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

鉄筋が腐食した RC 部材の構造性能に関する研究

齋藤 祐哉

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保利之

2008年3月

目

次

論文要旨	1
第1章 序論	2
1.1 研究背景	2
1.2 研究目的	3
第2章 中心圧縮性状	4
2.1 はじめに	4
2.2 試験体	5
2.3 腐食模擬方法	8
2.3.1 切削鉄筋	8
2.3.2 細径丸鋼	9
2.3.3 電食	10
2.4 材料試験結果	11
2.4.1 コンクリート	11
2.4.2. 鉄筋	12
2.5 実験方法	23
2.6 実験結果および考察	24
2.7 軸応力ー軸歪関係のモデル化	25
2.8 まとめ	28
第3章 局所付着性状	29
3.1 はじめに	29
3.2 試験体	30
3.3 材料試験結果	31
3.4 実験方法	32
3.5 実験結果	33
3.6 実験結果の検討	36
3.6.1 質量減少率	36
3.6.2 腐食ひび割れの検討	37
3.7 まとめ	42
第4章 グローバル付着性状	43
4.1 はじめに	43
4.2 試験体	44
4.3 材料試験結果	46
4.3.1 コンクリート	46
4.3.2 鉄筋	47
4.4 鉄筋腐食方法	48
4.5 実験方法	49
4.6 実験結果および検討	50
4.7 まとめ	57
第5章 結論	58
謝辞	59
参考文献	60

論文要旨

本研究は鉄筋の腐食が鉄筋コンクリート部材の構造性能に与える影響を把握することを目的とし ている。第2章では、鉄筋の腐食を模擬する方法として、切削鉄筋および細径の丸鋼を用いることで 腐食の位置や程度をコントロールし、鉄筋が腐食した場合の中心圧縮性状の定量的な把握を目的とし た中心圧縮試験を行った。実験結果より、主鉄筋の腐食は最大軸応力に大きく影響し、帯鉄筋の腐食 は最大軸応力以降の応力軟化域に大きく影響することが確認された。また、帯鉄筋の腐食に伴う最大 軸応力以降の応力軟化域を考慮した横拘束を受ける拘束コンクリートの軸応力ー軸歪関係のモデル 化を行い、実験値を精度良く評価した。第3章では付着長を鉄筋径の4倍と短くし、鉄筋が腐食した 場合の局所付着性状の把握を目的とした引抜試験を行った。実験結果より、鉄筋の質量減少率が7% 程度までは最大付着応力の低下と質量減少率との対応関係が見られた。また、腐食により生じる内部 ひび割れに着目し、割裂面に付着した錆汁を画像解析により読み取ることで最大付着応力の評価を試 み、低下度合いの上限値を示した。引き続き第4章では、付着長を鉄筋径の30倍と長くし、実部材 の付着性状の解明に資する目的で、実験的検討を行った。実験結果より、かぶりが厚いほど平均付着 応力は大きくなるが、質量減少率に対する平均付着応力の減少勾配は急になることが確認された。ま た、割裂面に付着した錆汁から、割裂面における片側のかぶりに集中して錆汁が浸入していたことが 確認された。既往の研究ではこのような片側に腐食が集中した場合についての報告はなく、これにつ いては今後の検討課題となる。

第1章 序論

1.1 研究背景

従来、鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物は、長期間にわたって丈夫で美しく長持ちするものと 考えられてきた。実際に長期に渡り供用されつつもなお美しく、十分な耐久性を有する数々の RC 構 造物がそれを証明している。しかしながらそれは計画・設計・施工・維持管理が適切に行われること が前提であり、場合によっては必ずしもそうならない。また、当初に想定された耐用期間をはるかに 超えて供用されているものにあっても、やはり長持ちの程度には限界がある。

RC 構造物に見られる種々の劣化現象は供用年数と共に生じ、建物の耐久性を徐々にではあるが確 実に低下させる。我が国では第二次世界大戦後から高度経済成長期を経て現在に至るまで、数多くの RC 構造物を建造し、蓄えてきた。それらの建物は近い将来に何らかの補修補強を必要とする時代を 迎えつつあり、今後も供用し続けるためには適切な維持管理が必要である。しかしながらその数は膨 大であり、維持管理にかかるコストの急激な増加が予想される。しかも最悪の場合、集中的に膨大な 維持管理費用が要求される可能性もありうる。このことは本来必要となる新設構造物に対して影響す るばかりでなく、補修補強を必要とする構造物に対しても十分な措置がとれなくなり、RC 構造物の 安全性や信頼性に大きく影響すると考えられる。

そのため近年では RC 構造物の維持管理に関する戦略的マネジメントが提唱されつつある。今後も 増加すると考えられる維持管理費用を確保するためには、劣化の度合いに見合った適切な補修補強の 方法を体系化し、ライフサイクルコストを削減することで、維持管理にかかる費用の増大を防ぐ必要 がある。しかしながら、様々な補修補強の方法が提案され実用化されている現在でも劣化の度合いを 定量的に把握するには至っておらず、今もなお種々の劣化因子に対する構造性能の低下を把握する研 究が進められている。

1.2 研究目的

RC 構造物の劣化要因として、アルカリ骨材反応、塩害、中性化などに代表されるコンクリートの 劣化と、これらの劣化要因に誘発される鉄筋の腐食があげられる。特に鉄筋の腐食は RC 構造物の構 造性能を大きく低下させることから、本研究では RC 構造物の劣化要因として鉄筋腐食に着目し、腐 食による構造性能の低下を評価することを最大の目的としている。

現在までに鉄筋の腐食による構造性能の低下に関しては種々の検討がなされており、鉄筋を腐食さ せる方法としては電食や自然暴露などの促進劣化が用いられている。これらの方法はより実際の腐食 に近い形で鉄筋を腐食させることが可能であるといった利点がある反面、腐食の程度や位置をコント ロールすることが難しく、腐食に要する期間が長期(自然暴露の場合数年単位)にわたることもある。 そのため、構造性能の低下を"定量的"に評価できているとは言いがたい。そこで本研究の第2章では、 鉄筋が腐食した場合の中心圧縮性状に焦点を置き、腐食の程度や位置をコントロールすることで、鉄 筋の腐食が中心圧縮性状に与える影響を定量的に把握することを目的する。また、実験結果から帯鉄 筋の腐食を考慮した拘束コンクリートの軸応力ー軸歪関係のモデル化を行っている。

また、鉄筋の腐食は鉄筋とコンクリートとの付着性状にも大きな影響を及ぼすことから、現在まで に多くの研究がなされている。しかしながら鉄筋の腐食による付着性状の変化には様々な要因があり、 現在でも未解明な点が多く存在する。そこで本研究では、コンクリートの割裂により破壊する場合に ついて、第3章では付着長を短くした場合の局所付着性状を、第4章では付着長を長くした場合のグ ローバルな付着性状を把握することを目的としている。特にコンクリートが割裂して破壊する場合は、 鉄筋周変のコンクリートによる拘束状況が大きく影響するものと考えられることから、第3章では腐 食により発生する内部ひび割れを考慮することで付着強度の低下を検討する。

第2章 中心圧縮性状

2.1 はじめに

鉄筋の腐食に伴う中心圧縮性状の変化について、これまでに種々の検討がなされている¹¹²。しか しながら、それらの多くは電食や自然暴露によって鉄筋の腐食を模擬しており、腐食の程度や位置を コントロールすることが難しく、腐食の影響を定量的に評価したとは言いがたい。そこで本章では、 腐食の程度や位置をコントロールすることで、鉄筋腐食が中心圧縮性状に与える影響を定量的に把握 することを目的とする。ここで、腐食の位置や程度をコントロールするための方法として、試験体の 腐食想定区間にはあらかじめ健全な鉄筋を切削した切削鉄筋³⁾および細径の丸鋼を用いる。これらは 従来の電食や自然暴露といった方法とは異なり、試験体作製時に研究者が任意で腐食の程度や位置を 決定できるといった利点がある。また、本章では帯鉄筋の腐食に伴う最大軸応力以降の応力軟化域を 考慮した拘束コンクリートの軸応力ー軸歪関係のモデル化を行う。

2.2 試験体

試験体の一覧を表 2.1 に、試験体概略を図 2.1 および図 2.2 に示す。試験体は全部で 22 体であり、 断面が 180×180mm、高さが 660mm である。試験区間は 360mm で、腐食想定区間は試験体中央から 上下 100mm である。なお、帯鉄筋の腐食は腐食想定区間内の 4 本を対象としている。また、コア断 面内の拘束コンクリートの応力-歪関係を得るため、すべての試験体のかぶりは除いている。

実験のパラメータは、鉄筋の腐食を想定する位置(全方向、一面、二面)、腐食模擬方法(電食、 細径丸鋼、切削)および、腐食の程度である。なお、腐食の程度は、腐食模擬方法が電食の場合目標 質量減少率(5%、15%、30%)を示し、細径丸鋼または切削の場合断面積最小部分の断面減少率(20%、 40%、60%、80%)を示す。健全部分の主鉄筋は D16、帯鉄筋は D6 を用いている。

これ以降、実験のパラメータごとに、No.1,5,22 を健全試験体、No.2 から No.4 を電食シリーズ、 No.6 から No.9 を細径丸鋼シリーズ、No.10 から No.13 を一面切削シリーズ、No.14 から No.17 を二 面切削シリーズ、No.18 から No.21 を主鉄筋切削シリーズとまとめて呼称する。

試験体	主鈞	 转		帯鉄筋				
No.	腐食模擬方法	腐食程度	腐食位置	腐食模擬方法	腐食程度			
1	健全	D16		健全 D6@45				
2		5%			5%			
3	D16 電食	15%	全方向	D6@45 電食	15%			
4		30%			30%			
5	なし(組立筋	īとして∅3)		健全 D6@45				
6				細径丸鋼 <i>ø</i> 6@49.5	20%			
7	おし(組立節	(6) 7 12)	会士向	細径丸鋼 ø 5@45	40%			
8	はし(祖立肋	$f \in U (\varphi S)$	至 方 问	細径丸鋼 ø 4@44.5	60%			
9				細径丸鋼 ø3@50	80%			
10					20%			
11	おし (約支贷	(1742)		D6@45 扫削	40%			
12	よし(祖立別	$f \in U \subset (\psi S)$	——————————————————————————————————————	口0個43 95日1	60%			
13					80%			
14					20%			
15	おし (約支贷	(1742)	一五	D6@45 扫削	40%			
16	いよし (船立)加	$f \in U \setminus (\varphi S)$	——————————————————————————————————————	口0個43 9月1	60%			
17					80%			
18				細径丸鋼 <i>ø</i> 6@49.5	20%			
19	D16 把削	200/	令专向	細径丸鋼 ø 5@45	40%			
20	D10 A1H1	30%	土刀門	細径丸鋼 ø4@44.5	60%			
21				細径丸鋼 ø3@50	80%			
22	なし(組立筋	5として ø 3)	健全 D6@45					

表 2.1 試験体一覧



図 2.1 試験体概略(健全試験体・電食シリーズ・細径丸鋼シリーズ)









図 2.2 試験体概略(一面切削シリーズ・二面切削シリーズ・主鉄筋切削シリーズ)

2.3 腐食模擬方法

2.3.1 切削鉄筋

切削鉄筋の概略を図 2.3 に示す。主鉄筋の腐食想定長さは腐食想定区間と同じ 200mm で、帯鉄筋 の腐食想定長さは100mmとしている。切削鉄筋は平均的に断面を切削する一次切削部と、局所的に 断面を切削する二次切削部からなり、実際の腐食鉄筋に見られる平均的な断面減少および孔食による 局所的な断面減少を表現している。既往の研究³⁾から、一次切削部は二次切削部の1/2の断面減少と し、二次切削部の長さは腐食想定長さの15%としている。なお、主鉄筋の二次切削部は2箇所に分 けて設けている。切削する向きは主鉄筋が縦節側、帯鉄筋が横節側とし、切削面が外側になるように 配筋するものとしている。

なお、腐食による付着切れを表現するため、切削面にはビニールテープを貼りつけて付着を除去し ている。



D6切削鉄筋



2.3.2 細径丸鋼

細径丸鋼は鉄筋の腐食が全方向に生じた場合を想定している。本研究では*φ*6、*φ*5、*φ*4、*φ*3 鉄筋 を用いており、それぞれの断面減少率(20%、40%、60%、80%)に対する帯鉄筋比がほぼ一致する ようにピッチを調節している。各鉄筋の断面積および帯鉄筋比の一覧を表 2.2 に示す。

なお、腐食による付着切れを表現するため、丸鋼にはビニールテープを巻きつけて付着を除去して いる。

種類	断面減少率(%)	断面積 (mm ²)	ピッチ (mm)	帯鉄筋比(%)	
D6 切削 20%	20	25.34	45	0.626	
<i>φ</i> 6	20	28.27	49.5	0.634	
D6 切削 40%	40	19.00	45	0.469	
φ5	40	19.63 46		0.474	
D6 切削 60%	60	12.67	45	0.313	
φ4	00	12.57	44.5	0.314	
D6 切削 80%	80	6.33	45	0.156	
φ3	80	7.07	50	0.157	

表 2.2 各鉄筋の断面積および帯鉄筋比一覧

2.3.3 電食

電食方法を図 2.4 に示す。試験体の腐食想定区間に固定した水槽内に電解液として 3%NaCl 水溶液 を満たし、試験体を囲むように銅板を設置する。電流は定電流発生装置を用いて通電するものとし、 陽極を主鉄筋に、陰極を銅板に接続する。腐食の程度は質量減少率の目標を 5%、15%、30%とし、 通電時間を調節することで制御した。

試験終了後、試験体から鉄筋を取り出して除錆し、実際の質量減少率を測定した結果を表 2.3 に示 す。測定の結果、No.2 の質量減少率は主鉄筋、帯鉄筋ともに目標を上回り、No.3 および No.4 の質量 減少率は帯鉄筋が目標の2倍以上、主鉄筋が目標の半分程度であった。これは、試験体にかぶりがな いため、むき出しの帯鉄筋が主に腐食し、帯鉄筋より内側にある主鉄筋の腐食はあまり進行しなかっ たためと考えられる。

電食後の試験体は、帯鉄筋から直接錆汁が流れ出し、主鉄筋軸方向に縦ひび割れが発生しているの が確認できた。





図 2.4 電食方法

表 2.3 質量減少率

⇒膝休Na	主鉄筋質量液	咸少率(%)	帯鉄筋質量減少率(%)			
时间天存于INO.	目標	測定結果	目標	測定結果		
2	5	8.2	5	22.1		
3	15	8.5	15	41.5		
4	30	18.4	30	76.3		

2.4 材料試験結果

2.4.1 コンクリート

コンクリートのフレッシュ性状を表 2.4 に示す。コンクリートの設計強度は 24MPa であり、混和 剤として AE 減水剤を混入している。コンクリートの材料試験結果を表 2.5 に、解析に用いたコンク リートの力学的性質を表 2.6 に示す。テストピースのサイズは 100mmø ×200mm で、養生方法は現 場気中または現場封緘である。試験は各中心圧縮試験の加力日に行った。なお、コンクリートの弾性 係数は応力-歪関係における圧縮強度の 1/3 の応力点の割線弾性係数とする。また、解析に用いたコ ンクリートの力学的性質は現場気中にて養生したテストピースの値を用いるものとする。

は田学殿休	設計強度	煉り上り温度	スランプ	スランプフロー	空気量							
使用試練评	(MPa)	(°C)	(cm)	(cm)	(%)							
No.1~No.5	24	-	18	-	4.5							
No.6~No.22	24	20.0	17.0	29.0×28.5	4.0							

表 2.4 コンクリートのフレッシュ性状

適用				割裂碓度
(人出十十)	養生方法		(CD_{2})	
(121 閏7)		(MPa)	(GPa)	(MPa)
No 1 \sim No 5		24.3	22.4	2.15
	現場気中	22.1	21.3	2.31
(70日)		26.1	22.7	2.33
	平均	24.2	22.1	2.26
		41.1	27.6	-
	現場封緘	41.5	29.9	-
		39.8	29.0	-
	平均	40.8	28.8	-
No.6~No.22		28.4	22.3	-
加力日		27.0	22.9	-
(241 日)	11 4 与 山	28.3	22.9	-
	奶物风干	26.8	22.7	-
		28.7	23.8	-
		27.9	22.8	-
	平均	27.9	22.9	-

表 2.5 コンクリートの材料試験結果

表 2.6 コンクリートの解析用の力学的性質

使用試験体	圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)
No.1~No.5	24.2	22.1	2.26
No.6~No.22	27.9	22.9	-

2.4.2. 鉄筋

切削鉄筋の引張試験の概要を図 2.5 に示す。引張試験に用いた切削鉄筋は腐食想定区間を 100mm としたものであり、二次切削部は腐食想定区間の中心に一箇所設けている。歪は変位 1、変位 2 およ び切削面に貼付した 5 枚の歪ゲージを用いて計測する。変位 1 の検長は、D16 切削鉄筋の場合健全時 の公称径の 16 倍、D6 切削鉄筋の場合健全時の公称径の 24 倍であり、変位 2 の検長は、D16 切削鉄 筋および D6 切削鉄筋共に 50mm である。歪ゲージを貼付する位置は二次切削部の裏表、一次切削部 の裏表および一次切削開始部である。なお、伸びの計測のための標点間距離は D16 切削鉄筋の場合 健全時の公称径の 2 倍、D6 切削鉄筋の場合健全時の公称径の 4 倍としている。



図 2.5 切削鉄筋の引張試験概要

引張試験結果および伸びの一覧を表 2.8 から表 2.11 に、鉄筋の応力-盃関係を図 2.6 から図 2.17 に示す。応力は引張荷重を健全時の公称断面積で除して求め、歪は変位 1 および変位 2 により計測さ れた変位を各々の検長で除して求めた変位 1 歪および変位 2 歪と、二次切削部の裏表の歪ゲージの平 均歪としている。なお、表中の降伏応力および弾性係数は、それぞれの変形区間での見かけの値であ り、鉄筋の応力-歪関係に明瞭な降伏点が見られない場合、残留歪が 0.2%のときの応力を便宜的に 降伏点とした。全体として断面減少率の増加に伴う強度や伸びの低下が見られ、実際の腐食鉄筋の力 学的性状を模擬できているものと考えられる。

切削鉄筋の変位1 歪による応力- 歪関係を図 2.18 および図 2.19 に示す。なお、各金ゲージによる 歪の降伏時期は代表的な結果をプロットしている。D16 切削鉄筋の場合、二次切削部の歪 1 が早期に 降伏し、線形性を失う。歪 2 は曲げの影響のため歪 1 より遅れて降伏し、歪 2 が降伏すると全体の剛 性が低下する。その後直ちに二次切削部は歪硬化領域に達すると考えられ、さらに荷重が増加すると 一次切削部の歪 2、歪 3 が降伏する。若干の降伏棚を示した後、一次切削部も歪硬化領域に達し、そ の後は非切削部まで降伏が進展すると考えられる。D6 切削 20%の場合、一次切削部の降伏までは D16 切削鉄筋と同様の挙動を示すが、一次切削部は降伏後直ちに歪硬化領域に達すると考えられ、明瞭な 降伏棚は見られなかった。その後は一次切削開始部の歪 5 が降伏し、非切削部まで降伏が進展すると 考えられる。D6 切削 40%の場合、一次切削部の降伏までは D16 切削鉄筋と同様の挙動を示すが、そ の後は一次切削開始部の歪 5 が降伏することなく破断した。D6 切削 60%および 80%の場合、二次切 削部の降伏までは D16 切削鉄筋と同様の挙動を示すが、その後は一次切削部の歪 3 および歪 4 が降 伏することなく破断した。 D6 切削鉄筋は断面減少率を 60%以上とすると二次切削部の降伏のみで破断してしまうため、強度 や伸びに著しい低下が見られた。また、D6 健全鉄筋の降伏比が 0.69 であったことから、断面減少率 をおおむね 30%以上とすると、非切削部まで降伏が進展せず破断すると考えられる。

	八升	ふな 星大 引	리며텍	目かけの際仕者	見かけの降伏荷重(kN)			見かけの降伏強度			見かけの弾性係数		
毛手口ゴ	公仰	取八	り灰	元ルマリック中小へ作				(MPa)			(GPa)		
作里方门	町 町 山 行 山 行	何里 强度 (kN) (MPa	強度	変形1 変形2	歪 1-2	変形1	変形 2	歪 1-2	変形1	変形2	歪 1-2		
	(mm)		(MPa)	歪算出 歪算出	算出	歪算出	歪算出	算出	歪算出	歪算出	算出		
116.2		584	75.42		379			190	178	180			
D16	198.6	116.9	587	75.82			381		192	212	181		
健全		117.0	588	77.21			388		186	172	178		
	平均	116.7	586	76.15			383			187	180		
		18.35	573	13.29			419.6			177.6			
D6	31.67	18.23	570	13.22			417.3		167.9				
健全		18.35	573	13.73		433.6		171.2					
	平均	18.31	572	13.41			423.5		172.2				

表 2.8 引張試験結果(No.1 から No.5 に使用)

*0.2%オフセット耐力

種別	公称径		標点	〔間距離(mm)		伸び(%)						
	(mm)	区間1	区間2	区間 3	区間4	区間 5	区間1	区間2	区間3	区間4	区間 5		
		32.0	32.3	31.8	32.7	32.2	11.6	11.5	33.0	11.3	10.9		
D16	15.9	32.0	32.7	32.5	31.7	32.4	12.8	12.2	33.2	12.6	11.7		
健全		32.1	31.9	32.9	31.8	32.5	12.1	15.0	33.7	12.3	12.0		
	平均	32.0	32.3	32.4	32.1	32.4	12.2	12.9	33.3	12.1	11.5		
		12.2	11.9	12.6	11.7	12.9	6.6	5.0	19.0	20.5	4.7		
D6	6.35	12.7	12.6	12.2	11.8	12.7	3.9	6.0	36.1	6.8	4.3		
健全		12.4	12.3	12.7	14.4	11.7	4.8	6.5	9.8	5.6	4.3		
	平均	12.4	12.3	12.5	12.6	12.4	5.1	5.8	21.7	10.9	4.4		

表 2.9 伸び一覧(No.1から No.5に使用)

*標点外破断

							日かり	ナの際は	~ 油 庄	日あい	ナの遥せ	七夜粉
	公称	最大	引張	見かけ	の降伏荷	ī重(kN)	元/パー)の理U (MPa)	、烟皮	元/バャ) (GPa)	土尔致
種別	断面積	荷重	強度	亦形 1	亦形 2	本12	亦形 1	(IIII u) 亦形 2	杰12	亦形 1	(014)	本12
	(mm^2)	(kN)	(MPa)	変形 I 歪篁出	変形 2	正 1-2 篁出	変形 I 歪簋出	変形 2 歪篁出	≞ 1-2 篁出	変形 I 歪簋出	変形を	正 1-2
		82.4	414	丘 <u></u> 63.08*	正 开四 -	39.80*	亚升山 317*	正 开口 -	200*	正升四 139	<u> </u>	99
D16	198.6	83.0	417	61.89*	57.31*	45.37*	311*	288*	228*	154	254	101
切削		84.8	426	62.69*	57.91*	-	315*	291*	-	147	220	99
30%	平均	83.4	419	62.55	57.61	42.59	314	290	214	147	237	100
		17.75	555		12.06*			377*			170	1
D6	31.67	17.23	538		11.83*			370*			155	
健全		17.72	554		12.35*		386*			160		
	平均	17.57	549		12.08			378			162	
Dć		15.40	481	12.42*	-	11.01*	388*	-	344*	223	-	154
して	31.67	15.69	490	12.64*	12.35*	10.78*	395*	386*	337*	153	222	148
90月1		16.29	509	13.76*	12.96*	11.74*	430*	405*	367*	119	185	150
20%	平均	15.79	493	12.94	12.66	11.18	404	400	349	165	204	151
D6		12.17	380	9.76*	9.57*	8.00*	305*	299*	250*	160	190	125
して	31.67	12.29	384	10.46*	-	7.87*	327*	-	246*	124	-	117
少J月J 400/		11.84	370	10.21*	-	7.17*	319*	-	224*	123	I	109
40%	平均	12.10	378	10.14	9.57	7.68	317	299	240	136	190	117
D		7.85	245	7.33*	-	4.38*	229*	-	137*	89	-	87
D0 归出山	31.67	7.63	238	7.55*	6.78*	4.45*	236*	212*	139*	71	95	85
· 列削		8.09	253	8.16*	-	4.90*	255*	-	153*	61	-	86
60%	平均	7.86	246	7.68	6.78	4.58	240	212	143	74	95	86
Dć		2.64	82.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-
していたり	31.67	2.56	79.8	-	-	1.50*	-	-	47*	-	-	32
900/		3.03	94.5	1.63*	-	1.41*	51*	-	44*	8	-	87
80%	平均	2.74	85.6	1.63	-	1.46	51	-	46	8	-	60
		13.94	493		9.51			346*			212	
<i>ø</i> 6	28.3	14.00	495		9.97			352			213	
健全		14.18	501		9.83			347			215	
	平均	14.04	496		9.87			348			213	
		10.01	511		9.01*			460*			202	
<i>ф</i> 5	19.6	10.31	526		9.85*			503*			205	
健全		10.04	512		9.43*			481*			204	
	平均	10.12	516		9.43			481			204	
4.4	12.6	7.64	607		7.08*			562*			208	
<i>ϕ</i> 4	12.0	7.67	609		7.14*			567*			208	
健生	平均	7.66	608		7.11			565		208		
		4.84	685		4.70*			665*		204		
<i>ø</i> 3	7.07	5.28	767		4.90*			692*		236		
健全		5.20	735		4.89*			691*			204	
	平均	5.11	722		4.83			683			214	

表 2.10 引張試験結果(No.6 から No.22 に使用)

*0.2%オフセット耐力

	公称径		檀占	間距離(mm)				値び(%)			
種別	(mm)	区間 1	反問う	区間2	区間 /	区間 5	区間1	マ問う	区間2	区間 /	区間 5	
	(mm)	22.5	220	207	22.6	27.6		区间 2	区间 5	区间 4	区间 5	
D16	15.0	22.5	32.9	32.7	22.4	32.0	0.90	0.91	10.9	1.79	1.32	
切削	15.9	32.3	22.0	32.9	32.4	32.4	1.34	2.10	10.2	2.47	2.15	
30%		32.0	32.0	22.4	22.4	32.0	2.01	2.70	17.9	2.70	2.13	
	平均	32.1	32.3	32.7	32.8	32.0	1.73	2.70	17.5	2.33	1.84	
D	(25			48.0					12.3			
D0	0.35			48.1				11.4				
健主				40.7			10.1					
	平均	24.1	24.2	48.5	24.4	1.24	2.70	11.5	1.(4	2.0		
D6	6.25	24.1	24.3	24.1	24.4	24.4	1.24	3.70	19.5	1.04	3.09	
切削	0.55	23.0	24.7	24.0	24.0	24.0	5.39	2.43	13.9	2.44	3.33	
20%	亚 护	24.2	24.0	24.3	24.5	24.5	0.41	3.00	17.0	4.12	0.41	
	平均	24.0	24.5	24.4	24.4	24.2	1.08	3.20	1/./	2.75	24.8	
D6	(25	24.0	24.5	24.7	24.9	24.0	0.83	1.63	14.2	0.40	0.00	
切削	6.35	24.9	24.3	24.4	24.0	24.3	1.60	0.82	15.0	0.42	0.82	
40%		24.9	23.8	24.7	24.0	24.2	2.01	2.32	13.0	0.83	0.00	
	平均	24.6	24.2	24.6	24.3	24.2	1.48	1.5/	14.9	0.55	0.27	
D6	6.25	24.5	24.6	24.6	23.9	24.1	0.82	0.81	11.0	0.00	1.24	
切削	6.35	24.3	24.4	24.2	24.4	24.2	0.00	0.41	9.10	0.41	0.00	
60%		23.9	25.1	24.2	24.4	24.5	0.00	0.40	9.50	0.41	0.41	
0070	平均	24.2	24.3	24.3	24.2	24.3	0.27	0.54	9.87	0.27	0.55	
D6	6.25	24.4	24.3	24.8	25.1	24.0	0.00	1.65	4.44	0.40	0.00	
切削	6.35	24.1	24.6	24.1	24.1	24.6	0.00	0.00	4.56	0.00	0.00	
80%		24.2	24.0	24.8	24.1	23.9	0.41	1.0/	5.24	0.00	0.00	
0070	平均	24.2	24.3	24.6	24.4	24.2	0.14	1.11	4.75	0.13	0.00	
10	(54.1					28.3			
$\phi 6$	6			53.9					*			
健全				54.4					20.2			
	平均			54.1					28.3			
1.5	-			45.8					*			
$\phi $	5			45.4					*			
健全				45.5								
	平均			45.5					-			
ø4	4			32.5					*			
健全				32.7					*			
	半均			32.6					-			
				24.9					*			
<i>ø</i> 3	3			24.9					*			
健全				24.7					*			
	半均			24.8					-			

表 2.11 伸び一覧(No.6 から No.22 に使用)

*標点外破断



図 2.6 D16 健全鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.1 から No.4 に使用)



図 2.7 D6 健全鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.1 から No.5 に使用)



図 2.8 D16 切削 30%鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.18 から No.21 に使用)





図 2.10 D6 切削 20%鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.10,14 に使用)



図 2.11 D6 切削 40%鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.11,15 に使用)



図 2.12 D6 切削 60%鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.12,16 に使用)



図 2.13 D6 切削 80%鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.13,17 に使用)



図 2.15 Ø5 健全鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.7,19 に使用)



図 2.17 Ø3 健全鉄筋の応カー歪関係(試験体 No.9,21 に使用)



図 2.18 D16 切削鉄筋の変位 1 歪における応カー歪関係



図 2.19 D6 切削鉄筋の変位 1 歪における応カー 歪関係

2.5 実験方法

加力は 2MN ユニバーサル万能試験機を用いて、変位制御による一軸単調載荷を行うものとする。 試験体の設置方法を図 2.20 に示す。

計測項目は軸圧縮力および試験区間の軸方向変形量である。変位計の設置位置を図 2.21 に示す。 変位計を設置しているネジ棒は試験体が圧縮されることで軸方向外側に広がってしまうため、試験体 の4面に2本ずつ等間隔に設置した変位計を用いて試験体表面における軸方向変形量として算出する。



2.6 実験結果および考察

実験のパラメータで比較した軸応力ー軸歪関係を図 2.22 に示す。なお、使用したコンクリートの 違いによる影響をなくすため、軸応力は実験値をコンクリートの圧縮強度で除して基準化している。 帯鉄筋のみを腐食想定とした試験体(No.6 から No.17)より、最大軸応力は腐食模擬方法により若

干の差はあるものの、腐食模擬方法が同じであれば帯鉄筋の腐食の程度によらずほとんど差は見られ ず、最大軸応力以降の応力軟化域に大きな差が見られた。腐食想定区間の帯鉄筋に丸鋼を用いた細径 丸鋼シリーズ(No.6 から No.9)の場合、応力軟化域の荷重は鉄筋の断面減少率の増加に比例して低 下しているのに対し、腐食想定区間の帯鉄筋に切削鉄筋を用いた一面切削シリーズ(No.10 から No.13)および二面切削シリーズ(No.14 から No.17)の場合、応力軟化域の荷重は切削鉄筋の断面減 少率を 60%以上とすると急激に低下している。これは、切削鉄筋の材料試験結果より、D6 切削鉄筋 の断面減少率を 60%以上とすると二次切削部のみの降伏で破断してしまうため、十分な拘束効果が 得られなかったためと考えられる。

腐食想定区間の主鉄筋および帯鉄筋を電食により腐食させた電食シリーズ(No.2 から No.4)より、 鉄筋の腐食の程度の増加に伴う最大軸応力の低下が見られた。帯鉄筋の腐食が最大軸応力に影響しな いことを踏まえると、主鉄筋の腐食は最大軸応力に影響するものと考えられる。

主鉄筋を切削し帯鉄筋に丸鋼を用いた主鉄筋切削シリーズ(No.18 から No.21)より、主鉄筋の断 面減少率が一定である場合、最大軸応力は帯鉄筋の断面減少率によらずほぼ一定であった。また、最 大軸応力以降の応力軟化域の荷重は帯鉄筋の断面減少率の増加に比例して低下しており、主鉄筋のな い細径丸鋼シリーズと同様の挙動であったことから、主鉄筋の腐食は応力軟化域に影響しないと考え られる。



図 2.22 軸応カー軸歪関係

2.7 軸応カー軸歪関係のモデル化

帯鉄筋のみを腐食想定とした試験体 (No.6 から No.17)の拘束コンクリートにおける軸応力ー軸歪 関係のモデル化を行う。実験結果より、帯鉄筋の腐食模擬方法によらず最大軸応力までの軸応力ー軸 歪関係の曲線は健全の場合とほぼ同様であることから、最大軸応力までの曲線は既往の研究⁴⁾を参考 に次式に従うものとした。なお、最大軸応力時の歪*ε*mは実験結果から 0.5%とした。

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 2 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right) - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^2 \tag{2.1}$$

$$\frac{\sigma_m}{\sigma_B} = 0.77 + 0.37 \cdot p_w \tag{2.2}$$

ここで、 σ_m :最大軸応力(MPa) ε_m :最大軸応力時の歪(=0.5%とする) σ_B :コンクリートの圧縮強度(MPa)

*p*_w:鉄筋健全時の帯鉄筋比(%)

モデルの概略を図 2.23 に示す。実験結果より、すべての試験体に共通して最大軸応力以降の応力 軟化域における荷重は軸歪 2%までに大きく低下すると、その後は緩やかに低下し、軸歪 4%以降の 荷重低下はほとんど見られなかった。また、帯鉄筋に細径の丸鋼を用いた試験体と、切削鉄筋を用い た試験体の応力軟化域には明瞭な違いが見られたことから、最大軸応力以降の応力軟化域は軸歪 2% および軸歪 4%時の軸応力を帯鉄筋の腐食模擬方法別に算出し、それぞれを直線で結ぶことでモデル 化する。なお、モデル化においては鉄筋の腐食の程度が重要なパラメータとなると考えられるため、 帯鉄筋のピッチおよび断面積の減少を考慮できるように帯鉄筋比をパラメータとする。

細径丸鋼シリーズの軸歪 2%および 4%時の実験値の軸応力と帯鉄筋比の関係を図 2.24 に示す。細 径丸鋼シリーズの場合、グラフは次式のような一次式で近似できる。

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 0.256 \cdot \left(\frac{p_{wc}}{p_w}\right) + 0.305 \qquad (2.3)$$
$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 0.205 \cdot \left(\frac{p_{wc}}{p_w}\right) + 0.170 \qquad (2.4)$$



腐食想定区間の帯鉄筋に切削鉄筋を用いた試験体の軸歪 2%および 4%時の軸応力と帯鉄筋比との 関係を図 2.25 に示す。なお、切削鉄筋の帯鉄筋比は一次切削部の値を用いている。切削鉄筋を用い た試験体の場合、断面減少率を 60%以上とすると軸歪 2%までに急激に軸応力が低下するため、切削 鉄筋の降伏がどの程度進展して破断に至るかを考慮する必要があると考えられる。ここで、D6 健全 鉄筋の降伏比が 0.69 であることから、切削鉄筋は一次切削部と二次切削部の断面減少率の差をおお むね 30%以上とすると一次切削部まで降伏せずに破断すると考えられる。そこで、一次切削部まで 降伏すると考えられる断面減少率から、さらにどの程度切削しているのかを示す値として式(2.5)に示 す α を定義した。この α に 0.6 を乗じて、式(2.6)および式(2.7)とすることができた。なお、 α が 0 以下(非切削部まで降伏すると考えられる断面減少率の範囲内)である場合は α =0 とする。

$$\alpha = Y_r - \frac{100 - A_r}{100} \tag{2.5}$$

Ar: : 断面積最小部の断面減少率(%)

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 0.256 \cdot \left(\frac{p_{wc}}{p_w}\right) + 0.415 - 0.6 \cdot \alpha \tag{2.6}$$

$$\frac{\sigma}{\sigma_m} = 0.205 \cdot \left(\frac{p_{wc}}{p_w}\right) + 0.256 - 0.6 \cdot \alpha \tag{2.7}$$



図 2.25 軸歪 2%および軸歪 4%時の軸応力(一面切削および二面切削シリーズ)

実験結果とモデルの比較を図 2.26 に示す。モデルはいずれも実験結果と良好に対応しており、最 大軸応力以降の応力軟化域を精度良く表現できた。



27

2.8 まとめ

鉄筋が腐食した場合の中心圧縮性状を定量的に評価するため、あらかじめ健全な鉄筋を切削した切削鉄筋および細径の丸鋼を用いて試験体を作製し、中心圧縮試験に供することで以下の知見を得た。

- 主鉄筋の腐食は最大軸応力の低下に影響し、帯鉄筋の腐食は最大軸応力以降の応力軟化域に大き く影響する。なお、帯鉄筋に切削鉄筋をもちいた場合、二次切削部の断面減少率を60%以上とす ると、応力軟化域での軸応力の低下の度合いが激しくなる。
- 2) 帯鉄筋のみを腐食想定とした試験体について、帯鉄筋の腐食に伴う最大軸応力以降の応力軟化域 を考慮した拘束コンクリートにおける軸応力ー軸歪関係のモデル化を行い、実験値を精度良く評 価した。

第3章 局所付着性状

3.1 はじめに

鉄筋の腐食に伴う、鉄筋とコンクリートとの付着性状の変化を対象とした研究⁵⁰について概観する と,鉄筋腐食により付着強度が増大する場合と減少する場合の両方が報告されている。これらは概ね 鉄筋腐食の程度により相違し,腐食が軽微な場合は腐食生成物による体積膨張が鉄筋周囲に拘束圧を 生じさせて強度の増大をもたらし,それ以上に腐食が進行すると周辺コンクリートのひび割れによっ て強度の低下をもたらすと考えられる。しかしながら,鉄筋の腐食に伴うコンクリートとの付着性状 の評価については,対象部材の諸元(かぶり・鉄筋径・付着部の拘束条件その他)によってその影響 が大きく異なり,現象解明は容易でない。特に,鉄筋腐食によってかぶりコンクリートにひび割れが 発生し,その後,最終的に割裂破壊を生じて付着耐力が決定される場合,周辺コンクリートの拘束の 程度によって付着性状が大きく異なるものと推測され,腐食によるひび割れの評価を適切に行わなけ ればならないものと考えられる。

本章では,鉄筋が腐食した場合に,最終的に周辺コンクリートの割裂により挙動が決定される場合 の付着性状を明らかにすることを目的としている。また、腐食により発生する内部ひび割れを考慮し た場合の付着強度の低下についての検討を行う。

3.2 試験体

試験体の概略を図 3.1 に示す。試験体は断面が 224×224mm、高さが 112m のコンクリートブロッ クの中心に D16 異型鉄筋 1 本を埋め込んだものであり、試験体の両側に設けたスリットでかぶりを 表現すると共に、付着割裂破壊を誘発するように設計した。なお、付着長は 64mm(鉄筋径 d_b の 4 倍)とし、荷重端に付着絶縁区間として長さ 24mm(鉄筋径 d_b の 1.5 倍)の塩ビ管を配置している。 実験のパラメータはかぶりの厚さおよび鉄筋の腐食程度である。なお、かぶりの厚さ C はスリット の長さを調節し、鉄筋径 d_b の 1.5 倍、2.5 倍および 3.5 倍の 3 水準としている。

鉄筋は電食を用いて腐食させるものとした。電食装置を図 3.2 に示す。定電流発生装置の陽極を鉄 筋、試験体を挟み込むようにして設置した銅板を陰極に繋いで通電する。水槽内には電解液として 0.3%NaCl水溶液を満たしており、自由端側の鉄筋が直接電解液に触れないよう配慮した。試験区間 の腐食の程度は通電時間を調節してコントロールし、116 時間を基準としてその1倍、1.5倍、2倍、 3 倍および4倍の5水準としている。電食中の試験体は鉄筋からかぶりの表面に向かい腐食ひび割れ が発生しているのが確認された。なお、鉄筋の腐食により生じる錆汁は始め試験体の底面から流れ出 し、かぶりの表面からはしばらく時間が経過してから流れ出していた。また、特に通電時間の長い試 験体では、試験体の上面のコンクリートと鉄筋の境界に錆汁が発生しているのが確認された。

試験体一覧を表 3.1 に示す。試験体名のLに続く数字は電食時間が基準(116時間)の何倍である かを示しており、Cに続く数字は鉄筋径に対するかぶり厚さの比を示している。なお、通電時間0時 間とは電食を行わない健全な試験体である。



図 3.1 試験体概略



図 3.2 電食装置

表 3.1 試験体一覧

試験体名	C/d_b^*	通電時間 (h)	試験体名	C/d_b^*	通電時間 (h)	試験体名	C/d_b^*	通電時間 (h)
L0.0_C15		0	L0.0_C25		0	L0.0_C35		0
L1.0_C15		116	L1.0_C25		116	L1.0_C35		116
L1.5_C15	1.5	174	L1.5_C25	2.5	174	L1.5_C35	3.5	174
L2.0_C15	(24mm)	232	L2.0_C25	(40mm)	232	L2.0_C35	(56mm)	232
L3.0_C15		348	L3.0_C25		348	L3.0_C35		348
L4.0_C15		464	L4.0_C25		464	L4.0_C35		464

*鉄筋径に対するかぶり厚さの比

3.3 材料試験結果

コンクリートのフレッシュ性状を表 3.2 に示す。コンクリートの目標強度は 24MPa とし、混和剤 として AE 減水剤を混入している。

コンクリートの材料試験結果を表3.3に、解析に用いたコンクリートの力学的性質を表3.4に示す。 コンクリートの材料試験には100mm¢×200mmのテストピースを用いており、すべて現場気中にて 養生した。圧縮試験および割裂試験は引抜試験の前後にそれぞれ3本ずつ試験を行った。なお、コン クリートの弾性係数は応力-歪関係における圧縮強度の1/3の応力点の割線弾性係数とし、解析に用 いたコンクリートの力学的性質は加力前および加力後の平均値を用いるものとする。

鉄筋の引張試験結果を表 3.5 に示す。

衣3.2 コングリードのプレリンエビス					
設計強度	煉り上り温度	スランプ	スランプフロー	空気量	
(MPa)	(°C)	(cm)	(cm)	(%)	
24	20.0	17.0	29.0×28.5	4.0	

表 3.2 コンクリートのフレッシュ性状

適用	姜丹士沈	圧縮強度	弹性係数	割裂強度
(材齢)	食工刀仏	(MPa)	(GPa)	(MPa)
		32.2	25.3	2.13
加力前	現場気中	30.3	25.1	2.19
(511 日)		31.0	24.1	2.61
	平均	31.2	24.8	2.31
		30.1	27	2.10
加力後	現場気中	30.9	25	2.60
(590 日)		30.9	24.9	2.75
	平均	30.6	25.6	2.48

表 3.3 コンクリートの材料試験結果

表 3.4 コンクリートの解析用の力学的性質

圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)
30.9	25.2	2.40

表 3.5 鉄筋の材料試験結果

種別	規格	引張強度(MPa)	降伏強度(MPa)	弾性係数(GPa)
D16-1		576	379	169
D16-2	SD345	579	385	175
D16-3		575	386	164
平	均	577	383	169

3.4 実験方法

加力方法を図 3.3 に示す。加力は、スリット内部のコンクリートを拘束しないようにスリットの寸 法にあわせた孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、鉄筋を単調に引き抜くことにより行った。な お、割裂によるコンクリートの横方向への変位を拘束しないようにするため、加力板と試験体の間に テフロンシートを4枚に切って配置した。加力板を写真 3.1 に、テフロンシートを写真 3.2 に示す。

計測項目は引張荷重および自由端の主鉄筋すべり量である。自由端のすべり量はスリット内部のコ ンクリートから十分離れた位置を支点として変位計を設置し、健全な部分のコンクリートと主鉄筋と の相対すべり量としている。





写真 3.1 加力板



写真 3.2 テフロンシート

3.5 実験結果

引抜試験により得られた付着応カーすべり量関係および割裂面の写真を図 3.4 から図 3.6 に示す。 なお、グラフの付着応力は引張荷重を試験区間の鉄筋の表面積で除して求めており、鉄筋周長は健全 な鉄筋の公称値としている。また、すべり量は自由端で計測された値である。

グラフより、付着応力-すべり量関係の全体の挙動として、鉄筋が徐々に抜出しつつ最大付着応力 に至るケースと、ほとんど鉄筋が抜出さずに最大付着応力に至るケースが確認された。これらに腐食 の程度による相関関係は見られなかった。また、電食時間が長い試験体の数体において一旦付着応力 が低下した後、再度付着応力が増加する現象が見られた。これは、鉄筋の腐食により節部が減少する と共に、コンクリートとの間に腐食成生物が形成され、節部との機械的噛み合い作用がある程度鉄筋 が抜け出してから作用するためと考えられる。

割裂面から、鉄筋の腐食により生じた錆汁は鉄筋側からだけでなく、かぶり側からも浸入しているのが確認されたが、錆汁の浸入位置や程度は試験体により異なり、特に規則性は見られなかった。







3.6 実験結果の検討

3.6.1 質量減少率

質量減少率は加力後に試験体から取出した鉄筋を除錆し、試験区間の質量減少量を健全時の質量で除して求めた。ただし、写真3.3に示すように、電食時間が長い試験体では特に試験区間外(荷重端側のコンクリートと鉄筋との境目)で腐食が進行しており、本研究において質量減少率を算出する際、この部分の腐食を計算から除外することができないため、電食時間が長い試験体の質量減少率は総じて大きくなっている。

実験により得られた最大付着応力-質量減少率関係を図 3.7 に、質量減少率一覧を表 3.6 に示す。 なお、最大付着応力は既往の研究⁶⁰を参考とし、健全時の最大付着応力の計算値で除して基準化して いる。グラフより、質量減少率が 7%程度までは右下がりの傾向が見られ、そこまでの試験体(9 体) の結果を用いて最小二乗法による回帰計算を行った結果、式(3.1)に示すような関係式を得た。

$$\frac{cor^{\tau_{b,max}}}{\tau_{b,max}} = 1 - 9.86 \cdot C$$
(3.1)
ここで、
 $cor \tau_{b,max}$:腐食鉄筋の付着割裂強度
 $\tau_{b,max}$:健全鉄筋の付着割裂強度計算値²⁾
C:質量減少率

しかしながら、質量減少率が7%程度を超えた場合、質量減少率と基準化最大付着応力とに明瞭な 関係は見られない。これは、質量減少率が鉄筋腐食を平均的に扱うもので、コンクリートに発生する 腐食ひび割れと対応するとは言いがたい。したがって、付着応力の低下を質量減少率により評価する には限界があると思われ、かぶり部分に発生する腐食ひび割れを考慮する必要があると考えられる。



写真3.3 試験区間外腐食の様子



表 3.6 質量減少率一覧

封殿休夕	最大付	着応力	質量減少率
武映仲石	実験値	基準化	(%)
L0.0_C15	6.77	1.61	-
L1.0_C15	4.40	1.05	2.48
L1.5_C15	2.24	0.532	4.54
L2.0_C15	1.43	0.217	7.08
L3.0_C15	2.35	0.559	12.11
L4.0_C15	2.49	0.591	13.22
L0.0_C25	9.90	1.57	-
L1.0_C25	5.60	0.887	3.40
L1.5_C25	5.21	0.825	4.95
L2.0_C25	2.19	0.347	5.06
L3.0_C25	1.21	0.158	11.57
L4.0_C25	2.53	0.400	12.90
L0.0_C35	10.73	1.27	-
L1.0_C35	5.53	0.657	1.87
L1.5_C35	2.26	0.268	4.62
L2.0 C35	3.27	0.388	4.14
L3.0_C35	3.50	0.415	8.46
L4.0_C35	3.19	0.379	10.02

3.6.2 腐食ひび割れの検討

これまで、鉄筋の腐食を扱った研究は数多くなされているが、コンクリート内部に発生している腐 食ひび割れについてはいまだ未解明な点が多い。特に引抜試験において付着割裂により破壊する場合、 コンクリートのかぶりの厚さが重要なパラメータとなる。すなわち、鉄筋腐食によりコンクリート内 部にひび割れが発生する場合、かぶり部分のコンクリートがどれだけひび割れず健全な状態で残って いるかが重用になると思われる。また、鉄筋の腐食により生じた錆汁は内部ひび割れに沿って浸入す ると考えられる。そこで本研究では、コンクリートの割裂面に付着した錆汁に着目し、割裂面の写真 を画像解析にかけることで錆汁の判定を行い、最大付着応力の低下を評価可能であるか検討した。

はじめに、鉄筋腐食により発生した内部ひび割れを考慮するための基本理念となっている Tepfers による付着割裂に関する研究⁷⁾において提案されている健全な試験体の付着割裂強度式について整 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 3.8 に示すような、 内圧を受ける中空肉厚シリンダーにモデル化し、付着割裂強度を求めている。なお、内半径が r_i 、外 半径が r_u であるシリンダーに内圧 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によって求められており、次式で与えられる。



図 3.8 中空シリンダーに働く内圧と引張応力

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力とすると、 σ_{θ} は周辺コンクリート に対する割り裂き力(=リングステンション)と考えられる。半径 $r = r_i$ において、 σ_{θ} がコンクリート の割裂強度 σ_i に等しくなるとき内部ひび割れが発生し、リングステンションを負担できなくなると、 内圧 σ は、式(3.2)に $r = r_i$ 、 $\sigma_{\theta} = \sigma_i$ を代入し、次式で与えられる。

$$\sigma = \sigma_{t} \cdot \frac{r_{u}^{2} - r_{i}^{2}}{r_{u}^{2} + r_{i}^{2}}$$
(3.3)

一方、図 3.9 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、式(3.4)に示すような関係がある。 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から、鉄筋径を d_b とすると式(3.5) に示すような関係がある。

$$\tau_{b} = \sigma_{s} \cdot \cot \alpha \qquad (3.4)$$

$$\sigma_{s} \cdot \pi \cdot d_{b} = \sigma \cdot \pi \cdot 2r_{i} \qquad (3.5)$$



図 3.9 付着応力と内圧との関係

したがって、付着応力τωと内圧σとの関係は次のように表される。

$$\tau_b = \sigma \cdot \frac{2r_i}{d_b} \cdot \cot\alpha \tag{3.6}$$

式(3.6)を式(3.3)に代入し、以下の関係を得る。

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

式(3.7)が Tepfers の示した付着割裂強度式である。 r_u はコンクリートのかぶり厚さに鉄筋の半径を加えた値、 r_i は鉄筋の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できる。ここで、 r_i は $d_b/2 \leq r_i \leq r_u$ の範囲をとりうる変数と考えられ、式(3.7)を r_i で微分し、(右辺)=0 とすることで、式(3.7)は

$$r_i = \sqrt{\sqrt{5} - 2} \cdot r_u = 0.486 \cdot r_u \tag{3.8}$$

のときに、極大値

$$\tau_{b,max} = 0.601 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \tag{3.9}$$

をとることが分かる。

この Tepfers の考察は、式(3.7)で表されるように、リングテンションによって発生する内部ひび割 れの大きさにより付着応力の増減を表すことができるところに特徴がある。なお、既往の研究⁶より、 α は実験的に α =34[°] であることが確認されている。 ここで、鉄筋軸方向のある微小断面において、鉄筋の腐食により内部ひび割れが発生し、図 3.10 に示すように錆汁が浸入したとする。かぶり表面に発生したひび割れは、その部分にはじめからかぶ りがなかったのと同じと考えられるため、 r_u は鉄筋の中心からかぶり表面に侵入した錆汁部分を除く 長さとし、これを $r_u'とする$ 。また、鉄筋周辺に侵入した錆汁部分(すでに内部ひび割れが発生して いると考えられる部分)の長さを $d_b'/2$ とすると、 $d_b'/2$ が 0.486 $r_u'未満であれば、式(3.7)$ は内部ひび 割れが $r_i=0.486r_u'$ まで進展したとき極大値をとると考えられ、 $r_u'を式(3.9)$ に代入し、式(3.10)とする ことで鉄筋の腐食により内部ひび割れが発生した場合のある断面における最大付着応力 $r_b'_{,max}$ を求め ることができる。ただし、 $d_b'/2$ が 0.486 r_u' 以上のとき、内部ひび割れはすでに式(3.9)が極大となる r_i の長さを超えて発生していると考えられ、そこからさらに内部ひび割れが進展する場合、つまり $d_b'/2$ $\geq r_i \geq r_u'$ の範囲で式(3.7)が最大となるのは $r_i = d_b'/2$ のときである。したがって、 $d_b'/2 \geq 0.486r_u'$ の場合 は、式(3.7)の r_i に $d_b'/2$ を代入し、式(3.11)としたときの値をその断面での $\tau_b'_{,max}$ とする。

$$\tau'_{b,max} = 0.601 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r'_u}{d_b} \cdot \cot\alpha$$
(3.10)

ただし、 $d_b'/2 \ge 0.486r_u$ のとき



図 3.10 鉄筋の腐食による内部ひび割れのイメージ

画像解析を行う場合、割裂面の錆汁が浸入した部分と健全なコンクリート部分をはっきり区別させる必要がある。しかしながら撮影した写真をそのまま用いると特に粗骨材と錆汁との区別がつきにくいため、図 3.11 に示すように割裂面のデジタル画像の RGB を反転させ、彩度および色の温度を調節することで、割裂面に浸入した錆汁のみを青白く浮かび上がらせる。今回、割裂面に浸入した錆汁としてカウントする部分は R の値が 150 未満で、かつ B の値が 200 より大きい部分とした。





画像解析の概要を図 3.12 に示す。画像解析では鉄筋の軸方向に割裂面の試験区間をピクセル単位 (今回は約 1mm ピッチ) で分割し、それぞれの断面における b', max を算出する。さらに全断面にお ける $\tau_b'_{,max}$ の平均値として $\tau_b'_{,max,average}$ を算出した。

なお、割裂面の錆汁が浸入した部分は鉄筋の両側で異なっているため、4 箇所の割裂面における錆 汁が浸入した部分を足し合わせてから計算を行っている。したがって、写真は4箇所すべての割裂面 を1枚に収める必要があり、割裂により2個に分かれたコンクリートを重ねる際は、双方に傾きが生 じないようにするため、型枠面(本研究では自由端側)のコンクリート面を合わせて写真の撮影を行 った。また、実際に割裂面を分割すると、連続して錆汁が浸入していない部分があったが、この場合 ru'は鉄筋の中心から錆汁が浸入していない区間の中で最も長い区間の外側までとし、db'/2 は鉄筋の 中心からこの区間の内側までとして計算を行った。



図 3.12 画像解析概要

実験値の最大付着応力と画像解析による tb', max, average との比較値一質量減少率関係を図 3.13 に、実験値と tb', max, average との比較値の一覧を表 3.7 に示す。

グラフより、比較値の上限はおおむね1程度(最大1.225)であり、腐食鉄筋によるコンクリートの割裂ひび割れに起因する付着応力の低下の上限値をおおよそ得ることができたと考えられる。しかしながらグラフの矢印で示すように比較値が0.6を下回る結果も見られ、これらと質量減少率との関係も明確ではない。これらの試験体の付着応力ーすべり量関係を図3.14に示す。なお、付着応力はその試験体の付着応力の最大値で除して基準化している。これらの試験体では最大付着応力が過大なすべり量(1mm以上)で発生していたり、最大付着応力後の負勾配以降に再度付着応力が増加して破壊するといった現象が観察される。

これらの試験体は健全鉄筋時の付着割裂メカニズムとは異なる過程を経て破壊に至ったものと考 えられ、腐食成生物や鉄筋径の腐食の影響などがあると考えられるが、本研究では引抜試験後すぐに 除錆を行ってしまったため、詳細な検討は今後の課題としたい。





図 3.13 実験値との比較値-質量減少率関係

図 3.14 付着応カーすべり量関係(比較値 0.6 以下)

表 3.7 実験値との比較

	実験値	$\tau'_{b.max.average}$	実験値
試験伴名	(MPa)	(MPa)	$/\tau'_{b,max,average}$
L0.0_C15	6.77	-	-
L1.0_C15	4.40	3.59	1.225
L1.5_C15	2.24	2.79	0.803
L2.0_C15	1.43	2.64	0.543
L3.0_C15	2.35	2.38	0.988
L4.0_C15	2.49	2.53	0.983
L0.0_C25	9.90	-	-
L1.0_C25	5.60	6.03	0.928
L1.5_C25	5.21	4.97	1.048
L2.0_C25	2.19	5.29	0.413
L3.0_C25	1.21	5.51	0.220
L4.0_C25	2.53	5.56	0.454
L0.0_C35	10.73	-	-
L1.0_C35	5.53	8.31	0.674
L1.5_C35	2.26	8.38	0.622
L2.0_C35	3.27	8.42	0.388
L3.0_C35	3.50	3.82	0.916
L4.0_C35	3.19	4.12	0.775

3.7 まとめ

鉄筋の腐食が局所の付着性状に与える影響を検討するため、付着長を鉄筋径の4倍と短くした試験 体を用いて引抜試験を行い、以下の知見を得た。

- 1) 鉄筋の質量減少率が 7%程度までは最大付着応力と質量減少率に関係が見られ、回帰計算による 実験式を得た。
- 2) 割裂面に付着した錆汁を画像解析により読み取ることで、内部ひび割れを考慮した最大付着応力 を評価し、その低下度合いの上限値を示すことができた。

第4章 グローバル付着性状

4.1 はじめに

曲げせん断応力下に置かれる実際の RC 部材では、部材長に渡って発生する鉄筋腐食によるひび割 れは付着強度の低下をもたらし、部材のせん断耐力および靱性能を減少させると考えられる。前章で は局所的な付着性状の評価を試みたが、実部材の挙動を把握するためには、付着長が長い試験体によ るグローバルな付着性状の評価も重要である。

付着問題における力学的な背景を考えると、グローバルな付着性状には局所的な付着性状に加えて、 鉄筋による荷重端から自由端に向かう応力の伝達機構が大きな影響を及ぼす。さらに腐食によるひび 割れの影響を考えると、局所付着性状の変化とともに先の鉄筋による応力伝達機構の変化がグローバ ルな付着性状に影響すると思われる。すなわち、グローバルな付着性状には局所付着性状よりさらに 多くの影響因子が存在し、未解明な点が多いと考えられる。

本章では付着長を鉄筋径の30倍とした試験体を用いて引抜試験を行い、付着長が長い場合の腐食鉄筋の付着性状の解明に資することを目的とした実験的検討を行う。試験体はコンクリート断面を薄くし、短辺方向(かぶり)に割裂ひび割れが誘発するように計画する。

4.2 試験体

試験体一覧を表 4.1 に、試験体概略を図 4.1 に示す。実験のパラメータは、鉄筋径、かぶり厚さ、 付着長および腐食の程度である。試験体はコンクリートブロックの中心に異型鉄筋 1 本を埋め込んだ もので、試験体に用いた鉄筋は D10、D16 および D32 の 3 種類である。なお、付着長は鉄筋径の 30 倍とし、付着絶縁区間として鉄筋径の 1.5 倍の長さの塩ビ管を自由端および荷重端に設けている。断 面のせいは全て 400mm とし、かぶり厚さ C は鉄筋が D10 の場合、健全時の公称径の 2.0 倍および 3.2 倍の 2 種類、D16 の場合、健全時の公称径の 2.0 倍、2.5 倍、3.0 倍および 3.5 倍の 4 種類、D32 の場 合、健全時の公称径の 1.0 倍および 2.0 倍の 2 種類である。なお、試験体により鉄筋の規格が異なっ ているが、これは引抜試験を行う際、鉄筋が降伏しないようにするためである。

鉄筋は電食を用いて腐食させるものとし、試験体名のハイフンに続く数字は0が健全、1が質量減 少率 7.5%目標、2 が質量減少率 15%目標であることを示している。

試験体名称	鉄筋径 d_b (mm)	C/d_b^*	付着長 (mm)	鉄筋の規格
D10CF20-0		2.0		SD685
D10CF20-1	10	(20mm)	200	
D10CF32-0	10	3.2	300	
D10CF32-1		(30mm)		
D16CF15-0		1.5		
D16CF15-1		(24mm)		
D16CF15-2		(2411111)		SD345
D16CF20-0		2.0		575
D16CF20-1		(32mm)	480	
D16CF20-2	16	(3211111)		
D16CF25-0	10	2.5	400	
D16CF25-1		(40mm)	-	SD490
D16CF25-2		(4011111)		
D16CF35-0		2.5		
D16CF35-1		(56mm)		
D16CF35-2		(30000)		
D32CF10-0		1.0		
D32CF10-1	32	(32mm) 2.0	960	SD345
D32CF20-0	32		960	SD345
D32CF20-1		(64mm)		

表 4.1 試験体一覧

*鉄筋径とかぶり厚さとの比



図 4.1 試験体概略

4.3 材料試験結果

4.3.1 コンクリート

コンクリートのフレッシュ性状を表 4.2 に示す。コンクリートの設計強度は 24MPa であり、混和 剤として AE 減水剤を混入している。コンクリートの材料試験結果を表 4.3 に、解析に用いたコンク リートの力学的性質を表 4.4 に示す。コンクリートの材料試験は 100mm Ø × 200mm のテストピース を現場気中または現場封緘にて養生したものを用いており、圧縮試験および割裂試験は引抜試験の加 力日に行った。なお、コンクリートの弾性係数は応力-歪関係における圧縮強度の 1/3 の応力点の割 裂弾性係数とし、解析に用いたコンクリートの力学的性質は圧縮強度が現場気中および現場封緘にて 養生したテストピースの平均値を用いるものとし、割線強度は現場気中にて養生したテストピースの 値を用いる

設計強度	煉り上り温度	スランプ	スランプフロー	空気量
(MPa)	(°C)	(cm)	(cm)	(%)
24	24	20.5	-	4.8

表 4.2 コンクリートのフレッシュ性状

姜丹士汁	圧縮強度	弹性係数	割裂強度
食生万伝	(MPa)	(GPa)	(MPa)
	35.6	23.7	3.05
現場気中	35.7	24.3	2.98
	36.7	24.6	2.79
平均	36.0	24.2	2.94
	36.0	29.3	-
現場封緘	36.4	28.0	-
	37.7	29.9	-
平均	36.7	29.1	-

表 4.3 コンクリートの材料試験結果

表 4.4 コンクリートの解析用の力学的性質

圧縮強度(MPa)	弾性係数(GPa)	割裂強度(MPa)
36.4	26.7	2.94

4.3.2 鉄筋

鉄筋の引張試験結果一覧を表 4.5 に示す。なお、D32 の1本目の引張試験は、試験機の鉄筋を挟む チャックに噛合い不良が生じたため、最大荷重の測定はできなかった。

種別	規格	最大荷重(kN)	引張強度(MPa)	降伏強度(MPa)	弹性係数(GPa)
		66.4	931	761	201
D10	SD685	66.3	930	741	196
D10		66.6	934	756	193
	平均	66.4	931	752	197
		98.5	496	343	199
D16	SD345	98.7	497	345	196
D16		98.7	497	344	204
	平均	98.6	497	344	200
	SD490	139.5	702	536	195
		139.5	702	529	194
D10		139.8	704	538	203
	平均	139.6	703	534	197
D22		-	-	395	198
	SD345	445.0	560	391	194
D32		447.0	563	393	200
	平均	446.0	562	393	197

表 4.5 鉄筋の引張試験結果

4.4 鉄筋腐食方法

鉄筋は電食により腐食させるものとしている。図 4.2 に電食装置を示す。水槽の長さは試験体の付着絶縁区間から内側に自由端側および荷重端側ともに 30mm ずつ短くしたものである。電解液には 3%NaCl 水溶液を用いており、電食中濾水しないよう配慮した。電流は定電流発生装置を用いて通電 するものとし、陽極を鉄筋、陰極を水槽の底に設置した銅板に接続している。なお、質量減少率は積 算電流量により調節するものとしている。電食中の試験体は主に下面のコンクリート(電解液に触れ ている面)に鉄筋軸方向に沿ってひび割れが発生しているのが確認された。

試験終了後、試験体から取り出した鉄筋を除錆し、実際の質量減少率を測定した。



図 4.2 電食装置

4.5 実験方法

図 4.3 に加力方法を示す。加力は試験体のかぶりを拘束しないようかぶりの寸法にあわせた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、割裂による横方向の変位を拘束しないように、試験体と加力板の間には4枚に切ったテフロンシートを配置している。

図 4.4 に変位計の設置方法を示す。計測項目は引張荷重、自由端抜出し量、荷重端および自由端の 横方向変位である。なお、荷重端および自由端の横方向変位を計測する変位計は全部で4本あり、試 験体の打設面を top、型枠面を bottom (以下 btm と略す)、荷重端側を load、自由端側を free とする ことで、例えば打設面の自由端側に設置した変位計は top-free と呼称する。



図 4.4 変位計の設置方法

4.6 実験結果および検討

本章で用いた試験体は最終的にすべて付着割裂により破壊した。最大付着応力-質量減少率関係を 図 4.5 に、実験結果および質量減少率 C の一覧を表 4.6 に示す。付着応力は引張荷重を試験区間の鉄 筋の表面積で除した平均付着応力とし、鉄筋周長は健全鉄筋の公称値を用いている。付着強度比は実 験値の付着応力 τ を同一諸元の健全試験体の最大付着応力 τ_m で除した値である。なお、鉄筋が D16 である試験体は各々のかぶり厚さごとに最小二乗法による回帰計算を行い、近似直線をグラフに表記 している。グラフより、かぶりが厚いほど最大付着応力は大きくなるが、質量減少率に対する付着応 力の低下の勾配は急になることが確認できた。しかしながら、各健全試験体と同一諸元の腐食試験体 は鉄筋が D10 または D32 の場合が各 1 体、鉄筋が D16 の場合でも各 2 体しかないため、この結果の みで詳細な検討を行うには信憑性に欠けると思われる。したがってこれらのデータの信頼性を高める ため、健全試験体と同一諸元の試験体において、腐食の程度をパラメータとした実験をさらに行う必 要があると考えられるが、これについては今後の検討課題としたい。

付着強度比-質量減少率関係を図 4.6 に示す。最小二乗法により回帰計算を行った結果、式(4.1)に 示すような関係式を得た。D16CF35-1 が関係式からやや外れているものの、それ以外はおおむね関係 式に近い結果が得られた。



 $\frac{\tau}{\tau_m} = 1 - 3.00 \cdot C \tag{4.1}$

=+==> (+- /2	最大付着応力 _m	付着強度比	質量減少率 C
武駛14名 	(N/mm^2)	$ au / au_m$	(%)
D10CF20-0	2.46	1	-
D10CF20-1	1.57	0.640	14.71
D10CF32-0	4.68	1	-
D10CF32-1	2.83	0.605	11.99
D16CF15-0	2.10	1	-
D16CF15-1	1.19	0.566	7.77
D16CF15-2	1.62	0.771	13.70
D16CF20-0	2.45	1	-
D16CF20-1	2.14	0.872	6.38
D16CF20-2	1.12	0.459	14.35
D16CF25-0	3.70	1	-
D16CF25-1	3.14	0.847	5.87
D16CF25-2	2.40	0.647	12.61
D16CF35-0	5.11	1	-
D16CF35-1	3.18	0.621	3.24
D16CF35-2	3.09	0.605	8.68
D32CF10-0	1.60	1	-
D32CF10-1	1.19	0.746	7.64
D32CF20-0	2.71	1	-
D32CF20-2	1.79	0.659	6.78

表 4.6 実験結果および質量減少率一覧



図 4.6 付着強度比一質量減少率関係

加力前の試験体の top 側と btm 側を写真 4.1 に示す。電食を行った試験体は top 側または btm 側の どちらかに大きなひび割れを生じていた。実験により得られた付着応力–横方向変位関係を使用した 鉄筋径ごとに図 4.7 から図 4.9 に示す。なお、横方向変位はひび割れが開く方向を正としている。加 力中の試験体は荷重端側からひび割れが生じ、自由端側に向かって引き裂かれるように割裂していく 様子が確認されており、グラフからも自由端側のコンクリートが最終的に割裂により破壊するまで、 変位が増大することが分かる。また、腐食試験体のいくつかは top 側と btm 側の横方向変位に差が見 られる箇所が見られる(D16CF20-1、D16CF35-2 など)。これは、写真 4.1 から、電食により鉄筋を 腐食させた際、試験体の top 側と btm 側で腐食ひび割れの発生に差が生じたためであると思われる。





図 4.8 付着応カー横方向変位関係(鉄筋が D16 の試験体)









加力後の割裂面の様子を写真 4.2 および写真 4.3 に示す。写真から、試験体の多くは鉄筋の腐食に よって生じた錆汁が鉄筋の両側の割裂面のどちらか一方に集中して浸入しており、内部ひび割れが片 側に集中して発生したことを意味している(以下片側腐食と呼ぶ)。このような片側腐食は既往の研 究で報告された例がなく、通常の腐食とは異なっている。そのため、片側腐食したときの付着性状が どのような影響を受けるかは未知数である。特に鉄筋の腐食によって内部ひび割れが発生している付 着長の長い試験体の付着応力-すべり量関係を解析的に求めるためには、鉄筋軸方向のある断面にお ける局所の付着応力-すべり量関係を定義する必要がある。そこで、本章で見られた片側腐食を考慮 した局所の付着応力-すべり量関係を実験的に把握すめるため、図 4.10 に示すような試験体を提案 する。第三章で用いた試験体のスリットを片側だけ鉄筋まで伸ばすことで、片側に内部ひび割れが集 中した場合を模擬できるものと思われる。



写真 4.2 割裂面の様子(鉄筋が D10 および D16 の試験体)



D32CF10-1

D32CF20-1

写真 4.3 割裂面の様子



図 4.10 片側腐食を模擬した試験体

4.7 まとめ

付着長を鉄筋径の 30 倍と長くし、鉄筋が腐食した場合のグローバルな付着性状について実験的に 検討を行った結果、以下の知見を得た。

- 1) 平均付着応力はかぶりが厚いほど大きくなるが、質量減少率に対する低下の度合いは激しくなる ことが確認された。
- 2) 付着強度比-質量減少率関係から、鉄筋の腐食による平均付着応力の低下を表す関係式を得た。
- 3) 鉄筋の腐食によりかぶりの片側に内部ひび割れが集中して発生しているのが確認され、解析的に 付着応力-すべり量関係を求めるための試験体を提案した。

第5章 結論

鉄筋の腐食が RC 部材の構造性能に与える影響について、第2章では切削鉄筋および細径の丸鋼を 用いて試験体を作製し、鉄筋の腐食が中心圧縮性状に与える影響を定量的に把握することを目的とし た中心圧縮試験を行った。第3章では鉄筋の腐食が局所付着性状に与える影響を把握するため、付着 長を鉄筋径の4倍と短くした試験体の引抜試験を行い、割裂面に浸入した錆汁から内部ひび割れを考 慮した付着強度の低下の評価を行った。第4章では付着長を鉄筋径の30倍と長くした試験体を用い

て、実部材における付着性状の解明に資する目的で引抜試験を行い、実験的検討を行った。 以上から得られた知見をまとめて以下に示す。

- 鉄筋が腐食した場合の中心圧縮性状について、主鉄筋の腐食は最大軸応力の低下に大きく影響し、 帯鉄筋の腐食は最大軸応力以降の応力軟化域に大きく影響する。
- 2) 帯鉄筋の腐食に伴う最大軸応力以降の応力軟化域を考慮した拘束コンクリートの軸応力ー軸歪 関係のモデルは実験値を精度良く評価できた。
- 3) 鉄筋が腐食した場合の局所付着性状について、質量減少率が7%程度までは最大付着応力と質量 減少率に関係が見られ、回帰計算による実験式が得られた。
- 4) 割裂面に付着した錆汁を画像解析により読み取ることで、内部ひび割れを考慮した最大付着応力 を評価し、その低下度合いの上限値を示すことができた。
- 5) 鉄筋が腐食した場合のグローバルな付着性状について、付着長が同じ場合、平均付着応力はかぶ りが厚いほど大きくなるが、質量減少率に対する低下の度合いも激しくなる。
- 6) 付着強度比-質量減少率関係から、鉄筋の腐食による平均付着応力の低下を表す実験式を得た。
- 7) 割裂面に付着した錆汁から、内部ひび割れがかぶりの片側に集中していることが確認され、解析的に付着応力-すべり用分布を求めるための試験体を提案した。

謝辞

本論文を作成するにあたり、研究テーマから、実験の実施、論文推敲に至るまで、終始あたたかい 目でご指導、ご鞭撻下さいました筑波大学システム情報工学研究科准教授 金久保利之先生に心より 感謝いたします。また、筑波大学システム情報工学研究科教授 今井弘先生には有意義なご意見を頂 きましたことを深く感謝いたします。財団法人鉄道総合技術研究所 大屋戸理明氏には実験方法から 実験器具の提供など、終始お力添えいただきましたことを深く感謝いたします。また、試験体の製作 から実験遂行にあたり、筑波大学システム情報工学等支援室技術専門職員 小島篤志氏にご協力いた だきましたことを深く感謝いたします。

日々の研究生活におきましては、研究室の雰囲気をいつも明るくしてくださった後輩の皆様、福原 哲夫君、松永健太郎君、大和伸行君、張若平さん、長谷川嘉子さん、保坂剛君、中山裕司君、 鬼塚 由佳さん、浅野浩平君に感謝いたします。

最後に、小生を6年もの長い間支えてくださった両親に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 金仁秀,李翰承,野口貴文,友沢史紀:帯筋腐食がRC短柱の中心圧縮性状に及ぼす影響,日本 建築学会大会学術講演梗概集,A-1,pp385-386,1997.9
- 山本貴士,服部篤史,宮川豊章:鉄筋腐食の生じた横拘束コンクリートの一軸圧縮特性,日本材料学会,Vol.55,No.10, pp911-916, 2006.10
- 3) 大屋戸理明, 佐藤勉: 鉄筋が腐食したコンクリート部材の曲げ耐力の評価, 鉄道総研報告, Vol.19, No.12, pp.21-26, 2005.12
- 4) 金久保利之,園部泰寿:高強度人工軽量骨材コンクリートを用いた鉄筋コンクリート部材の耐震 性能に関する研究,建築学会構造系論文報告集,441,pp63-72,1992
- 5) 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, 1998.10
- 6) 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,第492号,pp99-106,1997.2
- Tepher R., : Lapped Tensile Reinforcement Splies, ASCE, Journal of Structural Division, Vol.108, No.ST1, pp.283-301, 1982.1
- Timoshenko S. P. and Goodier J. N. : Theory of Elasticity, 3rd ed.(International Student Edition), McGraw-Hill Kogakusha Ltd., Tokyo, pp65-71, 1970