

論文 主筋の腐食が鉄筋コンクリート部材の付着割裂強度に及ぼす影響

日比野 陽^{*1}・森田 健^{*2}・篠原 保二^{*3}・林 静雄^{*4}

要旨: 鉄筋コンクリート構造における鉄筋の腐食は構造性能に対して多大な影響を与える。本研究では、電食反応により促進劣化させた部材を対象として、主筋腐食が付着割裂強度へ与える影響について実験的に明らかにするため、変動要因を腐食量、補強方法及び主筋本数とした試験体の単調載荷実験を行い、付着割裂性状について考察を行った。その結果、せん断補強筋が密に配筋され、補強筋が付着強度に大きな影響与える試験体では、主筋の腐食が進行しても付着強度はほとんど低下しない事を確認できた。また、主筋の配筋によって、付着割裂強度が異なる可能性があることを示した。

キーワード: 鉄筋腐食, 付着割裂, 腐食ひび割れ

1. はじめに

鉄筋腐食は、鉄筋コンクリート構造物の経年劣化の主たる要因のひとつである。経年劣化による構造性能の低下を定量的に把握することは、構造物の維持管理を行うために必要不可欠であり、これまでに様々な研究^(例えば1)-4)がなされている。

鉄筋腐食は健全断面の減少や、腐食生成物による体積膨張を引き起こす。それがさらに進行すると生成物による膨張圧が鉄筋周辺のコンクリートに損傷を与え、付着劣化やひび割れの発生、進展、さらにはかぶりの剥落を引き起こし、鉄筋コンクリート構造物の性能に多大な影響を与える。これまで、鉄筋腐食による付着の劣化やRC部材の耐力に関する研究が行われているが、梁などの実際の部材断面における鉄筋配置を想定した場合において、主筋の腐食による付着割裂耐力の検討を行った例はほとんどない。そこで本研究では、主筋腐食が付着性状に与える影響を把握することを目的として、主筋の腐食

量、主筋本数、補強方法を変動要因とする実験を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

表-1 に試験体変動要因、表-2 に材料特性一覧、表-3 にコンクリートの調合表、図-1, 2 に試験体図面を示す。共通要因は断面寸法 $b \times D = 220 \times 400 \text{mm}$ 、コンクリート圧縮強度 $\sigma_B = 23.2 \text{N/mm}^2$ とし、主筋には D19 (SD390 を焼き入れし降伏強度 $\sigma_y = 1044 \text{N/mm}^2$) とする高強度鉄筋、せん断補強筋には U6.4 ($\sigma_y = 1430 \text{N/mm}^2$) を用いた。せん断スパンは $a = 1025 \text{mm}$ 、試験区間を 400mm とし、加力端部側に幅 50mm のスリットを設けた。これに伴いスリット部折り曲げ筋を配筋することで急激なひび割れの進展やせん断力の低下を防ぎ左右均等に反力が得られるようにした。また、既往の研究^{5), 6)}より鉄筋径を d_b としたとき、スリットから $4d_b$ は付着力がコーン破壊により低下するため、スリット近傍の 100mm と、自由端

表-1 試験体変動要因

試験体名	主筋		せん断補強筋 配筋	腐食 程度	備考
	pt[%]	本数			
A4-50-0	1.45	4	2-U6.4@50	健全	基準試験体
A4-50-1				小	
A4-50-2				中	
A4-50-3				大	
N4-100-0	1.09	3	4-U6.4@100	健全	中子筋を配筋
N4-100-3			中		
A3-50-0	1.09	3	2-U6.4@50	健全	主筋を3本配筋
A3-50-3				中	

表-3 コンクリートの調合表

粗骨材の 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	混和剤
13	76.0	47.8	185	244	853	979	2.44

表-2 材料特性

		圧縮強度 σ_B [N/mm ²]	引張強度 σ_t [N/mm ²]	ヤング係数 E_c [N/mm ²]
コンクリート		23.2	2.73	17900
鉄筋	種別	降伏強度 σ_y [N/mm ²]	引張強度 σ_u [N/mm ²]	ヤング係数 E_s [N/mm ²]
	D19	1044	1116	195000
	U6.4	1430	1475	204000

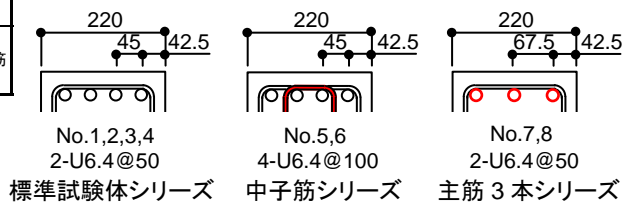


図-1 試験区間配筋図 (mm)

*1 東京工業大学 セキュアマテリアルセンター 助教 博士 (工学) (正会員)
 *2 鹿島建設株式会社 修士 (工学)
 *3 東京工業大学 建築物理研究センター 准教授 工学博士 (正会員)
 *4 東京工業大学 セキュアマテリアルセンター 教授 工学博士 (正会員)

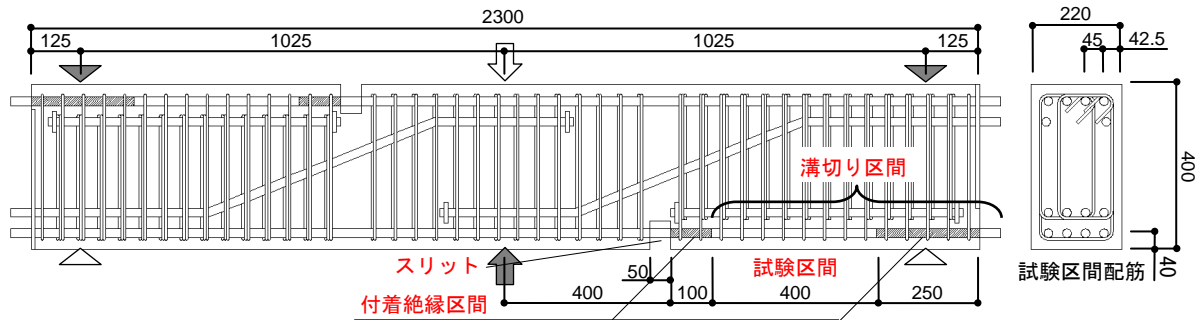


図-2 試験体配筋図 (mm)

部に付着絶縁加工を施した。また、主筋試験区間から自由端部に向かってゲージを貼り付けるために溝切り加工を施した。溝切り加工による断面減少率は加工前後に行った質量測定より 13.6%であった。

せん断補強筋は図-1, 2 に示すように配筋し、間隔は No.1~4, 7, 8 は 50mm になるように配置した。No.5, 6 については補強間隔を 2 倍の 100mm にし、中子筋を配して本数を倍にすることで、補強筋量が他の試験体と同様になるようにした。主筋については、腐食ひび割れ性状に差が出ることを期待して試験体 No.1~6 では 4 本, No.7, 8 では 3 本とした。以下, No.1~4 を標準試験体シリーズ, No.5, 6 を中子筋シリーズ, No.7, 8 を主筋 3 本シリーズとする。また、腐食度の水準は表-4 に示す通りとした。打設方向は試験体側面からの平打ちとした。

2.2 鉄筋腐食概要

鉄筋の促進腐食方法には電食³⁾を用いた。図-3 に電食概要を示す。電食は打設後 28 日から開始した。直流電源装置の負極側に銅板を、正極側に主筋をそれぞれ接続した。試験体底面部及び側面の主筋部分までの高さに吸水スポンジを用いて 5% の NaCl 水溶液を接触させ通電させた。腐食のコントロールについては積算電流量(A・h)を用いて行った。また、腐食対象は試験区間の主筋のみとしたため、健全試験体を含めた全試験体で、せん断補強筋にはビニールテープを水溶液の接触高さまで巻きつけて防食加工を施した。

2.3 腐食量測定方法

理論値の腐食率はファラデーの法則および既往の研究¹⁾から示されている式(1)から算出した。

$$w=0.766 \cdot I \cdot T \quad (1)$$

w : 生成量(g) I : 電流(A) T : 時間(h)

実測値は鉄筋をはつり出し、鉄筋に付着したモルタル粉を取り除いたのちに、10%のクエン酸Ⅱアンモニウム水溶液に浸漬し錆を溶解させて、重量測定を行った。

2.4 測定項目

図-4 にひずみゲージ貼り付け位置を示す。試験区間の主筋は電食によって腐食させるため、水の浸入を防ぐ目的で、図-5 に示す三層のコーキングを施してゲージ

表-4 腐食測定結果

No.	2	3	4	6	8
理論値の腐食率	0.3	4.1	7.0	4.1	4.1
実測値の腐食率	0.4	5.0	5.8	4.5	3.8

[%]

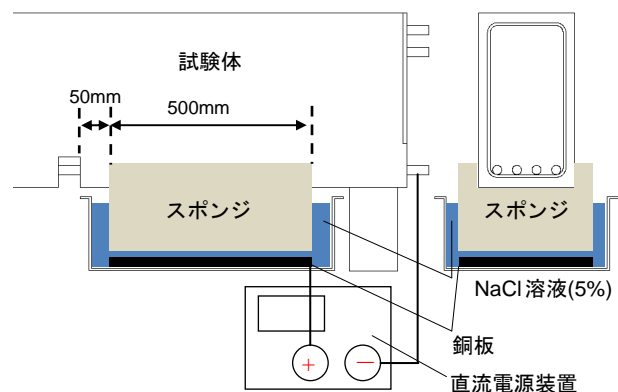


図-3 電食概要図

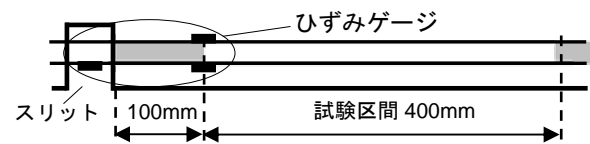


図-4 ひずみゲージ貼り付け位置

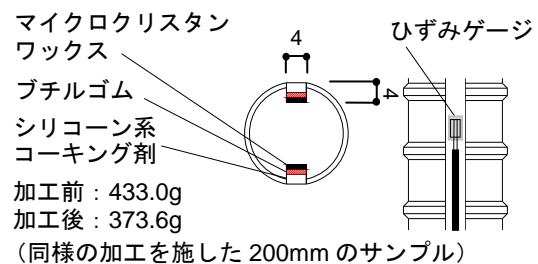


図-5 溝切り加工詳細図 (mm)

を保護した²⁾。しかし、電食の際に大半のひずみゲージが破損してしまったため、全てスリット部のひずみを測定することで代用し試験区間全体の付着力を測定した。自由端のすべり量は端部定着プレートから治具を用いて自由端の鉄筋端部に変位計を直接あてて測定した。

2.5 加力方法

図-2 に示す様な加力方法で単純梁形式の一方方向片振り載荷を行った。スリット部の歪みの平均値を 250 μ ごとに 1 サイクルとして制御した。また、試験体は中心か

ら対称に2箇所の試験区間を設けた。2回目の加力の対象となる試験区間の損傷を考慮して、2.5mmほど自由端の抜け出し量を認めた時点で1回目の加力を終了した。その後、上下左右を反転して同様に2回目の加力を行った。

3. 実験結果及び検討

3.1 腐食実験結果

表-4に腐食測定結果を、図-6にはそれぞれの試験体の腐食率の理論値-測定値関係を示す。理論値に対する実測値は、良い対応が見て取れた。腐食率が大きくなると実験値が理論値を下回っており、これは試験区間主筋近傍の吊り鉄筋及び内部の定着プレートの腐食が原因と考えられる。また、せん断補強筋には、全試験体において腐食は見取れなかった。

図-7に中子筋シリーズの腐食試験体 No.6 の底面の腐食ひび割れ図を示す。腐食率が大きな鉄筋に沿って腐食ひび割れが発生した。底面以外にはひび割れは発生しなかった。また、腐食ひび割れが開くと鉄筋と NaCl 溶液が直接接して電気抵抗が低下し大電流が流れたため主筋同士の腐食率の差が顕著となった。

図-8に全試験体を代表して、No.1の健全標準試験体のひび割れの状況図を示す。図-9には載荷終了後かぶりコンクリートをはつり、腐食生成物の付着状況から推定した試験体内部の腐食ひび割れを中子筋シリーズの No.6、主筋3本シリーズの No.8 について示す。

破壊形式は標準試験体シリーズの全試験体、また中子筋、主筋3本シリーズの各健全試験体において同様の性状を示した。

加力後図-8a)の様なスリット部から加力点へ向かうひび割れが発生し、その後図-8b)に示す様に試験区間に曲げひび割れ、そしてせん断ひび割れの順に発生した。最後に図-8c)に示す通りせん断ひび割れが複数発生し、それが繋がり合うことで付着ひび割れへと進展して行った。この付着ひび割れの幅が次第に開くことにより、サイドスプリット型の付着割裂破壊に至った。

また、図-9に示した中子筋、主筋3本シリーズにおいて、腐食試験体ではひび割れの発生過程は他のシリーズと大きな違いを見て取れなかった。しかし、加力していくと図-7に示した試験体底面部に入った外側の主筋にそった腐食ひび割れが開き、進展することでコーナースプリット型の様な破壊形式を示した。

3.2 最大荷重-腐食度関係

表-5に実験結果の一覧を示す。基準試験体シリーズの No.1~4 では最大荷重の低下は見取れず、むしろ上昇する結果となった。これは補強筋が密に配筋され、コンクリートの損傷の影響をあまり受なかったこと、及び

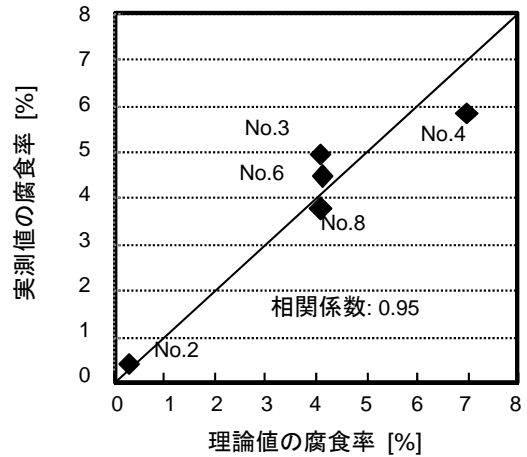


図-6 腐食率の理論値-実測値関係

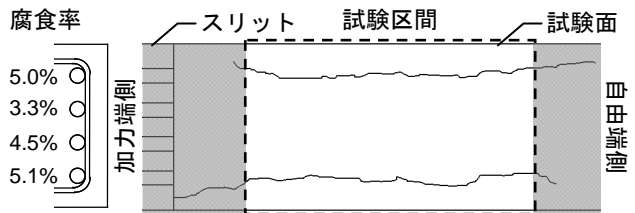


図-7 試験体底面腐食ひび割れ図

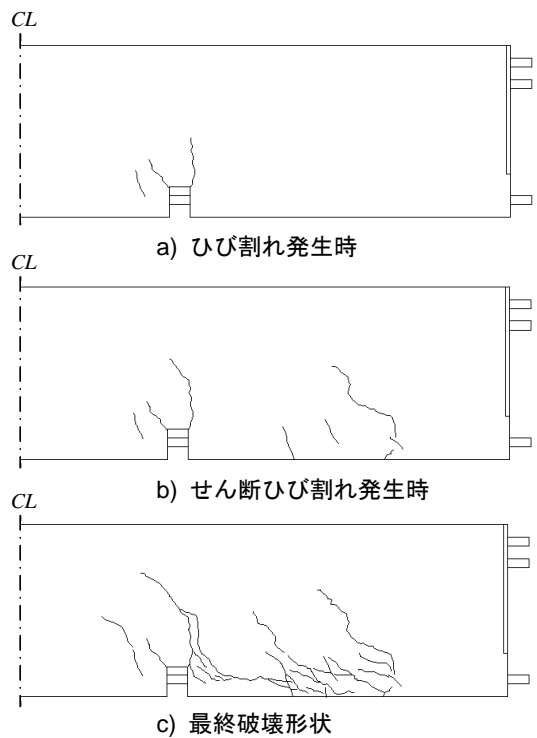


図-8 ひび割れ状況図

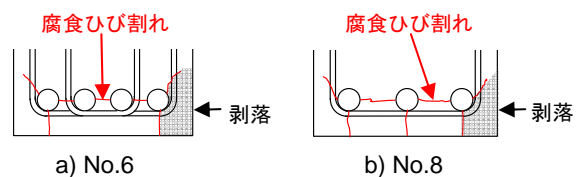


図-9 試験体内部腐食ひび割れ状況

表-5 実験結果一覧

No.	試験体名	主筋本数	配筋方法	最大荷重 [kN]	付着強度 τ_{max} [N/mm ²]	付着強度計算値 ^{※1} τ_{bu} [N/mm ²]	付着強度比 (腐食/健全)	腐食率 [%]	破壊モード ^{※2}
1	A4-50-0	4	2-U6.4 @50	260	2.15	2.56	****	0.0	SB
2	A4-50-1			312	2.93		1.36	0.5	SB
3	A4-50-2			269	2.59		1.20	5.0	SB
4	A4-50-3			276	2.97		1.38	5.8	SB
5	N4-100-0	3	4-U6.4@100 中子筋	348	3.49	2.93	****	0.0	SB
6	N4-100-3			274	2.59		0.74	4.5	CB
7	A3-50-0	3	2-U6.4 @50	347	4.20	3.53	****	0.0	SB
8	A3-50-3			257	3.72		0.89	3.8	CB

※1 靱性保証型耐震設計指針⁷⁾による信頼付着強度、※2 SB: サイドスプリット, CB: コーナススプリット

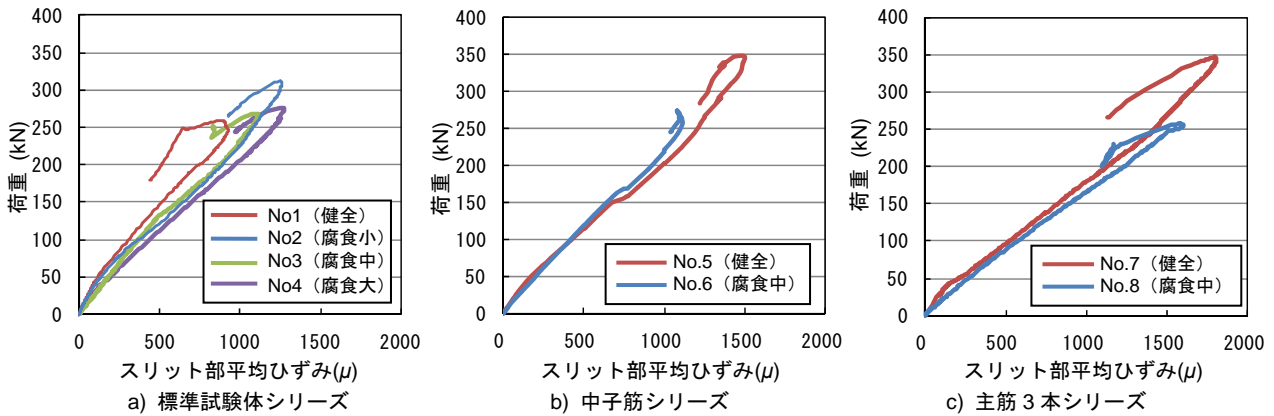


図-10 せん断カースリット部平均ひずみ関係

腐食生成物がコンクリートと鉄筋の界面に充填され、付着力が向上したためであると考えられる。

一方、中子筋、主筋3本の両シリーズでは、それぞれ腐食試験体に最大耐力の低下が見て取れた。このことより、中子筋シリーズの腐食試験体 No.6 では補強筋間隔が標準試験体シリーズの2倍であるため、同一の補強筋量でも腐食ひび割れの影響が大きかったことがわかる。また、主筋3本シリーズの腐食試験体 No.8 では主筋同士の間隔が大きいことが、大きな腐食ひび割れを生じさせ、それが荷重の低下に影響していると考えられる。また、両シリーズとも最終的にコーナススプリット型の様に破壊する程腐食ひび割れが入っていたことも影響していると考えられる。

3.3 荷重-スリット部平均ひずみ関係

図-10 に荷重と各試験体のスリット部主筋の平均ひずみの関係を示す。全試験体において、加力後まもなくスリット部にひび割れが入ることで、グラフの勾配が緩やかになっているのがわかる。図-10a)においてスリット部のひずみが大きくなり、腐食度が大きくなるにしたがって勾配が緩やかになっている。腐食生成物がコンクリートとの界面に充填されていることにより、自由端のすべり出しに対して抵抗しているため、同一の荷重でもひずみが大きくなっていることが確認できた。図-10b)においては、750μ付近でひずみが急激に増加しているこ

とが見て取れる。これは、せん断補強筋間隔が大きいため試験区間に発生したひび割れが影響し、自由端すべり量が増大して付着応力が上昇した影響が大きく出ているためと読み取れる。また、図-10b)、図-10c)において、共に健全試験体、腐食試験の勾配は概ね同様となっている。これより、腐食生成物による自由端が滑り出すまでの付着の向上と、コンクリートへの損傷を与える付着の低下が、互いの影響を打ち消していることが確認できる。

3.4 平均付着応力度-自由端すべり量関係

図-11にNo.1~8の平均付着応力度(τ)-自由端すべり量(s)の関係を示す。図中には、付着強度の点をそれぞれ示した。また、表-6に各シリーズの付着強度のコンクリートの負担分(τ_{co})及び補強筋の持ち分(τ_{st})を示した。

全試験体において加力開始後しばらくは自由端の抜け出しを確認できないがせん断ひび割れが入り始めると各主筋共に動きだした。抜け出し始める付着力は腐食度に関わらず顕著な差は見られなかった。また、それぞれの試験体においてせん断補強筋にひずみが生じていたため、テープをせん断補強筋に巻いた影響はほとんどなかったと考えられる。

(1) 標準試験体シリーズ

図-11a)に示すように、腐食度小のNo.2は他の標準試験体シリーズと比べ、付着強度に至るのに大きなすべり

表-6 付着強度負担分一覧

	基準試験体シリーズ		中子筋シリーズ		主筋3本シリーズ	
	τ_{st}	τ_{co}	τ_{st}	τ_{co}	τ_{st}	τ_{co}
各負担分	1.25	1.31	1.62	1.30	1.83	1.71
τ_{bu}	2.56		2.92		3.53	

[N/mm²]

量を要した。また付着強度を迎えた後も付着力は緩やかに低下した。このことより、鉄筋周辺のコンクリートに対してほとんど損傷を与えずに、鉄筋とコンクリートの界面に腐食生成物が堆積して付着性能が向上したことを確認できた。

また No.2 を除き、腐食度の上昇に伴い、大きなすべり量を要して付着強度に達しているのが見て取れた。

(2) 中子筋シリーズ

図-11b)に示す様に、腐食試験体において付着強度の低下を確認できた。また、両試験体共4本の主筋近傍に全てせん断補強筋が配してあったため、付着強度以降の急激な付着応力の低下はほとんど見られなかった。また、腐食試験体 No.6 は付着強度を迎えてからも付着がほとんど低下することなく自由端がすべり続けた。

(3) 主筋3本シリーズ

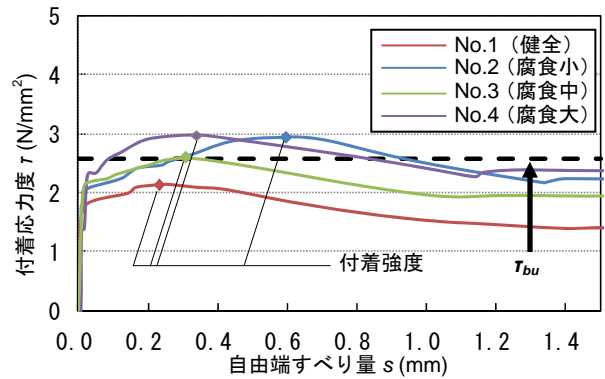
図-11c)に主筋3本シリーズを示す。No.7, 8 は共に0.4mm 付近で No.8 の腐食試験体が付着強度に至るまでは、ほぼ同様な性状を示した。しかしながら、No.8 においては付着強度の低下が見て取れた。標準試験体よりも付着強度に対するコンクリートの負担分が大きいことから、標準試験体の $\tau_{co}=1.31$ に対し、 $\tau_{co}=1.71$ と大きくなった。腐食膨張が τ_{co} に対して一定の割合の損傷を与えると考え、腐食によって τ_{co} が大きくなり、付着割裂強度が低下する可能性がある。また、試験体自由端の滑り出しが起るまでの付着の初期剛性は、腐食試験体において若干の低減を確認できた。

3.5 付着強度 - 腐食率関係

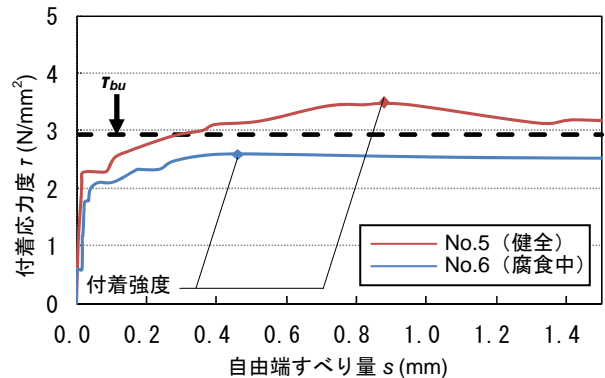
図-12 に付着強度と腐食率、及び付着強度の計算値⁷⁾を示す。標準試験体シリーズでは、付着強度と積算電流量の間に相関性は見られなかった。このことから、補強筋量が多く補強筋間隔が小さかったため、その拘束効果が腐食膨張の与える影響を抑制したことが確認できた。他のシリーズではいずれも付着強度の低下が見て取れた。

(1) 補強筋の配筋方法の効果

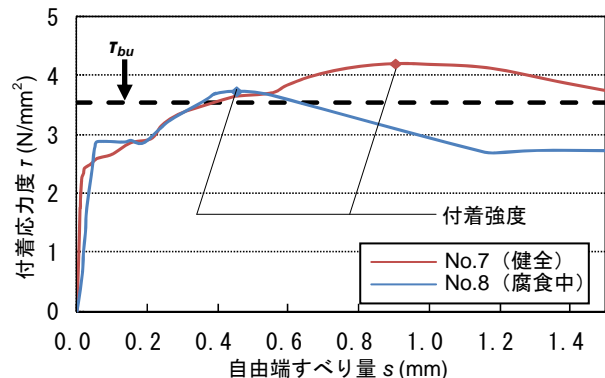
標準試験体シリーズでは、腐食率が大きくなって、付着強度は低下せずに、健全試験体と比べある程度の上昇が見てとれた。しかし、中子筋シリーズにおいては付着強度の低下が見て取れ、補強筋間隔が腐食試験体の付着強度に影響を与えることが確認できた。



a) 標準試験体シリーズ



b) 中子筋シリーズ



c) 主筋3本シリーズ

図-11 平均付着応力 - 自由端すべり関係

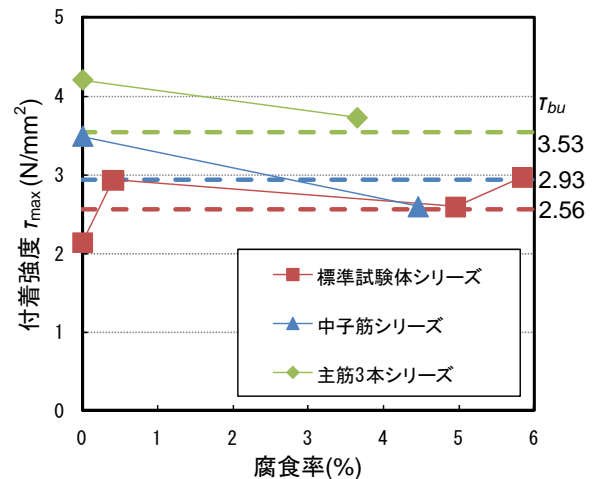


図-12 腐食率-付着強度関係

(2) 主筋本数と付着強度の関係

主筋3本シリーズでは、付着強度の低下が見て取れた。これは、同様にせん断補強筋を配筋した標準試験体シリーズよりも、サイドスプリット型の割裂面におけるコンクリートの長さが大きく、コンクリートが負担する付着強度が大きいためであると考えられる。

4. まとめ

本研究で鉄筋コンクリート梁において、主筋の腐食量や主筋本数、補強筋の本数が主筋の付着割裂強度及ぼす影響について考察を行い、以下の知見を得た。

- ・ せん断補強筋量の多い試験体($p_w=0.55\%$)において、主筋の腐食はすべり量が小さな範囲で付着応力度に大きな影響を及ぼさない。
- ・ 主筋の腐食に対して同様な補強筋量の試験体で、中子筋を用いて補強筋間隔を大きくしたものは、腐食ひび割れに対する拘束効果が低くなり、腐食試験体の付着強度に対しては不利となる。
- ・ 付着割裂強度に対してコンクリートの負担分の大きい部材ほど、主筋の腐食が付着強度に与える影響は大きくなる可能性がある。

謝辞

本研究は、三菱総合研究所の外部受託金を受けて行われました。また実験の実施にあたって高周波熱錬株式会社との協力を得ました。ここに深く感謝します。

参考文献

- 1) 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, Vol.10, No.2, pp.505-510, 1988
- 2) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所付着応力一局所すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.663-668, 1991.6
- 3) 角田真彦, 渡辺健, 三木朋広, 二羽淳一郎: 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報告集, Vol.30, No.3, pp.1705-1710, 2008.6
- 4) 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
- 5) 林静雄, 吉田弘行, 黒正清治: ひびわれ近傍における異形鉄筋とコンクリートの付着性状に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文報告集, No.348, pp.86-97, 1985.2
- 6) 太刀川毅, 林静雄, 篠原保二, 佐々木聡: 多段配筋部材における主筋段数と横補強筋が付着強度へ与える影響に関する実験研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.31, No.2, pp.667-672, 2009.6
- 7) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999.8