

論文 腐食による鉄筋の断面減少が付着性状へ及ぼす影響

保坂 剛^{*1}・八十島 章^{*2}・大屋戸 理明^{*3}・金久保 利之^{*4}

要旨：腐食した鉄筋コンクリート部材の構造性能の評価に関し、付着性状を把握することは重要な項目である。既往の研究では、鉄筋の質量減少率により付着強度が評価されているが、質量減少率は平均的な指標であり、局所的に生じる断面減少が全体の付着特性に及ぼす影響についての検討は行われていない。そこで、本論文では、鉄筋腐食による断面減少を切削により模擬した鉄筋を用いて実験を行い、断面減少した鉄筋の局所付着性状を把握し、付着応力-すべり量関係および鉄筋のひずみ分布について解析結果との比較検討を行い、鉄筋の断面減少が付着性状へ及ぼす影響について検討した。

キーワード：腐食, 断面減少, 模擬腐食鉄筋, 付着応力, すべり, 局所性状, 片引き試験

1. はじめに

コンクリートの中性化や塩害に起因する鉄筋腐食は鉄筋コンクリート構造物（以下、RC）の代表的な劣化要因の一つとして挙げられる。長期間供用されてきた RC 構造物においては、腐食による劣化が少なからず生じていると予測され、腐食の程度によっては補修・補強が必要となる。その要否の判断に際し、腐食の程度を把握することに加え、腐食による構造性能の低下の程度を把握しておくことも重要である。鉄筋腐食による構造性能の低下を定量的に評価することを目的として種々の研究がなされており、特に、腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状を対象とした研究に着目すると、電食や自然暴露により、コンクリート中の鉄筋を腐食させた試験体を用い、実験的な付着性状の評価が試みられている^{例え¹}。それらの研究では、鉄筋の質量減少率（試験区間における元の質量に対する腐食による質量減少）を腐食の評価指標として主に用い、付着強度を評価している。結果として、鉄筋の質量減少率の増加に伴い、付着強度が低下することは確認できている。しかし、質量減少率という平均的な捉え方に対し、鉄筋腐食は不均一に進行しており、孔食などにより生じる局所的な腐食が全体の付着特性にどの程度影響を及ぼすかといった、試験体細部での現象が全体の付着特性へ及ぼす影響についての検討には至っていない。その原因として、電食や自然暴露のように実際に鉄筋を腐食させる方法では、腐食の程度や位置をコントロールすることが困難であること、また腐食による鉄筋の断面減少とともに、腐食生成物の体積膨張に伴って内部ひび割れが発生するといったように腐食のメカニズムが複雑であることも起因していると考えられる。

そこで本論文では、腐食による付着劣化の原因の一つ

と想定される鉄筋の断面減少のみに着目し、局所腐食を伴う腐食鉄筋の断面減少を鉄筋を切削することにより模擬し、片引き試験を行う。実験より鉄筋の断面減少の付着性状への寄与を明確にすることで、鉄筋の腐食が付着性状へ及ぼす影響を把握するための足掛かりを築くことを目的とする。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の概要を図-1 に示す。試験体は断面が 128×300mm、高さが 288mm のコンクリートブロックの中心に異形鉄筋 D16 (SD345) を 1 本埋め込んだ片引き試験体である。かぶり厚は 56mm (鉄筋径の 3.5 倍)、試験区間は 240mm (鉄筋径の 15 倍) とし、荷重端側および自由端側には付着絶縁区間として 24mm (鉄筋径の 1.5 倍) の塩ビパイプを設けた。

試験体は 11 体で、1 体のみ健全鉄筋を用い、他の 10 体は鉄筋を切削し、腐食による断面欠損を切削により模擬した模擬腐食鉄筋を用いた。

また、試験体に用いたコンクリートの配合を表-1 に、使用した骨材の諸元を表-2 に示す。なお、目標強度は 24N/mm² とし、レディーミクストコンクリートのプラン

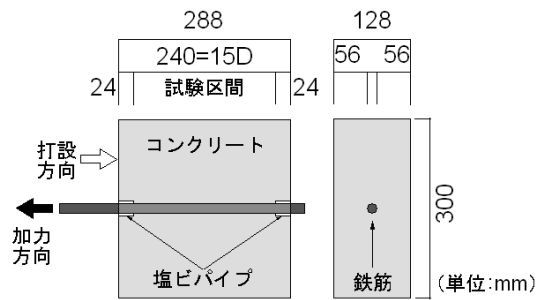


図-1 試験体概要

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (正会員)

*2 広島大学大学院 工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 コンクリートの配合計画およびフレッシュ性状

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
	水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤		
72	185	257	924	881	2.57	15.8	4.5

表-2 使用骨材

骨材	種類	産地	密度(g/cm ³)	吸水率(%)
細骨材	砂	栃木県栃木市尻内町	2.61	1.67
粗骨材	碎石	栃木県栃木市尻内町	2.63	1.36

トの配合に従った。試験体加力時材令の圧縮強度は 23.8N/mm²、割裂強度は 2.36N/mm² であり、弾性係数は 25.3kN/mm² であった。また、ブリージング量は計測していないが、図-1 に示すように鉄筋軸方向に打設し、ブリージングが付着性状へ影響を及ぼさないようにした。

2.2 模擬腐食鉄筋

実験に使用した異形鉄筋の形状を図-2 に、模擬腐食鉄筋の概要を図-3 に示す。模擬腐食鉄筋はかぶり面側から腐食が生じる鉄筋を想定し、コンクリート中の腐食のばらつきを模擬するため、全体に平面切削する部分（以下、一次切削部）と局部的に曲面切削する部分（以下、二次切削部）を設け、片面を切削している。各試験体に用いた模擬腐食鉄筋は切削の程度や位置を変動因子としており、表-3 に各試験体の鉄筋の一覧を示す。なお、切削の程度については、鉄筋の公称断面積に対する断面積の減少率で計画した。

試験体 No.1 は健全鉄筋を、No.2 から No.4 は一次切削部のみを設けた鉄筋を用いた。一次切削部の断面減少率は 10%、20%および 30%の 3 水準とし、二次切削部については、既往の研究²⁾で調査された実構造物中の腐食鉄筋の断面積分布を基に、最大断面減少率が平均断面減少率の 2 倍となるものを基準とし、No.6 および No.7 については、それぞれ 4 倍および 6 倍とし、局部腐食の程度の違いの及ぼす影響を検討するようにした。また、二次切削部を設けた鉄筋については、No.5 から No.9 は図-3 に示すように、試験区間の中央から荷重端側および自由端側それぞれに 40mm の位置が最深部となるように二次切削部を 2 ヶ所設けた。また、片引き試験では荷重端側と自由端側では荷重の差が大きい。その荷重条件の違いを考慮するため、No.10 および No.11 は No.8 と等しい断面減少率とし、二次切削部の位置を No.8 に対して、No.10 は荷重端側に 40mm、No.11 は自由端側に 40mm ずらした位置に設けた。

なお、腐食による付着切れを模擬するため、切削面にはゴム製のテープを貼付し、切削による凹みを埋めるようにした。

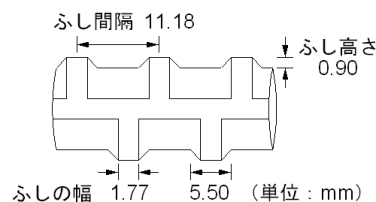


図-2 鉄筋形状

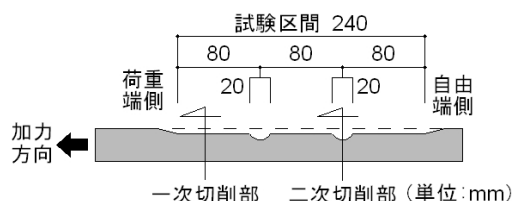


図-3 切削鉄筋概要

表-3 各試験体の鉄筋一覧

試験体 No.	断面減少率		二次切削部の位置 (荷重端から)
	一次切削部	二次切削部	
1	なし		-
2	10%	なし	
3	20%	なし	
4	30%	なし	
5	10%	20%	中央部 80,160mm
6	10%	40%	
7	10%	60%	
8	20%	40%	
9	30%	60%	
10	20%	40%	荷重端側 40,120mm
11	20%	40%	自由端側 120,200mm

2.3 模擬腐食鉄筋の力学特性

(1) 引張試験方法

模擬腐食鉄筋の力学特性を評価するため、健全鉄筋および試験体 No.5 から No.9 に用いた模擬腐食鉄筋について引張試験を行った。試験状況を図-4 に示す。引張試験は試験区間と等しい間隔 (240mm) となるように鉄筋にターゲットを取り付け、変位計により区間伸びを計測した。また同時に、ゲージ長 2mm のひずみゲージにより局所ひずみも計測した。なお、ひずみゲージは健全鉄筋については、試験区間の中央部に表裏 1 枚ずつ計 2 枚貼付し、模擬腐食鉄筋については、図-5 に示すように、

試験区間を6等分する位置に表裏1枚ずつ（切削面およびリブ上）計10枚貼付した。

(2) 引張試験結果

健全鉄筋の力学特性を表-4に示す。また、引張試験より得られた模擬腐食鉄筋の応力-ひずみ関係を図-6に示す。なお、縦軸は引張荷重を公称断面積で除した応力、横軸は変位計で計測した区間伸びを検長で除したひずみである。

また、図-6には解析による結果も合わせて示す。なお、解析は腐食鉄筋の力学モデル³⁾を用いて行った。用いた力学モデルは、微小区間（本論では1mm）の両端に引張力が作用した場合のひずみを、素材自体の σ - ϵ 関係とその区間の断面積から求め、ひずみと区間長の積から算出される微小区間での伸びを試験区間全体で積算して伸びを求めるものである。1ヶ所でも局所的に引張強度に達した段階で、鉄筋が破断したと判断し解析を終了する。このモデルでは、弾性限界および引張強度は最小断面積に支配される。なお、素材自体の σ - ϵ 関係には、健全鉄筋より得られた σ - ϵ 関係を適用している。

実験結果と解析結果を比較すると、切削が大きくなるにつれて、弾性限界には差が見られてくる。模擬腐食鉄筋は片面を切削しているため、切削の大きい断面では、断面の重心と加力軸がずれることにより曲げが生じ、同一断面内でも降伏している部分と弾性域にある部分が混在している。一方、解析では曲げの影響を考慮していないため弾性限界に差が生じたと考えられる。このよう

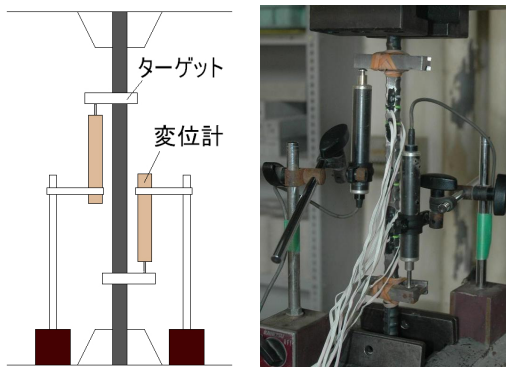


図-4 鉄筋の引張試験状況

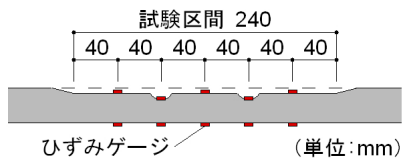


図-5 模擬腐食鉄筋のひずみゲージ貼付位置

表-4 健全鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
D16 (SD345)	352.3	513.9	192.3

に、若干の相違は見られるものの、全体としては解析結果は実験結果と比較的良好な対応を示しており、模擬腐食鉄筋の力学特性を評価することができる。

2.4 実験方法

加力方法を図-7に示す。加力は試験体のかぶりを拘束しないようかぶりと同じ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った。

計測項目は引張荷重、荷重端すべり量、自由端すべり量および鉄筋のひずみである。なお、鉄筋に貼付したひずみゲージについては、2.3の引張試験の際と同様に、図-5のように貼付した。

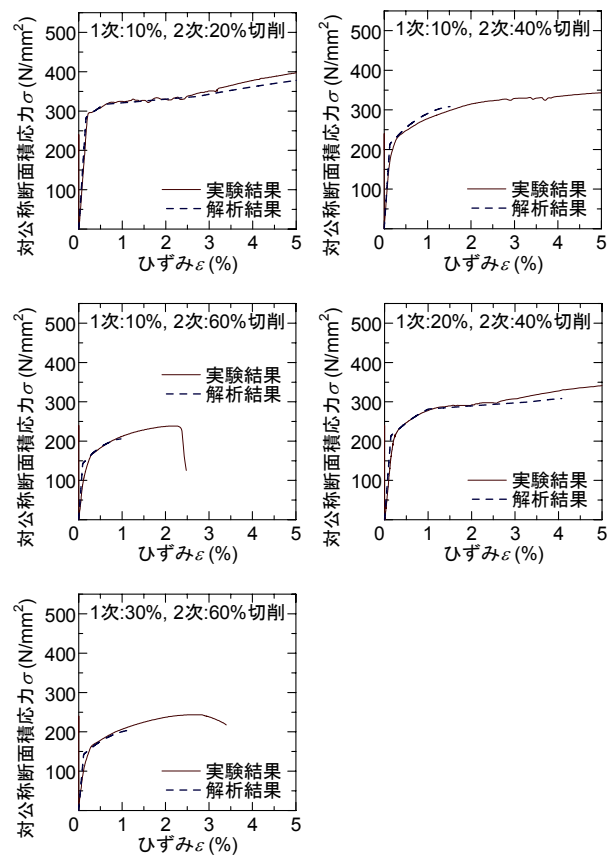


図-6 模擬腐食鉄筋の応力-ひずみ関係

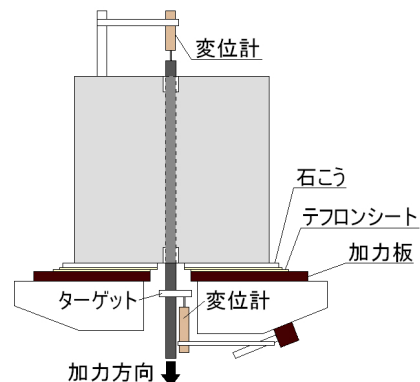


図-7 加力方法

3. 実験結果

3.1 断面減少した鉄筋の局所付着性状

試験体 No.1 から No.4 について、鉄筋のひずみ分布より算出した各ゲージ位置での付着応力-すべり量関係（以下、 τ - s 関係）を図-8 に示す。なお、付着応力は式(1)より求めた。鉄筋の応力はひずみと素材自体の σ - ε 関係より算出しており、鉄筋降伏以後の付着応力の算出も可能となっている。

$$\tau = \frac{1}{\phi} A_s \frac{d\sigma}{dx} \quad (1)$$

ここで、 τ : 付着応力、 ϕ : 鉄筋の周長、 A_s : 鉄筋の断面積、 $d\sigma/dx$: 応力分布の傾きである。なお、鉄筋の断面積は断面減少を考慮した断面積とし、周長は断面を真円と仮定し、断面減少を考慮した断面積より算出した値である。

また、すべり量は自由端から各位置までのひずみの積分値を自由端すべり量に加えたものである。

No.2 から No.4 の模擬腐食鉄筋を用いた試験体では、各位置によって τ - s 関係にばらつきが見られるが、位置による τ - s 関係に違いはないものと仮定し、解析に用いる τ - s 関係をモデル化する。構成則には式(2)および式(3)に示す六車ら⁴⁾のモデルを用いた。

$$\tau_{x1} = e \cdot \frac{\log[(e-1)s_{x1} + 1]}{(e-1)s_{x1} + 1} \quad (2)$$

$$\tau_{x1} = \frac{\tau_x}{\tau_{\max}}, \quad s_{x1} = \frac{s_x}{s_{\tau=\tau_{\max}}} \quad (3)$$

なお、最大付着応力 τ_{\max} および最大付着応力時のすべり量 $s_{\tau=\tau_{\max}}$ の値については、図-8 にプロットで示した各位置での最大付着応力のうち、明瞭なデータが得られなかった荷重端から 40mm および、軟化域の見られなかった荷重端から 200mm の位置を除いた 3 点（荷重端から 80mm, 120mm, 160mm）での平均値とした。モデルを図-8 に示す。また、各モデルの最大付着応力および最大応力時すべり量を表-5 に示す。模擬腐食鉄筋の最大付着応力は、断面減少の増大に伴い減少している。また、最大応力時のすべり量は、健全鉄筋と比較して増大する傾向が見られる。

3.2 平均付着応力-荷重端すべり量関係

各試験体の平均付着応力-荷重端すべり量関係を図-9 に示す。縦軸は引張荷重を公称周長と試験区間長で除した値であり、横軸は荷重端すべり量の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。

No.1, No.7 および No.10 は付着割裂ひび割れが発生し、割裂破壊により試験を終了した。また、No.9 は二次切削部の鉄筋破断、その他の試験体は鉄筋の引抜けにより試験を終了し、付着割裂ひび割れは発生しなかった。

実験結果に関して、一次切削部の違いについて、No.1 から No.4 に着目すると、概ね断面減少率の増大に比例して、降伏が開始する付着応力の低下や初期剛性の低下が見られる。しかし、一次切削部が等しく、二次切削部の異なる No.2, No.5, No.6 および No.7 を比較すると、No.2, No.5 および No.6 がほぼ同様の関係を示しているのに対し、局所的な断面減少率の大きい No.7 では付着応力の低下が顕著に見られる。したがって、付着応力が平均的な断面減少率に必ずしも依存しているとは言い難い。また、断面減少率が等しく、二次切削部の位置のみが異なる No.8, No.10 および No.11 を比較すると、荷重端側に二次切削部を設けた No.10 の付着応力が他の 2 体に比べ低くなっており、断面分布の違いが全体の付着特性へ影響を及ぼし得ることが確認できる。

また、図-9 には解析結果も合わせて示す。解析方法については、式(4)~式(6)に示すように、微小区間での力の釣り合いを考え、逐次計算を行った。

$$\tau_x = f(s_x) \quad (4)$$

$$P_{sx,i+1} = P_{sx,i} + \tau_{x,i} \cdot \phi \cdot dx \quad (5)$$

$$s_{x,i+1} = s_{x,i} + \frac{\varepsilon_{sx,i+1} + \varepsilon_{sx,i}}{2} \cdot dx \quad (6)$$

ここで、 P : 鉄筋引張力、 ε : 鉄筋のひずみである。な

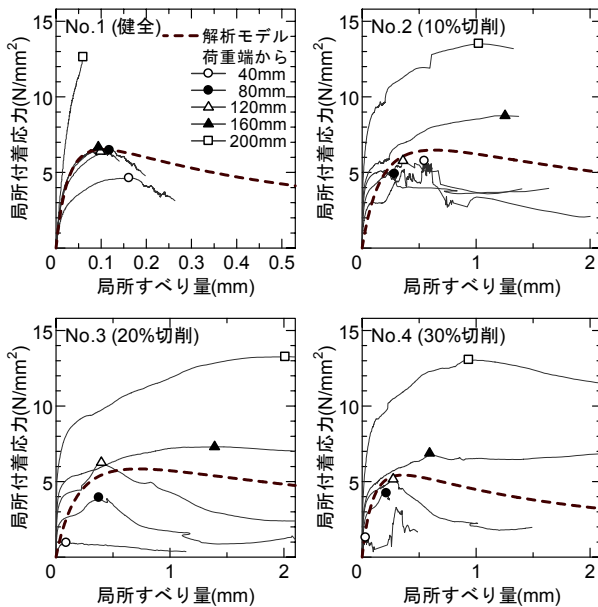


図-8 模擬腐食鉄筋の局所付着性状

表-5 解析モデルの最大付着応力およびすべり量

試験体	最大付着応力 τ_{\max} (N/mm ²)	最大付着応力時の すべり量 $s_{\tau=\tau_{\max}}$ (mm)
No.1	6.52	0.103
No.2	6.48	0.632
No.3	5.83	0.722
No.4	5.43	0.359

お、鉄筋の断面積および周長は、2.3の鉄筋引張試験の際と同様に、断面減少を考慮した値を用いた。また、解析に用いた付着構成側は、各試験体の模擬腐食鉄筋の一次切削部に応じて、3.1で定義した τ - s 関係をそれぞれ対応させた。

鉄筋の降伏以前は、若干の誤差が見られるものもあるが、概ね解析値は実験値を評価できている。また、鉄筋の降伏以後については、解析では最大付着応力を示した時点で鉄筋の引抜けが生じている。一方、実験では、鉄筋がひずみ硬化域に達し、さらに付着強度が増加している試験体もあり解析とは一致していない。本解析では鉄筋の降伏以前以後に関らず付着構成則を統一しているが、降伏後も降伏前と同じ局所付着性状を有しているかについては明らかではない。

3.3 鉄筋のひずみ分布

図-10に鉄筋のひずみ分布の推移を平均付着応力 1 N/mm^2 毎にプロットで示す。グラフの横軸は試験区間の位置を示し、左端が荷重端、右端が自由端である。No.7、No.9およびNo.10を除く試験体については、荷重端でのひずみが最も進行している。一方、No.7、No.9およびNo.10については、二次切削部でのひずみが最も進行しており、二次切削部での鉄筋の降伏が3.2で述べたような他の試験体に比べ付着強度が低下したことに寄与したと考えられる。

また、解析結果も合わせて図-10に実線で示す。なお、解析結果も実験結果と同様に、 1 N/mm^2 毎に示している。一次切削部については、実験値と解析値が比較的良好な対応を示している。一方、二次切削部については、段階が進むにつれ、実験値が解析値よりも大きくなる傾向が見られる。この原因として、解析では一次切削部に応じて付着構成則を決定し、二次切削部ではその付着構成則に断面減少を考慮することで解析を行っているが、3.1からも分かるように、局所付着性状は断面減少の違いにより相違しており、一次切削部と二次切削部の局所付着性状に違いがあるためと考えられる。しかし、No.7やNo.9のように断面減少が極端に大きいものを除けば、全体の付着特性は荷重端での鉄筋の降伏により決定しており、局所的な断面減少が全体の付着特性へ与える影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

本論文では、腐食による付着劣化の原因の一つと想定される鉄筋の断面減少に着目し、付着性状への寄与を明確にすることで、鉄筋の腐食が付着性状へ及ぼす影響を把握するための足掛かりを築くことを目的とした。腐食鉄筋の断面減少を切削により模擬した鉄筋を用いて、片引き試験を行い、実験結果と解析結果の比較検討を行っ

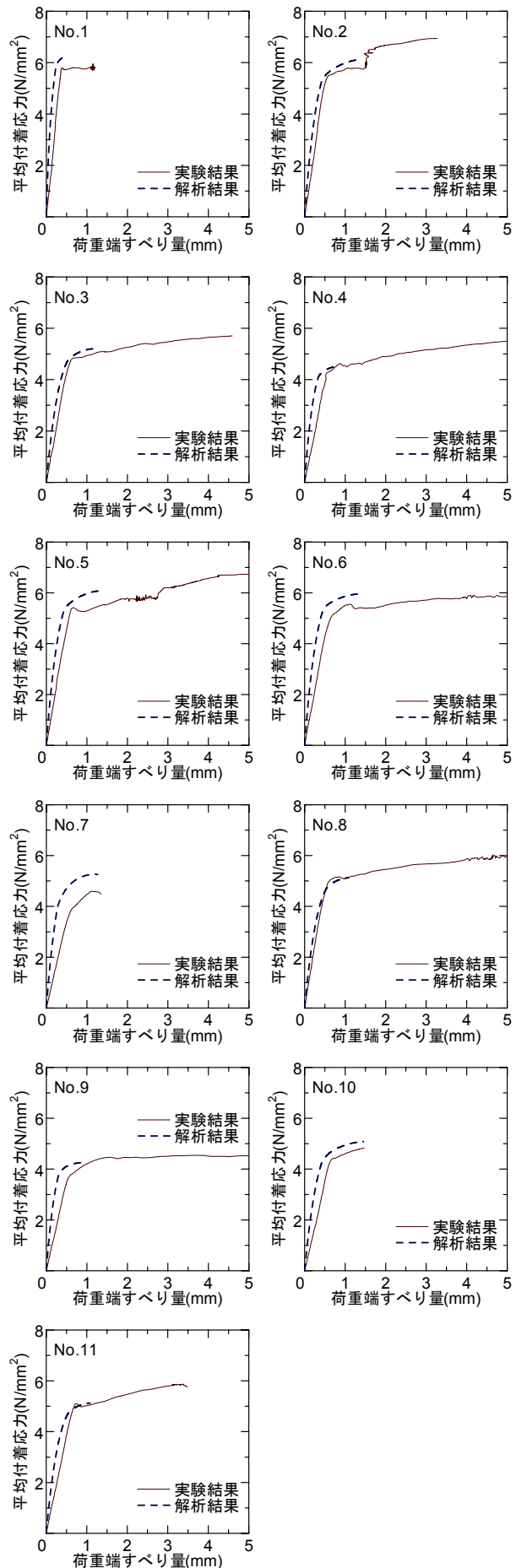


図-9 平均付着応力-荷重端すべり量関係

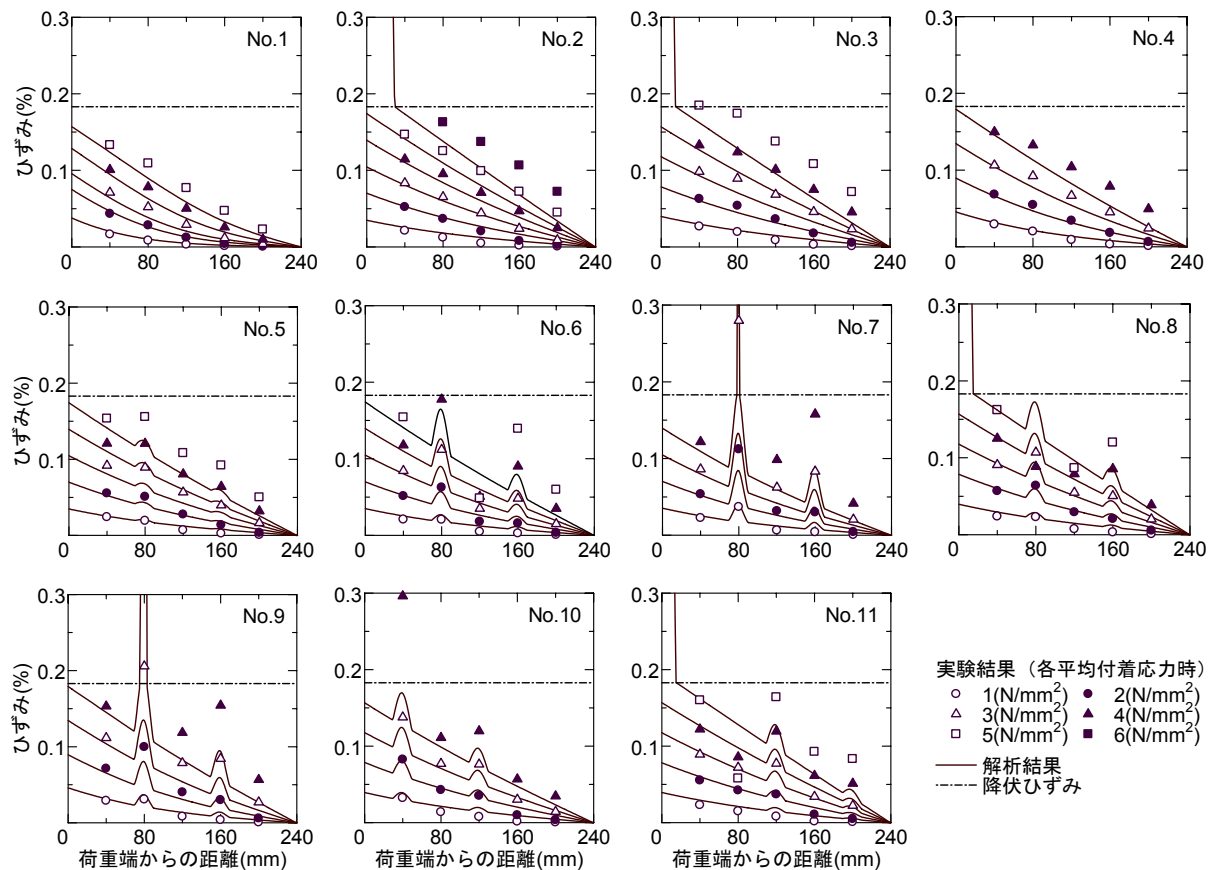


図-10 鉄筋のひずみ分布

た。以下に得られた知見を示す。

- (1) 局所付着性状は断面減少の増大に伴い、概ね最大付着強度は減少し、最大付着強度時のひずみは増大する傾向が見られた。
- (2) 鉄筋のひずみ分布より算出した局所付着性状を用いて、平均付着応力-荷重端すべり量関係を概ね評価することが出来た。
- (3) 断面減少が極端に大きいものを除けば、局所的な断面減少が全体の付着特性に与える影響は小さいことを確認した。

謝辞

本研究は、科学研究費補助金基盤研究(C)課題番号 20560457 (腐食したコンクリート部材の付着割裂メカニズムの解明) の助成を受けた。

参考文献

- 1) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, 663~668, 1991
- 2) 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, pp.143~155, 2007.3
- 3) 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, pp.542-554, 2006
- 4) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (I 付着応力分布について) - (II), 日本建築学会論文報告集, No.132, pp.1~6, 1967.2