

# 論文 主鉄筋の腐食膨張挙動に対する腐食を生じた補強筋の拘束効果

長谷川 貴哉\*1・村上 祐貴\*2

**要旨：**本研究では、電食試験によって補強筋を促進腐食した試験体に対して、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を行い、主鉄筋の腐食膨張挙動に対する腐食を生じた補強筋の拘束効果について検討した。その結果、補強筋の拘束効果は、補強筋の腐食の進行によって低下することが明らかとなった。また、腐食による補強筋の空間的な拘束効果の低下程度は補強筋からの距離によって異なり、補強筋に近い領域程、腐食に伴う拘束効果の低下は顕著に生じた。また、本実験の範囲内では D6 補強筋下半分の腐食率が 20%程度になると補強筋の拘束効果はほとんど消失した。

**キーワード：**鉄筋腐食, 補強筋, 静的破砕剤, 拘束圧

## 1. はじめに

近年、既存の鉄筋コンクリート構造物(以下、RC 構造物)の劣化損傷が数多く報告されている。島国であるわが国において、塩害による鉄筋腐食は比較的起こりやすい劣化現象である。塩害による腐食鉄筋が RC 構造物に与える影響は様々であるが、鉄筋腐食による主鉄筋とコンクリートの付着強度の低下は RC 構造物の構造性能を低下させる。付着強度はかぶりコンクリートにおける鉄筋軸に沿った腐食ひび割れの発生により著しく低下することが知られており、かぶりコンクリートの鉄筋軸に沿った腐食ひび割れを指標として、RC 部材の付着強度を評価する試みがなされている<sup>1)</sup>。かぶりコンクリートにおける鉄筋軸に沿った腐食ひび割れの発生による付着劣化は、コンクリートの拘束圧の低下が主たる要因であることを米田らは報告している<sup>2)</sup>。

他方、JCI リハビリテーション委員会報告書では、補強筋が RC 部材の鉄筋腐食を起因とする付着劣化を抑制することが報告されている<sup>3)</sup>。これは、補強筋が鉄筋腐食に伴うコンクリートの拘束圧の低下を抑制するためであると考えられる。

このような背景から、葦澤らは、補強筋を有する試験体に対し、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を実施して主鉄筋の腐食膨張挙動に対する補強筋の拘束効果について検討を行っており、補強筋の拘束効果には影響範囲が存在し、影響範囲が重なり合う範囲では複数本の補強筋の拘束効果が相互影響することを明らかとした<sup>3) 4)</sup>。

本研究では、電食試験により補強筋を促進腐食させた試験体に対し、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を実施し、文献 4)で課題とされた主鉄筋の腐食膨張挙動に対する腐食した補強筋の拘束効果を明らかにすることを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要および実験パラメータ

試験体概要を図-1 に示す。試験体は断面 150mm×150mm、高さ 300mm の角柱試験体であり、直径 22mm の円孔を芯かぶり 50mm の位置に設けている。補強筋には D6 異形鉄筋(SD295A)を使用した。補強筋の配筋は図-1(c)に示すように、試験体中央に 1 本、100mm 間隔、および 50mm 間隔で補強筋を配筋した。補強筋上部には電食試験を行うための被覆銅線をエポキシ樹脂で固定した。

試験体パラメータを表-1 に示す。実験水準は補強筋本数および補強筋の腐食程度である。試験体名称の末尾が A である試験体は、補強筋の腐食率が軽微(補強筋全体で 5%程度)な場合を想定した試験体シリーズである。試験体名称の末尾が B の場合は腐食が大きい場合を想定している(補強筋全体で 10%程度)。また、末尾が 0%の試験体および S0 試験体の実験結果は長岡らおよび葦澤らが実施したものであり、既報済みである<sup>3) 4)</sup>。

コンクリートの配合表は表-2 に示す通りであり、セメントは早強ポルトランドセメントを使用した。

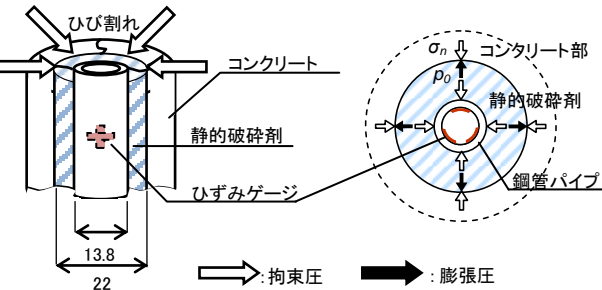
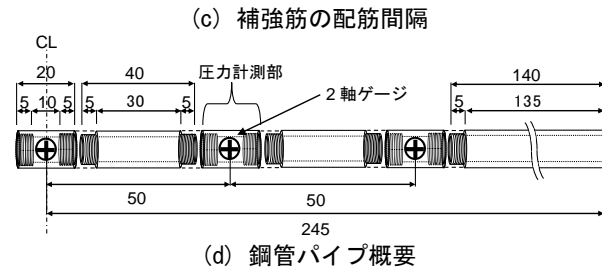
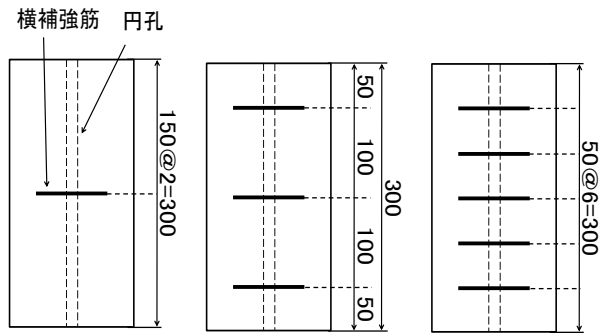
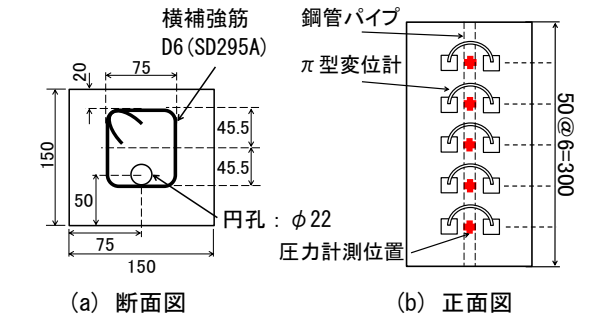
### 2.2 実験方法

補強筋は電食試験により促進腐食させた。図-2 に示すように試験体を 5%NaCl 水溶液に浸漬し、直流安定化電源装置の陽極に補強筋、陰極に銅板を接続して直流電流を通電した。本実験では、円孔に止水処理を施さず、電食試験中、円孔内は食塩水で満たされている。補強筋に通電した電流の電流密度は表面積に対して 11.4A/m<sup>2</sup> とし、1 本あたりの平均積算電流量は末尾が A の試験体では 7hr・A とし、B では 14hr・A とした。

電食試験終了後、試験体の円孔内に図-1(d)に示す鋼管パイプを挿入後、円孔と鋼管パイプの隙間に静的破砕剤を充填し、膨張圧を発生させた。鋼管パイプの圧力計

\*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 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)



(e) 拘束圧と膨張圧の関係

図-1 試験体概要

測部の内曲面には、2軸のゲージが3枚貼り付けてあり、鋼管に生じる縦軸方向ひずみおよび横方向ひずみを計測した。静的破砕剤の膨張挙動は原田ら<sup>5)</sup>によって液圧的であることが報告されていることから、図-1(e)に示すように膨張圧と鋼管パイプに作用する外圧は等しいと仮定し、計測したひずみ値を中空円筒理論を用いた式(1)に代入して拘束圧を算出した。

$$\sigma_n = p_0 = \frac{-E(k^2 - 1)}{2k^2(1 - \nu^2)} (\epsilon_\theta + \nu \epsilon_z) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma_n$  : 拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $p_0$  : 膨張圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $E$  :

表-1 試験体パラメータ

試験体名	測定点数	補強筋本数	せん断補強筋腐食率(%)		圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )
			全体	下半分	
S1-A	S1-5σ-A	5	4.6	16.1	38.6
	S1-4σ-A	4			32.8
S1-B	S1-5σ-B	5	9.9	24.1	39.2
	S1-4σ-B	4			39.2
S3-A	S3-5σ-A	5	5.5	16.8	40.4
	S3-4σ-A	4			39.9
S3-B	S3-5σ-B	5	8.4	21.0	39.3
	S3-4σ-B	4			39.5
S5-A	S5-5σ-A	5	3.1	12.8	33.7
	S5-4σ-A	4			33.3
S5-B	S5-5σ-B	5	7.1	16.8	35.6
	S5-4σ-B	4			35.3
S1-0%※	S1-5σ	5	0.0	0.0	39.0
	S1-4σ	4			37.0
S3-0%※	S3-5σ	5	0.0	0.0	33.6
	S3-4σ	4			31.2
S5-0%※	S5-5σ	5	0.0	0.0	32.9
	S5-4σ	4			35.0
S0※	S0-5σ	5	0	0.0	34.8

※ S1-0%=C39-S1<sup>3)</sup> S3-0%=C39-S3<sup>3)</sup>  
S5-0%=C39-S5<sup>3)</sup> S0=C39-S0<sup>3)</sup>

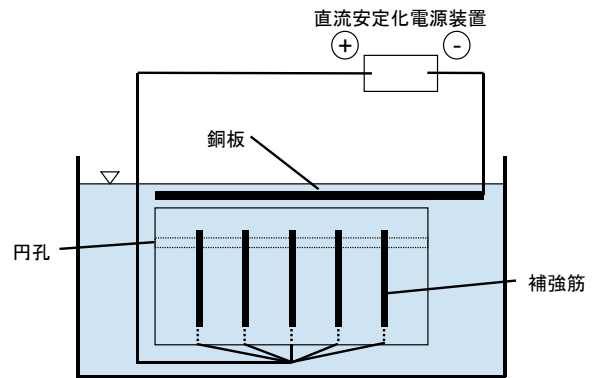


図-2 電食試験概要(S5シリーズ)

表-2 コンクリートの配合表

W/C(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
	水:W	セメント:C	細骨材:S	粗骨材:G	混和剤
60	155	258	835	1040	2.58

鋼管の弾性係数(200000N/mm<sup>2</sup>)、 $\epsilon_\theta$  : 鋼管の円周方向ひずみ、 $\epsilon_z$  : 鋼管の軸方向ひずみ、 $k$  : 鋼管の外内径比(外径 : 13.8mm,内径 : 9.2mm)、 $\nu$  : 鋼管のポアソン比(0.3)である。

圧力計測位置は、試験体名称に5σを有する試験体は、試験体端から50mm,100mm,150mm,200mm,250mm(以下、5ヶ所計測)の位置であり、試験体名称に4σを有する試験体は、75mm,125mm,175mm,225mm(以下、4ヶ所計測)の位置である。

図-1(b)に示すように最小かぶり面の圧力計測部直上にはπ型変位計を設置し、最小かぶり面の膨張圧に起因するひび割れ幅を測定した。

腐食膨張模擬実験終了後、試験体からは取り出した補強筋を10%濃度クエン酸二アンモニウム水溶液に24時間浸漬した。腐食生成物を除去後、質量を計測して、腐食率(腐食前後の鉄筋の質量減少率)を算出した。なお、村上らは、かぶりコンクリートに発生した主鉄筋軸に沿った腐食ひび割れの幅の拡大性状は、補強筋下部(主鉄筋

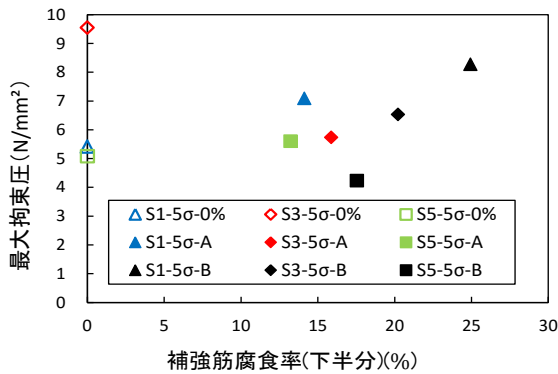


図-3 最大拘束圧と補強筋の腐食率の関係

重心位置から下側の領域)の腐食性状の影響を受けることを指摘している<sup>9)</sup>。そこで、本研究では、補強筋を補強筋の高さ中央で切断し、補強筋下半分の腐食率も計測した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 補強筋の腐食性状

各試験体シリーズにおける補強筋の平均腐食率を表-1に示す。試験体名称の末尾がAの試験体は、一部の補強筋において、破断が確認された。試験体名称の末尾がBの試験体では、ほぼ全ての補強筋において、破断が確認された。補強筋の破断は、試験体の円孔直下で多く確認された。また、Bでは補強筋軸に沿った腐食ひび割れが試験体側面に数箇所発生した。

#### 3.2 補強筋の腐食がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響

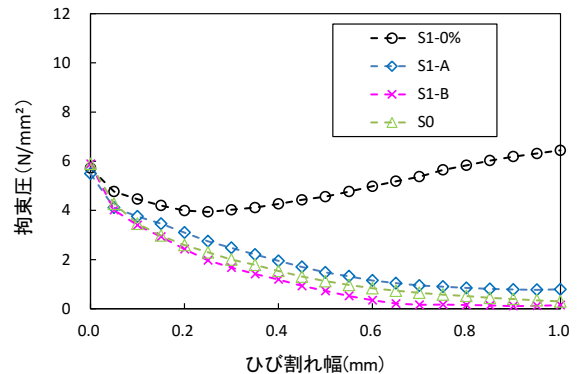
##### (1) 最大拘束圧

図-3に補強筋の腐食率(下半分)と最大拘束圧の関係を示す。ここで、最大拘束圧とは、静的破砕剤の膨張圧により、最小かぶり面にひび割れが発生した時点の拘束圧であり、図中の値は各計測部の平均値である。比較のため補強筋が非腐食の試験体の最大拘束圧も併せて示している。最大拘束圧の平均値は $6.3\text{N/mm}^2$ であり、変動係数は25%であった。各試験体の最大拘束圧と補強筋の腐食率(下半分)の間には明確な相関性は認められず、補強筋の有無や腐食が最大拘束圧に及ぼす影響は小さいものと考えられる。

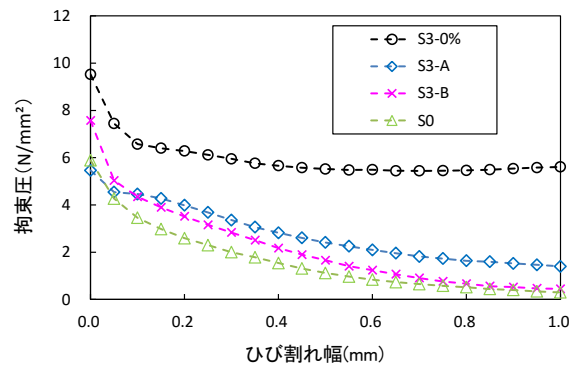
##### (2) 最大拘束圧以降の拘束圧

図-4にS1試験体、S3試験体およびS5試験体の補強筋直上での最大拘束圧以降の拘束圧と最小かぶり面の円孔軸方向のひび割れ幅の関係を示す。拘束圧およびひび割れ幅の値は、試験体3体の補強筋直上の計測部の平均値である。計測部の不具合により、試験体4ヶ所または3カ所の拘束圧を平均化した値が含まれている。

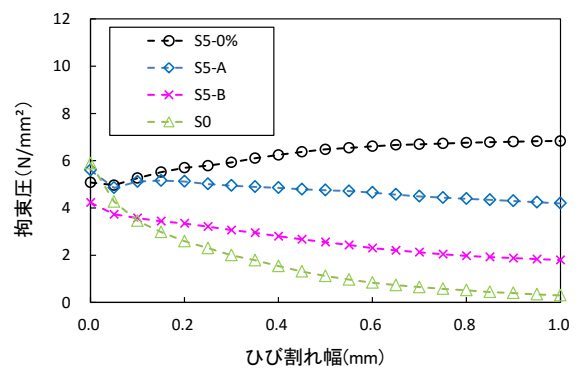
まず、図-4(a)に示した補強筋を1本配筋した場合、補強筋に腐食を有するS1-A試験体およびS1-B試験



(a) S1 試験体



(b) S3 試験体



(c) S5 試験体

図-4 拘束圧とひび割れ幅の関係

体の拘束圧は、補強筋が非腐食であるS1-0%試験体と比較して、ひび割れ幅の増加に伴う拘束圧の低下が著しい。また、拘束圧の低下は補強筋の腐食率が大きい程、顕著であった。これは補強筋の腐食に起因する補強筋軸に沿った腐食ひび割れに起因した補強筋の付着劣化に加えて、補強筋の断面減少や補強筋下半分の破断が、腐食率が大きい程、顕著に生じるためであると考えられる。

次に、図-4(b)、(c)に示した複数本の補強筋を配筋した場合であるが、S1シリーズ試験体と同様、補強筋の腐食率が大きい程、ひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下が顕著に生じた。しかしながら、補強筋の本数が増加する程、ひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下が抑制されている。これは蕪澤らの報告にあるように複数の補強筋の相互影響によるものと考えられる<sup>3), 4)</sup>。

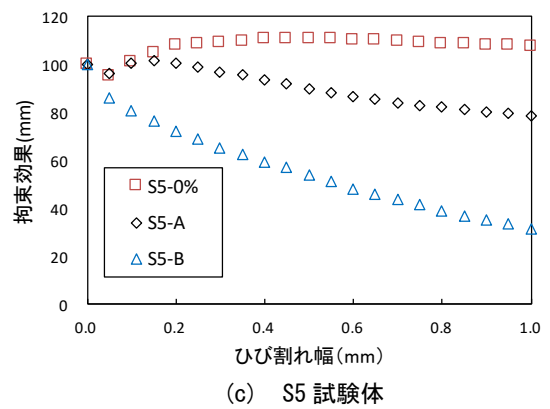
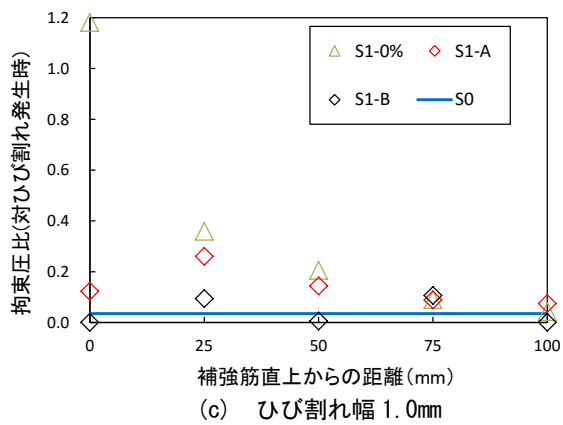
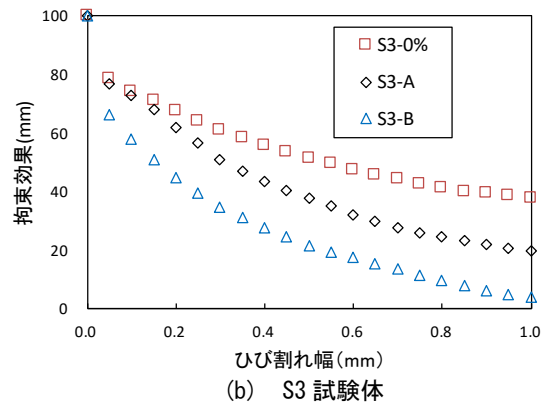
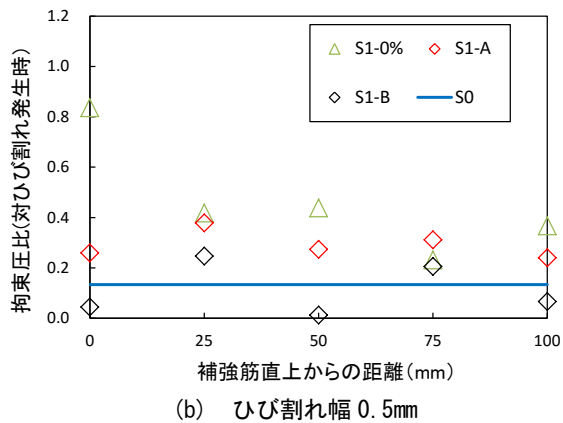
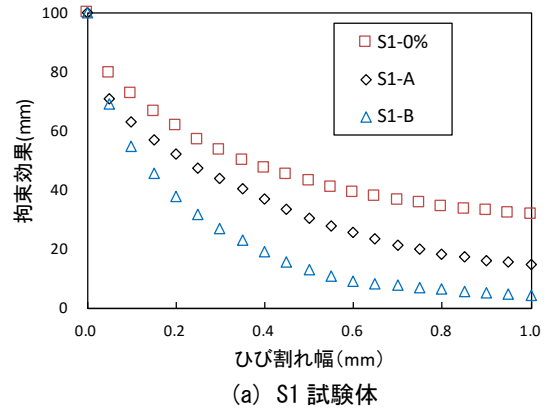
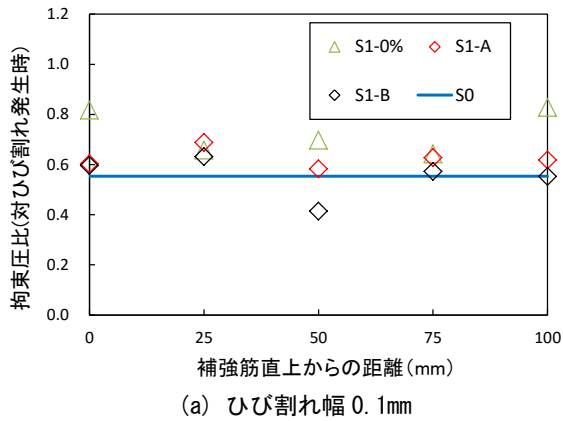


図-5 補強筋の拘束効果の影響範囲

図-6 補強筋が腐食した場合の拘束効果

#### 4. 補強筋の拘束効果の影響範囲に及ぼす補強筋の腐食の影響

図-5にS1試験体における各ひび割れ幅の時点での拘束圧を最大拘束圧で正規化した拘束圧(以下、拘束圧比)と補強筋直上からの距離の関係を示す。各図には4ヶ所計測および5ヶ所計測の試験体で得られた拘束圧比を併せて示しており、補強筋からの距離が同じ測定点の拘束圧は平均化した。最大拘束圧および円孔軸方向のひび割れ幅は同一時間軸での平均値を用い、拘束圧比の値がマイナスとなる測定点は0として示した。補強筋を有しないS0試験体の拘束圧比も示しているが、当該試験体の拘束圧は、ほぼ一様に分布していたため、5ヶ所の平均

値を直線で示した。

補強筋の腐食を有するS1-A試験体およびS1-B試験体では、S1-0%試験体と比較して、全体的に拘束圧比が小さい。ひび割れ幅が1.0mmの時点で、補強筋の腐食率(下半分)が約16%のS1-A試験体ではS0試験体よりも拘束圧比は全体的に大きく、程度は異なるが、S1-0%試験体と同様、補強筋の空間的な拘束効果が認められる。一方、補強筋の腐食率(下半分)が約24%のS1-B試験体の拘束圧比は全域にわたり、S0試験体の拘束圧比と同様であり、補強筋の拘束効果がほぼ消失した。

図-6にS1試験体、S3試験体およびS5試験体の各ひび割れ幅における拘束圧比分布の面積(以下、拘束効果)

の変化を示す。ここで拘束効果とは、図-5 に一例を示した拘束圧比分布を試験体中央(0mm) から 100mm の区間を 25mm 間隔毎に台形面積として算出した値の合算値であり、補強筋の腐食に伴う空間的な拘束効果の全体的な変化を把握する目的で算出した。

全てのパラメータにおいて、円孔軸に沿ったひび割れ幅の拡大に伴い空間的な拘束効果は低下し、補強筋の腐食率が高くなる程、拘束効果の低下は大きい。

図-7 に各パラメータの拘束圧-ひび割れ幅曲線で囲まれた面積  $A_{on}$  とせん断補強筋の腐食率(下半分)の関係を示す。 $A_{on}$  はひび割れ幅が 0.0mm から 1.0mm の区間の拘束圧-ひび割れ幅曲線で囲まれた領域を 0.05mm 間隔毎に台形面積として算出した値の合算値である。図中には、補強筋を有さない S0 試験体の  $A_{on}$  を直線で示す。

全ての補強筋を有する試験体シリーズにおいて、腐食率の増加に従い  $A_{on}$  は低下し、補強筋の腐食率(下半分)が 25%程度になると、 $A_{on}$  は S0 試験体とほぼ同様となった。これは補強筋の腐食率が 20%程度になると補強筋の拘束効果が試験体全域で消失することを意味するが、平均腐食率が 20%程度の試験体の補強筋の多くが破断を生じていた影響も大きい。また、補強筋の腐食に伴う  $A_{on}$  の低下割合は、補強筋量が多い程大きい。

### 5. 補強筋の拘束圧に及ぼす影響

図-8 に S1-0%試験体、S1-A 試験体および S1-B 試験体における補強筋の拘束圧比と円孔軸方向のひび割れ幅の関係を示す。補強筋の拘束圧比は、各試験体の拘束圧比からコンクリートの拘束圧比を減ずることで算出した。コンクリートの拘束圧比は、長岡らが提案した式(2)に示す拘束圧算定式を用いて算出した<sup>7)</sup>。

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

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

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

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

ここで、 $\sigma_n$  : 拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $W_{cr}$  : 最小かぶり面のひび割れ幅(mm)、 $\alpha$  : 拘束圧の低下割合に関する係数、 $\phi$  : 円孔径、 $\sigma_{n-max}$  : 最大拘束圧(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_1/\phi$  : 円孔径に対する最小かぶり厚の比、 $f'_c$  : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $C_1, C_2$  : 最小かぶり厚および横かぶり厚(mm)、 $(C_2 + \phi/2)/(C_1 + \phi/2)$  : 横縦かぶり比である。

なお、補強筋の拘束圧比が、マイナスの値は 0 として示した。

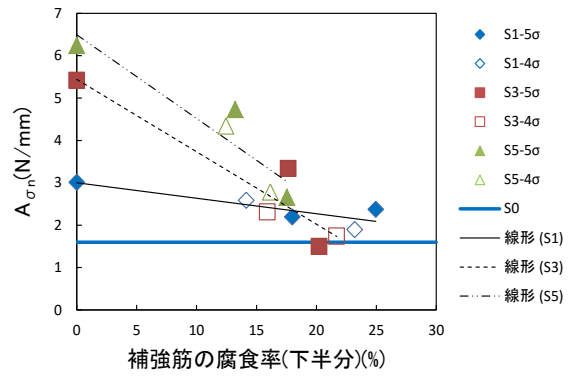
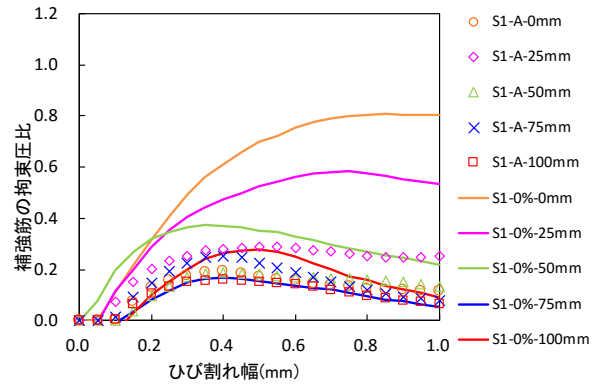
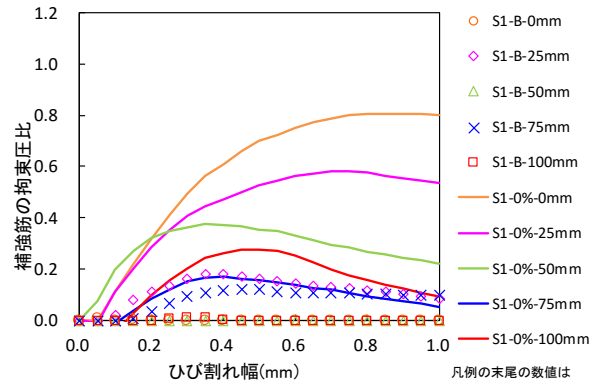


図-7 拘束圧の低下と腐食率の関係



(a) S1-A

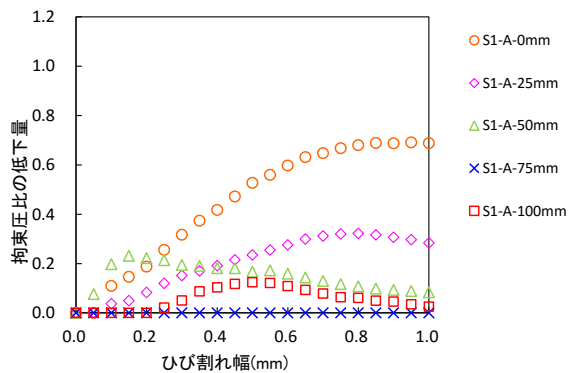


(b) S1-B

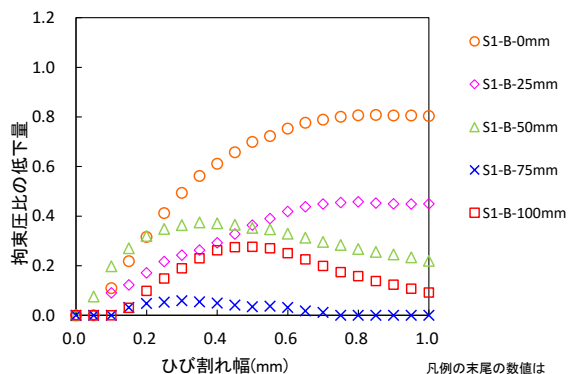
図-8 補強筋の拘束圧比とひび割れ幅の関係

補強筋直上(0mm)では、補強筋が非腐食の場合、ひび割れの拡大に伴い補強筋の拘束効果は上昇する傾向にあるが、補強筋下半分の平均腐食率が約 16%であった S1-A 試験体では、ひび割れ幅が 0.4mm の時点までは拘束圧比は増加したが、その後ひび割れ幅の拡大に従い拘束圧比は低下する傾向にある。補強筋下半分の平均腐食率が約 24%であった S1-B 試験体では、補強筋の拘束効果はほとんど消失した。

図-9 に S1-A 試験体および S1-B 試験体における、補強筋の拘束圧比の低下量と円孔軸方向のひび割れ幅の関係を示す。拘束圧比の低下量は、同一計測位置における、補強筋が非腐食である S1-0%試験体の補強筋の拘束



(a) S1-A



(b) S1-B

図-9 拘束圧比の低下量

束圧比から S1-A 試験体および S1-B 試験体の拘束圧比をそれぞれ減ずることによって算出した。なお、低下量がマイナスの値は 0 として示した。

補強筋の拘束圧比の低下量は補強筋直上から補強筋に近い位置であるほど大きい傾向にあり、腐食に伴う補強筋の拘束効果の低下割合は、位置によって異なった。

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 本実験の範囲内では補強筋の腐食膨張挙動に対する拘束効果は、補強筋(D6)の腐食率(下半分)が 20%程度になるとほとんど消失した。また、腐食に伴う

健全時からの補強筋拘束効果の低下は補強筋量が多い程大きい。

- (2) 補強筋の腐食による空間的な拘束効果の低下程度は位置によって異なり、補強筋に近い領域程低下が著しい。

**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
- 2) 米田直也，丸山久一，清水敬二，柳益夫：鉄筋の発錆による付着劣化機構，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.14，No.2，pp.81-86，1992
- 3) 蕪澤洋平，村上祐貴：腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に及ぼす補強筋の影響とその影響範囲，コンクリート工学年次論文集，vol.36，No.1，pp.1156-1161，2014
- 4) 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
- 5) 原田哲夫，出光隆，渡辺明：静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 360 号，pp.61-70，1985
- 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) 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