = \sigma \cdot \frac{r_i^2}{r_u^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_u^2}{r^2} \right) \quad (3.1)$$

ここで、内圧は鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとするものであるとすれば、 σ_θ は周辺コンクリートに作用する割裂き応力、いわゆるリングテンションであると考えられる。半径 $r=r_i$ においてがコンクリートの割裂強度 σ_t に等しくなるときの内部ひび割れが発生し、リングテンションを負担できなくなると考えると、内圧 σ は、式(3.1)に $r=r_i$ 、 $\sigma_\theta=\sigma_t$ を代入し、次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_t \cdot \frac{r_u^2 - r_i^2}{r_u^2 + r_i^2} \quad (3.2)$$

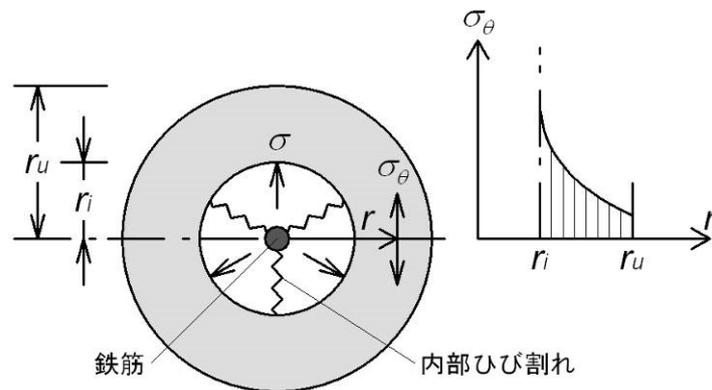


図 3.6 中空シリンダーに働く内圧と引張応力

一方、図 3.7 左図に示すように、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする応力の断面方向成分 σ_s と鉄筋の付着応力 τ_b には、応力の鉄筋方向とのなす角を α とすると、次の関係がある。

$$\tau_b = \sigma_s \cdot \cot \alpha \quad (3.3)$$

また、 σ_s と σ には、内部ひび割れ部分に作用する圧縮力の等価関係より、鉄筋の直径を d_b とすれば次式が成り立つ (図 3.7 右図参照)。

$$\sigma_s \cdot \pi \cdot d_b = \sigma \cdot \pi \cdot 2r_i \quad (3.4)$$

したがって、付着応力 τ_b と内圧 σ の関係は次のように示される。

$$\tau_b = \sigma \cdot \frac{2r_i}{d_b} \cdot \cot \alpha \quad (3.5)$$

式(3.5)を式(3.2)に代入し、以下の関係を得る。

$$\tau_b = \sigma_t \cdot \frac{2r_i}{d_b} \cdot \frac{r_u^2 - r_i^2}{r_u^2 + r_i^2} \cdot \cot \alpha \quad (3.6)$$

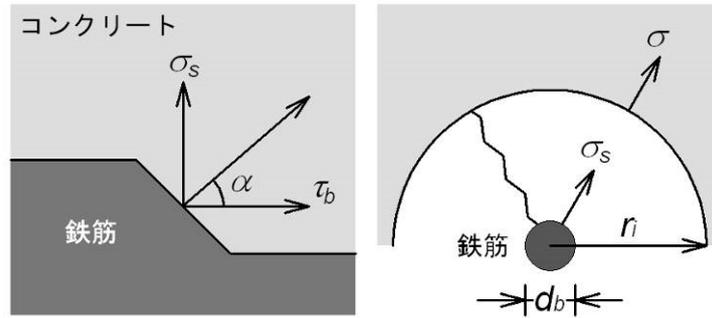


図 3.7 付着応力と内圧の関係

式(3.6)が、Tepfers の示した付着割裂強度式であり、 r_u はコンクリートのかぶり厚に鉄筋半径を加えた値、 r_i は鉄筋周辺コンクリートに生じる内部ひび割れの大きさと見ることが出来る。ここで、 r_i は $d_b/2 \leq r_i \leq r_u$ の範囲をとり得る変数であると考えられ、式(3.6)を r_i で微分すると、次式を得る。

$$\frac{d\tau_b}{dr_i} = \sigma_t \cdot \frac{2(r_u^4 - 4r_u^2 r_i^2 - r_i^4)}{d_b (r_u^2 + r_i^2)^2} \cdot \cot \alpha \quad (3.7)$$

式(3.7)の右边=0 とすると、式(3.6)は、

$$r_i = \sqrt{\sqrt{5} - 2} \cdot r_u = 0.486r_u \quad (3.8)$$

のときに、極大値

$$\begin{aligned} \tau_{b,\max} &= (\sqrt{5} - 1) \cdot \sqrt{\sqrt{5} - 2} \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \\ &= 0.601 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \end{aligned} \quad (3.9)$$

をとることが分かる。

この Tefpers の付着割裂に関する考察では、応力の鉄筋方向とのなす角 α を 45° と仮定している。また、文献 9) では、 $\alpha = 45^\circ$ の仮定の根拠が明瞭ではない点に着目し、実験的に $\alpha = 34^\circ$ であることが確認されている。本研究の健全試験体 (NS シリーズ) の付着割裂強度の実験値について、図 3.8 の実線で示すように最小二乗法による近似計算を行ったところ $\alpha = 40.9^\circ$ であった。図に破線で示したように $\alpha = 34^\circ$ および $\alpha = 45^\circ$ としたときの理論値とは若干ずれが見られた。角 α については鉄筋の節形状やコンクリート強度の違いによる影響を受けると考えられるため、本研究では実験値の近似計算より得られた $\alpha = 40.9^\circ$ を用いて以後検討を行うこととする。なお、グラフ中のプロットは各試験体 3 体の付着割裂強度の平均値であり、プロットの上下には標準偏差の範囲を示している。

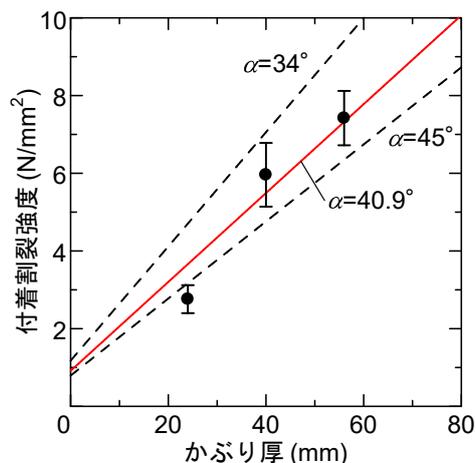


図 3.8 応力の主筋方向とのなす角 α の算定

この Tefpers の付着割裂強度算定式を本研究のスリットを用いた試験体に適応させる場合は、図 3.9 に示すように、鉄筋の半径と鉄筋側のスリットの長さの和 (図 3.9 左図参照) または鉄筋側にスリットが無い場合は鉄筋の半径 (図 3.9 右図参照) を内径 r_i とし、鉄筋の中心からかぶり面までの距離 (図 3.9 左図参照) またはかぶり面側にスリットが有る場合は鉄筋の中心からスリットまでの距離 (図 3.9 右図参照) を外径 r_u とする。ここで、 $r_i \leq 0.486 r_u$ であれば、内部ひび割れが $r_i = 0.486 r_u$ まで進展したときに極大値をとると考えられるため、式(3.9)より付着割裂強度を求めればよい。一方、 $r_i > 0.486 r_u$ のときは、 r_i が極大値をとる長さを超えているため、式(3.6)で求められる付着応力を付着割裂強度とすればよい。

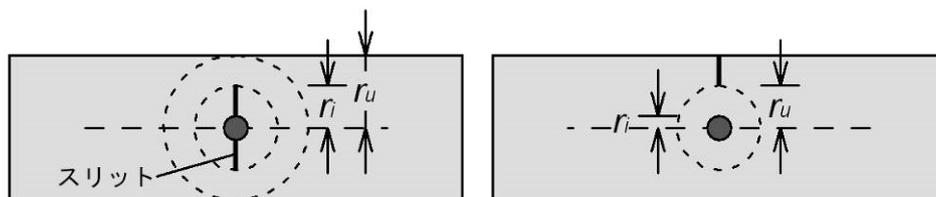


図 3.9 Tefpers の付着割裂強度算定式の試験体への適応例

3.6.2 片側のかぶり面に腐食による内部ひび割れが達した試験体の付着割裂強度

前項で示した Tepfers の付着割裂強度算定式を腐食による内部ひび割れが片側のかぶり面に達した試験体に適応させる場合、外径 r_u と内径 r_i は等しくなるため、式(3.6)より求められる付着割裂強度は理論上 0 となる。しかし、文献 5) および 6) では、片側のかぶり面に内部ひび割れが達した試験体においてもある程度の付着応力を有する結果が得られている。よって、片側のかぶり面に内部ひび割れが達した試験体の付着割裂強度については、新たな算定式を構築し検討を行う。そこで本研究では、図 3.10 に示すように、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする応力により、かぶり面に達しているひび割れが開口することで、健全部分の残るかぶり側に曲げが生じて付着応力が発生すると仮定し、付着強度算定式の導出を行った。

まず、図 3.10 に示される曲げモーメント M は、付着長 l_b を幅、割裂線の健全部分の長さ C' をせいとする断面に作用するので、以下の式が成り立つ。

$$M = \sigma_b \cdot z = \sigma_b \cdot \frac{l_b \cdot C'^2}{6} \quad (3.10)$$

ここで、

σ_b : コンクリートの曲げ強度
 z : 断面係数

また、この曲げモーメントが鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする力の断面方向成分 P_s により、健全部分の中間位置に働くとすると、以下の式が成り立つ。

$$M = P_s \cdot e \quad (3.11)$$

ここで、

e : 鉄筋の中心とコンクリートの健全部分の中間位置との距離

式(3.10)および式(3.11)を整理すると、 P_s は以下の式で示される。

$$P_s = \sigma_b \cdot \frac{l_b \cdot C'^2}{6 \cdot e} \quad (3.12)$$

また、 P_s は、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする応力 σ_s の割裂線に対する垂直方向成分を積分することで、以下の式で示される。

$$P_s = d_b \cdot l_b \cdot \sigma_s \quad (3.13)$$

式(3.12)および式(3.13)を整理すると、 σ_s は以下の式で示される。

$$\sigma_s = \sigma_b \cdot \frac{C'^2}{6 \cdot d_b \cdot e} \quad (3.14)$$

鉄筋が σ_s と鉄筋の付着応力 τ_b には, Tepfers の考察と同様に応力の鉄筋方向とのなす角を α として次式を得る。前項より, 本研究では $\alpha=40.9^\circ$ を用いる。

$$\tau_b = \sigma_s \cdot \cot \alpha \quad (3.15)$$

よって, ひび割れの開口に伴い, 健全部分に生じる曲げが付着応力の発生に寄与していると仮定したときの付着割裂強度算定式は式(3.14)を式(3.15)に代入することにより, 次式で示される。

$$\tau_b = \sigma_b \cdot \frac{C'^2}{6 \cdot d_b \cdot e} \cdot \cot \alpha \quad (3.16)$$

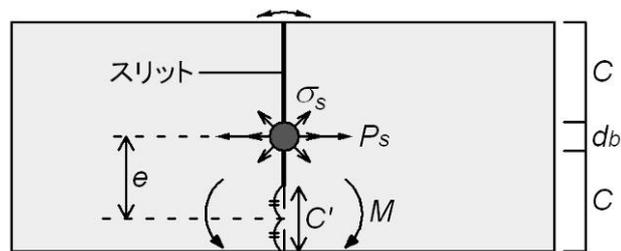


図 3.10 内圧と曲げモーメントの関係

3.7 付着割裂強度の解析値と実験値の比較

各試験体の付着割裂強度の実験値と、前節で示した算定式より算出した付着割裂強度の解析値の比較を図 3.11 に示す。横軸が解析値、縦軸が実験値である。なお、付着割裂強度の解析値について、OS2_C25, BS3 シリーズおよび BS4_C25 は健全部分の曲げを考慮した付着割裂強度算定式より算出し、その他の試験体は Teffers の付着割裂強度算定式より算出した値である。

ここで、試験体 BS2_C25 の付着割裂強度を Teffers の付着割裂強度算定式より算出すると、外径 r_u と内径 r_i は等しくなり、付着割裂強度が理論上 0 という結果が得られる(図 3.12 左図参照)。しかし、実験では付着応力が得られているため、本検討では内圧の状態が図 3.12 右図と等価なものであると仮定し Teffers の付着割裂強度算定式より解析値を算出した。また、BS5_C25A および BS5_C25H については、断面のみに着目すると付着割裂強度の解析値は等しくなる。しかし、写真 3.4 に示すように各試験体のかぶり面のひび割れ状況を見ると、試験区間全長にスリットを配置した BS5_C25A では、一方のスリットから割裂ひび割れがかぶり面まで進展しているのに対し、試験区間の半分にスリットを交互に配置した BS5_C25H では、それぞれのスリットを伝うように斜めにひび割れが生じる傾向が見られた。図 3.13 にひび割れ状況の違いを模式的に示した。ここで、BS5_C25A に対する BS5_C25H のひび割れ長さの比率をこれらの Teffers の付着割裂強度算定式より求まる値に乗ずることで、ひび割れ状況の違いが付着割裂強度に及ぼす影響を解析的に表現した。つまり、ひび割れの長さ (64.8mm) を付着長と捉えて、算出される鉄筋の引張力を従来の付着長 (64mm) で除して換算した値に相当する。

付着割裂強度の解析値と実験値を比較すると、健全部分の曲げを考慮した付着割裂強度算定式より解析値を求めた試験体は、実験結果を安全側に評価している。また、Teffers の付着割裂強度算定式より解析値を求めた試験体については、解析値が実験値を若干過大評価する傾向が見られるが概ね良好な対応を示している。これらの結果より、鉄筋の腐食により生じる内部ひび割れが鉄筋とコンクリートの局所付着性状へ大きく影響を及ぼすことが示されている。また、その内部ひび割れの状況を把握することで、付着割裂強度を解析的に示すことが可能であることが確認できた。

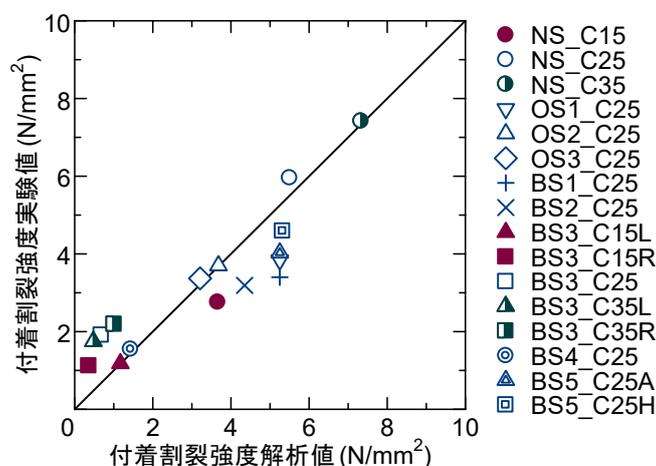


図 3.11 付着割裂強度の解析値と実験値の比較

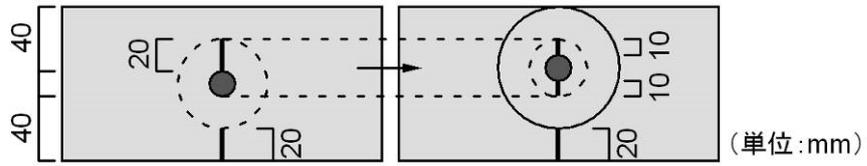
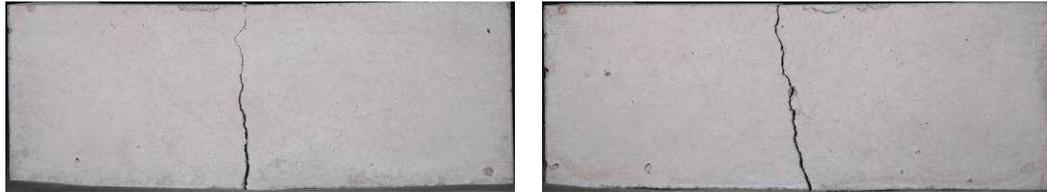


図 3.12 試験体 BS2_C25 のスリット置換



【BS5_C25A】

【BS5_C25H】

写真 3.4 試験体 BS5 のかぶり面のひび割れ状況

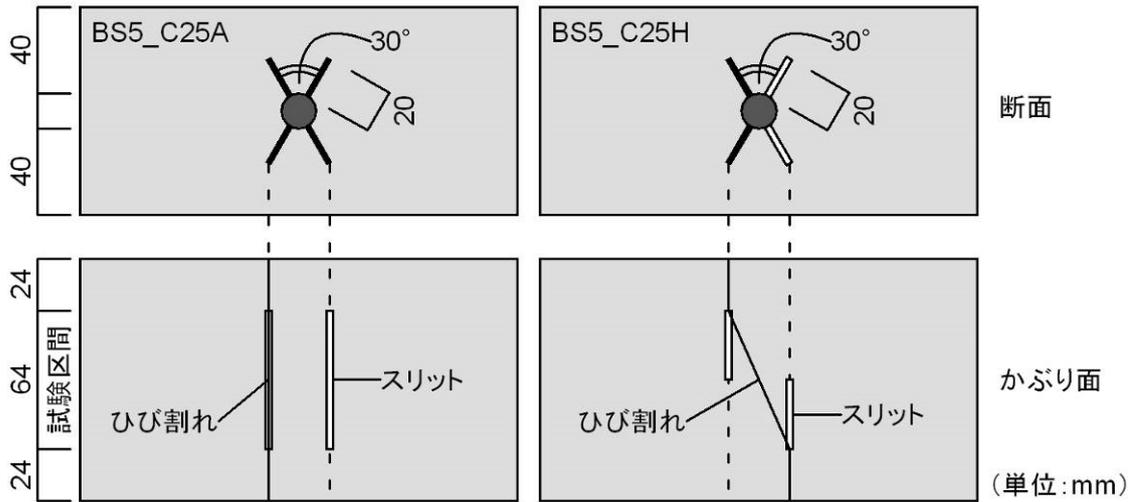


図 3.13 試験体 BS5_C25A および BS5_C25H のひび割れ長さ

3.8 付着長が付着性状に及ぼす影響

前節では、腐食による内部ひび割れの状況に応じた付着割裂強度算定式より、付着長が短い試験体の付着割裂性状の把握が可能であることを示した。本節では、これらの付着長を漸増させて付着解析を行うことで、より実部材に近い場合の内部ひび割れが付着割裂性状に及ぼす影響についての検討を行う。

解析対象は、かぶり厚比 $C/d_b=2.5$ の試験体で統一し、健全試験体の NS_C25、割裂破壊による急激な荷重低下が見られた BS1_C25 および最大荷重後に緩やかな荷重低下が見られた BS3_C25 の3体とした。付着解析に用いる付着構成則は、図 3.14 に示すようにそれぞれの試験体について実験結果から得られた局所付着応力-すべり量関係をモデル化した。解析モデルには以下に示す popovics 式を用いた。なお、付着強度 τ_{max} および付着強度時のすべり量 s_{max} は3体の実験結果の付着強度および付着強度時のすべり量の平均値を用いた。また、最大荷重後の軟化の程度を表す定数 a は、割裂破壊による急激な荷重低下が見られた NS_C25 および BS1_C25 は $a=5$ 、最大荷重後に緩やかな荷重低下が見られた BS3_C25 は $a=2$ とした。各試験体の解析モデルの諸元を表 3.6 に示す。

$$\frac{\tau}{\tau_{max}} = \frac{s}{s_{max}} \cdot \frac{a}{(a-1) + (s/s_{max})^a} \quad (3.17)$$

ここで、

τ : 局所付着応力

s : すべり量

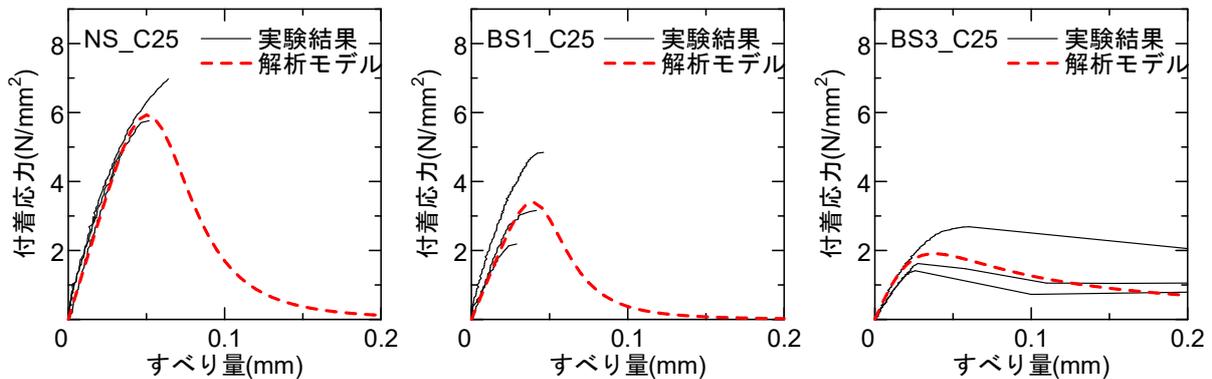


図 3.14 局所の付着割裂性状のモデル化

表 3.6 解析モデル諸元

試験体名	付着割裂強度 (N/mm ²)	付着割裂強度時の すべり量 (mm)	a
NS_C25	5.96	0.050	5
BS1_C25	3.40	0.039	5
BS3_C25	1.91	0.038	2

前述のように定めた付着構成則を用いて付着解析を行った。付着解析の方法は前章と同様に逐次計算法を用い、付着長を漸増させて行った。解析より得られた各試験体の各付着長ごとの付着割裂強度を図 3.15 に示す。横軸は鉄筋径 d_b に対する付着長 l_b の比で、付着長は鉄筋径の 100 倍の 1600mm まで示した。

解析結果は、付着長がごく短い場合は各試験体とも局所での付着割裂強度をとり、付着長が鉄筋径の 5 倍程度まではほぼ一定の付着割裂強度を示している。付着長が大きくなるに従い強度が低下し、ある程度より大きくなると付着長に反比例した曲線（二点鎖線）に漸近する結果を示している。また、健全試験体 NS_C25 の付着割裂強度に対する、BS1_C25 および BS3_C25 の付着割裂強度の比率をそれぞれ図 3.16 に示した。健全試験体と同様に割裂破壊による急激な荷重低下が見られた BS1_C25 は、付着長が鉄筋径の 20 倍程度までは若干比率が増加しているが、それ以上に付着長が大きくなるとほぼ一定値を示している。一方、最大荷重後に緩やかな荷重低下が見られた BS3_C25 は、付着長がごく短い場合は健全試験体の 3 割ほどの付着割裂強度しか示していないが、付着長が大きくなるに従い健全試験体との付着割裂強度の差異は小さくなり、付着長が鉄筋径の 60 倍になるとほぼ同等の付着割裂強度が示されている。さらに付着長が大きくなると、健全試験体の付着割裂強度を上回る結果が示されており、実部材レベルで考えた場合、腐食した RC 部材が急激な割裂破壊を伴う健全部材と比較して大きな強度低下のない可能性が示された。このような結果が得られた理由の検討として、付着長が鉄筋径の 4 倍 ($l_b/d_b=4$)、20 倍 ($l_b/d_b=20$) および 60 倍 ($l_b/d_b=60$) としたときの各試験体の付着割裂強度時の付着応力分布を図 3.17 に示す。 $l_b/d_b=4$ のときは、各試験体とも付着応力が鉄筋軸方向に対して概ね一様に分布し、局所での付着割裂強度を示している。また、 $l_b/d_b=60$ のときは、NS_C25 および BS1_C25 は局所的な付着応力については大きいですが、付着応力を有している範囲が小さい。一方で、BS3_C25 は、局所的な付着応力は NS_C25 および BS1_C25 に比べ小さいが、試験区間全長で付着応力を有している。したがって、両者の有効付着長の違いが付着長を大きくした場合の平均的な付着割裂性状に影響し、局所的な付着割裂性状の違いの影響は小さくなったと考えられる。

本節では、腐食による内部ひび割れが付着性状へ及ぼす影響について、付着長を変動させ解析的に検討を行った。しかし、解析的な検討のみに留まり、結果の妥当性についての検証には至っていない。よって、今後は実験的に得られた結果との対応について検証し、局所付着割裂性状と付着長を大きくした場合の平均的な付着割裂性状の関係性について明確にする必要があると考えられる。また、実部材の腐食による内部ひび割れの進展は、本解析の対象試験体のように鉄筋軸方向に対して一様には生じないと考えられるため、内部ひび割れの進展のばらつきも考慮した検討を行っていくことも今後の課題としてあげられる。

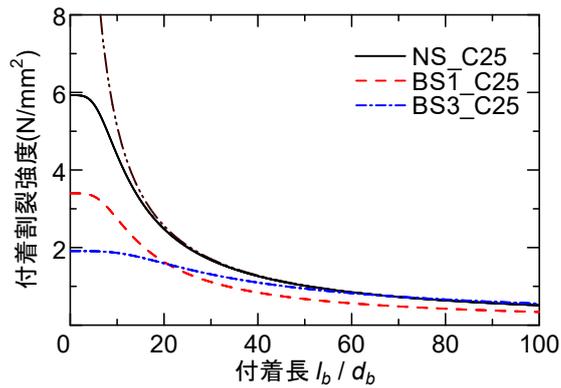


図 3.15 付着長と付着割裂強度の関係

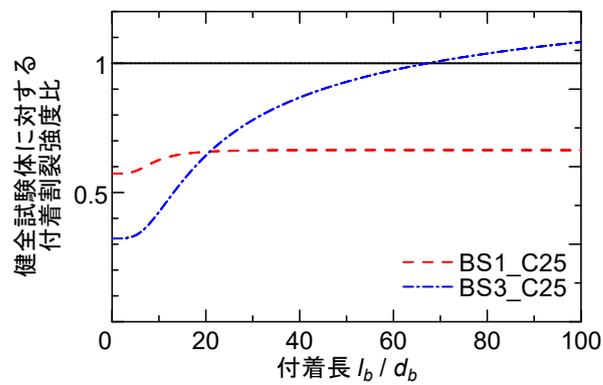


図 3.16 健全試験体(NS_C25)に対する付着割裂強度比

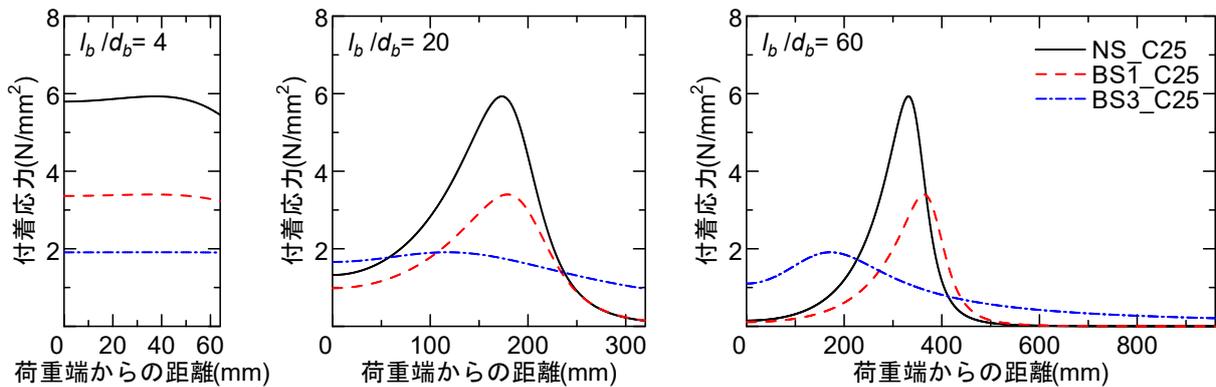


図 3.17 付着応力分布

3.9 まとめ

腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状，特に付着割裂性状に及ぼす影響について検討を行った。スリットを用いて内部ひび割れを模擬し，スリットの長さや位置をパラメータとして，内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合も含め，種々の腐食状況を表現した。試験体の付着長を鉄筋径の4倍として片引き試験を行い，内部ひび割れが局所での付着割裂性状に及ぼす影響について検討した。さらには，より実部材に近い付着長の試験体の付着割裂性状について解析的な検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 試験体の破壊形式について，両側のかぶりに健全部分が残る試験体は割裂破壊による急激な荷重低下が見られ，片側のかぶりがスリットにより分断された試験体は最大荷重後に緩やかに荷重低下する傾向が見られた。
- (2) 健全試験体の付着割裂強度の実験値について，最小二乗法による近似計算を行い，Tepfersの付着割裂強度算定式における応力の鉄筋方向とのなす角 α を 40.9° と決定した。
- (3) 鉄筋の腐食による内部ひび割れが片側のかぶり面まで達した試験体の付着割裂強度の算出に関して，ひび割れの開口に伴い，健全部分に生じる曲げが付着応力の発生に寄与していると仮定し，付着割裂強度算定式を構築した。
- (4) 内部ひび割れの進展状況に応じて算出した付着割裂強度の解析値が実験値と概ね良好に対応することを確認した。
- (5) 付着長を変動させた場合の腐食による内部ひび割れが付着性状へ及ぼす影響について，付着長がごく短い場合の局所での付着割裂性状の違いは，付着長を大きくした場合の平均的な付着割裂性状ではその影響が小さくなることが解析的に確認できた。

第4章 結論

4.1 研究結果のまとめ

本研究は、鉄筋が腐食した RC 部材の付着性状を定量的に評価するための足掛かりとして、腐食により鉄筋および鉄筋周囲に生じる現象が付着性状に及ぼす影響を明確にすることを目的とした研究である。既往の研究において、鉄筋が腐食した RC 部材の付着強度の評価が質量減少率という腐食状況を平均的に捉えた指標により行われていることを問題点としてあげ、腐食による鉄筋の断面減少および鉄筋周辺のコンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状に及ぼす影響について、それぞれ模擬的に再現した実験を行った。得られた知見を以下に示す。

第 2 章では、腐食による鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが付着性状に及ぼす影響について検討を行った。鉄筋を切削することにより腐食鉄筋の断面減少を模擬し、断面を平均的に切削する部分と局所的に切削する部分を設け、切削の程度や位置をパラメータとすることで腐食による鉄筋断面積のばらつきを表現した。これらの鉄筋に対し、試験体の付着長を鉄筋径の 15 倍として片引き試験を行った。

鉄筋のひずみ分布の推移より、局所的に断面減少した位置での局所的なひずみの進行が付着応力の低下に寄与することが確認されたが、断面減少が極端に大きい場合に限定されており、一般的には鉄筋軸方向の断面減少のばらつきが全体の付着性状へ及ぼす影響は小さいことが確認された。また、局所付着応力—すべり量関係をモデル化して付着解析を行い、得られた平均付着応力—荷重端すべり量関係および鉄筋のひずみ分布の推移が実験結果と概ね良好な対応を示しており、同様の結果を解析からも確認した。

第 3 章では、腐食生成物の膨張により周辺コンクリートに生じる内部ひび割れが付着性状、特に付着割裂性状に及ぼす影響の検討を行った。スリットを用いて内部ひび割れを模擬し、スリットの長さや位置をパラメータとして、内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合も含め種々の腐食状況を表現した。試験体の付着長を鉄筋径の 4 倍として片引き試験を行った。

Tepfers の周辺コンクリートの応力状態を内圧を受ける厚肉円筒に置換した付着割裂に関する考察をもとに、健全試験体の実験値より鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする力の鉄筋方向とのなす角を 40.9° と決定した。さらに、内部ひび割れの進展状況に応じて算出した付着割裂強度により実験値を概ね評価できることを確認した。また、Tepfers の考察が適応できない内部ひび割れが片側のかぶり面まで進展した場合の付着割裂強度を、ひび割れの開口に伴い健全部に生じる曲げにより付着応力が発生すると仮定して構築した算定式より求め、算定値が実験値を概ね評価可能であることを示した。

4.2 今後の研究課題

本研究では、腐食による内部ひび割れが付着割裂性状へ及ぼす影響について、付着長の短い試験体で内部ひび割れを模擬した片引き試験を行い、内部ひび割れの進展状況に応じて局所での付着割裂性状を評価できることを示した。しかし、より実部材に近い場合の付着割裂性状については解析的に示すに留まっている。健全な RC 部材については、局所的性状と平均的性状を関連づけた研究はあるが、腐食した RC 部材については行われていない。内部ひび割れの影響については、軸方向に対してひび割れの進展のばらつきを考慮し、局所的性状と平均的性状を関連付けることを今後の課題としたい。

また、第 1 章において、鉄筋の腐食による付着性状への影響因子として示した、節の欠損およびプレストレス効果については本研究では扱っていないため、今後それらの因子が付着性状に及ぼす影響について検討する必要がある。節の欠損については、鉄筋とコンクリートの機械的な噛み合いに影響を及ぼすと考えられるため、節の欠損高さが局所での付着応力-すべり量関係に与える影響についての検討が重要であると考えられる。また、プレストレス効果については、腐食の程度と腐食性生物による膨張圧の関係を明確にし、拘束圧が付着性状に与える影響について検討する必要があると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 大屋戸理明, 金久保利之, 山本泰彦, 佐藤勉: 鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響, 土木学会論文集, 部門 E, Vol.62, No.3, pp.542-554, 2006
- 2) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, pp.47~51, 1998
- 3) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (I 付着応力分布について) - (II), 日本建築学会論文報告集, No.132, pp.1~6, 1967.2
- 4) 齋藤祐哉, 大屋戸理明, 金久保利之: 鉄筋が腐食した RC 部材の局所付着性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.691~696, 2008
- 5) 大屋戸理明, 中山裕司, 八十島章, 金久保利之: 腐食した鉄筋コンクリート部材の付着割裂性状に関する引抜試験, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演梗概集, V-244, pp.485-486, 2009
- 6) 中山裕司, 大屋戸理明, 八十島章, 金久保利之: 腐食した鉄筋コンクリート部材の付着割裂性状に関する腐食損傷調査, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演梗概集, V-245, pp.487-488, 2009
- 7) Tepfers R. : Lapped Tensile Reinforcement Splices, ASCE, Journal of Structural Division, Vol.108, No.ST1, pp.283~301, 1982.1
- 8) Timoshenko S. P. and Goodier J. N. : Theory of Elasticity, 3rd ed. (International Student Edition), McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, pp.65~71, 1970
- 9) 金久保利之, 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 1, 横補強のない場合の局所付着割裂性状, 日本建築学会構造系論文集, No.492, pp.99~106, 1997.2