

論文 腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧が鉄筋腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅の關係に及ぼす影響

刈谷潤貴*1・高木大地*1・村上祐貴*2

要旨: 本研究では、電食試験により鉄筋を促進腐食劣化させ、かぶり、鉄筋径、横補強筋が鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅の關係に及ぼす影響について検討した。腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧の違いによって生成される腐食生成物の力学的な特性は異なり、腐食ひび割れ幅と腐食量の關係は放物的な關係であった。横補強筋を有しない場合、かぶり表面の腐食ひび割れ幅は一定の角度で開口し、かぶりが大きい程、腐食の増加に伴う腐食ひび割れ幅の増加は顕著となり、その角度は鉄筋が太径な程、大きい値を示した。また、横補強筋を有する場合、腐食量とひび割れ幅の關係は、かぶりによらず、概ね同様の關係を示した。

キーワード: 鉄筋腐食、腐食ひび割れ幅、腐食量、コンクリートの拘束圧

1. はじめに

既存 RC 構造物において、塩害や中性化によるコンクリート内部の鉄筋腐食は、種々ある劣化の中でも発生頻度が比較的高いことに加え、耐荷力や変形性能といった構造性能に大きな影響を及ぼす場合が多い。鉄筋腐食による構造性能の低下は、腐食に伴う鉄筋量の減少や鉄筋とコンクリートの付着劣化に起因する。従って、鉄筋腐食した既存 RC 構造物の構造性能評価の実現には、RC 構造物内部の空間的な腐食性状を把握する必要があり、非破壊、或いは微破壊によって部材内部の鉄筋腐食量を推定する研究が行われている^{1), 2)}。

RC 部材内部の鉄筋腐食量の推定については、これまでも、様々な評価手法が提案されており、その試みの一つとして通常の点検業務で比較的容易に計測が可能なかぶりコンクリートの鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅から、鉄筋腐食量を推定する試みがなされている^{3), 4)}。

既往の研究において、かぶりコンクリートの腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の關係には正の相関性を有することが明らかとなっているが、その關係は研究ごとに相違しており、現在までに蓄積された知見を実構造物に適用するまでに至ってはいない。その主たる要因としては二つ挙げられる。この種の研究では、時間的な制約から電食や塩水噴霧などによる促進腐食試験によって実験が行われる場合が多いが、促進腐食試験によって発生する腐食生成物と実構造物の腐食生成物の体積膨張率は相違することが西澤らによって指摘されている⁵⁾。西澤らは、電食試験および促進試験では、体積膨張率の高い塩化酸化鉄(III)カルシウムが生成され、実構造物や暴露試験で生成される腐食生成物の体積膨張率と相違することを明らかとしている。その上で、既往の研究における塩水噴霧試験および長期暴露試験結果をもとに、ひび割れ幅と腐

食量の關係式の構築を試みた結果、電食試験と塩水散布試験、長期暴露試験の同じひび割れ幅における腐食量の違いを、体積膨張倍率の違いで表現できる可能性があることを指摘している。したがって、促進腐食試験と実構造物の腐食環境は異なるが、生成される腐食生成物が明らかとなれば、促進腐食試験をもとに構築された腐食ひび割れ幅と腐食量の關係を適用することが可能であると考えられる。

もう一つの要因として、腐食ひび割れ幅と腐食量の關係はコンクリートの力学的特性に加え、かぶりや鉄筋径などによっても変化することが考えられる。このことは、腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量の關係性が、腐食膨張挙動に対するコンクリートの抵抗性(拘束圧)によって変化し、このコンクリートの拘束圧がコンクリート強度のみならず、かぶり、鉄筋径、および横補強筋量などの影響を受け変化するためであると考えられる。腐食ひび割れ幅と腐食量の關係に影響を及ぼすこれらの因子は次元が異なるため、統一的に評価することは困難である。

一方、鉄筋コンクリート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⁶⁾。腐食膨張挙動を割裂挙動として捉えれば、横補強筋は、腐食膨張挙動に対するかぶり表面の鉄筋軸方向の腐食ひび割れの開口を拘束するため、かぶり表面の腐食ひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定には、横補強筋の腐食膨張挙動に対する拘束効果も明らかにする必要がある。

そこで本研究では、RC 試験体に対し、電食試験により鉄筋を促進腐食劣化させ、かぶり、鉄筋径および横補強筋が鉄筋腐食と腐食ひび割れ幅の關係に及ぼす影響度をコンクリートの拘束圧として評価し、拘束圧に基づいてかぶり表面の腐食ひび割れ幅と鉄筋腐食量との關係について検討した。

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (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)

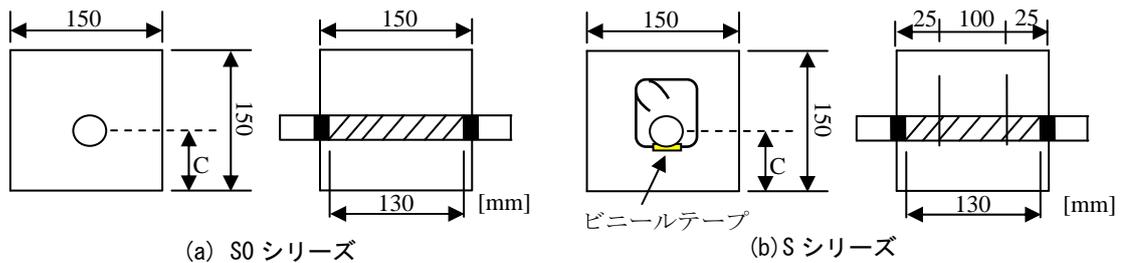


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

シリーズ	試験体	補強筋本数S (本)	芯かぶりC (mm)	鉄筋径D (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	積算電流量 (hr・A)	腐食量 (mg/cm ²)	腐食ひび割れ発生限界 腐食量(mg/cm ²)
S0	S0_D13	0	40	13	29.08	17.0	145.1	8.35
			50		29.76	17.0	181.9	15.69
			60		29.76	17.0	180.1	22.56
	S0_D16		40	16	25.99	18.3	172.1	7.06
			50		29.08	17.0	134.6	8.78
			60		34.35	17.0	164.3	10.49
	S0_D22		40	22	30.89	17.0	67.2	4.55
			50		34.07	17.0	48.9	4.08
			60		30.89	17.0	40.3	3.42
S	S_D13	2	40	13	29.39	17.0	104.4	8.45
			50		29.33	17.0	108.0	16.06
			60		29.33	17.0	115.3	15.83
	S_D16		40	16	33.50	17.0	71.6	2.85
			50		29.39	17.0	86.0	4.49
			60		33.50	17.0	69.2	9.18
	S_D22		40	22	34.07	17.0	42.7	2.06
			50		26.24	17.0	53.2	3.50
			60		26.24	17.0	54.5	4.27

表-2 コンクリートの配合表

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

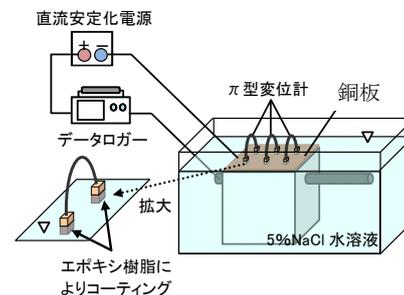


図-2 電食試験概要

2. 試験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。試験体の断面は150mm×150mm、長さ150mmであり、主鉄筋にD13(SD295A)、D16(SD295A)、D22(SD345)、横補強筋にD6(SD295A)を用いた。横補強筋は、試験体端面から、25mm、125mmの位置に配筋した。なお、本実験では主鉄筋のみを腐食の対象としており、主鉄筋と接触する部分の横補強筋には、ビニールテープを巻き付け、絶縁した。

実験パラメータを表-1に示すように、主鉄筋のみ配筋したS0シリーズと、主鉄筋および横補強筋を配筋したSシリーズに分類され、両シリーズの実験パラメータは鉄筋径(D)、かぶり(C)、横補強筋の有無であり、各パラメータにつき試験体は3体作成した。

コンクリートの配合を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、練り混ぜ水には5%NaCl水溶液を用いた。試験体の養生方法は水中養生とした。

2.2 電食試験方法

鉄筋の腐食手法は電食試験を採用し、材齢7日の時点

で直流安定化電源装置を用いて主鉄筋に直流電流を、0.1A通電した。積算電流量は表-1に示すように、17hr・Aである。なお、試験体D16_C40については、所定の時間に試験が終了できず、積算電流量が18.3hr・Aである。電食試験は図-2に示すように、5%NaCl水溶液を満たした水槽に試験体を浸漬し、主鉄筋を陽極、銅板を陰極に接続した。銅板は最小かぶり面に設置した。腐食区間は、図-1に示すように、130mmであり、試験体両端から10mmの区間は熱収縮チューブを装着して防食した。

電食試験では、最小かぶり表面の鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅をπ型変位計により計測した。π型変位計は、図-2に示すように、π型変位計設置箇所位置の銅板に穴を開け、ビニールテープとエポキシ樹脂でコーティングした取り付けコマをコンクリートに接着し、取付コマとπ型変位計をネジ接合した。π型変位計は、最小かぶり面の鉄筋軸直上に試験体端から25mm、75mm、

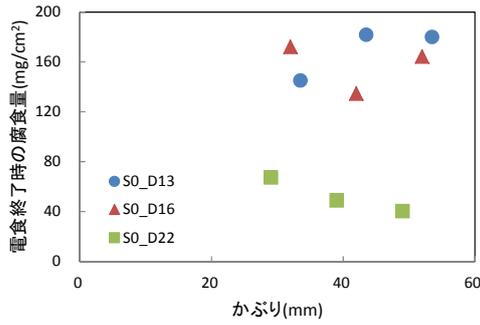


図-3 電食終了時の腐食量とかぶり

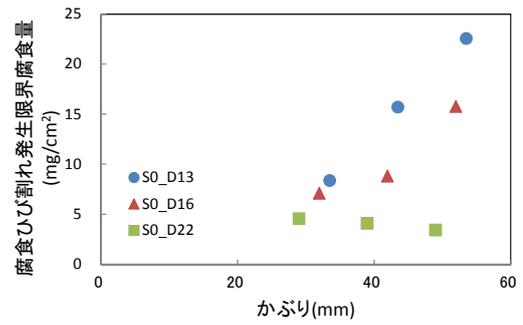


図-4 ひび割れ発生限界腐食量とかぶり

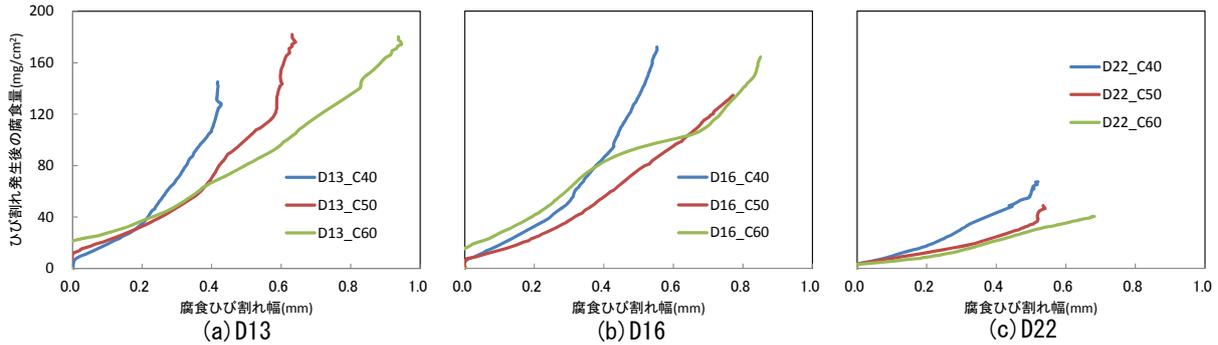


図-5 ひび割れ発生後の腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅(横補強筋なし)

125mm に設置した。

電食試験終了後、試験体から鉄筋をはつり出し、10%濃度クエン酸アンモニウム溶液に24時間浸漬させ、腐食生成物を除去後、質量を計測し、事前に計測した鉄筋の質量から腐食量を算出した。なお、熱収縮チューブで防食した領域も腐食が認められたため、試験体に埋設された領域の腐食量を算出した。

3. 実験結果

3.1 かぶり面のひび割れ幅と腐食量

図-3 に電食試験終了時におけるかぶりと腐食量の関係を示す。平均腐食量は D13 が 169mg/cm²、D16 が 151mg/cm²、D22 が 51mg/cm²であり、鉄筋径が大きい程単位面積当たりの腐食量は小さくなる傾向にあった。

一方、かぶりの違いが腐食量に及ぼす影響は認められなかった。これは、腐食ひび割れから塩水が流入するため、かぶりの大きさによって腐食量は変化しなかったと考えられる。実構造物では、鉄筋まで浸透する塩分量はかぶりの大きさによって異なるため、外部環境が同じであれば、腐食量はかぶりの影響を受ける。

図-4 に腐食ひび割れ発生限界の腐食量を示す。腐食量は、積算電流量に比例すると仮定し、腐食ひび割れ発生時間から腐食ひび割れ発生限界腐食量を算出した。なお、腐食ひび割れ発生の判断は、かぶり表面に設置したπ型変位計の変位が急激に増加する時点とした。図-4 に示すように、D13 および D16 では、かぶりの増加に従い、腐食ひび割れ発生限界腐食量が大きくなった。D22

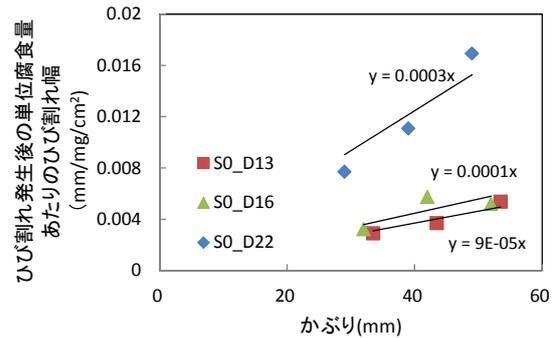


図-6 かぶりと単位腐食当りのひび割れ幅

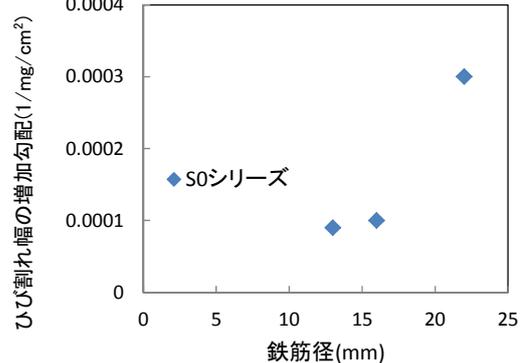


図-7 ひび割れ幅の増加勾配と鉄筋径

ではこの傾向は認められなかったが、これは鉄筋径が太径のため、腐食ひび割れを発生させるために必要なエネルギーを獲得するために必要な腐食量が小さく、かぶりの影響が顕著に生じなかったと考えられる。

図-5(a)～(c)にかぶり表面のひび割れ幅とひび割れ発生後の腐食量の関係を示す。いずれの鉄筋径においても、かぶり大きいほど腐食量の増加に伴い、腐食ひび割れが顕著に増加する傾向にある。特に、D13 および D16

では、腐食ひび割れ幅が小さい時点では、かぶりが大きい程、同一腐食ひび割れ時の腐食量は大きい、腐食ひび割れが拡大するに従い、かぶりが大きい程同一腐食ひび割れ時の腐食量が小さくなり、かぶりと腐食量の関係が腐食ひび割れ幅の大きさによって異なる傾向を示した。

図-6 は単位腐食量当たりのひび割れ幅とかぶりの関係である。なお、ここでの腐食量とは試験終了時の腐食量から腐食ひび割れ発生限界腐食量を減じた値である。同図に示すように、単位腐食量当たりの腐食ひび割れ幅は、かぶりの増加に伴い線形的に増加する傾向にある。

図-6 に示す結果を各鉄筋径毎に線形近似し、単位腐食量当たりのひび割れ幅の増加勾配を算出し、鉄筋径との関係を示したものが図-7 である。図-7 に示すように、鉄筋径が太径なほど増加割合が大きい。このことより、かぶり表面の腐食ひび割れ幅は、一定の角度で開口し、その角度は鉄筋が太径な程、大きいものと考えられる。

図-5 に再度着目する。腐食ひび割れが拡大するに従い、コンクリートの腐食膨張挙動に対する拘束効果は低下するため、腐食ひび割れの増加に伴う腐食量の増加は鈍化するものと考えられる。しかしながら、図-5 に示すように、腐食ひび割れ幅と腐食量の関係は、腐食ひび割れ幅が拡大するに従い、腐食量が顕著に増加した。このことは、腐食生成物の物性がコンクリートの拘束度によって異なるためであると考えられる。

吉岡らは、腐食生成物の力学的特性について実験的に検討を行っており、拘束下で生成された腐食生成物と非拘束下で生成された腐食生成物は、極めて性質の異なった固体であり、前者は比較的弾性的（ $200\text{N/mm}^2 \sim 300\text{N/mm}^2$ ）であることに對し、後者は塑性的性質の強い固体であることを指摘している⁷⁾。このことは足助・大下らも指摘しており、コンクリート中で生成された腐食生成物の弾性係数は約 20000N/mm^2 であり、無拘束下の場合では、 500N/mm^2 程度としている⁸⁾。両文献で弾性係数のオーダーは異なるものの、コンクリートの拘束圧によって腐食生成物の力学的特性は相違することが示されている。コンクリート内で生成される腐食生成物の力学的特性が拘束圧によって異なることに立脚すれば、図-8 に示すように、弾性的で硬質の腐食生成物の場合、腐食生成物の膨張挙動は拘束されにくく、腐食膨張量に応じて線形的に腐食ひび割れが増加すると考えられる。一方、腐食生成物の弾性係数が小さい場合、腐食ひび割れが発生するまでに相当の腐食量が必要であり、腐食ひび割れ発生後は、弾性係数が大きい場合に比べて、腐食膨張挙動はコンクリートの拘束の影響を受けるため、腐食量の増加に伴い緩やかに腐食ひび割れ幅が開口する。ひび割れの開口が進み、コンクリートの拘束圧が消失した以降は、膨張挙動に対する腐食生成物の弾性係数の大きさは

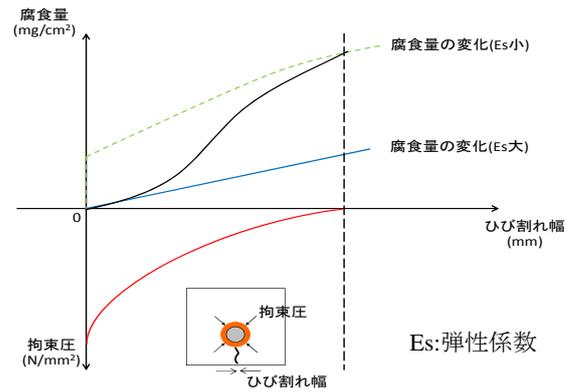


図-8 ひび割れ幅の拡大に伴う腐食量の変化

影響せず、腐食量の増加に従って、ある一定の割合でひび割れ幅が開口していくものと考えられる。実際のコンクリート内部の腐食進行は、膨張挙動に応じてコンクリートの拘束圧が変化するため、生成される腐食生成物の力学的特性が連続的に変化するものと考えられる。すなわち、かぶり表面の腐食ひび割れ幅が開口するにしたがい、塑性的性質の強い腐食生成物の生成量の割合が大きくなることにより、弾性係数の大きい場合の挙動から弾性係数の小さい挙動に遷移し、腐食ひび割れ幅の拡大に伴い腐食量が放物的な変化を示したものと考えられる。なお、上述した腐食生成物の物性の知見は電食試験によって得られたものであり、実環境下で生成される腐食生成物とは、異なる可能性があり、今後更なる検討が必要である。

3.2 腐食膨張挙動に対するコンクリート拘束圧と腐食量

前述したように、コンクリートのかぶり表面のひび割れ幅と腐食量の関係は、腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧の影響を大きく受けるものと考えられる。

長岡らは、腐食膨張挙動を静的破砕剤を用いて模擬腐食膨張に対するコンクリートの拘束圧算定式を提案している。静的破砕剤はコンクリートの拘束が大きい場合は、弾性的な挙動を示し、拘束圧が小さい状態では自己崩壊が生じ、塑性的な性質が強くなる。この性質は上述した腐食生成物の力学的特性と類似している。そこで、式(1)に示す長岡らによって提案された拘束圧算定式から各試験体の拘束圧を算定し、腐食量との比較を行った結果を図-9 に示す。

$$\begin{aligned} \sigma_n &= \exp(-\alpha \cdot W_{cr}) \cdot \sigma_{n-\max} \\ \sigma_{n-\max} &= 4.05 \frac{C_1}{\phi} + 0.103 f'_c - 3.65 \\ \alpha &= (-0.407 \ln C_2 + 2.12) \cdot f'_c{}^{2/3} \\ &\left(\begin{array}{l} 1.32 \leq \frac{C_1}{\phi} \leq 4.19, 22.6 \leq f'_c \leq 55.5 \\ \frac{C_2 + \phi/2}{C_1 + \phi/2} > 1.50 \text{ の場合 } C_2 = 1.50 C_1 + \frac{\phi}{4} \end{array} \right) \quad (1) \end{aligned}$$

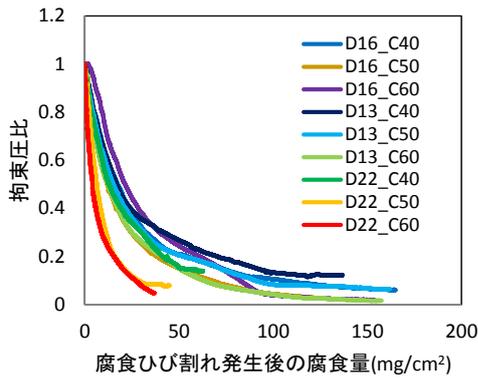


図-9 拘束圧比とひび割れ発生後の腐食量

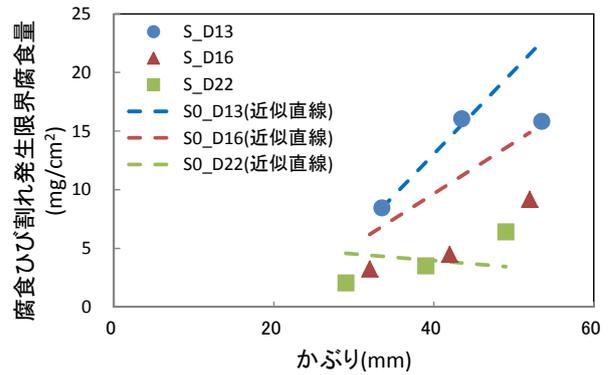


図-10 腐食ひび割れ発生限界腐食量とかぶり

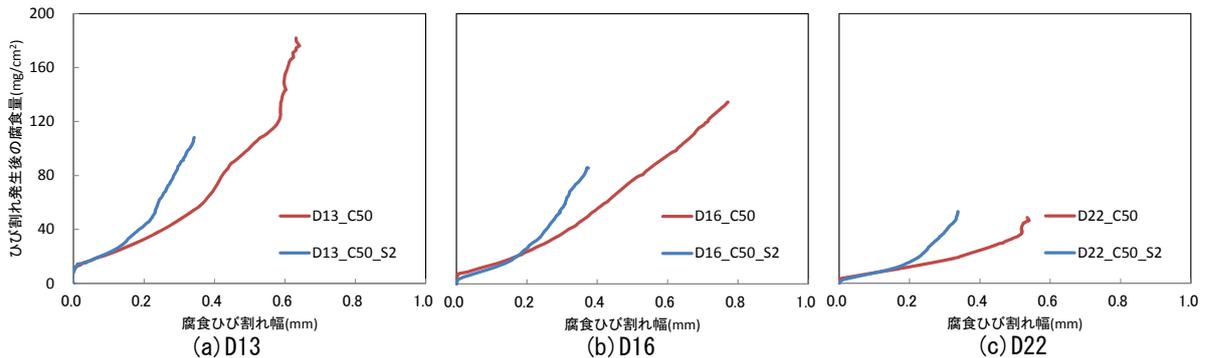


図-11 横補強筋の有無によるひび割れ発生後の腐食量と腐食ひび割れ幅(かぶり 50mm)

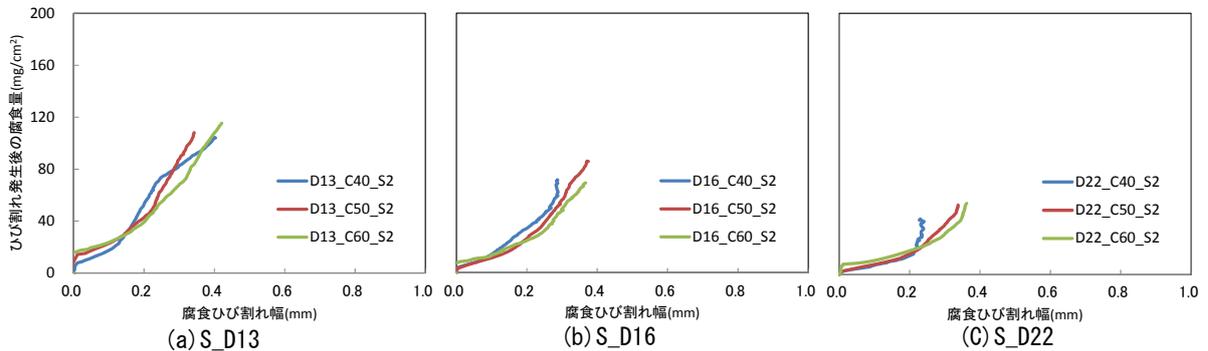


図-12 ひび割れ発生後の腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅(横補強筋あり)

ここで、 σ_n : 拘束圧(N/mm²)、 W_{cr} : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm)、 σ_{n-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。

なお、拘束圧は腐食ひび割れ発生時点の拘束圧(最大拘束圧)で正規化している。また、ここでの腐食量は全腐食量から腐食ひび割れ発生限界の腐食量を減じた値であり、腐食ひび割れ発生後に生成された腐食生成物の腐食量である。同図に示すように、拘束圧の低下に伴い、腐食量が増加する傾向にある。また、試験体 D22_C50 および D22_C60 を除き、正規化した拘束圧と腐食量の関係は、ほぼ同様の傾向を示した。このことは、腐食ひび割れ幅から拘束圧を算出し、図-9 に示す関係から、腐食量が推定できる可能性を示唆しており、今後さらなる検討を進める。

3.3 横補強筋がかぶり面の腐食ひび割れ幅に及ぼす影響

図-10 に横補強筋を配筋した試験体の腐食ひび割れ発生限界腐食量とかぶりの関係を示す。S_D16 試験体シリーズでは、横補強筋を有する試験体の腐食ひび割れ発生限界腐食量は、横補強筋を有しない場合と比較して全体的に小さくなっているが、S_D13 および S_D22 試験体シリーズでは横補強筋の有無によらず、かぶりと腐食ひび割れ発生限界腐食量は概ね同様の値を示しており、腐食ひび割れ発生以前では、横補強筋の影響は小さいものと考えられる。

図-11 に一例としてかぶり 50mm の試験体のひび割れ発生後の腐食量と腐食ひび割れ幅の関係を示す。積算電流量は同じであることから、本来、試験終了時の腐食量は鉄筋径が同一であれば、横補強筋の有無によらず、同程度になるものと予想されるが、同図に示すように、い

ずれの鉄筋径においても横補強筋を有する場合の試験終了時の腐食量は横補強筋を有しない場合と比較して小さい。本実験では主鉄筋の接触部の横補強筋をビニールテープで絶縁したが、主鉄筋に通電された電流がコンクリートを介して、横補強筋に流れたためであると考えられる。試験終了後、試験体から横補強筋をはつり出し、目視で確認した結果、若干の腐食が生じていた。

ひび割れ幅の増加に伴う腐食量の変化に着目すると、横補強筋を有する試験体は、腐食ひび割れが約0.2mmの時点から腐食量の増加に伴うひび割れ幅の拡大が横補強筋を有しない場合に比べて緩やかになる傾向を示しており、ひび割れ幅が約0.2mm程度まで開口すると、横補強筋による腐食ひび割れ開口の抑制効果が発揮された。

図-12に横補強筋を有する試験体のひび割れ発生後の腐食量と腐食ひび割れ幅の関係を示す。図-5に示したように、横補強筋を有しない場合、かぶりが大きい程、腐食の増加に伴うひび割れ幅の増加が大きくなる傾向にあったことに対し、横補強筋を有する場合では、そのような傾向は認められず、かぶりによらずほぼ同様の関係を示した。これは、横補強筋が腐食ひび割れの開口を抑制することで、ひび割れ開口角度が小さくなり、本実験の腐食量の範囲内では、かぶりの影響が認められなかったものと考えられる。

本実験は電食により発生した腐食膨張圧に対するコンクリートや横補強筋の拘束が腐食ひび割れ幅と腐食量の関係に及ぼす影響について検討するものであるが、実構造物と腐食環境が異なるため、本実験結果を実構造物に直接適用することはできない。しかしながら、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの腐食ひび割れの進展適性が腐食生成物の体積膨張とそれに対するコンクリートや横補強筋の力学的な拘束によることを鑑みれば、かぶり、鉄筋径、横補強筋が腐食ひび割れ幅と腐食量の関係に及ぼす影響について定性的な傾向は捉えていると考えられる。実環境と腐食促進環境で生成される腐食生成物の物性の相違や腐食の不均一性が腐食ひび割れ幅と腐食量の関係に及ぼす影響については今後の課題としたい。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 同一鉄筋径に対する腐食ひび割れ発生限界腐食量は、かぶりが大きい程大きくなる。また、鉄筋径が大きくなる程、同一かぶりに対する腐食ひび割れ発生限界腐食量は小さくなる。
- (2) 本実験の範囲内では横補強筋を有しない場合、かぶり表面の腐食ひび割れ幅は、一定の角度で開口するため、かぶりが大きい程、腐食の増加に伴う腐食ひび割れの増加が顕著となる。また、その角度は鉄筋

径が大きい程、大きい値を示した。

- (3) 腐食ひび割れ幅と腐食量の関係は放物的な関係を示した。これは、腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧の違いによって生成される腐食生成物の力学的な特性が異なるためであると考えられる。
- (4) 横補強筋を有さない場合、拘束圧比と腐食ひび割れ発生後の腐食量には、一義的な傾向を示すことが認められた。
- (5) 本実験の範囲内では、横補強筋が、腐食ひび割れ発生限界腐食量に及ぼす影響は小さい。また、腐食膨張に伴うひび割れ開口を抑制し、腐食量とひび割れ幅の関係はかぶりによらず、概ね同様の関係を示した。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号: 25871031)により行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大下 英吉, 長坂 慎吾, 倉橋 貴彦, 谷口 修: コンクリート表面温度に基づく鉄筋腐食厚および腐食率の推定手法に関する研究, 土木学会論文集, E, Vol.65, No.4, pp.442-458, 2009.10
- 2) 山室 俊介, 森川 英典: 塩害劣化したRC部材における鉄筋腐食モニタリングと劣化予測手法, コンクリート工学年次論文集, vol.30, No.1, pp.747-752, 2008
- 3) 元路寛, 関博: 鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ発生状況及びひび割れ幅に関する研究, 土木学会論文集, Vol.669, No.50, pp.161-171, 2001.2
- 4) 西内達雄: コンクリート表面のひび割れ幅に基づく鉄筋腐食量の推定手法, 電力中央研究所報告, 2010
- 5) 西澤彩, 高谷哲, 中村士郎, 宮川豊章: 腐食性生成物の違いがひび割れ幅と腐食量の関係に与える影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.135, No.1, pp.1051-1056, 2008
- 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集, Vol.25, No.2, pp.961-966, 2003
- 7) 吉岡保彦, 米澤敏男: 鉄筋の腐食生成物の力学的特性に関する基礎的な検討, 土木学会第37回年次学術講演会講演概要集, V-136, pp.271-272, 1982.10.
- 8) 足助美岐子, 根岸泰彦, 大下英吉: 腐食生成物の力学的特性を考慮した腐食ひび割れ幅進展モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1045-1050, 2013