

論文 せん断補強筋が主鉄筋腐食量とかぶり表面の腐食ひび割れ幅の係に及ぼす影響

刈谷 潤貴*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させたせん断補強筋量の異なる RC 試験体を対象に、せん断補強筋が主鉄筋腐食量と主鉄筋に沿った腐食ひび割れ幅の係に及ぼす影響を主鉄筋の腐食膨張挙動に対するせん断補強筋の拘束圧に着目して検討した。せん断補強筋の拘束効果は、せん断補強筋直上のみならず、ある一定の領域に発現し、各せん断補強筋の拘束効果が重なり合う領域では、拘束効果が相互に影響し、主鉄筋の腐食に伴うひび割れ幅の増加を抑制する。これにより、主鉄筋の質量減少率が同じであっても、せん断補強筋量によってせん断補強筋直上の主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅は異なることが明らかとなった。

キーワード: 鉄筋腐食, せん断補強筋, 腐食ひび割れ幅, 拘束圧

1. はじめに

現在、既存 RC 構造物の材料劣化が問題となっている。特に塩害や中性化によるコンクリート内部の鉄筋腐食は代表的な劣化現象の一つであり、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。鉄筋腐食による構造性能の低下は、主に、腐食に伴う構造材として機能する鉄筋量の減少および鉄筋とコンクリートの付着劣化に起因する。したがって鉄筋腐食を生じた RC 構造物の構造性能を定量的に評価するためには、RC 構造物内部における鉄筋の空間的な腐食性状を把握する必要がある¹⁾。

鉄筋腐食の予測手法については、これまでも分極抵抗法や赤外線サーモグラフィを利用したものなどが提案されているが、腐食ひび割れ発生以後の加速期や劣化期には適用できない^{2), 3)}。加速期や劣化期における鉄筋腐食量の推定手法として、通常の点検業務で得られる既存 RC 構造物のかぶりコンクリートの主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅から主鉄筋腐食量を推定する手法がある⁴⁾。腐食ひび割れ幅と主鉄筋腐食量には相関関係のあることは明らかとなっているが、その関係性は研究ごとに相違しており、実務で適用可能段階までに至っていない。この要因としては、主鉄筋に沿った腐食ひび割れ幅と主鉄筋腐食量の関係は腐食膨張挙動に対するコンクリートやせん断補強筋の拘束圧の影響を受け、この拘束圧がコンクリート強度に加え、かぶり、主鉄筋径およびせん断補強筋量などの影響を受けて変化するためだと考えられる。

このような背景から、著者らは主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅と主鉄筋腐食量の係に影響を及ぼす、次元が異なる種々の因子を拘束圧として統一的に評価し、電食試験により主鉄筋を促進腐食させた RC 試験体に対し、コンクリートの拘束圧に基づいて主鉄筋腐食量と腐食ひび割れ幅の係について検討した⁵⁾。その結果、コンク

リートの拘束圧の低下に伴い、主鉄筋腐食量が増加する傾向にあることを明らかにした。しかしながら、せん断補強筋量やせん断補強筋の腐食が主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅と主鉄筋腐食量の係に及ぼす影響については検討が不十分であった。

そこで本研究では、せん断補強筋が主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の係に及ぼす影響を主鉄筋の腐食膨張挙動に対するせん断補強筋の拘束圧に着目して検討した。

2. 試験概要

2.1 試験体概要

試験体概要を図-1に示す。試験体は断面が150mm×150mm、長さ1000mmの角柱試験体であり、主鉄筋にD22(SD345)、せん断補強筋にD6(SD295A)を用いた。せん断補強筋を有する試験体は3体であり、それぞれ試験体中央から50mm間隔、100mm間隔、150mm間隔でせん断補強筋を配筋した。なお、せん断補強筋と接する部分の主鉄筋には、ビニールテープを巻き付け、せん断補強筋への過度な通電を抑制した。また、主鉄筋端部は著しく腐食するため、試験体両端の10mm区間は熱収縮チューブを装着して防食した。

最小かぶり面の主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅を計測するため、図-1(e)に示すように試験体端から100mm間隔でπ型変位計を9ヶ所設置した。

実験パラメータは表-1に示すように、せん断補強筋量を実験水準とした。各パラメータにつき試験体は1体作成した。

コンクリートの配合表を表-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、練り混ぜ水には鉄筋腐食を促進させるため、5%NaCl水溶液を用いた。試験

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻科 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

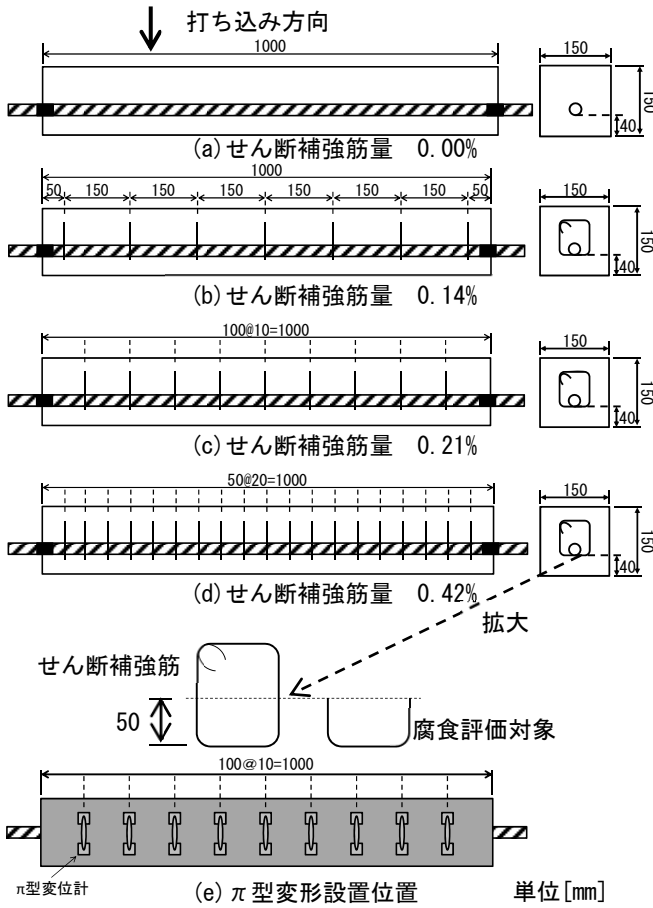


図-1 試験体概要

体の養生方法は湿布養生とした。

2.2 電食試験方法

鉄筋腐食の促進方法は電食試験を採用し、材齢 10 日の時点から、直流安定化電源装置を用いて所定の積算電流量(475.2hr・A)に到達するまで、主鉄筋に直流電流を 0.66A 通電した。なお、電流密度は表面積に対して 9.65A/m²である。π型変位計による主鉄筋軸方向のひび割れ幅の計測は、1 分毎に実施し、電食試験終了時まで計測を行った。電食試験は図-2 に示すように、5%NaCl 水溶液を満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。

電食試験終了後、試験体からはり出した主鉄筋を 10%濃度クエン酸二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬し、腐食生成物を除去した。なお、S 0.14%試験体と S 0.21%試験体の主鉄筋は 10%濃度クエン酸二アンモニウム水溶液に 24 時間浸漬後も、腐食生成物の付着が認められたため、さらに 6 時間浸漬し、計 30 時間浸漬した。除錆した主鉄筋は埋設区間の両端 50mm を除いた 900mm を 100mm 間隔で切断し、計 9 領域の主鉄筋の質量と切断長さを計測した。なお、各計測領域の中心にπ型変位計が設置されている。

せん断補強筋は、主鉄筋に通電された電流がコンクリートを介してせん断補強筋に流れることで腐食が生じた。

表-1 実験パラメータ

試験体名	せん断補強筋 間隔(mm)	せん断補強筋 量Pw(%)	主鉄筋の 平均腐食率(%)	せん断補強筋の 平均腐食率(%)	圧縮強度 (N/mm ²)
S 0.00%		0.00	5.33		25.1
S 0.14%	150	0.14	3.04	8.98	27.8
S 0.21%	100	0.21	2.90	10.03	27.8
S 0.42%	50	0.42	5.47	12.22	32.9

$P_w = A_s / b_s$ A_s : せん断補強筋の公称断面積(mm²) b_s : 試験体幅(mm)
 s : せん断補強筋間隔(mm)

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	1.29

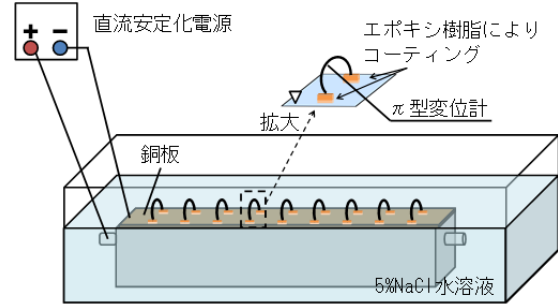


図-2 電食試験概要

既往の研究において、せん断補強筋の下側の腐食性状がかぶりコンクリートの主鉄筋軸方向のひび割れ幅に影響を及ぼすことが指摘されている⁶⁾。そのためせん断補強筋を高さの中央で切断し、下半分を腐食評価対象とした。

3. 実験結果

3.1 せん断補強筋が腐食ひび割れ幅に及ぼす影響

図-3(a)～(c)に S 0.00%と S 0.42%試験体の各π型変位計位置における主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の関係を示す。各π型変位計のひび割れ幅には、π型変位計を中心として左右 50mm の領域の主鉄筋腐食量を対応させた。なお、主鉄筋腐食量はファラデーの法則により、積算電流量に線形的に比例すると仮定し、試験終了時の主鉄筋腐食量から比例計算により算出した。

せん断補強筋を有する試験体はせん断補強筋を有さない試験体に比べ、同一腐食量に対するひび割れ幅が小さくなった。これはせん断補強筋が腐食ひび割れの開口を抑制したためである。また、S 0.00%試験体はπ型変位計位置によって主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の関係の差異が大きい。一方、S 0.42%試験体はπ型変位計の位置によらず主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の関係は概ね同様であった。これは、せん断補強筋が主鉄筋軸方向の腐食ひび割れの伝播を抑制し、腐食膨張量に応じてひび割れ幅が局所的に変化したためであると考えられる。

3.2 かぶり表面のひび割れ幅とせん断補強筋量の関係

図-4 にせん断補強筋量の異なる試験体の主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の関係を示す。ここの主鉄筋腐食量および主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅

は測定した 9ヶ所の平均値である。主鉄筋腐食量が約 50mg/cm²以上では、せん断補強筋量が大きい程、同一腐食量に対する主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅は小さい傾向にある。また、主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の拡幅は、主鉄筋腐食量の増加にしたがい、緩やかになる。その要因としては無拘束下で生成された腐食生成物は塑性的でもろい固体であることが知られており⁷⁾、ひび割れ幅が大きくなる程、腐食生成物がひび割れに沿って滲出してしまい、ある程度の幅以上になると腐食量との相関が見られなくなるためと考えられる。

図-5(a)～(d)に主鉄筋およびせん断補強筋下側の腐食率と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の分布を示す。ここで、腐食率は腐食前後の質量減少率である。実験中にπ型変位計が外れた箇所はその部分のひび割れ幅を除いて示している。主鉄筋の平均腐食率は試験体によって差異はあるが、いずれの試験体もほぼ均一に腐食していた。また、せん断補強筋を有する試験体において、同試験体で比較すれば、せん断補強筋の腐食率が大きいところでは腐食ひび割れ幅も大きくなる傾向にあった。

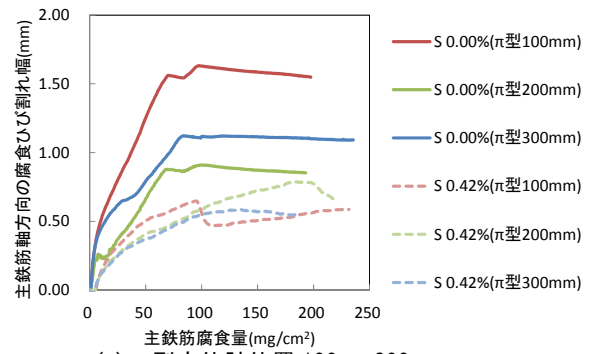
図-6に主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅とせん断補強筋量の関係を示す。腐食ひび割れ幅は試験終了時のひび割れ幅であり、π型変位計位置 100mm-300mm, 400mm-600mm, 700mm-900mm で平均化した値である。せん断補強筋量が大きくなる程、ひび割れ幅は線形的に小さくなった。

図-7にせん断補強筋の腐食率と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の関係を示す。いずれのせん断補強筋量においても、せん断補強筋下側の腐食率の増加に応じて、せん断補強筋に沿った腐食ひび割れが拡幅し、これによってせん断補強筋の付着力の低下が生じ、せん断補強筋による主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ拡大の抑制効果が低下したためであると考えられる。

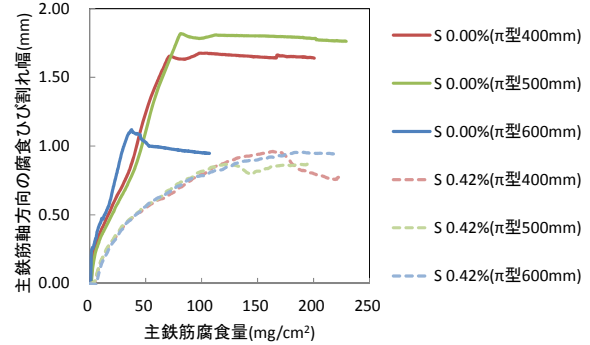
3.3 せん断補強筋の拘束圧の影響範囲の分布

図-6に再度着目する。S 0.21%と S 0.42%は全てのπ型変位計がせん断補強筋直上のコンクリートに設置されており、せん断補強筋の拘束効果が局所的に発現するのであれば、両者の主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の計測値は、ほぼ同様になると考えられるが、主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅は S 0.42%の方が小さい。葦澤らは、せん断補強筋の拘束圧には影響範囲が存在し、せん断補強筋間隔によって、拘束効果の影響範囲が重なり合い、その領域の拘束効果は相互の影響が生じると報告している⁸⁾。また、せん断補強筋を有する試験体の拘束圧は式(1)に示すように、コンクリート単体の拘束圧にせん断補強筋の拘束圧を重ね合わせることで表現できるとしている。

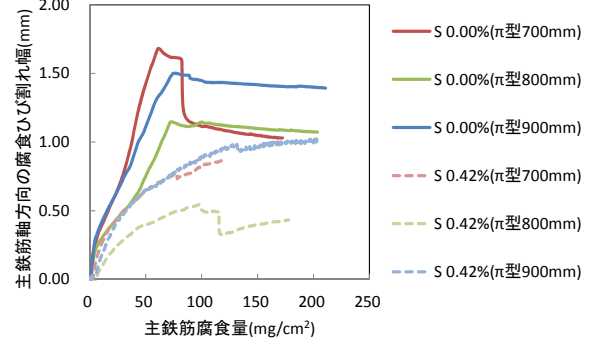
$$\sigma_A = \sigma_n + \sigma_s \quad (1)$$



(a) π型変位計位置 100mm-300mm



(b) π型変位計位置 400mm-600mm



(c) π型変位計位置 700mm-900mm

※()内の数値は試験体端面からπ型変位計設置位置までの距離

図-3 せん断補強筋の有無による腐食量とひび割れ幅

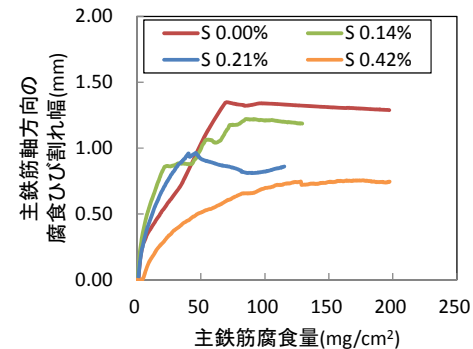


図-4 せん断補強筋量の違いが主鉄筋腐食量と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅に及ぼす影響

ここで、 σ_A ：せん断補強筋を有する試験体の拘束圧(N/mm²)、 σ_n ：コンクリート単体の拘束圧(N/mm²)、 σ_s ：せん断補強筋の拘束圧(N/mm²)である。

また、コンクリート単体の拘束圧は長岡らにより提案された式(2)に示す拘束圧算定式より求められる⁹⁾。

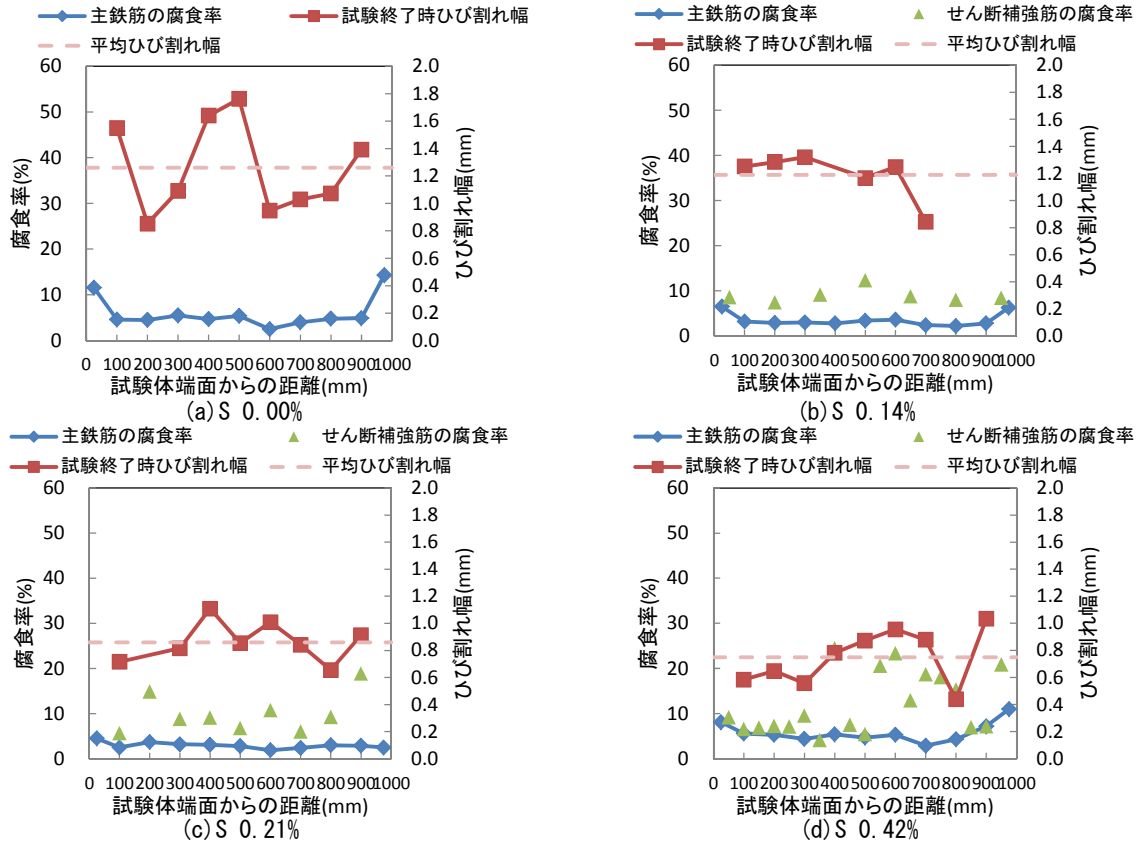


図-5 主鉄筋およびせん断補強筋の腐食率(下側)と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅

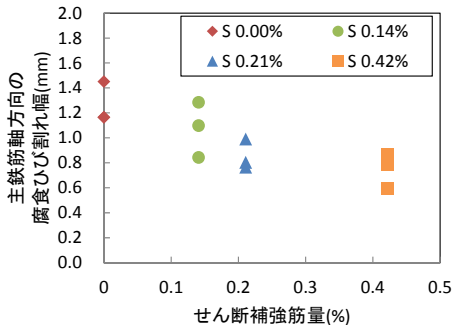


図-6 主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅とせん断補強筋量

$$\sigma_n = \exp(-\alpha \cdot W_{cr}) \cdot \sigma_{n-max}$$

$$\sigma_{n-max} = 4.05 \frac{C_1}{\phi} + 0.103 f'_c - 3.65$$

$$\alpha = (-0.407 \ln C_2 + 2.12) \cdot f'_c{}^{2/3}$$

$$\left(\begin{array}{l} 1.32 \leq \frac{C_1}{\phi} \leq 4.19, 22.6 \leq f'_c \leq 55.5 \\ \frac{C_2 + \phi/2}{C_1 + \phi/2} > 1.50 \text{ の場合 } C_2 = 1.50 C_1 + \frac{\phi}{4} \end{array} \right) \quad (2)$$

ここで、 σ_n : コンクリートの拘束圧(N/mm²), W_{cr} : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm), σ_{n-max} : コンクリートの最大拘束圧, C_1 : 最小かぶり, 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。

せん断補強筋(非腐食)の拘束圧比は文献 8)より式(3)に示す算定式が提案されている。

$$\frac{\sigma_s}{\sigma_{n-max}} = \frac{p_0}{p_0 - p_1} \{ \exp(-p_1 \cdot W_{cr}) - \exp(-p_0 \cdot W_{cr}) \} \quad (3)$$

$$(0.0mm \leq W_{cr} \leq 1.0mm)$$

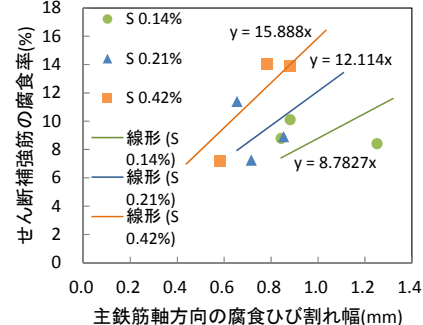


図-7 せん断補強筋の腐食率(下側)と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅

ここで、 σ_s/σ_{n-max} : せん断補強筋の拘束圧比, p_0, p_1 : せん断補強筋直上からの距離に関する係数, W_{cr} : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm)である。

なお、係数 p_0, p_1 は式(4), (5)から求められる。

$$p_0 = -0.0133x + 2.3643 \quad (4)$$

$$p_1 = 0.0461x - 0.0597 \quad (5)$$

ここで、 x : せん断補強筋直上からの距離(mm)である。

図-8(a), (b)は式(3)で算出した拘束圧比の影響範囲を試験体中央からの距離で示したものである。せん断補強筋は、せん断補強筋間隔50mmが試験体中央から0mm, 50mm, 100mm, 150mm位置に、せん断補強筋間隔100mmが試験体中央から0mm, 100mm位置に、せん断補強筋間隔150mmは試験体中央から0mm, 150mmの位置にある。せん断補強筋の拘束圧の相互影響によって拘束圧比

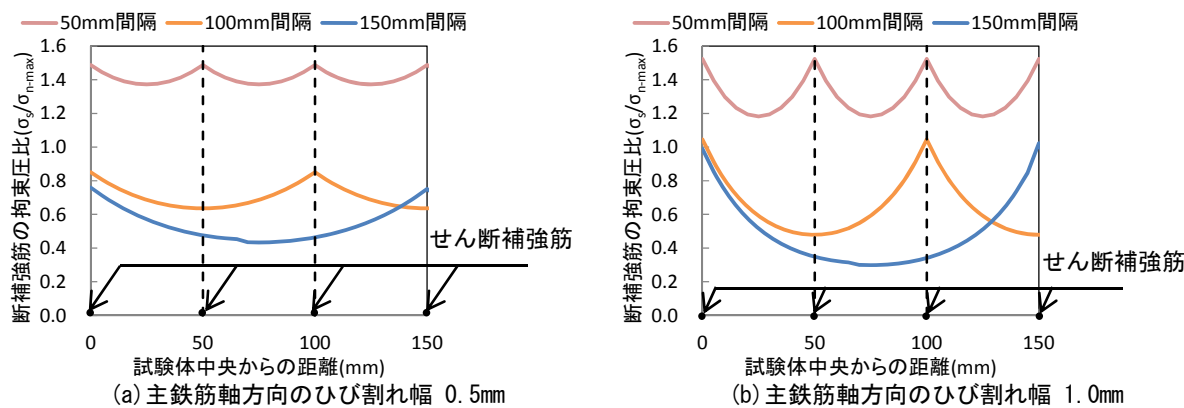


図-8 せん断補強筋の拘束圧比の影響範囲

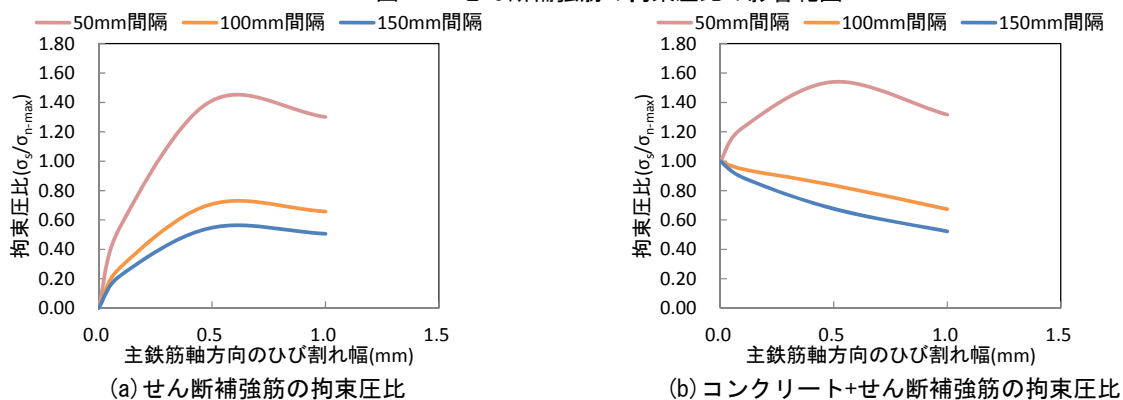


図-9 せん断補強筋の平均拘束圧比と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅

の分布はせん断補強筋間隔によって大きく変化することが確認でき、特にせん断補強筋間隔 50mm では拘束圧比が低下することなくほぼ一定である。また、拘束圧比は主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の大きさによっても変化し、ひび割れ幅が大きい程、せん断補強筋直上の拘束圧比は大きくなる。

図-9(a)、(b)に平均拘束圧比と主鉄筋軸方向のひび割れ幅の関係を示す。ここで、平均拘束圧比とは、図-8に示す領域で任意のひび割れ時点の拘束圧比を平均化した値である。なお、図-9(a)はせん断補強筋のみの拘束圧比であり、図-9(b)はコンクリートとせん断補強筋の拘束圧比の合算である。せん断補強筋のみの場合、ひび割れ幅が約 0.5mm に達するまではすべてのせん断補強筋間隔で拘束圧比は増加するが、それ以降は主鉄筋軸方向のひび割れ幅の拡大に伴い、拘束圧比は緩やかに減少する。せん断補強筋間隔が 50mm の場合、せん断補強筋の相互影響により、拘束圧比は 1.0 よりも大きくなる。

コンクリートの拘束圧比を合算した場合、図-9(b)に示すように、せん断補強筋間隔が 100mm および 150mm 間隔ではひび割れ幅の拡大に伴い、拘束比が緩やかに減少する。一方、せん断補強筋間隔が 50mm の場合では、せん断補強筋の拘束効果の影響が大きいため、主鉄筋軸方向のひび割れ幅が約 0.5mm に達するまでは拘束圧比が増加し、それ以降は緩やかに減少する結果になった。以上の結果より、同一ひび割れ幅において、せん断補強

筋間隔が密な程、拘束圧が大きいこととなる。すなわち、せん断補強筋間隔が密な程、同一ひび割れ幅の際、腐食生成物の生成量が相対的に大きいということになる。したがって、主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅と主鉄筋の腐食率を直接関連付けて評価を行うことは難しく、ひび割れ幅から腐食率を推定する場合には、拘束圧を考慮した腐食鉄筋の径とひび割れ幅を関連付ける必要がある。

3.4 拘束圧を考慮した腐食鉄筋径の評価

図-10 に主鉄筋の腐食率と主鉄筋軸方向の平均腐食ひび割れ幅の関係を示す。S 0.00%試験体と S 0.42%試験体および S 0.14%試験体と S 0.21%試験体は同等の腐食率にもかかわらず、腐食ひび割れ幅が異なる傾向にある。これは、せん断補強筋の間隔によって、試験体内の拘束効果の分布が異なるためである。

前述したように、腐食ひび割れ発生メカニズムは、主鉄筋が腐食し、その腐食生成物がコンクリートやせん断補強筋の拘束を受けながら膨張することにより、ひび割れが発生する。したがって、主鉄筋腐食量を推定する際には、拘束下における腐食した鉄筋径とひび割れ幅を関連付ける必要がある。本研究では、簡便のため、腐食した鉄筋径の拘束圧による変化を松島らの中空円筒理論を用いて拘束圧作用下における腐食した鉄筋径を算出した¹⁰⁾。その際、まだ腐食していない鉄筋に生じる圧力 q_0 は、式(6)の q_1 に試験終了時の拘束圧 σ_A を与えることにより算出した。

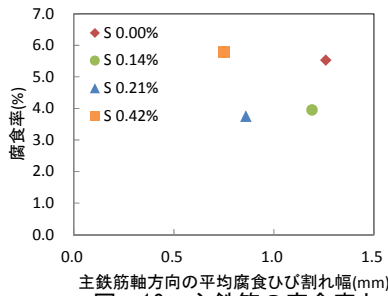


図-10 主鉄筋の腐食率と主鉄筋軸方向の平均腐食ひび割れ幅

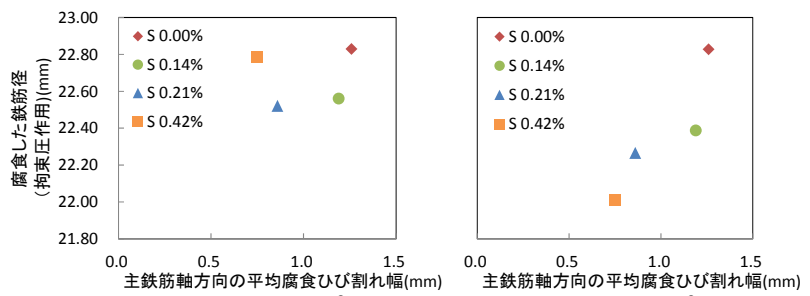


図-11 腐食した鉄筋径と主鉄筋軸方向の平均腐食ひび割れ幅

$$q_0 = \frac{q_1 E_s (-2\nu_r K_1^2 + 2K_1^2)(1 + \nu_r)}{(1 - \nu_s)(K_1^2 - 1)E_r + (1 + \nu_s)E_s - 2\nu_r E_s (1 + \nu_r) + K_1^2 E_s (1 + \nu_s)} \quad (6)$$

ここで、 q_0 :内圧(N/mm²)、 q_1 :外圧(拘束圧 σ_A)(N/mm²)、 E_r :腐食生成物の弾性係数(N/mm²)、 E_s :鉄筋の弾性係数(N/mm²)、 ν_r :腐食生成物のポアソン比(0.3)、 ν_s :鉄筋のポアソン比(0.3)、 K_1 :腐食生成物により増加した鉄筋の外周径(無拘束下)(mm)/腐食により減少した鉄筋の内周径(mm)である。

文献7)を参考に、電食させた際の腐食生成物の弾性係数を拘束下では200N/mm²~300N/mm²、無拘束下では20N/mm²とた。図-11(a)、(b)は腐食生成物の弾性係数 E_r を200N/mm²および20N/mm²として算出した鉄筋径と腐食ひび割れ幅の関係である。Er:200N/mm²の場合、腐食した鉄筋径とひび割れ幅の関係は、図-10に示す主鉄筋の腐食率と平均ひび割れ幅の関係と同じ傾向にある。一方、Er:20N/mm²の場合、せん断補強筋量によらず腐食した鉄筋径と主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の間には、線形的な関係が認められた。腐食生成物の弾性係数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) せん断補強筋量が大きいく程、試験終了時の主鉄筋軸方向の平均腐食ひび割れ幅は小さくなる。また、せん断補強筋を有する試験体において、同試験体と比較すれば、せん断補強筋の腐食率が大きい位置では腐食ひび割れ幅も大きくなる。
- (2) せん断補強筋量が大きいく程、せん断補強筋の腐食率の増加に伴う主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅の拡大は抑制される。
- (3) せん断補強筋直上の拘束効果は相互影響によって異なるため、せん断補強筋直上の主鉄筋軸方向の腐食ひび割れ幅は主鉄筋が同一腐食率であっても、せん断補強筋間隔によって異なる。

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) 日本コンクリート工学会：鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化研究委員会報告書、2013
- 2) 小林孝一、宮川豊章：分極抵抗法を用いた鉄筋の腐食速度評価に関する研究、土木学会論文集、第669号、pp.173-186、2001
- 3) 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、vol.65、No.4、pp.442-458、2009
- 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) 刈谷潤貴、高木大地、村上祐貴：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关系到及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、vol.36、No.1、pp.1174-1179、2014
- 6) 村上祐貴、大下英吉、鈴木修一、堤知明：鉄筋腐食したRC梁部材の残存耐力性状に及ぼすせん断補強筋ならびに定着性能の影響に関する研究、土木学会論文集、vol.64、No.4、pp.631-649、2008
- 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) 蕪澤洋平、村上祐貴：腐食膨張挙動に対する横補強筋の拘束効果に及ぼすコンクリートの圧縮強度およびかぶりの影響、コンクリート工学年次論文集、vol.37、No.1、pp.967-972、2015
- 9) 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
- 10) 松島学、堤知明、関博：塩害環境下におけるRC構造物の設計かぶり、土木工学論文集、No.490、V-23、pp.41-49、1994.5