

論文 鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着応力性状に及ぼすコンクリートの拘束度の影響

長岡 和真*1・佐藤 綾桂*2・村上 祐真*3

要旨：本研究では、鉄筋腐食により損傷を受けた RC 部材の付着応力性状に及ぼすコンクリートの拘束度の影響評価を目的として、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を実施するとともに、拘束度に基づき鉄筋腐食した RC 部材の付着応力性状のモデル化を試みた。その結果、拘束度はかぶり厚ならびにコンクリートの圧縮強度に大きく影響し、かぶりコンクリートに発生するひび割れ幅の増加にしたがい指数的に低下することが明らかとなった。また、拘束度に基づく付着評価モデルは既往の実験結果と比較的良好な一致を示した。

キーワード：鉄筋腐食, 腐食ひび割れ, 付着劣化, コンクリートの拘束度

1. はじめに

既存構造物の現有性能を定量的に評価し、構造性能を管理基準値として直接用いることが可能となれば、合理的な維持管理活動の実現に大きく貢献する。そのため、近年では各種劣化が生じた RC 構造物の現有性能の定量的評価について盛んに研究が行われている。

RC 構造物に生じる各種劣化現象はさまざまあるが、特に塩害に伴う鉄筋腐食劣化に関しては比較的起こり易い劣化現象であることに加えて、構造性能に直接影響を及ぼす場合が多いことから、この種の劣化を受けた構造物の構造性能の定量的評価は重要視されている。

鉄筋の腐食は、構造的に有意な鉄筋量を減少させるだけでなく、鉄筋とコンクリートの付着を劣化させる。例えば RC はり部材において、鉄筋腐食に伴う付着劣化が主鉄筋定着部まで及ぶと、主鉄筋の抜け出しが生じる恐れがあり、その場合、部材の耐荷力に及ぼす影響は非常に大きいことが既往の研究で報告されている¹⁾。そのため、腐食を生じた鉄筋とコンクリートの付着性状を適切に評価し得るモデルを構築することは、鉄筋腐食により損傷を受けた RC 構造物の構造性能評価を行う上で非常に重要な位置づけにあるが、未だ有用なモデルは確立されていない。

現在、鉄筋腐食を生じた RC 部材の付着性状に関する研究は多数実施されており、有用な知見が蓄積されつつある²⁾。既往の研究では、腐食ひび割れ幅、或いは鉄筋の断面減少率といった付着劣化因子と付着性状を直接関連付けて評価されている場合が多い。しかしながら付着劣化は、各付着劣化因子の複合的な影響を受けて生じるため、特定の付着劣化因子のみに着目して評価することに疑問が残る。付着劣化因子を同時に考慮できない理

由の一つとしては、腐食ひび割れ幅や鉄筋の断面減少率などの種々の付着劣化因子の次元が異なり、統一的に評価することに困難を要するためである。また、コンクリートの圧縮強度やかぶり厚等の構造細目の影響も大きいものと思われるが、現在までにほとんど議論はなされていない。

そこで本研究では、鉄筋の腐食膨張や腐食ひび割れ性状といった付着劣化因子に加えて、コンクリートの圧縮強度やかぶり厚といった構造細目が RC 部材の付着応力性状に及ぼす影響を、コンクリートの拘束圧の変化として統一的に評価するとともに、鉄筋腐食した RC 部材の付着評価モデルの構築を行った。

2. 実験手法

2.1 実験目的

RC 部材の付着割裂機構は、図-1 に示すように異形鉄筋の節による支圧力による影響が支配的である。この支圧応力の分力として鉄筋周囲のコンクリートを押し出すように作用する圧力(σ_n)が生じ、これにより鉄筋周辺のコンクリートには、リングテンションが生じる。一方、コンクリート側からは支圧応力に抵抗して鉄筋に付着応力(τ)と拘束圧(σ_n)が作用する。摩擦作用などの影響を無視して、鉄筋節の幾何学的な拘束圧のみを考えると、付着応力と拘束圧の関係は式(1)に示すようになる。

$$\tau = \sigma_n \cdot \cot \theta \quad (1)$$

ここで、 τ ：付着応力、 σ_n ：拘束圧、 θ ：支圧応力と主筋方向のなす角度である。

本研究では、式(1)に示す拘束圧(σ_n)を 2.2 節に示す手

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 (正会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻科

*3 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)

法により直接計測し、拘束圧におよぼす腐食膨張、それに起因してかぶり表面に生じる腐食ひび割れの影響および構造細目の影響評価を行った。

2.2 実験概要

図-2 に試験体形状を示す。コンクリートの拘束圧の測定方法は、静的破砕剤の膨張圧測定のために開発された内管法を参考にした³⁾。試験体は 150mm×150mm×300mm の角柱試験体であり、所定の位置に直径 22mm の円孔を設けた。円孔内には、拘束圧測定用の鋼管パイプを挿入し、その隙間に腐食膨張圧を模擬するため、静的破砕剤を充填した。静的破砕剤の膨張挙動は、原田らによって液圧的であることが報告されており、図-3 に示すように拘束圧は鋼管パイプに作用する外圧とほぼ等価となる³⁾。

図-2(d)に鋼管パイプの詳細を示す。膨張圧を計測する受圧部の長さは 50mm と短くすることで視野および作業性を確保した。受圧部の内曲面に 2 軸のひずみゲージを 3 枚貼付し、鋼管に生じる軸方向および円周方向のひずみを計測した。受圧部両端はネジを切り、鋼管パイプとネジ接合して一体化した。

計測したひずみ値を式(2)に示す中空円筒理論を用い

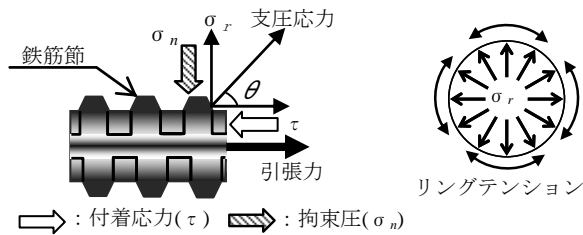


図-1 付着割裂破壊時の付着作用図

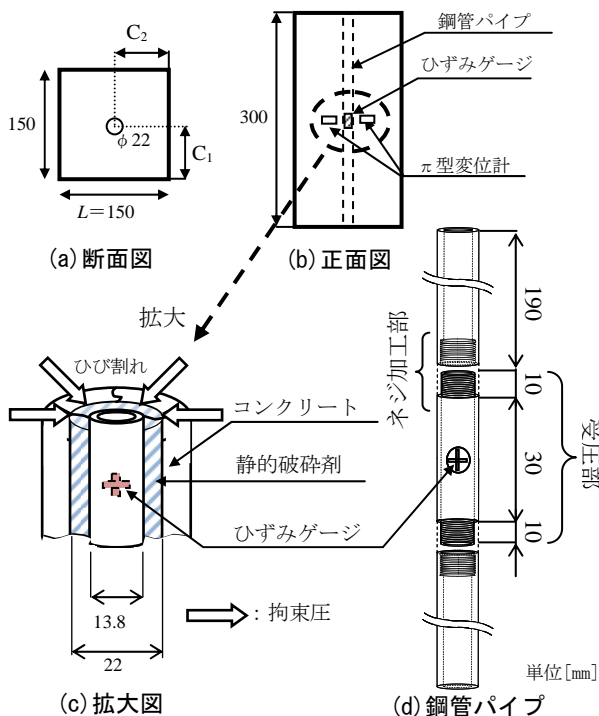


図-2 試験体形状

た式に代入して拘束圧を算出した。

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

ここで、 σ_n : 拘束圧(N/mm²)、 p_0 : 膨張圧(N/mm²)、 E : 鋼管の弾性係数(200000N/mm²)、 ε_θ : 円周方向ひずみ、 ε_z : 軸方向ひずみ、 k : 鋼管の外内径比(外径: 13.8mm, 内径: 9.2mm)、 ν : 鋼管のポアソン比(0.3)である。

なお、原田らも本実験と同様に鋼管パイプにネジ加工を施しており、内管法による圧力測定の精度に問題がないことを報告している³⁾。

試験体の側面中央部には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。

2.3 実験パラメータ

実験パラメータは表-1 に示すように、かぶり厚(芯かぶり)とコンクリートの圧縮強度であり、2つのシリーズに分類される。S0 シリーズは、縦方向のかぶり厚(C₁)のみを変化させたものであり、C₁=75mm, 60mm, 50mm, 40mm, の4水準、横かぶり厚(C₂)は75mmと一定とした。圧縮強度は水セメント比 60%, 45%, 30%の3水準とした。

S1 シリーズは、縦方向(C₁)および横方向(C₂)のかぶり厚を変化させたシリーズ(隅角部)である。縦かぶり厚と横かぶり厚の組合せは6水準とし、圧縮強度は水セメント比 60%の1水準とした。試験体名称は、縦かぶり厚(C₁) - 横かぶり厚(C₂)を順に表記している。

なお、コンクリートの配合は表-2 に示す通りである。

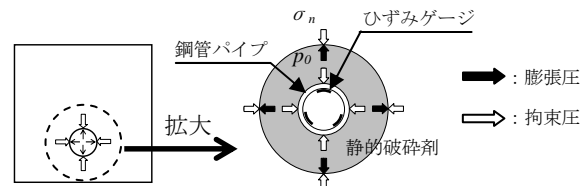


図-3 拘束圧と膨張圧の関係

表-1 実験パラメータ

試験体No.	水セメント比 W/C (%)	かぶり厚 C(mm)		圧縮強度 (N/mm ²) 平均	弾性係数 (N/mm ²) 平均	最大拘束圧 (N/mm ²)	変動係数 (%)
		縦 (C ₁)	横 (C ₂)				
S0シリーズ	60	75	75	31.6	29200	30300	11.8
		60	75	26.3	28400		8.0
		50	75	32.4	31600		6.5
		40	75	30.4	32000		4.9
	45	75	75	37.4	32100	34175	11.5
		60	75	36.3	36200		9.5
		50	75	39.3	34000		7.3
		40	75	43.1	34400		4.9
	30	75	75	52.2	30500	35150	14.2
		60	75	49.7	35200		11.9
		50	75	47.5	40900		9.2
		40	75	55.5	33000		7.3
S1シリーズ	60	60	60	29.8	29700	28833	8.3
		50	60	28.6	29600		6.5
		50	50	28.6	29900		6.5
		40	60	25	28600		4.0
	45	50	50	22.6	23900	21300	4.6
		40	50	22.6	23900		4.0
		40	40	24.9	31300		5.3
		40	40	24.9	31300		7.7

表-2 配合表

粗骨材の 最大寸法 (mm)	細骨材率 s/a(%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
25	45	60	155	258	835	1040	2.58
		45		344	803	1000	3.44
		30		517	739	920	5.17

3. 実験結果

3.1 最小かぶり厚, 圧縮強度が最大拘束圧に及ぼす影響

図-4 に最大拘束圧と最小かぶり厚の関係を示す。表-1 に示す各試験体の最大拘束圧は試験体 3 体の平均値であり, 変動係数も併せて示した。変動係数は, 最大で 21.5%, 平均は 8.6%である。ただし, C60-75, W/C30 の試験体はひずみゲージの不具合により 1 体だけの結果である。まず, S0 シリーズでは, いずれの水セメント比においても, かぶり厚の増加に伴い最大拘束圧は増加した。また, 同一かぶり厚においては, 水セメント比が小さい(圧縮強度が大きい)ほど最大拘束圧は大きい値を示しており, 最大拘束圧はかぶり厚と圧縮強度に影響することが分かる。

次に, S1 シリーズは, いずれの試験体においても S0 シリーズと同様な傾向を示し, S0 シリーズと S1 シリーズの最大拘束圧に差異がないことが分かる。これより, 最大拘束圧は横かぶり厚(C_2)の影響を受けず, 最小かぶり厚(C_1)による影響が支配的であると考えられる。

上記の結果から, 最小かぶり厚と圧縮強度を説明変数, 最大拘束圧を目的変数として重回帰分析を行った結果, 式(3)に示す回帰式が得られる。

$$\sigma_{n-max} = 0.1916C_1 + 0.1076f'_c - 6.1043 \quad (40 \leq C_1 \leq 75, \quad 22.6 \leq f'_c \leq 55.5) \quad (3)$$

ここで, σ_{n-max} : 最大拘束圧(N/mm²), C_1 : 最小かぶり厚(mm), f'_c : 圧縮強度(N/mm²)である。

式(3)から得られる最大拘束圧と実験値の比較を図-5 に示す。自由度調整済み決定係数は 0.9511 であり, 本実験の範囲内では, かぶり厚と圧縮強度から最大拘束圧が評価可能であると示された。また, 図-4 には水セメント比毎に式(3)を適用した結果を実線で示した。

3.2 最小かぶり面のひび割れ幅が拘束圧に及ぼす影響

図-6 に, 試験体のひび割れ状況の一例を示す。ひび割れは 3 方向に発生しており, その中でも最小かぶり面のひび割れは卓越して進行した。このようなひび割れ傾向が S0 シリーズ, S1 シリーズともに見られた。また, 本実験ではいずれの試験体も拘束圧が最大値を示した時点で最小かぶり面までひび割れが進展した。図-7 に一例として, C40-75, W/C30 の最大拘束圧を示した時点からの拘束圧と各側面のひび割れ幅の関係を示す(側面 1 が最小かぶり面)。ひび割れは最小かぶり面において卓越して拡大し, 他の側面表面までひび割れは到達しなかった。いずれの試験体においても同様な傾向を示した。図-7 では, 最小かぶり面以外の一部の側面のひび割れ幅は負の値を示しているが, ひび割れ測定は, π 型変位計を用いて標点距離内のコンクリートの変形を計測しており, 最小かぶり面のひび割れ幅が卓越して拡大

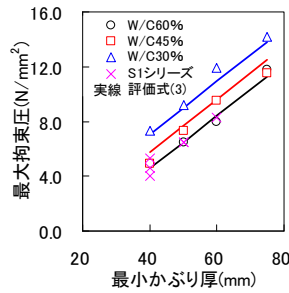


図-4 最大拘束圧と最小かぶり厚の関係

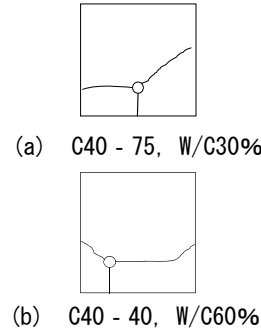


図-6 ひび割れ状況

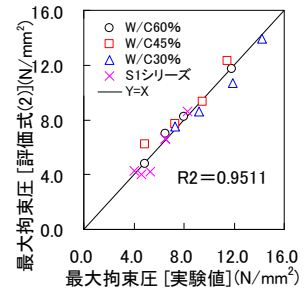


図-5 評価式(2)と実験値の比較

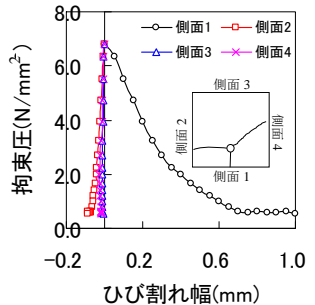
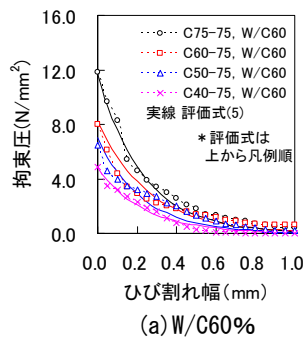
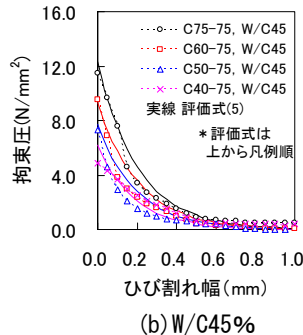


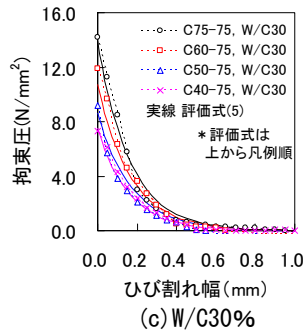
図-7 拘束圧とかぶり面のひび割れ幅



(a) W/C60%

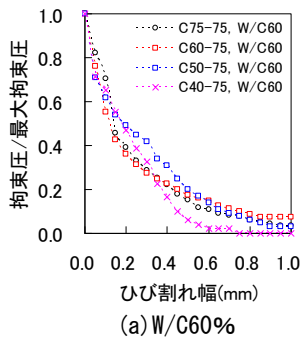


(b) W/C45%

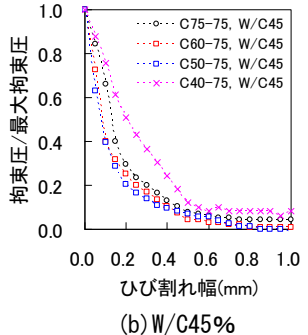


(c) W/C30%

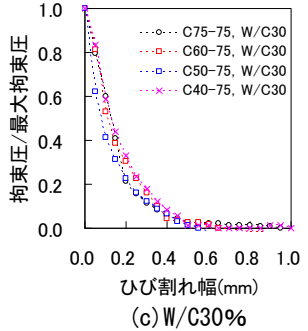
図-8 拘束圧とひび割れ幅の関係 (S0 シリーズ)



(a) W/C60%



(b) W/C45%



(c) W/C30%

図-9 低下率とひび割れ幅の関係 (S0 シリーズ)

したことにより、他の側表面には曲げ圧縮応力が発生し、これによる圧縮変形を計測したためだと考えられる。

(1) S0 シリーズ

図-8に、S0シリーズの最大拘束圧を示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毎に示す。全体的な傾向としては、拘束圧はひび割れ幅が0.2mm程度に達するまでに急激に低下し、それ以降は緩やかに低下した。また、ひび割れ幅が1.0mmに達すると拘束圧はほぼ消失した。

図-9に、S0シリーズにおける、水セメント比毎の最大拘束圧からの低下率と最小かぶり面のひび割れ幅の関係、図-10にS0シリーズにおける、かぶり厚毎の最大拘束圧からの低下率と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を示す。全体的な傾向としては、拘束圧の低下率は最小かぶり厚の影響をあまり受けない。また、図-10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)ほど拘束圧の低下割合は大きい。これは、圧縮強度が大きいほど腐食膨張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。

(2) S1 シリーズ (隅角部)

図-11に、S1シリーズの最大拘束圧を示した時点か

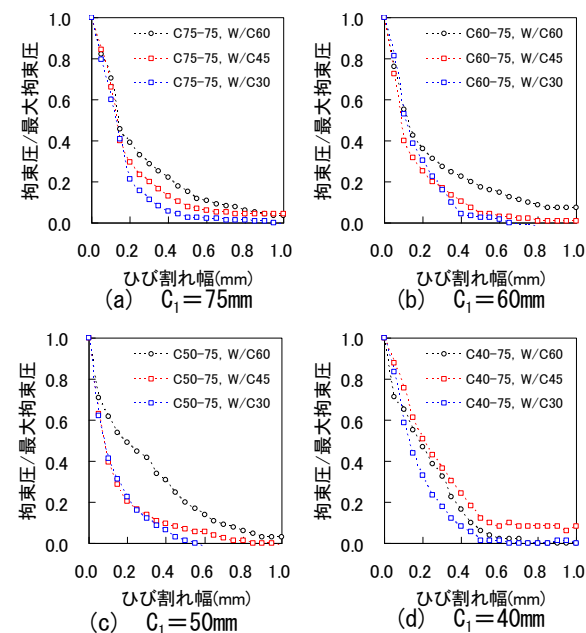


図-10 低下率とひび割れ幅の関係 (S0 シリーズ)

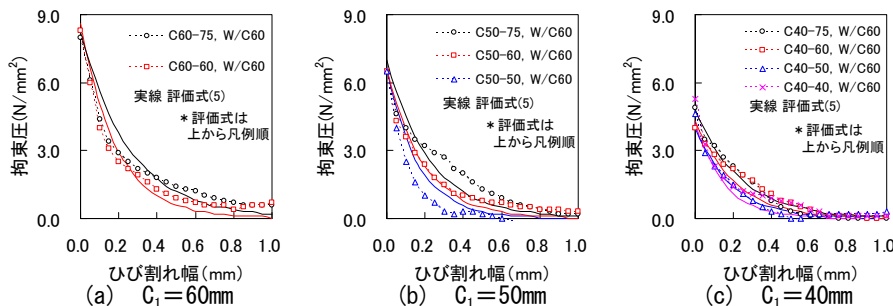


図-11 拘束圧とひび割れ幅の関係 (S1 シリーズ)

らの拘束圧と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を同一最小かぶり厚毎に示す。全体的な傾向としては S0 シリーズと同様、ひび割れ幅の増加にしたがい拘束圧の減少が認められたが、その低下割合は試験体によって異なる傾向を示しており、横かぶり厚が小さいほど拘束圧の低下割合は S0 シリーズに比べて大きいことが分かる。これは、最小かぶり面にひび割れが達した時点で、横かぶり方向へのひび割れが S0 シリーズに比べて側面表面付近に進行しているため、拘束圧が解放されやすくなったと考えられる。図-12に示すように、内部横方向ひび割れ先端を軸として曲げ変形挙動が生じ、最小かぶり面のひび割れ拡大を促進させるものと考えられる⁴⁾。これにより、横かぶり厚が大きい S0 シリーズのものに比べて S1 シリーズは、最小かぶり厚のひび割れ拡大を促進し、拘束圧が相対的に解放したと考えられる。

3.3 ひび割れ進展エネルギー

図-13に、ひび割れ進展エネルギーとかぶり厚の関係を示す。ここで、ひび割れ進展エネルギーとは図-8, 11に示した実験結果を積分して算出した値であり、拘束圧が解放されるまでに必要とする総エネルギー量のことである。本実験においては、最小かぶり面のひび割れ幅が卓越して拡大したことから、側面方向へのひび割れ自体の進展エネルギーは相対的に小さいものと考えられるため考慮していない。図-13(a)に示すように、ひび割れ進展エネルギーは最小かぶり厚が大きくなるにしたがって増加する傾向を示した。また、図-13(b)に S1 シリーズのひび割れ進展エネルギーを示すように、全体的な傾向としては、同一最小かぶり厚において横かぶり厚が小さいほどエネルギーは低下する傾向を示した。これは、前述したように側面方向のひび割れ自体の進展エネルギーは小さいが、横かぶり厚が小さいものほど横方向への内部ひび割れ先端がコンクリート表面に到達し、最小かぶり厚のひび割れ拡大を促進させやすいためであると考えられる。また図-13(c)に S1 シリーズのひび割れ進展エネルギーと横かぶり厚(C_2)と最小かぶり厚(C_1)の比の関係を示す。最小かぶり厚が小さいものほど横かぶり厚の増加に伴うひび割れ進展エネルギーの増加は小さい傾向を示した。これは、最小かぶり厚が小

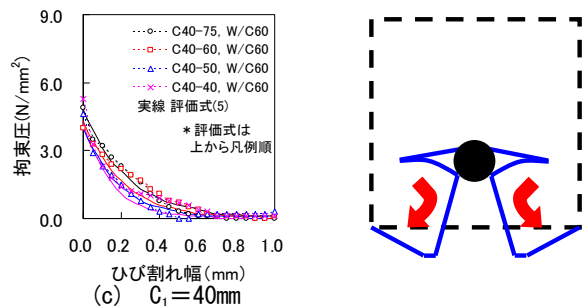


図-12 ひび割れ進展挙動

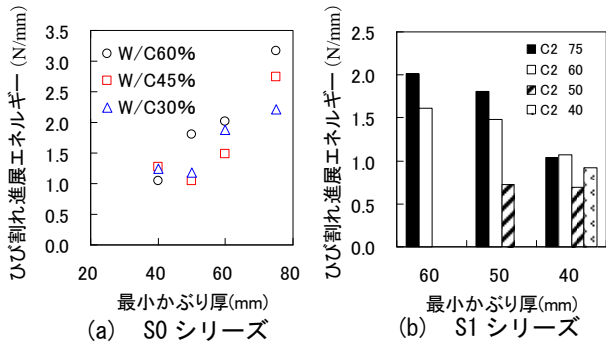


図-13 ひび割れ進展エネルギーとかぶり厚の関係

いほど、最小かぶり面にひび割れが到達した時点で、横方向ひび割れがあまり進展しておらず、最小かぶり面のひび割れ拡大におよぼす影響が小さかったためだと考えられる。この結果より、最小かぶり厚(C_1)、横かぶり厚(C_2)と縦かぶり厚(C_1)の比(C_2/C_1)を説明変数、ひび割れ進展エネルギーを目的変数として重回帰分析を行ったところ、式(4)に示す回帰式が得られた。

$$G = 0.0565C_1 + 0.6116 \frac{C_2}{C_1} - 2.2756 \quad (4)$$

$$(40 \leq C_1 \leq 75, \quad 40 \leq C_2 \leq 75)$$

ここで、 G ：ひび割れ進展エネルギー(N/mm)、 C_2 ：横かぶり厚(mm)、である。

また、図-14は式(4)から得られるエネルギーと実験値の比較を示したものであるが、実験結果と評価式(4)は比較的良好的な一致が得られる。

4. 拘束圧評価モデル

図-8, 11に示したように、拘束圧はひび割れ幅の増加に伴い指数的に低下する傾向にあることから式(5)のように指数型の関数でモデル化することとした。

$$\sigma_n = \exp(-\alpha \cdot W_{cr}) \cdot \sigma_{n-max} \quad (5)$$

ここで、 σ_n ：拘束圧(N/mm²)、 α ：係数、 W_{cr} ：ひび割れ幅(mm)、 σ_{n-max} ：最大拘束圧(N/mm²)である。

係数 α については、図-9, 10, 11より、かぶり厚と圧縮強度に依存する値であると考えられる。そこで、式(5)を用いて、ひび割れ幅が1.0mmに達した時点までのひび割れ進展エネルギーを求め、式(4)から得られるひび割れ進展エネルギーが等価となる係数 α を算出した。その際、最大拘束圧は式(3)から得られる値とした。

図-15に係数 α の算出結果を示す。なお、係数 α は圧縮強度の2/3乗で除して正規化した。図-15(a)に示すように、S0シリーズでは係数 α は最小かぶり厚の影響をあまり受けないことが分かる。しかしながら図-15(b)に示すように、係数 α は横かぶり厚が大きくなるにした

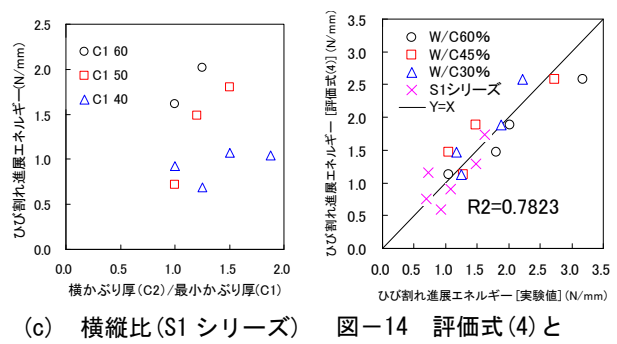


図-14 評価式(4)と実験値の比較

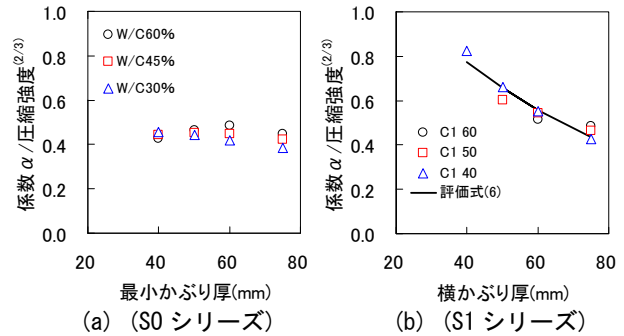


図-15 係数 α とかぶり厚の関係

がい指数的に低下していることが分かる。これらの結果を用いて、横かぶり厚の自然対数をとったものを説明変数、係数 α を圧縮強度の2/3乗で除したものを目的変数として重回帰分析を行ったところ、式(6)に示す回帰式が得られた。

$$\alpha = (-0.5376 \ln C_2 + 2.7589) \cdot f_c^{2/3} \quad (6)$$

$$(40 \leq C_2 \leq 75, \quad 22.6 \leq f_c \leq 55.6)$$

構築した式(5)と実験結果との比較を図-8, 11に実線で示す。実線は、各実験パラメータと同色で示している。一部の試験体では差異が大きいものの、全体的な傾向としては評価式(5)と実験値は比較的良好的な一致を示した。

5. 拘束圧に基づく付着劣化性状評価

2.1節で述べたとおり、RC部材の付着割裂機構は摩擦作用などの影響を無視して、鉄筋節の幾何学的な拘束圧のみを考えると、付着応力と拘束圧の関係は式(1)に示すようになる。式(1)に示すように、拘束圧と付着応力は角度 θ によって関連付けられる。赤司らは、表面筋形状と異形鉄筋界面での付着力との関係について検討している⁵⁾。赤司らによれば、角度 θ は最大耐力以降は一定の角度を保ち、最大支圧応力時の角度 θ は節高さに関わらず節間隔ごとにはほぼ等しい値をとることを指摘している。このことから、本研究は、均一に鉄筋腐食を生じた場合、腐食に伴って節高さは変化するが節間隔は変化しないことから腐食前後で角度 θ は一定であると仮定した。また、本実験における最大拘束圧が、非腐食主鉄筋を引抜いた際に生じる拘束圧とすれば、任意の腐食ひび

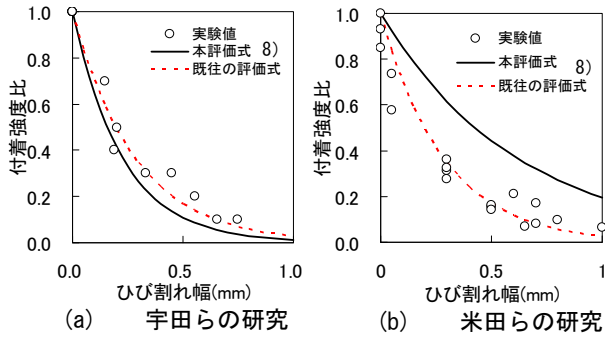


図-16 付着強度比とひび割れ幅の関係

割れ幅の時点における付着強度と非腐食時の付着強度との比は式(3)から式(6)より、式(7)に示すようになる。

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

$$\alpha = (-0.5376 \ln C_2 + 2.7589) \cdot f_c'^{2/3} \quad (7)$$

$$(40 \leq C_2 \leq 75, \quad 22.6 \leq f_c' \leq 55.6)$$

ここで、 τ/τ_{n-max} ：付着強度比である。

この評価式を宇田ら⁶⁾、米田ら⁷⁾の実験結果にそれぞれ適用し評価式の妥当性を確認した。宇田らはD16を配筋した150mm×150mm×400mmの角柱供試体を促進劣化し、両引き試験を実施している。試験体の最小かぶり厚および横かぶり厚は75mm、圧縮強度は32.2N/mm²である。米田らはD13を配筋した250mm×250mm×150mmの角柱供試体を促進劣化し、片引き試験を実施している。試験体の最小かぶり厚は56.5mm、横かぶり厚は125mm、圧縮強度は31.5N/mm²である。この実験条件を評価式に適用し付着強度比を算出した。

図-16(a)に宇田ら、(b)に米田らの実験に対する適応結果を示す。なお、図中にはJCIの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において報告された評価式も併せて示す⁸⁾。既往の評価式は幾つかの腐食RC部材の引抜き試験より得られた付着強度比と腐食ひび割れ幅の結果の回帰曲線である。断面が同じである宇田らの実験結果と本評価式は良好な一致を示した。また、拘束圧に基づき算出した本評価式と既往の評価式は結果的に類似している。これは既往の評価式では、かぶり厚や圧縮強度の影響が非腐食試験体の付着強度に潜在的に含まれているためであると考えられる。一方、断面が異なる米田らの実験結果に対しては定性的な傾向は捉えているものの、本評価モデルは付着強度比を過大に評価する結果となり、今後、断面の影響を考慮する必要性がある。

現状については、本実験と同じ断面形状において、最小かぶり面のひび割れが卓越して進展する場合に適用可能な評価モデルであり、断面が異なる場合、鉄筋が複数本存在する場合や補強筋の影響については、今後更な

る検討が必要である。

6. 結論

本研究では、鉄筋腐食したRC部材の付着性状をコンクリートの拘束圧の変化として検討した結果、以下の結果が得られた。

- (1) 最大拘束圧は最小かぶり厚(C_1)ならびに圧縮強度に大きく影響する。
- (2) 本実験の範囲内では、拘束圧は最小かぶり面に生じるひび割れ幅が0.2mmに達するまでに急激に低下し、それ以降は緩やかな低下を示した。また、ひび割れ幅が1.0mmに達すると拘束圧はほぼ作用しないことが分かった。
- (3) 隅角部の場合、ひび割れの拡大に伴う拘束圧の低下は、横かぶり厚(C_2)が小さいほど大きい。
- (4) 拘束度に基づき構築した付着評価モデルを既往研究の実験結果に対応させたところ、本実験と同じ断面形状の場合は比較的良好な結果が得られた。

謝辞 本研究は科研費(21760364)の助成を受けたものである

参考文献

- 1) 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E, vol.64, No.4, pp.631-649, 2008.12
- 2) 島弘, 山本恭史: 腐食した鉄筋の局所付着応力-局所すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集13-1, pp.663-668, 1991
- 3) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破碎剤を用いたコ5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, 1985.8
- 4) 河村圭亮ら: 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報告集, Vol.31, No.1, pp.1075-1080, 2009
- 5) 赤司二郎ら: 異形鉄筋の付着力と割裂力の関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.69-74, 1992
- 6) 宇田好一郎ら: 腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートの付着特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.26, No.2, pp.841-846, 2004
- 7) 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
- 8) 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