筑波大学大学院博士課程

理工情報生命学術院 システム情報工学研究群修士論文

# 鉄筋腐食による付着性能の低下を 模擬した RC 部材の構造性能

## 藤原 海

## 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

2022年 3月

#### 論文概要

建設後 40~50 年以上経過した鉄筋コンクリート(RC)造構造物は経年劣化による性能低 下が危惧されている。既存の構造物に対して十分な性能を確保するためには、劣化の度合を 定量的に評価し、適切な維持管理を行う必要がある。RC 造構造物の経年劣化の一つに鉄筋腐 食が挙げられる。鉄筋が腐食することで、鉄筋断面積の減少による鉄筋の強度低下が生じる とともに、腐食生成物による体積膨張がコンクリートにひび割れを引き起こし、鉄筋とコン クリート間の付着性状に影響を与える。先行研究においては、鉄筋腐食によるひび割れが RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討するため、静的破砕剤を用いて腐食ひび割れを模擬した 試験体で加力実験を行った。破砕剤による手法では腐食生成物による体積の増加を模擬する ため、体積増加による拘束圧の上昇、腐食ひび割れ、腐食ひび割れに伴う付着力の低下を要 因として含んでいる。鉄筋腐食はそれらが複合的に作用することで構造性能に影響を及ぼす ため、各要因による影響を把握したい。そのため、本研究では腐食ひび割れによる鉄筋とコ ンクリート間の付着性能の低下が RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討することを目的と し、

第1章では、本研究の背景について整理し、目的を明確にした。

第2章では、せん断破壊型試験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、主筋の付着力 の低減が部材の構造性能に及ぼす影響を検討した。付着性能の低下が比較的小さい試験体で は、付着性能の低下に伴う最大耐力および累積吸収エネルギーが増加し、付着性能の低下が より大きい試験体では最大耐力が低下する傾向が見られた。また、付着性能の低下に伴い正 側加力時における初期剛性が低下した。部材角が比較的小さいとき、累積エネルギー吸収量 は付着性能が低下すると増加した。

第3章では、曲げ破壊型試験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、主筋の付着力の 低減が部材の構造性能に及ぼす影響を検討した。付着性能の変化が最大耐力へ及ぼす影響は わずかであり、付着性能の低下に伴い最大耐力は若干増加した。初期剛性は付着性能の低下 に伴い減少する傾向が見られた。累積エネルギー吸収量は、部材角が比較的小さいとき、付 着性能の低下に伴って減少した。

第4章では、本論文の結論を述べた。

# 目次

第1章 序論
1.1 研究背景
1.2 研究目的
1.3 鉄筋-コンクリート間の付着力低減の模擬方法4
第2章 せん断破壊型試験体の曲げせん断実験
2.1 はじめに
2.2 実験概要
2.2.1 試験体概要
2.2.2 使用材料
2.2.3 加力方法
2.2.4 計測方法
2.3 実験結果
2.3.1 試験体破壊状況
2.3.2 せん断力-部材角関係
2.3.3 最大耐力および最大耐力時の部材角
2.3.4 包絡線の比較
2.3.5 主筋のひずみ
2.3.6 付着応力
2.4 まとめ
第3章 曲げ破壊型試験体の曲げせん断実験
3.1 はじめに
3.2 実験概要
3.2.1 試験体概要
3.2.2 使用材料
3.2.3 加力方法
3.2.4 計測方法
3.3 実験結果
3.3.1 試験体破壊状況
3.3.2 せん断力-部材角関係
3.3.3 最大耐力
3.3.4 包絡線の比較
3.3.5 主筋のひずみ
3.3.6 付着応力
3.4 まとめ
第4章 結論

謝辞······	77
参考文献	78

# 図表目次

义	1.1.1	破砕剤充填による鉄筋腐食ひび割れの模擬手法[1]	2
义	1.1.2	鉄筋腐食によるひび割れが付着強度に与える影響[2]	2
汊	1.3.1	粘土とフィルムにより設けた非付着領域	5
义	2.2.1	せん断破壊型試験体配筋図	7
汊	2.2.2	せん断破壊型試験体の非付着領域配置	8
汊	2.2.3	せん断破壊型試験体における鉄筋の応力-ひずみ関係	. 13
汊	2.2.4	せん断破壊型試験体におけるアルミパイプの応力-ひずみ関係	. 14
义	2.2.5	加力装置図	. 15
义	2.2.6	加力履歴	. 15
义	2.2.7	変位計設置位置(単位:mm)	. 16
汊	2.2.8	せん断破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置	. 17
汊	2.3.1	せん断破壊型試験体のひび割れ状況(S-BD1)	. 19
义	2.3.2	せん断破壊型試験体のひび割れ状況(S-BD2)	. 20
汊	2.3.3	せん断破壊型試験体のひび割れ状況(S-BD3)	. 21
义	2.3.4	せん断破壊型試験体のせん断力-部材角関係	. 22
义	2.3.5	相当ひび割れ幅-最大耐力関係	. 23
义	2.3.6	相当ひび割れ幅-最大耐力時部材角関係	. 24
义	2.3.7	せん断破壊型試験体の包絡線	. 25
汊	2.3.8	S-BD1 主筋ひずみ分布	. 27
汊	2.3.9	S-BD2 主筋ひずみ分布	. 28
义	2.3.10	S-BD3 主筋ひずみ分布	. 29
义	2.3.11	ひずみゲージ間の区間番号	. 30
义	2.3.12	ひずみ測定位置と区間長の設定	. 30
义	2.3.13	Menegotto-Pinto モデル	. 31
义	2.3.14	S-BD1 上端主筋の付着応力	. 32
义	2.3.15	S-BD1 下端主筋の付着応力	. 33
义	2.3.16	S-BD2 上端主筋の付着応力	. 34
义	2.3.17	S-BD2 下端主筋の付着応力	. 35
汊	2.3.18	S-BD3 上端主筋の付着応力	. 36
义	2.3.19	S-BD3 下端主筋の付着応力	. 37
义	2.3.20	サイクルピーク時における付着応力の平均値	. 38
义	2.3.21	せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量	. 39
义	2.3.22	せん断破壊型試験体の累積エネルギー吸収量比	. 39
义	3.2.1	曲げ破壊型試験体の配筋図	. 42
义	3.2.2	曲げ破壊型試験体の非付着領域配置	. 43

义	3.2.3	各試験体のせん断余裕度-付着余裕度関係	. 44
义	3.2.4	曲げ破壊型試験体における鉄筋の応力-ひずみ関係	. 46
义	3.2.5	曲げ破壊型試験体におけるグラウト充填アルミパイプの応力-ひずみ関係	. 47
义	3.2.6	曲げ破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置	. 48
义	3.3.1	曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-NC)	. 50
义	3.3.2	曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-BD1)	. 51
义	3.3.3	曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-BD2)	. 52
义	3.3.4	曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-BD3)	. 53
义	3.3.5	曲げ破壊型試験体のせん断力-部材角関係	. 55
义	3.3.6	相当ひび割れ幅-最大耐力関係	. 56
义	3.3.7	相当ひび割れ幅-最大耐力時部材角関係	. 57
义	3.3.8	曲げ破壊型試験体の包絡線	. 58
义	3.3.9	B-NC 主筋ひずみ分布	. 60
义	3.3.10	B-BD1 主筋ひずみ分布	. 61
义	3.3.11	B-BD2 主筋ひずみ分布	. 62
义	3.3.12	B-BD3 主筋ひずみ分布	. 63
义	3.3.13	ひずみゲージ間の区間番号	. 64
义	3.3.14	B-NC 上端主筋の付着応力	. 65
义	3.3.15	B-NC 下端主筋の付着応力	. 66
义	3.3.16	B-BD1 上端主筋の付着応力	. 67
义	3.3.17	B-BD1 下端主筋の付着応力	. 68
义	3.3.18	B-BD2 上端主筋の付着応力	. 69
义	3.3.19	B-BD2 下端主筋の付着応力	. 70
义	3.3.20	B-BD3 上端主筋の付着応力	. 71
义	3.3.21	B-BD3 下端主筋の付着応力	. 72
义	3.3.22	サイクルピーク時における付着応力の平均値	. 73
义	3.3.23	曲げ破壊型試験体の累積エネルギー吸収量	. 74
义	3.3.24	曲げ破壊型試験体の累積エネルギー吸収量比	. 74
表	1.3.1	各手法が模擬する鉄筋腐食の因子	4
表	2.2.1	せん断破壊型試験体一覧	7
表	2.2.2	せん断破壊型試験体の耐力計算結果	9
表	2.2.3	せん断破壊型試験体におけるコンクリートの調合表	. 12
表	2.2.4	せん断破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果	. 12
表	2.2.5	せん断破壊型試験体における検討用コンクリート強度	. 12
表	2.2.6	せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果	. 13
表	2.2.7	せん断破壊型試験体におけるアルミパイプに引張試験結果	. 14
表	2.3.1	せん断破壊型試験体の最大耐力と最大耐力時部材角	. 23

表	3.2.1	曲げ破壊型試験体一覧	42
表	3.2.2	曲げ破壊型試験体の耐力計算	44
表	3.2.3	曲げ破壊型試験体におけるコンクリートの調合表	45
表	3.2.4	曲げ破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果	45
表	3.2.5	曲げ破壊型試験体における検討用コンクリート強度	45
表	3.2.6	せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果	46
表	3.2.7	曲げ破壊型試験体におけるグラウト充填アルミパイプ引張試験結果	47
表	3.3.1	曲げ破壊型試験体の最大耐力と最大耐力時部材角	56

## 第1章 序論

### 1.1 研究背景

高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート(以下、RC)造構造物は、建設から40~50 年以上経過し、環境要因や経年劣化による性能低下が危惧されている。既存の構造物に対し て十分な性能を確保するためには、構造物の劣化による構造性能の低下を定量的に評価し、 維持管理を行う必要がある。

RC 構造物の性能低下を引き起こす経年劣化の一つに鉄筋腐食が挙げられる。鉄筋腐食は、 鉄筋断面積の減少により、鉄筋の強度が低下するとともに、腐食生成物による体積膨張がコ ンクリートにひび割れを引き起こし、鉄筋-コンクリート間の付着性状に影響を与える。

腐食による鉄筋の断面減少が RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討した研究は広く行われているが、腐食生成物による体積膨張に由来したひび割れ(以下、腐食ひび割れ)の影響 に着目した研究は少ない。

先行研究<sup>[1]</sup>では、腐食ひび割れが RC 部材のせん断性能に及ぼす影響について検討するため、せん断破壊先行型試験体に静的破砕剤を用いて腐食ひび割れの模擬を行い、逆対称繰返し曲げせん断加力試験が実施された。破砕剤による模擬方法は、RC 部材にあらかじめ中空のアルミパイプを埋設し、養生後に静的破砕剤を充填することで、腐食生成物の体積膨張によるひび割れを模擬したひび割れを生じさせる方法である(図 1.1.1)<sup>[1]</sup>。実験結果より、加力前のひび割れ幅と最大耐力には明瞭な関係が見られていない。破砕剤の膨張に伴う拘束圧の上昇によるコンクリートの有効圧縮強度の増大や、加力前ひび割れによる破壊の局所化の抑制が要因であると考えられるとしている。

鉄筋腐食が構造性能に及ぼす影響は、鉄筋腐食に起因する各パラメータの変化が複合的に 作用することで生じる。そのため、各因子が及ぼす影響を把握することは、構造性能を定量 的に評価する上で重要である。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」報告書では、腐食ひび割れ幅と鉄筋-コンクリート間の付着強度に ついて報告されている。鉄筋-コンクリート間の付着強度比は、RC 部材に補強筋がある場合 とない場合ともに、腐食ひび割れ幅の増大に伴い低下することが示されている(図 1.1.2)<sup>[2]</sup>。 付着性能の低下は部材の付着割裂破壊を引き起こし、靱性能を低下させる。また、トラス機 構では主筋とコンクリート間の付着により力が十分に伝達することが前提となるため、腐食 ひび割れによる付着性状の低下は RC 部材の構造性能に影響を及ぼすと考えられる。そのた め、付着性能の低下そのものがどのように構造性能に影響を及ぼすか検討することも重要で ある。



図 1.1.1 破砕剤充填による鉄筋腐食ひび割れの模擬手法<sup>[1]</sup>



図 1.1.2 鉄筋腐食によるひび割れが付着強度に与える影響[2]

## 1.2 研究目的

本研究では、主筋の付着性能の低下が RC 部材の構造性能に及ぼす影響を検討することを 目的とし、せん断破壊型試験体と曲げ破壊型試験体の2シリーズについて、建研式の逆対称 繰返し曲げせん断加力を実施する。鉄筋-コンクリート間の付着力を低減させる方法として、 主筋を油粘土とフィルムで被覆する方法を採用する。

第2章では、主筋の付着性能低下が繰返し加力下における RC 部材のせん断性状に及ぼす 影響を検討するため、せん断破壊型試験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を行う。加力試験 の結果より、最大耐力、包絡線、主筋の付着応力、累積エネルギー吸収量について検討する。

第3章では、主筋の付着性能低下が繰返し加力下における RC 部材の破壊形式および構造 性能に及ぼす影響を検討するため、付着性能の低下に伴い付着破壊に移行する曲げ破壊型試 験体に逆対称繰返し曲げせん断加力を行う。加力試験の結果より、最大耐力、包絡線、主筋 の付着応力、累積エネルギー吸収量について検討する。

## 1.3 鉄筋-コンクリート間の付着力低減の模擬方法

鉄筋腐食に関する検討を行う場合、既往の研究では暴露試験、電食試験、スリットによる 模擬方法、静的破砕剤による模擬方法などが用いられる。各手法により模擬される鉄筋腐食 の因子を表 1.3.1 に示す。暴露試験および電食試験では鉄筋腐食が持つ因子が全て模擬され るため、実際の鉄筋腐食が及ぼす影響を検討する上で有効である。しかしながら、電食試験 では、鉄筋に通電させるためひずみゲージによる測定が難しく、取得できるデータに限りが ある。また、電食ではひび割れ発生箇所における腐食の局所化が指摘されている<sup>[3]</sup>。そのため、 鉄筋腐食の模擬方法としてスリットや破砕剤による模擬が提案されている。これらの手法で は鉄筋腐食の因子を部分的に模擬しているため、各因子の与える影響について検討すること ができる。

本研究では鉄筋腐食による付着力の変化が構造性能に及ぼす影響を検討するため、対象と する主筋に鉄筋とコンクリート間の付着力が作用しない領域(以下、非付着領域)を設ける。 非付着領域は鉄筋に粘土を貼付し、フィルムで覆い作製する(図 1.3.1)。付着性能の低減度 合は非付着領域の長さによりコントロールする。本研究では、先行研究<sup>[1]</sup>の試験体に生じた加 力前ひび割れ幅に対応するように付着性能を低減させる。腐食ひび割れ幅-付着強度比関係 <sup>[2]</sup>を参考に任意のひび割れ幅時の付着強度比を求め、付着強度比の低下分の比率を主筋にお ける非付着領域長さの割合とした。

模擬方法	模擬する鉄筋腐食の因子	補足
暴露試験	<ul> <li>実際の鉄筋腐食と同一</li> <li>鉄筋の断面減少</li> <li>鉄筋表面の状態変化</li> <li>ひび割れ</li> <li>付着力の変化</li> <li>腐食生成物による体積膨張</li> </ul>	
電食試験	実際の鉄筋腐食と同一	ひずみゲージによる測定が難しい。 腐食が局所化する。
スリットによる 模擬	<ul> <li>ひび割れ</li> </ul>	実際のひび割れとの関連性が不明 である。
破砕剤による 模擬	<ul> <li>・ ひび割れ</li> <li>・ 付着力の変化</li> <li>・ 腐食生成物による体積膨張</li> </ul>	
非付着領域による 模擬	・ 付着力の変化	

表 1.3.1 各手法が模擬する鉄筋腐食の因子



図 1.3.1 粘土とフィルムにより設けた非付着領域

# 第2章 せん断破壊型試験体の曲げせん断実験

### 2.1 はじめに

RC部材のせん断耐荷機構の一つであるトラス機構は、せん断補強筋の引張力とともに引張 鉄筋-コンクリート間の付着力とコンクリートの斜め圧縮力により形成されるため、付着性 能の低下がせん断性状に影響を及ぼすことが予想される。主筋の腐食が RC 部材のせん断耐 力に及ぼす影響について検討した既往研究<sup>[4]</sup>では、主筋の腐食した RC 部材の最大耐力は健全 試験体と同程度以上になることが指摘された。先行研究<sup>[2]</sup>においても、主筋周りで加力前ひび 割れ幅 1.10mm の試験体の最大耐力は加力前ひび割れ幅 0.20mm の試験体の最大耐力と同程 度以上となった。鉄筋腐食の度合と RC 部材の構造性能を定量的に評価することは難しい。 そのため、鉄筋腐食の要因の一つである付着性能の低下に着目し、その影響について検討す る。

本章では、鉄筋-コンクリート間の付着性能の低下がせん断性状に及ぼす影響について検 討するため、せん断破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断加力を実施し、最大耐力、包絡 線、主筋の付着応力の検討を行った。

### 2.2 実験概要

#### 2.2.1 試験体概要

せん断破壊型試験体の一覧を表 2.2.1 に、試験体配筋を図 2.2.1 に、非付着領域の配置を図 2.2.2 に示す。試験体は全 3 体である。断面は幅 b×せい Dを 220mm×420mm とし、試験体 の中央部 1260mm を試験区間とした。主筋は 4-D16 の二段配筋、せん断補強筋は試験区間で D10@200、両端部で D10@100 を配している。コンクリート目標強度は 18MPa で、変動因子 は一段目主筋の D10@200 区間における非付着領域の長さとした。非付着領域の長さは、腐食 ひび割れ幅-付着強度比関係<sup>[2]</sup>を参考にし、先行研究の試験体で模擬された腐食ひび割れ幅 0.20mm、0.55mm、1.10mm に相当する付着強度比の低下分となるよう設定した。コンクリート打設から 4 週間経過後に、予め埋設したアルミパイプにグラウトを充填した。

学校休		付着強度比	相当する加力前				
武吻 (平	—————————————————————————————————————	(非付着領域長比)	ひび割れ幅				
S DD1		0.737	0.90				
3-BD1	主筋:SD490(D16)	(371mm / 1400mm)	0.20mm				
C DD2	せん断補強筋:SD295A(D10)	0.433	0.55				
S-BD2	せん断スパン比:1.5	(791mm / 1400mm)	0.35mm				
C DD2	せん断補強筋比:0.32%	0.187	1.10				
S-BD3		(1141mm / 1400mm)	1.10mm				

表 2.2.1 せん断破壊型試験体一覧



図 2.2.1 せん断破壊型試験体配筋図







(b) S-BD2



(c) S-BD3図 2.2.2 せん断破壊型試験体の非付着領域配置

耐力計算結果を表 2.2.2 に示す。試験体は RC 部材のせん断性能の確認のため、せん断破壊 が起こるように設計した。曲げ強度の計算には梁の終局曲げ強度略算式<sup>[5]</sup>を用いた。せん断強 度は荒川 mean 式<sup>[5]</sup>および日本建築学会「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指 針・同解説」<sup>[6]</sup>によるせん断強度式 A 法より算出した。付着耐力は日本建築学会「鉄筋コン クリート造建物の靭性保証型耐震設計指針・同解説」<sup>[7]</sup>による付着破壊の影響を考慮したせん 断信頼強度式より算出した。曲げ強度においては破砕剤充填パイプの負担荷重はないものと して算出した。付着強度算出においてはパイプの負担付着力がないものとし、一段目主筋の 付着信頼強度に各試験体の付着強度比を乗することで付着性能の低減を考慮した。

試験体	曲げ強度	せん断弾	度 (kN)	付着破壊 考慮せん断 強度(kN)	せん断	余裕度	付着 余裕度
	$Q_{Mu}$ (kN)	荒川 mean	終局強度型	まれんと (兄 弐丁 ヂリ	荒川 mean	終局強度型	靭性
		式	A 法	WE休祖空 V	式	A 法	保証型
		$Q_{u,me}$	V <sub>u,A</sub>	V bu	Q <sub>u,me</sub> / Q <sub>Mu</sub>	$V_{u,A} / Q_{Mu}$	$V_{bu}$ / $Q_{Mu}$
S-BD1				251			1.23
S-BD2	204	147	180	251	0.72	0.88	1.23
S-BD3				229			1.12

表 2.2.2 せん断破壊型試験体の耐力計算結果

(1)曲げ強度(略算式)

$$Q_{mu} = 0.9 \sum a_t \cdot \sigma_y \cdot d / (L_0/2)$$

ここで、

*Q<sub>mu</sub>*:曲げ強度

- *a*<sub>t</sub> :引張鉄筋断面積
- *σ*y : 引張鉄筋の降伏強度

*d* : 有効せい

*L*<sub>0</sub> : 内法スパン

(2) 荒川 mean 式

$${}_{c}Q_{su,mean} = \left\{ \frac{0.115k_{u}k_{p}(180 + \sigma_{B})}{M/Qd + 0.12} + 2.7\sqrt{p_{w} \cdot \sigma_{wy}} \right\} b \cdot j$$

ここで、

<sub>c</sub>Q<sub>su</sub> :曲げ強度 (kgf)

*k*<sub>u</sub> : 断面寸法による補正係数 (= 0.72)

$$k_p$$
 : 引張鉄筋比引 $p_t$ (%)による補正係数(=  $0.82 {p_t}^{0.23}$ )

 $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)

M/Qd: せん断スパン比

- *p<sub>w</sub>* : せん断補強筋比
- $\sigma_{wy}$ : せん断補強筋の降伏強度 (kgf/cm<sup>2</sup>)
- *b* :梁幅 (cm)
- j : 応力中心間距離 (= 7/8d) (cm)
- d : 有効せい (cm)

(3) せん断強度(終局強度型指針式 A 法)

$$W_{u} = b \cdot j_{t} \cdot p_{w} \cdot \sigma_{wy} \cdot \cot \varphi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_{B}/2$$

$$V_u$$
 : せん断強度

 b
 : 梁幅

  $j_i$ 
 : 主筋中心間距離

  $p_w$ 
 : せん断補強筋比

  $\sigma_{wy}$ 
 : せん断補強筋の降伏強度

  $\phi$ 
 : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度

  $= min\{2.0, j_t/(D \cdot tan \theta), \sqrt{v \cdot \sigma_B/(p_w \cdot \sigma_{wy}) - 1.0}\}$ 
 $\theta$ 
 :  $tan \theta = \sqrt{(L/D)^2 + 1 - L/D}$ 
 $\beta$ 
 :  $= (1 + cot^2 \varphi)p_w \cdot \sigma_{wy}/v \cdot \sigma_B$ 
 $D$ 
 : 梁せい

  $L$ 
 : 内法スパン

  $v$ 
 :  $v_0 = 0.7 - \sigma_B/2000 \ (\sigma_B on \mbox{P}dctt \ kgf/cm^2)$ 
 $\sigma_B$ 
 :  $= 1 - v / J - V / L$ 

(4) 付着耐力(靱性保証型指針式)

$$V_{bu} = \min\left(\sum_{i} (\tau_{bu}\psi)j_e + \left\{v\sigma_B - \frac{2.5\sum_{i} (\tau_{bu}\psi)}{\lambda b_e}\right\}\frac{bD}{2}tan\theta, \frac{\lambda v\sigma_B}{2}b_e j_e\right)$$
$$\sum_{i} (\tau_{bu}\psi) = \tau_{bu}\sum_{i} \psi_1 + \tau_{bu2}\sum_{i} \psi_2$$

ここで、

- *V<sub>bu</sub>*: せん断強度
- je : せん断補強筋のせん断力方向への芯々間隔
- $v \qquad := 0.7 \frac{\sigma_B}{200}$
- $\sigma_B$  : コンクリート圧縮強度

$$\lambda \qquad := \left(1 - \frac{s}{2j_e}\right) \cdot \left(1 - \frac{b_s}{4j_e}\right)$$

s : せん断補強筋間隔

- **b**s : せん断補強筋断面方向最大間隔
- *be* : せん断補強筋のせん断力直交方向への芯々間隔(= *b*<sub>s</sub>)
- *b* :梁幅
- D : 梁せい

 $tan \theta$  :=  $0.9 \times \frac{D}{2L}$  L :内法スパン  $\tau_{bu}$  :一段目主筋付着信頼強度  $= \alpha_t \{ (0.086b_{si} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st} \}$  $\tau_{bu2}$  :一段目主筋付着信頼強度

= 
$$0.6\alpha_t \{ (0.086b_{si2} + 0.11) \sqrt{\sigma_B} + k_{st2} \}$$
  
(上端筋のとき、 $\alpha_t = 0.75 + \frac{\sigma_B}{400}$ /下端筋のとき、 $\alpha_t = 1$ )

- $b_{si}$ :=  $(b N_1 d_b)/(N_1 d_b)$  $b_{si}$ :=  $(b N_2 d_b)/(N_2 d_b)$  $k_{st}$ :=  $(56 + 47N_W/N_1)/(b_{si} + 1)p_W$  $k_{st2}$ :=  $103(b_{si2} + 1)p_W$  $N_W$ :  $-400 \pm \lambda$ 断補強筋の足の数 $N_1$ :  $-600 \pm 260 \pm 300$  $N_2$ :  $260 \pm 260 \pm 300$  $t_b$ :  $\pm 168$  $p_W$ :  $\pm 0.000$
- $\Sigma \psi_1$  : 一段目主筋周長合計
- $\Sigma \psi_2$  : 二段目主筋周長合計

#### 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、最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。 コンクリートの調合計画を表 2.2.3 に示す。

W/C		借去				
(%)	С	W	G	Ad	加巧	
78.5	243	191	938	845	2.43	

表 2.2.3 せん断破壊型試験体におけるコンクリートの調合表

コンクリートの材料試験には、  $\phi$ 100mm×200mm の円柱供試体を用いた。試験体の加力期間の前後で材料試験を行った。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行った。

コンクリートの材料試験結果を表 2.2.4 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 2.2.5 に示す。検討用コンクリート強度は、加力期間前後の試験結果の平均値とした。

衣 2.2.4 との時候後生民候伴に6577-6-12777 105月7日政府和								
大大忠今	来旦	圧縮強度	弾性係数	割裂強度	備去			
「「「」」(1)「「」」(1)「「」」(1)「「」」(1)「」)(1)「」(1)」(1)「」)(1)「」)(1)「」(1)」(1)「」)(1)「」(1)」(1)」(1)「」(1)」(1)」(1)」(1)「」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)」(1)	() 街 万	(MPa)	(GPa)	(MPa)	11月4月			
	1	23.6	19.4	2.43				
12 🗆	2	23.7	19.4	1.83				
43 🗆	3	23.8	19.1	2.11				
	平均	23.7	19.3	2.12				
	4	25.1	19.8	2.46				
50 🗆	5	24.5	19.4	2.05				
<u> </u>	6	24.8	19.6	2.13				
	平均	24.8	19.6	2.21				

表 2.2.4 せん断破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果

表 2.2.5 せん断破壊型試験体における検討用コンクリート強度

日搏強度	E縮強度 弾性係数		割裂強度
日际强度	(MPa)	(GPa)	(MPa)
18MPa	24.2	19.4	2.17

(2) 異形鉄筋

主筋には異形鉄筋 D16 (SD490)、せん断補強筋には異形鉄筋 D10 (SD295A) を用いた。引 張試験結果を表 2.2.6 に、応力--ひずみ関係を図 2.2.3 に示す。

坐控	来旦	降伏強度	弾性係数	降伏ひずみ	引張強度	破断伸び	備去
业大月刀	留方	(MPa)	(GPa)	(%)	(MPa)	(%)	
	1	529	197	0.27	701	10.8	標点間外破断
D16	2	528	200	0.27	704	17.9	
SD490	3	522	179	0.29	704	15.7	
	平均	526	192	0.27	703	14.8	
	1	353	191	0.19	482	32.0	
D10	2	348	188	0.18	480	29.9	
SD295A	3	355	192	0.19	481	29.4	
	平均	352	190	0.19	481	30.4	

表 2.2.6 せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果



図 2.2.3 せん断破壊型試験体における鉄筋の応カーひずみ関係

(3) アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには外径 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用いた。アルミパイプ単体の引張試験結果を表 2.2.7 に、応力-ひずみ関係を図 2.2.4 に示す。なお、降伏強度は 0.2% オフセット耐力とした。

アルミ	来旦	降伏強度	弹性係数	引張強度	破断伸び	ポマッシュル	借去
パイプ		(MPa)	(GPa)	(MPa)	(%)		
	1	201	63.8	210	6.97	0.327	標点間外破断
φ22mm	2	217	52.9	247	5.17	0.317	標点間外破断
t=1mm	3	203	63.3	248	4.79	0.372	
	平均	207	60.0	235	5.64	0.338	

表 2.2.7 せん断破壊型試験体におけるアルミパイプに引張試験結果



図 2.2.4 せん断破壊型試験体におけるアルミパイプの応カーひずみ関係

#### 2.2.3 加力方法

加力装置を図 2.2.5 に、加力履歴を図 2.2.6 に示す。試験体は軸方向を鉛直方向とし、鋼製 アングルで端部を固定することで設置した。加力方法は建研式加力で、軸力が 0 になるよう 制御し、加力梁の平行を保ちながら 100t アクチュエーターによる曲げせん断加力を行った。 曲げせん断加力は正負交番繰返しで、部材角 1/400~1/33rad の同一部材角で 2 回、部材角 1/20 および 1/15rad で 1 回行った。



図 2.2.6 加力履歴

#### 2.2.4 計測方法

計測項目は、アクチュエーター出力によるせん断力、変位計によるスタブ間変位、軸方向 変位、試験体局部変位、ひずみゲージによる主筋ひずみ、せん断補強筋ひずみ、アルミパイ プのひずみである。

変位計の設置位置を図 2.2.7 に、ひずみゲージの貼付位置を図 2.2.8 に示す。スタブ間変位 は D1 と D2 の平均値とした。主筋およびアルミパイプの危険断面位置、せん断補強筋は梁側 面中央部、および付着応力検討のため一段目主筋の D10@200 区間における各区間中央にひず みゲージを貼付した。



図 2.2.7 変位計設置位置(単位:mm)



図 2.2.8 せん断破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置

## 2.3 実験結果

#### 2.3.1 試験体破壊状況

部材角 1/400~1/33rad の 2 サイクル加力終了後、1/20 および 1/15rad の 1 サイクル加力終了 後の試験体ひび割れ状況を図 2.3.1~図 2.3.3 に示す。図中の左側が試験体配筋における下ス タブ、右側が上スタブに該当する。併せて、実験時の各試験体のひび割れ状況について述べ る。 S-BD1

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で二段目主筋 位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れと一段目主筋位置の付着割裂 ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



(g)1/20rad(h)1/15rad図 2.3.1 せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (S-BD1)

S-BD2

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で二段目主筋 位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れと一段目主筋位置の付着割裂 ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



(g)1/20rad(h)1/15rad図 2.3.2 せん断破壊型試験体のひび割れ状況 (S-BD2)

S-BD3

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れが発生した。部材角 1/100rad に至る過程で二段目主筋 位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、上端端部から下端中央部に架かるせん断ひび 割れと、下端一段目主筋位置の付着割裂ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



図 2.3.3 せん断破壊型試験体のひび割れ状況(S-BD3)

#### 2.3.2 せん断カー部材角関係

各試験体のせん断力-部材角関係を図 2.3.4 に示す。以下に、各試験体の状況を述べる。 S-BD1

正加力時では部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 189kN に達し、負加力時では 1/100rad に至る過程で 164kN に達した。最大耐力以降、耐力が徐々に低下し、主筋の滑りによる逆 S 字型の履歴を示した。

#### S-BD2

正加力時では部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 180kN に達し、負加力時では 1/100rad に至る過程で 182kN に達した。正負ともに部材角 1/50rad 時に急激な耐力低下が見られた。 逆 S 字型の履歴は S-BD1 と同様の傾向を示した。

#### S-BD3

正加力時では部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 160kN に達し、負加力時では 1/100rad に至る過程で 175kN に達した。最大耐力以降、耐力が徐々に低下し、他試験体と同様に主筋の滑りによる逆 S 字型の履歴を示した。





図 2.3.4 せん断破壊型試験体のせん断カー部材角関係

#### 2.3.3 最大耐力および最大耐力時の部材角

各試験体の最大耐力と最大耐力時の部材角を表 2.3.1 に示す。試験体の相当ひび割れ幅と 最大耐力の関係を図 2.3.5 に、相当ひび割れ幅と最大耐力時部材角の関係を図 2.3.6 に示す。 図 2.3.5 に終局強度型指針式 A 法によるせん断強度計算値、主筋の付着強度低下を考慮した 靭性保証型指針による付着耐力計算値を併せて示す。各強度は 2.2.1 で述べた方法に材料試験 で得られた値を用いて算出した。

S-BD2 の最大耐力は相当ひび割れ幅の増大に伴い、S-BD1 よりわずかに増加した。S-BD3 の最大耐力は S-BD1、S-BD2 より小さい値を示した。破壊状況より、S-BD3 は上端端部から 下端中央部に架かるせん断ひび割れと下端一段目主筋位置の付着割裂ひび割れにおいてひび 割れの拡幅が集中したことで S-BD1、S-BD2 より最大耐力が小さくなったと考えられる。

最大耐力時の部材角は、B-BD2 で B-BD1 より小さい値を示し、B-BD3 は B-BD2 と同等の 値を示した。

試験体	正側 最大耐力 (kN)	正側 最大耐力時の 部材角 (×0.01rad)	負側 最大耐力 (kN)	負側 最大耐力時の 部材角 (×0.01rad)	正負平均 最大耐力 (kN)	正負平均 部材角 (×0.01rad)
S-BD1	189	1.92	165	1.01	177	1.46
S-BD2	180	1.50	182	1.01	181	1.25
S-BD3	160	1.52	175	1.00	168	1.26

表 2.3.1 せん断破壊型試験体の最大耐力と最大耐力時部材角





図 2.3.6 相当ひび割れ幅-最大耐力時部材角関係

#### 2.3.4 包絡線の比較

各試験体の包絡線を図 2.3.7 に示す。左図は部材角 1/50rad まで、右図は加力終了時までの 全体の包絡線を示す。初期剛性を比較すると、正側では部材角 1/50rad まで S-BD1、S-BD2、 S-BD3 の順で剛性の低下が小さい。負側では部材角 1/100rad まで S-BD2、S-BD3、S-BD1 の 順で剛性の低下が小さい。降伏後の耐力は正側で S-BD1、S-BD3、S-BD2 の順で大きく、負側 で 1/33rad を除くと S-BD3、S-BD2、S-BD1 の順で大きくなった。



#### 2.3.5 主筋のひずみ

各試験体の部材角 1/400~1/50rad における 1 サイクル目サイクルピーク時の一段目主筋の ひずみ分布を図 2.3.8~図 2.3.10 に示す。以下に、各試験体のひずみ状況を述べる。 S-BD1

上端では部材角-1/50rad に至っても主筋は降伏せず、部材角 1/50rad、-1/50rad 時にはひずみ が一様に分布した。下端では部材角-1/50rad 時に主筋が降伏した。

#### S-BD2

上端では部材角 1/50rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。下端では部材角 1/100rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。

#### S-BD3

上端では部材角 1/50rad 時に下スタブ側で主筋が降伏した。下端では部材角 1/50rad 時に下 スタブ側の主筋が降伏した。S-BD3 のひずみ分布は部材角によらず試験区間において直線状 に分布しているため、付着応力が一様に生じていると考えられる。





図 2.3.9 S-BD2 主筋ひずみ分布



図 2.3.10 S-BD3 主筋ひずみ分布
#### 2.3.6 付着応力

図 2.3.11 に示すひずみ測定位置間の 12 区間で、それぞれの区間における付着応力を算出 した。図 2.3.12 に示すように 2 点のひずみ測定位置間を区間長さとして、その区間で分布す る平均付着応力を算出した。主筋の応力の算出にあたり、鉄筋の応力--ひずみ関係に図 2.3.13 に示す Menegotto-Pinto モデル<sup>[8]</sup>を用いた。各区間の付着応力-部材角関係および部材角 1/400~1/50rad における 1 サイクル目ピーク時の付着応力分布を図 2.3.14~図 2.3.19 に示す。 グラフ中の付着強度は、靱性保証型指針式<sup>[7]</sup>による付着信頼強度の計算値に各試験体の付着 強度比を乗して計算した。各サイクルピーク時における 12 区間の付着応力の平均値を図 2.3.20 に示す。

区間内における主筋の付着応力の平均値は、全ての試験体において正側、負側加力時とも に 1/100rad に至るまで部材角の増大に伴い増加した。正側、負側加力時の 1/100rad 以下にお いて S-BD1、S-BD2 の値は同程度で、S-BD3 は S-BD1、S-BD2 より小さい値を示した。正側 加力時の 1/100rad と 1/50rad では各主筋で同程度の値を示した。負側加力時の 1/50rad では 1/100rad から値が低下した。破壊状況より、全ての試験体で正加力時 1/50rad 時に降伏し、両 方向の加力で降伏を経たことが影響していると考えられる。



図 2.3.11 ひずみゲージ間の区間番号



図 2.3.12 ひずみ測定位置と区間長の設定

付着応力計算式

$$\tau = \frac{(\sigma_i - \sigma_{i+1})A}{L\phi}$$

ここで、

τ	:区間内に作用する平均付着応力
$\sigma_i$ , $\sigma_{i+1}$	: 隣り合うひずみ測定位置の主筋の応力
Α	: 主筋の断面積

- *L* : ひずみゲージ間の距離
- **φ** : 主筋の周長





Menegotto-Pinto モデル

$$\frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r} = R_s \tilde{\varepsilon} + \frac{(1 - R_s)\tilde{\varepsilon}}{(1 - \tilde{\varepsilon}^{R_b})^{\frac{1}{R_b}}}$$
$$\tilde{\varepsilon} = \frac{\sigma_s - \sigma_r}{\sigma_0 - \sigma_r}$$

ここで、

$$\varepsilon_r, \sigma_r$$
 :載荷反転点の歪と応力

  $\varepsilon_0, \sigma_0$ 
 :漸近線の交点

  $\varepsilon_{sy}, \sigma_{sy}$ 
 :鉄筋の降伏歪と降伏応力

  $P_s$ 
 := $\frac{E_{s2}}{E_s}$ 
 $E_{s2}$ 
 :鉄筋初期弾性係数

  $E_{s2}$ 
 :鉄筋初期弾性係数

  $E_{s2}$ 
 :鉄筋降伏後の弾性係数

  $R_b$ 
 := $R_{b0} - \frac{a_1\xi}{a_2 + \xi}$ 

 $R_{b0}, a_1, a_2: 材料定数 (R_{b0} = 20, a_1 = 18.5, a_2 = 0.15$ とする)

$$\xi \qquad := \frac{|\varepsilon_0 - \varepsilon'_r|}{\varepsilon_{sy}}$$















#### 2.3.7 累積吸収エネルギー

各試験体の累積エネルギー吸収量を図 2.3.21 に、S-BD1 を基準とした各試験体の累積エ ネルギー吸収量比を図 2.3.22 に示す。部材角 1/400rad、1/33rad において、S-BD2 と S-BD3 は同程度のエネルギー吸収量となり、ともに S-BD1 より大きい値を示した。部材角 1/200rad ~1/50rad においては S-BD2、S-BD3、S-BD1 の順で大きい値を示した。1/20rad 以降はいず れの試験体も同程度のエネルギー吸収量となった。



## 2.4 まとめ

主筋に非付着領域を設けたせん断破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を行い、鉄筋-コンクリート間の付着性能の低減がせん断性能に及ぼす影響を検討した。本章で得られた知見を以下に示す。

- S-BD1およびS-BD2においては付着性能の低下に伴い最大耐力がわずかに増加し、S-BD3 ではS-BD1、S-BD2より小さい最大耐力を示した。
- ② 付着性能の低下に伴い正側加力時における初期剛性が低下した。負側では付着性能の低下と初期剛性に明瞭な関係は見られなかった。
- ③ 非付着領域を設けた主筋に生じる付着応力の平均値は、S-BD1、S-BD2 では同程度、S-BD3 では S-BD1、S-BD2 より小さい値となる傾向を示した。
- ④ 累積吸収エネルギーは S-BD2、S-BD3、S-BD1 の順に大きく、1/20rad 以降は同程度の値 を示した。
- ⑤ 付着性能の低下が比較的小さい場合、最大耐力および累積吸収エネルギーは付着性能の 低下に伴い増加した。より付着性能の低下が大きい場合、最大耐力は低下した。

# 第3章曲げ破壊型試験体の曲げせん断実験

## 3.1 はじめに

せん断破壊型試験体による実験では実験要因による影響が小さく、付着性能の低下と構造 性能の関係については大まかな傾向を把握する程度に留まった。非付着領域を設けた鉄筋が 一段目主筋のみであり、付着性能の低下に伴う付着余裕度の変化が小さい試験体であったた め、構造性能への影響が小さい原因であると考えられる。付着性能の低下による影響をより 顕著なものにするため、付着余裕度の変化が大きく、破壊性状が変化する試験体を対象に実 験を行う。

本章では、鉄筋-コンクリート間の付着性能の低下が構造性能および破壊性状に及ぼす影響について検討するため、付着余裕度が小さい曲げ破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断 加力を実施し、最大耐力、包絡線、主筋の付着応力の検討を行った。

## 3.2 実験概要

#### 3.2.1 試験体概要

曲げ破壊型試験体一覧を表 3.2.1 に、試験体配筋図を図 3.2.1 に、非付着領域の配置を図 3.2.2 に示す。試験体は全4体で、内3体に非付着領域を設けた。断面は幅*b×*せい*D*を235mm×315mmとし、試験体の中央部 1260mmを試験区間とした。主筋は2-D19の一段配筋、せん断補強筋は試験区間で D10@200、両端部で D10@100を配している。コンクリート目標強度は 18MPa で、変動因子は主筋の D10@200 区間における非付着領域の長さとした。非付着領域の長さは、2.2.1 と同様に設定した。コンクリート打設から4週間経過後に、予め埋設した アルミパイプにグラウトを充填した。

試験体名	共通事項	付着強度比 (非付着領域長比)	相当する腐食 ひび割れ幅
B- NC		非付着領域なし	ひび割れなし
B-BD1	王筋 : SD345(D19) せん断補強筋 : SD295A(D10)	0.737 (371mm / 1400mm)	0.20mm
B-BD2	せん断スパン比:2.0 せん断補強筋比:0.30%	0.433 (791mm / 1400mm)	0.55mm
B-BD3		0.187 (1141mm / 1400mm)	1.10mm

表 3.2.1 曲げ破壊型試験体一覧



図 3.2.1 曲げ破壊型試験体の配筋図







(b) B-BD2



(c) B-BD3図 3.2.2 曲げ破壊型試験体の非付着領域配置

試験体の耐力計算結果を表 3.2.2 に、第2章で用いたせん断破壊型試験体と本章の曲げ破 壊型試験体のせん断余裕度-付着余裕度関係を図 3.2.3 に示す。試験体は付着性能の低下に よる影響を明確にするため、付着余裕度の変化が比較的大きく、破壊形式が曲げ破壊から付 着割裂破壊に移行するように設計した。各強度は2.2.1 で述べた方法により算出した。

試験体	曲げ強度	せん断強度	付着耐力	せん断余裕度	付着余裕度
	$Q_{Mu}$ (kN)	$V_u$ (kN)	V <sub>bu</sub> (kN)	$V_u/Q_{Mu}$	$V_{bu}/Q_{Mu}$
NC		120	110		1.47
B-BD1	75		110	1.60	1.47
B-BD2	/3		92	1.00	1.23
B-BD3			66		0.88

表 3.2.2 曲げ破壊型試験体の耐力計算



図 3.2.3 各試験体のせん断余裕度-付着余裕度関係

#### 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、最大骨材寸法 20mm の普通コンクリートを使用した。 コンクリートの調合計画を表 3.2.3 に示す。

W/C		借去				
(%)	С	W	加力			
78.5	248	191	938	845	2.43	

表 3.2.3 曲げ破壊型試験体におけるコンクリートの調合表

コンクリートの材料試験には、  $\phi$ 100mm×200mmの円柱供試体を用いた。試験体の加力 期間の前後で材料試験を行った。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 3.2.4 に、本実験における検討用コンクリート強度を表 3.2.5 に示す。検討用コンクリート強度は、加力期間前後の試験結果の平均値とした。

材齢	采旦	圧縮強度	弾性係数	割裂強度	借去
		(MPa)	(GPa)	(MPa)	加石
	1	21.2	19.6	2.03	
/1 □	2	20.9	19.7	2.02	
41 口	3	18.9	18.9	1.69	
	平均	20.3	19.4	1.92	
50 日	4	22.3	19.9	1.85	
	5	22.6	19.9	1.89	
	6	22.5	19.8	2.21	
	平均	22.5	19.9	1.98	

表 3.2.4 曲げ破壊型試験体におけるコンクリートの材料試験結果

表 3.2.5 曲げ破壊型試験体における検討用コンクリート強度

日博強座	圧縮強度	弹性係数	割裂強度	
日悰蚀皮	(MPa)	(GPa)	(MPa)	
18MPa	21.4	19.6	1.95	

### (2) 異形鉄筋

主筋には異形鉄筋 D19 (SD345)、せん断補強筋には異形鉄筋 D10 (SD295A)を用いた。引 張試験結果を表 3.2.6 に、応力--ひずみ関係を図 3.2.4 に示す。

鉄筋	番号	降伏強度 (MPa)	弹性係数 (GPa)	降伏ひず み (%)	引張強度 (MPa)	破断伸び (%)	備考
D10	1	343	179	0.19	_		チャック部で 滑り加力終了
D19	2	343	180	0.19	509	23.4	
SD345	3	341	180	0.19	512	24.0	
	平均	342	180	0.19	510	23.7	
	1	353	185	0.19	478	25.5	
D10	2	369	186	0.20	505	26.5	
SD295A	3	359	187	0.19	493	25.8	
	平均	360	186	0.19	492	25.9	

表 3.2.6 せん断破壊型試験体における鉄筋の引張試験結果





(3) グラウト充填アルミパイプ

破砕剤充填用パイプには外径 22mm、肉厚 1mm のアルミパイプを用い、グラウトを充填し て引張試験を行った。引張試験結果を表 3.2.7 に、応力-ひずみ関係を図 3.2.5 に示す。応力 を求める際は外径 22mm の中実パイプの断面積とし、降伏強度は 0.2%オフセット耐力とした。

アルミ	来旦	降伏強度	弹性係数	引張強度	破断伸び	ポマソンド	借去
パイプ	留方	(MPa)	(GPa)	(MPa)	(%)		加巧
	1	37.3	12.4	40.2	5.70	0.0780	
φ22mm	2	40.7	15.0	43.7	4.93	0.0644	標点間外破断
t=1mm	3	40.1	13.1	43.1	6.19	0.0708	
	平均	39.5	13.5	42.4	5.61	0.0711	

表 3.2.7 曲げ破壊型試験体におけるグラウト充填アルミパイプ引張試験結果



図 3.2.5 曲げ破壊型試験体におけるグラウト充填アルミパイプの応カーひずみ関係

### 3.2.3 加力方法

加力方法は2.2.3 で述べた方法と同様である。

### 3.2.4 計測方法

計測方法は試験体局部変位の計測とひずみゲージ貼付位置を除いて、2.2.4 で述べたものと 同様である。ひずみゲージの貼付位置を図 3.2.6 に示す。主筋およびアルミパイプの危険断面 位置、せん断補強筋の梁側面中央部、および付着応力検討のため一段目主筋の D10@200 区間 における各区間中央にひずみゲージを貼付した。



図 3.2.6 曲げ破壊型試験体のひずみゲージ貼付位置

## 3.3 実験結果

### 3.3.1 試験体破壊状況

部材角 1/400~1/33rad の 2 サイクル加力終了後、1/20 および 1/15rad の 1 サイクル加力終了 後の試験体ひび割れ状況を図 3.3.1~図 3.3.4 に示す。図中の左側が試験体配筋における下ス タブ、右側が上スタブに該当する。併せて、実験時の各試験体のひび割れ状況について述べ る。 B- NC

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れと主筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



### B-BD1

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れと主筋位置に付着割裂ひび割れが発生した。その後、せん断ひび割れと付着割裂ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



図 3.3.2 曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-BD1)

B-BD2

部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部材角 1/200rad に至る過程でせん断ひび割れが発生した。部材角 1/50rad に至る過程でせん断ひび割 れから下端主筋位置にひび割れが進展し、付着割裂ひび割れが発生した。上端主筋位置にお ける付着割裂ひび割れの進展は見られなかった。その後、上端端部から下端中央部に架かる せん断ひび割れと、下端主筋位置の付着割裂ひび割れが拡幅して最終破壊に至った。



(g)1/20rad(h)1/15rad図 3.3.3 曲げ破壊型試験体のひび割れ状況(B-BD2)

### B-BD3

正加力時部材角 1/400rad に至る過程で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが発生した。部 材角 1/200rad に至る過程で主筋位置に付着割裂ひび割れが発生したが、その後の進展は比較 的小さい。両端部で曲げひび割れと曲げせん断ひび割れが進行して最終破壊に至った。



#### 3.3.2 せん断カー部材角関係

各試験体のせん断力-部材角関係を図 3.3.5 に示す。以下に、各試験体の状況を述べる。 B-NC

正加力時では部材角 1/100rad に至る過程で最大耐力 99.1kN に達し、負加力時では 1/50rad に至る過程で 91.5kN に達した。最大耐力以降、耐力が徐々に低下し、主筋の滑りによる逆 S 字型の履歴を示した。

#### B-BD1

正加力時では部材角 1/100rad に至る過程で最大耐力 95.6kN に達し、負加力時では 1/100rad に至る過程で 99.6kN に達した。B-NC と比較して、最大耐力以降は正負ともに緩やかな耐力 低下傾向がみられた。履歴は B-NC と同様に逆 S 字型を示した。

#### B-BD2

正加力時では部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 99.8kN に達し、負加力時では 1/100rad に至る過程で 99.7kN に達した。正負ともに部材角 1/33rad 時に急激な耐力低下が見られた。 逆 S 字型の履歴は B-NC 、SF-Lv.1 と同様な傾向がみられた。

#### B-BD3

正加力時では部材角 1/50rad に至る過程で最大耐力 97.3kN に達し、負加力時では 1/50rad に 至る過程で 97.0kN に達した。B-BD1 と同様に、最大耐力以降は正負ともに緩やかな耐力低下 傾向がみられた。逆 S 字型の履歴は他の試験体と同様な傾向がみられた。







#### 3.3.3 最大耐力

各試験体の最大耐力と最大耐力時の部材角を表 3.3.1 に示す。試験体の相当ひび割れ幅と 最大耐力の関係を図 3.3.6 に、相当ひび割れ幅と最大耐力時部材角の関係を図 3.3.7 に示す。 図 3.3.6 に終局曲げ強度略算式による曲げ強度計算値、終局強度型指針式 A 法によるせん断 強度計算値、主筋の付着強度低下を考慮した靭性保証型指針による付着耐力計算値を併せて 示す。各強度は 2.2.1 で述べた方法に材料試験で得られた値を用いて算出した。

B-NC、B-BD1、B-BD2の最大耐力は相当ひび割れ幅の増大に伴いわずかに増加した。B-BD3の最大耐力はB-BD2よりわずかに低下し、B-BD1と同程度の値を示した。相当ひび割れ幅の増大に伴う最大耐力の増加は、主筋の付着性状の低下によってアーチ機構におけるせん断力 負担が増大したためであると考えられる。

最大耐力時の部材角は、B-BD1 で B-NC より小さい値を示し、B-BD2、B-BD3 では相当ひ び割れ幅の増大に伴い増加した。

試験体	正側 最大耐力 (kN)	正側 最大耐力時の 部材角 (×0.01rad)	負側 最大耐力 (kN)	負側 最大耐力時の 部材角 (×0.01rad)	正負平均 最大耐力 (kN)	正負平均 部材角 (×0.01rad)
B-NC	99.1	1.01	91.5	1.91	95.3	1.46
B-BD1	95.6	0.98	99.6	0.98	97.6	0.98
B-BD2	99.8	1.80	99.7	1.00	99.7	1.40
B-BD3	97.3	1.40	97.0	1.93	97.2	1.67

表 3.3.1 曲げ破壊型試験体の最大耐力と最大耐力時部材角





図 3.3.7 相当ひび割れ幅-最大耐力時部材角関係

#### 3.3.4 包絡線の比較

各試験体の包絡線を図 3.3.8 に示す。左図は部材角 1/50rad まで、右図は加力終了時までの 全体の包絡線を示す。初期剛性を比較すると、正側で 1/100rad、負側で 1/50 まで B-NC と B-BD1 が同程度で最も大きく、B-BD2、B-BD3 の順で剛性が小さい。剛性の低下は主筋の付着 性能の低下に伴い、滑りが増大したためと考えられる。1/50rad 以降は正負ともに B-BD3 が比 較的大きい耐力を示した。B-BD3 は他試験体と比較して 1/50rad 以降の耐力低下が小さい。付 着劣化により試験体両端部以外の領域では目立ったコンクリートのひび割れが生じず、アー チ機構が卓越して、危険断面位置でのコンクリートの圧壊のみで破壊が進行したことによる ものと考えられる。



#### 3.3.5 主筋のひずみ

各試験体の部材角 1/400~1/50rad における 1 サイクル目サイクルピーク時のひずみ分布を 図 3.3.9~図 3.3.12 に示す。以下に、各試験体のひずみ状況を述べる。

### B-NC

上端では部材角 1/100rad 時に上スタブ側の主筋が降伏し、部材角 1/50rad および-1/50rad 時 に上端中央部の主筋が降伏した。下端では部材角-1/100rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。

#### B-BD1

上端では部材角-1/100rad 時に下スタブ側の主筋が降伏し、部材角 1/50rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。下端では部材角 1/100rad 時に下スタブ側、部材角-1/100rad 時に上スタブ 側の主筋が降伏した。

#### B-BD2

上端では部材角 1/50rad および-1/50rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。下端では部材角 1/100rad 時に上スタブ側の主筋が降伏した。

#### B-BD3

上端では部材角 1/50rad 時に上スタブ側、-1/50rad 時に下スタブ側の主筋が降伏した。下端 では部材角 1/50rad および-1/50rad 時に下スタブ側の主筋が降伏した。B-BD3 のひずみ分布は 部材角によらず試験区間において直線状に分布しているため、付着応力が一様に生じている と考えられる。









#### 3.3.6 付着応力

付着応力の算出は2.2.1 で述べた方法と同様である。付着応力を算出した区間を図 3.3.13 に 示す。各区間の付着応力-部材角関係および部材角 1/400~1/50rad における 1 サイクル目ピ ーク時の付着応力分布を図 3.3.14~図 3.3.21 図 2.3.19 に示す。各サイクルピーク時における 12 区間の付着応力の平均値を図 3.3.22 に示す。

区間内における主筋の付着応力の平均値は、全ての試験体において負側加力時の健全試験 体を除き 1/100rad に至るまで部材角の増大に伴い増加した。正側、負側加力時の 1/100rad 以 下においての健全試験体を除き B-BD1、B-BD2、B-BD3 の順で大きな値を示した。正側加力 時の 1/100rad と 1/50rad で、健全試験体と B-BD1 の付着応力が低下し、B-BD2 と B-BD3 の付 着応力は増加した。負側加力時では健全試験体のみ付着応力が増加し、他試験体では付着応 力が低下した。



図 3.3.13 ひずみゲージ間の区間番号




















#### 3.3.7 累積エネルギー吸収量

各試験体の累積エネルギー吸収量を図 3.3.23 に、健全試験体を基準とした各試験体の累 積エネルギー吸収量比を図 3.3.24 に示す。部材角 1/400rad~1/100rad において、B-BD2 と B-BD3 は同程度のエネルギー吸収量となり、健全試験体、B-BD1、B-BD2 および B-BD3 の 順で大きい値を示した。B-BD1 は 1/50rad 以降、健全試験体と同程度のエネルギー吸収量を 示した。B-BD2 は 1/50rad、1/33rad で健全試験体より大きい値を示し、1/20rad 以降、全試験 体と同程度の値を示した。B-BD3 は 1/20rad 以降、他試験体と比較して大きいエネルギー吸 収量を示した。



図 3.3.24 曲げ破壊型試験体の累積エネルギー吸収量比

#### 3.4 まとめ

主筋に非付着領域を設けた曲げ破壊型試験体の逆対称繰返し曲げせん断実験を行い、鉄筋 -コンクリート間の付着性能の低減が構造性能に及ぼす影響を検討した。本章で得られた知 見を以下に示す。

- 付着性能の変化が最大耐力へ及ぼす影響はわずかであった。最大耐力は付着性能の低下 に伴いわずかに増加した。
- ② 付着性能の低下に伴い初期剛性は低下する傾向が見られた。しかし、付着性能低下が比較的小さい試験体においては健全試験体と同程度の初期剛性を示した。
- ③ 最大耐力時部材角は最も付着性能低下が小さい試験体では健全試験体より小さい値となったが、更なる付着性能の低下に伴い最大耐力時部材角が増加した。
- ④ 部材角 1/100 時における付着応力の平均値は、付着性能の低下に伴い低下したが、比較的 付着性能低下の小さい B-BD1 試験体においては健全試験体の値を上回った。
- ⑤ 部材角 1/100rad までの累積エネルギー吸収量は付着性能の低下に伴い減少し、B-BD2 と B-BD3 は同程度の値となった。1/20rad 以降、B-BD1 と B-BD2 は健全試験体と同程度の 累積エネルギー吸収量を示し、B-BD3 は他試験体より大きい値となった。
- ⑥ S-BD3 試験体では最大耐力および累積エネルギー吸収量で他試験体と異なる傾向が見られた。これは付着性能の低下によってアーチ機構が卓越し、危険断面位置でのコンクリートの圧壊のみで破壊が進行したことによるものと考えられる。

### 第4章 結論

本研究では、鉄筋-コンクリート間の付着性能の低下が RC 部材の構造性能に及ぼす影響 を検討することを目的とし、せん断破壊型試験体および曲げ破壊型試験体の 2 シリーズにつ いて、非付着領域長を変動因子とした逆対称繰返し曲げせん断実験を実施した。

せん断破壊型試験体における最大耐力は、相当ひび割れ幅 0.20mm の S-BD1 と 0.55mm の S-BD2 を比較すると、付着性能の低下が大きい S-BD2 試験体の方が大きい値を示した。S-BD2 と S-BD3 (相当ひび割れ幅 1.10mm)を比較すると、S-BD3 の最大耐力のほうが小さい値を示 した。曲げ破壊型試験体においては、付着性能の変化が最大耐力へ及ぼす影響はわずかであ り、付着性能の低下に伴い最大耐力は若干増加した。初期剛性は付着性能の低下に伴い減少 する傾向が見られた。累積エネルギー吸収量についてはせん断破壊型と曲げ破壊型の試験体 で異なる傾向が見られた。部材角が比較的小さいとき、せん断破壊型試験体では付着性能の 低下が累積エネルギー吸収量を増加させ、曲げ破壊型試験体では付着性能の低下が累積エネ

両試験体より、付着性能の低下が構造性能に及ぼす影響については、最大耐力と付着性能 低下についてなどいくつかの傾向を把握できたが、定量的な評価には至っておらず未解明な 点が多い。今後の課題として、鉄筋腐食の各因子が構造性能に及ぼす影響を明らかにするた め、他の鉄筋腐食模擬による実験結果と比較することで詳細な検討を行うことが必要である と考えられる。

# 謝辞

本論文を作成するにあたり、多くの方々のご指導およびご協力を頂きました。指導教員で ある筑波大学システム情報工学系教授金久保利之先生には、研究に関する相談から実験、論 文の推敲に至るまでご指導を賜りました。筑波大学システム情報系准教授の八十島章先生に は研究および試験体作製の過程で多くのご助言を賜りました。筑波大学技術専門職員の小島 篤志氏には、試験体の作製から実験準備まで多くのご協力を頂きました。実験にご協力いた だきました油野登梧氏、下河邊大貴氏、SYLLAMADOU SAKHIR 氏、永井聖人氏および、研 究室の先輩、同期、後輩の皆様には多くの支援を頂きました。この場を借りて感謝の意を表 します。

## 参考文献

- [1] 藤原海、油野登梧、Amadou Sakhir Syll、金久保利之:破砕剤充填パイプにより鉄筋 腐食ひび割れを模擬した RC 部材のせん断性能、日本建築学会大会学術講演梗概集、 No.23249、pp.497-498、2021.9
- [2] 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.47-49、1998
- [3] 松島学、横田優、関博:鉄筋腐食膨張によるひび割れ発生時の腐食量、コンクリート 工学会年次論文集、Vol.26、No.2、pp.1669-1674、2004
- [4] 佐藤吉孝、山本貴士、服部篤史、宮川豊章: せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部 材のせん断耐荷特性に与える影響、コンクリート工学会年次論文集、Vol.25、No.1、 pp.821-826、2003.7
- [5] 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2011
- [6] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説、1990
- [7] 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説、1999
- [8] 堺淳一、川島一彦:部分的な除荷・再載荷を含む履歴を表す修正 Menegotto-Pinto モ デルの提案、土木学会論文集、No.738/I-64、pp.159-169、2003.7