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

# 鉄筋腐食によるひび割れを模擬した RC 柱の 中心圧縮性状に関する研究

藻川 哲平

修士 (工学)

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2017年 3月

#### 論 文 概 要

本研究では、鉄筋の腐食膨張によって発生したかぶりコンクリートのひび割れに着目し、 種々の方法を用いてひび割れを模擬した RC 柱部材の中心圧縮試験を行い, コンクリートの ひび割れが RC 部材の圧縮性状へ及ぼす影響を把握することを目的としている。第2章では、 コンクリートのひび割れが圧縮性状へ及ぼす影響を定量的に把握するため、ひび割れの量や 位置を意図的にコントロールできるスリットを用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮 試験を行った。実験結果より、スリットおよびコンクリートの破壊の局所化が応力-歪曲線 の最大応力以降の挙動に影響を及ぼし、ひび割れの程度により応力-歪曲線の軟化勾配が大 きくなることを確認した。また、ひび割れ長さを考慮したコンクリートの構成則モデルを構 築し、実験結果の挙動を概ね再現できた。第3章では、第2章で提案したモデルの適応性を 検討するため、電食を用いて腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行った。実験結果より、電 食によって発生したかぶりコンクリートのひび割れ長さと最大応力以降の応力低下について, 明確な関係は確認できなかったが、剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さ を用いて、第2章で提案したモデルにより実験結果を概ね表現できた。第4章では、第2章 で提案したモデルの適応性を検討するとともに、ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響を把握 するため、静的破砕材を用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行った。実験結 果より,試験区間長が400mmの試験体においては,初期ひび割れ幅が大きいほど,最大応力 以降の応力低下が大きくなることを確認した。また、初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上 のひび割れを RC 部材の圧縮性能に影響を及ぼすひび割れと仮定し、第2章で提案したモデ ルを用いることで、実験結果を概ね表現できた。

目次	
第1章 序論	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究目的	2
第2章 スリットを用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状	
2.1 はじめに	
2.2 実験概要	4
2.2.1 試験体	4
2.2.2 腐食劣化の模擬方法	6
2.2.3 材料試験結果	8
2.2.4 加力および計測方法	9
2.3 実験結果	10
2.3.1 加力後の破壊状況	10
2.3.2 応力-歪曲線	11
2.4 応力-歪曲線のモデル	15
2.4.1 鉄筋のモデル	15
2.4.2 コンクリートのモデル	16
2.5 モデルと実験結果の比較	
2.6 まとめ	
第3章 電食を用いて腐食させた RC 柱の中心圧縮性状	
3.1 はじめに	21
3.2 実験概要	22
3.2.1 試験体	
3.2.2 電食方法	
3.2.3 材料試験結果	
3.2.4 加力および計測方法	
3.3 実験結果	
3.3.1 通電後のひび割れ性状	
3.3.2 鉄筋の腐食性状	
3.3.3 加力後の破壊状況	
3.3.4 応力-歪曲線	
3.4 応力-歪曲線のモデル	
3.4.1 鉄筋のモデル	
3.4.2 コンクリートのモデル	
3.5 モデルと実験結果の比較	
3.6 まとめ	

第4章 静的破砕材を用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状	
4.1 はじめに	
4.2 実験概要	
4.2.1 試験体	40
4.2.2 材料試験結果	
4.2.3 加力および計測方法	
4.3 実験結果	
4.3.1 加力直前のひび割れ性状	
4.3.2 加力後の破壊状況	
4.3.3 応力-歪曲線	
4.4 初期ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響評価	
4.5 モデルと実験結果の比較	
4.6 まとめ	50
第5章 結論	
謝辞	52
参考文献	53

# 図表目次

表	2.1	スリット試験体一覧5
表	2.2	コンクリート材料試験結果8
表	2.3	鉄筋引張試験結果
表	2.4	スリット試験体実験結果一覧11
表	2.5	鉄筋モデルの変数一覧15
表	3.1	電食試験体一覧
表	3.2	コンクリート材料試験結果25
表	3.3	電食後のひび割れ状況27
表	3.4	腐食鉄筋の質量減少率および断面減少率28
表	3.5	電食試験体実験結果一覧
表	3.6	電食試験体の係数nの一覧(1)
表	3.7	電食試験体の係数nの一覧(2)
表	4.1	破砕材試験体一覧41
表	4.2	破砕材充填後加力前のひび割れ状況
表	4.3	破砕材試験体実験結果一覧45
表	4.4	各試験体の腐食ひび割れ長さ(初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上) 48
2		
凶	1.1	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)1
X	1.1 2.1	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)
図 図 図	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> </ol>	<ul> <li>圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)1</li> <li>スリット試験体概要図4</li> <li>スリット配置の例6</li> </ul>
図 図 図	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> </ol>	<ul> <li>圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)1</li> <li>スリット試験体概要図4</li> <li>スリット配置の例6</li> <li>鉄筋の腐食模擬方法7</li> </ul>
	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9
	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10
	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> </ol>	<ul> <li>圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)1</li> <li>スリット試験体概要図4</li> <li>スリット配置の例6</li> <li>鉄筋の腐食模擬方法7</li> <li>加力および測定方法9</li> <li>最終破壊状況10</li> <li>応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)12</li> </ul>
	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10         応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)       12         応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例       13
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10         応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)       12         応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例       13         基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)       14
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10         応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)       12         応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例       13         基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)       14         Popovics モデル       16
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10         応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)       12         応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例       13         基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)       14         Popovics モデル       16         係数nと腐食ひび割れ長さ比Lcr/Lの関係       16
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> </ol>	<ul> <li>圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)</li></ul>
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係) 1 スリット試験体概要図 4 スリット配置の例 6 鉄筋の腐食模擬方法 7 加力および測定方法 9 最終破壊状況 10 応力—歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無) 12 応力—歪曲線(変動因子:試験区間長)の例 13 基準化応力—基準化歪曲線(変動因子:スリット) 14 Popovics モデル 16 係数 $n$ と腐食ひび割れ長さ比 $L_{cr}/L$ の関係 17 $n/n_0$ と腐食ひび割れ長さ $L_{cr}/L$ の関係 17
N N N N N N N N N N N N N N N N N N N	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係) 1 スリット試験体概要図 4 スリット配置の例 6 鉄筋の腐食模擬方法 7 加力および測定方法 9 最終破壊状況 10 応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無) 12 応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例 13 基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット) 14 Popovics モデル 16 係数nと腐食ひび割れ長さ比L <sub>cr</sub> /Lの関係 16 係数n <sub>0</sub> と破壊域長さ比L <sub>f</sub> /Lの関係 17 実験結果とモデルの比較(試験区間長 150mm) 18
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> <li>2.14</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)1スリット試験体概要図4スリット配置の例6鉄筋の腐食模擬方法7加力および測定方法9最終破壊状況10応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)12応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例13基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)14Popovics モデル16係数 $n_0$ と破壊域長さ比 $L_{cr}/L$ の関係17 $n/n_0$ と腐食ひび割れ長さ $L_{cr}/L$ の関係17実験結果とモデルの比較(試験区間長 150mm)18実験結果とモデルの比較(試験区間長 235mm)19
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> <li>2.14</li> <li>2.15</li> </ol>	圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)       1         スリット試験体概要図       4         スリット配置の例       6         鉄筋の腐食模擬方法       7         加力および測定方法       9         最終破壊状況       10         応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)       12         応力-歪曲線(変動因子:試験区間長)の例       13         基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)       14         Popovics モデル       16         係数nと腐食ひび割れ長さ比L <sub>cr</sub> /Lの関係       17         n/n <sub>0</sub> と腐食ひび割れ長さ比L <sub>cr</sub> /Lの関係       17         実験結果とモデルの比較(試験区間長 150mm)       18         実験結果とモデルの比較(試験区間長 235mm)       19         実験結果とモデルの比較(試験区間長 400mm)       19
X X X X X X X X X X X X X X X X X X X	<ol> <li>1.1</li> <li>2.1</li> <li>2.2</li> <li>2.3</li> <li>2.4</li> <li>2.5</li> <li>2.6</li> <li>2.7</li> <li>2.8</li> <li>2.9</li> <li>2.10</li> <li>2.11</li> <li>2.12</li> <li>2.13</li> <li>2.14</li> <li>2.15</li> <li>3.1</li> </ol>	<ul> <li>圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重—変位関係)</li></ul>

図 3	3.3	電食後の試験体状況	26
図 3	3.4	剥落後のかぶりコンクリートに付着している錆汁	29
図 3	3.5	電食試験体の応力-歪曲線	31
図 3	8.6	電食試験体の基準化応力-基準化歪曲線	31
図 3	3.7	錆汁範囲の長さの計測例	33
図 3	8.8	モデルと実験結果の比較(設計強度13.5MPa)	36
図 3	8.9	モデルと実験結果の比較(設計強度18.0MPa)	37
図 4	1.1	破砕材試験体概要図	40
図 4	1.2	ひび割れ観測面の番号	43
図 4	1.3	最大荷重直後の試験体状況	44
図 4	1.4	破砕材試験体の応力-歪曲線	46
図 4	4.5	破砕材試験体の基準化応力-基準化歪曲線	46
図 4	1.6	曲線形状係数と初期ひび割れ幅の関係(試験区間長 150mm)	47
図 4	1.7	曲線形状係数と初期ひび割れ幅の関係(試験区間長 400mm)	47
図 4	1.8	実験結果とモデルの比較(試験区間長 400mm)	49

## 第1章 序論

## 1.1 研究背景

近年,建設から年数が経過した鉄筋コンクリート(以下 RC と記す)造構造物が増加して きており,塩害や中性化など環境要因や経年劣化に伴う性能低下が問題化してきている<sup>例えば</sup> <sup>1)</sup>。性能低下の原因の一つには,鉄筋の腐食が挙げられている。鉄筋の腐食は断面減少に伴っ て鉄筋単体の力学性能を低下させることに加え,鉄筋表面に生成される腐食生成物の発生に よって体積膨張が起こり,コンクリートにひび割れが発生することで構造物の耐荷性能が低 下する。既存の RC 造構造物を長期的に利用するためには,構造物の状態や保有性能を定量 的に評価し,適切な補修や補強をすることが必要であり,予防保全の観点から維持管理が重 要であると考えられている。

現在までに, RC 部材において引張力を負担している鉄筋の腐食が, RC 部材の耐荷性能へ 及ぼす影響を検討した研究は多くなされている一方で, 圧縮力を負担しているコンクリート が劣化した際に, それが RC 部材の耐荷性能に及ぼす影響について検討した例はほとんど見 られない。

既往の研究<sup>2)</sup>では, 圧縮側鉄筋を電食によって腐食させた RC 梁部材の曲げ試験が行われ, 鉄筋の腐食の程度によって最大荷重の低下や靭性が乏しくなる(図 1.1 参照)など, 腐食に よって発生した圧縮側コンクリートのひび割れおよび圧縮側鉄筋の座屈が, RC 梁部材の力学 挙動に影響を及ぼすという結果が示されている。この結果から, 腐食鉄筋の圧縮性能と劣化 したコンクリートの圧縮性能を定量的に評価することが重要であると考えられる。



図 1.1 圧縮側鉄筋の腐食を検討した既往の研究(荷重-変位関係)<sup>2)</sup>

## 1.2 研究目的

本研究では、鉄筋腐食によって発生したコンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性状へ 及ぼす影響を把握することを目的とし、種々の方法を用いてかぶりコンクリートのひび割れ を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い、劣化を考慮したコンクリートの圧縮モデルの検討 を行う。第2章では、スリットを用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行うと ともに、ひび割れ長さを考慮したコンクリートの構成則モデルを構築する。第3章では、電 食によって腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行うとともに、第2章で提案したモデルの適 応性を検討する。第4章では、静的破砕材を用いて劣化を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を 行い、第2章で提案したモデルの適応性を検討するとともに、ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼ す影響の考察を行う。

# 第2章 スリットを用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状

## 2.1 はじめに

今までに、電食や自然暴露によって腐食させた RC 部材の構造実験が多く行われてきてい るが、鉄筋の腐食やかぶりコンクリートのひび割れの程度を意図的にコントロールすること が難しいことから、劣化した RC 部材の性能を定量的に評価しているとは言いがたい。

本章では、かぶりコンクリートのひび割れが RC 部材の圧縮性状へ及ぼす影響を把握する ことを目的として、切削による鉄筋腐食およびスリットによるコンクリートひび割れを模擬 した RC 柱部材の中心圧縮試験を行う。得られた実験結果から、コンクリートの応力-歪曲 線のモデルの提案を行う。

## 2.2 実験概要

### 2.2.1 試験体

試験体概要を図 2.1 に,試験体一覧を表 2.1 に示す。試験体は全 25 体である。断面は 150mm × 235mm で,試験体両端部には帯鉄筋 (D6@30)を配し,試験体中央部を試験区間とした。 主鉄筋には D10 異形鉄筋を 4 本使用している。変動因子はスリットの方向および位置,鉄筋 腐食による断面欠損を模した主鉄筋の切削の有無および試験区間長である。



図 2.1 スリット試験体概要図

Na	封殿休夕*	試験区間長	鉄筋切削率	スリット	I /I
10.	武歌伴泊	(mm)	(%)	方向	L <sub>cr</sub> /L
1	SN-N0.00			-	0.00
2	SN-L0.33				0.33
3	SN-L0.67			長辺	0.67
4	SN-L1.00				1.00
5	SN-B1.00				1.00
6	SN-B1.33			両辺	1.33
7	SN-B1.67		30	Щ <u>77</u>	1.67
8	SN-B2.00	150			2.00
9	SR-N0.00	150		-	0.00
10	SR-L0.33			長辺	0.33
11	SR-L0.67				0.67
12	SR-L1.00				1.00
13	SR-B1.00			両辺	1.00
14	SR-B1.33				1.33
15	SR-B1.67				1.67
16	SR-B2.00				2.00
17	MN-N0.00			-	0.00
18	MN-L1.00	0 235 -	-	長辺	1.00
19	MN-B2.00			両辺	2.00
20	LN-N0.00			-	0.00
21	LN-L0.50			E' \TI	0.50
22	LN-L1.00	400		RD	1.00
23	LN-B1.00	400	-		1.00
24	LN-B1.50			両辺	1.50
25	LN-B2.00				2.00

表 2.1 スリット試験体一覧

\*:記号は,試験区間長(S,M,L),鉄筋切削の有無(N,R),スリット方向(N,L,B),腐食ひび割れ 長さ比 *L*<sub>cr</sub>/*L* の順

## 2.2.2 腐食劣化の模擬方法

(1) かぶりコンクリートのひび割れ模擬

コンクリートのひび割れを模したスリット配置の例を図 2.2 に示す。コンクリートのひび 割れは、コンクリート打設前に厚さ 0.5mm のポリプロピレンシートを主鉄筋表面に接着し、 試験体表面までスリットを入れることにより模擬した。スリット長さ(腐食ひび割れ長さ) の和を試験区間長で除した値(以下,腐食ひび割れ長さ比)を、各試験区間長で変動させた 表 2.1 におけるスリットの方向は、スリットと交わる試験体断面の辺(長辺または両辺)で 表している。



図 2.2 スリット配置の例

(2) 鉄筋の腐食模擬

鉄筋の腐食模擬方法を図 2.3 に示す。既往の研究 <sup>3)</sup>を参考に,鉄筋腹部の最小径位置にお ける深さまで切削することで,腐食による局所的な断面欠損を模擬した。公称断面積と等価 な断面積を有する楕円に対して切削率 30%となるように切削深さを決定した。既往の研究 <sup>3)</sup> では,試験区間長が長い場合には弾性座屈が支配的となり,切削の影響が明確に現れなかっ たため,試験区間長 150mm の試験体のみに切削を行う試験体を準備した。切削位置はスリッ トの位置に応じて,試験体中央と中央から上下 37.5mm の位置の 2 種類とした。



単位:mm

図 2.3 鉄筋の腐食模擬方法

#### 2.2.3 材料試験結果

(1) コンクリート

コンクリートには,設計強度を13.5MPaとした最大骨材寸法 20mmの普通コンクリートを 用いた。加力時材齢におけるコンクリートの材料試験結果を表 2.2 に示す。圧縮試験 3 体, 割裂引張試験 3 体の試験を行い,それらの平均値を示している。

表 2.2 コンクリート材料試験結果

設計強度	圧縮強度	弹性係数	割裂強度		
(MPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)		
13.5	14.1	17.1	1.44		

(2) 鉄筋

主鉄筋に用いた異形鉄筋 D10 の引張試験の結果を表 2.3 に示す。3 体の引張試験を行い, その平均値を示している。

括则	引張強度	降伏強度	弾性係数	
个里力门	(MPa)	(MPa)	(GPa)	
異形鉄筋 D10	468	346	192	

表 2.3 鉄筋引張試験結果

### 2.2.4 加力および計測方法

加力および計測方法を図 2.4 に示す。加力には 2MN 万能試験機を用いて一方向単調圧縮載 荷を行った。計測項目は軸圧縮力および試験体表面における軸方向変形量である。変位計は 全ての面に 2 本ずつ等間隔に設置した。載荷に伴う変位計設置用インサートの変形を補正で きるように外側の変位計の計測値から内側(試験体側)の変位計の計測値の 2 倍を差し引く ことにより,試験体表面における軸方向変形量として算出した。



## 図 2.4 加力および測定方法

## 2.3 実験結果

#### 2.3.1 加力後の破壊状況

試験体の破壊状況の例を図 2.5 に示す。すべての試験体においてかぶりコンクリートのひ び割れ発生後に最大荷重を迎えた。その後,かぶりコンクリートの剥離および剥落と同時に 荷重が急激に低下し,最終破壊に至った。試験区間長が 150mm および 235mm の試験体では 概ね試験区間全体が破壊する挙動が確認されたが,400mm の試験体では破壊が試験区間全体 ではなく一部に局所化する傾向が見られた。また,かぶりコンクリートの剥落位置において, 主鉄筋の座屈挙動が見られた。



図 2.5 最終破壊状況

## 2.3.2 応力一歪曲線

実験結果一覧を表 2.4 に示す。応力は荷重を試験体断面積で除した値, 歪は試験区間変形 量を試験区間長で除した値である。

試験体名	試験区間長 L(mm)	最大応力(MPa)	最大応力時の歪(%)
SN-N0.00		13.5	0.37
SN-L0.33		14.0	0.54
SN-L0.67		13.9	0.39
SN-L1.00	150	13.4	0.49
SN-B1.00	(切削無し)	13.6	0.50
SN-B1.33		14.1	0.51
SN-B1.67		13.7	0.76
SN-B2.00		13.9	0.64
SR-N0.00		13.1	0.54
SR-L0.33		13.5	0.55
SR-L0.67		13.4	0.39
SR-L1.00	150	13.1	0.56
SR-B1.00	(切削有り)	13.4	0.54
SR-B1.33		13.8	0.62
SR-B1.67		13.9	0.52
SR-B2.00		13.9	0.59
MN-N0.00		13.2	0.40
MN-L1.00	235	12.6	0.43
MN-B2.00		12.7	0.47
LN-N0.00		12.9	0.33
LN-L0.50		12.6	0.29
LN-L1.00	400	13.1	0.31
LN-B1.00	400	12.4	0.31
LN-B1.50		11.2	0.34
LN-B2.00		13.0	0.39

表 2.4 スリット試験体実験結果一覧

#### (1) 鉄筋切削有無の比較

主鉄筋の切削の有無で比較した応力-歪曲線を図 2.6 に示す。最大応力に関しては、差が 最も大きいL<sub>cr</sub>/L = 0.33の試験体において 4%未満の応力低下にとどまり、L<sub>cr</sub>/L = 1.67の試 験体のように増加した試験体も見られたことから、主鉄筋の切削が試験体の最大応力に及ぼ す明瞭な傾向は見られなかった。最大応力時の歪も同様に、約半数の試験体で切削有より無 の方が上回っていることから、鉄筋切削による明瞭な傾向が見られなかった。最大応力以降 の負勾配は、既往の研究 <sup>4)</sup>と同様に、切削有りの試験体の方が切削無しの試験体より勾配が 緩やかになる傾向が見られた。最大応力に到達後、ひび割れの進展と同時にかぶりコンクリ ートの拘束がなくなり、鉄筋単体の座屈挙動と同様の挙動を示したと考えられる。



図 2.6 応力-歪曲線(変動因子:鉄筋切削の有無)

#### (2) 試験区間長差異の比較

スリットが入っていない試験体の応力-歪曲線について,試験区間長ごとによる比較を図 2.7 に示す。試験区間長が増大するにつれて最大応力以降の軟化勾配が大きくなった。実験結 果の歪は試験区間長で除すことで算出しているため,図 2.5 に示したように,コンクリート の破壊の局所化が影響していると考えられる。



図 2.7 応力---・・・ 応動因子: 試験区間長)の例

#### (3) スリット差異の比較

表 2.4 より,最大応力は試験区間長によって若干の差異が見られるが,試験区間長が同一の場合はスリットの方向および位置によって大きな差異は見られなかったことから,スリットが最大応力に及ぼす影響は少ないと考えられる。最大応力以降の挙動に着目するために,実験で得られた応力-歪曲線を,各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した曲線を図 2.8 に示す。スリットが入っていない試験体(*L<sub>cr</sub>/L* = 0.00)とスリットを設置した試験体の応力-歪曲線を比較すると,スリットの存在が応力-歪曲線の最大応力以降の挙動に影響を及ぼし,腐食ひび割れ長さ比が増大するにつれて軟化勾配が大きくなる傾向が見られた。



図 2.8 基準化応力-基準化歪曲線(変動因子:スリット)

## 2.4 応力-歪曲線のモデル

### 2.4.1 鉄筋のモデル

図 2.5 の試験体の最終破壊状況に示すように,鉄筋の座屈はかぶりコンクリートが破壊さ れた領域で確認されたことから,主鉄筋の座屈長はコンクリートの破壊域長さであると仮定 し,モデル化を行う。既往の研究 <sup>5)</sup>で実験的に算出された破壊域長さは本実験で見られた破 壊域長さと対応が良いことから,表 2.5 に示すように定めた。

鉄筋の最大応力以降の応力-歪曲線のモデルは既往の研究<sup>4,6)</sup>で提案されている式(2-1)~(2-3)を用いた。試験区間長が400mmの試験体については,座屈長が260mmで弾性座屈する 範囲であり,式(2-2)および式(2-3)の適用外のため,既往の研究<sup>3)</sup>と同一の方法でD10の座屈 試験を行ってモデル化した。モデル化で用いた各変数の値を表 2.5 に示す。

試験区間長	破壊域(座屈)長さ	最大応力	座屈開始時歪	ρ
<i>L</i> (mm)	$L_f(mm)$	$\sigma_s(MPa)$	$\varepsilon_s(\%)$	ρ
150	150	346	0.85	0.74
235	200	346	0.59	0.98
400	260	307	0.42	1.40

表 2.5 鉄筋モデルの変数一覧

$$\sigma/\sigma_{s} = \begin{cases} 
 鉄筋切削なし 
 (\epsilon_{s}/\epsilon)^{\beta} 
 鉄筋切削あり 
 (\epsilon_{s}/\epsilon)^{\beta\sqrt{1-\alpha/100}}
 \end{cases}$$

(2-1)

$$\beta = 0.049(L/D)$$
 (2-2)  
 $\varepsilon_s = \varepsilon_y e^{21.7/(L/D)}$  (2-3)

ここで、 $\alpha$ :断面減少率(%)、 $\beta$ :軟化勾配の差異を表現する係数、L:試験区間長(mm)、D: 鉄筋径(mm)、 $\varepsilon_{v}$ :引張試験で得られた降伏歪(%)である。

#### 2.4.2 コンクリートのモデル

コンクリートのモデルには式(2-4)に示す Popovics モデル<sup>7)</sup>を用い,スリットおよび破壊の 局所化による軟化勾配の違いを表現したモデルを構築する。

$$\frac{\sigma}{\sigma_c} = \frac{n(\varepsilon/\varepsilon_c)}{n-1+(\varepsilon/\varepsilon_c)^n}$$
(2-4)

ここで、 $\sigma_c$ :最大応力(MPa)、 $\varepsilon_c$ :最大応力時の歪(%)である。

Popovics モデルの曲線形状を図 2.9 に示す。式(2-4)の係数nは、応力-歪曲線の形状を決定 する係数であり、係数nの値が大きくなるにつれて、最大応力以降の負勾配が大きくなる。こ の係数nにひび割れを模擬したスリットおよび破壊の局所化の影響が生じることが考えられ る。平面保持を仮定し、各試験体の結果から鉄筋モデルの応力を差し引き、コンクリート負 担分の応力一歪曲線を算出し、最小二乗法による近似により各試験体の曲線形状係数を算出 した。同様の条件で実験を行った既往の研究<sup>8)</sup>と共に、腐食ひび割れ長さ比L<sub>cr</sub>/Lと係数nの 関係を図 2.10 に示す。腐食ひび割れ長さ比Lcr/Lおよび試験区間長Lが大きくなるにつれて, 係数nの値が大きくなる傾向が確認できる。破壊の局所化による影響を定式化するため、スリ ットのない試験体について、破壊域長さLfを試験区間長Lで除した値(以下、破壊域長さ比) と曲線形状係数noの関係を図 2.11 に示す。破壊域長さ比が小さいほど、係数noの値が大きく なる傾向を示している。最小二乗法による回帰計算から、式(2-5)を得た。

$$n_0 = 1.81 (L_f/L)^{-0.84}$$

(2-5)

(2-6)

次に、式(2-5)を用いて各試験体の係数nを基準化した値と腐食ひび割れ長さ比の関係を図 2.12 に示す。ばらつきは多いものの、右上がりの傾向が確認できる。最小二乗法による直線 近似を行い,式(2-6)を得た。

$$n/n_0 = 0.071(L_{cr}/L) + 1$$





図 2.9 Popovics モデル





式(2-5)および式(2-6)から式(2-7)を導出した。なお、最大応力時の歪 $\varepsilon_c$ には、実験で得られた各試験区間長の最大応力時の歪の平均値を適用した。

$$n = \frac{0.13(L_{cr}/L) + 1.81}{\left(L_f/L\right)^{0.84}}$$
(2-7)

ここで、 $1.81 \le n \le 2.97$ 、 $0.65 \le L_f/L \le 1.00$ 、 $0.00 \le L_{cr}/L \le 2.00$ 、である。



図 2.11 係数 $n_0$ と破壊域長さ比 $L_f/L$ の関係



図 2.12 n/n<sub>0</sub>と腐食ひび割れ長さL<sub>cr</sub>/L の関係

## 2.5 モデルと実験結果の比較

平面保持の仮定に基づき,2.4.1 項で得た座屈鉄筋の応力-歪曲線と,2.4.2 項で提案したコ ンクリートの応力-歪曲線を足し合わせ,全荷重を試験体断面積で除した応力-歪曲線のモ デルを構築した。各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した応力-歪曲線の実 験値とモデルの比較を図 2.13~図 2.15 に示す。実験結果では応力上昇域の曲線形状係数に 大きな差異は見られず, Popovics モデルで適用した係数nの範囲で,応力上昇域の同一歪にお ける応力が 3 割程度の差異を生じるが,最大応力以降の負勾配の領域では,精度よく実験値 を表していると考えられる。



図 2.13 実験結果とモデルの比較(試験区間長 150mm)



図 2.14 実験結果とモデルの比較(試験区間長 235mm)



図 2.15 実験結果とモデルの比較(試験区間長 400mm)

## 2.6 まとめ

スリットによってかぶりコンクリートのひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い, 実験結果に基づいて応力-歪曲線のモデル化を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大応力にはスリットの種類および鉄筋切削による明瞭な影響は見られず,腐食ひび割 れが最大応力に及ぼす影響は少ないと考えられる。
- (2) ひび割れを模擬したスリットおよびコンクリートの破壊の局所化が、応力-歪曲線の最 大応力以降の挙動に大きく影響を及ぼし、ひび割れの程度により応力-歪曲線の軟化勾 配が大きくなる。
- (3) 腐食ひび割れ長さ比と破壊域長さ比を用いて、応力-歪曲線の形状を決定する関係式を 提案し、実験結果の挙動を概ね再現できた。

# 第3章 電食を用いて腐食させた RC 柱の中心圧縮 性状

3.1 はじめに

第2章では、スリットを用いてかぶりコンクリートのひび割れを模擬した RC 柱の中心圧 縮試験を行い、ひび割れ長さを考慮したコンクリートの圧縮モデルの提案を行った。しかし、 スリットの設置はひび割れの量や位置を意図的にコントロールできる一方で、実際の鉄筋腐 食膨張に伴うひび割れとの関連性は不明である。本章では、電食によって腐食させた RC 柱 の中心圧縮試験を行い、鉄筋の腐食およびかぶりコンクリートのひび割れが RC 柱の圧縮性 能へ及ぼす影響を検討するとともに、第2章で提案したモデルの適応性を検討する。

## 3.2 実験概要

#### 3.2.1 試験体

試験体概要を図 3.1 に,試験体一覧を表 3.1 に示す。試験体は全 17 体である。断面は 150mm ×235mm で,試験体中央部を試験区間とした。主鉄筋には D10 異形鉄筋を4本使用している。 試験体両端部については,試験体 No.1~No.8 では帯鉄筋 (D6@30)を配し,試験体 No.9~ 17 では炭素繊維シートを用いて補強している。変動因子は設計強度,試験区間長および電食 によって試験区間に発生させるひび割れ長さである。



図 3.1 電食試験体概要図

No.	試験体名	設計強度(MPa)	試験区間長(mm)	目標ひび割れ長さ(mm)	
1	S13-E0			0	
2	S13-E1		150	50	
3	S13-E2		150	100	
4	S13-E3	13.5		150	
5	L13-E0			0	
6	L13-E1		400	100	
7	L13-E2			400	200
8	L13-E3			400	
9	S18-E0				0
10	S18-E1		150	50	
11	S18-E2		150	100	
12	S18-E3			150	
13	L18-E0	18		0	
14	L18-E1			100	
15	L18-E2		400	200	
16	L18-E3			300	
17	L18-E4			400	

表 3.1 電食試験体一覧

#### 3.2.2 電食方法

電食方法を図 3.2 に示す。試験体の腐食想定区間に固定した水槽内に 3%NaCl 水溶液を満たし、銅板を試験体の最小かぶり面に 4 枚設置した。電流は定電流発生装置を用いて通電するものとし、陽極を主鉄筋に、陰極を銅板に接続した。電流密度は全試験体において 0.8mA/cm<sup>2</sup> で一定とした。

本実験では試験区間に対するかぶりコンクリートのひび割れ長さを変動因子とするため, 通電中は目視によるひび割れ観察を適宜行い,所定のひび割れ長さに到達した時点で通電を 終了した。





図 3.2 電食方法(左:概要図,右:上面写真)

#### 3.2.3 材料試験結果

(1) コンクリート

コンクリートには,設計強度を13.5MPa および18.0MPa とした最大骨材寸法20mmの普通 コンクリートを用いた。加力時材齢におけるコンクリートの材料試験結果を表3.2 に示す。 圧縮試験6体,割裂引張試験3体の試験を行い,その平均値を示している。

	-						
	計除休 Na	La 設計強度 圧縮強度		弹性係数	割裂強度		
	时间天144 INO.	(MPa)	(MPa)	(GPa)	(MPa)		
	1~8	13.5	10.9	14.8	1.20		
	9~17	18.0	23.0	20.0	2.00		

表 3.2 コンクリート材料試験結果

(2) 鉄筋

鉄筋の諸元は, 第2章の2.2.3項(2)と同一である。

## 3.2.4 加力および計測方法

加力および計測方法は、第2章の2.2.4項と同様である。

## 3.3 実験結果

#### 3.3.1 通電後のひび割れ性状

電食後の試験体状況の例を図 3.3 に, ひび割れ状況の一覧を表 3.3 に示す。初期ひび割れ 長さは目視により直定規により計測し(二捨三入),表中の丸数字は図 3.3 に示す各鉄筋各面 位置を示す。電食を行った全ての試験体において主鉄筋に沿ったひび割れが生じた。通電終 了後に計測した主鉄筋に沿ったひび割れ長さ(以下,初期ひび割れ)と表 3.1 に示した目標 ひび割れ長さに差異があるのは,通電中にひび割れがある一定の長さになると進展が止まり, 鉄筋の腐食のみが進行する様子が一部の試験体で確認され,その時点で通電を終了したため である。帯鉄筋を有している試験体 No.1~8(図 3.3 左図参照)については,帯鉄筋の発錆が 顕著となり,試験区間の腐食進行を妨げる様子が確認された。





NT	試験体	最大ひび割れ		初期ひび割れ長さ(mm)						
No.	名	幅(mm)	1	2	3	4	5	6	$\bigcirc$	8
1	S13-E0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	S13-E1	0.05	0	0	0	0	50	0	0	0
3	S13-E2	0.10	0	35	0	0	0	0	0	0
4	S13-E3	0.10	0	10	20	0	0	0	0	0
5	L13-E0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	L13-E1	0.05	0	0	210	330	0	0	300	70
7	L13-E2	0.10	0	0	100	100	0	0	50	150
8	L13-E3	0.10	0	50	100	200	0	0	120	50
9	S18-E0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	S18-E1	0.10	0	30	30	0	30	0	0	35
11	S18-E2	0.20	0	0	30	0	0	60	0	40
12	S18-E3	0.15	0	0	0	0	40	0	70	50
13	L18-E0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	L18-E1	0.10	0	0	240	290	0	0	25	40
15	L18-E2	0.10	0	0	0	0	170	0	80	0
16	L18-E3	0.35	0	0	400	300	30	0	400	400
17	L18-E4	0.40	0	400	0	400	0	0	400	400

表 3.3 電食後のひび割れ状況

網掛け:最大値

#### 3.3.2 鉄筋の腐食性状

中心圧縮試験終了後,試験体から鉄筋をはつりだし,10%濃度クエン酸アンモニウム水溶 液に48時間浸漬させることで腐食生成物を除去した。鉄筋の質量減少率および断面減少率の 一覧を表 3.4 に示す。質量減少率は除錆後に計測した質量を,事前に計測した鉄筋長さに単 位長さ当たりの質量(0.56kg/m)を掛けた値で除すことにより算出した。腐食後の断面積は, ノギスにより最小径および最小径に対して90度回転させた径の計測を行い,2つの径を用い た楕円の断面積とした。計測した断面積を公称断面積で除すことで断面減少率を算出した。 全て主鉄筋4本の平均値を示している。

No.	試験体名	質量減少率(%)	断面減少率(%)	積算電流量(A・h)				
1	S13-E0	-	-	-				
2	S13-E1	5.6	2.4	71.5				
3	S13-E2	10.5	24.8	87.7				
4	S13-E3	10.7	21.4	106.6				
5	L13-E0	-	-	-				
6	L13-E1	8.8	2.8	80.3				
7	L13-E2	21.0	56.9	233.9				
8	L13-E3	19.0	52.4	284.2				
9	S18-E0	-	-	-				
10	S18-E1	8.5	25.3	52.0				
11	S18-E2	15.6	46.5	89.8				
12	S18-E3	14.4	34.1	89.8				
13	L18-E0	-	-	-				
14	L18-E1	10.7	29.7	138.6				
15	L18-E2	10.7	25.8	138.6				
16	L18-E3	19.3	35.3	239.6				
17	L18-E4	26.2	41.5	239.6				

表 3.4 腐食鉄筋の質量減少率および断面減少率

#### 3.3.3 加力後の破壊状況

試験体の破壊形態は第2章の2.3.1 項と概ね同様の傾向を示した。剥落後のかぶりコンクリートに付着している錆汁の例を図3.4 に示す。鉄筋腐食によって発生した錆汁が試験体表面まで到達している(図3.4 右図参照)だけでなく、試験体表面まで到達していない錆汁やかぶり表面から侵入している錆汁(図3.4 左図参照)も確認された。表3.3 に示す最大ひび割れ幅が約0.30mm 以上であるとかぶりコンクリートに錆汁が全面的に付着している傾向が確認された。



図 3.4 剥落後のかぶりコンクリートに付着している錆汁

#### 3.3.4 応力-歪曲線

実験結果一覧を表 3.5 に,試験体の応力-歪曲線を図 3.5 に,最大応力以降の挙動に着目 するために各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した曲線を図 3.6 に示す。応 力は荷重を試験体断面積で除した値,歪は試験区間変形量を試験区間長で除した値である。

設計強度 13.5MPa の試験体において,最大応力については S13-E3 のみが健全試験体 S13-E0 を上回っているが,その他の試験体では各試験区間長の健全試験体と大きな差異は見られなかった。最大応力以降の応力低下について,試験区間長 400mm の試験体では健全試験体 L13-E0 が最も負勾配が大きくなるなど,初期ひび割れ長さと最大応力以降の負勾配との関連 は見られなかった。

設計強度 18.0MPa の試験体において,最大応力については各試験区間長において健全試験体より電食によって劣化している試験体の方が低下する傾向が見られた。最大応力以降の応力低下について,試験区間長 150mm の試験体では健全試験体 S18-E0 が最も負勾配が大きくなる結果が得られた。試験区間長 400mm の試験体では,初期ひび割れ長さが最も大きいL18-E3 において,最大応力の5割程度まで健全試験体 L18-E0 より負勾配が大きくなる結果を示したが,その他の試験体では初期ひび割れ長さと最大応力以降の負勾配との関連は見られなかった。

		初期ひび割れ長さの	最大応力	最大応力時の歪
No.	試験体名	最大値(mm)	(MPa)	(%)
1	S13-E0	-	12.3	0.43
2	S13-E1	50	11.8	0.38
3	S13-E2	35	12.3	0.47
4	S13-E3	20	13.8	0.59
5	L13-E0	-	11.6	0.39
6	L13-E1	330	10.9	0.32
7	L13-E2	150	11.1	0.34
8	L13-E3	200	11.4	0.27
9	S18-E0	-	23.4	0.50
10	S18-E1	35	20.5	0.40
11	S18-E2	60	19.5	0.30
12	S18-E3	70	19.1	0.40
13	L18-E0	-	24.4	0.25
14	L18-E1	290	23.0	0.19
15	L18-E2	170	21.4	0.19
16	L18-E3	400	22.8	0.18
17	L18-E4	400	21.8	0.19

表 3.5 電食試験体実験結果一覧







図 3.6 電食試験体の基準化応力-基準化歪曲線

## 3.4 応力-歪曲線のモデル

## 3.4.1 鉄筋のモデル

鉄筋のモデルは第2章の2.4.1項と同一である。ここで,式(2-1)における断面減少率αは表 3.4 に示した断面減少率を適用した。

#### 3.4.2 コンクリートのモデル

コンクリートのモデルには第2章の2.4.2項で提案したモデルを使用する。式(2-7)における 腐食ひび割れ長さ $L_{cr}$ には電食によって発生したひび割れ長さを適用するにあたり、(1)電食後 に計測した初期ひび割れ長さの最大値 $L_i$ 、(2)かぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さ  $L_a$ により評価を行った。錆汁範囲の長さは、剥落したかぶりコンクリート片を用いて目視に より直定規によって計測した(二捨三入)。錆汁範囲の長さの計測例を図 3.7 に示す。コンク リート片の一部に錆汁が見られる領域も錆汁範囲の長さに算入した。3.3.3 項より、表面まで 到達している錆汁は試験体表面にひび割れとして目視で確認できるが、表面まで到達してい ない錆汁は目視で確認できず、かぶり内部にひび割れが生じている点を考慮して、ひび割れ 長さとした。電食試験体の係数nの一覧を表 3.6 および表 3.7 に示す。nは 2.4.2 項と同一の手 法で算出した各試験体の実験結果から得られた曲線形状係数、 $n_i$ および $n_a$ は、それぞれ $L_i$ お よび $L_a$ を用いて式(2-7)によって算出された曲線形状係数である。 $n \ge n_i$ および $n_a$ の誤差につい て比較すると、若干の差異ではあるが、(2)の評価方法を適用することで実験結果をより良く 評価できる。



図 3.7 靖汁範囲の長さの計測例

試験体名	n	L(mm)	L <sub>i</sub> (mm)	$L_i/L$	n <sub>i</sub>	n <sub>i</sub> とnの誤差(%)
S13-E0	1.83		0	0.00	1.81	1.1
S13-E1	1.93	150	50	0.33	1.85	4.0
S13-E2	2.05	130	35	0.23	1.84	10.2
S13-E3	2.11		20	0.13	1.83	13.4
L13-E0	2.32		0	0.00	2.60	12.0
L13-E1	2.11	400	330	0.83	2.75	30.5
L13-E2	2.43	400	150	0.38	2.67	9.8
L13-E3	2.20		200	0.50	2.69	22.4
S18-E0	1.82	150	0	0.00	1.81	0.5
S18-E1	2.07		35	0.23	1.84	11.1
S18-E2	1.60		60	0.40	1.86	16.4
S18-E3	1.91		70	0.47	1.87	2.1
L18-E0	2.19		0	0.00	2.60	18.7
L18-E1	2.65		290	0.73	2.73	3.2
L18-E2	2.77	400	170	0.43	2.68	3.3
L18-E3	2.70		400	1.00	2.79	3.2
L18-E4	2.05		400	1.00	2.79	35.9
	11.6					

表 3.6 電食試験体の係数nの一覧(1)

ここで、 $L_i$ :電食後に計測した初期ひび割れ長さの最大値、 $L_i/L$ :腐食ひび割れ長さ比、 $n_i: L_i$ を用いて式(2-7)によって算出された曲線形状係数

試験体名	n	L(mm)	$L_a(mm)$	$L_a/L$	n <sub>a</sub>	n <sub>a</sub> とnの誤差(%)
S13-E0	1.83		0	0.00	1.81	1.1
S13-E1	1.93	150	38	0.25	1.84	4.7
S13-E2	2.05	130	100	0.67	1.90	8.1
S13-E3	2.11		105	0.69	1.90	11.0
L13-E0	2.32		0	0.00	2.60	10.7
L13-E1	2.11	400	120	0.30	2.66	21.6
L13-E2	2.43	400	75	0.50	2.69	11.4
L13-E3	2.20		245	0.76	2.74	17.1
S18-E0	1.82	150	0	0.00	1.81	0.6
S18-E1	2.07		175	1.17	1.96	5.5
S18-E2	1.60		130	0.85	1.92	16.7
S18-E3	1.91		125	0.83	1.92	0.4
L18-E0	2.19		0	0.00	2.60	15.7
L18-E1	2.65		325	0.81	2.75	3.7
L18-E2	2.77	400	235	0.59	2.71	2.3
L18-E3	2.70		520	1.30	2.84	5.0
L18-E4	2.05		555	1.39	2.86	28.3
	9.6					

表 3.7 電食試験体の係数nの一覧(2)

ここで、 $L_a$ :かぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さ、 $L_a/L$ :腐食ひび割れ長さ比、 $n_a: L_a$ を用いて式(2-7)によって算出された曲線形状係数

## 3.5 モデルと実験結果の比較



図 3.8 モデルと実験結果の比較(設計強度 13.5MPa)



図 3.9 モデルと実験結果の比較(設計強度 18.0MPa)

## 3.6 まとめ

電食によって腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行い,鉄筋の腐食およびかぶりコンクリートのひび割れが RC 柱の圧縮性能へ及ぼす影響を検討するとともに,第2章で提案したコンクリートの圧縮モデルの適応性について検討した。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大応力は設計強度 13.5MPa の試験体では腐食による明確な影響は確認できなかったが, 設計強度 18.0MPa の試験体では健全試験体に比べて低下する傾向が見られた。
- (2) 電食によって発生したかぶりコンクリートのひび割れ長さと最大応力以降の応力低下について,明確な関係は確認できなかった。
- (3) 剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さを用いて,第2章で提案したモデルにより実験結果を概ね表現できた。

# 第4章 静的破砕材を用いてひび割れを模擬した RC 柱の中心圧縮性状

## 4.1 はじめに

第3章において,電食によって発生したひび割れが RC 柱の中心圧縮性状に及ぼす影響に ついて検討し,剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さを評価することで実 験結果を表現できた。しかし,3.3節において同等のひび割れ長さにおいても,ひび割れ幅の 値によってかぶりに付着する錆汁の範囲が異なる結果が得られた。以上の結果より,ひび割 れ長さだけでなく,ひび割れ幅がコンクリートの圧縮性能に及ぼす影響について検討する必 要があると考えられる。

既往の研究<sup>9</sup>では,主鉄筋の腐食膨張の模擬に静的破砕材を用いた検討が行われ,破砕材 の膨張に伴って鉄筋軸に沿ったひび割れが進展し,ひび割れ幅が開口するとともにコンクリ ートの拘束圧が低下することが報告されている。本章では,静的破砕材を用いて劣化を模擬 した RC 柱の中心圧縮試験を行い,第2章で提案したモデルの適応性を検討するとともに, ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響の考察を行う。

## 4.2 実験概要

#### 4.2.1 試験体

試験体概要を図 4.1 に, 試験体一覧を表 4.1 に示す。試験体は全8 体である。断面は 150mm ×235mm で, 試験体両端部は炭素繊維シートを用いて補強し, 試験体中央部を試験区間とした。主鉄筋には D10 異形鉄筋を4本使用している。円孔はコンクリート打設前に直径 22mm の塩化ビニル管を挿入し, 硬化後に引き抜くことで所定の位置に設けた。コンクリートの養 生期間経過後, 円孔に鉄筋を挿入し, 円孔内に静的破砕材を充填することで腐食膨張を模擬 した。水-破砕材比のメーカー推奨値は 30%であるが, 破砕材の流動性を考慮して全試験体 において 50%とした。変動因子は試験区間長および加力開始直前のひび割れ幅である。ひび 割れ幅はクラックスケールを用いて目視観察により計測し, 概ね目標とするひび割れ幅に達 した時点で中心圧縮加力を開始した。破砕材の充填から中心圧縮加力までに要した時間は, 20~30 時間程度であった。



No.	試験体名	試験区間長(mm)	目標ひび割れ幅(mm)
1	S18-S0		0
2	S18-S1	150	0.3
3	S18-S2	130	0.5
4	S18-S3		0.7
5	L18-S0		0
6	L18-S1	400	0.3
7	L18-S2	400	0.5
8	L18-S3		0.7

表 4.1 破砕材試験体一覧

## 4.2.2 材料試験結果

(1) コンクリート

コンクリートの諸元は, 第3章の3.2.3項(1)の試験体 No.9~17と同一である。

## (2) 鉄筋

鉄筋の諸元は、第2章の2.2.3項(2)と同一である。

## 4.2.3 加力および計測方法

加力および計測方法は、第2章の2.2.4項と同様である。

## 4.3 実験結果

## 4.3.1 加力直前のひび割れ性状

加力直前の試験体のひび割れ状況の一覧を表 4.2 に,ひび割れ観測面の番号を図 4.2 に示 す。初期ひび割れ幅は,試験区間に発生したひび割れにおける幅の最大値とした。全ての試 験体において鉄筋軸に沿ったひび割れが試験区間全体に発生していることが確認された。初 期ひび割れ幅はひび割れ発生箇所によって差異が見られ,かぶり厚さが短い試験体長辺方向 に垂直なひび割れは,かぶり厚さが長い試験体短辺方向に垂直なひび割れより大きく計測さ れる傾向を示した。

No. 試験体名			初期ひび割れ幅(mm)							
	試験伴名	1	2	3	4	5	6	$\bigcirc$	8	平均
1	S18-S0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	S18-S1	0.10	0.05	0.20	0.30	0.10	0.10	0.30	0.30	0.18
3	S18-S2	0.10	0.20	0.40	0.60	0.20	0.40	0.20	0.70	0.35
4	S18-S3	0.40	0.75	0.70	0.75	0.75	0.00	0.70	0.50	0.59
5	L18-S0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	L18-S1	0.05	0.00	0.20	0.50	0.20	0.30	0.05	0.35	0.21
7	L18-S2	0.20	0.00	0.25	0.70	0.80	0.00	0.50	0.70	0.39
8	L18-S3	0.50	0.40	0.80	0.90	0.60	0.50	0.70	0.90	0.65

表 4.2 破砕材充填後加力前のひび割れ状況

網掛け:最大値



図 4.2 ひび割れ観測面の番号

### 4.3.2 加力後の破壊状況

最大荷重直後の試験体状況の例を図 4.3 に示す。試験区間長が 150mm の試験体では,最大荷重を迎えるとともに徐々にかぶりが剥離および剥落し,荷重が低下していったのに対して, 試験区間長が 400mm の L18-S2 および L18-S3 では,最大荷重を迎えるとともにかぶりが試験 区間全体にわたって脆性的に破壊し,荷重が急激に低下する傾向が見られた。



No.3(S18-S2)



No.4(S18-S3)



No.7(L18-S2)



No.8(L18-S3)



#### 4.3.3 応力-歪曲線

実験結果一覧を表 4.3 に,試験体の応力-歪曲線を図 4.4 に,最大応力以降の挙動に着目 するために各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した曲線を図 4.5 に示す。応 力は荷重を試験体断面積で除した値,歪は試験区間変形量を試験区間長で除した値である。

各試験区間長の健全試験体と破砕材を充填した試験体を比較すると,破砕材の膨張に伴っ て発生したひび割れによる最大応力の低下が見られた。試験区間長が400mmの試験体におい ては,初期ひび割れ幅の増大とともに最大応力が低下し,最大応力以降の負勾配も大きくな る傾向が見られた。

No.	計時 仕 々	初期ひび害	可れ幅(mm)	最大応力	最大応力時の歪			
	武歌伴名	最大値	平均值	(MPa)	(%)			
1	S18-S0	-	-	23.4	0.50			
2	S18-S1	0.30	0.18	21.1	0.61			
3	S18-S2	0.70	0.35	20.7	0.54			
4	S18-S3	0.75	0.59	21.0	0.50			
5	L18-S0	-	-	24.4	0.25			
6	L18-S1	0.50	0.21	23.0	0.26			
7	L18-S2	0.80	0.39	19.7	0.23			
8	L18-S3	0.90	0.65	21.1	0.24			

表 4.3 破砕材試験体実験結果一覧



図 4.4 破砕材試験体の応力-歪曲線



図 4.5 破砕材試験体の基準化応力-基準化歪曲線

## 4.4 初期ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響評価

第2章の2.4.2項と同一の手法で算出した各試験体の実験結果から得られた曲線形状係数と, 初期ひび割れ幅の最大値および平均値との関係を図 4.6 および図 4.7 に示す。ここで, 健全 試験体である S18-S0 および L18-S0 の初期ひび割れ幅は 0mm としている。

試験区間長 150mm の試験体において, 破砕材によって初期ひび割れを導入した試験体の曲線形状係数は, S18-S0 の曲線形状係数(図中破線)を下回っており,最大応力以降の挙動とひび割れ幅の明確な関係は得られなかった。試験区間長 400mm の試験体においては,曲線形状係数と初期ひび割れ幅の間に傾向が見られ,初期ひび割れ幅の最大値で 0.6mm 程度,平均値で 0.2mm 程度から大きくなる傾向が見られた。ひび割れ幅がある一定以上の値になると最大応力以降の負勾配に影響が出ると考えられる。



図 4.6 曲線形状係数と初期ひび割れ幅の関係(試験区間長 150mm)



図 4.7 曲線形状係数と初期ひび割れ幅の関係(試験区間長 400mm)

## 4.5 モデルと実験結果の比較

初期ひび割れ幅によって差異が生じた試験区間長 400mm の試験体に関して, モデルと実験 結果の比較を行う。第2章の2.5節と同様に応力-歪曲線のモデルを算出した。式(2-7)にお ける腐食ひび割れ長さ*L<sub>cr</sub>*には,静的破砕材の膨張圧によって発生したひび割れ長さを適用す る。

第3章の3.3.1項より,電食によって腐食促進させた試験体では,試験体表面の各鉄筋各面 位置の全てにひび割れが発生するのではなく,数か所のみで発生する傾向を確認した。本章 で検討した初期ひび割れ幅の平均値を電食試験体において同様に考慮すると,その平均値が 極端に小さくなることが想定される。また,試験体の破壊形態では,最も損傷している箇所

(ひび割れ長さおよび幅の最大値) での破壊が卓越することが考えられるため、初期ひび割れ幅の最大値で評価することが適切であると仮定し、初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上のひび割れを腐食ひび割れ長さ*L*crとした。各試験体の腐食ひび割れ長さを表 4.4 に示す。

各試験体の最大応力および最大応力時の歪で基準化した応力-歪曲線の実験値とモデルの 比較を図 4.8 に示す。算出したモデルは実験結果を概ね表現できているが,L18-S2 とL18-S3 のモデルでは腐食ひび割れ長さが同じ値のため、実験結果の差異を表現できなかった。

No. 試験体名	試験区間長	腐食ひび割れ長さ	腐食ひび割れ長さ比	曲線形状係数	
	L(mm)	$L_{cr}(mm)$	$L_{cr}/L$	n	
5	L18-S0		0	0.00	2.60
6	L18-S1	400	0	0.00	2.60
7	L18-S2	400	800	2.00	2.97
8	L18-S3		800	2.00	2.97

表 4.4 各試験体の腐食ひび割れ長さ(初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上)



図 4.8 実験結果とモデルの比較(試験区間長 400mm)

## 4.6 まとめ

静的破砕材を用いて劣化を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い,第2章で提案したモデルの適応性を検討するとともに,ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響の検討を行った。本章で得られた知見を以下に示す。

- (1) 最大応力は破砕材の膨張圧によって発生したひび割れの影響で,健全試験体に比べて低下する傾向が見られた。
- (2) 試験区間長が 400mm の試験体において,初期ひび割れ幅が大きいほど,最大応力以降の 応力低下が大きくなる。
- (3) 初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上のひび割れを,試験体の圧縮性能に影響を及ぼす ひび割れと仮定し,第2章で提案したモデルを用いることで,実験結果を概ね表現できた。

## 第5章 結論

鉄筋腐食によって発生したかぶりコンクリートのひび割れが RC 柱の圧縮性能に与える影響について, 第2章では, スリットを用いてひび割れを模擬した RC 部材の中心圧縮試験を行うとともに, ひび割れ長さを考慮したコンクリートモデルを提案した。第3章では, 電食によって腐食させた RC 柱の中心圧縮試験を行うとともに, 第2章で提案したモデルの適応性を検討した。第4章では, 静的破砕材を用いて劣化を模擬した RC 柱の中心圧縮試験を行い, 第2章で提案したモデルの適応性を検討するとともに, ひび割れ幅が圧縮性能へ及ぼす影響の考察を行った。

以上から得られた結果を以下に示す。

- (1) 種々のひび割れ模擬方法において,最大応力は設計強度 13.5MPa の試験体ではひび割れ 模擬による明確な影響は確認できなかったが,設計強度 18.0MPa の試験体では健全試験 体に比べて低下する傾向を確認した。
- (2) スリットを用いてひび割れを模擬した試験体において、スリットおよびコンクリートの 破壊の局所化が応力-歪曲線の最大応力以降の挙動に影響を及ぼし、ひび割れの程度に より応力-歪曲線の軟化勾配が大きくなる。
- (3) 腐食ひび割れ長さ比と破壊域長さ比を用いて、応力-歪曲線の形状を決定する関係式を 提案し、実験結果の挙動を概ね再現できた。
- (4) 電食によって劣化させた試験体において,鉄筋腐食に伴って試験体表面に発生したひび 割れの長さと最大応力以降の応力低下に明確な関係は確認できなかった。
- (5) 剥落後のかぶりコンクリートに付着した錆汁範囲の長さを用いて,第2章で提案したモデルにより実験結果を概ね表現できた。
- (6) 静的破砕材を用いてひび割れを模擬した試験体において,試験区間長が400mmの試験体では,初期ひび割れ幅が大きいほど,最大応力以降の応力低下が大きくなる。
- (7) 初期ひび割れ幅の最大値が 0.6mm 以上のひび割れを,試験体の圧縮性能に影響を及ぼす ひび割れと仮定し,第2章で提案したモデルを用いることで,実験結果を概ね表現できた。

## 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。

筑波大学システム情報工学研究科教授金久保利之先生には、本研究における相談から実験 の実施、および論文推敲に至るまで終始親身にご指導、ご鞭撻を賜りました。ここに感謝の 意を表します。副指導教官であります筑波大学システム情報工学研究科准教授の八十島章先 生には、研究において的確な助言と丁寧なご指導を賜りました。副指導教官であります筑波 大学システム情報工学研究科准教授の庄司学先生には、研究に対する有益な助言を頂きまし た。筑波大学技術専門職員の小島篤志氏には、試験体作成や実験の際に多大なる便宜を図っ て頂きました。財団法人鉄道総合研究所の大屋戸理明氏には、研究に対する示唆や実験器具 の提供など終始ご協力頂きました。皆様に深く感謝致します。

また,研究室の同期である山田大氏,渡邉啓介氏には,研究や学生生活において様々なご 協力を頂きました。研究室の先輩である,牟雨氏,郝帥氏,後輩であります,安藤麻衣氏, 大図友梨子氏,掛川萌子氏,川村佳弘氏,橋本裕子氏,猪口隆大氏,高橋拓也氏とは,多く の時間を共有し,有意義な時間を過ごすことができました。皆様に心より感謝致します。

最後に長い間支えて頂いた両親に深く感謝致します。

# 参考文献

- 日本コンクリート工学会:既設コンクリート構造物の維持管理と補修・補強技術に関す る特別委員会報告書,2015.9
- 2) 鈴木健二,金久保利之,八十島章,大屋戸理明:圧縮鉄筋が腐食した RC 梁部材の曲げ 挙動,JCI,鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウ ム論文集,pp.259-264, 2013.11
- 金久保利之,八十島章,大屋戸理明,武田惇志,鈴木健二:腐食を模擬した切削鉄筋の 座屈性状,土木学会年次学術講演会講演概要集,5-452 号,pp.905-906,2014.9
- 4) 墨野倉駿,金久保利之,八十島章,大屋戸理明:腐食を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.37,No.1, pp.973-978, 2015.7
- Nakamura, H and Higai, T : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length Concrete, JCI-C51E Post - Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.252-272, 1999
- 5) 墨野倉駿,金久保利之,八十島章:座屈する異形鉄筋の応力-歪曲線の提案,土木学会 年次学術講演会講演概要集,5-112号,pp.223-224,2015.9
- 7) Popovics, S : A Numerical Approach to the Complete Stress Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.3, pp.583-599, 1973
- 8) 藻川哲平,墨野倉駿,村井凌,金久保利之,八十島章,大屋戸理明:鉄筋の腐食による コンクリートのひび割れを模擬した RC 部材の中心圧縮性状,土木学会年次学術講演会 講演概要集, 5-078 号, pp.155-156, 2015.9
- 9) 長岡和真,阿部哲雄,番場俊介,村上祐貴:主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価,コンクリート工学論文集,第24巻第2号,pp.29-42,2013.5