

論文 断面修復工法により補修した腐食を有する鉄筋定着部の力学性能

酒井 舞^{*1}・松本 浩嗣^{*2}・森 誠^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨：本研究では、腐食を有する鉄筋定着部の補修方法を検討するため、腐食の有無、補修の有無、補修材の種類を実験パラメータとして、断面修復を施した腐食を有する鉄筋定着部の引抜き試験を行った。実際の構造物中の応力状態を再現するため、はり型の引抜き試験を採用した。実験の結果、補修材の強度、短繊維の有無、シリカフュームの有無が、鉄筋と補修材の付着特性および界面の接着性状に大きく影響することが分かった。ビニロン繊維とシリカフュームを併用することにより、腐食発生前と同程度まで定着部の力学性能を向上させることができた。

キーワード：補修、断面修復工法、定着部、付着性状、鉄筋腐食、PVA 繊維、シリカフューム

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート (RC) 構造物の多くがその設計耐用年数を迎えようとしており、鉄筋腐食、アルカリ骨材反応、凍害等の劣化問題が顕在化してきている。現在、このような劣化した構造物に対しては、使用性能・美観の保持、劣化の防止といった観点から補修が行われているが、補修した RC 構造物の構造性能に関する研究は十分になされていないのが現状である。

一方、RC 構造物が十分な構造性能を発揮するためには、定着の確保が重要であることが、既往の研究によって示されている¹⁾。実構造物に目を向けると、RC はり部材における劣化はスパン内に限らず、定着部にも同様に起こり得る。しかし、定着部に損傷を有する部材の耐荷性能に関する研究は十分ではない。また、その補修方法を開発することも急務の課題となっている。

そこで本研究では、腐食を有する鉄筋定着部の力学性能を把握すること、またその補修方法を開発することを目的に、腐食の有無、補修の有無、補修材の種類をパラメータとして、断面修復を施した腐食を有する鉄筋定着部の引抜き試験を行った。高強度モルタルや、ビニロン (PVA) 繊維、シリカフュームを使用したモルタルによる鉄筋定着部の補修効果を検討した。

2. 試験概要

2.1 コンクリート示方配合

表-1 に、供試体作製に用いたコンクリートの配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。

2.2 供試体概要

図-1 に、載荷試験の概要図を示す。本研究では、実構造物におけるはりの定着部を模擬するために、はり型の載荷試験治具を用いた。載荷点と支点の間に働く曲げモーメントにより、試験区間の鉄筋に引抜き力が作用する。図-2 に試験区間の詳細を、表-2 に供試体の諸元を示す。定着形状は直線形とし、供試体端から 50mm のアンボンド区間を設けており、定着長は 350mm となっている。表-3 に鉄筋の力学特性を示す。また、供試体の側面、下面のかぶり厚はそれぞれ 34mm, 42mm である。

2.3 載荷試験および計測項目

載荷には、油圧式 2000kN 万能試験機を用いた。支点と供試体の間には減摩パッドを挿入することで、支点の拘束による水平反力を除去した。載荷試験における計測項目は、鉄筋の軸方向ひずみ、自由端すべりおよび付着ひび割れ幅である。なお、ひずみゲージは、アンボンド端から 50mm 間隔で貼付し、アンボンド区間にも 1 箇所貼付した。また、所定の荷重において、デジタルカメラにより供試体表面を撮影した。

表-1 コンクリートの配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
20	60	45	177	296	838	963	0.443

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

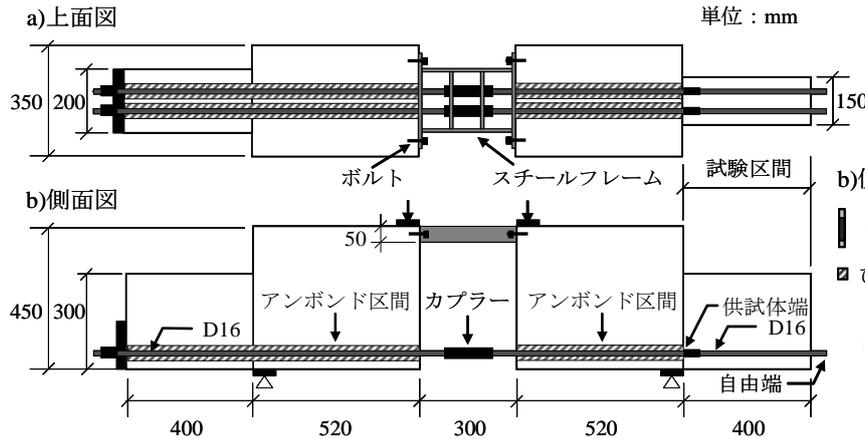


図-1 はり型引抜き荷試験の概要図

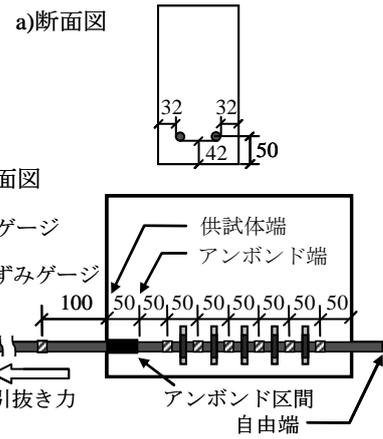


図-2 試験区間の詳細

表-2 供試体諸元

軸方向鉄筋断面積 (mm ²)	引張鉄筋比 (%)	幅 (mm)	有効高さ (mm)
198.6	1.06	150	250

表-3 鉄筋の力学特性

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
341	484	197

表-4 補修モルタルの配合

配合名	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント	シリカフューム	細骨材	PVA	AE 減水剤	高性能減水剤
N	60	283	472	—	1315	—	0.707	—
H	20	225	1011	112	1006	—	—	33.7
NF	60	283	472	—	1325	19.5	0.707	—
SF	60	281	422	47	1317	19.5	0.703	—

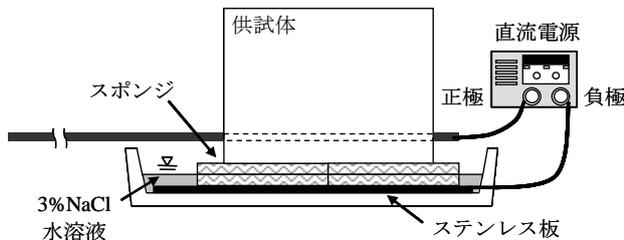


図-3 電食試験の概要図

2.4 腐食促進試験方法

本研究では、軸方向鉄筋に腐食を生じさせるため、材齢 7 日目から電食試験を実施した。図-3 に電食試験の概要図を示す。電食試験では軸方向鉄筋を陽極、ステンレス板を陰極側とした。また、供試体全体に腐食を導入するため、3%NaCl 水溶液に浸したスポンジを供試体底面に接触させた²⁾。

2.5 補修方法

本研究では、断面修復工法³⁾により補修を行った。一般的な断面修復工法の施工フローに基づき、以下に示す手順で、断面修復を行った。

(1) 腐食領域のコンクリートの除去

実構造物における断面修復工法においては、かぶりコ

ンクリートのはつり後、腐食生成物を取り除くため、腐食した鉄筋を完全に露出させる必要がある。本研究では、実際のはりの補修を模擬するため、鉄筋と母材コンクリートとの間に 20mm 以上の空気を確保した。

(2) 腐食生成物の除去

露出した鉄筋を 10%クエン酸水素二アンモニウムに常温で 2 日間浸漬することで、腐食生成物を除去した。

(3) プライマー処理

母材と補修材の界面の接着性を確保するために、補修材の埋め戻しの 24 時間前にはつり面にプライマーを塗布した。

(4) 埋め戻し

電食試験終了後の材齢 14 日目に埋め戻しを行った。埋め戻し材にはセメントモルタルを用いた。モルタルの配合は 4 種類であり、普通強度 (配合名: N)、高強度 (H)、配合 N にビニロン繊維 (PVA) を 1.5% 混入したもの (NF)、配合 N のセメント量の 10% をシリカフュームに置換し、PVA を 1.5% 混入したもの (SF) である。表-4 に、本研究で使用した埋め戻し材の配合を、表-5 に、PVA の物性値を示す。また、埋め戻しは、供試体を上下逆に設置し、型枠を組み、補修材を流し込むことにより行った。

2.6 供試体シリーズ

表-6に、供試体シリーズを示す。実験パラメータは、腐食の有無、補修の有無、補修材の種類である。また、腐食を導入した供試体においては、腐食鉄筋の質量減少率の平均値が同等となるように、電食試験時の積算電流量を供試体ごとに管理した。

3. 実験結果

3.1 腐食状況

軸方向鉄筋の腐食を定量的に評価するため、式(1)に示す質量減少率 C (%) を用いた²⁾。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 Δw は健全な鉄筋と腐食した鉄筋の単位長さあたりの質量差 (g/mm)、 w は健全な鉄筋の単位長さあたりの質量 (g/mm) を示している。

腐食供試体 C5 については、載荷試験終了後、鉄筋の質量減少率を算出するため、供試体を解体して軸方向鉄筋を取り出し、表面に付着した腐食生成物を除去した。一次処理として、取り出した鉄筋の表面をブラシで清掃し、その後二次処理として、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」に則って⁴⁾、60℃のクエン酸水素二アンモニウムに2日間浸漬した。補修供試体については、2.5(2)の処理により腐食生成物は既に除去されているため、供試体から軸方向鉄筋を取り出した後は、鉄筋表面に付着したモルタルを除去する以外の処理は行っていない。これらの処理を行った後、鉄筋を50mmごとに分割し、各鉄筋片の長さ質量を測定した。このようにして得られた単位長さあたりの質量を、健全な鉄筋と比較することで質量減少率を算出した。

図-4に、各供試体の質量減少率の分布を示す。ここで示した質量減少率は、2本の鉄筋の区間ごとの平均であり、以降の議論では、この平均質量減少率を用いた。表-6に、試験区間全体の質量減少率の平均値を示す。また、図-5に供試体C5の腐食ひび割れ図、各供試体の載荷により生じたひび割れ、および補修供試体の補修界面の様子を示す。供試体全体の平均値は、目標値である5%に近くなった。質量減少率の分布にばらつきが見られる供試体もあるが、ひび割れ状況に大きな違いはなく、力学性状に与える影響は小さいものと考えられる。

表-5 ビニロン繊維の物性値

直径 (mm)	密度 (g/cm ³)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	繊維長 (mm)
0.66	1.3	860	23	30

表-6 供試体シリーズ

供試体名	質量減少率(%)		補修	補修材の種類
	目標	平均		
N	0	0	—	—
C5	5	6.8	無	—
C5N	5	6.6	有	普通モルタル
C5H	5	5.8	有	高強度モルタル
C5NF	5	4.6	有	繊維補強モルタル
C5SF	5	4.5	有	シリカフェーム置換繊維補強モルタル

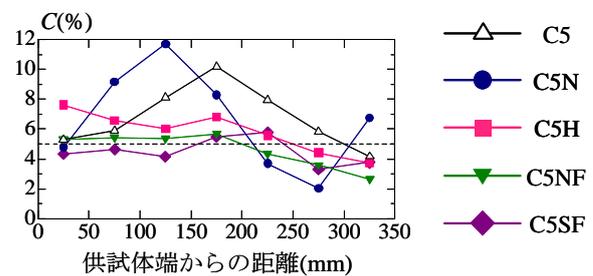


図-4 質量減少率分布

面の様子を示す。供試体全体の平均値は、目標値である5%に近くなった。質量減少率の分布にばらつきが見られる供試体もあるが、ひび割れ状況に大きな違いはなく、力学性状に与える影響は小さいものと考えられる。

3.2 載荷実験結果

(1) 最大引抜き力

表-7に、コンクリートの力学特性、補修モルタルの力学特性および載荷試験結果を示す。供試体C5N以外の全供試体は、鉄筋降伏により載荷試験を終了した。なお、以降の議論では、アンボンド区間に貼付したひずみゲージの測定値から鉄筋の引抜き力を算出している。すなわち、ひずみが降伏ひずみよりも小さい場合にはひずみに弾性係数および断面積を乗じた値、ひずみが降伏ひずみよりも大きい場合には降伏強度に断面積を乗じた値を引

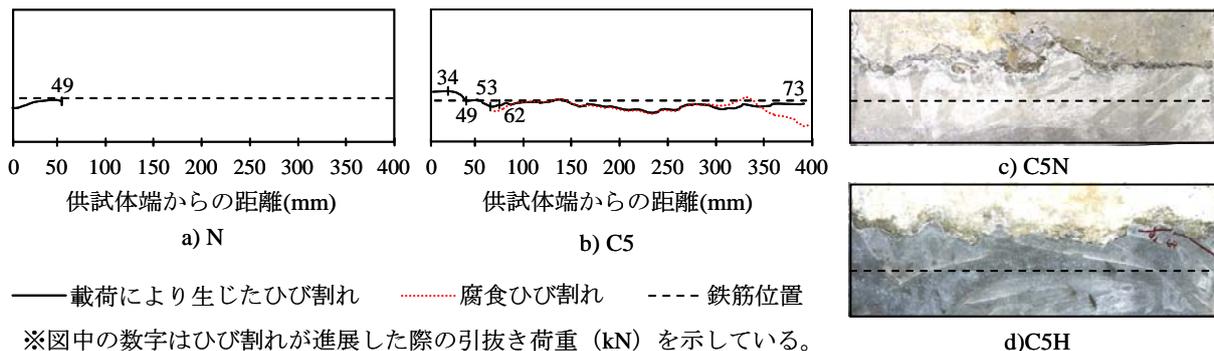


図-5 ひび割れ図および補修界面性状 (左側が供試体端)

表-7 コンクリートの力学特性および載荷試験結果

供試体名	コンクリートの力学特性			補修モルタルの力学特性			載荷試験結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	破壊モード	最大引抜き力 (kN)
N	35.5	3.08	29.7	—	—	—	鉄筋降伏	67.7
C5	33.4	3.31	28.9	—	—	—	鉄筋降伏	67.7
C5N	14.2	1.43	23.5	22.1	—	5.06	—	34.1*
C5H	13.4	1.47	20.0	107.1	3.61	9.16	鉄筋降伏	67.7
C5NF	38.4	2.91	34.1	24.5	3.88	6.61	鉄筋降伏	67.7
C5SF	36.2	2.66	31.5	9.6	1.81	—	鉄筋降伏	67.7

* 供試体 C5N については、鉄筋降伏に達する前に試験を終了している。

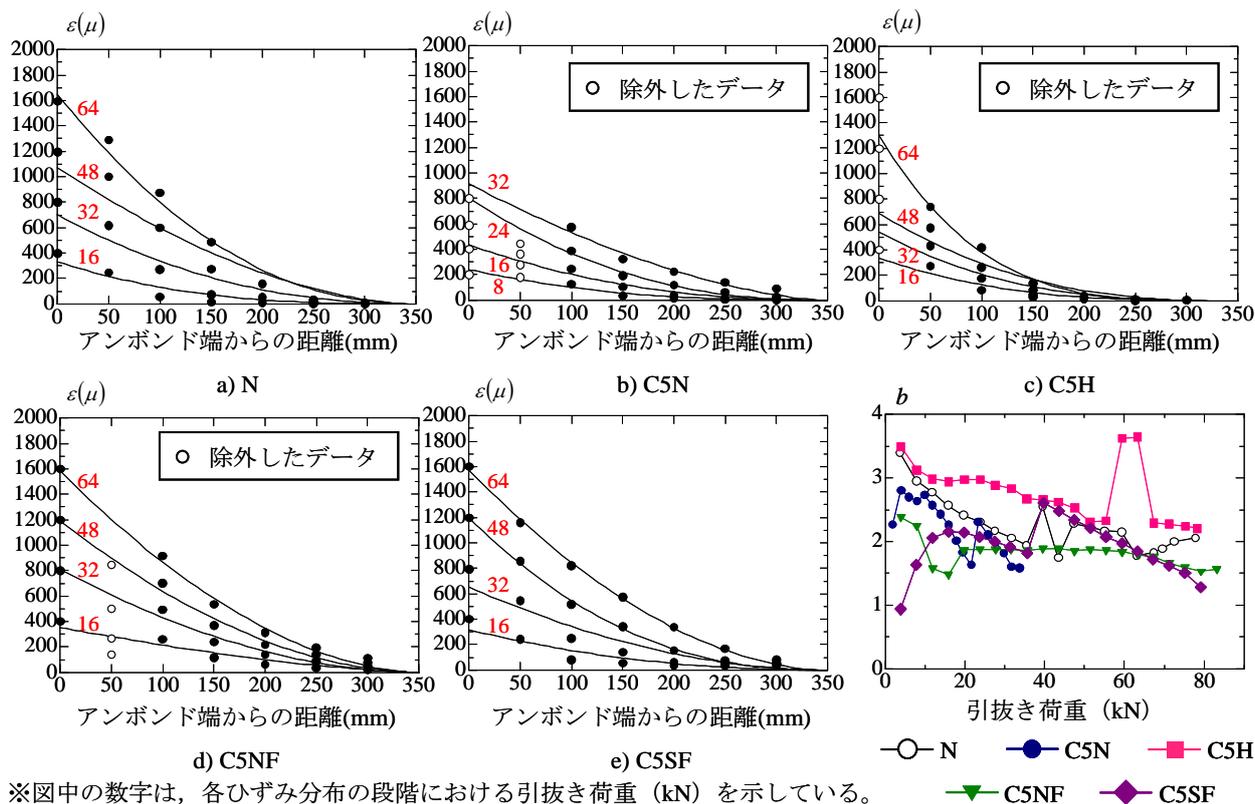


図-6 ひずみ分布の推移

図-7 累乗定数 b の推移

抜き力とした。腐食試験体 C5 の最大引抜き力は健全供試体 N と同等であるが、C5 は鉄筋降伏後すぐに付着割裂破壊を呈した。したがって、腐食による質量減少率が本研究で目標とした 5% を超える場合、健全供試体より定着強度が低下することが予想される。

(2) ひずみ分布

図-6 に、各供試体のひずみ分布の推移を示す。なお、ここでは、引抜き荷重 16kN 毎の推移を示している。ただし、供試体 C5N は 8kN 毎の推移であり、供試体 C5 は腐食鉄筋のひずみが計測できなかったため、掲載していない。図中の曲線は、実験値を式(2)に示す累乗式を用いて、最小二乗法により近似した結果である。

$$\varepsilon(x) = a(350 - x)^b \quad (2)$$

ここで、 $\varepsilon(x)$ はひずみの近似値 (μ)、 x はアンボンド端からの距離 (mm)、 a および b は最小二乗法で決まる定数、である。ただし、いくつかの供試体においては、アンボンド端付近のひずみの値が右隣のひずみの値より小さくなる現象が見られた。これは、試験の特性上、アンボンド端付近では鉄筋に局所的な曲げが発生したことが原因と考えられるため、これらのひずみの値は近似には用いていない。以上のようにして得られた式(2)の定数 a および b は、それぞれ 0~3.6、1.1~3.0 の間で推移した。図-7 に、ひずみ分布の非線形性を表す累乗定数 b の推移を示す。定数 b は、ばらつきが大きいものの、引抜き荷重が増大するにつれて、概ね減少傾向を示している。これは、式(2)では、 $x=350\text{mm}$ でひずみが 0 となる境界条件を与えているが、実際にひずみが 0 となる地点は、引

引抜き荷重が小さい段階では荷重の作用点付近であり、引抜き荷重が増加するに従って x の正方向に移動するためと考えられる。

図-6 に示すように、普通モルタルで補修した供試体 C5N のひずみ分布は、健全供試体 N と比較すると、勾配が緩やかになっていることが分かる。これは、普通モルタルで補修したものの、補修界面の接着性能が十分に回復しなかったためと考えられる。図-8 に、供試体 C5N および C5H の π ゲージで測定した、ひび割れ開口変位 (COD) の 16kN 毎 (C5N は 8kN 毎) の推移を示す。図-5 c) に示したように、補修モルタルに付着ひび割れは生じなかったことから、図-8 に示すように π ゲージの値が増大したのは、補修界面が載荷に伴い開口したためである。

高強度モルタルを用いて補修した供試体 C5H では、図-6 c) に示すように鉄筋降伏時においても、 $x > 250\text{mm}$ の区間においてひずみがほとんど発生していない。他の供試体と比較して、ひずみ発生領域が狭いことから、高強度モルタルを用いることにより、軸方向鉄筋の付着性能が向上したことが分かる。

(3) 付着応力分布

付着応力 τ (N/mm^2) を、式(3)で算出した。

$$\tau(x) = \frac{d\varepsilon(x)}{dx} \cdot \frac{ED}{4} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon(x)$ は式(2)で近似したひずみ分布、 E は健全時の軸方向鉄筋の弾性係数 (N/mm^2)、 D は 3.1 節で得られた各区間の質量減少率をもとに算出した腐食時の鉄筋径 (mm) である。図-9 に、各供試体の 16kN 毎 (ただし、供試体 C5N は 8kN 毎) の付着応力分布の推移を示す。

普通モルタルにより補修した供試体 C5N に関しては、引抜き荷重が 32kN に達した時点で他の供試体と比較すると、供試体 N と比較してなだらかな分布となっている。すなわち、普通モルタルで補修したケースでは、軸方向鉄筋との付着性能が相対的に低下している。また、繊維

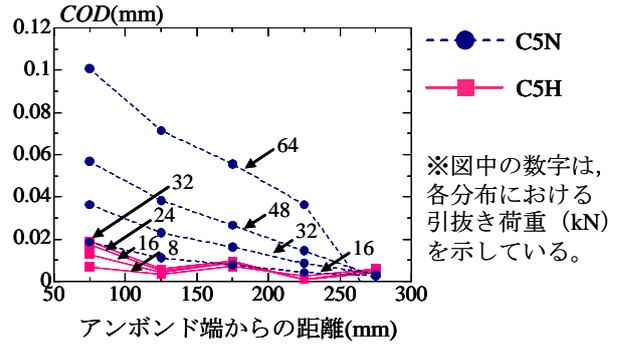


図-8 COD 分布の推移

を混入した C5NF および C5SF の供試体については、健全供試体 N には及ばないものの、普通モルタルで補修した供試体 C5N よりも付着応力が大幅に増加していることが分かる。したがって、PVA 繊維を混入することにより、定着性能が向上すると考えられる。

(4) すべり量の推移

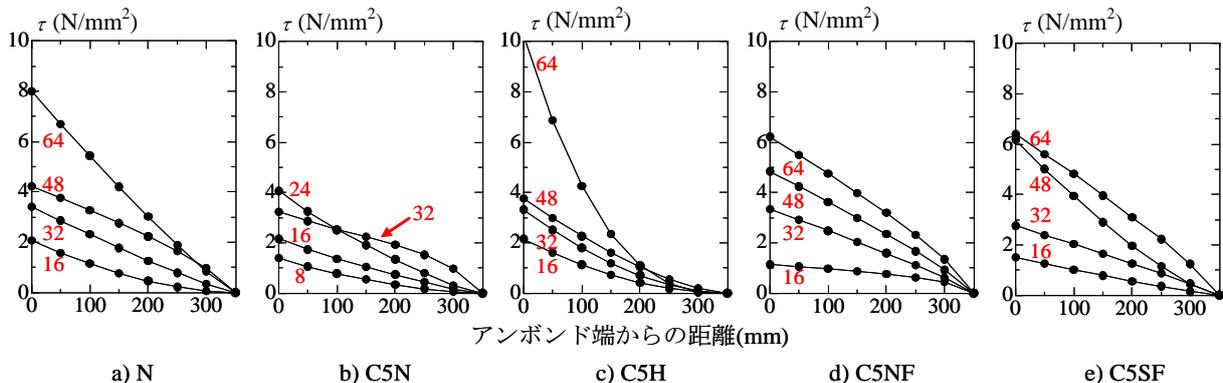
すべり量 S を式(4)で算出した。

$$S(x) = \int_x^{350} \varepsilon(x) dx + S_{350} \quad (4)$$

ここで、 S_{350} は自由端でのすべり (mm) である。図-10 に、アンボンド端からの距離ごとに、すべり量の推移を示す。

健全供試体 N と普通モルタルで補修した供試体 C5N を比較すると、すべり量が健全供試体 N を大きく上回っている。また、3.2(2)で議論したように、供試体 C5N では、補修界面が開いており、界面においてすべりが発生したと考えられる。そのため、全体のすべり量は健全供試体 N よりも更に大きくなると予測される。すなわち、普通モルタルを用いて補修しても、界面の接着性能が十分に回復せず、鉄筋の拔出量が増加すると考えられる。

高強度モルタルにより補修した供試体 C5H については、他の供試体と比較してすべり量が非常に小さいことが分かる。また、セメントの一部をシリカフェームで置



※図中の数字は、各付着応力分の段階の引抜き荷重 (kN) を示している。

図-9 付着応力分布の推移

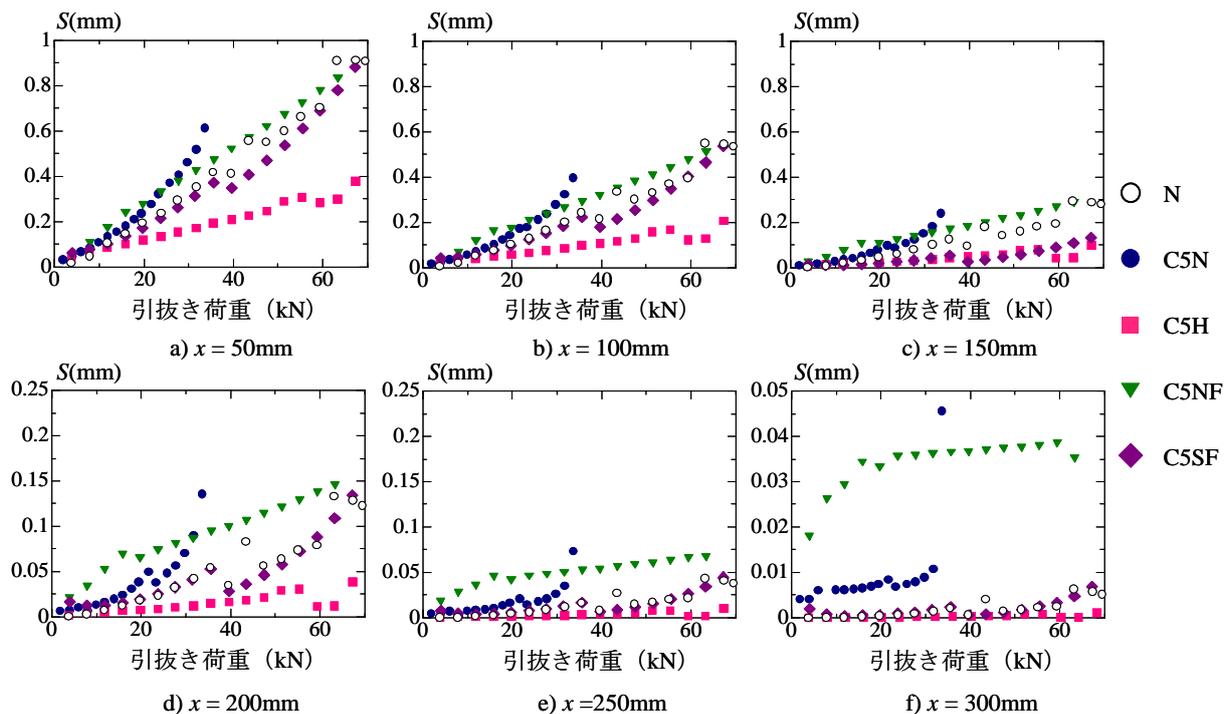


図-10 すべり量の推移

換した供試体 C5NF については、健全供試体 N と同程度のすべり量であるものの、他の供試体と比較するとすべり量が小さくなっていることが分かる。これは、シリカフェームを混入することにより、補修材の粘性が上がり、母材との接着性能が向上したためであると考えられる。補修材として高強度モルタルを使用した場合、実構造物においては、収縮によるひび割れの発生が懸念される。このことを鑑みると、同じセメント量で、PVA 繊維およびシリカフェームを混入し、すべり量を健全時程度にまで減少させることができた C5SF は実用化に向けた今後の展開が期待できる。

4. まとめ

本研究では、RC はりの定着部を模擬した供試体を作製し、腐食の有無、補修の有無、補修材の種類を実験パラメータとして、はり型引抜き荷重試験を実施した。

以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 埋込み長さ 350mm の健全供試体および質量減少率 5% の腐食を導入した供試体は鉄筋降伏により終局したが、5% の腐食を導入した場合、鉄筋降伏直後に付着割裂破壊を呈した。
- 2) 5% の腐食を導入した供試体を普通モルタルによる断面修復で補修したところ、健全供試体と比べて鉄筋のひずみ勾配が緩やかになり、付着応力が減少した。普通モルタルでは、健全時の定着性能まで回復させることができなかった。
- 3) 5% の腐食を導入した供試体を高強度モルタルによ

る断面修復で補修したところ、健全供試体よりも鉄筋のひずみ勾配が急になり、付着応力が増加した。高強度モルタルにより定着性能を大幅に回復させることができるが、収縮の面が懸念される。

- 4) 普通モルタルに PVA 繊維を混入し、またセメントの一部をシリカフェームで置換した補修材を用いて、5% の腐食を導入した供試体を断面修復したところ、付着応力が普通モルタルで補修したものよりも大幅に増加し、すべり量を健全供試体と同程度まで減少させることができた。

謝辞

本研究で使用した鉄筋は東京鐵鋼株式会社より提供して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 阿部仁ほか：鉄筋の定着不良を有する RC 梁のせん断破壊性状の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.27, No.2, pp.337-342, 2005.7.
- 2) 角田真彦ほか：局所的な鉄筋腐食を有する RC はり部材のせん断耐荷性能に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, pp.1705-1710, 2008.7.
- 3) 土木学会：表面保護工法 設計施工指針（案）〔工種別マニュアル編〕，コンクリートライブラリー119, pp.189-266, 土木学会，2005.4.
- 4) 日本コンクリート工学協会：JCI 規準集(1977-2002)，pp.91-94, 2004.