

目 次

要 旨	3
1. ま え が き	4
2. 実験概要	4
2.1 試験体概要	4
2.2 載荷試験	5
2.3 腐食状態の評価	6
3. 内部鉄筋の腐食状況	6
4. 鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響	7
4.1 ひび割れ開口に対する拘束筋の無いRC試験体の付着劣化性状	7
4.2 ひび割れ開口に対する拘束筋を有するRC試験体の付着劣化性状	8
4.3 付着性状の定量評価	9
5. 鉄筋腐食が付着劣化に及ぼす影響に関する解析的検討	10
5.1 解析概要	10
5.2 鉄筋腐食による付着劣化の表現方法	10
6. 結 論	11
参考文献	12
付 録	13

Bond Behavior Between Corroded Rebar and Concrete

Ema KATO*

Mitsuyasu IWANAMI**

Hiroshi YOKOTA***

Hajime ITO****

Fuminori SATO*****

Synopsis

Port and harbor concrete structures suffer from the chloride attack that may cause deterioration of materials. For example, expansion of rebar due to corrosion may induce cracks in concrete and consequent fall of cover concrete. The material deterioration decreases structural performances. However, the relationship between the degree of rebar corrosion and structural performance has not been made clear.

In this study, the relationship between the states of rebar corrosion and deterioration of bond property between rebar and concrete has been experimentally investigated. It was evaluated that the effects of degree of rebar corrosion and deterioration of bond property on tension stiffening and crack distribution of reinforced concrete member. The experimental results showed that the tension stiffening and crack distribution were influenced by deterioration of bond property between rebar and concrete depending on the cross-sectional loss of rebar. Non-linear FEM analysis focusing on the deterioration of structural performance was conducted. In the analysis, the cross-sectional loss of rebar and the deterioration of bond property obtained by the experiments were taken into account. As a result, the quantitative evaluation method of bond behavior between rebar and concrete was proposed in the analysis.

Key Words: reinforced concrete, rebar corrosion, bond property, tension stiffening, crack distribution

* Researcher of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

** Senior Researcher of Geotechnical and Structural Engineering Department

*** Head of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

**** Trainee of Structural Mechanics Division, Geotechnical and Structural Engineering Department

***** Former Trainee of Structural Mechanics Division (Maeda Corporation)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-0468-44-5059 Fax : +81-0468-44-0255 E-mail : katoh-e@pari.go.jp

鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響

加藤 絵万 *
岩波 光保 **
横田 弘 ***
伊藤 始 ****
佐藤 文則 *****

要 旨

海洋環境下に構築される鉄筋コンクリート構造物において最も重大かつ重要な劣化原因は、コンクリート中の鉄筋腐食である。コンクリート中の鉄筋において腐食が開始すると、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、やがてかぶりコンクリートの剥落にまで至る。このような材料劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性、変形性といった構造性能は低下する。しかし、鉄筋腐食程度と構造性能の低下の関係については未だ定量的な評価はなされておらず、目視観察結果に基づいた定性的かつ主観的な情報により、構造性能が間接的に判断されているのが現状である。

本研究では、構造性能の低下をより精緻に評価する手法を確立するための研究の一環として、鉄筋の腐食程度と単純引張応力下における鉄筋とコンクリート間の付着劣化の関係について実験的検討を行った。特に、鉄筋腐食程度とそれによる付着劣化が鉄筋コンクリート部材のテンションスティフニング効果、およびひび割れ分散性に及ぼす影響について考察した。その結果、鉄筋腐食により付着性能が低下した場合、テンションスティフニング効果が失われ、ひび割れ分散性が低下することが確認された。また、その低下程度は鉄筋の断面減少率に大きく依存することが分かった。さらに、これらの実験結果を基に、腐食による鉄筋の断面減少の影響と付着性能の低下を表現するために、鉄筋要素の断面積および付着要素のせん断ひずみ-せん断応力関係を変化させた非線形有限要素解析を行った。その結果により、鉄筋とコンクリート間の付着性能の定量的表現方法を提案した。

キーワード：鉄筋コンクリート部材，鉄筋腐食，付着劣化，テンションスティフニング，ひび割れ分散性

* 地盤・構造部構造強度研究室 研究官
** 地盤・構造部主任研究官
*** 地盤・構造部構造強度研究室長
**** 地盤・構造部構造強度研究室依頼研修員
***** 前地盤・構造部構造強度研究室依頼研修員（前田建設工業株式会社）
〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人港湾空港技術研究所
電話：0468- 44-5059 Fax：0468- 44-0255 E-mail：katoh-e@pari.go.jp

1. まえがき

我が国は、高度経済成長期を通じて社会資本の著しい充実を実現し、特に公共構造物である土木構造物の建設が急速に進められてきた（高橋ら、2002）。土木構造物のなかでもコンクリート構造物は、適切に設計・施工がなされた場合、極めて耐久性に富む構造形式である。しかし、近年、1970年代に建設されたトンネルや高架橋などの劣化問題の顕在化に代表されるように、既存コンクリート構造物の安全神話を覆す事例が多発している。このような現状から、今後の社会基盤整備を考える上で、維持管理が必要不可欠であることはもはや常識となっている。つまり、既設構造物の健全性診断、保有性能の評価・判定、補修・補強といった維持管理プロセスが適切に遂行されることが強く求められている（土木学会、2001）。

コンクリート構造物の劣化原因には様々なものがあるが、最も重大かつ重要な原因はコンクリート中の鉄筋腐食である。特に、海洋環境下に構築される港湾構造物においては、コンクリートへの塩化物イオンの侵入に起因する鉄筋腐食が問題となる。コンクリート中の鉄筋において腐食が開始すると、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひび割れが生じ、これが進行すれば、かぶりコンクリートの剥落に至る。このような材料劣化の進行に応じて、構造物の耐荷性・変形性といった構造性能は低下する（日本コンクリート工学協会、1998）。しかし、鉄筋腐食程度と構造性能の低下の関係については未だ定量的な評価はなされておらず、目視観察結果に基づいた定性的かつ主観的な情報により、構造性能が間接的に判断されているのが現状である（運輸省港湾技術研究所、1999）。

著者らはこれまで、塩害により劣化した鉄筋コンクリート構造物の構造性能評価手法の確立を最終目標とし、電気化学特性値を用いた鉄筋腐食程度の把握、AE計測を適用した損傷度定量化手法の提案（岩波ら、2000）など、種々の研究を行っている。特に、既報告（佐藤ら、2001）においては、鉄筋腐食が部材の構造性能に及ぼす影響を評価する場合、鉄筋とコンクリート間の付着劣化の考慮が不可欠であることを明らかにしている。ここで、付着とは鉄筋とコンクリートの力学的相互作用の総称であり、鉄筋表面の節などによって両者が噛合う機構である。付着は鉄筋コンクリート構造物全体の変形だけでなく、ひび割れ分散性やひび割れ幅に支配的影響を及ぼすものである。

本研究では、この付着劣化を定量的に評価するために、鉄筋の腐食程度と単純引張応力下における鉄筋とコンク

リート間の付着劣化の関係について実験的検討を行った。特に、鉄筋腐食程度とそれによる付着劣化が鉄筋コンクリート部材のテンションスティフニング効果（土木学会、1991）、およびひび割れ分散性に及ぼす影響について考察した。さらに、これらの実験結果を基に、非線形有限要素解析における腐食鉄筋とコンクリート間の付着性能の定量的表現方法を提案した。

2. 実験概要

鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を把握するため、電食により内部鉄筋を腐食させた鉄筋コンクリート試験体を用いて一軸引張試験を行った。実験概要を以下に記す。

2.1 試験体概要

(1) 試験体諸元

図-1に試験体概要を示す。試験体は寸法200mm×150mm×2000mmのコンクリートの中央に、D19のネジ付き鉄筋1本を埋め込んだものである。本研究では、鉄筋に直接引張力を作用させるため、試験体両端部において鉄筋を750mmおよび1250mm露出させている。また、鉄筋腐食が腐食ひび割れ幅に与える影響を把握するために、腐食ひび割れ開口に対する拘束筋を設けた試験体と設けていない試験体の2種類を製作した。拘束筋間隔は150mmおよび75mmの2ケースである。表-1にコンクリートの配合、

表-1 コンクリートの配合

G _{max}	W/C (%)	s/a	単位量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	SP
20	56.5	43.3	160	284	790	1080	0.568

C:普通ポルトランドセメント, S:砂, G:砕石, SP:AE減水剤

表-2 コンクリートの物性値

拘束筋	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
無	39.3	3.15×10 ⁴	3.40
有	40.7	3.15×10 ⁴	3.50

表-3 鉄筋の物性値

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)
D19	362	418	1.90×10 ⁵
D6	401	474	—

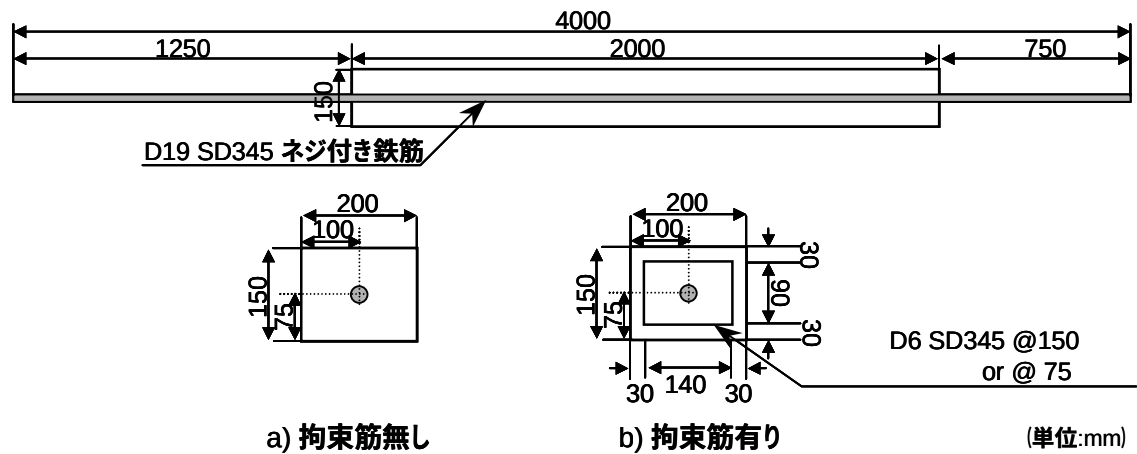


図-1 試験体概要

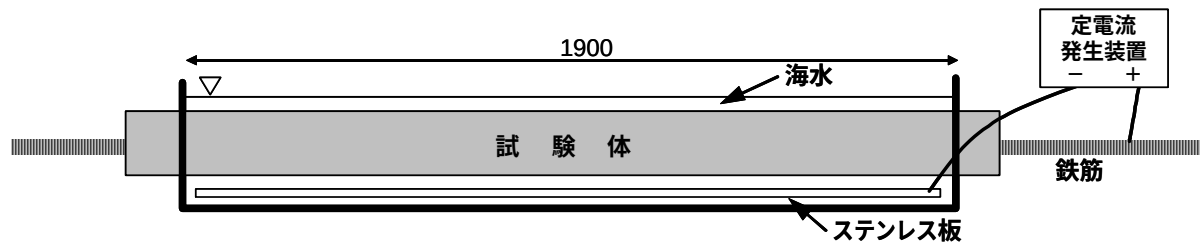


図-2 電食方法

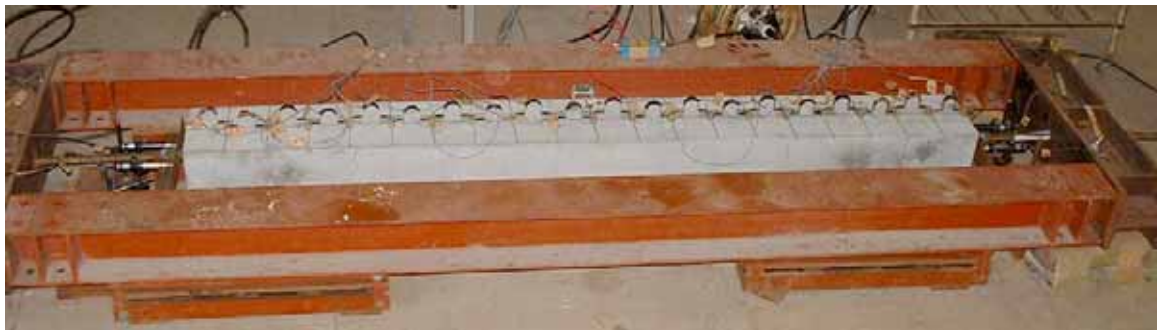


写真-1 载荷試験概要

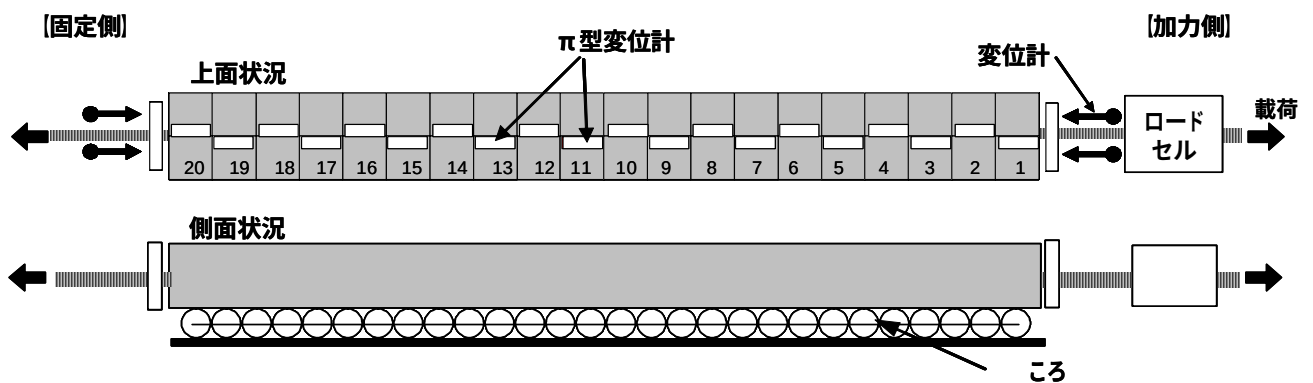


図-3 载荷試験概要

表-2に載荷試験時のコンクリートの物性値、また、表-3に鉄筋の物性値を示す。

(2) 電食方法

図-2に電食方法を示す。鉄筋の腐食程度を調整するため、海水中に浸せきした試験体内部の鉄筋に直流電流を印加し、試験体毎に電食期間を変化させた。電流密度は主鉄筋の表面積に対して 8.5A/m^2 である。目標とした腐食ひび割れ幅に達した段階で電流印加を終了し、試験体表面における腐食ひび割れ幅を100mm毎にクラックスケールにより測定した。

2.2 載荷試験

載荷試験の概要を写真-1および図-3に示す。載荷試験は試験体周りに専用フレームを設置し、床面の拘束を低減させるため、ころ上に試験体を載せて行った。載荷はセンターホールジャッキを用いて、試験体端部より露出させた鉄筋を直接引っ張ることによって行った。荷重は加力側においてロードセルにより測定した。また、コンクリート両端部において鉄筋に取り付けた治具を介して試験体の伸び量を変位計により測定した。試験体の平均ひずみは、伸び量を載荷前の試験体長で除することにより求めた。また、試験体表面100mm毎に π 型変位計を取り付け、載荷により発生する軸直角方向のひび割れ幅を把握した。試験終了後、これらのひび割れ発生状況を観察した。

2.3 腐食状態の評価

電食による鉄筋の腐食状態を定量的に把握するため、載荷試験終了後に鉄筋をはつり出し、腐食量を測定した。まず、1次処理として、鉄筋にサンドブラスト処理を施し、付着した腐食生成物およびコンクリートを取り除いた。2次処理として、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に鉄筋を浸せきし、腐食生成物を完全に除去した。その後、100mm区間毎の質量減少量より、鉄筋断面積の平均減少率（以降、断面減少率と呼ぶ）を算定した。拘束筋を有する試験体においては、主鉄筋だけでなく拘束筋についても同様の処理を行い、断面減少率を算定した。

3. 内部鉄筋の腐食状況

図-4に通電により内部鉄筋を腐食させた試験体の腐食ひび割れ幅と断面減少率の関係を示す。図中のプロットは腐食ひび割れ幅と断面減少率の平均値、水平および鉛直の実線はばらつきの範囲を示している。拘束筋が無

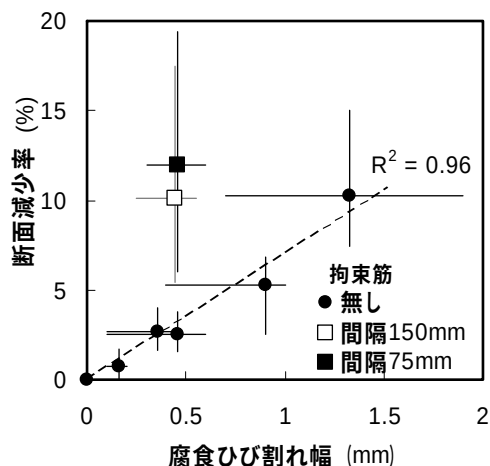


図-4 腐食ひび割れ幅と断面減少率の関係

い試験体の測定結果に着目すると、腐食ひび割れ幅の平均値と断面減少率の平均値はほぼ直線関係で表せることが分かる。これは、Qi らによる研究（1999）と同様の結果である。したがって、腐食ひび割れ幅から内部鉄筋の腐食程度をある程度判断することができる。しかし、拘束筋間隔 150mm および 75mm の測定結果においては、拘束筋が無い場合と同等の腐食ひび割れ幅でありながら、鉄筋の断面減少率は 4 倍以上大きい値となる場合があった。そして、拘束筋が多いほど、同等のひび割れ幅に対する断面減少率は大きくなった。以上の結果より、腐食ひび割れ幅と鉄筋断面減少率の関係から内部鉄筋の腐食程度を判断するには、ひび割れ開口に対する拘束筋の影響を適切に考慮することが重要である。

また、同図に示したばらつきの範囲から、鉄筋の腐食状況は一様ではなく、平均腐食ひび割れ幅および平均断面減少率が大きいほど、それぞれのデータ存在範囲は広くなることが分かる。松尾ら（2001）は、腐食の著しい鉄筋コンクリート部材の耐荷・変形能力は、平均的な断面減少ではなく、局所的な断面減少に支配される場合があると報告している。腐食程度が著しくなるにつれ、腐食の不均一性の考慮が必要となることが考えられるが、本研究では簡便性を考慮し、平均腐食ひび割れ幅および平均断面減少率で載荷試験結果を整理することとした。部材中の腐食ひび割れ幅および断面減少率の分散性に関する評価と、それが構造性能に及ぼす影響については、今後の検討課題である。

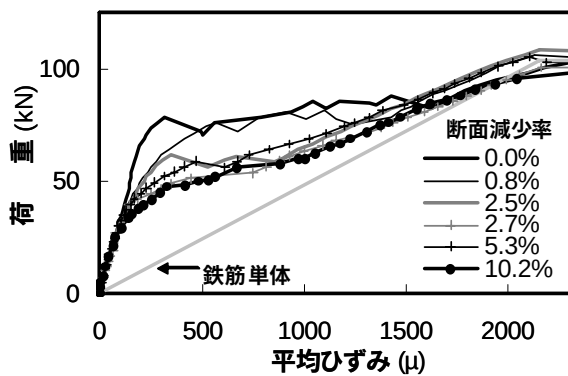


図-5 荷重－平均ひずみ関係

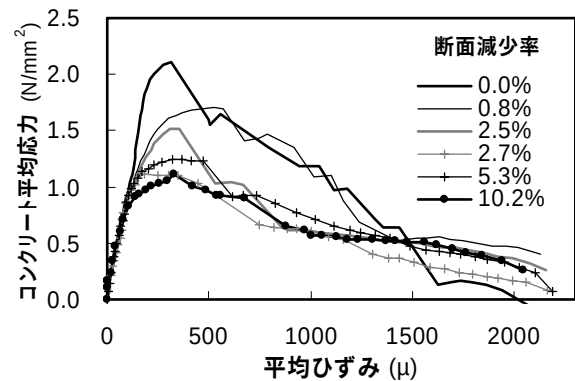


図-6 コンクリート平均応力－平均ひずみ関係

4. 鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響

鉄筋の腐食が鉄筋コンクリート部材の構造性能に及ぼす影響を評価する上で不可欠である、鉄筋とコンクリート間の付着劣化現象を把握するため、内部鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート試験体の一軸引張試験を行った。特に、テンションスティフニング効果およびひび割れ分散性に着目し、腐食による付着劣化現象の定量的評価方法を検討した。

4.1 ひび割れ開口に対する拘束筋の無い RC 試験体の付着劣化性状

(1) 荷重－平均ひずみ関係

ひび割れ開口に対する拘束筋が無い試験体の荷重－平均ひずみ関係を図-5に示す。鉄筋単体の荷重－ひずみ関係が2000μまで線形で表せるのに対し、健全な試験体(断面減少率0.0%)では、同一荷重時における平均ひずみは鉄筋単体の場合よりも小さくなった。これが、鉄筋とコンクリート間の付着力により生じるテンションスティフニング効果であり、これより、鉄筋とコンクリートが一体となって引張力に抵抗していることが分かる。

鉄筋腐食が生じ鉄筋断面が減少した試験体においては、健全な試験体と比較して、同一ひずみにおける荷重は低下した。また、荷重－平均ひずみ関係が鉄筋単体のそれに近づく傾向となるのは、健全な試験体よりも小さいひずみの段階であり、これらは腐食による断面減少率が大きいほど顕著であった。また、荷重－ひずみ関係の折れ点は、試験体に载荷によるひび割れが発生した点を示すが、鉄筋腐食が生じた試験体において、折れ点は不明確であった。

(2) コンクリート平均応力－平均ひずみ関係

図-5に示した荷重－平均ひずみ関係を用いて、式(1)よりコンクリートが負担する応力を算出することができる。

$$\sigma_{c,av} = \frac{P - A_{s,av} E_s \varepsilon_{av}}{A_c} \quad (1)$$

ここに、 $\sigma_{c,av}$:コンクリートの平均応力、 P :作用荷重、 $A_{s,av}$:鉄筋の平均断面積(鉄筋腐食した試験体においては、腐食後の平均断面積を示す)、 E_s :鉄筋のヤング係数、 ε_{av} :平均ひずみ、 A_c :コンクリートの断面積である。ただし、式(1)は鉄筋降伏以前においてのみ成立する。

式(1)より得られたコンクリート平均応力と平均ひずみの関係を図-6に示す。健全な試験体と比較して、鉄筋腐食が生じた試験体においては、同一ひずみにおけるコンクリート平均応力が小さくなっていることが分かる。これは、鉄筋からコンクリートに伝達される引張力が低下したことを示している。このような付着劣化現象は、腐食による断面減少率が大きいほど顕著であった。

(3) ひび割れ分散性

図-7に健全な試験体における荷重－平均ひずみ関係とひび割れ発生点、および载荷終了時のひび割れ状況を示す。健全な試験体に引張力が作用した場合、荷重の増加とともに鉄筋と直交する方向にひび割れが発生した。ひび割れ発生直後は荷重が低下し、平均ひずみが増加する傾向を示した。しかし、この傾向は腐食程度が大きくなるほど不明確となった。また、载荷終了時のひび割れ状況から分かるように、健全なコンクリートにおいては

試験体全体にひび割れが分散した。

1.において述べたとおり，付着は鉄筋コンクリート構造物全体の变形だけでなく，ひび割れ分散性やひび割れ幅に支配的影響を及ぼすものである．前述までの検討より，鉄筋腐食が生じた試験体では付着劣化の影響により健全な試験体とは異なったひび割れ分散性，ひび割れ幅となることが考えられる．これについての検討結果を図-8に示す．図-8は，断面減少率とひび割れ分散性，およびひび割れ幅の関係を示したものである．左縦軸は，健全な試験体に生じたひび割れの本数 N_0 に対する鉄筋が腐食した試験体のひび割れ本数 $N_{cor,n}$ の比である．ひび割れ本数は，鉄筋降伏以前において目視により計数した値とした．右縦軸は，試験体の平均ひずみ 2000μ における，健全な試験体に生じた平均ひび割れ幅 w_0 に対する鉄筋が腐食した試験体の平均ひび割れ幅 $w_{cor,n}$ の比である．同図より，断面減少率が大きくなるほどひび割れ分散性は低下し，ひび割れ幅も大きくなることが分かる．これは，鉄筋腐食により鉄筋とコンクリート間の付着力が低下したため，部材の破壊が局部的に生じた結果と考えられる．これより，付着力の低下が荷重によるひび割れ幅の拡大，ひいては使用性の低下を招く恐れがある（日本コンクリート工学協会，1998）ことが確認できた．

ここで，断面減少率 10.2%の試験体の場合，断面減少率 5.3%の場合よりもひび割れ幅が小さくなった．これは，最終的に割裂ひび割れ（腐食ひび割れと同方向）が生じて破壊に至ったためである．このような破壊形態を示したのは，断面減少率 10.2%の試験体においては，付着力がほとんど期待できない状態であったためと推測される．

以上の検討から，鉄筋の腐食により鉄筋コンクリート部材として期待される鉄筋とコンクリートの一体性が失われ，耐荷性およびひび割れ分散性が低下すること，また，その程度は鉄筋の断面減少率に依存することが確認された．

4.2 ひび割れ開口に対する拘束筋を有する RC 試験体の付着劣化性状

ひび割れ開口に対する拘束筋を有する試験体の荷重－平均ひずみ関係を図-9に示す．比較のため，鉄筋単体，拘束筋が無い場合の健全試験体，および断面減少率が 10.2%試験体の結果も同図にあわせて示す．拘束筋が無い試験体と同様，腐食した試験体では，同一荷重時における平均ひずみは鉄筋単体の場合よりも小さくなった．また，健全な試験体と比較して同一ひずみにおける荷重は常に低い値となり，最終的には鉄筋単体よりも小さいひずみで降伏する傾向を示した．

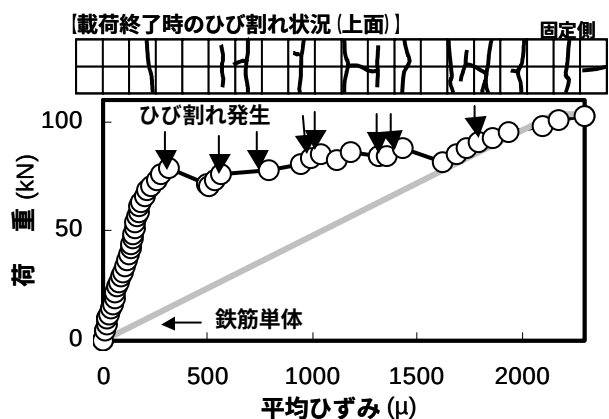


図-7 健全試験体のひび割れ挙動

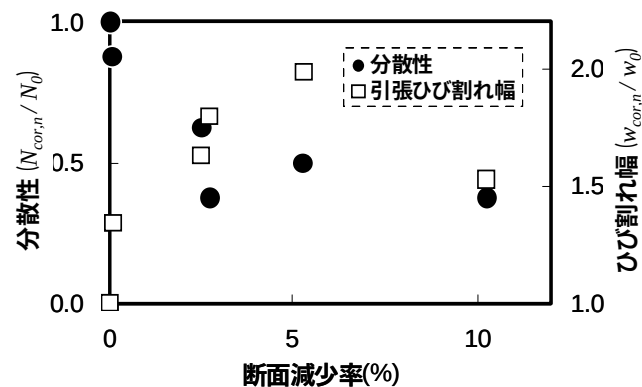


図-8 断面減少率とひびわれ分散性・ひび割れ幅の関係

4.1(2)と同様，式(1)を用いてコンクリート平均応力を算出した結果を図-10に示す．これまでの検討と同様，健全な試験体と比較して，同一ひずみにおけるコンクリート平均応力が小さくなり，テンションスティフニング効果が失われたことが分かる．また，鉄筋の断面減少率が約 10%の条件で，拘束筋が無い試験体と拘束筋間隔 75mm の試験体におけるコンクリート平均応力を比較すると，最大応力時までは両者は同様の応力－ひずみ関係を示した．しかし，その後，拘束筋間隔 75mm の試験体では 1300μ付近まで応力の停滞が見られ，鉄筋降伏ひずみまで直線的に低下した．拘束筋間隔が 150mm，鉄筋断面減少率が 12.0%の場合，最大荷重はその他の試験体より低い値となったが，拘束筋間隔 75mm の場合と同様，応力は 1500μ付近まで停滞した後，鉄筋降伏ひずみまで直線的に低下した．

図-10における最大応力の低下は，内部鉄筋の腐食による付着劣化の影響と考えられる．ここで，李ら（1996）や橘ら（1989）によれば，主鉄筋がせん断補強筋により

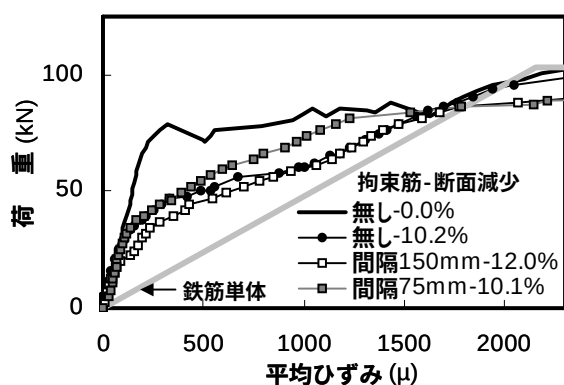


図-9 荷重－平均ひずみ関係

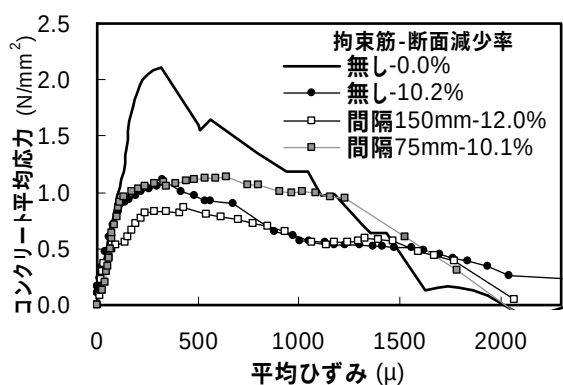


図-10 コンクリート平均応力－平均ひずみ関係

拘束されている場合、コンクリートに腐食ひび割れが生じて、鉄筋の付着強度はそれ程低下しないとの知見が得られている。本研究で用いた拘束筋は、腐食ひび割れ幅を制御する目的で導入したものであり、せん断補強筋としての機能はあまり期待されていない。しかし、断面減少率が10%程度である拘束筋が無い試験体と拘束筋間隔75mmの試験体の比較において、後者の方が引張応力の保持能力があることを考慮すれば、拘束筋により見かけの付着強度の低下が抑制されたと考えることができる。今回の実験では、拘束筋量の影響について把握できなかったため定性的な考察となるが、ひび割れ開口に対する拘束筋の存在により内部コンクリートの微視的破壊が生じ難くなり、鉄筋の節との噛合い効果が持続したものと推測される。

4.3 付着性状の定量評価

これまで検討した内部鉄筋の腐食程度と鉄筋とコンクリート間の付着性状の関係を定量的に表すため、図-6お

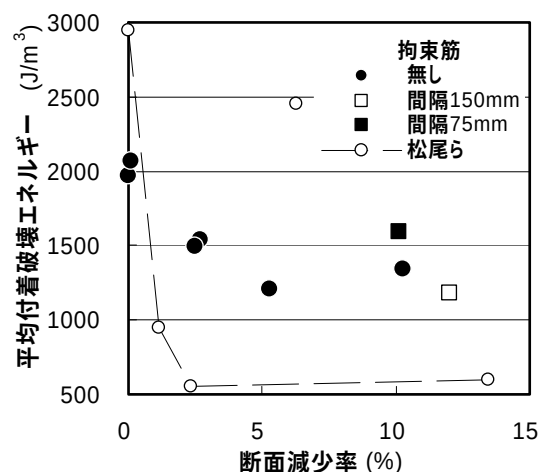


図-11 断面減少率と平均付着破壊エネルギーの関係

よび図-10 の曲線下に囲まれた面積（以下、平均付着破壊エネルギーと呼ぶ）を以下の式(2)より算出した。

$$W_b = \sum (\sigma_{c,av} \varepsilon_{av}) \quad (2)$$

ここに、 W_b ：平均付着破壊エネルギー、 $\sigma_{c,av}$ ：コンクリートの平均応力、 ε_{av} ：試験体の平均ひずみである。ここで求まる平均付着破壊エネルギーは、部材の力学特性値であり、今後、付着性能の指標となり得るものと考えられる。

断面減少率と平均付着破壊エネルギーの関係を図-11に示す。断面減少率が大きくなるほど平均付着破壊エネルギーが減少し、断面減少率が5.3%より大きくなると、ほぼ一定の値となった。これより、平均付着破壊エネルギーは鉄筋の断面減少率に依存し、断面減少率の増加に伴って徐々にある一定値に収束することが考えられる。また、ここで注目すべきは、拘束筋を有する試験体の付着破壊エネルギーである。主筋の断面減少率が同等であれば、拘束筋を有する試験体の場合と同等の付着破壊エネルギーを示すことが分かる。これより、部材寸法が等しければ、付着破壊エネルギーは拘束筋の有無によらず主鉄筋の断面減少率で評価できる可能性があるといえる。

同図に、松尾ら（2001）による実験結果を参考までにプロットした。本研究と比較して断面減少率が付着破壊エネルギーに及ぼす影響がより顕著である。松尾らは、100mm×100mm×1000mm のコンクリートは中央に異形鉄筋1本を埋め込み、一軸引張試験を行っている。また、本研究と同径のD19鉄筋を使用しているが、ネジ付

き鉄筋と比較して節（凹凸）が小さく数も少ない形状となっている。このような試験体諸元の違いが、断面減少率と付着破壊エネルギーの関係に影響を及ぼしていることが考えられる。また、同研究によれば、腐食の著しい鉄筋コンクリート部材の降伏近くの挙動は、平均的な断面減少率ではなく、局所的な断面減少率に支配される場合がある。それを裏付けるのが、断面減少率 5% 付近の付着破壊エネルギーの値である。しかし、図-4 に示したように、平均断面減少率が大きいほど各測定箇所の断面減少率に大きなばらつきがあったにも関わらず、本研究における付着破壊エネルギーは局所的な断面減少の影響は現れなかった。これは、前述したように、本研究で使用した鉄筋の節が比較的大きく数も多いため、局所的な断面減少が生じてても、鉄筋の節とコンクリートの機械的噛合いにより断面減少の影響が小さくなったこと、また、試験体長が大きいために局所的破壊の影響が相対的に小さくなったことが理由として挙げられる。

なお、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の耐荷性状について実験的検討を行った佐々木らの研究（1991）では、腐食の程度が小さい試験体では、健全な試験体と比較して付着性状の向上がみられたことが報告されている。腐食生成物により鉄筋が膨張すること、また摩擦が増加することから得られた結果と考えることができるが、本研究の実験結果からはこの傾向は認められなかった。これについても、試験体諸元による付着機構の相違の影響であることが考えられる。

以上の検討より、鉄筋腐食による鉄筋コンクリート部材中の鉄筋とコンクリート間の付着劣化は、平均付着破壊エネルギーを用いて定量的に評価することができ、これは断面減少率に依存することが分かった。ただし、これを一般化するには、部材寸法および使用鉄筋の形状を考慮することが必要である。

5. 鉄筋腐食が付着劣化に及ぼす影響に関する解析的検討

鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の一軸引張試験結果より、鉄筋腐食が鉄筋とコンクリート間の付着劣化に及ぼす影響を把握した。ここでは、実験で得られた成果を基に、非線形有限要素解析を用いて、鉄筋とコンクリート間の付着性能の定量的表現方法を提案した。以下に、解析概要と結果を示す。

5.1 解析概要

コンクリートは 4 節点アイソパラメトリック平面応力

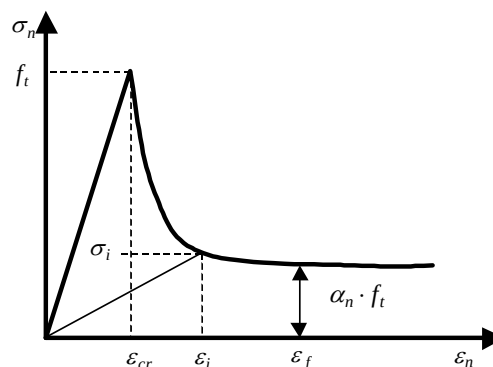


図-12 引張応力軟化曲線

要素、鉄筋はトラス要素とし、要素サイズは全て 50mm とした。コンクリートのひび割れ発生規準は、最大応力判定より行った。ひび割れ発生後の応力-ひずみ関係は、図-12 に示すように、ひび割れ発生以降の応力残留量をひび割れひずみの関数とし、式(3)に示す応力軟化曲線を定義した。

$$\sigma_n = \exp \left[\frac{\log(\alpha_n)}{\varepsilon_f} \cdot (\varepsilon_i - \varepsilon_{cr}) \right] \cdot f_t \quad (3)$$

ここに、 ε_{cr} ：ひび割れ発生時のひずみ、 ε_f ：基準ひずみ（2000 μ ）、 f_t ：ひび割れ発生応力、 α_n ：応力低下を示す係数であり ε_f 時に 0.05 となる。

鉄筋は弾塑性材とし、降伏応力に達した後のひずみ硬化率を初期剛性の 1.0% とした。降伏規準としては、一般的な von Mises 基準を用いた。なお、鉄筋とコンクリートの材料物性値は、それぞれの材料試験結果を基に設定した。鉄筋の腐食による断面減少については、鉄筋要素の断面積に各位置における実測値の断面減少率を与えることによって設定した。

また、鉄筋とコンクリート間の付着性能を表現するため、鉄筋要素とコンクリート要素の間にボンド要素を導入した。ボンド要素の奥行きは鉄筋周長とし、ボンド要素高さは 0.1mm に設定した。

5.2 鉄筋腐食による付着劣化の表現方法

健全なコンクリートの場合、鉄筋とコンクリートの付着性能を表現するボンド要素のせん断応力とせん断ひずみの関係は、図-13 に示すバイリニア型とした。これは、鉄筋コンクリート部材のモデル化において、最も簡便な付着性能の表現方法である。ボンド要素高さを h 、鉄筋

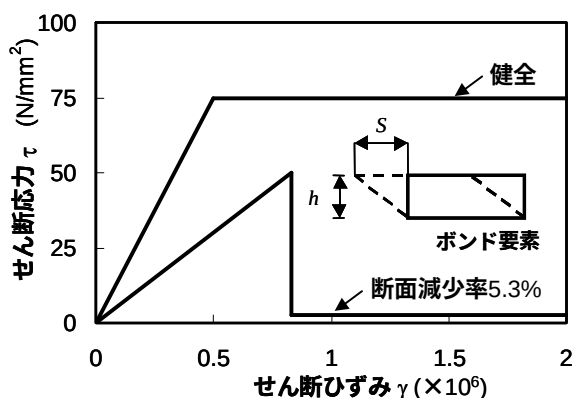


図-13 セン断ひずみとせん断応力の関係

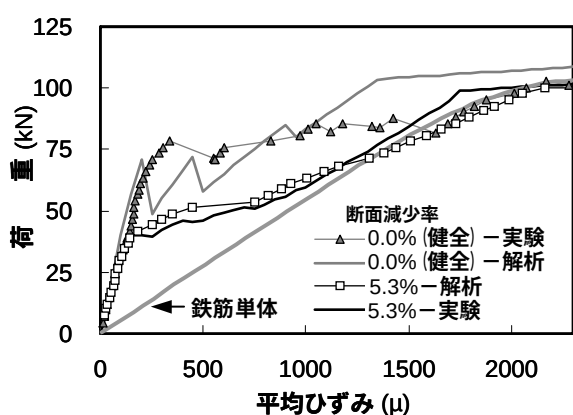


図-14 実験結果と解析結果の比較

変位（拔出し量）を S とすれば、せん断ひずみ γ は式(4)として、せん断ひずみとせん断応力との関係は式(5)として表現できる。

$$\gamma = \frac{S}{h} \quad (4)$$

$$\tau = G_s \cdot \gamma \quad (5)$$

以上の関係を基本とし、鉄筋腐食に起因する一軸引張応力下における付着劣化の定量的表現方法について検討した。この際、解析結果の荷重－平均ひずみ関係およびひび割れ発生状況が、実験におけるそれらの結果と概ね一致するように、せん断ひずみ γ とせん断応力 τ を選定した。

図-14 に、健全な試験体と腐食による断面減少率 5.3% の試験体の実験結果および解析結果における荷重－平均ひずみ関係を示す。既報告（佐藤ら，2001）によれば、部材接合部の鉄筋腐食による付着性能の低下は、せん断

弾性係数 G_s を腐食程度によって低減させることで評価可能であった。本研究では、せん断弾性係数 G_s の低減だけでは表現できず、図-13 に示すように、最大せん断応力まで達した後、せん断応力 τ を最大せん断応力の 5% まで低減し、その後一定とすることで実験結果を再現することができた。断面減少率 5.3% の場合、解析における荷重－平均ひずみ関係、およびひび割れ発生状況の解析結果が実験結果とほぼ一致するためには、健全試験体と比較して、最大せん断応力を 33%、せん断弾性係数 G_s を 60% に低減させた場合であった。

本研究では、実験値と解析値を一致させることを重視して解析を行ったが、腐食による鉄筋の断面減少率と最大せん断応力およびせん断弾性係数 G_s の低減率の一般的な関係については、今後の検討課題である。なお、健全試験体における解析値は、実験値を詳細まで再現していないが、これは計算ステップを変更することで精度を向上させることが可能であると考えられる。なお、今回の検討では、鉄筋腐食による付着性能低下の表現方法の提案に重点を置いたため、健全なコンクリートの場合の計算精度向上については言及していない。

6. 結 論

本研究では、鉄筋の腐食が鉄筋コンクリート部材の構造性能に及ぼす影響を評価する上で不可欠である、鉄筋とコンクリート間の付着劣化現象を把握するため、鉄筋が腐食した試験体の一軸引張試験を行った。さらに、得られた結果を基に、鉄筋とコンクリート間の付着性能の定量的表現方法を提案した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- 1) 腐食に起因するコンクリート表面の平均ひび割れ幅と鉄筋の断面減少率には相関があり、その程度はひび割れ開口に対する拘束筋の有無により異なった。
- 2) 鉄筋の腐食により鉄筋とコンクリート間の付着性能が低下した結果、テンションスティフニング効果が失われ、ひび割れ分散性が低下することが確かめられた。また、その低下程度は鉄筋の断面減少率に大きく依存した。
- 3) 本研究の範囲では、部材諸元が等しければ、付着破壊エネルギーはひび割れ開口に対する拘束筋の有無によらず、鉄筋の断面減少率で評価できた。
- 4) 腐食による鉄筋の断面減少の影響と鉄筋とコンクリート間の付着性能の低下を、鉄筋要素の断面減少およびボンド要素のせん断ひずみとせん断応力関係を変化させて表現する手法により、部材の荷重－ひず

み関係を精度良く評価できた。

(2002年11月15日受付)

参考文献

- 岩波光保, 横田弘, 秋本孝 (2000): 内部鉄筋が腐食した RCはりの力学性能評価のための非破壊検査手法の適用性, 港湾技研資料, No.978
- 運輸省港湾技術研究所 編著: 港湾構造物の維持・補修マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー, No.6, 沿岸開発技術センター, pp.95-97
- 佐々木淳, 丸山久一, 清水敬二, 米田直也 (1991): 鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.139-144
- 佐藤文則, 岩波光保, 横田弘 (2001): RC部材接合部の構造性能に及ぼす内部鉄筋腐食の影響, 港湾空港技術研究所資料, No.1006
- 高橋宏直, 舟橋香, 横田弘 (2002): 港湾施設の維持補修・更新費の将来推計に関する研究, 国土技術政策総合研究所資料, No.44
- 橘吉宏, 梶山康男, 川村満紀 (1989): 鉄筋腐食によって損傷をうけたRCはりの挙動に関する研究, 土木学会論文集, No.402/V-10, pp.105-114
- Qi, L., 関博 (1999): 離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1033-1038
- 土木学会 (1991): コンクリートの力学特性に関する調査研究報告, コンクリートライブラリー69, pp.37-47
- 土木学会 (2001): コンクリート標準示方書 [維持管理編]
- 日本コンクリート工学協会 (1998): 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
- 松尾洋, 五角亘, 下村匠 (2001): 鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1327-1332
- 李翰承, 友澤史紀, 野口貴文 (1996): 鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.534-539

付録A 載荷前後の試験体のひび割れ発生状況

電食により鉄筋腐食を促進させた鉄筋コンクリート試験体の腐食ひび割れ発生状況（載荷前），および載荷後のひび割れ発生状況を以下に示す．

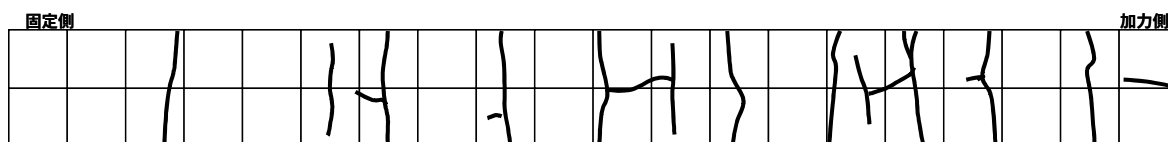
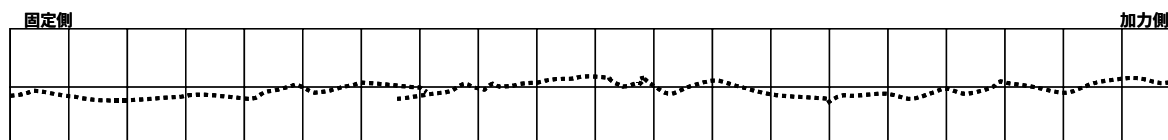
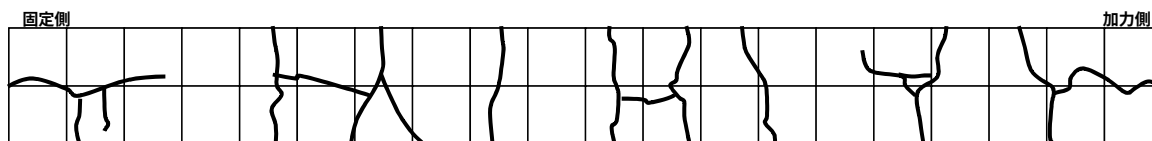


図-A.1 健全試験体のひび割れ発生状況（載荷後）

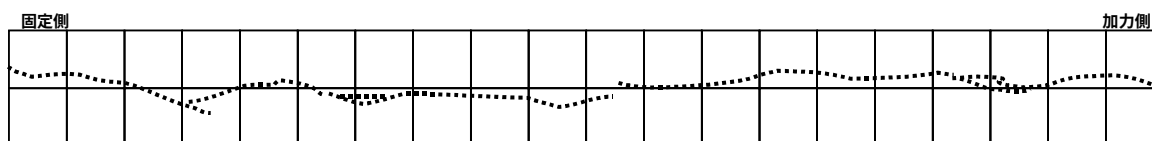


腐食によるひび割れ

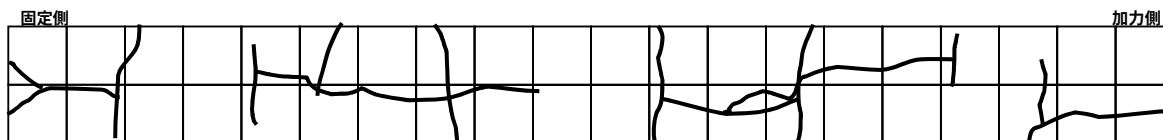


載荷によるひび割れ

図-A.2 断面減少率0.8%試験体のひび割れ発生状況



腐食によるひび割れ



載荷によるひび割れ

図-A.3 断面減少率2.5%試験体のひび割れ発生状況

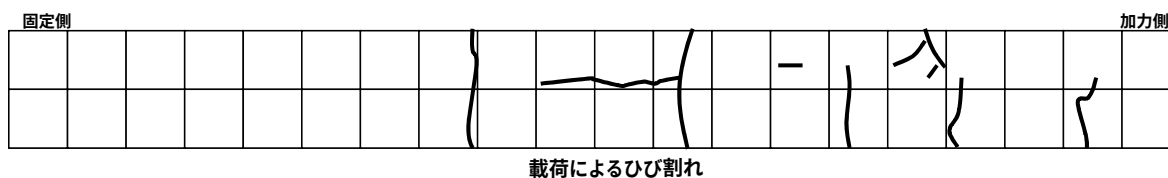
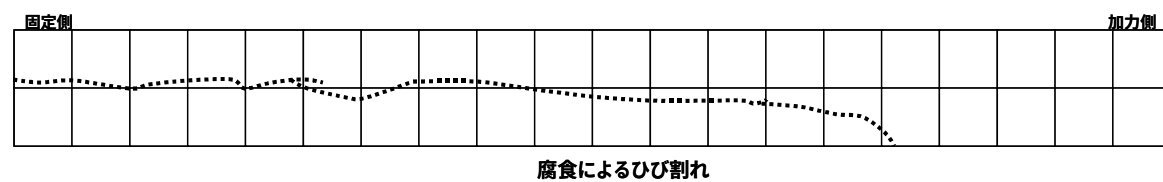


図-A.4 断面減少率2.7%試験体のひび割れ発生状況

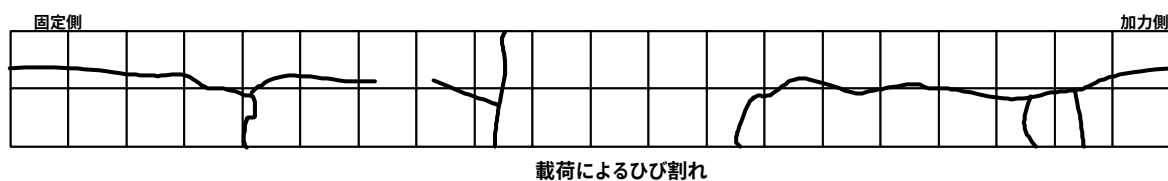
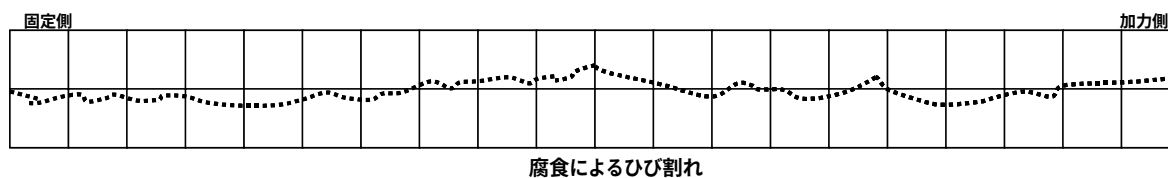


図-A.5 断面減少率5.3%試験体のひび割れ発生状況

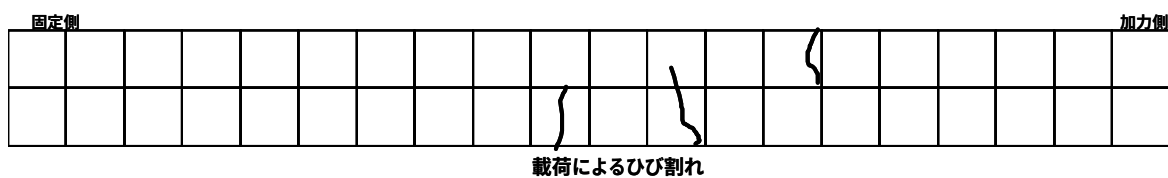
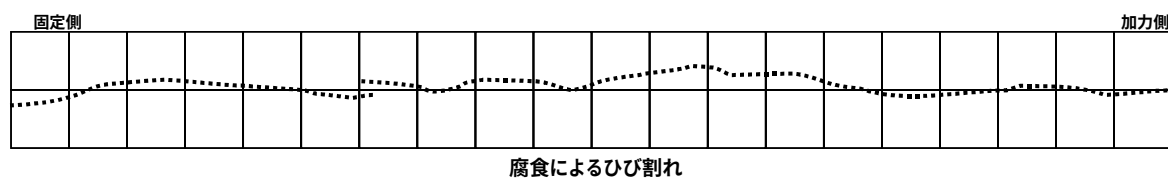


図-A.6 断面減少率10.2%試験体のひび割れ発生状況

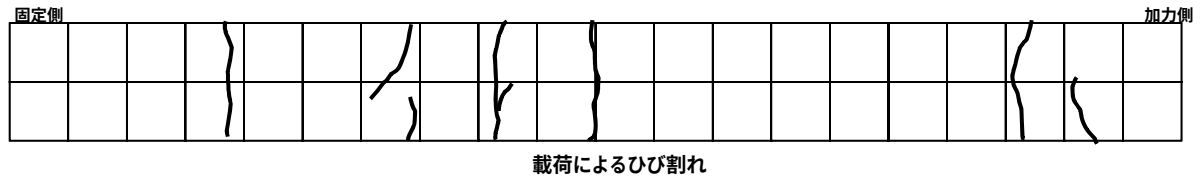
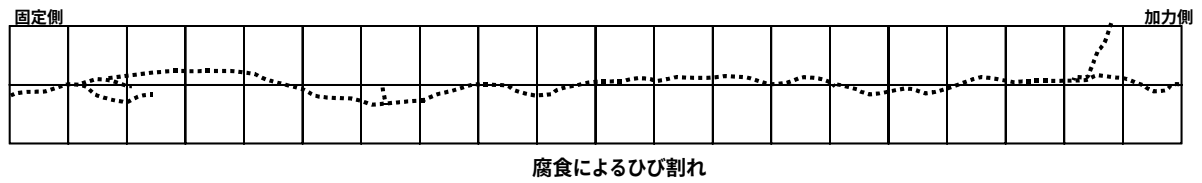


図-A.5 ひび割れ開口に対する拘束筋を有する試験体のひび割れ発生状況
(拘束筋間隔150mm, 断面減少率12.0%)

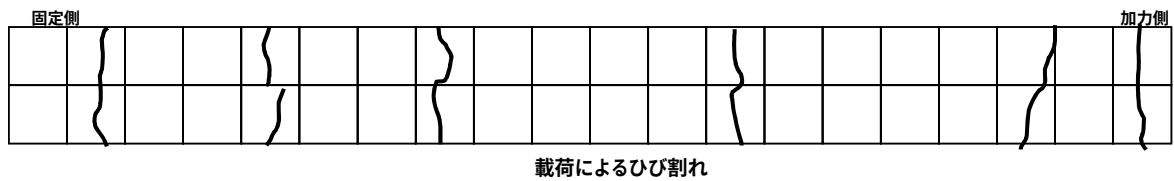
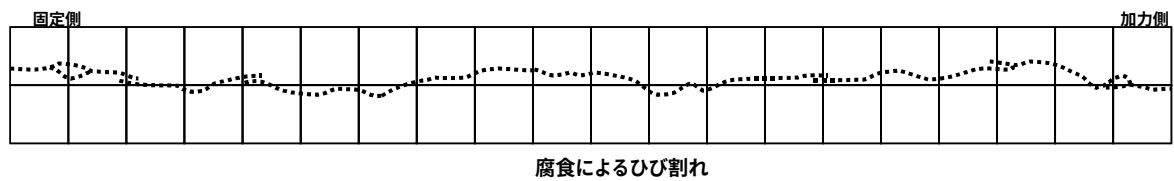


図-A.6 ひび割れ開口に対する拘束筋を有する試験体のひび割れ発生状況
(拘束筋間隔75mm, 断面減少率10.1%)

付録B 腐食ひび割れ幅および鉄筋の断面減少率データ

電食により鉄筋腐食を促進させた鉄筋コンクリート試験体の腐食ひび割れ幅、および鉄筋の断面減少率の分布状況を試験体毎に示す。また、ひび割れ開口に対する拘束筋を有する試験体については、拘束筋の断面減少率の分布もあわせて示す。

表-B.1 腐食ひび割れ幅の分布状況（ひび割れ開口に対する拘束筋が無い試験体）

平均断面減少率 (%)		0.8	2.5	2.7	5.3	10.2
平均ひび割れ幅 (mm)		0.16	0.35	0.47	0.91	1.32
標準偏差		0.03	0.08	0.07	0.17	0.19
測定領域 (mm)		ひび割れ幅 (mm)				
加力側	0 ~ 100	0.15	0.38	0.25	0.75	0.95
	100 ~ 200	0.18	0.35	0.40	0.85	1.15
	200 ~ 300	0.20	0.30	0.38	0.95	1.35
	300 ~ 400	0.18	0.28	0.40	0.95	1.40
	400 ~ 500	0.18	0.35	0.43	0.90	1.40
	500 ~ 600	0.18	0.40	0.48	0.95	1.45
	600 ~ 700	0.15	0.40	0.53	1.00	1.45
	700 ~ 800	0.15	0.43	0.53	1.00	1.50
	800 ~ 900	0.15	0.43	0.53	0.95	1.55
	900 ~ 1000	0.18	0.37	0.48	0.95	1.35
	1000 ~ 1100	0.18	0.35	0.45	1.00	1.25
	1100 ~ 1200	0.13	0.38	0.50	1.00	1.60
	1200 ~ 1300	0.13	0.38	0.45	0.95	1.65
	1300 ~ 1400	0.15	0.36	0.41	0.90	1.30
	1400 ~ 1500	0.15	0.36	0.43	0.90	1.30
	1500 ~ 1600	0.13	0.33	0.50	0.83	1.30
	1600 ~ 1700	0.10	0.27	0.55	0.73	1.15
	1700 ~ 1800	0.10	0.22	0.53	0.60	1.15
	1800 ~ 1900	0.10	0.20	0.53	0.50	1.25
固定側	1900 ~ 2000	0.10	0.15	0.48	0.45	1.00

表-B.2 鉄筋の断面減少率の分布状況（ひび割れ開口に対する拘束筋が無い試験体）

平均断面減少率 (%)		0.8	2.5	2.7	5.3	10.2
標準偏差		0.44	0.60	0.53	0.98	1.88
測定領域 (mm)		断面減少率 (%)				
加力側	0 ~ 100	1.10	2.36	2.86	2.54	9.56
	100 ~ 200	1.24	3.80	3.83	4.56	11.85
	200 ~ 300	1.16	3.98	2.70	5.61	11.65
	300 ~ 400	1.05	2.76	1.54	5.59	11.05
	400 ~ 500	1.04	3.56	1.60	5.81	13.48
	500 ~ 600	0.94	3.20	2.73	4.25	12.34
	600 ~ 700	0.65	3.47	2.71	4.65	10.89
	700 ~ 800	0.52	2.71	1.95	5.46	9.57
	800 ~ 900	0.65	2.90	2.48	4.84	10.37
	900 ~ 1000	0.83	1.67	2.48	6.58	10.03
	1000 ~ 1100	0.04	1.81	2.79	6.60	9.50
	1100 ~ 1200	0.09	2.51	2.98	6.71	9.01
	1200 ~ 1300	0.34	2.86	3.26	5.36	8.90
	1300 ~ 1400	0.31	2.89	2.18	5.71	11.43
	1400 ~ 1500	0.14	2.71	2.17	5.28	15.04
	1500 ~ 1600	0.46	2.44	2.52	5.57	9.94
	1600 ~ 1700	0.55	2.54	2.25	5.31	8.24
	1700 ~ 1800	0.89	2.44	2.10	5.06	7.85
	1800 ~ 1900	1.04	3.08	2.39	6.88	9.72
固定側	1900 ~ 2000	1.71	2.40	2.33	5.04	7.45

表-B.3 腐食ひび割れ幅および主鉄筋の断面減少率の分布状況（ひび割れ開口に対する拘束筋を有する試験体）

拘束筋間隔		150mm		75mm	
		ひび割れ幅(mm)	断面減少率(%)	ひび割れ幅(mm)	断面減少率(%)
平均値		0.47	12.0	0.45	10.1
標準偏差		0.06	3.83	0.06	3.51
測定領域(mm)					
加力側	0 ~ 100	0.50	6.29	0.33	7.29
	100 ~ 200	0.48	13.33	0.38	13.07
	200 ~ 300	0.50	12.15	0.41	9.58
	300 ~ 400	0.50	10.90	0.46	6.36
	400 ~ 500	0.48	8.77	0.48	5.41
	500 ~ 600	0.48	7.80	0.48	10.16
	600 ~ 700	0.53	6.86	0.50	13.84
	700 ~ 800	0.58	6.05	0.55	17.11
	800 ~ 900	0.53	10.13	0.50	12.63
	900 ~ 1000	0.48	17.40	0.43	7.96
	1000 ~ 1100	0.48	19.40	0.43	7.94
	1100 ~ 1200	0.48	18.01	0.50	10.32
	1200 ~ 1300	0.48	13.57	0.53	17.45
	1300 ~ 1400	0.45	13.15	0.50	10.72
	1400 ~ 1500	0.40	9.15	0.48	7.96
	1500 ~ 1600	0.40	11.21	0.45	10.00
	1600 ~ 1700	0.43	14.48	0.40	11.06
	1700 ~ 1800	0.42	13.41	0.37	9.30
	1800 ~ 1900	0.35	14.92	0.39	15.15
	1900 ~ 2000	0.38	10.91	0.37	5.75
固定側					

表-B.4 ひび割れ開口に対する拘束筋の断面減少率の分布状況

拘束筋間隔		150mm		75mm	
		測定位置(mm)	断面減少率 (%)	測定位置(mm)	断面減少率 (%)
加力側		100	53.24	63	34.10
		250	32.85	138	6.62
		400	10.74	213	10.44
		550	7.48	288	3.50
		700	17.11	363	4.11
		850	4.51	438	4.45
		1000	56.61	513	18.96
		1150	26.12	588	9.53
		1300	60.92	663	21.78
		1450	3.48	738	38.13
		1600	44.77	813	12.34
		1750	38.31	888	5.13
				963	2.61
				1038	8.46
固定側		1900	51.11	1113	2.63
				1188	21.84
				1263	46.04
				1338	12.34
				1413	6.48
				1488	9.57
				1563	29.55
				1638	6.86
				1713	7.55
				1788	8.63
				1863	44.68
				1938	4.00