

論文 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

蕪澤 洋平*1, 村上 祐貴*2

要旨: 本研究では、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を行い、腐食膨張挙動に対するコンクリートの抵抗性(コンクリートの拘束圧)に及ぼす横補強筋の拘束効果について検討した。その結果、横補強筋を有する RC 部材のかぶり面にひび割れが発生する時点の拘束圧はかぶり厚、圧縮強度の影響を受け、かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下割合は圧縮強度の影響を受けた。さらに、横補強筋の拘束効果の影響度は、かぶり厚、圧縮強度の影響を受けることを明らかにした。また、コンクリートの拘束圧に基づいた横補強筋を有する腐食 RC 部材の付着強度評価を行った。

キーワード: 鉄筋腐食, 横補強筋, 拘束圧, 静的破砕剤, 付着強度

1. はじめに

近年、日本各地で鉄筋コンクリート構造物(以下、RC 構造物)の劣化損傷が多数報告され、社会資本ストックの安定的な供用を継続するために維持管理の重要性がますます高まっている。予算、人員確保に際して厳しい制約が課せられるなかで、既存 RC 構造物の安全性・使用性を確保し長期間供用するには、現有性能を適切に評価し、定量化された性能に基づいて維持管理計画を策定する必要がある。

RC 構造物に生じる劣化は多種多様であるが、四方を海で囲まれたわが国において、塩害による鉄筋腐食は代表的な劣化現象の一つである。また、国土の半分が豪雪地帯であるわが国では凍結防止剤に起因する塩害も大きな問題となっており、現在までに塩害により劣化を生じた RC 構造物の構造性能評価については、研究が盛んに行われ、体系的な取り組みもなされている¹⁾⁴⁾。鉄筋腐食を生じた RC 構造物の耐荷性能や変形性能といった構造性能を定量的に評価するためには、部材内部の鉄筋の腐食性状を評価することは勿論のこと、鉄筋腐食した RC 部材の鉄筋とコンクリートの付着性状を適切に評価する必要がある。

鉄筋腐食が RC 部材の付着性状に及ぼす要因は種々あるが、特にかぶりコンクリートの鉄筋軸に沿った腐食ひび割れは付着強度の著しい低下を引き起こすことが知られており、かぶりコンクリートの腐食ひび割れ幅を指標として腐食した鉄筋コンクリートの付着性能を評価する試みがなされている⁵⁾。米田らは、かぶりコンクリートの鉄筋軸方向の腐食ひび割れが付着劣化を生じさせる主たる要因として、鉄筋軸方向の腐食ひび割れによる鉄筋近傍のコンクリートの拘束効果の低下を指摘している⁶⁾。

また、JCI リハビリテーション委員会報告書では、横

補強筋は腐食に伴う付着強度の低下を抑制し、かぶり面の腐食ひび割れ幅が大きい程、横補強筋の付着劣化の抑制効果が大きいことが報告されている⁵⁾。これは、腐食ひび割れ発生後も横補強筋によって割裂応力に対するコンクリートの拘束圧が保持されるためであると考えられる。

このような背景から、著者らは横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、腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に及ぼす横補強筋の影響について検討した。その結果、横補強筋がコンクリートの拘束圧の低下を抑制することを明らかにするとともに、横補強筋の拘束効果は試験体軸方向に影響範囲が存在し、横補強筋が複数本配筋され拘束効果の影響範囲が重なり合う領域では相互の影響が生じることを明らかにした⁷⁾。

本研究では、文献⁷⁾で未検討であった腐食膨張挙動に対する横補強筋の拘束効果に及ぼすかぶり、圧縮強度の影響について検討するとともに、横補強筋を有する鉄筋腐食を生じた鉄筋コンクリートの付着強度について拘束圧に基づいて検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験方法

試験体概要を図-1 に示す。試験体は断面が 150mm×150mm、高さ 300mm の角柱試験体であり、直径 22mm の円孔を所定の位置に設けた。横補強筋には D6 異形鉄筋 (SD295A) を使用し、試験体中央に 1 本配筋した。フック形状は鋭角フックとし、定着長は 40mm とした。

本実験では図-1 (d) に示す鋼管パイプを用いて拘束圧を測定した。鋼管パイプは圧力計測部と接続部がねじ

*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)

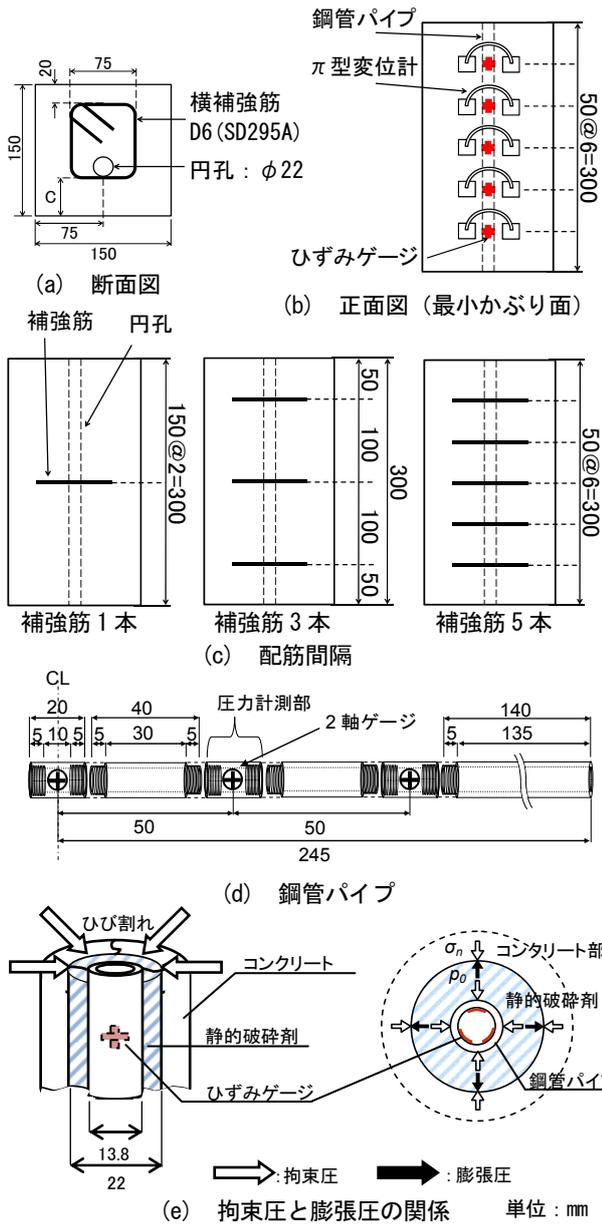


図-1 試験体概要

部により連結されており、各圧力計測部の内曲面には 2 軸のひずみゲージが 3 枚貼り付けてある。

鋼管パイプを円孔内に挿入し、鋼管パイプと円孔の隙間に静的破砕剤を充填して膨張圧を発生させた。円孔の下端部は硬化前の静的破砕剤の漏れを防止するためにビニールテープで閉じ、上端部は開放している。静的破砕剤の膨張挙動は、原田ら⁸⁾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)に示すように拘束圧は鋼管パイプに作用する外圧と等価であると仮定し、計測したひずみを中空円筒理論を用いた式に代入して拘束圧を算出した。拘束圧算出方法の詳細は既往の研究⁷⁾を参照されたい。

また、図-1(b)に示すように、試験体の最小かぶり面には、圧力計測部直上に π 型変位計を設置し、膨張圧に起因する縦ひび割れ幅の計測を行った。

表-1 実験パラメータ

試験体名	かぶり厚 C(mm)	水セメント比(%)	横補強筋本数	計測点数	圧縮強度 (N/mm ²)	補強筋量 pw(%)※1
C29-S0 W/C60-5 σ	29	60	0	5	37.1	-
C39-S0 W/C60-5 σ ※2	39				34.8	-
C49-S0 W/C60-5 σ	49				39.0	-
C29-S1 W/C60-5 σ	29	60	1	5	32.3	0.28
C29-S1 W/C60-4 σ				4	35.0	
C39-S1 W/C30-5 σ				5	70.9	
C39-S1 W/C30-4 σ	39	30	1	4	70.1	0.28
C39-S1 W/C45-5 σ				5	42.2	
C39-S1 W/C45-4 σ				4	41.8	
C39-S1 W/C60-5 σ ※3	39	45	1	5	35.8	0.28
C39-S1 W/C60-4 σ ※3				4	28.9	
C39-S3 W/C60-5 σ ※4				5	31.4	
C39-S3 W/C60-4 σ ※2	39	60	3	4	31.2	0.42
C39-S5 W/C60-5 σ ※2				5	32.9	
C39-S5 W/C60-4 σ ※2				4	35.0	
C49-S1 W/C60-5 σ	49	60	1	5	31.4	0.28
C49-S1 W/C60-4 σ				4	32.3	

※1 $pw=2A_s/b_s A_c$ A_s : 鉄筋公称断面積, b_s : 試験体幅, s : 補強筋間隔

※2 文献⁷⁾で既報済

※3 圧縮強度が設定強度に対し過大であったため再実験を実施

※4 最大拘束圧が過大であったことから再実験を実施

表-2 配合表

W/C(%)	単位量 (kg/m ³)						
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	高性能 AE減水剤	AE剤
60	155	258	835	1040	2.58	-	-
45		344	803	1000	7.71	-	-
30		517	739	920	-	5.17	0.06

2.2 実験パラメータ

実験パラメータは表-1 に示す通り、かぶり厚、水セメント比、横補強筋本数および圧力測定箇所である。かぶり厚は 49mm, 39mm, 29mm の 3 水準、水セメント比は 60%, 45%, 30% の 3 水準とした。圧力計測点は試験体端から 50mm, 100mm, 150mm, 200mm, 250mm の位置(以下、5ヶ所計測)、75mm, 125mm, 175mm, 225mm の位置(以下、4ヶ所計測)で計測を行った。なお、横補強筋を有していない試験体は 5ヶ所でのみ計測を行った。試験体は各パラメータにつき 3 体作製した。実験結果の一部は既発表である⁷⁾。

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た。

3. 実験結果

3.1 横補強筋の拘束圧特性に及ぼすかぶりの影響

(a) 最大拘束圧

図-3 に最大拘束圧とかぶり厚の関係を示す。図中には長岡らが提案した最大拘束圧算定式より算出した最大拘束圧を併せて示す⁹⁾。なお、最大拘束圧の定義は最小かぶり面にひび割れが生じる時点の拘束圧とし、試験体の各圧力計測部で計測したひび割れ発生時の拘束圧を平均化した値である。

図-3 に示すようにかぶり厚が大きいほど最大拘束圧は大きい値を示しており、最大拘束圧はかぶり厚の影響を受けることが分かる。また、同一かぶり厚において算定値および横補強筋を有しない試験体の最大拘束圧と良好な一致をしていることから、最大拘束圧は横補強筋の影響を受けないと考えられる。さらに、計測箇所の違いによらず最大拘束圧は同様の値を示していることから、

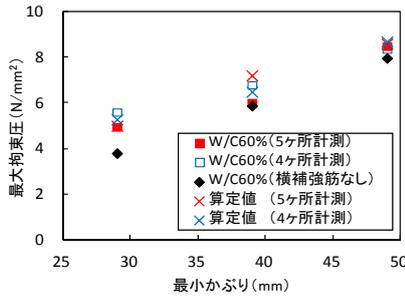


図-3 最大拘束圧と
かぶり厚の関係

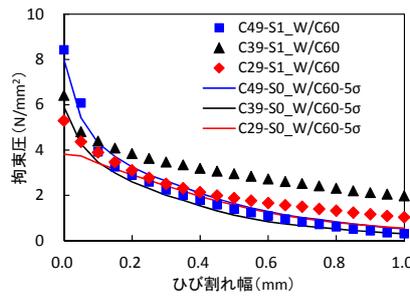


図-4 拘束圧とひび割れ幅の関係
(かぶり厚別)

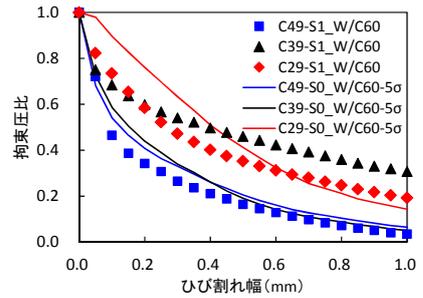


図-5 拘束圧比とひび割れ幅
の関係(かぶり厚別)

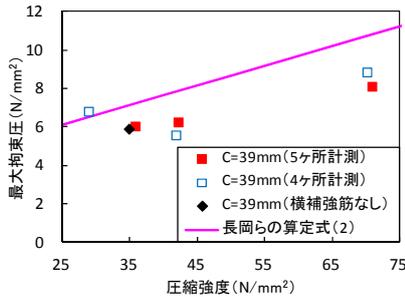


図-6 最大拘束圧と
圧縮強度の関係

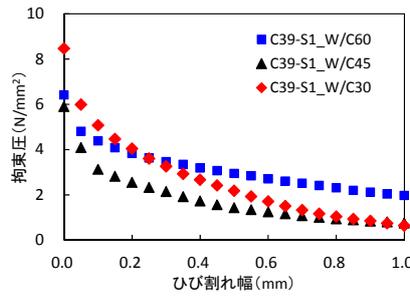


図-7 拘束圧とひび割れ幅の関係
(水セメント比別)

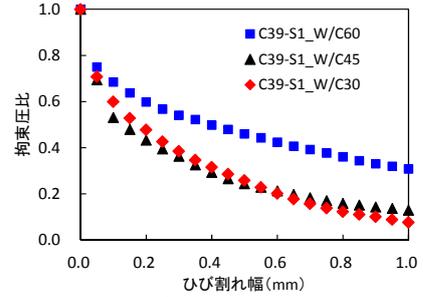


図-8 拘束圧比とひび割れ幅
の関係(水セメント比別)

最大拘束圧に及ぼす計測位置の影響は小さいと考えられる。

(b) ひび割れ発生後の拘束圧

図-4 に最小かぶり面にひび割れが発生した時点からの拘束圧と最小かぶり面のひび割れ幅の関係をかぶり厚毎に示す。本研究において同一パラメータで計測した 5ヶ所計測と 4ヶ所計測の実験結果は同様の値を示したため、以降、実験結果は 5ヶ所計測と 4ヶ所計測の平均値を示す。なお、C49-S1_W/C60-5 σ 試験体は 2 体平均である。

全体的な傾向として、拘束圧は最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴い指数関数的に低下した。

図-5 に最大拘束圧で正規化した拘束圧(以下、拘束圧比)と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を示す。かぶり厚 39mm の試験体では横補強筋を有しない試験体と比較して、拘束圧の低下が抑制されているが、かぶり厚 29mm と 49mm の試験体では、そのような傾向は確認できなかった。

3.2 横補強筋の拘束圧特性に及ぼす圧縮強度の影響

(a) 最大拘束圧

図-6 に最大拘束圧と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度が大きいほど最大拘束圧は大きい値を示す傾向にあり、最大拘束圧は圧縮強度の影響を受けることが分かる。

(b) ひび割れ発生後の拘束圧

図-7 に最小かぶり面にひび割れが発生した時点からの拘束圧と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を水セメント比別に示す。

3.1 節で示した拘束圧のひび割れ幅の関係と同様に、拘

束圧は最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴い指数関的に低下する傾向にある。

図-8 に拘束圧比と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を示す。図-8 より同一最小かぶり厚において水セメント比が小さい(圧縮強度が大きい)ほど最大拘束圧からの拘束圧の低下割合が大きい傾向にある。これは、圧縮強度が大きいほど膨張作用によって蓄積される内部エネルギーが大きく、ひび割れ発生に伴うエネルギーの解放量が大きいためであると考えられる。

4 横補強筋の拘束圧の影響に及ぼす各種要因

4.1 かぶり

図-9 に各ひび割れ時における拘束圧比と横補強筋直上からの距離の関係をかぶり厚毎に示す。横補強筋 1 本あたりの拘束圧比の影響範囲を検討するに際し、同一パラメータの 5ヶ所計測および 4ヶ所計測で得られた拘束圧の拘束圧比を併せて示している。なお、拘束圧比およびひび割れ幅は、試験体 5ヶ所および 4ヶ所で計測した値をそれぞれ同一時間で平均した値である。本実験では、ひび割れが大きく拡大すると拘束圧がマイナスの値を示す計測箇所があったが、マイナスの値は 0 とした。

いずれのかぶり厚においても、試験体中央の拘束圧比はひび割れ幅が拡大しても低下せず、それ以外の箇所では、拘束圧比はひび割れ幅の拡大に伴い低下する傾向にあった。図-10 に各ひび割れ幅における、横補強筋の拘束効果の影響範囲の面積をかぶり厚毎に示す。なお、影響範囲の面積は、図-9 に示した実験結果を試験体中央から 100mm までの区間で試験体中央からの距離 25mm

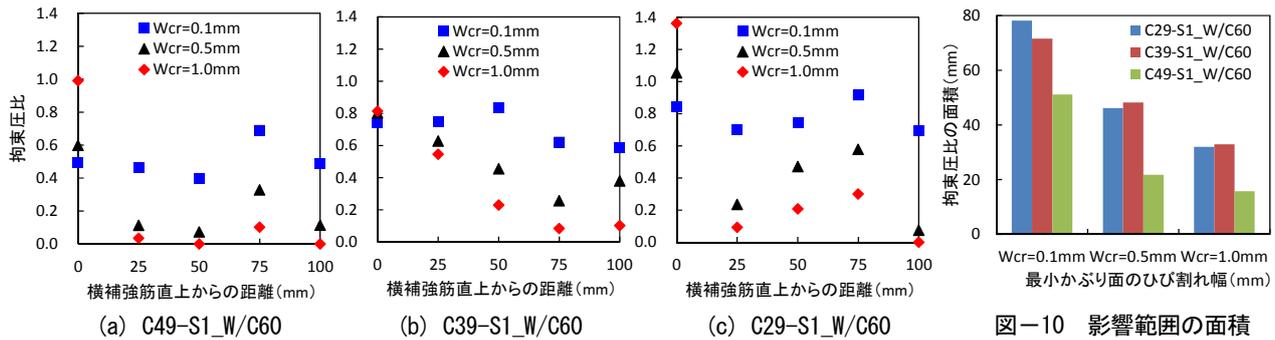


図-9 横補強筋の拘束効果の影響範囲-かぶり厚別

図-10 影響範囲の面積 (かぶり厚別)

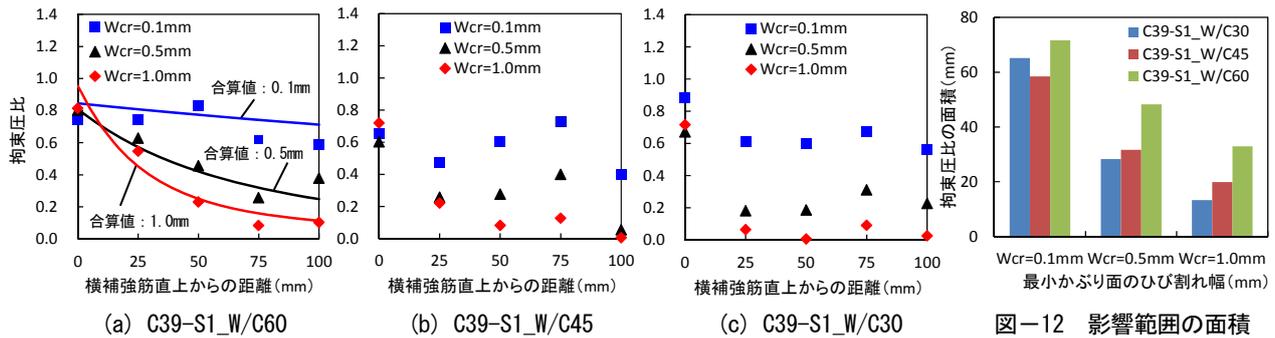


図-11 横補強筋の拘束効果の影響範囲-水セメント比別

図-12 影響範囲の面積 (水セメント比別)

を刻み幅とした台形および三角形の面積として算出した。図-10より、かぶり厚が大きいほど影響範囲の面積は小さく、横補強筋の拘束効果の影響範囲の面積はかぶり厚の影響を受けることが分かる。

4.2 圧縮強度

図-11には各ひび割れ時における拘束圧比と横補強筋直上からの距離の関係を水セメント比別に示す。水セメント比の違いによらず、試験体中央の拘束圧比はひび割れ幅が拡大しても低下せず、それ以外の箇所では拘束圧比はひび割れ幅の拡大に伴い低下する傾向にあった。図-12に水セメント比について図-10と同様の方法で求めた影響範囲の面積を示す。図-12より、水セメント比が小さい(圧縮強度が大きい)ほど影響範囲の面積は小さく、横補強筋の拘束効果の影響範囲の面積は圧縮強度の影響を受けることが分かる。

5 横補強筋の拘束効果の定量化

本横補強筋を有する試験体の拘束圧は、コンクリート単体の拘束圧に横補強筋の拘束圧を重ね合わせることで表現できると仮定し、式(1)のように評価することにした。

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

ここで、 σ_A :横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 :横補強筋の拘束圧(N/mm²)である。

本研究では、既往の拘束圧算定式より算出したコンク

リート単体の拘束圧を用いて横補強筋の拘束効果の定量化を試みた。

5.1 横補強筋の拘束圧比

本研究では、5.3節で後述する横補強筋を複数本有する試験体の拘束効果の影響範囲の分布を検討するため、C39-S3_W/C60およびC39-S5_W/C60試験体とかぶり、水セメント比が同じであるC39-S1_W/C60試験体について定量化を行った。

横補強筋の各測定点における拘束圧比は、C39-S1_W/C60試験体の拘束圧比から式(2)に示す拘束圧算定式により算出したコンクリート単体の拘束圧の拘束圧比の値を減ずることで算出した⁹⁾。

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

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)、 α :拘束圧の低下割合に関する係数、 σ_{n-max} :最大拘束圧(N/mm²)、 C_1/ϕ :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/mm²)、 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。

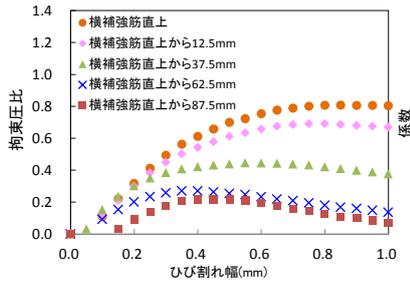


図-13 横補強筋の拘束圧比 (移動平均)

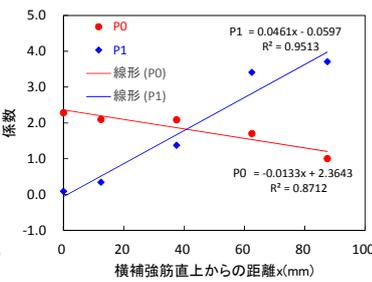


図-14 p_0 および p_1

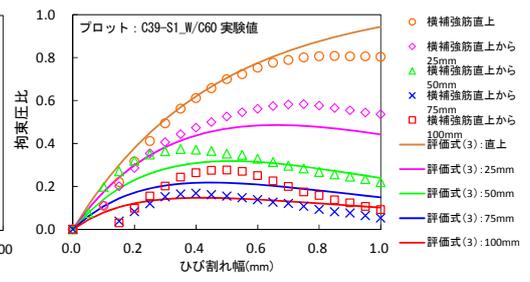


図-15 評価式(3)の適用性評価

さらに、各測定点の計測値のバラツキを考慮するため、隣接する測定点の値を用いて2点移動平均処理を行った。なお、横補強筋直上については2点移動平均処理を行っていない。図-13に2点移動平均した横補強筋の拘束圧比と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を横補強筋直上からの距離ごとに示す。

本研究では、図-13に示す横補強筋の拘束圧比を式(3)に示す指数型の関数でモデル化することとした。

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

(0.0mm ≤ W_{cr} ≤ 1.0mm)

ここで、 σ_s/σ_{n-max} : 横補強筋の拘束圧比、 p_0, p_1 : 横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。

図-13に示した各位置の横補強筋の拘束圧比について、最小二乗法により誤差が最も小さくなるような p_0 および p_1 を求め、図-14に示す両者の回帰直線から式(4)、(5)が得られた。

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

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

ここで、 x : 横補強筋直上からの距離(mm)である。

5.2 適用性評価

図-15は、C39-S1_W/C60試験体に対し、式(3)より算出した拘束圧比と実験値を比較したものである。両者は比較的良好な一致を示している。

評価式(3)より算出した横補強筋の拘束圧比と式(2)より求めたコンクリート単体の拘束圧の拘束圧比との合算値と、C39-S1_W/C60試験体の実験値を図-16に示す。

なお、図中には実験値をプロット点で、合算値を実線で示す。図-16より、合算値と実験値は概ね一致していることから、横補強筋を有する試験体の拘束圧比は、既往のコンクリート単体の拘束圧算定式と横補強筋の拘束効果の評価式を合算することで評価可能であると考えられる。

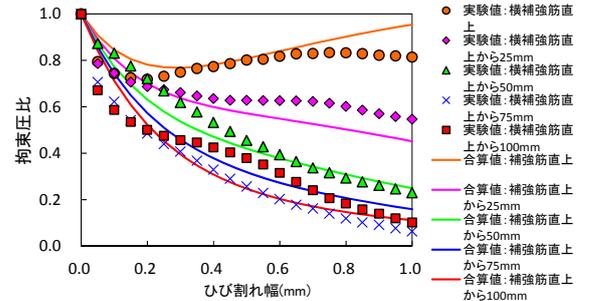


図-16 実験値と合算値の比較

なお、前述した通り本研究で構築した評価式はかぶり39mm、W/C60%の実験結果に基づくものであり、今後、実験条件の異なる場合への適用性についても検討する必要がある。

また、実構造物では鉄筋断面内で不均一に腐食することが多いが、本実験では簡便のため鉄筋が断面内で均一に腐食した条件で検討を行った。鉄筋断面の一部が腐食する場合については、今後の検討課題とする。

5.3 横補強筋の拘束効果の影響範囲の分布

5.2節で算出した、コンクリートの拘束圧比と横補強筋の拘束圧比の合算値と横補強筋直上からの距離の関係を図-11(a)に示す。図-11(a)に示す合算値と横補強筋直上からの距離の関係は、C39-S1_W/C60試験体の実験値と概ね一致している。

図-17には、図-11(a)に示した合算値を重ね合わせて再現したC39-S3_W/C60試験体とC39-S5_W/C60試験体の影響範囲を示す。なお、図中には両試験体の実験値も合わせて示す。一部の測定点において差異が大きいため、概ね影響範囲の分布の傾向を再現できていることから、評価式を用いて得られた合算値を重ね合わせることで、横補強筋の拘束効果の相互の影響についても評価可能であると考えられる。

6 横補強筋を有するRC部材の付着強度と拘束圧

長岡らは横補強筋を有しない鉄筋腐食をしたRC部材の引抜試験を実施し、付着割裂挙動が支配的である場合における付着強度と拘束圧の間には、比較的良好な正の相関性を有することを確認し、両者の間には式(6)に示すような関係が成り立つことを明らかにした⁹⁾。

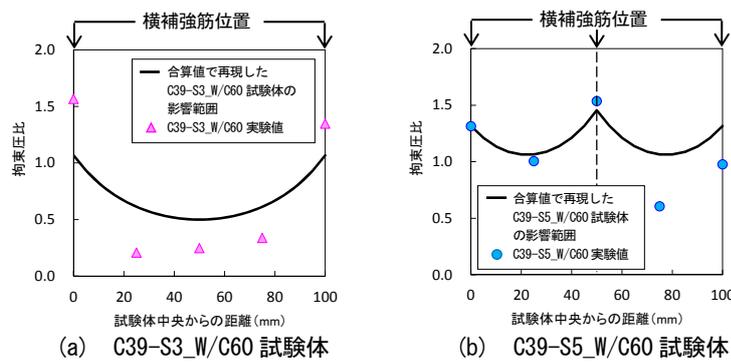


図-17 横補強筋の拘束効果の重ね合わせ

$$\tau_{cor} = \sigma_n \cdot \cot 54.1^\circ + 2.60 \quad (6)$$

ここで、 τ_{cor} ：腐食 RC 部材の付着強度(N/mm²)、 σ_n ：コンクリート単体の拘束圧(N/mm²)である。

さらに、阿部らは横補強筋を有する主鉄筋のみを腐食させた RC 部材の片側引抜試験を実施し、横補強筋を有しない試験体に比べて付着強度が増加することを明らかにした¹⁰⁾。試験体諸元・実験方法の詳細は文献 10)を参照されたい。本研究では、付着強度の増加が横補強筋の拘束効果により横補強筋を有していない試験体と比べコンクリートの拘束圧が増加するためであると仮定し、横補強筋を有する場合の付着強度評価式を式(7)のように評価することにした。

$$\tau_{cor} = (\sigma_n + \sigma_s) \cdot \cot 54.1^\circ + 2.60 \quad (7)$$

ここで、 σ_n ：コンクリートの拘束圧(N/mm²)、 σ_s ：横補強筋の拘束圧(N/mm²)である。

図-18 は阿部らの引抜試験結果と式(7)より算出した付着強度を比較したものである。横補強筋の拘束圧(σ_s)は式(3)より算出した横補強筋の拘束圧比の分布の平均値に式(2)より算出した最大拘束圧(σ_{n-max})を乗じることで算出した。コンクリートの拘束圧(σ_n)は式(2)より算出した。図-18 に示すようにひび割れ幅約 1.0mm 時点の実験値と算定値の差異は大きいものの、全体的には比較的良好な一致を示している。

本研究では横補強筋の腐食は考慮しておらず、横補強筋が腐食した場合、横補強筋とコンクリートの付着程度によって横補強筋の拘束効果は変化するものと考えられるが、これは今後の検討課題である。

7 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 横補強筋を有する RC 部材の最大拘束圧はかぶり厚、圧縮強度の影響を受ける。
- (2) 横補強筋を有する RC 部材の最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下割合は圧縮強度の

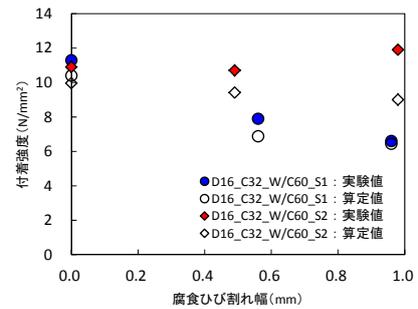


図-18 適用性評価(式(7))

影響を受ける

- (3) 横補強筋の拘束効果の影響範囲の面積は、かぶり厚、圧縮強度の影響を受ける。
- (4) 既往の腐食 RC 片側引抜試験結果とコンクリートの拘束圧に基づいた横補強筋を有する腐食 RC 部材の付着強度算定値(式(7))は、比較的良好な一致を示した。

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) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ，Vol.71，2006。
- 2) 土木学会：続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能，コンクリート技術シリーズ Vol.85，2009
- 3) 土木学会：材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会（342 委員会）委員会報告書およびシンポジウム講演概要集，2012
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 斐澤洋平，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
- 8) 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
- 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) 阿部哲雄，番場俊介，村上祐貴：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，コンクリート工学年次論文集，vol.36，No.1，pp.1282-1287，2014