

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

腐食した鉄筋コンクリート部材の
付着割裂性状に関する研究

中山 裕司

(構造エネルギー工学専攻)

指導教員 金久保 利之

2010 年 3 月

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 割裂ひび割れが生じる場合の付着性状	3
2.1 はじめに	3
2.2 試験体	4
2.2.1 試験体概要	4
2.2.2 使用材料	5
2.2.3 鉄筋腐食方法	6
2.3 引抜試験	7
2.3.1 実験方法	7
2.3.2 実験結果と考察	9
2.4 腐食損傷調査	14
2.4.1 コンクリート表面に生じた腐食割裂ひび割れ幅の検討	14
2.4.2 鉄筋の腐食状況の評価	17
2.4.3 RC 部材の内部損傷評価	20
2.5 まとめ	23
第3章 腐食による割裂ひび割れの影響を除去した腐食鉄筋の付着性状	24
3.1 はじめに	24
3.2 試験体	25
3.2.1 試験体概要	25
3.2.2 使用材料	28
3.2.3 鉄筋腐食方法	29
3.3 実験方法	32
3.4 実験結果と考察	34
3.5 鉄筋の腐食状況の評価	43
3.6 まとめ	49

第 4 章 結 論 50

参考文献 51

謝辭 52

付録

第1章 序 論

1.1 研究背景

現在までに、腐食が鉄筋コンクリート(以下 RC)部材の構造性能に及ぼす影響について、各研究機関で研究が進められている。それらの研究では実際に RC 部材を製作し、暴露や電食等の方法により鉄筋を腐食させた後に加力実験を行うか、これを模擬した数値解析を行うことにより検討を行っている。これらの結果のうち、例えば部材の曲げ剛性については、腐食による引張鉄筋自体の力学性能の低下に加えて腐食鉄筋の付着すべりを考慮する必要があるとされている¹⁾。また、せん断耐荷性能については、腐食鉄筋の付着が失われることに伴ってせん断耐荷機構に占めるアーチ機構の卓越が生じるとされている¹⁾。さらに、鉄筋端部定着部や重ね継手部などの構造細目については、腐食鉄筋の付着の低下が鉄筋負担力の著しい低下をもたらす、RC 部材の耐荷機構を損なう場合があるとされている²⁾。このように、腐食した RC 部材の構造性能に関して、腐食鉄筋の付着性状の把握は重要な意味を持つ。

しかしながら、腐食鉄筋の付着性状を対象とした研究について概観すると²⁾、腐食鉄筋の質量減少率(腐食による減少質量の、腐食前の質量に対する比率)と最大付着応力の関連の検討に留まっている。図 1-1 に付着強度比－腐食減量率関係を示す。図 1-1 によれば、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最大付着応力の増大をもたらす、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最大付着応力の低下をもたらすとされている。しかし、その評価については、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。

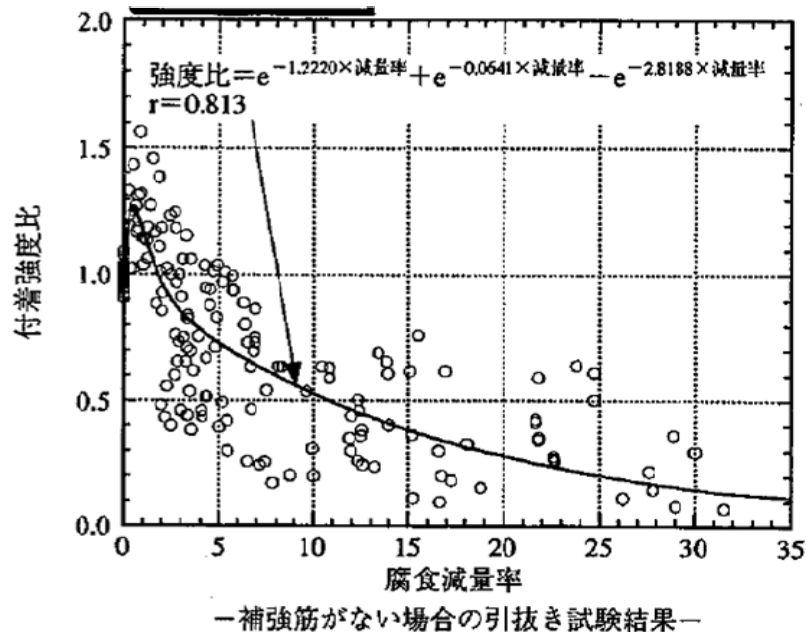


図 1-1 付着強度比－腐食減量率関係²⁾

1.2 研究目的

鉄筋の腐食に伴う付着性状の変化については、部材の曲げ剛性やせん断耐荷特性、鉄筋端部定着部及び重ね継手機構に影響を及ぼすことから、その把握は重要である。

既往の研究では付着性状を評価する指標として質量減少率が用いられており、腐食が軽微な場合は最大付着応力が増大し、それ以上に腐食が進行すると最大付着応力の低下をもたらすと報告されている。しかしながら、質量減少率は腐食割裂ひび割れや鉄筋の節の欠損、腐食生成物によるプレストレス効果など様々な腐食による劣化のメカニズムを含んだ指標であり、それら一つ一つが付着性状にどのように影響を及ぼすのかといった議論はなされていない。これは、付着性状に影響を与える因子について未解明な点が多いからであり、腐食による劣化のメカニズムの解明が付着性状の適切な評価に繋がると考えられる。

そこで本研究の第2章では、同一条件の下作製した試験体を用い、一方を腐食による割裂ひび割れの調査に、他方を引抜試験に充てることにより鉄筋腐食が付着性状に与える影響を明確にすることを目的としている。

第3章では、腐食による割裂ひび割れが腐食鉄筋とコンクリートとの付着性状に大きな影響を与えてしまうと考えられるので、電食後の試験体に切込みを入れることにより腐食割裂ひび割れの影響を除去した引抜試験を行う。加えて、腐食生成物によるプレストレス効果の及ぼす影響を評価するための足がかりを築くことを目的として、試験体外部から外力を与えた状態で引抜試験を行うことで、腐食生成物によるプレストレス効果や横補強筋による拘束効果を模擬した付着実験を行う。

第2章 割裂ひび割れが生じる場合の付着性状

2.1 はじめに

鉄筋の腐食に伴う付着性状の変化は、部材の曲げ剛性やせん断耐荷特性へ影響を及ぼすため、その把握は重要である。しかしながら、既往の研究は、鉄筋腐食が RC 部材の付着性状に及ぼす影響に関し、腐食鉄筋の質量減少率と最大付着応力の関連を報告するに留まっており、メカニズムの解明に言及したものはほとんどない。これは、コンクリートの割裂を伴う場合の鉄筋の付着メカニズムの難解さに起因するものと考えられる。そこで本章では、同じ条件の下作製した 2 体の試験体を用い、一方を腐食による割裂ひび割れの調査に、他方を鉄筋の引抜試験に充てることによって、鉄筋の腐食、特に腐食生成物によって生じるコンクリートの割裂ひび割れが付着性状に与える影響を検討することを目的とする。

2.2 試験体

2.2.1 試験体概要

試験体形状を図 2-1 に示す。試験体は、断面幅 300mm のコンクリート平板の中心に異形鉄筋 D16(SD490)を 1 本埋め込んだものである。試験体の付着長は 480mm(鉄筋径の 30 倍)で、荷重端及び自由端には塩ビ管により 24mm(鉄筋径の 1.5 倍)の付着絶縁区間を設けた。

試験体一覧を表 2-1 に示す。表 2-1 中の A および B の 6 体に対しては引抜試験を行い、A2 および B2 の 6 体には腐食に伴うコンクリートの損傷調査を実施した。A と A2、B と B2 は同じ積算電流量で電食し、引抜試験用試験体 (A、B) の内部腐食状況を、損傷調査用試験体 (A2、B2) の内部腐食状況により推定する。変動因子は鉄筋とコンクリートのかぶり厚さとの比(以下、かぶり径比) C/ϕ および鉄筋の腐食程度とし、腐食の程度は積算電流量の大小により 2 種類を設定した。電食量の小さい試験体 (A および A2) は目標質量減少率を 7.5%とし、電食量の大きい試験体 (B および B2) は目標質量減少率を 15%とした。表中の質量減少率は、引抜試験用試験体 (A、B) の引抜試験終了後には取り出した鉄筋を 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬して除錆し、試験区間の質量減少量を健全時の質量で除して求めた値である。試験体名称の末尾が 0 の試験体は文献 3)の結果を引用している。

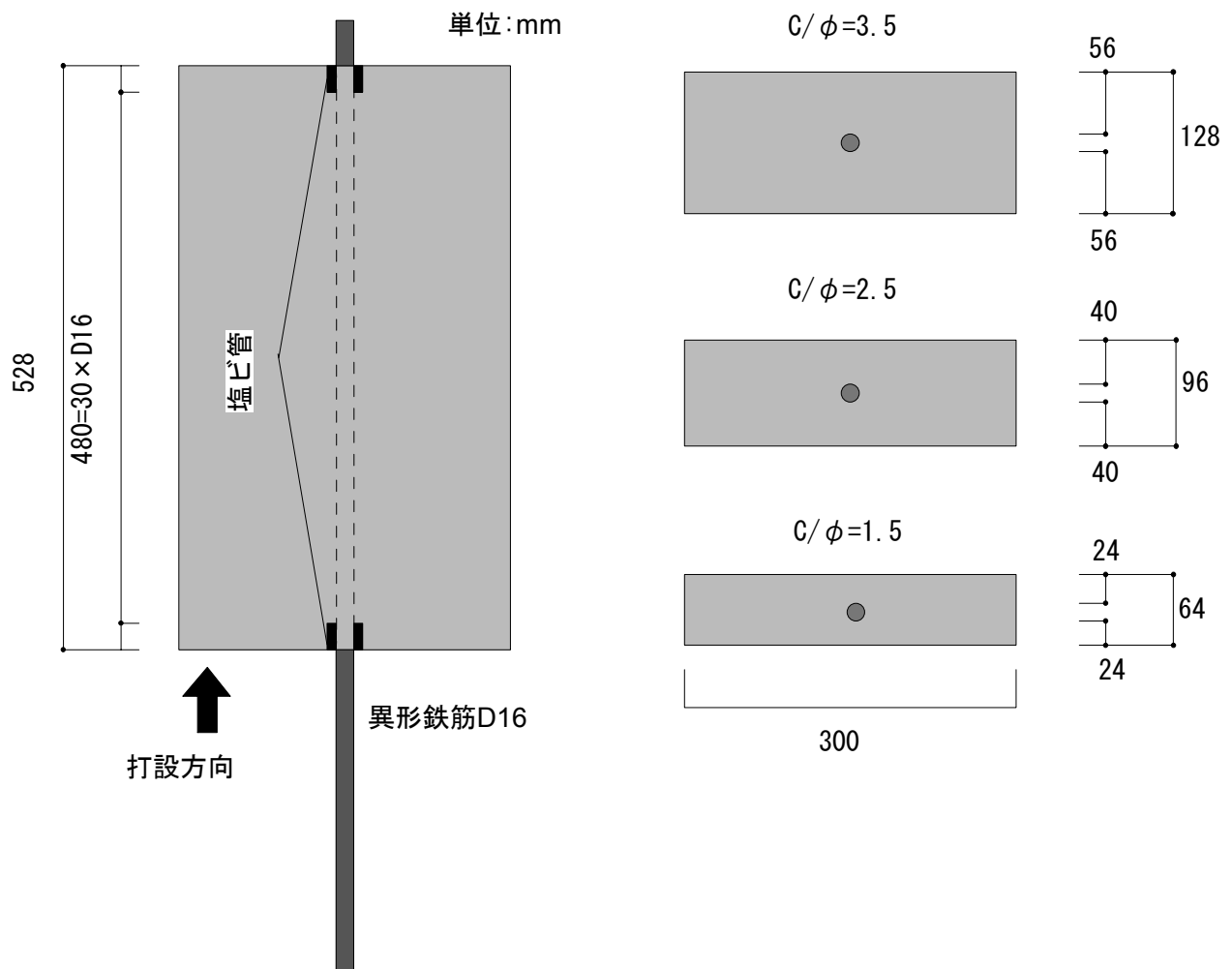


図 2-1 試験体形状

表 2-1 試験体一覧

試験体名称	かぶり C(mm)	積算電流量(A・hr)	質量減少率(%)※
D16CF15-0	24 (1.5φ)	0	0 (健全)
D16CF15-A		73.3	13.2
D16CF15-A2			—
D16CF15-B		146.6	24.9
D16CF15-B2			—
D16CF25-0	40 (2.5φ)	0	0 (健全)
D16CF25-A		73.3	14.4
D16CF25-A2			—
D16CF25-B		146.6	19.0
D16CF25-B2			—
D16CF35-0	56 (3.5φ)	0	0 (健全)
D16CF35-A		73.3	9.9
D16CF35-A2			—
D16CF35-B		146.6	15.7
D16CF35-B2			—

※—は損傷調査用試験体のため質量減少率を測定していない

2.2.2 使用材料

(1) コンクリート

コンクリート目標圧縮強度は 21N/mm^2 とした。粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を用いた。材料試験結果の力学特性を表 2-2 に示す。弾性係数 E_c は 1/3 割線係数とした。

表 2-2 コンクリートの力学特性

目標圧縮強度 (N/mm^2)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	弾性整数 E_C (kN/mm^2)	割裂引張強度 σ_t (N/mm^2)
21	24.8	26.7	2.60

(2) 鉄筋

表 2-3 に鉄筋の引張試験結果を示す。

表 2-3 鉄筋の引張試験結果

規格	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	弾性係数(kN/mm ²)
D16 (SD490)	527	703	203
	534	714	198
	529	712	202
平均	530	710	201

2.2.3 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⁴⁾。写真 2-1 に電食状況を示す。電流は直流安定化電源を用いて通電した。陽極を鉄筋、陰極を水槽の側面に設置した銅板に接続し、電解液には 3.0%の NaCl 水溶液を用いた。なお、電流の大きさは 0.27A とし、通電時間を変動させて腐食の程度を制御した。



写真 2-1 電食状況

2.3 引抜試験

2.3.1 実験方法

加力方法を図 2-2 に示す。加力は、試験体のかぶりを拘束しないように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 2-2 に、テフロンシートを写真 2-3 に示す。

計測項目は引張荷重、荷重端すべり量、自由端すべり量、荷重端側および自由端側の横方向変位である。なお、荷重端側および自由端側の横方向変位は、南面および北面に2本ずつ計4本取り付け変位計により計測した。

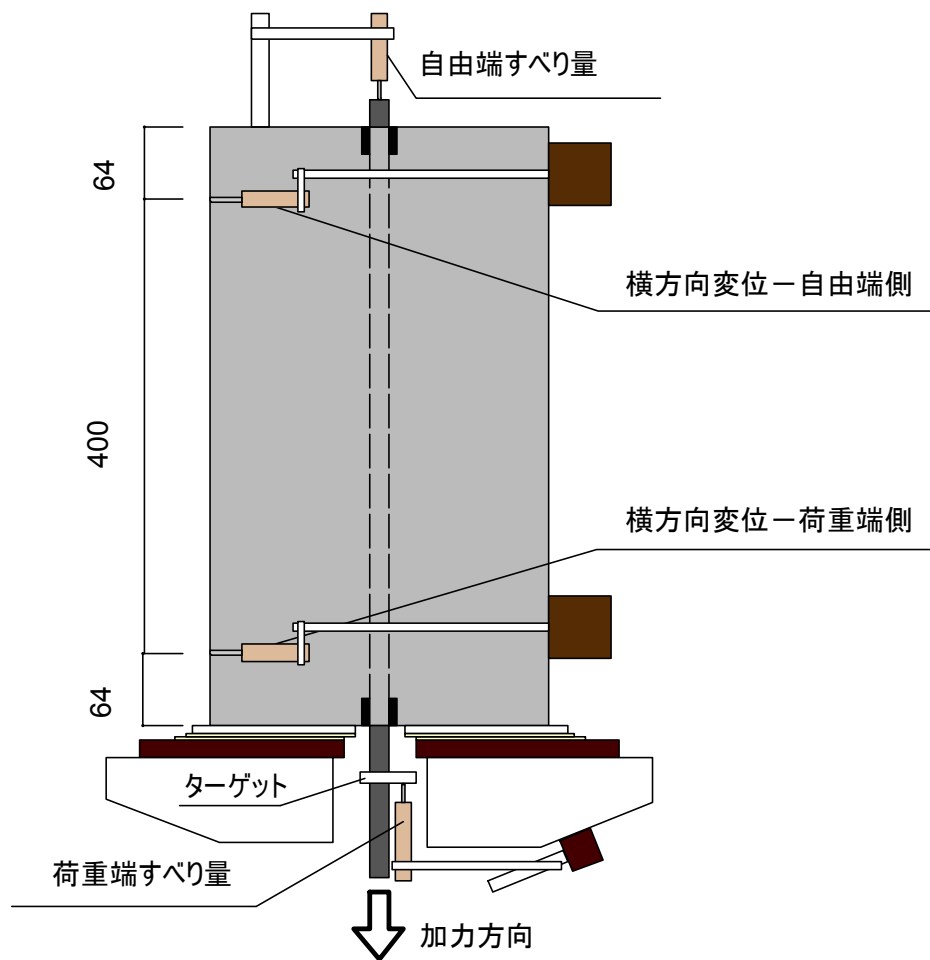


図 2-2 加力方法



写真 2-2 加力板



写真 2-3 テフロンシート

2.3.2 実験結果と考察

試験体の破壊過程は、腐食により鉄筋軸方向に沿って発生した割裂ひび割れが拡大して破壊した場合と、腐食によるひび割れとは別に新たに割裂ひび割れが発生して破壊した場合が存在した。いずれの試験体においても、加力中のひび割れ状況は荷重端側から割裂ひび割れが生じるかまたは拡大し、自由端側に向かって連鎖的に割裂かれてひび割れが拡大する様子が確認された。

実験結果一覧を表 2-4 に、各試験体の平均付着応力－すべり量関係を図 2-3 に示す。平均付着応力は引張荷重を鉄筋の公称周長と付着長で除した値であり、荷重端すべり量は変位計計測値から試験区間外での鉄筋の伸びを除いた値である。図 2-3 より同一の荷重端すべり量において、コンクリートのかぶりが小さくなる程、また質量減少率が大きくなる程、平均付着応力が小さくなることがわかる。荷重端すべり量は平均付着応力の増加に伴い増加しているのに対して、自由端すべり量は最大荷重までほとんど変化なく、最大荷重後に急激に増加していることがわかる。D16CF15-A および D16CF15-B は付着応力が一旦低下した後、再度付着応力が増加する現象が見られる。

表 2-4 実験結果一覧

試験体名称	最大荷重時			質量減少率(%)
	荷重 (kN)	付着応力 (N/mm ²)	荷重端すべり量※ (mm)	
D16CF15-0	50.66	2.10	—	—
D16CF15-A	38.18	1.58	0.65	13.2
D16CF15-B	31.83	1.32	0.99	24.9
D16CF25-0	89.27	3.70	—	—
D16CF25-A	63.80	2.64	0.88	14.4
D16CF25-B	49.94	2.07	0.97	19.0
D16CF35-0	123.29	5.11	—	—
D16CF35-A	79.90	3.31	0.99	9.9
D16CF35-B	58.90	2.44	0.89	15.7

※－は計測していない

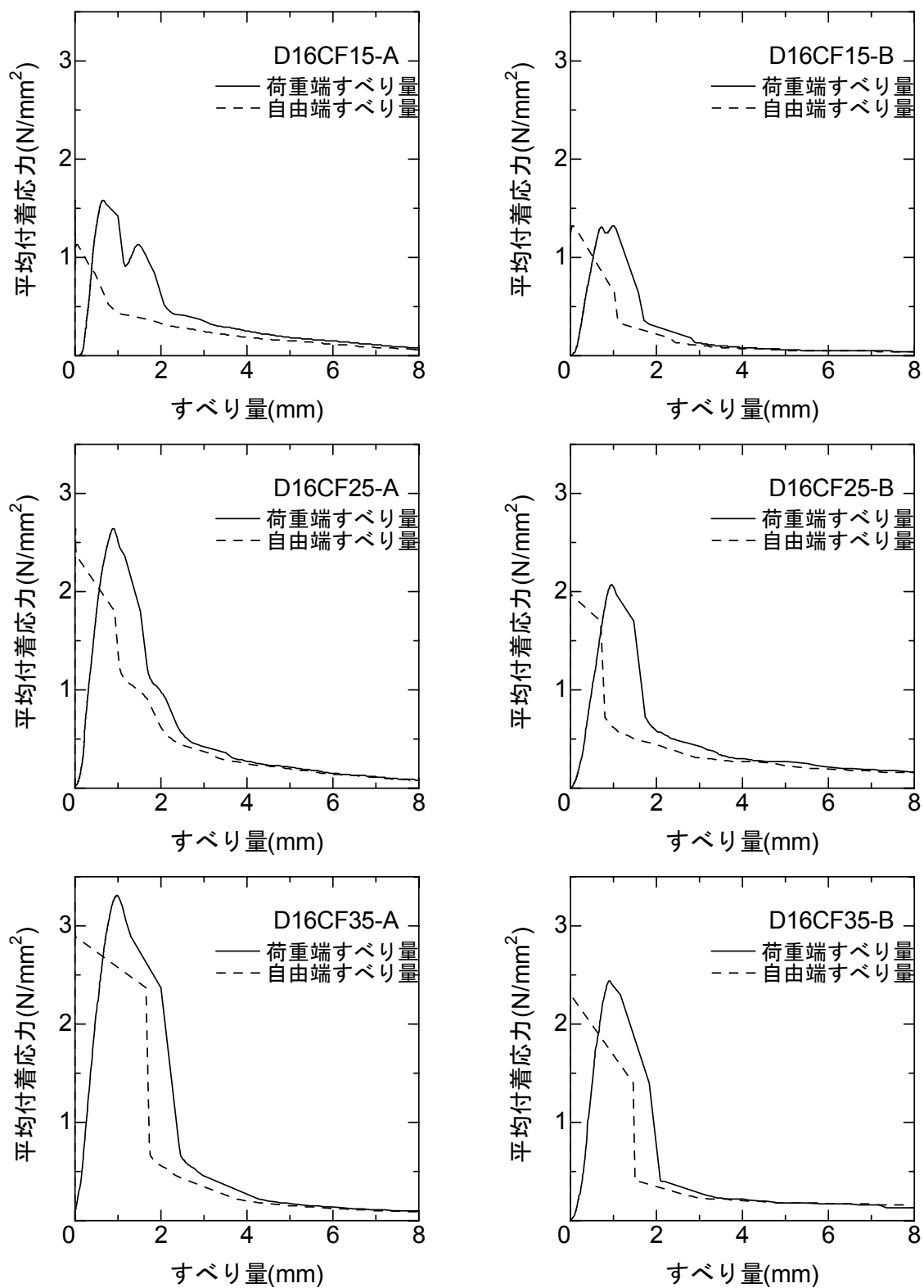


図 2-3 平均付着応力ーすべり量関係

引抜試験後の試験体の割裂面の様子を写真 2-4 に示す。腐食ひび割れ面に腐食生成物が付着し、質量減少率の増加に伴い増加している様子が伺える。かぶりコンクリートの片側には腐食生成物が顕著に漏出し、ひび割れ面を介した引張抵抗力は大きく低下していると思われる。しかしながら、もう一方のかぶりコンクリートにはそれほど漏出が見られていないことがわかる。



写真 2-4 引抜試験後の試験体の割裂面の様子

平均付着応力－横方向変位関係を図 2-4 に示す。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たが、図 2-4 から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、荷重端変位が増大する様子が伺える。また、横方向変位は、北面と南面で差異が生じており、両面の腐食ひび割れの違いが影響していると見られ、この現象は全ての試験体において計測された。

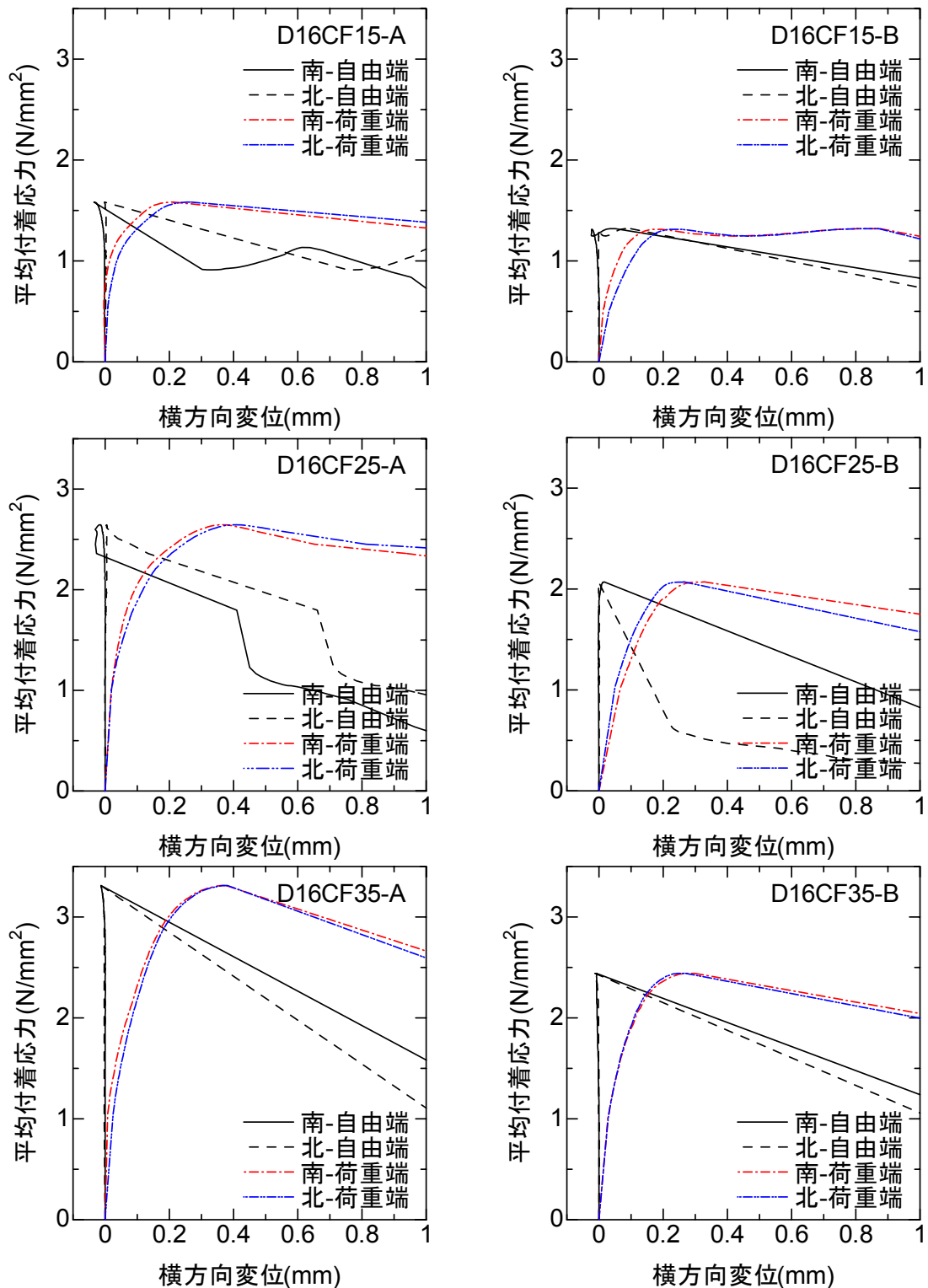


図 2-4 平均付着応力－横方向変位関係

図 2-5 に基準化付着強度－質量減少率関係を示す。なお、基準化付着強度は、各々の最大付着応力を健全試験体の最大付着応力で基準化した値であり、かぶり径比ごとに最小二乗法による回帰計算した結果も示している。図 2-5 より、最大付着応力においては、かぶりコンクリートが大きくなると、質量減少率の付着応力の低下勾配が急になることがわかる。

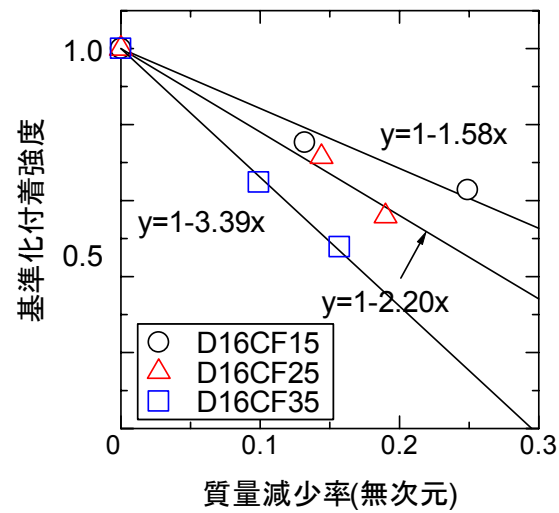


図 2-5 基準化付着強度－質量減少率関係

2.4 腐食損傷調査

腐食した RC 部材の損傷状況を検討するために、コンクリート表面に生じた腐食割裂ひび割れ幅の検討、3D スキャナによる鉄筋の腐食状況の評価および RC 部材の内部損傷調査を行った。

2.4.1 コンクリート表面に生じた腐食割裂ひび割れ幅の検討

電食後の試験体の様子を写真 2-5 に示す。試験体は側面に、鉄筋軸方向に沿った 1 本の腐食ひび割れが生じ、腐食生成物が漏出している状態が確認された。

電食終了後、鉄筋軸方向に沿って測定した試験体の表面ひび割れ幅分布を図 2-6、図 2-7 に示す。測定位置は打設面から 48mm 間隔で、クラックスケールにより測定した。なお、D16CF15-B2、D16CF35-A2 に関しては、ひび割れ幅測定前に試験体を 10 分割したためひび割れ幅を測定していない。

コンクリート表面のひび割れはいずれの試験体も片面のみ顕著に開口し、他面はかぶりの小さい試験体（かぶり径比 $C/\phi=1.5$ ）を除いてほとんど開口しなかった。かぶりの大きい試験体（ $C/\phi=2.5$ 、 3.5 ）は、鉄筋腐食の進展に伴ってコンクリート内部でひび割れが進展し、片面に割裂ひび割れが達した後は、その面のみで集中的にひび割れが開口するためと考えられる。一方、 $C/\phi=1.5$ の試験体では、片面に顕著に腐食生成物の漏出が見られたが、他面においても部分的に確認することができた。

図 2-8 に質量減少率を測定した 6 体の表面ひび割れ幅－質量減少率関係を示す。なお、北面、南面を含め全部で 12 個のデータをプロットしている。質量減少率の増加に伴い、表面ひび割れ幅の標準偏差が増加する傾向があることがわかる。

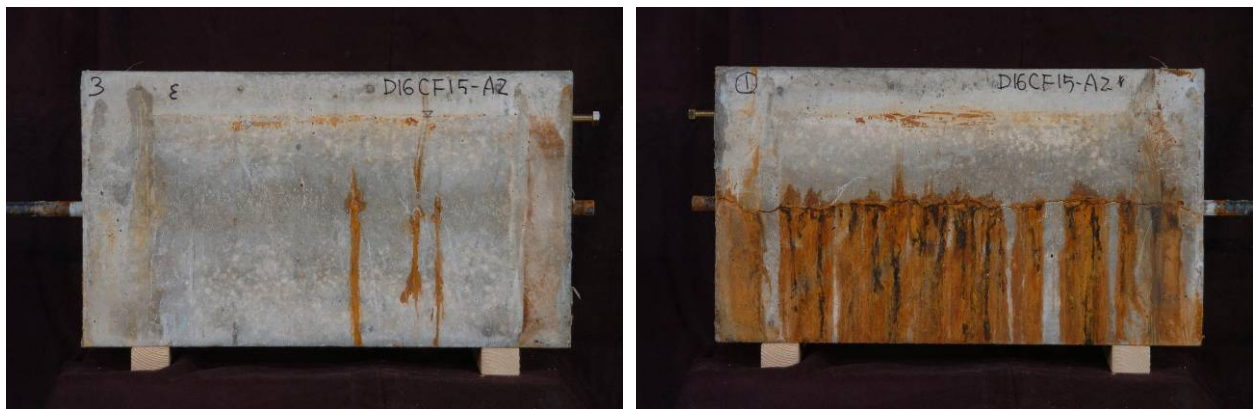


写真 2-5 電食後の試験体の様子
(左：D16CF15-A2 北面、右：D16CF15-A2 南面)

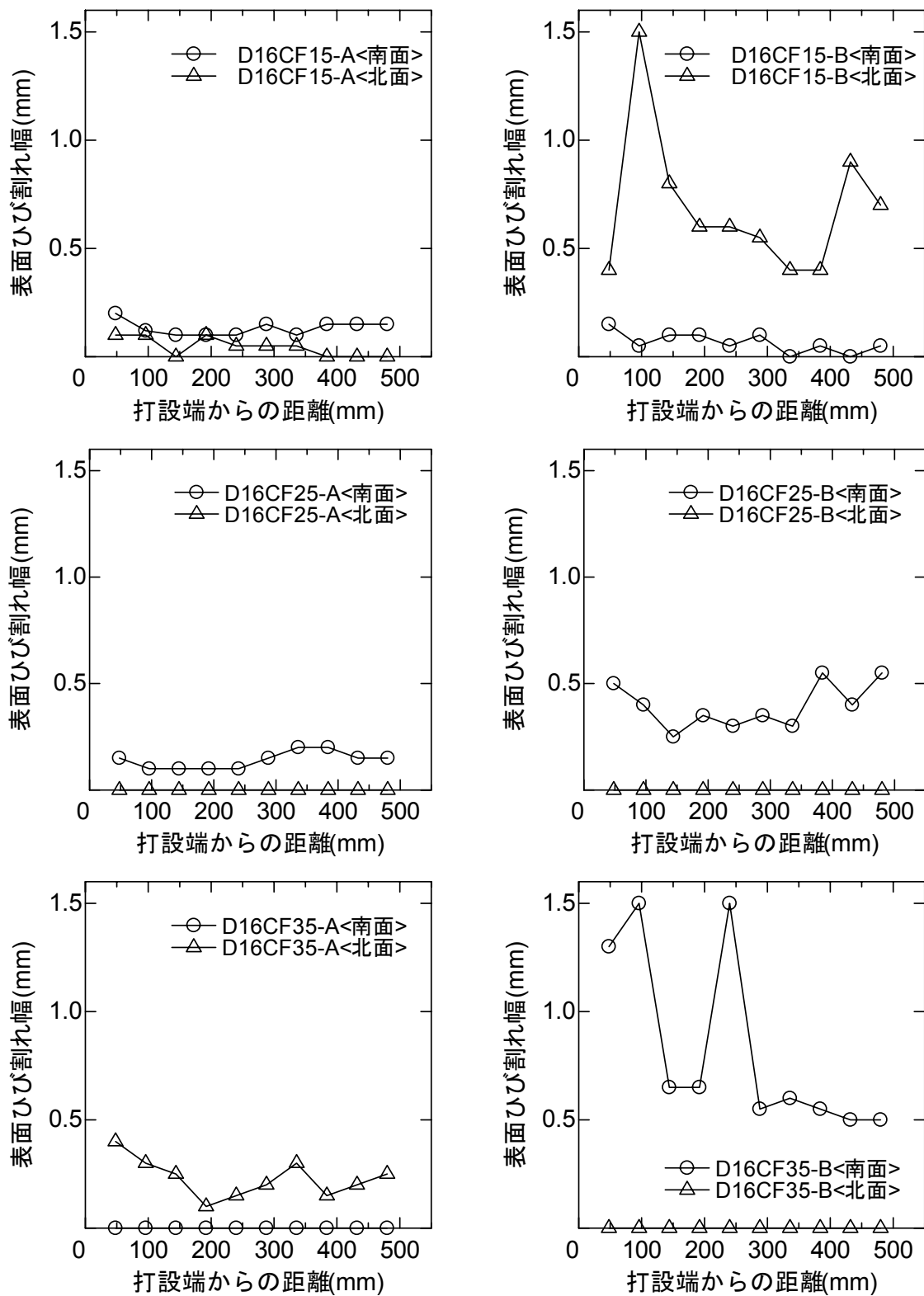


図 2-6 表面ひび割れ幅分布(引抜試験の試験体)

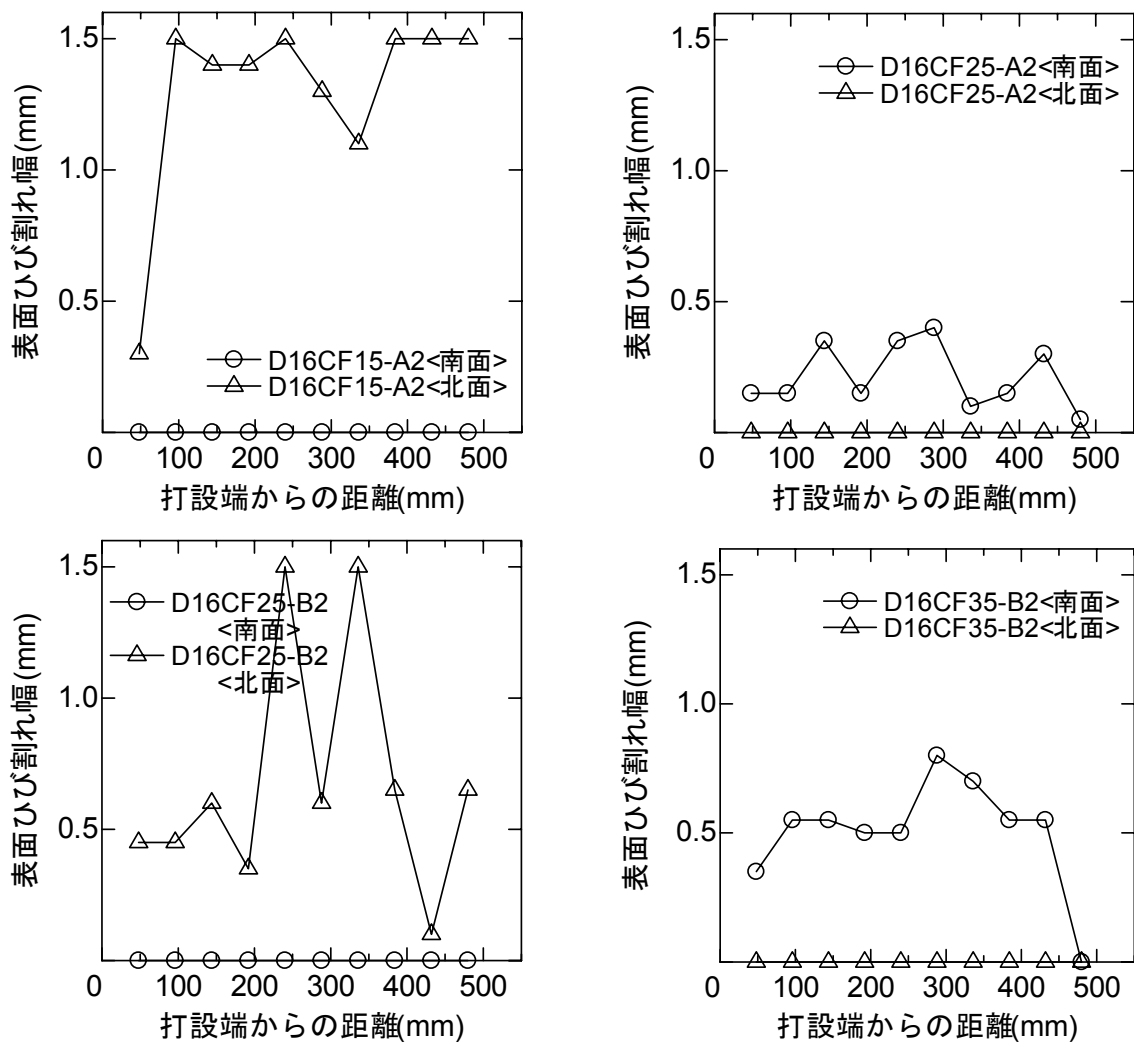


図 2-7 表面ひび割れ幅分布(腐食損傷調査の試験体)

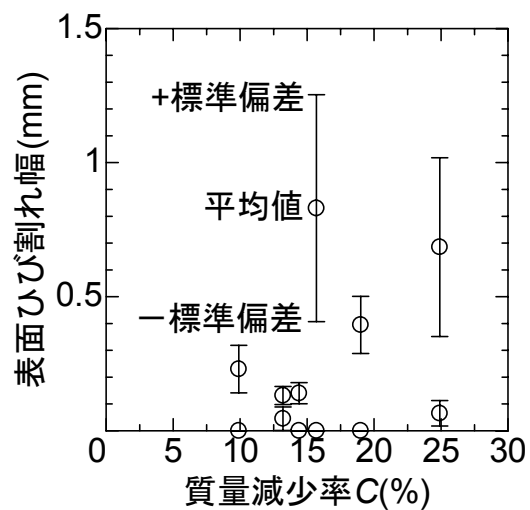


図 2-8 表面ひび割れ幅－質量減少率関係

2.4.2 鉄筋の腐食状況の評価

腐食量のばらつきについて、鉄筋のみかけの最小径(任意の方向から測った鉄筋径の最小値)をノギスにより測定した研究例がある。しかしながら、鉄筋の形状の違いを取り扱う上ではより正確かつ間隔を小さく断面積を計測することが望まれる。そこで、本研究では腐食後の鉄筋の形状を非接触レーザー方式による 3D スキャナにより計測した⁵⁾。

3D スキャナの外観を写真 2-6 に、3D スキャナの諸元を表 2-5 に示す。この装置は、ある一定の高さ(z)から水平にレーザー光を照射し、対象表面に現れるビームスポットの平面上の位置(x、y)を計測する。この工程をターンテーブルを回転させながら円周方向に等間隔で繰り返し、ターンテーブルが一周した後に高さ方向に一定の距離だけレーザー光ユニットを移動させて同じ動作を行う。これを測定エリア全体にわたり繰り返すことで、計測対象の表面形状を取得する。



写真 2-6 3D スキャナの外観

表 2-5 3D スキャナの諸元

スキャン方式	スポットビーム三角測量方式
使用レーザー	波長：600～700nm 最大出力：1.0mW 未満 パルス幅：350 μ s パルス周波数：2857Hz
スキャンピッチ	円周方向 0.2～60° 高さ方向 0.2～406.4mm
最大スキャン領域	直径 254mm、高さ 406.4mm

3D スキャナにより、試験体の主筋の断面積のばらつきを検証した。なお、計測間隔は、鉄筋軸方向に 1mm とし、円周方向に 1° とした。

3D スキャナにより求めた鉄筋断面積の軸方向分布を図 2-9 に示す。計測区間は付着長の 480mm である。なお、3D スキャナの制約上鉄筋の上端と下端は計測できない。図 2-9 より、D16CF15-A については断面積が一部分で小さい領域(孔食)が見られるものの、質量減少率が小さい試験体の鉄筋では節と腹の部分が区別できる。一方、質量減少率が大きい試験体の鉄筋では、節と腹の部分が激しい断面欠損のため明瞭に区別できない部分がある。

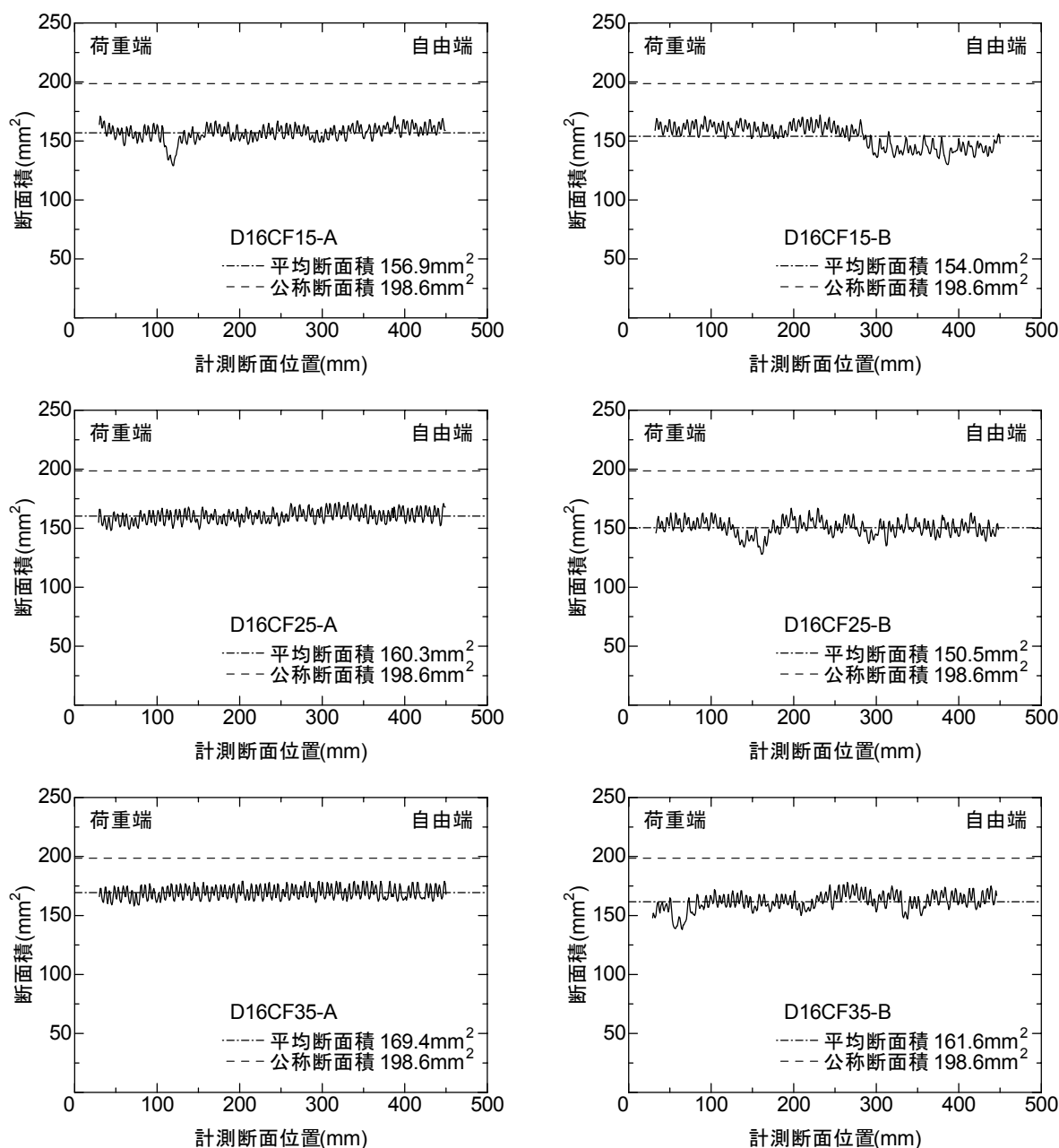
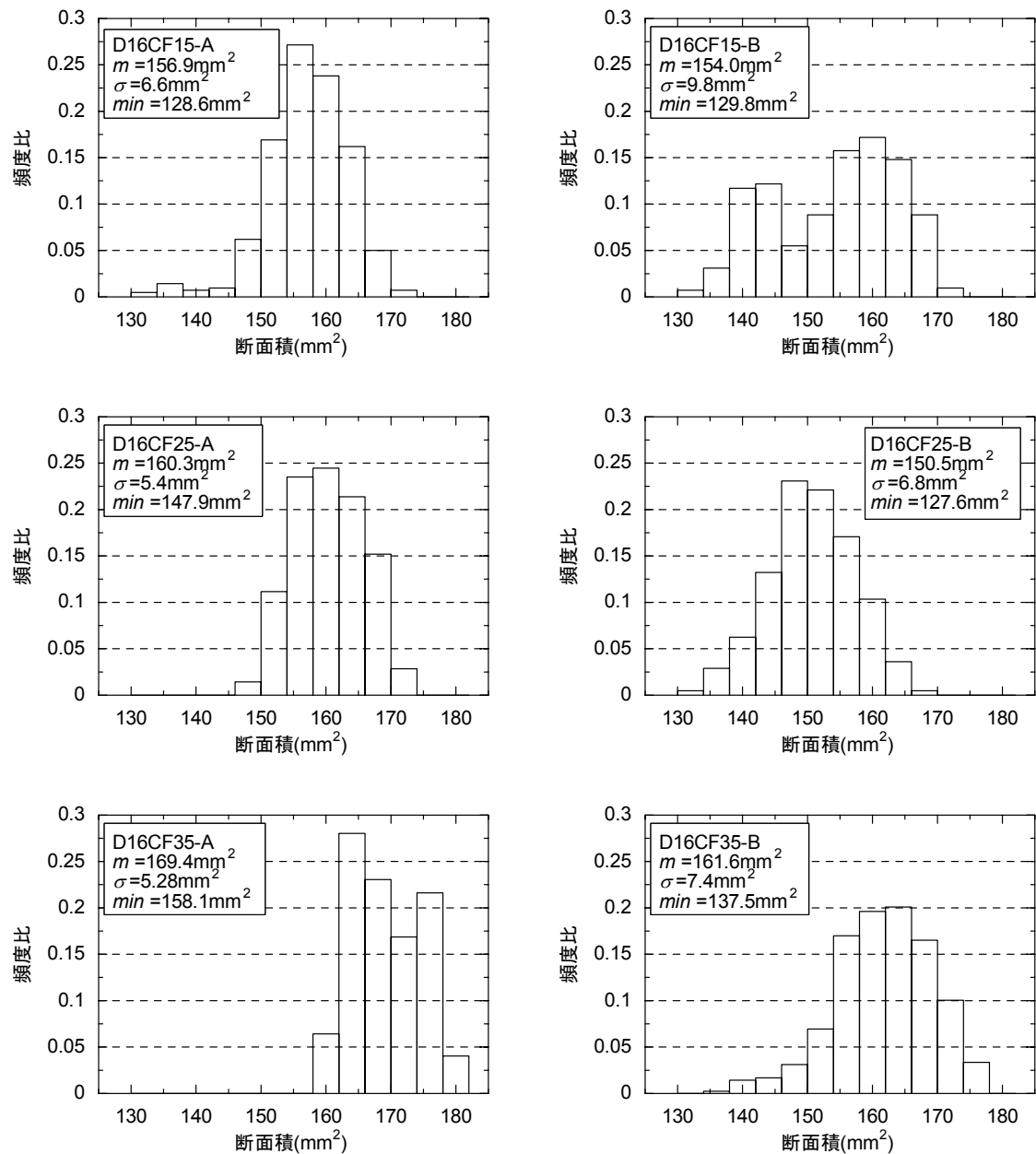


図 2-9 鉄筋の断面積の軸方向分布図

各試験体の断面積の度数のヒストグラム(計測断面数で基準化)を図 2-10 に示す。同じかぶり径比の試験体を比較すると、質量減少率が大きくなるほど、標準偏差が大きく、より小さい断面積の存在する割合が高くなることがわかる。同じ積算電流量の試験体を比較すると、ヒストグラムの形状は似ているが、かぶり径比が大きくなる程より大きい断面積の存在する割合が高くなる傾向がある。



m : 平均断面積、 σ : 標準偏差、 $\min$: 最小断面積

図 2-10 断面積のヒストグラム

2.4.3 RC 部材の内部損傷評価

試験体の切断位置を図 2-11 に示す。試験体は、写真 2-7 に示すダイヤモンドカッターにより付着長の 480mm を 48mm 間隔で 10 分割した。

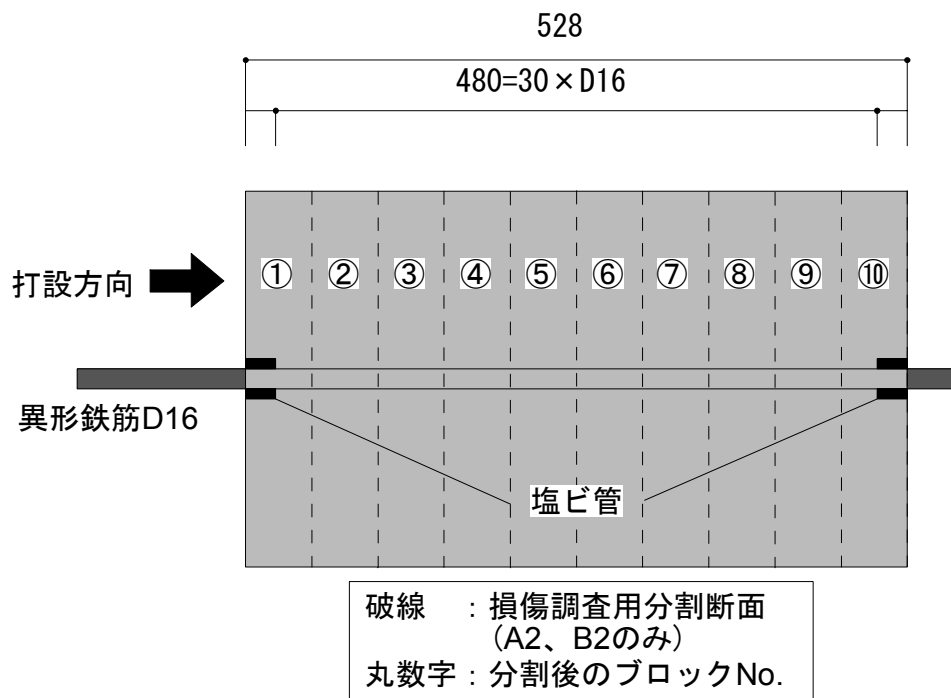


図 2-11 試験体の切断位置



写真 2-7 ダイヤモンドカッター

切断面の腐食ひび割れ状況を写真 2-8、写真 2-9 に示す。写真 2-8 よりかぶり径比 $C/\phi=1.5$ の試験体は $C/\phi=2.5$ 、 3.5 に比べ鉄筋腐食による割裂ひび割れが放射状に多数生じていることがわかる。 $C/\phi=2.5$ 、 3.5 の試験体については、両者に明確な差異が見られなかったが、質量減少率の増加に伴って鉄筋腐食による割裂ひび割れが進展し、コンクリートかぶりを貫通して試験体表面に達していることが確認できる。また、写真 2-9 より鉄筋軸方向におけるコンクリート損傷程度は、かぶりおよび切断位置によらず、すべての断面で同じような腐食による割裂ひび割れであることがわかる。

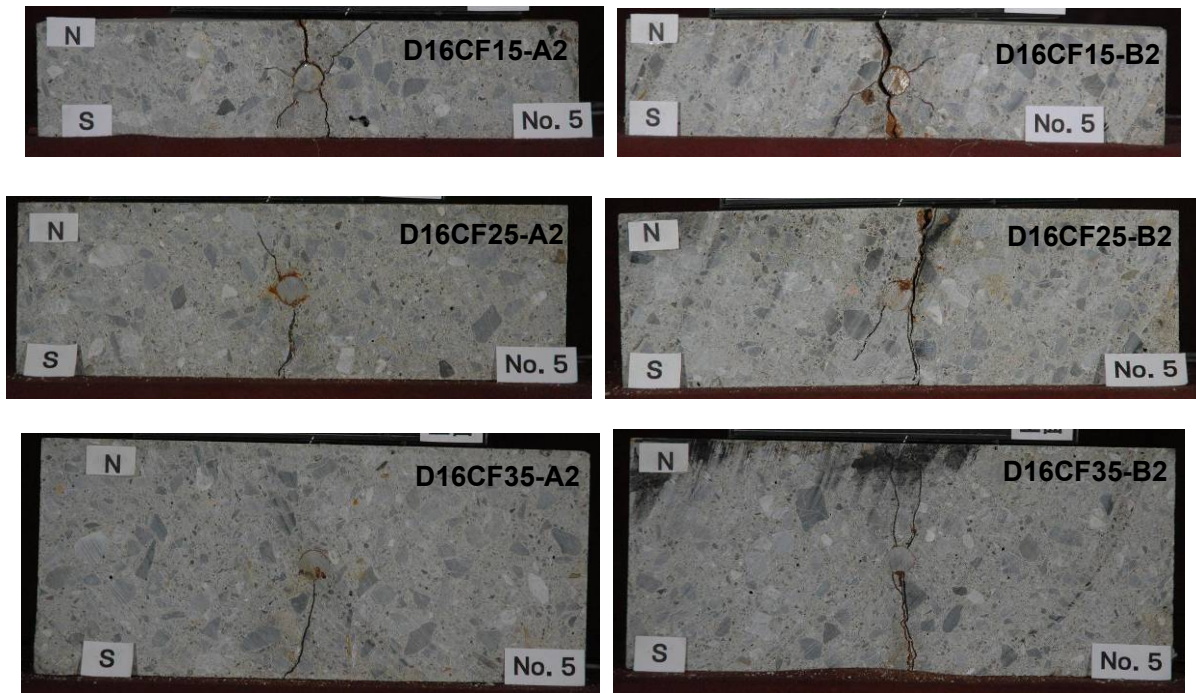


写真 2-8 各試験体の腐食ひび割れ状況

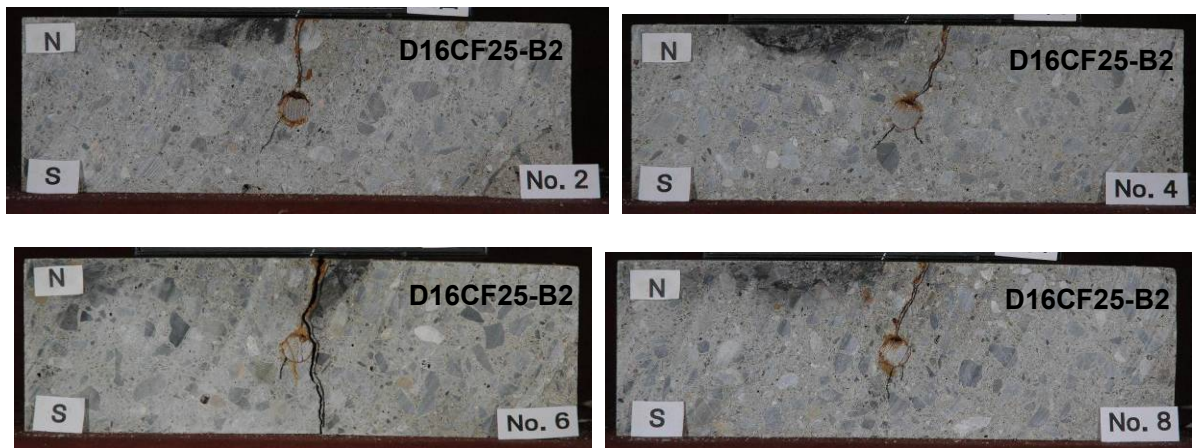


写真 2-9 D16CF25-B2 の腐食ひび割れ状況

さらに、コンクリート損傷評価の試験体と引抜試験を行った試験体を比較するために、引抜試験後の試験体を 5 分割して断面を観察した。写真 2-10 に代表的な試験体の断面を示す。腐食による割裂ひび割れの 1 本が引抜試験によって卓越し、ひび割れを拡大させて最終破壊に至った様子が伺える。

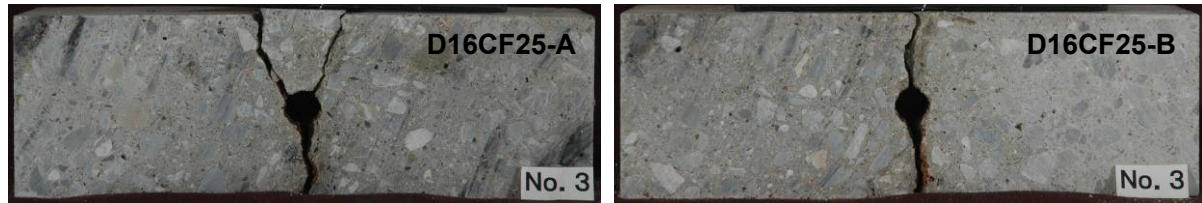


写真 2-10 引抜試験後の腐食ひび割れ状況

2.5 まとめ

腐食生成物によって生じるコンクリートの割裂ひび割れが付着性状に与える影響を検討するために、同じ条件の下作製した２体の試験体を用い、一方を腐食による割裂ひび割れの調査に、他方を鉄筋の引抜試験に充てる実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) 引抜試験により得られた最大付着応力は腐食量の増加に伴い小さくなり、その低下勾配はかぶりが大きいほど顕著であった。
- (2) 電食によって生じたコンクリートの表面ひび割れは、いずれの試験体においても片面のみ顕著に開口し、もう一方の面はかぶりの小さい試験体を除いてほとんど開口しないことを確認した。
- (3) コンクリート表面のひび割れ幅を測定した結果、腐食が進むとひび割れ幅の標準偏差が大きくなった。
- (4) 3D スキャナによって鉄筋の断面積を検討した結果、腐食が進むと激しい断面欠損が見られ、断面積の標準偏差が大きくなった。
- (5) RC 部材の内部損傷調査の結果、腐食による内部ひび割れや腐食生成物を確認した。内部ひび割れはコンクリートかぶりを貫通して、試験体表面に達していた。

第3章 腐食による割裂ひび割れの影響を除去した腐食鉄筋の付着性状

3.1 はじめに

前章の引抜試験では腐食による割裂ひび割れが拡大して破壊した試験体が多く見られた。そこで本章では、純粹に腐食鉄筋とコンクリートとの付着性状を検討することを目的として、電食後の試験体に切込みを入れることにより腐食割裂ひび割れの影響を除去した引抜試験を行った。加えて、腐食生成物によるプレストレス効果の及ぼす影響を評価するための足がかりを築くことを目的として、試験体外部から外力を与えた状態で引抜試験を行うことで、腐食生成物によるプレストレス効果や横補強筋による拘束効果を模擬した。

3.2 試験体

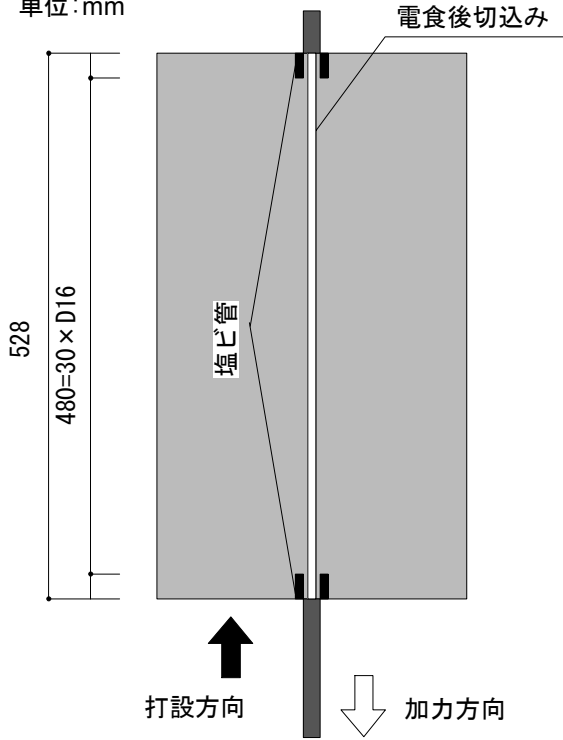
3.2.1 試験体概要

試験体形状を図 3-1 に示す。試験体は、断面幅 300mm のコンクリート平板の中心に異形鉄筋 D16(SD390)を 1 本埋め込んだものである。試験体の付着長は 480mm(鉄筋径の 30 倍)で、荷重端及び自由端には塩ビ管により 24mm(鉄筋径の 1.5 倍)の付着絶縁区間を設けた。なお、腐食試験体は写真 3-1 に示す方法で電食後、ダイヤモンドカッターにより切込みを入れ、コンクリートブロックを完全に分離した。また、腐食試験体との比較のために健全鉄筋を使用した試験体を作製した。この試験体においても断面中央部にスリットを設け、図中左右のコンクリートブロックを完全に分離した。いずれも割裂ひび割れの影響を除去し、横拘束力を主筋にのみ作用させるためである。

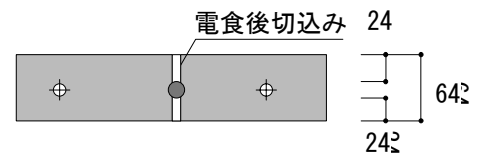
試験体一覧を表 3-1 に示す。変動因子はかぶり径比 C/ϕ 、鉄筋の腐食程度および横拘束応力とした。電食後切込みを入れるため、かぶり径比は腐食の状況を変化させるためのもので、加力実験には影響しない。鉄筋の腐食程度は、積算電流量の大小により 2 種類を設定した。電食量の小さい試験体は目標質量減少率を 7.5%とし、電食量の大きい試験体は目標質量減少率を 15%とした。表中の質量減少率は、加力試験終了後にはつり出した鉄筋を 10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬して除錆し、試験区間の質量減少量を健全時の質量で除して求めた値である。なお、試験体 CF25-N-1b は最大荷重直後に加力を終了し付着面を観察することとし、試験体 CF25-N-1c は横拘束力の軸方向分布への影響度を検討するため荷重端側の 2 個のオイルジャッキのみを用いて加力を行った。

【腐食鉄筋試験体】

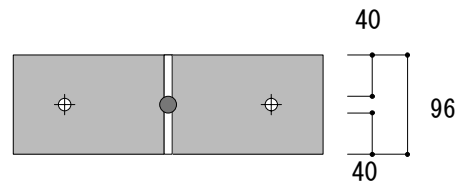
単位:mm



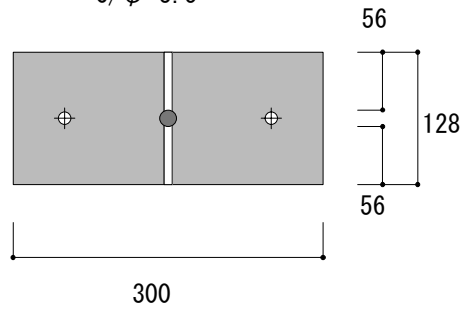
$C/\phi=1.5$



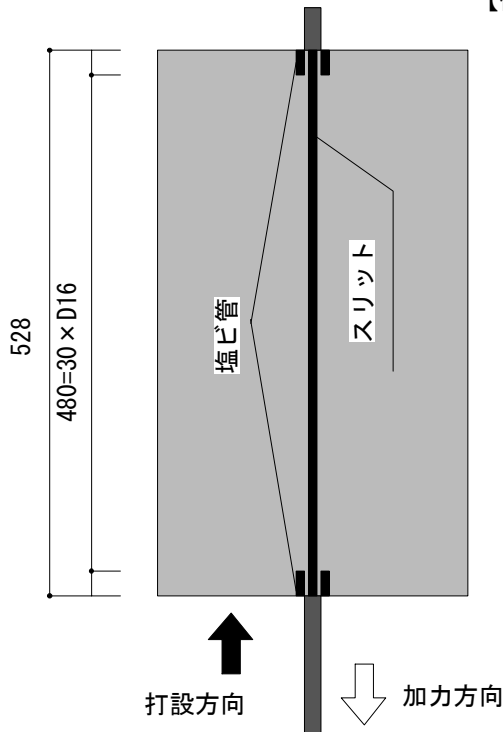
$C/\phi=2.5$



$C/\phi=3.5$



【健全鉄筋試験体】



$C/\phi=2.5$

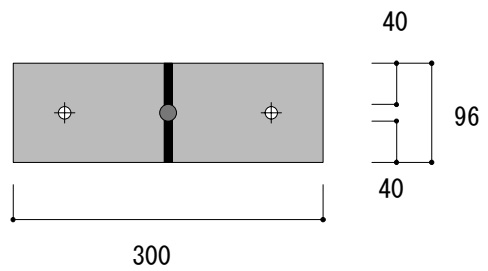


図 3-1 試験体形状



写真 3-1 切込みの様子

表 3-1 試験体一覧

試験体名称	かぶり C (mm)	横拘束応力 (N/mm ²)	積算電流量 (A・hr)	質量減少率(%)
CF15-A-0.5	24 (1.5φ)	0.5	73.3	11.8
CF15-A-1		1.0		12.1
CF15-A-2		2.0		10.9
CF15-B-0.5		0.5	146.6	19.2
CF15-B-1		1.0		19.3
CF15-B-2		2.0		20.2
CF25-A-0.5	40 (2.5φ)	0.5	73.3	9.7
CF25-A-1		1.0		10.3
CF25-A-2		2.0		9.5
CF25-B-0.5		0.5	146.6	16.9
CF25-B-1		1.0		17.0
CF25-B-2		2.0		16.0
CF25-N-0.5		0.5	0	0 (健全)
CF25-N-1a		1.0		
CF25-N-1b		1.0		
CF25-N-1c		1.0		
CF25-N-2		2.0		
CF35-A-0.5	56 (3.5φ)	0.5	73.3	8.9
CF35-A-1		1.0		7.6
CF35-A-2		2.0		8.0
CF35-B-0.5		0.5	146.6	15.3
CF35-B-1		1.0		14.7
CF35-B-2		2.0		11.2

3.2.2 使用材料

(1) コンクリート

コンクリート目標圧縮強度は 21N/mm^2 とした。粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を用いた。材料試験結果の力学特性を表 3-2 に示す。弾性係数 E_c は 1/3 割線係数とした。

表 3-2 コンクリートの力学特性

目標圧縮強度 (N/mm^2)	圧縮強度 σ_B (N/mm^2)	弾性整数 E_c (kN/mm^2)	割裂引張強度 σ_t (N/mm^2)
21	24.4	24.3	2.89

(2) 鉄筋

表 3-3 に鉄筋の引張試験結果を示す。

表 3-3 鉄筋の引張試験結果

規格	降伏強度(N/mm^2)	引張強度(N/mm^2)	弾性係数(kN/mm^2)
D16 (SD390)	442	663	192
	443	664	191
	440	667	187
平均	442	665	190

3.2.3 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。写真 3-2 に電食状況を示す。電流は直流安定化電源を用いて通電した。陽極を鉄筋、陰極を水槽の側面に設置した銅板に接続し、電解液には 3.0%の NaCl 水溶液を用いた。なお、電流の大きさは 0.24A とし、通電時間を変動させて腐食の程度を制御した。



写真 3-2 電食状況

電食後の試験体の様子を写真 3-3、電食終了後、鉄筋軸方向に沿って測定した試験体のひび割れ幅分布を図 3-2、図 3-3 に示す。なお、測定位置は打設面から 48mm 間隔で、クラックスケールにより測定した。写真 3-3 より、鉄筋軸方向に沿って 1 本の腐食ひび割れが生じ、腐食生成物が漏出している様子が確認できる。図 3-2 および図 3-3 より、コンクリート表面のひび割れはいずれの試験体も片面のみ顕著に開口し、他面はほとんど開口しなかった。また、かぶり径比 $C/\phi=1.5$ を除く試験体においては、質量減少率の小さい試験体に生じたひび割れは測定位置によらずほぼ一定であるが、質量減少率の増加に伴い表面ひび割れ幅にばらつきが生じていることがわかる。これらの状況は第 2 章の試験体と同様である。



写真 3-3 電食後の試験体の様子

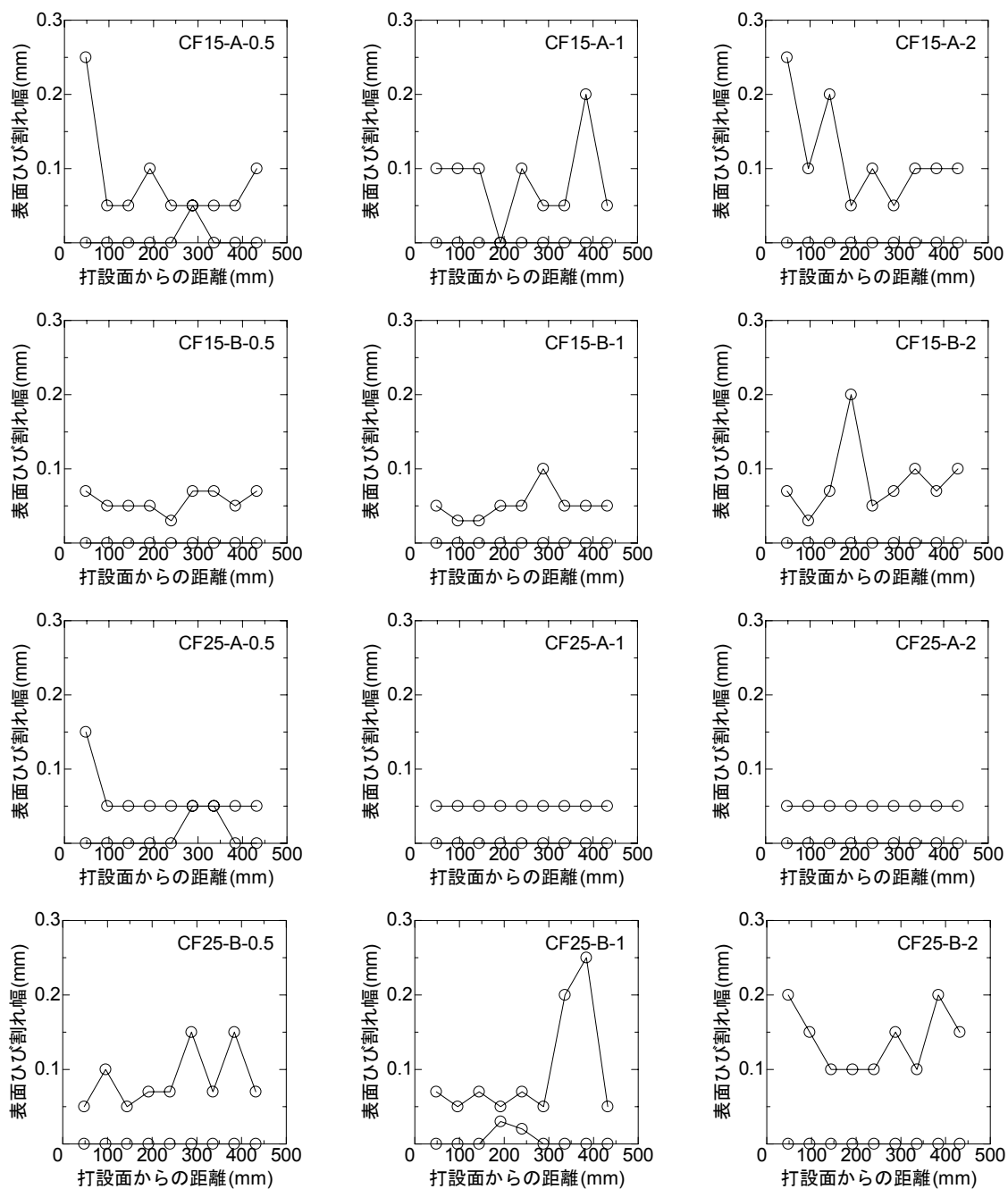


図 3-2 表面ひび割れ幅分布(かぶり径比が 1.5、2.5 の試験体)

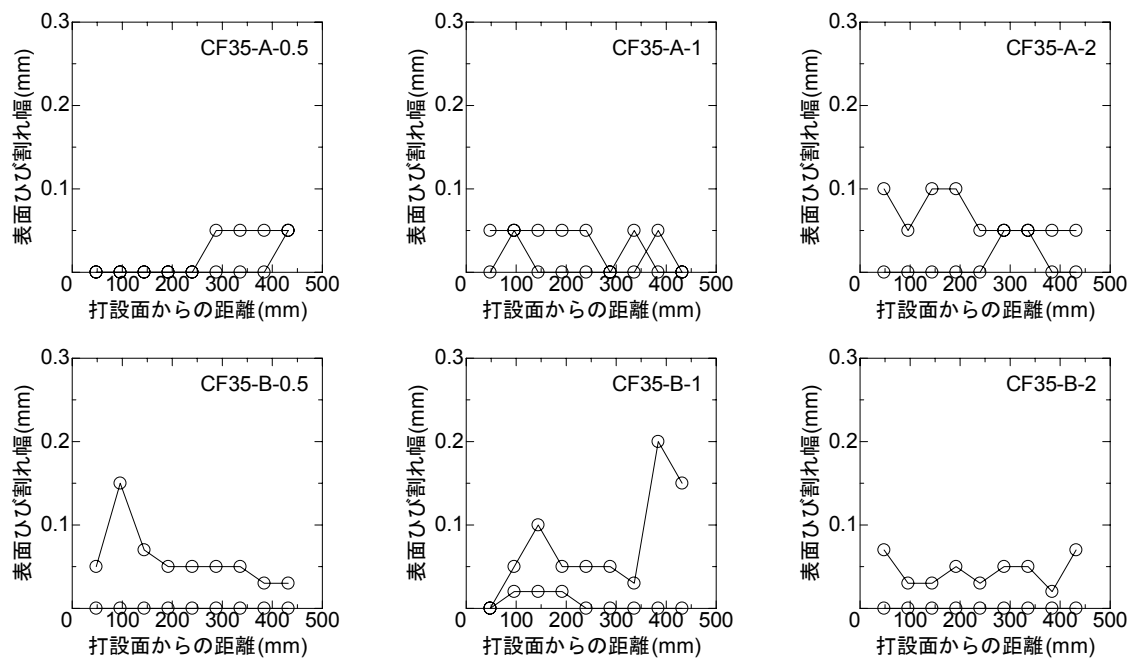


図 3-3 表面ひび割れ幅分布(かぶり径比が 3.5 の試験体)

3.3 実験方法

加力方法を図 3-4 に示す。引抜試験の加力は試験体のかぶりを拘束しないようかぶりと等しい寸法の孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、鉄筋を単調に引抜くことにより行う。横拘束力は 6 個のオイルジャッキによりコンクリートブロックに直接作用させ、加力中は目標値を一定に保つように制御する。横拘束力は目標とする横拘束応力に対して、下式により算出した。

$$P_l = \sigma_l \cdot d_b \cdot l_b \quad (1)$$

ここで、

P_l : 横拘束力

σ_l : 横拘束応力

d_b : 主筋径

l_b : 付着長

横拘束応力の目標値は健全試験体において 0.5N/mm^2 、 1N/mm^2 、 2N/mm^2 と増加させて加力を行い、鉄筋が降伏する応力までを目標値とした。結果として前記の 3 水準となった。

計測項目は主筋引張力、横拘束力、荷重端すべり量、自由端すべり量、横方向変位である。なお、荷重端側および自由端側の横方向変位は、南面および北面に 2 本ずつ計 4 本取り付けけた変位計により計測した。

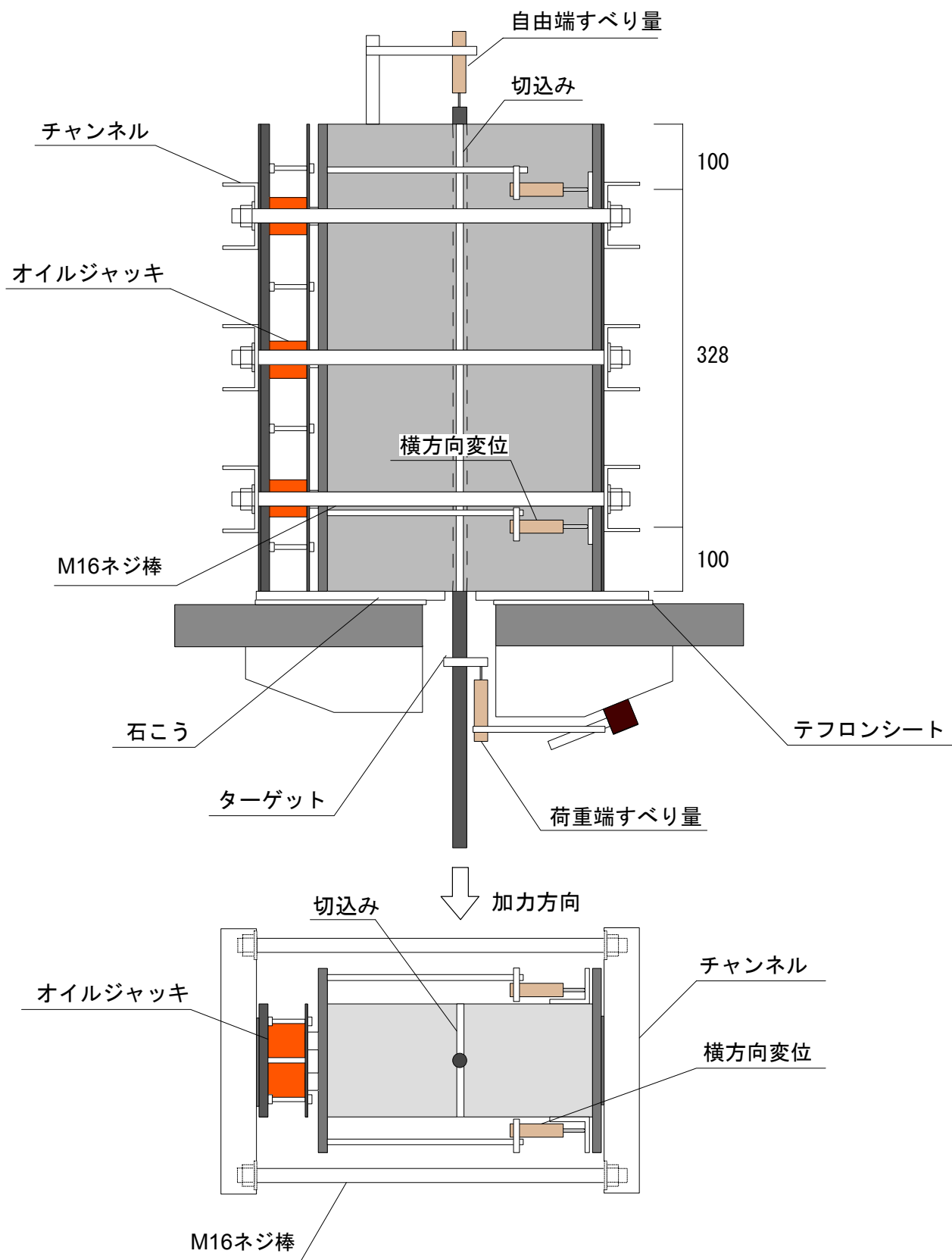


図 3-4 加力方法

3.4 実験結果と考察

表 3-4 に実験結果一覧を、図 3-5、図 3-6 に平均付着応力－すべり量関係を示す。平均付着応力は引張荷重を鉄筋の公称周長と付着長で除した値であり、荷重端すべり量は変位計計測値から試験区間外での鉄筋の伸びを除いた値である。なお、CF35-A-1 の自由端すべり量は実験時の不備により計測できていない。

試験体 CF25-N-2、CF35-A-0.5、CF35-A-1、CF35-A-2、CF35-B-2 は鉄筋の降伏、それ以外の試験体は鉄筋の引き抜けで試験を終了した。CF25-A-2 と CF25-B-2 を除き、同一の横拘束力下では質量減少率が大きくなる程、最大付着応力が減少する結果を得た。また、CF25-A-1 の最大付着応力が CF25-N-1a の最大付着応力を上回っており、腐食試験体の最大付着応力が健全試験体の最大付着応力よりも大きくなる場合もある。すべり量が 10mm 付近で再度平均付着応力が増大している試験体が見られるが、鉄筋の節間隔が 10mm であることから、前の節とコンクリートの凸部との噛み合いにより増大していると考えられる。健全試験体においては最大荷重後急激に荷重が低下するのに対して、腐食試験体は緩やかに荷重が低下し、質量減少率が増加する程その特徴が顕著になることを確認した。これは、コンクリートとの間に形成された腐食生成物と鉄筋の節部の噛み合い作用によると考えられる。荷重端すべり量は平均付着応力の増加に伴い増加しているのに対して、自由端すべり量は最大荷重までほとんど変化なく、最大荷重後に急激に増加していることがわかる。

表 3-4 実験結果一覧

試験体名称	最大荷重時			鉄筋の 降伏の有無	質量減少率(%)
	荷重 (kN)	付着応力 (N/mm ²)	荷重端すべり量 (mm)		
CF15-A-0.5	71.56	2.97	2.28	無	11.8
CF15-A-1	66.05	2.74	1.65	無	12.1
CF15-A-2	82.15	3.40	2.75	無	10.9
CF15-B-0.5	63.42	2.63	2.31	無	19.2
CF15-B-1	62.06	2.57	3.20	無	19.3
CF15-B-2	74.54	3.09	2.90	無	20.2
CF25-A-0.5	59.77	2.48	1.85	無	9.7
CF25-A-1	72.60	3.01	1.62	無	10.3
CF25-A-2	80.28	3.33	1.31	無	9.5
CF25-B-0.5	45.95	1.90	1.29	無	16.9
CF25-B-1	59.36	2.46	1.67	無	17.0
CF25-B-2	84.39	3.50	2.72	無	16.0
CF25-N-0.5	73.79	3.06	2.88	無	—
CF25-N-1a	69.59	2.88	1.31	無	
CF25-N-1b	70.33	2.91	1.60	無	
CF25-N-1c	56.38	2.34	1.07	無	
CF25-N-2	93.15	3.86	4.98	有	
CF35-A-0.5	98.78	4.09	9.39	有	8.9
CF35-A-1	93.50	3.88	5.93	有	7.6
CF35-A-2	107.36	4.50	13.85	有	8.0
CF35-B-0.5	61.52	2.55	1.53	無	15.3
CF35-B-1	60.33	2.50	1.47	無	14.7
CF35-B-2	100.67	4.17	11.89	有	11.2

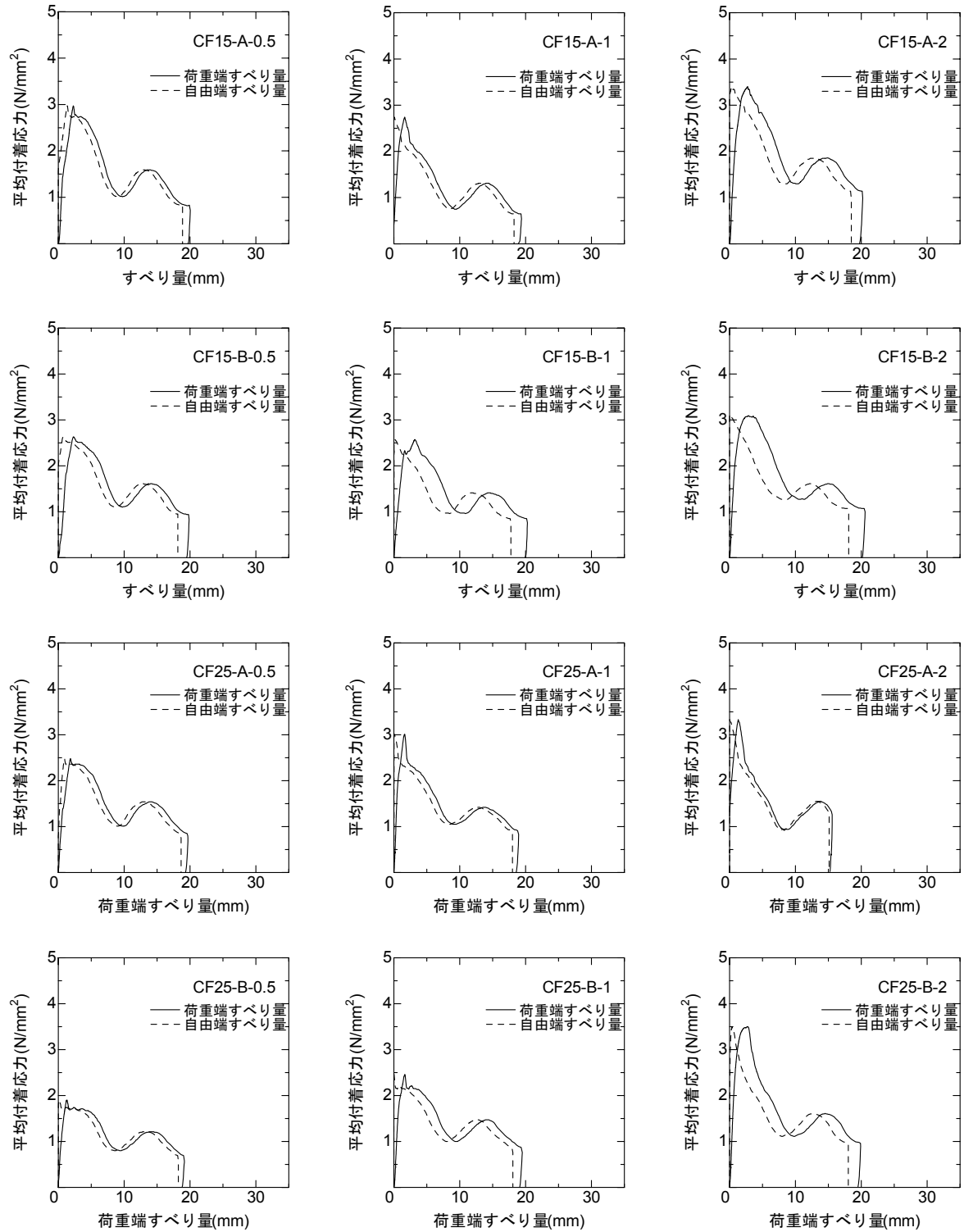


図 3-5 平均付着応力ーすべり量関係(かぶり径比 1.5、2.5 の試験体)

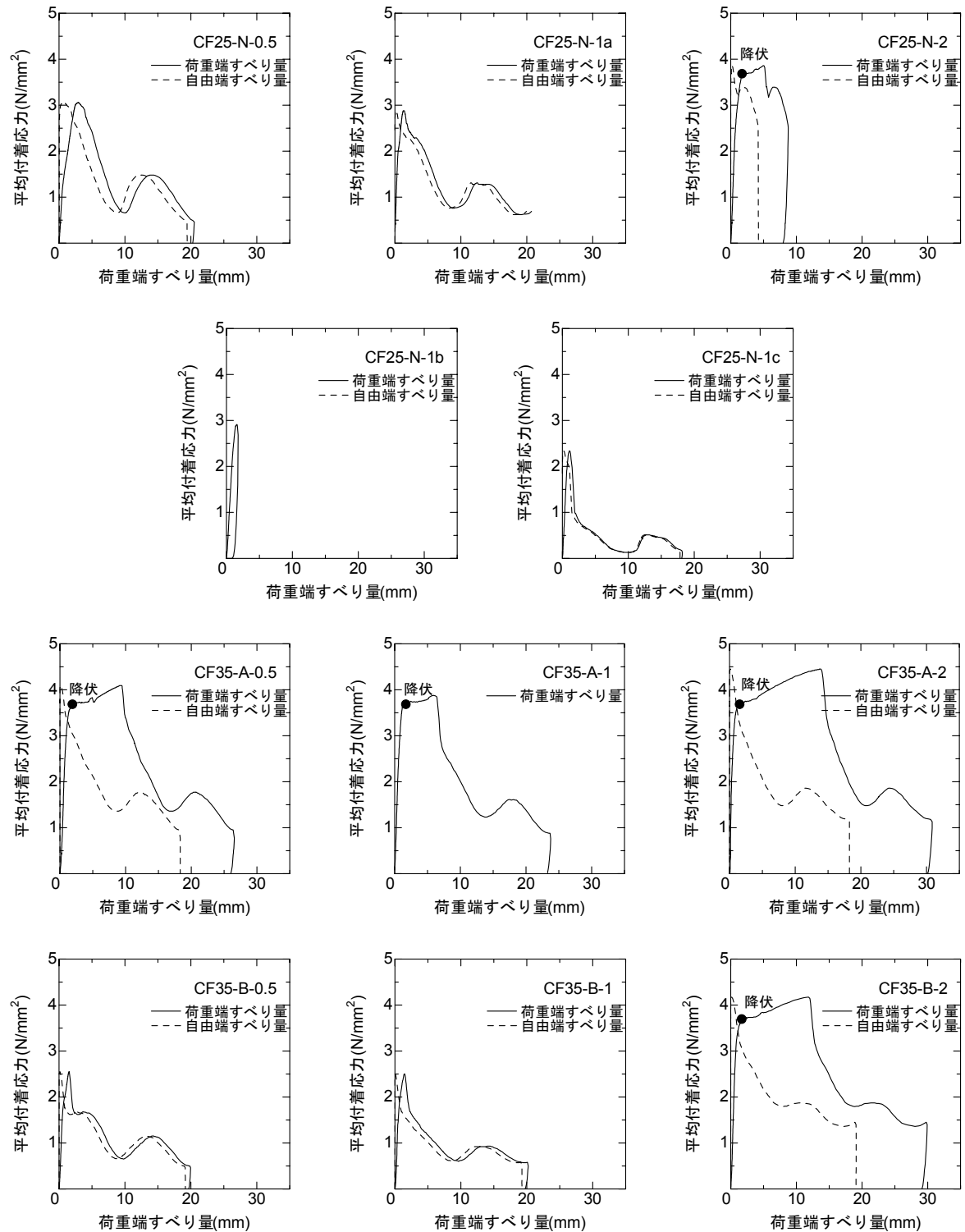


図 3-6 平均付着応力-すべり量関係(健全試験体、かぶり径比 3.5 の試験体)

図 3-7、図 3-8 に平均付着応力－横方向変位関係を示す。最大荷重までは、同一の平均付着応力において、荷重端の横方向変位が自由端の横方向変位より大きいことを確認した。CF25-N-1a と CF25-N-1c を比較すると、CF25-N-1a は最大荷重まで自由端変位がほぼ一定であることから、オイルジャッキによる横拘束力が横方向変位を拘束している様子が伺える。また、最大付着応力が 2 割程減少していることから、横拘束力が軸方向全域に作用することで付着応力が増加すると考えられる。

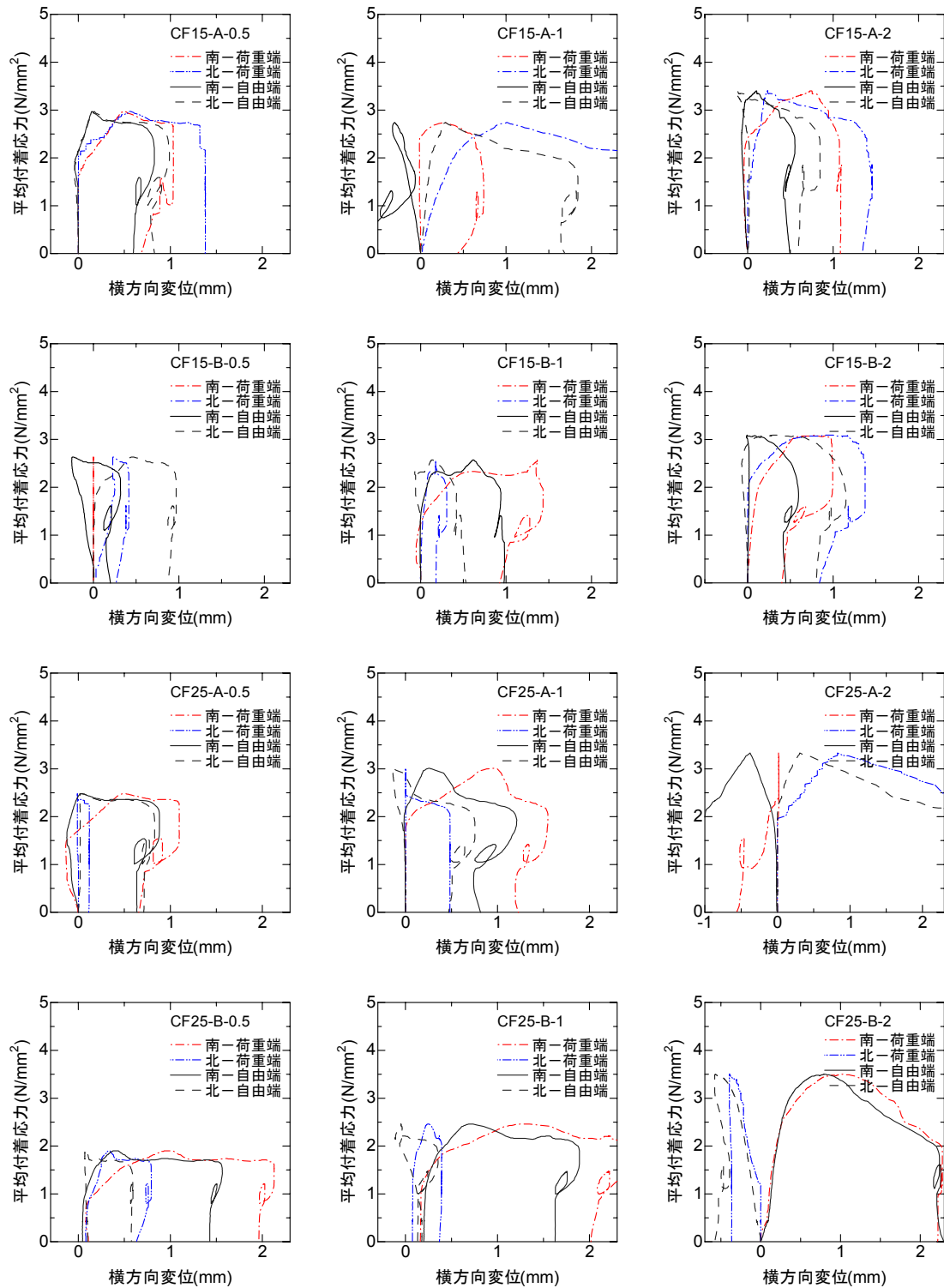


図 3-7 平均付着応力－横方向変位関係(かぶり径比 1.5、2.5 の試験体)

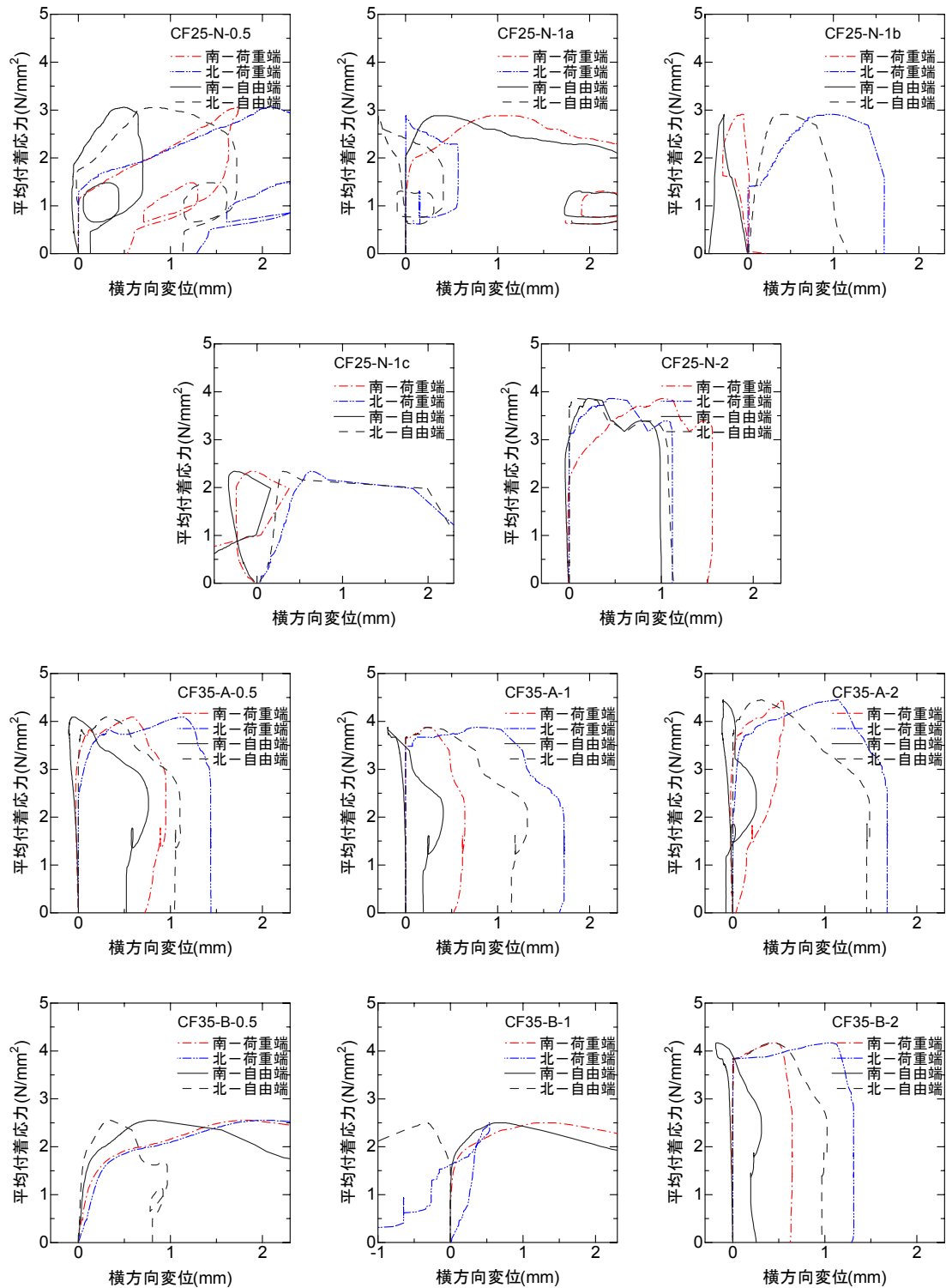


図 3-8 平均付着応力－横方向変位関係(健全試験体、かぶり径比 3.5 の試験体)

写真 3-4 に試験体 CF25-A-1、CF25-N-1a、CF25-N-1b の引抜試験後の破壊状況を示す。節間コンクリートが損傷を受けて削り取られているが、CF25-N-1b の節間コンクリートが損傷をほとんど受けていないことから、最大荷重後のすべり量が増大する際にコンクリートは損傷を受けたと考えられる。この性状は、鉄筋腐食の有無に影響されないと考えられる。



写真 3-4 引抜試験後の試験体の破壊状況
(上 : CF25-A-1、中 : CF25-N-1a、下 : CF25-N-1b)

図 3-9 に最大付着応力－拘束応力関係を、図 3-10 に最大荷重時の荷重端すべり量－拘束応力関係を、図 3-11 に最大付着応力－質量減少率関係を示す。なお、鉄筋が降伏した試験体はプロットしていない。図 3-11 において、各々の横拘束応力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。

図 3-9 より、拘束応力が大きくなると最大付着応力が増大する傾向が伺える。また、かぶり径比の影響は少ないといえる。

図 3-10 からかぶり径比 $C/\phi=1.5$ の試験体は拘束応力と荷重端すべり量に相関がないことがわかる。CF25-B の試験体は拘束応力が大きくなると荷重端すべり量が大きくなるが、CF25-A、CF35-B、CF25-N の試験体については拘束応力の増加とともに荷重端すべり量が減少しているのがわかる。以上から、かぶり径比や腐食の程度によらず最大荷重時の荷重端すべり量は、拘束応力に大きな影響は受けていないと言える。

図 3-11 より、質量減少率の増加に伴い最大付着応力が減少しているのがわかる。また、すべての横拘束応力下においてかぶり径比の違いによる腐食状況の差異が最大付着応力に及ぼす影響はないと考えられる。

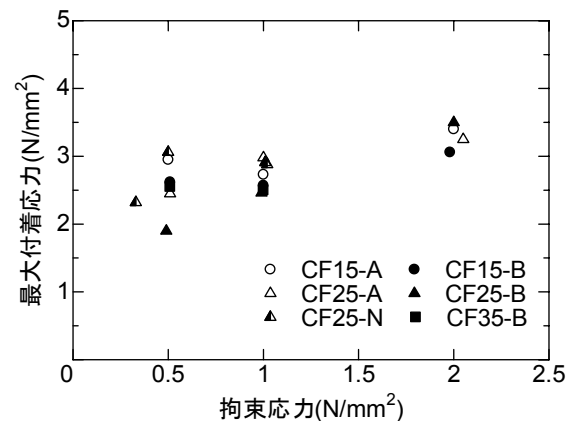


図 3-9 最大付着応力－拘束応力関係

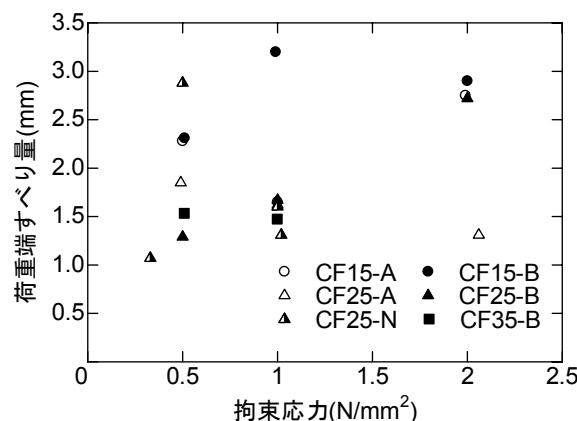


図 3-10 最大荷重時の荷重端すべり量－拘束応力関係

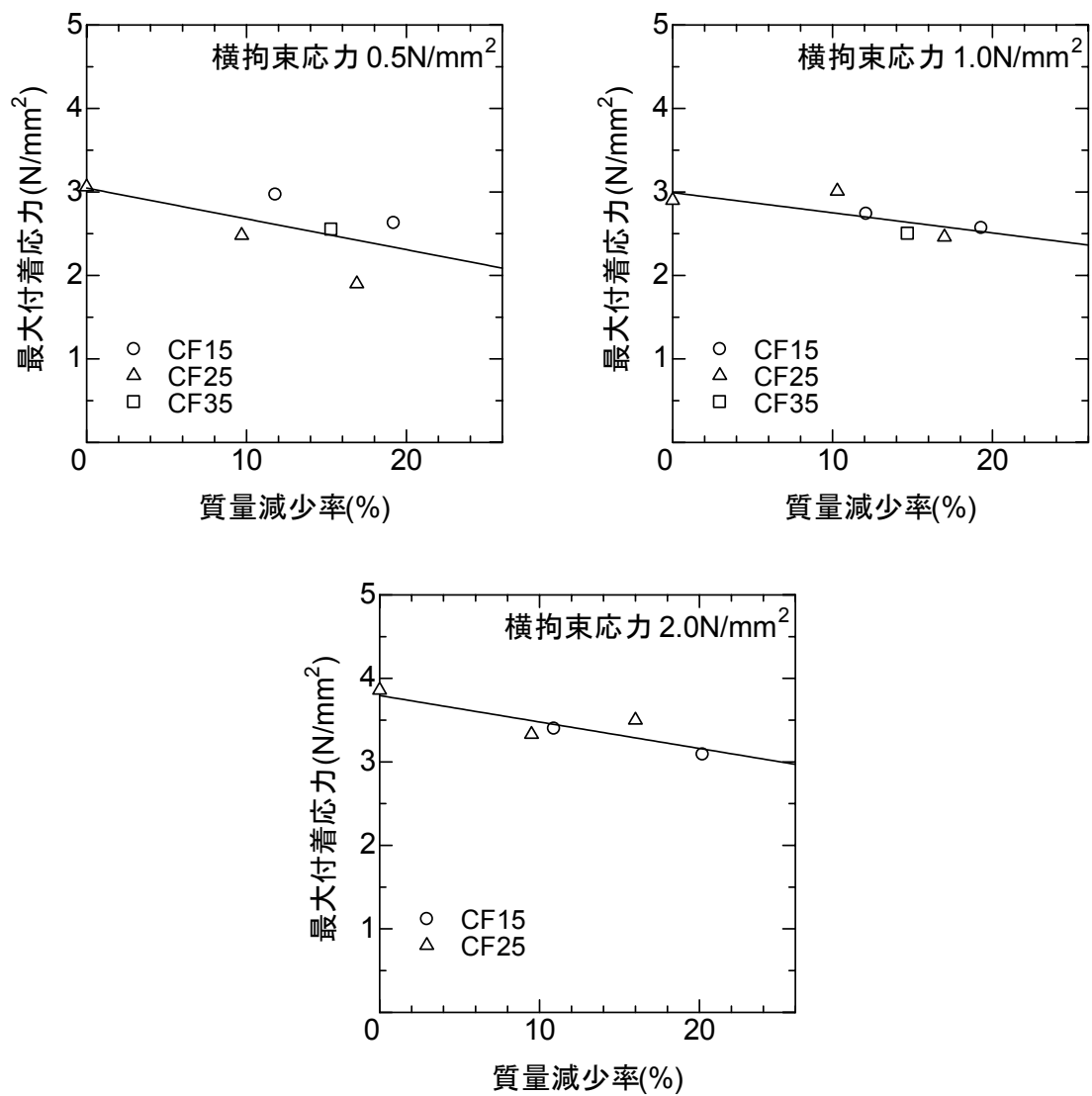


図 3-11 最大付着応力－質量減少率関係

図 3-11 において最大付着応力に対するかぶり径比の影響はないと考え、最大付着応力を健全試験体の結果で基準化したグラフを図 3-12 に示す。なお、横拘束応力 0.5N/mm^2 の試験体については CF25-N-0.5 の、横拘束応力 1N/mm^2 の試験体については CF25-N-1a と CF25-N-1b の平均値を、横拘束応力 2N/mm^2 の試験体については CF25-N-2 の最大付着応力で基準化した。鉄筋が降伏した試験体はプロットしていない。右下のグラフは第 2 章の図 2-5 を再掲したものである。横拘束応力 0.5N/mm^2 の試験体に比べ横拘束応力 1N/mm^2 、横拘束応力 2N/mm^2 の試験体は質量減少率に対する最大付着応力の低下勾配が小さいことがわかる。また、いずれの横拘束応力下においても第 2 章で示した低下勾配よりも小さいことがわかる。よって、腐食による割裂ひび割れの発生が最大付着応力の大きな低下を招くと考えられる。また、腐食した場合でも腐食によるプレストレス効果や横補強筋等の横補強筋によって横拘束力が作用する場合には、腐食による最大付着応力の低下は小さいと考えられる。

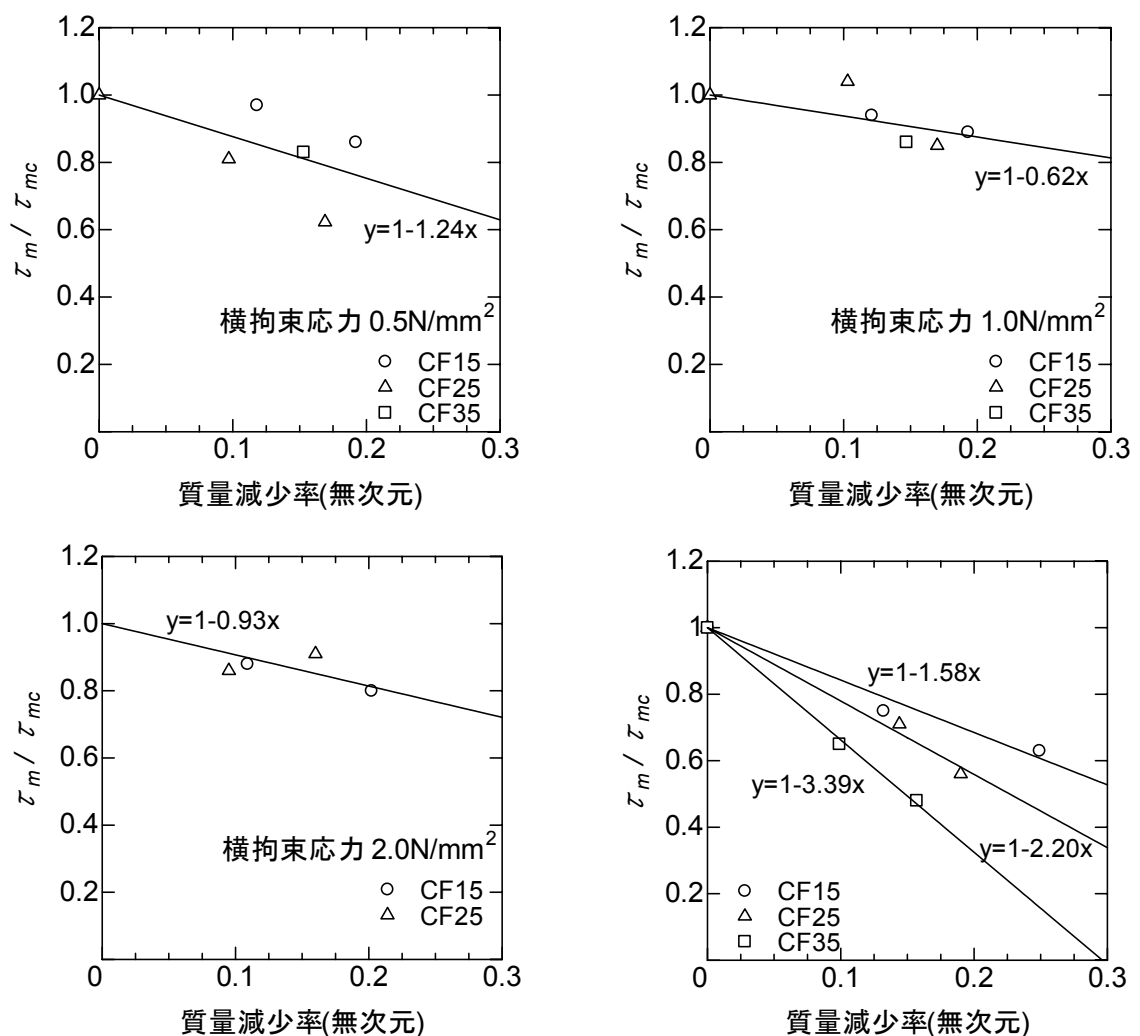


図 3-12 基準化最大付着応力－質量減少率関係

3.5 鉄筋の腐食状況の評価

鉄筋の腐食状況を検討するために、腐食後の鉄筋の形状を 3D スキャナにより計測した。なお、計測方法については 2 章と同様である。

図 3-13 から図 3-15 に 3D スキャナにより求めた鉄筋断面積の軸方向分布を示す。計測区間は試験体長さの 528mm である。質量減少率の小さい試験体の鉄筋は、節と腹の部分が区別でき、かぶり径比が大きくなるほど明瞭に区別することができる。質量減少率の大きい試験体の鉄筋については、激しい断面欠損が見られ、かぶり径比の小さい試験体ほどその傾向が顕著であることがわかる。これらの傾向は 2 章の結果と同様であるが、前節で述べたようにかぶり径比の違いによる腐食状況の差異は必ずしも最大付着応力に影響するとは限らない。

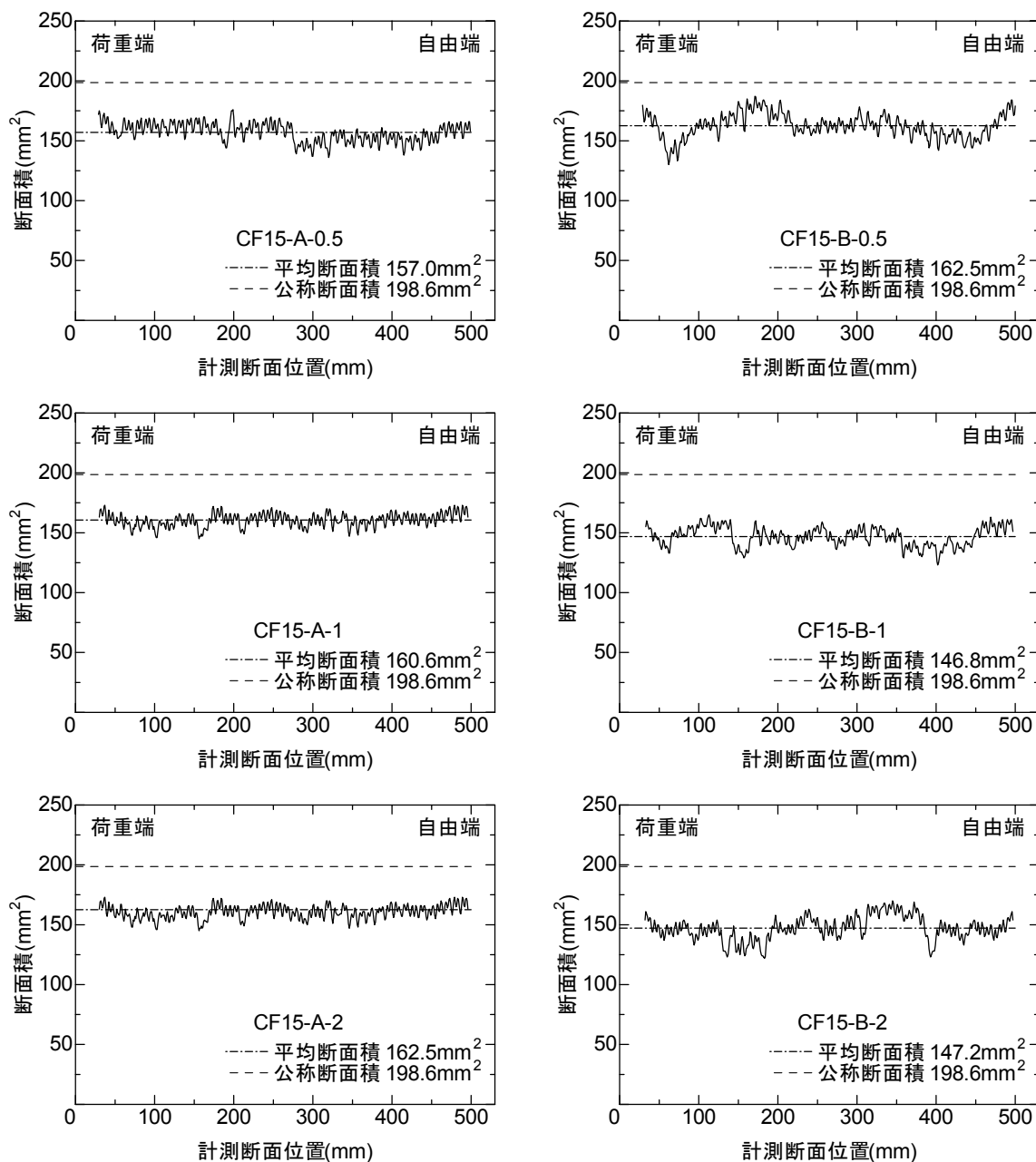


図 3-13 鉄筋の断面積の軸方向分布図(かぶり径比が 1.5 の試験体)

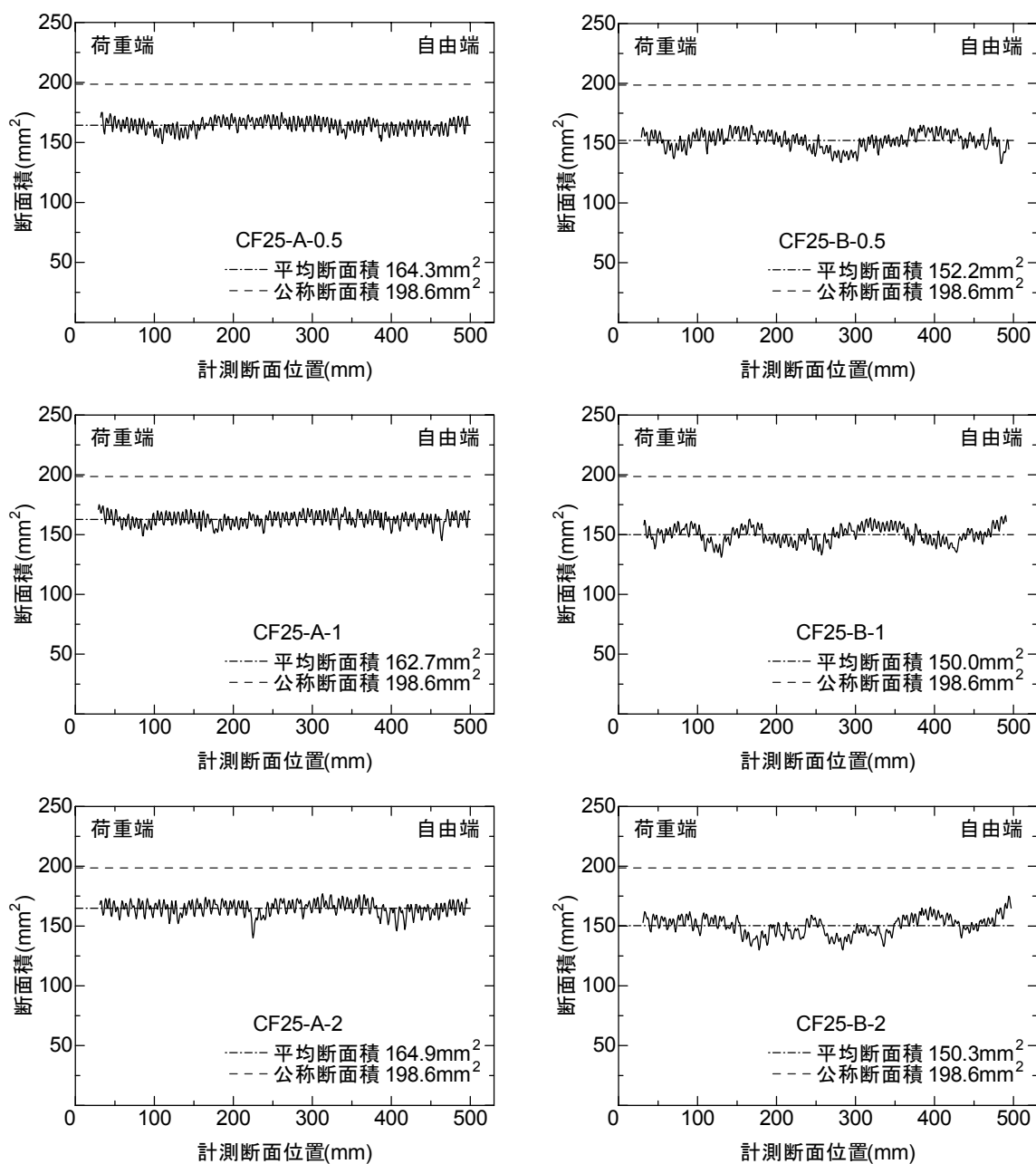


図 3-14 鉄筋の断面積の軸方向分布図(かぶり径比が 2.5 の試験体)

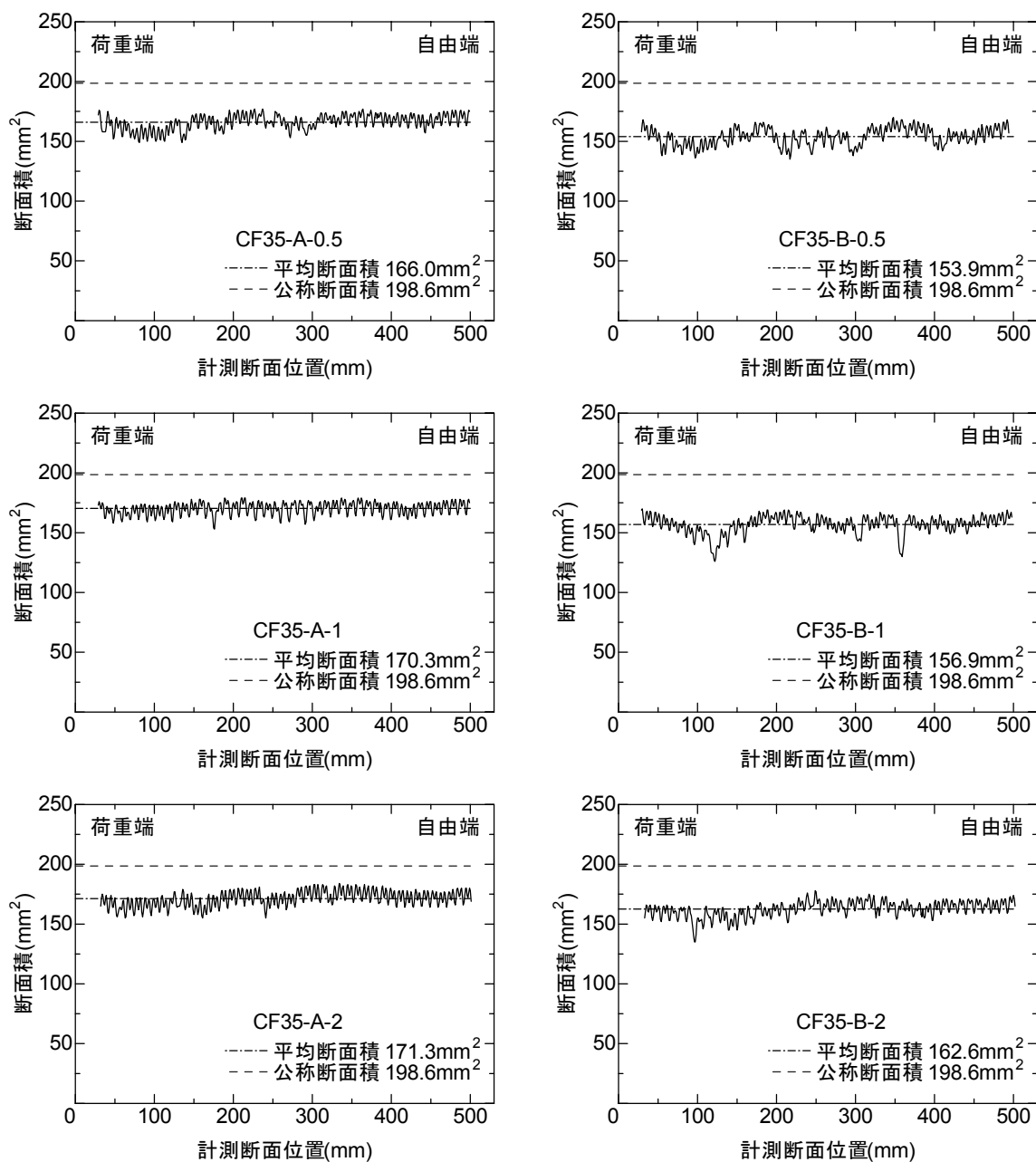


図 3-15 鉄筋の断面積の軸方向分布図(かぶり径比が 3.5 の試験体)

図 3-16 から図 3-18 に各試験体の断面積の度数のヒストグラム(計測断面数で基準化)を示す。同じ積算電流量の試験体を比較すると、かぶり径比が大きくなるほど、標準偏差が小さくなることがわかる。同じかぶり径比の試験体については、質量減少率が大きくなるほど、標準偏差が大きく、より小さい断面積の存在する割合が高くなることがわかる。

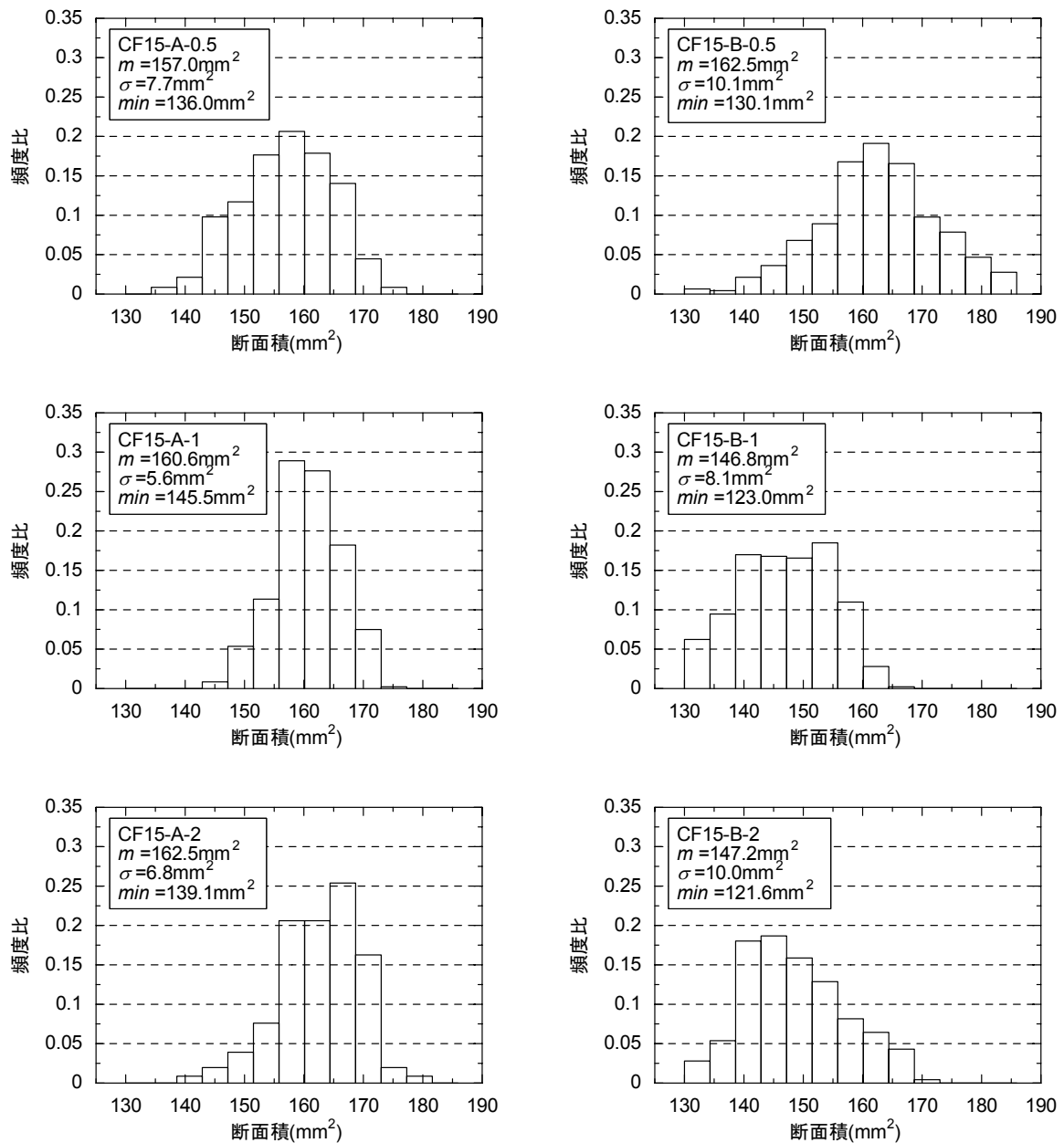


図 3-16 断面積のヒストグラム(かぶり径比が 1.5 の試験体)

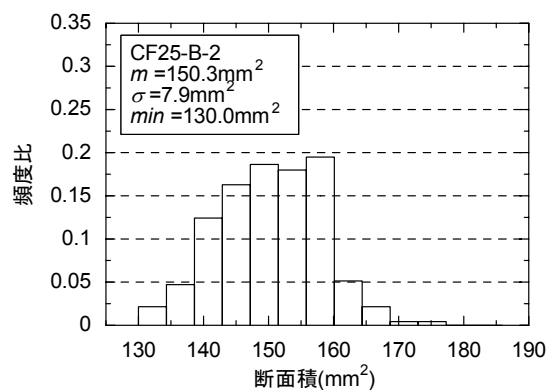
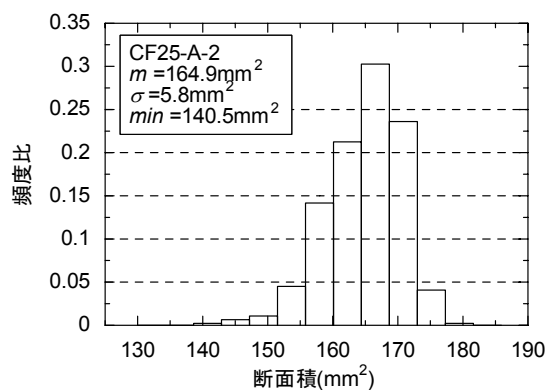
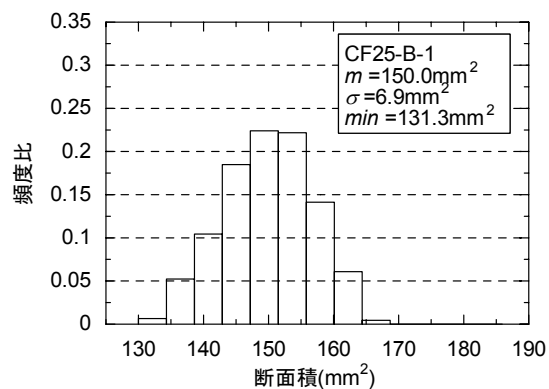
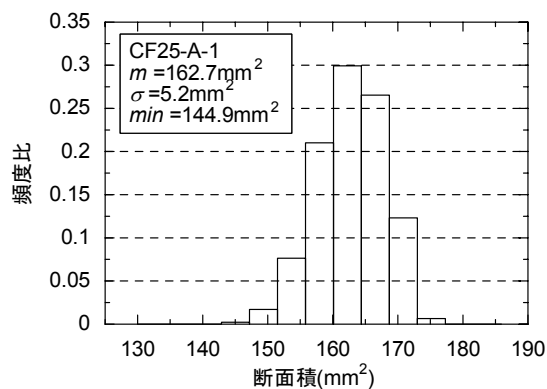
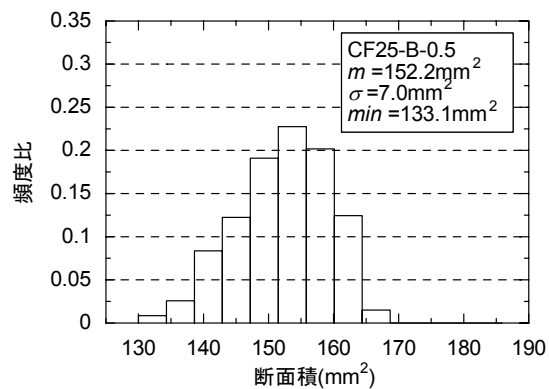
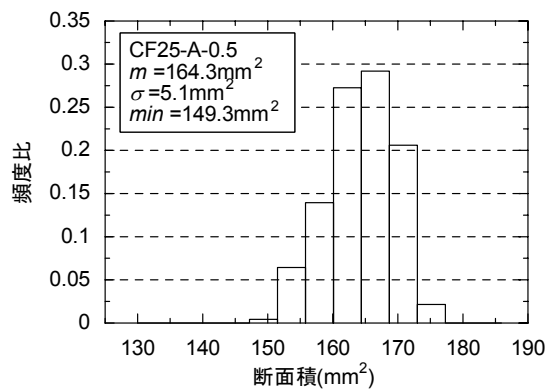
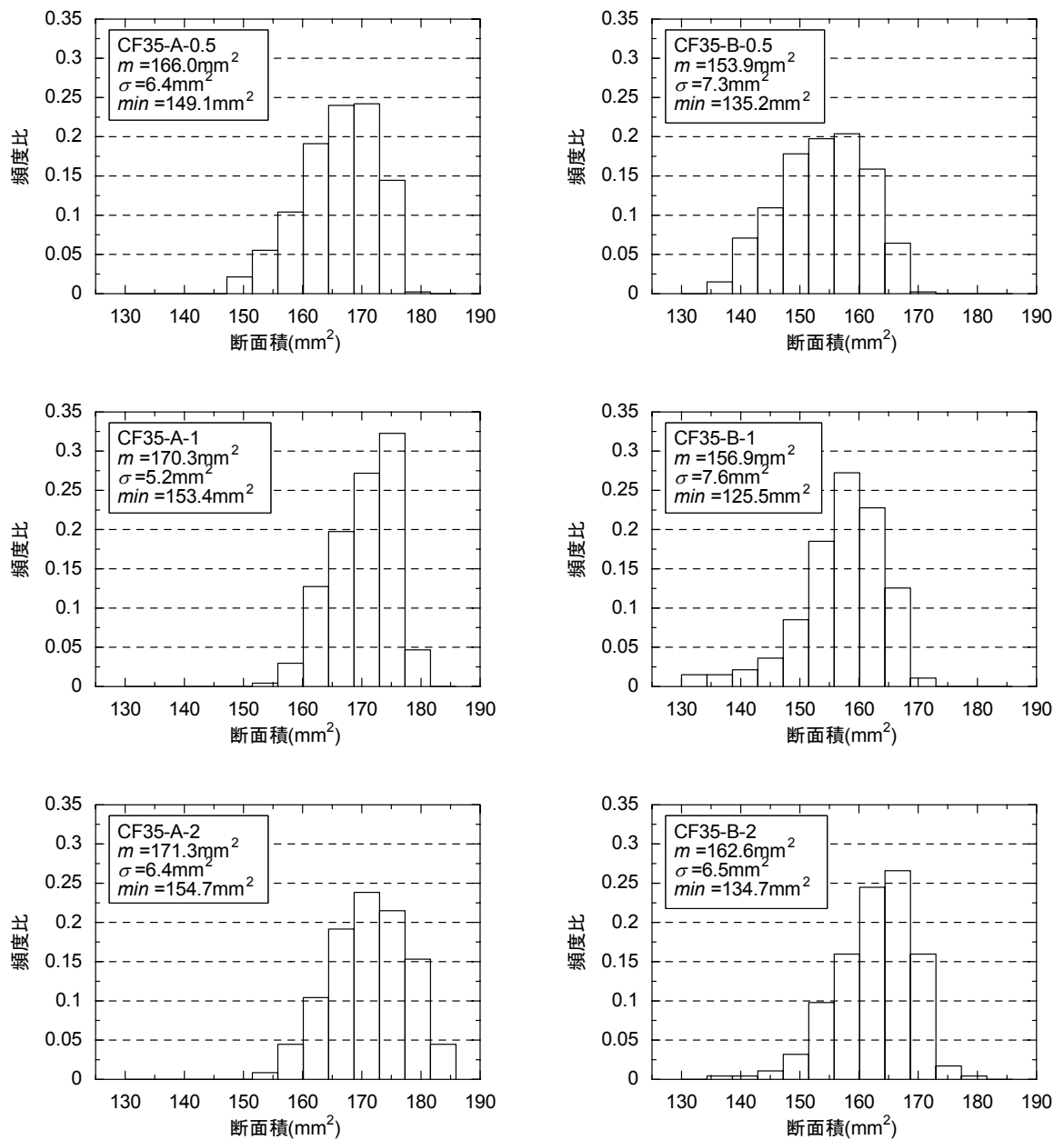


図 3-17 断面積のヒストグラム(かぶり径比が 2.5 の試験体)



m : 平均断面積、 σ : 標準偏差、 min : 最小断面積、

図 3-18 断面積のヒストグラム(かぶり径比が 3.5 の試験体)

3.6 まとめ

試験体に切込みを入れることにより腐食割裂ひび割れの影響を除去した引抜試験を行った。また、試験体外部から外力を与えた状態で引抜試験を行うことで、腐食生成物によるプレストレス効果や横補強筋による拘束効果を模擬した。この実験により、以下の知見を得た。

- (1) 腐食した場合も横拘束力が大きくなると最大付着応力が増加する。
- (2) かぶり径比の違いによる腐食状況の差異が最大付着応力に及ぼす影響は小さい。
- (3) 質量減少率に対する最大付着応力の低下勾配は、割裂ひび割れが発生する場合と比較して緩やかである。

第4章 結 論

腐食した RC 部材の付着割裂性状について、第 2 章では同じ条件の下作製した 2 体の試験体を用い、一方を腐食による割裂ひび割れの調査に、他方を鉄筋の引抜試験に充てることによって、鉄筋の腐食が付着性状に及ぼす影響を検討した。電食後の試験体の腐食割裂ひび割れは、いずれも片面のみ顕著に開口し、もう一方の面はかぶりの小さい試験体を除いてほとんど開口しないことを確認した。腐食が進むとコンクリート表面に生じる腐食割裂ひび割れ幅及び鉄筋の断面積の標準偏差が大きくなった。引抜試験によって得られた最大付着応力は腐食量の増加に伴い小さくなり、その低下勾配はかぶりが大きいほど顕著であった。

第 3 章では、第 2 章により電食後の腐食割裂ひび割れが付着性状に影響を及ぼすと考えられたので、試験体に切込みを入れることにより腐食割裂ひび割れの影響を除去した引抜試験を行った。また、試験体外部から外力を与えた状態で引抜試験を行うことで、腐食生成物によるプレストレス効果や横補強筋による拘束効果を模擬した。引抜試験では、腐食した試験体の最大付着応力が健全試験体の最大付着応力を上回る試験体も見られた。腐食した場合においても横拘束力が大きくなると最大付着応力が増加した。かぶり径比の違いによる腐食状況の差異が最大付着応力に及ぼす影響は小さい。質量減少率に対する最大付着応力の低下勾配は、割裂ひび割れが発生する場合と比較して緩やかであった。よって、腐食による割裂ひび割れの発生が最大付着応力の大きな低下を招くと考えられる。また、腐食した場合でも腐食によるプレストレス効果や横補強筋等の横補強筋によって横拘束力が作用する場合には、腐食による最大付着応力の低下は小さいと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集 E，Vol.62 No.3，542-554，2006.8
- 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，1998.10
- 3) 斎藤祐哉：鉄筋が腐食した RC 部材の構造性能に関する研究，筑波大学修士論文，2008.3
- 4) 田森清美，丸山久一，小田川昌史，橋本親典：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，10-2，1988
- 5) 大屋戸理明，金久保利之，山本泰彦，飯島亨：実構造物の調査結果に基づく腐食鉄筋の力学性状の評価，土木学会論文集 E，Vol.63 No.1，143-155，2007.3

謝 辞

本論文を作成するにあたり、研究計画、実験、論文の推敲等終始温かくご指導、ご鞭撻を頂きました筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻准教授 金久保利之先生に心より感謝致します。

財団法人鉄道総合技術研究所 大屋戸理明氏には研究の計画や実験器具の提供、実験、考察等全ての面においてアドバイス・ご協力頂き、土木学会でも大変お世話になりましたことを深く感謝致します。

筑波大学システム情報工学等支援室技術専門職員 小島篤志氏には試験体の作製から実験遂行にあたるまで終始ご協力頂きましたことを深く感謝致します。筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻助教 八十島章先生には研究計画や実験におけるアドバイス、土木学会への投稿論文の推敲等でお世話になりましたことを深く感謝致します。

アルファエンジニアワークス 海老沢伸二氏には第 2 章での試験体の作製や電食、実験準備においてお世話になりましたことを感謝致します。

金久保研究室博士前期課程 2 年鬼塚由佳氏、平野雄大氏、保坂剛氏とは楽しい研究室生活を送り、授業や就職活動等においても苦労を分かち合いました。互いに切磋琢磨した同期の友人として深く感謝致します。金久保研究室博士前期課程 1 年浅野浩平氏、麻生高行氏、重水法弘氏、田中慎冶氏、張偉氏、大学 4 年の池村清志氏、岩見綾花氏、矢野正剛氏、研究生の張軍雷氏、方民航氏には研究室での楽しい会話やバーベキュー、飲み会等明るく有意義な研究生活を送ることができ感謝致します。元金久保研究室で楽しい研究生活を提供して頂いた斎藤祐哉氏、福原哲夫氏、松永健太郎氏、大和伸行氏、張若平氏、長谷川嘉子氏に感謝致します。また、筑波大学博士前期課程 2 年の木村尚人氏、高木優氏、山崎光亮氏、筑波大学 4 年の岡田昌之氏とは大学 1 年から同級生として、すべてのときを共に分かち合うことができたことに深く感謝致します。

最後に、大学生活の 6 年間を常に支えてくれたお父さんに心より感謝致します。

2010 年 3 月 中山 裕司

付 録 目 次

付録1 第2章に関わる実験の資料	付 1
1.1 コンクリートの材料試験結果	付 1
1.2 電食中の試験体	付 2
1.3 電食後の試験体	付 3
1.4 腐食ひび割れ状況	付 6
 付録2 第3章に関わる実験の資料	付 12
2.1 コンクリートの材料試験結果	付 12
2.2 電食後の試験体	付 13
2.3 荷重－荷重端すべり量関係	付 19
2.4 引抜試験後の試験体	付 21

付録1 第2章に関わる実験の資料

1.1 コンクリートの材料試験結果

コンクリート打設時に採取した $\phi 100 \times 200$ mmの円柱形の供試体（テストピース）の圧縮試験および割裂引張試験結果を付表 1-1 に示す。適用には4週強度・加力中の種別、供試体の加力日、材齢を示す。また同表には併せて圧縮強度 σ_B 、1/3 割線係数 E_C 、割裂引張強度 σ_t を示す。割裂引張強度は式(1.1)により求めた。供試体は全て封緘養生とした。

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1.1)$$

ここで、

- σ_t : 割裂引張強度 (N/mm²)
- P : 最大荷重 (N)
- d : テストピースの直径 (mm)
- l : テストピースの長さ (mm)

付表 1-1 コンクリートの材料試験結果

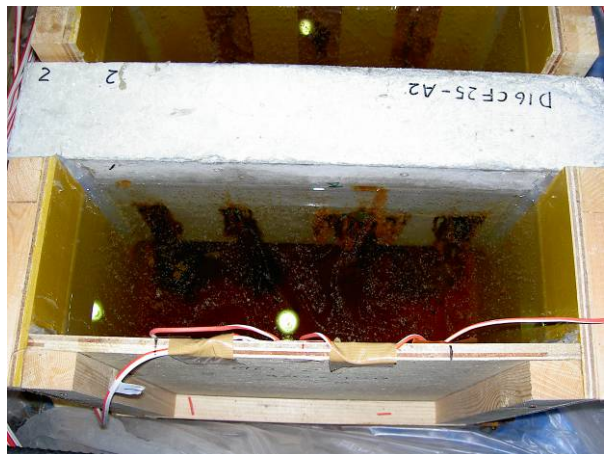
適用 (加力日)	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	養生	直径 (mm)	長さ (mm)	重量 (g)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	1/3 割線係 数 E_C (kN/mm ²)	割裂引張 強度 σ_t (N/mm ²)
4 週 2008.11.24 材齢 28 日	21.0	封緘	100.4	197.9	3562.4	165.0	20.7	25.1	-
			100.3	197.8	3549.4	178.5	22.5	25.0	-
			100.4	196.5	3531.2	184.5	23.2	25.9	-
		平均	-	-	-	-	22.1	25.3	-
		封緘	100.4	197.3	3544.9	57.0	-	-	1.83
			100.3	197.5	3555.0	64.2	-	-	2.06
			100.2	199.0	3576.9	58.4	-	-	1.87
		平均	-	-	-	-	-	-	1.92
加力中 2009.1.13 材齢 57 日	21.0	封緘	100.3	197.9	3560.5	197.0	23.0	27.0	-
			100.2	197.9	3570.9	202.5	25.7	26.7	-
			100.2	198.1	3561.3	203.5	25.8	26.4	-
		平均	-	-	-	-	24.8	26.7	-
		封緘	100.5	198.6	3584.9	89.0	-	-	2.84
			100.2	200.0	3603.2	78.4	-	-	2.49
			100.6	198.8	3549.1	77.4	-	-	2.46
		平均	-	-	-	-	-	-	2.60

1.2 電食中の試験体

電食状況を付写真 1-1 に、電食中の試験体の様子を付写真 1-2 に示す。



付写真 1-1 電食状況



付写真 1-2 電食中の試験体の様子

1.3 電食後の試験体

電食試験後の試験体の様子を付写真 1-3 から付写真 1-5 に示す。



【D16CF15-A】



【D16CF15-B】

付写真 1-3 電食後の試験体(かぶり径比 1.5 の試験体)



【D16CF25-A】



【D16CF25-B】

付写真 1-4 電食後の試験体(かぶり径比 2.5 の試験体)



【D16CF35-A】



【D16CF35-B】

付写真 1-5 電食後の試験体(かぶり径比 3.5 の試験体)

1.4 腐食ひび割れ状況

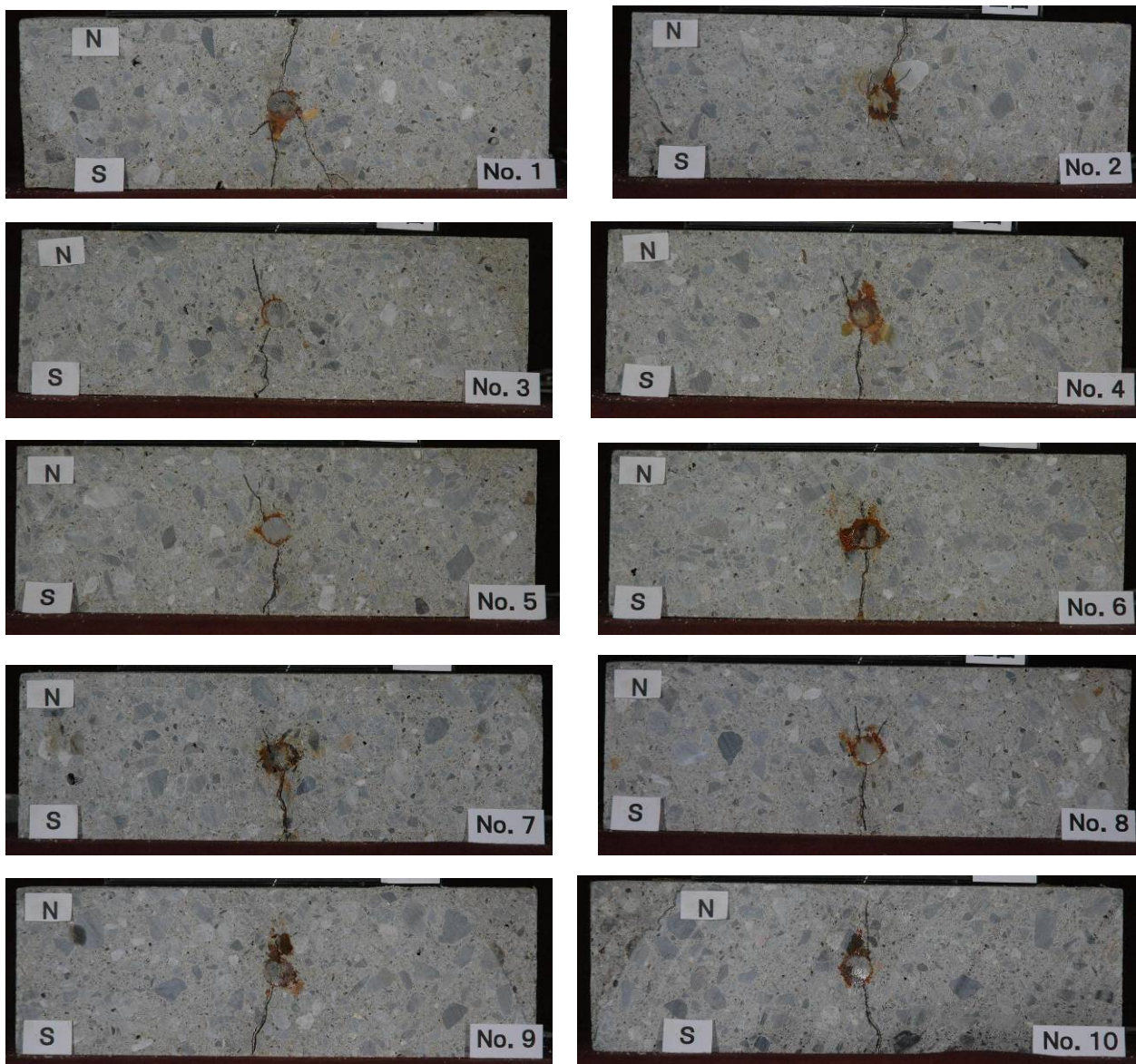
腐食ひび割れ状況を付写真 1-6 から付写真 1-11 に示す。



付写真 1-6 D16CF15-A2 の腐食ひび割れ状況



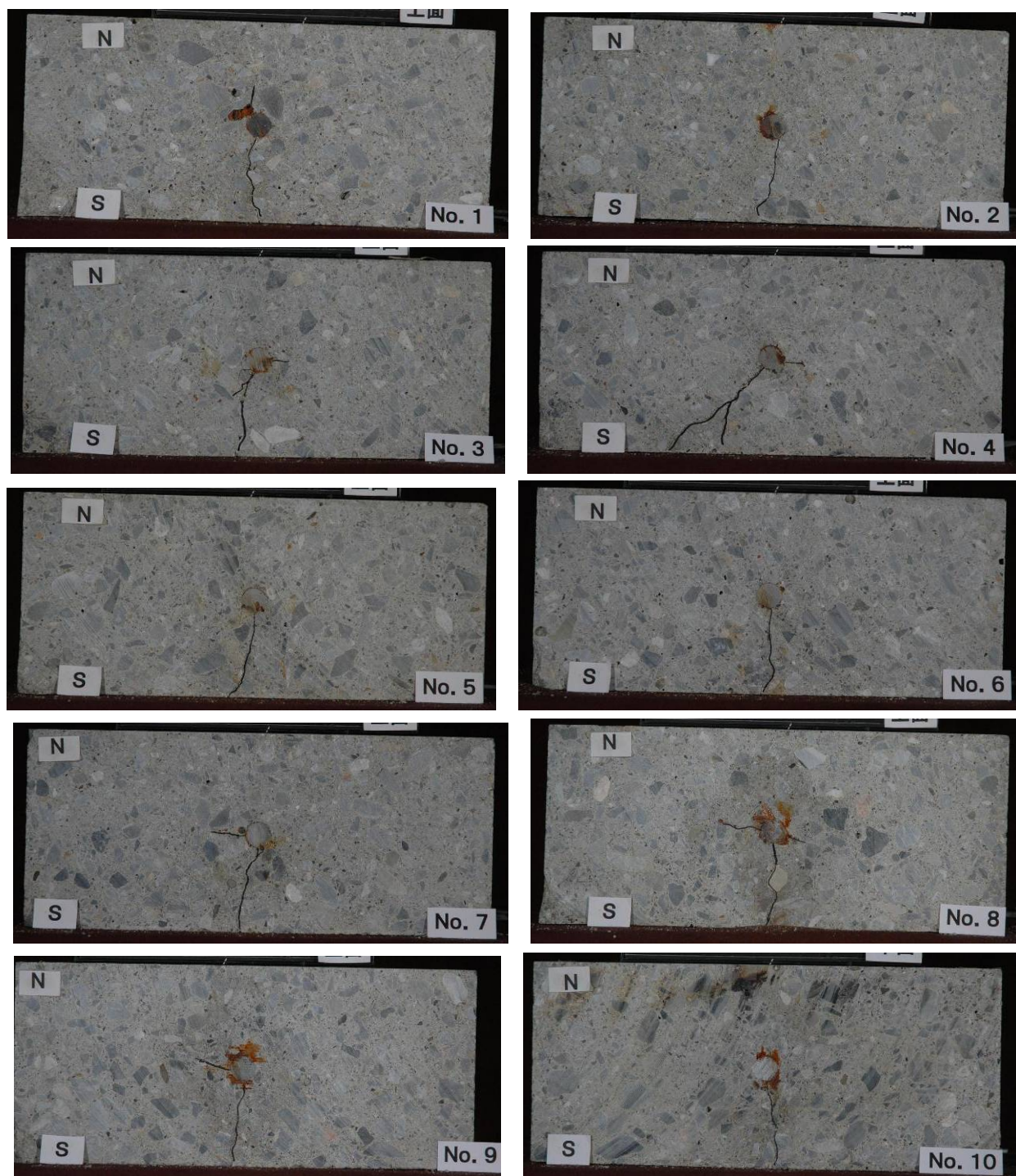
付写真 1-7 D16CF15-B2 の腐食ひび割れ状況



付写真 1-8 D16CF25-A2 の腐食ひび割れ状況



付写真 1-9 D16CF25-B2 の腐食ひび割れ状況



付写真 1-10 D16CF35-A2 の腐食ひび割れ状況



付写真 1-11 D16CF35-B2 の腐食ひび割れ状況

付録2 第3章に関わる実験の資料

2.1 コンクリートの材料試験結果

コンクリート打設時に採取した $\phi 100 \times 200$ mmの円柱形の供試体（テストピース）の圧縮試験および割裂引張試験結果を付表 2-1 に示す。適用には4週強度・加力中の種別、供試体の加力日、材齢を示す。また同表には併せて圧縮強度 σ_B 、1/3 割線係数 E_C 、割裂引張強度 σ_t を示す。割裂引張強度は式(2.1)により求めた。供試体は全て封緘養生とした。

$$\sigma_t = \frac{2 \cdot P}{\pi \cdot d \cdot l} \quad (1.1)$$

ここで、

- σ_t : 割裂引張強度 (N/mm²)
- P : 最大荷重 (N)
- d : テストピースの直径 (mm)
- l : テストピースの長さ (mm)

付表 2-1 コンクリートの材料試験結果

適用 (加力日)	コンクリート 目標圧縮強度 (MPa)	養生	直径 (mm)	長さ (mm)	重量 (g)	最大荷重 (kN)	圧縮強度 σ_B (N/mm ²)	1/3 割線係 数 E_C (kN/mm ²)	割裂引張 強度 σ_t (N/mm ²)
4 週 2009.8.19 材齢 28 日	21.0	封緘	99.7	196.9	3494.4	188.8	24.2	21.4	-
			100.4	197.5	3530.7	174.1	22.0	21.4	-
			100.2	197.4	3521.3	164.9	20.9	17.1	-
		平均	-	-	-	-	22.4	20.0	
		封緘	100.2	197.8	3536.3	76.6	-	-	2.46
100.6	198.4		3567.7	77.5	-	-	2.47		
100.4	198.0		3532.8	70.6	-	-	2.26		
平均	-	-	-	-	-	-	2.40		
加力中 2009.12.7 材齢 138 日	21.0	封緘	100.3	198.7	3531.8	194.5	24.3	24.2	-
			100.3	199.3	3565.4	195.8	24.5	25.4	-
			100.4	198.5	3546.7	195.5	24.5	23.4	-
		平均	-	-	-	-	24.4	24.3	-
		封緘	100.3	198.3	3542.8	86.8	-	-	2.78
			100.2	197.9	3529.7	89.2	-	-	2.87
			100.4	196.9	3484.4	93.8	-	-	3.02
平均	-	-	-	-	-	-	2.89		

2.2 電食後の試験体

電食後の試験体の様子を付写真 2-1 から付写真 2-6 に示す。



【CF15-A-0.5】



【CF15-A-1】



【CF15-A-2】

付写真 2-1 電食後の試験体

(かぶり径比 1.5、積算電流量 $73.3A \cdot hr$ の試験体)



【CF15-B-0.5】

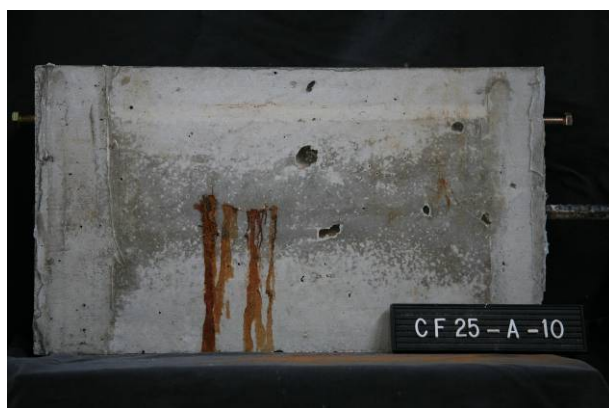


【CF15-B-1】



【CF15-B-2】

付写真 2-2 電食後の試験体
(かぶり径比 1.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)



【CF25-A-0.5】



【CF25-A-1】



【CF25-A-2】

付写真 2-3 電食後の試験体
(かぶり径比 2.5、積算電流量 $73.3\text{A} \cdot \text{hr}$ の試験体)



【CF25-B-0.5】



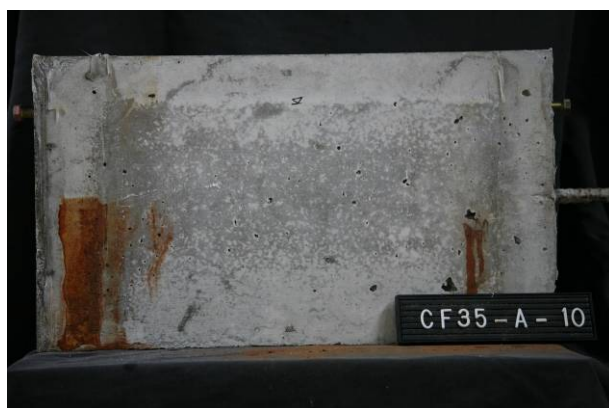
【CF25-B-1】



【CF25-B-2】

付写真 2-4 電食後の試験体

(かぶり径比 2.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)



【CF35-A-0.5】



【CF35-A-1】



【CF35-A-2】

付写真 2-5 電食後の試験体
(かぶり径比 3.5、積算電流量 $73.3\text{A} \cdot \text{hr}$ の試験体)



【CF35-B-0.5】



【CF35-B-1】

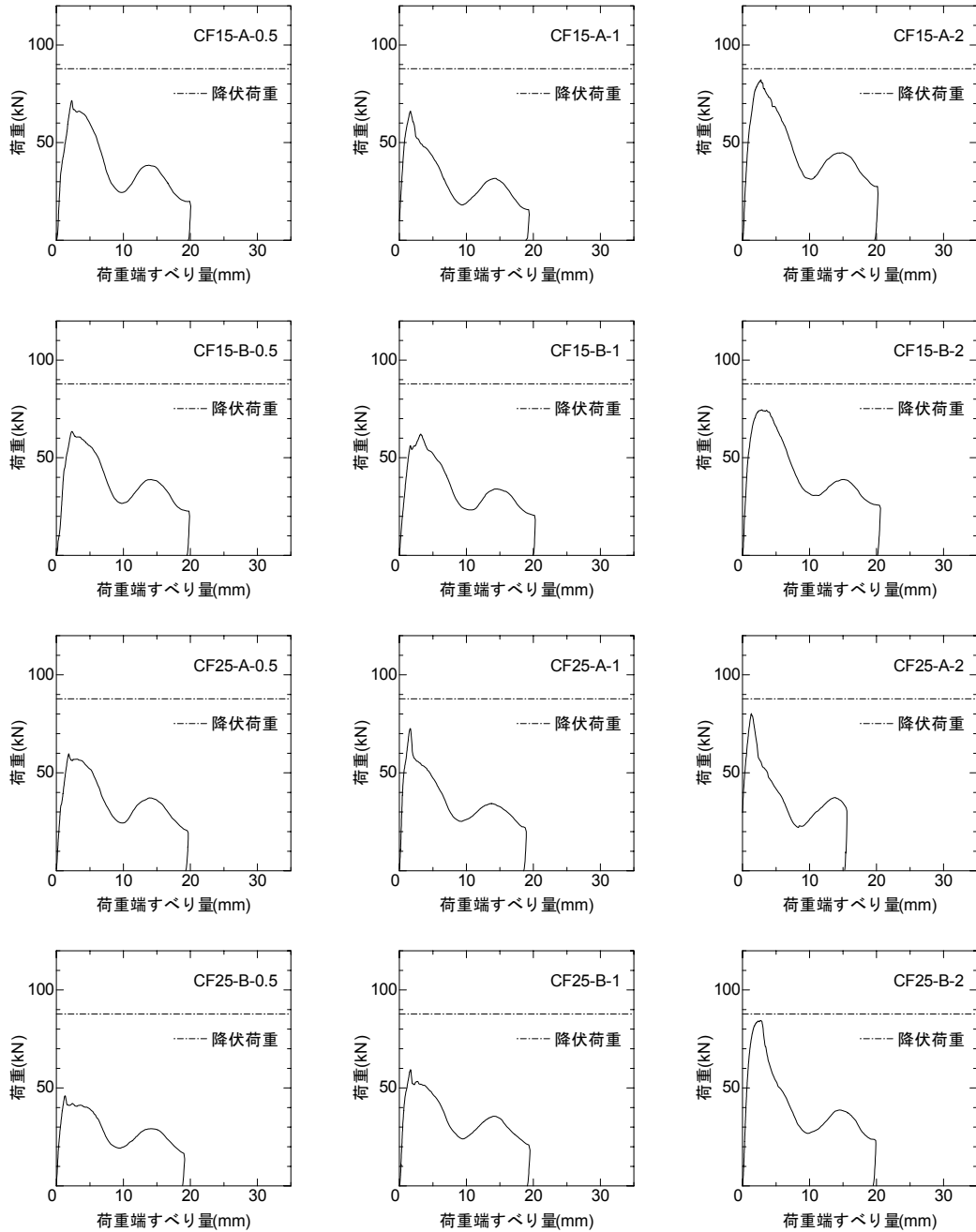


【CF35-B-2】

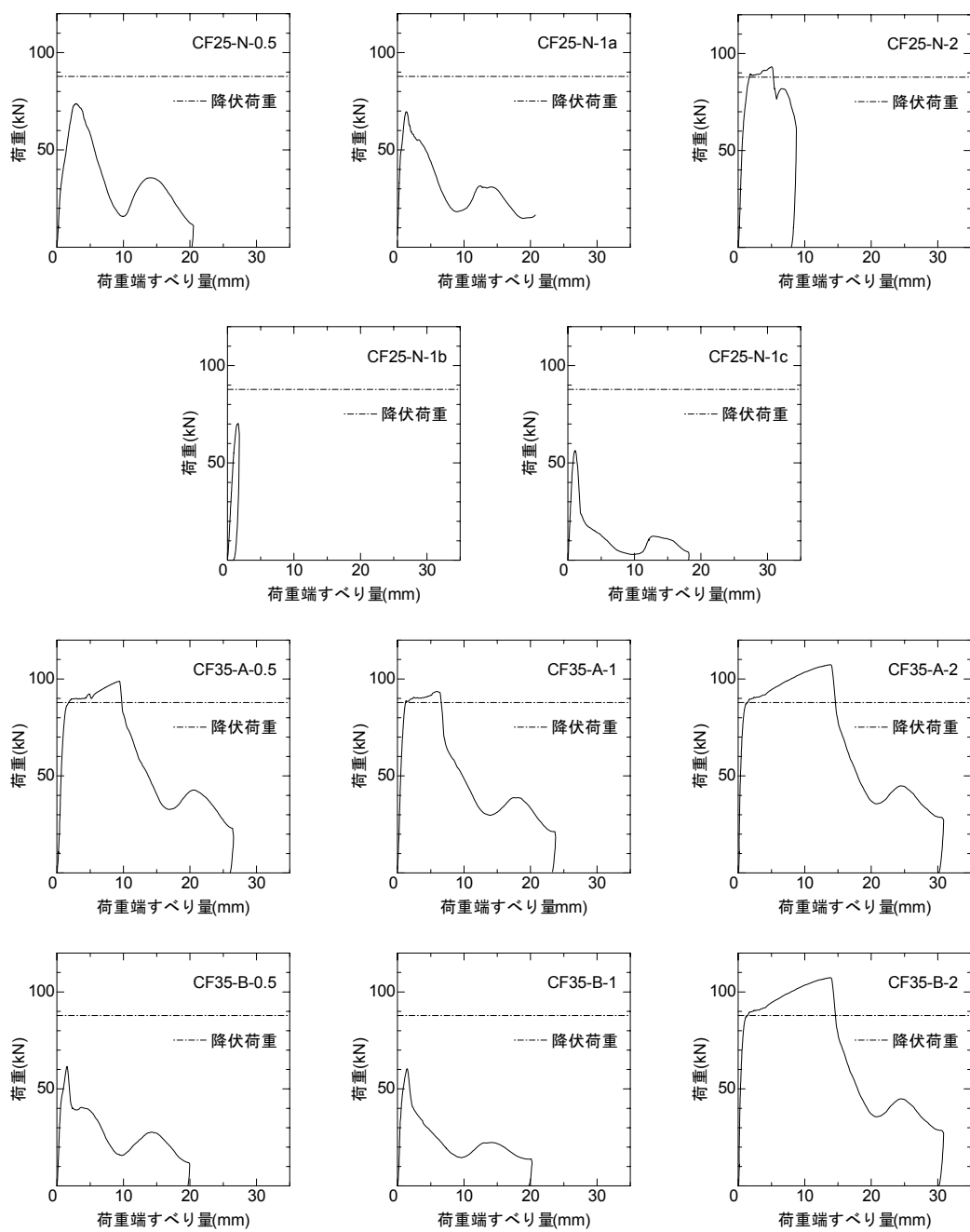
付写真 2-6 電食後の試験体
(かぶり径比 3.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)

2.3 荷重－荷重端すべり量関係

荷重－荷重端すべり量関係を付図 2-1 と付図 2-2 に示す。なお、荷重端すべり量は変位計計測値から試験区間外での鉄筋の伸びを除いた値である。



付図 2-1 荷重－荷重端すべり量関係(かぶり径比 1.5、2.5 の試験体)



付図 2-2 荷重—荷重端すべり量関係(健全試験体、かぶり径比 3.5 の試験体)

2.4 引抜試験後の試験体

引抜試験後の試験体の破壊状況を付写真 2-7 から付写真 2-13 に示す。



【CF15-A-0.5】



【CF15-A-1】



【CF15-A-2】

付写真 2-7 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 1.5、積算電流量 73.3A・hr の試験体)



【CF15-B-0.5】



【CF15-B-1】



【CF15-B-2】

付写真 2-8 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 1.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)



【CF25-A-0.5】



【CF25-A-1】



【CF25-A-2】

付写真 2-9 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 2.5、積算電流量 73.3A・hr の試験体)



【CF25-B-0.5】



【CF25-B-1】



【CF25-B-2】

付写真 2-10 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 2.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)



【CF25-N-0.5】



【CF25-N-1a】



【CF25-N-2】



【CF25-N-1b】



【CF25-N-1c】

付写真 2-11 引抜試験後の試験体の破壊状況
(健全試験体)



【CF35-A-0.5】



【CF35-A-1】



【CF35-A-2】

付写真 2-12 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 3.5、積算電流量 $73.3\text{A} \cdot \text{hr}$ の試験体)



【CF35-B-0.5】



【CF35-B-1】



【CF35-B-2】

付写真 2-13 引抜試験後の試験体の破壊状況
(かぶり径比 3.5、積算電流量 146.6A・hr の試験体)