

論文 鉄筋腐食した RC 部材の付着応力性状に及ぼす横補強筋の影響

阿部 哲雄*1・番場 俊介*1・村上 祐貴*2

要旨: 本研究では、鉄筋腐食した RC 部材の付着割裂性状に対する横補強筋による付着割裂強度（以下、付着強度）の低下抑制効果の評価を目的として、横補強筋を配筋した RC 試験体に対して片側引抜試験を実施した。その結果、横補強筋が非腐食の場合、横補強筋による付着強度の低下抑制効果は主鉄筋の腐食ひび割れ幅、かぶりおよび横補強筋量によって変化することが明らかとなった。また、横補強筋の下部領域における腐食率が約 15%の範囲内では、横補強筋による付着強度の低下抑制効果は保持された。さらに、横補強筋による付着強度の低下抑制効果をコンクリートの拘束圧の変化として捉えることを試みた。

キーワード: 鉄筋腐食, 付着劣化, 横補強筋, コンクリートの拘束圧

1. はじめに

RC 部材内部の横補強筋は、付着割裂破壊の抑制効果を有することが知られている^{1), 2), 3)}。腐食膨張挙動により、かぶりコンクリートに鉄筋軸に沿った腐食ひび割れが発生した RC 部材において、鉄筋に引張力が作用し、コンクリートに割裂力が作用すると、腐食ひび割れが開口するが、横補強筋はこの開口を拘束するため、鉄筋腐食による付着剛性の低下や付着強度の低下（以下、付着劣化）を抑制することとなる。

横補強筋の拘束効果は主鉄筋の腐食劣化状態、かぶりや鉄筋径、コンクリートの強度によって変化することに加え、横補強筋自体の腐食性状、横補強筋量、断面内の主鉄筋と横補強筋の位置関係等によって変化すると考えられ、それら種々の影響を統一的に評価することは非常に困難であることから、横補強筋による付着劣化抑制効果については未解明な部分が多い。

そこで本研究では、横補強筋の付着劣化抑制効果の基礎的研究の位置づけとして、かぶり、横補強筋量、断面内の横補強筋と主鉄筋の距離および横補強筋の腐食量を実験変数とし、主鉄筋のみが腐食した場合と、主鉄筋および横補強筋が腐食した RC 試験体に対して、片側引抜試験を実施し、鉄筋腐食した RC 部材の付着割裂性状に対する横補強筋の付着劣化抑制効果について検討した。

2. 実験手法

2.1 試験体概要および実験パラメータ

図-1 に試験体概要を示す。試験体は断面が 150mm×150mm、高さ 150mm とした RC 角柱試験体であり、引抜鉄筋には D16(SD390)、横補強筋には D6(SD295A)を用いた。付着長は 140mm とし、載荷端および自由端から 5mm の領域は、試験体端部の主鉄筋の局所的な腐食を防止する目的で主鉄筋にビニールテープを巻いた。

実験パラメータは表-1 に示すように、引抜鉄筋のみを配筋した S0 シリーズ、主鉄筋のみを腐食させ、横補強筋を非腐食とした S シリーズ、主鉄筋および横補強筋を腐食させた S_{cor} シリーズに分類される。なお、S0 シリーズの実験結果については報告済みである⁴⁾。S シリーズの実験パラメータは、横補強筋の配筋本数(S)、かぶり(C)、横補強筋の横幅(b)を設定し、各々に対して最小かぶり面の鉄筋軸に沿った腐食ひび割れ幅(W_{cr})を 3 水準設定した。S_{cor} シリーズは主鉄筋の腐食ひび割れ幅(W_{cr})および横補強筋の腐食量をパラメータとしている。なお、試験体は各パラメータにつき 3 体作製した。

コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は 60%とした。なお、練混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl 水溶液を用いた。

2.2 鉄筋腐食手法および載荷試験手法

鉄筋の腐食手法は電食試験法を採用し、材齢 7 日の時点で鉄筋に直流電流 0.20A (S シリーズ)、0.23A (S_{cor} シリーズ) を目標の腐食ひび割れ幅に到達するまで通電した。なお、陽極側に接続する鉄筋は後述するように S シリーズと S_{cor} シリーズで異なる。主鉄筋のみを腐食対象とした S シリーズの試験体においては、図-1 に示すように主鉄筋と接する横補強筋の一部にビニールテープを巻き絶縁することで横補強筋の防錆を行い、主鉄筋に直流電流を通電した（電流密度 2.8mA/cm²）。主鉄筋と横補強筋の両方を腐食対象とした S_{cor} シリーズの試験体においては、主鉄筋と横補強筋を接触させ、横補強筋に電極を接続し、直流電流を通電した（電流密度 2.8mA/cm²）。

最小かぶり面の鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅は、図-2 に示すように π 型変位計を用いて測定した。 π 型変位計設置箇所の銅板をくり抜き、エポキシ樹脂でコーティングした取付けコマをコンクリートに接着し、取付けコ

*1 長岡工業高等専門学校 専攻科 環境都市工学専攻 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 准教授 環境都市工学科 (正会員)

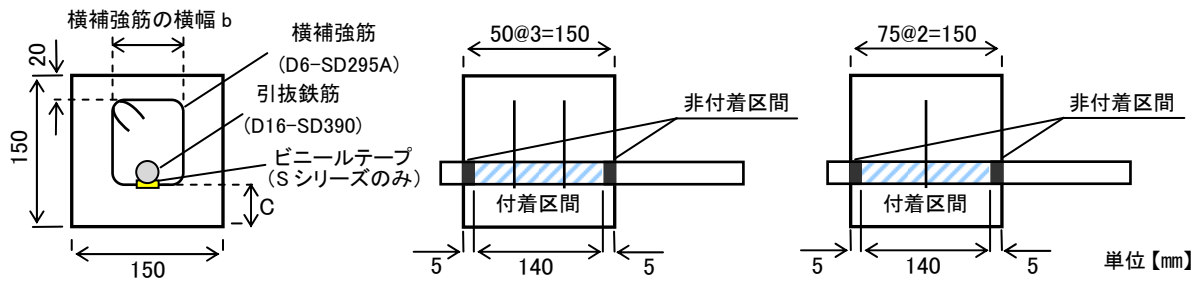


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータおよび実験結果

シリーズ	試験体	補強筋本数S (本)	かぶりC (mm)	補強筋の横幅b (mm)	腐食ひび割れ幅 W_c (mm)		腐食率 (%)		圧縮強度 (N/mm ²)	付着強度 (N/mm ²)
					設定値	実測値	主鉄筋	横補強筋 (下部領域)		
S0	S0_C32	0	32	-	-	-	-	-	31.7	7.3
					0.50	0.52	3.32	-	27.2	6.0
					1.00	0.98	7.84	-	30.3	1.8
S	S1_C32_b75	1	32	75	-	-	-	-	34.5	11.3
					0.50	0.56	2.82	-	30.3	7.9
					1.00	0.96	5.24	-	34.5	6.6 ※1
	S2_C32_b75	2	32	75	-	-	-	-	30.2	10.9
					0.50	0.50	2.34	-	31.5	11.5
					1.00	0.98	7.45	-	35.5	11.6 ※1
					-	-	-	-	28.2	10.6
					1.00	0.95	5.78	-	30.3	10.6
					-	-	-	-	26.5	11.1
	S2_C32_b100	2	32	100	-	-	-	-	26.5	11.3
					0.50	0.50	2.07	-	33.2	9.7 ※1
					1.00	0.98	5.64	-	27.1	11.8
	S2_C32_b125	2	32	125	-	-	-	-	36.1	11.9 ※1
					0.50	0.44	5.19	-	31.2	10.4 ※1
					1.00	0.98	3.99	-	27.7	11.3 ※1
S2_C42_b75	2	42	75	-	-	-	-	29.8	12.0 ※1	
				0.50	0.49	1.85	-	30.1	7.6 ※1	
				1.00	1.01	4.47	-	29.8	11.7	
S2_C52_b75	2	52	75	-	-	-	-	5.58 (4.84)	31.0	11.7 ※1
				0.50	0.50	1.68	-	20.2 (14.3)	32.4	10.0
				1.00	0.92	4.30	-	-	-	-
S _{cor}	S2 _{cor} -C32_b75	2	32	75	0.20	0.20	0.95	2.77 (2.99)	29.8	11.7
					0.50	0.50	1.68	5.58 (4.84)	31.0	11.7 ※1
					1.00	0.92	4.30	20.2 (14.3)	32.4	10.0

表-2 コンクリートの配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		
25	60	155	258	835	1040	2.58	

※1 試験体 2 体の平均値

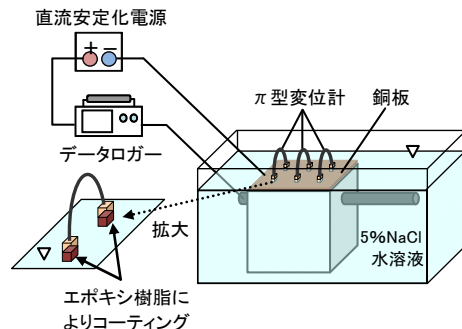


図-2 電食試験概要

マとπ型変位計をネジ止めにより取付けた。設置位置は、最小かぶり面の鉄筋軸直上に自由端から 25mm, 75mm, 125mm である。

鉄筋腐食量は、試験前後の鉄筋の質量減少率により評価した。載荷試験終了後、試験体からはり出した鉄筋を、10%濃度クエン酸二アンモニウム溶液に 24 時間浸漬させ、腐食生成物を除去した後に、腐食後の質量を計測した。主鉄筋においては付着区間での評価であり、非腐食時の鉄筋の質量を事前に計測し、単位長さ当たりの質量は一樣と仮定した。横補強筋に関しては、図-3 に示すように、全体の腐食率を測定した後、横補強筋の下部領域における腐食率も測定した。

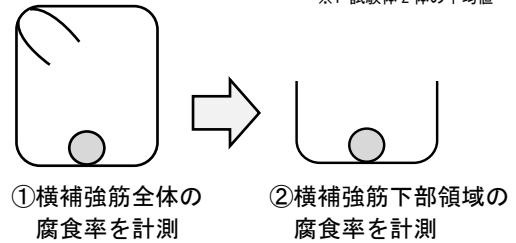


図-3 横補強筋の腐食率計測領域

載荷は片側引抜試験とし、変位制御(0.5mm/min)で実施した。主たる測定項目は、引抜荷重、自由端すべり量である。

3. 実験結果

3.1 横補強筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着割裂性 状に及ぼす影響因子

(1) 横補強筋量

図-4 に横補強筋量のみが異なる試験体における、付着強度と腐食ひび割れ幅の関係を示す。付着応力は引抜荷重を鉄筋の付着面積で除すことにより算出しており、鉄筋周長は腐食後の付着区間の平均的な鉄筋径から算出した。なお、付着強度は各パラメータにおける試験体 3 体の付着強度の平均値である。なお、一部の試験体では、主鉄筋が降伏したため、その結果は除外した。

図-4 より、腐食ひび割れ幅 0.0mm の時点に着目すると、横補強筋を有する S1_C32_b75 および S2_C32_b75 試験体は横補強筋を有しない S0_C32 試験体と比べ、付

着強度は大きい。これは、横補強筋による拘束効果によるものと考えられる。腐食ひび割れ幅の拡大に伴う付着強度の変化に着目すると、横補強筋を有しない試験体の場合、付着強度は腐食ひび割れ幅の拡大に伴い急激に低下する傾向にあるが、横補強筋を有する試験体における付着強度の低下は横補強筋を有しない場合と比較して明らかに抑制されており、横補強筋による腐食ひび割れ幅の拡大抑制効果が確認される。横補強筋を有する試験体の付着強度の低下に着目すると、S1_C32_b75 試験体においては、腐食ひび割れ幅の拡大とともに付着強度は低下する傾向にあり、最も腐食が進行している腐食ひび割れ幅 1.0mm 時点における付着強度の非腐食時に対する低下率は、約 42%であった。一方、S2_C32_b75 試験体においては、腐食ひび割れ幅が拡大しても、付着強度の低下は認められず、ほぼ一定値を示しており、横補強筋による付着強度の低下に対する抑制効果は横補強筋量の影響を受けることが分かる。

図-5 に横補強筋量のみが異なる試験体における付着応力-すべり量関係を主鉄筋の腐食ひび割れ幅ごとに示す。なお、図中に破線で示された算定式は、式(1)に示す、長岡らによって提案された横補強筋を有しない場合におけるコンクリートの拘束圧 σ_c に基づいた付着応力-すべり量モデルである⁴⁾。

$$\begin{aligned}
 0 \leq S \leq S_{\max} & \quad S_{\max} < S \\
 \tau = \tau_{cor} (S/S_{\max})^\gamma & \quad \tau = -I(S - S_{\max}) + \tau_{cor} \\
 \tau_{cor} = \sigma_c \cdot \cot 54.1^\circ + 2.60 & \quad I = 2.16 \sigma_c^{0.509} \\
 S_{\max} = 1.51D/100 & \\
 \gamma = 0.431 & \\
 \sigma_c = \exp(-\alpha \cdot W_{cr}) \cdot \sigma_{c-\max} & \quad (1) \\
 \sigma_{c-\max} = 4.05 \frac{C_1}{\phi} + 0.103 f'_c - 3.65 & \\
 \alpha = (-0.407 \ln C_2 + 2.12) \cdot f'_c^{2/3} & \\
 \left(\begin{array}{l} 1.32 \leq \frac{C_1}{\phi} \leq 4.19, 22.6 \leq f'_c \leq 55.5 \\ \frac{C_2 + \phi/2}{C_1 + \phi/2} > 1.50 \text{ の場合 } C_2 = 1.50 C_1 + \frac{\phi}{4} \end{array} \right) &
 \end{aligned}$$

ここで、 τ : 付着応力(N/mm²), τ_{cor} : 腐食 RC 部材の付着強度(N/mm²), S : すべり量(mm), S_{\max} : 付着強度時の

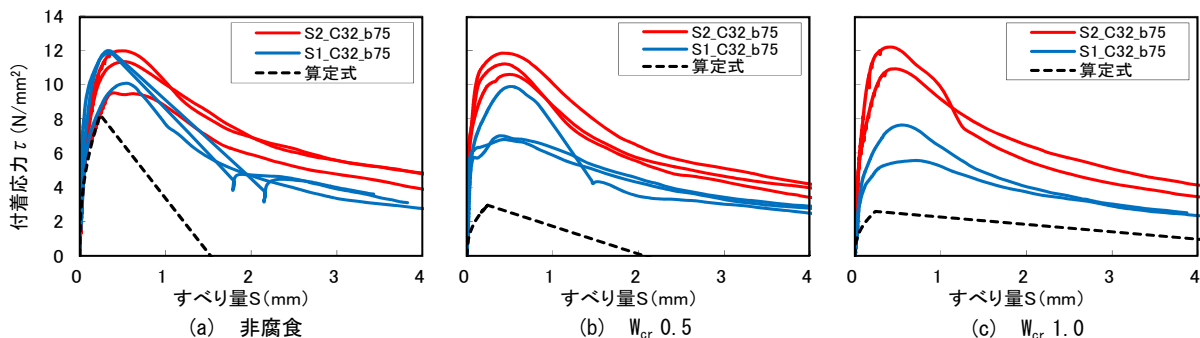


図-5 付着応力-すべり量関係(横補強筋量の影響)

すべり量(mm), D : 鉄筋径(mm), γ : 付着応力の増加勾配に関する係数, σ_c : コンクリートの拘束圧(N/mm²), I : 軟化勾配, α : 係数, W_{cr} : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm), $\sigma_{c-\max}$: 最大拘束圧(N/mm²), C_1 : 最小かぶり(mm), ϕ : 円孔径(鉄筋径)(mm), f'_c : 圧縮強度(N/mm²), C_2 : 横かぶり(mm)である。

図-5 より、主鉄筋が非腐食の状態では、横補強筋量によって剛性に特に差異は見られないが、腐食ひび割れ幅が 0.5mm および 1.0mm の時点では、剛性は横補強筋量が多い方が高い。また、付着強度時のすべり量は、横補強筋を有している試験体は横補強筋を有していないものと比べ大きくなる傾向にあるが、横補強筋量による差異は認められなかった。

付着強度以降の付着応力の挙動に関しては、横補強筋を有する試験体の場合、付着応力の急激な低下は発生せず、横補強筋がコンクリートの割裂に起因する急激な付着応力の低下を抑制し、延性的な低下挙動を示した。

(2) かぶり

図-6 にかぶりのみが異なる S2_C32_b75, S2_C42_b75 および S2_C52_b75 試験体における、付着強度と腐食ひび割れ幅の関係を示す。付着強度は非腐食時と比較して腐食ひび割れ幅 0.5mm の時点では、いずれのかぶりにおいても付着強度の低下は認められないが、腐食ひび割れ幅 1.0mm の時点ではかぶりが大きいほど付着強度が低下する傾向にあった。この要因としては、内部ひび割れの影響が考えられる。河村ら⁵⁾によれば、内部ひび割れはその先端を軸としたかぶり面側への曲げ変形挙動を生

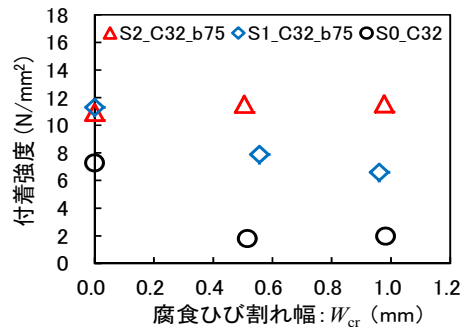


図-4 付着強度と腐食ひび割れ幅の関係(横補強筋量の影響)

じさせることを指摘している。本実験において、腐食膨張挙動が等方的であるとすれば、最小かぶりが大きいほど、最小かぶり面の腐食ひび割れ幅が 1.0mm に到達した時点で内部ひび割れは進展しているものと考えられ、その場合に生じる曲げ変形挙動の影響に加え、内部ひび割れによる鉄筋周辺のコンクリートの損傷によって付着強度の低下が生じたものと考えられる。

図-7にかぶりのみが異なる試験体における付着応力-すべり量関係を主鉄筋の腐食ひび割れ幅ごとに示す。非腐食および腐食ひび割れ幅 0.5mm の時点においては、かぶりによらず付着応力-すべり量関係は概ね同様である。腐食ひび割れ幅 1.0mm の時点においては、先述したように付着強度はかぶりによって異なるものの、かぶりが最も小さい S2_C32_b75 試験体における付着強度時のすべり量の平均値は 0.43mm であることに対して、S2_C42_b75 試験体は 0.60mm, S2_C52_b75 試験体では 0.41mm であり、付着強度時のすべり量はかぶりによって明確な差異は生じていない。一方、付着強度以降の軟化挙動に関しては、腐食ひび割れ幅 1.0mm の時点において、かぶりが小さい程、すべり量の増加に伴い顕著に付着応力が低下し、付着応力が約 3 N/mm² に漸近する傾向が認められた。

(3) 横補強筋の横幅

図-8 は横補強筋の横幅 b を変化させた S2_C32_b75, S2_C32_b100 および S2_C32_b125 試験体における、付着強度と横補強筋の横幅 b の関係を主鉄筋の腐食ひび割れ幅毎に整理したものである。図-8 より、主鉄筋の中心

から横補強筋中心までの距離が拡大しても、付着強度に大きな差異は認められないことから、本実験の範囲内では、主鉄筋と横補強筋の距離が約 60mm 以内までは、横補強筋の拘束効果は十分に期待できるものと判断される。

図-9 に横補強筋の横幅 b のみが異なる試験体における付着応力-すべり量関係を主鉄筋の腐食ひび割れ幅ごとに示す。主鉄筋の腐食ひび割れ幅が変化しても各横補強筋の横幅 b の付着応力-すべり量関係は概ね同様であり、腐食ひび割れ幅による差異は認められない。また、同一腐食ひび割れ幅に着目すると、横補強筋の横幅 b によって付着強度時までの剛性および付着強度以降の軟化挙動に大きな差異は認められなかった。

(4) 横補強筋の腐食

図-10 に横補強筋の腐食率が異なる S2_C32_b75 および S2_{cor}_C32_b75 試験体における付着応力-すべり量関係を主鉄筋の腐食ひび割れ幅ごとに示す。図-10 より、同一腐食ひび割れ幅に着目すると、横補強筋の腐食によって剛性および付着強度以降の軟化挙動に大きな差異は認められない。

図-11 に主鉄筋のみを腐食させ、横補強筋の腐食率が 0%である S2_C32_b75 試験体および、主鉄筋と横補強筋を腐食させた S2_{cor}_C32_b75 試験体における付着強度と横補強筋の腐食率の関係を示す。S2_C32_b75 試験体の付着強度は S2_C32_b75 試験体シリーズの付着強度の平均値を用いた。また、ここでの横補強筋の腐食率とは横補強筋の下部領域における腐食率である(図-3 参照)。図-11 より、横補強筋の腐食率が 15%の範囲内では付着強

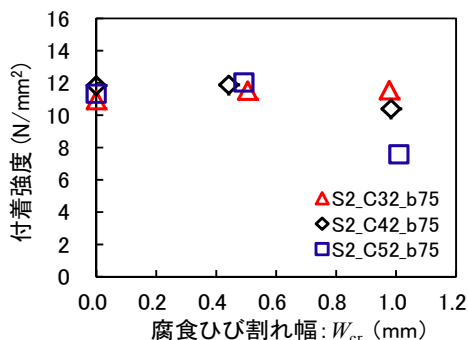


図-6 付着強度と腐食ひび割れ幅の関係

(かぶりの影響)

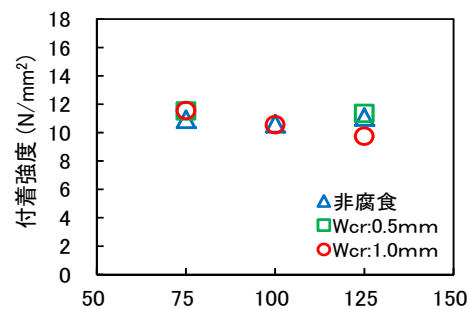


図-8 付着強度と横補強筋の横幅 b の関係 (S2-C32)

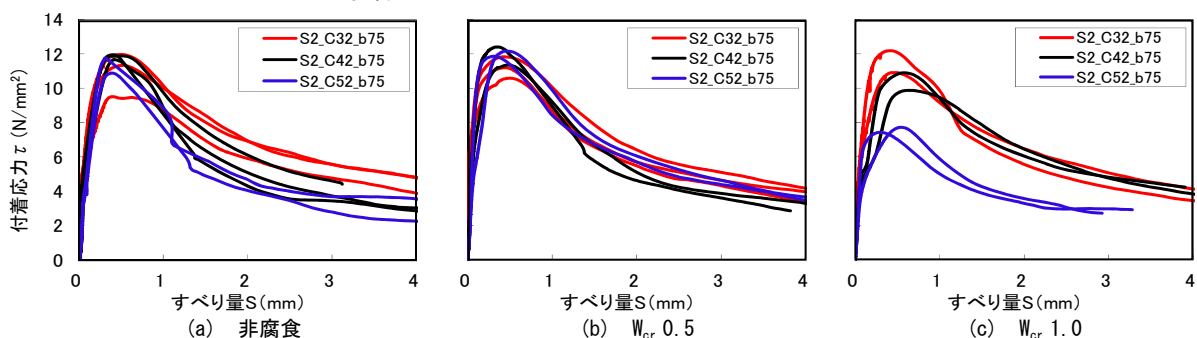


図-7 付着応力-すべり量関係 (かぶりの影響)

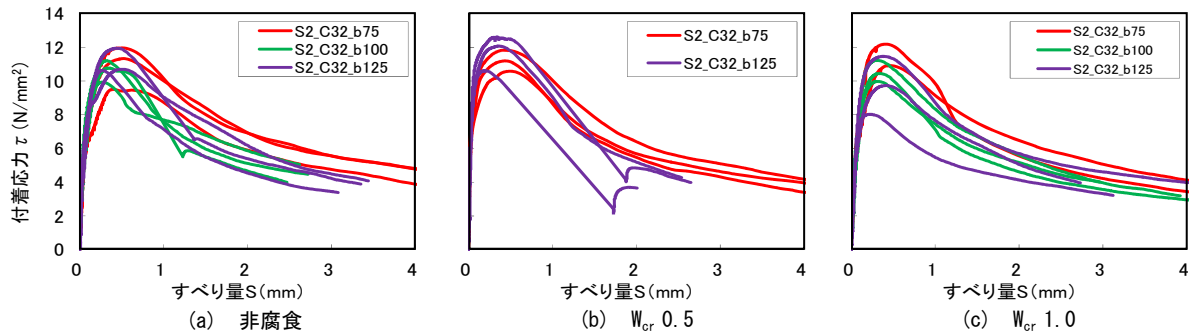


図-9 付着応力-すべり量関係(横補強筋の横幅の影響)

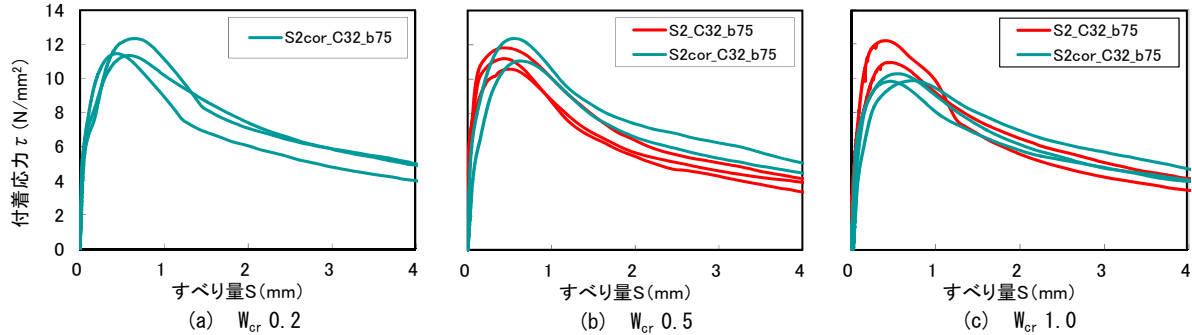


図-10 付着応力-すべり量関係(横補強筋の腐食の影響)

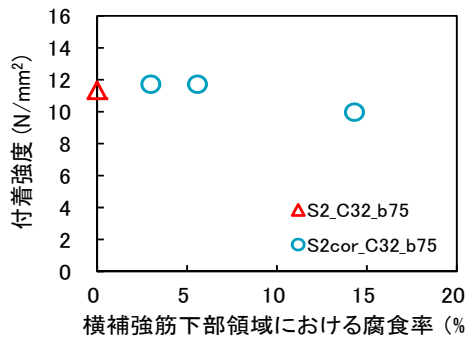


図-11 付着強度と横補強筋の腐食率の関係

度に顕著な差異は見られなかった。このことから、本実験の範囲内ではあるが、拘束効果が大いと思われる横補強筋の下部領域における腐食率が15%程度であれば、横補強筋の腐食による拘束効果の低下は小さいものと考えられる。

4. 横補強筋による付着割裂性状に対する拘束効果

本章では、横補強筋が鉄筋腐食したRC部材の付着強度に及ぼす効果を拘束圧 σ_n と関連付けて評価することを試みる。

図-12は、RC部材の付着割裂機構を模式的に示したものである。鉄筋に引抜き力が作用すると、異形鉄筋の節前面のコンクリートには支圧応力が作用するが、この支圧応力の反力として付着応力 τ と拘束圧 σ_n が鉄筋に作用する。長岡らは、摩擦作用の影響を考慮して、付着応力 τ と拘束圧 σ_n の関係を式(2)に示すように提案した。

$$\tau = \sigma_n \cdot \cot 54.1^\circ + 2.60 \quad (2)$$

$$\sigma_n = \sigma_c + \sigma_s \quad (3)$$

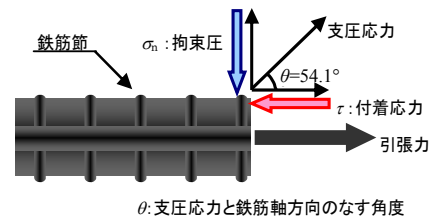


図-12 RC部材の付着割裂機構

ここで、 σ_c :コンクリートの拘束圧(N/mm²)、 σ_s :横補強筋による拘束圧(N/mm²)である。

本研究では横補強筋を有する場合の拘束圧 σ_n は、式(3)に示すように、コンクリートの拘束圧 σ_c と横補強筋の拘束圧 σ_s の重ね合わせで表現することとし、以下の手法によって横補強筋の拘束圧 σ_s を算出した。式(2)に横補強筋を有する試験体の付着強度を代入し、拘束圧 σ_n を逆算した。すなわち、ここで求めた拘束圧は式(3)に示す $\sigma_c + \sigma_s$ である。この値から、式(1)より求めたコンクリートの拘束圧 σ_c を減じ、横補強筋による拘束圧 σ_s を算出した。

図-13に横補強筋量のみが異なる試験体における、横補強筋による拘束圧 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係を示す。全体的な傾向として、横補強筋量が多いほど各腐食ひび割れ幅時点での σ_s が大きい。腐食ひび割れ幅0.0mm時点においても σ_s は0以上の値を示しているが、これは、腐食ひび割れ幅の状態によらず発揮される横補強筋による拘束効果によるものである。腐食ひび割れ幅の拡大に伴う σ_s の変化に着目すると、 σ_s は腐食ひび割れ幅の拡大とともに増加する傾向にあり、 σ_s はある一定量ではなく、腐食ひび割れ幅によって変化することがわかる。八十島ら⁹⁾は、横補強筋による拘束効果は主鉄筋すべりに伴う割裂ひび割れに応じて発揮されることを報告しており、

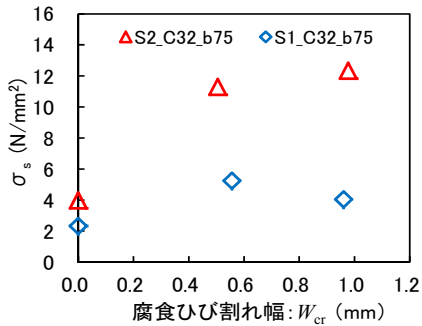


図-13 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係
(横補強筋量の影響)

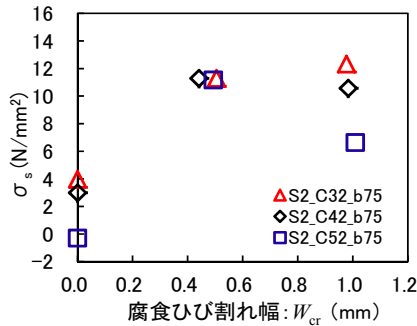


図-14 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係
(かぶりの影響)

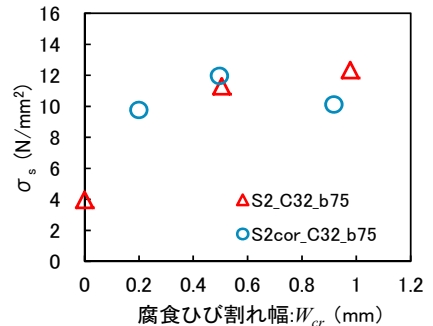


図-15 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係
(横補強筋の腐食の影響)

腐食ひび割れが発生した試験体の σ_s が非腐食時よりも大きくなったことは既往の知見と整合する。

横補強筋による拘束圧 σ_s は、腐食ひび割れ幅の状態にかかわらず横補強筋が存在することにより発揮される拘束効果と腐食ひび割れ幅に応じて発揮される拘束効果による。したがって、任意の腐食ひび割れ時点の横補強筋による拘束圧 σ_s を定量化するためには、腐食ひび割れ幅に応じて発揮される拘束効果の定量化のみならず、横補強筋量やかぶり等によって変化する非腐食時の横補強筋による拘束圧 σ_s の定量化も併せて行う必要があり、これについては今後の課題である。

図-14にかぶりのみが異なる試験体における、横補強筋による拘束圧 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係を示す。図-14に示すように、非腐食時と腐食ひび割れ幅 0.5mm 時点においては、かぶりによって変化は見られないが、腐食ひび割れ幅 1.0mm 時点では、かぶりが小さいほど σ_s が大きくなる傾向にある。

図-15は横補強筋が非腐食である S2_C32_b75 および、横補強筋を腐食させた S2cor_C32_b75 試験体における、横補強筋による拘束圧 σ_s と腐食ひび割れ幅の関係である。図-15より腐食ひび割れ幅と σ_s の関係は、横補強筋の腐食の有無によらずほぼ同様の傾向を示しており、本実験の範囲内では、横補強筋下部領域の腐食率が約 15%以内において横補強筋の腐食が σ_s に及ぼす影響は顕著に生じなかった。横断補強筋がより過度に腐食した場合においては、 σ_s に影響を及ぼす可能性があり、今後更なる検討が必要である。

5. 結論

本研究は、横補強筋を配筋した RC 試験体に対して片側引抜試験を実施し、鉄筋腐食した RC 部材の付着割裂性状に対する横補強筋の付着劣化抑制効果について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 横補強筋は鉄筋腐食による RC 部材の付着劣化を抑制し、その抑制効果は横補強筋量が多いほど顕著である。
- (2) 横補強筋を有していても主鉄筋の腐食が進行した

場合には、内部ひび割れの影響によってかぶりが大きいほど付着強度が低下する可能性がある。

- (3) 本実験の範囲内では、主鉄筋の中心から横補強筋の中心までの距離が約 60mm 以内ならば、断面中央の主鉄筋に対する横補強筋の付着劣化抑制効果は十分に期待できる。
- (4) 本実験の範囲内において、横補強筋が腐食した場合、横補強筋下部領域の腐食率が約 15%の範囲内では、付着強度の顕著な低下は見られなかった。
- (5) 横補強筋による拘束圧 σ_s は横補強筋量が多いほど大きい。また、腐食ひび割れ幅が大きくなるにしたがって、横補強筋による拘束圧 σ_s が増加する傾向にあった。

参考文献

- 1) 李 朝承, 友澤 史紀, 野口 貴文: 鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性能に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.534-539, 1996
- 2) 柳益夫, 丸山久一, 清水敬二: 鉄筋の腐食による付着劣化に及ぼすスターラップの影響, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, V-190, pp.410-411, 1992
- 3) 牧野誠太郎, 松島学, 横田優: 電食試験により発生したひび割れ幅が付着性能に及ぼす影響, 土木学会第 57 回年次学術講演会, pp.1119-1120, 2002
- 4) 長岡 和真, 阿部 哲雄, 番場 俊介, 村上 祐貴: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, vol.34, No.1, pp.29-42, 2013.5
- 5) 河村圭亮, 中村光, 国枝稔, 上田尚文: 鉄筋腐食に伴うコンクリートのひび割れ進展挙動評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, pp.1075-1080, 2009
- 6) 八十島章, 金久保利之, 石川嘉崇: フライアッシュ高強度人工軽量骨材を用いた片持梁型試験体による付着割裂性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.25, No.2, pp.961-966, 2003