

平成 23 年 6 月 13 日現在

機関番号：53101

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760364

研究課題名 (和文) 鉄筋腐食を生じたコンクリート部材の付着構成則の構築

研究課題名 (英文) Development of Bond Constitutive Law of RC Members with Corrosion

研究代表者

村上 祐貴 (MURAKAMI YUKI)

長岡工業高等専門学校 環境都市工学科 助教

研究者番号：70509166

研究成果の概要 (和文) : 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。

研究成果の概要 (英文) : To evaluate the influence of the restraint degree of concrete on bond stress behavior of RC member damaged by corrosion, expansion test using nonexplosive demolition agent was carried out. As a result, the thickness of cover-concrete and the compressive strength of concrete greatly influence the restraint degree of concrete and the restraint of concrete decreases exponentially as the increase of crack width of the concrete surface. Furthermore, the deterioration of bond characteristics due to restraint degree of concrete was formulated. This model includes the influence of the concrete strength, thickness of cover-concrete, pressure of the corrosion expansion and crack width of the concrete surface.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,000,000	600,000	2,600,000
2010年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,900,000	870,000	3,770,000

研究分野：コンクリート工学，維持管理工学

科研費の分科・細目：構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鉄筋コンクリート，鉄筋腐食，付着劣化，拘束圧

1. 研究開始当初の背景

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、構造的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的な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。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 構造物の構造的な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。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。

2. 研究の目的

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。

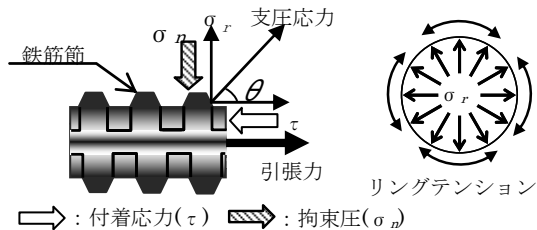


図1 付着割裂破壊時の付着作用図

3. 研究の方法

(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_r ）が生じ、これにより鉄筋周囲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) 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。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、液圧的であることから、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。

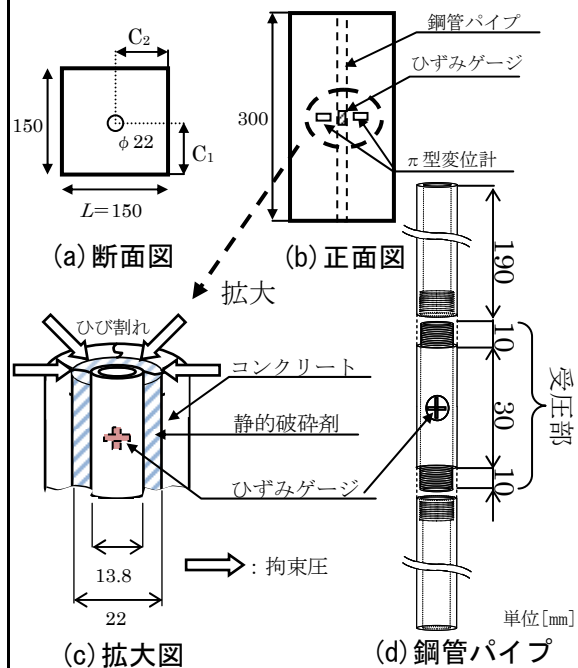


図2 試験体形状

図2(d)に鋼管パイプの詳細を示す。受圧部の内曲面上に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。

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。

(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。

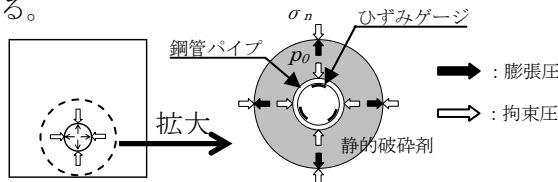


図3 拘束圧と膨張圧の関係

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)		弾性係数 (N/mm ²)		最大拘束圧 (N/mm ²)	変動係数 (%)
		縦 (C ₁)	横 (C ₂)	f _c	平均	E _c	平均		
C75-75, W/C60	60	75	75	31.6	30.2	29200	30300	11.8	21.5
C60-75, W/C60		60	75	26.3		28400		8.0	3.7
C50-75, W/C60		50	75	32.4		31600		6.5	18.3
C40-75, W/C60		40	75	30.4	39.0	32000	34175	4.9	10.7
C75-75, W/C45		75	75	37.4		32100		11.5	6.7
C60-75, W/C45		60	75	36.3		36200		9.5	9.6
C50-75, W/C45		50	75	39.3	51.3	34000	35150	7.3	6.9
C40-75, W/C45		40	75	43.1		34400		4.9	4.2
C75-75, W/C30		75	75	52.2		30500		14.2	4.3
C60-75, W/C30		60	75	49.7	26.6	36200	28833	11.9	-
C50-75, W/C30		50	75	47.8		40900		9.2	9.3
C40-75, W/C30		40	75	55.5		33000		7.3	5
C60-60, W/C60	60	60	60	29.8	26.6	29100	28833	9.3	14.9
C50-60, W/C60		50	60	28.6		28600		6.5	15.1
C40-60, W/C60		40	60	25		28600		4.0	0.2
C60-50, W/C60		60	50	22.6	23900	4.6	3.6		
C40-50, W/C60		40	50	22.6	23900	4.6	3.6		
C40-40, W/C60		40	40	24.9	31300	5.3	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	粗骨材 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	

なお、コンクリートの配合は表2に示す通りである。

4. 研究成果

(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体のみの結果である。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(C₂)の影響を受けず、最小かぶり厚(C₁)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。

$$\sigma_{n-max} = 0.1916C_1 + 0.1076f'_c - 6.1043 \quad (3)$$

(40 ≤ C₁ ≤ 75, 22.6 ≤ f'_c ≤ 55.5)

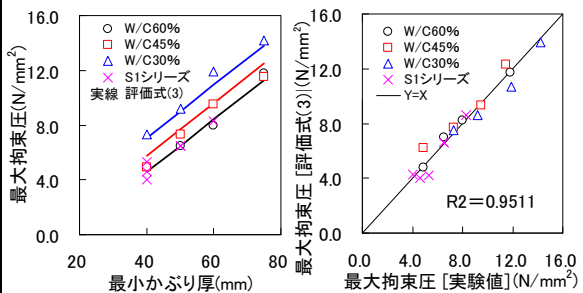


図4 最大拘束圧

図5 評価式(3)

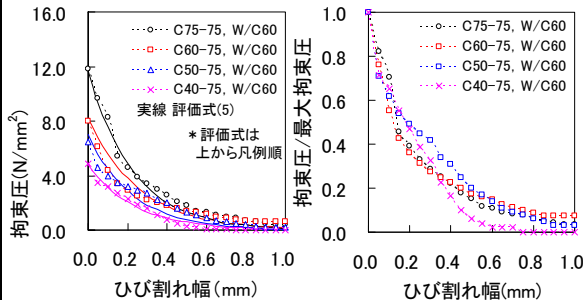


図6 拘束圧とひび割れ幅 (S0・W/C60%)

図7 低下率とひび割れ幅 (S0・W/C60%)

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。

(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、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の時点で拘束圧はほぼ消失した。

図7に一例として、S0シリーズ、W/C60%における、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8に一例としてS0シリーズ、 $C_1=60$ mmにおける、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。

図7より、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。

図9に、一例としてS1シリーズ、 $C_1=60$ mm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

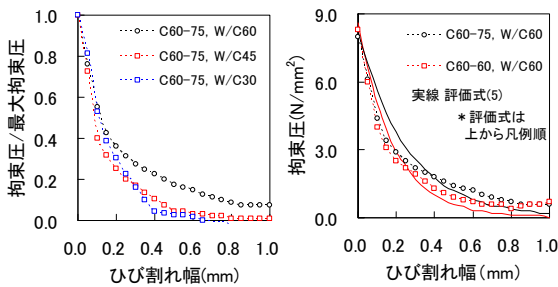


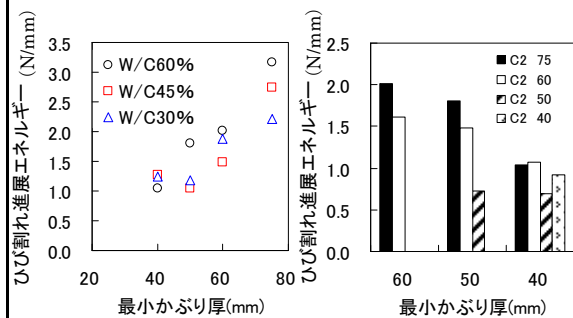
図8 拘束圧とひび割れ幅 (S0・ $C_1=60$ mm) 図9 拘束圧とひび割れ幅 (S1・ $C_1=60$ mm)

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。

(3) ひび割れ進展エネルギー

図10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実験より得られた拘束圧とひび割れ幅の関係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10(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10(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11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ほど横かぶり厚の増加に伴うひび割



(a) S0シリーズ (b) S1シリーズ

図10 Gと C_1

※G: ひび割れ進展エネルギー C_1 : 最小かぶり厚

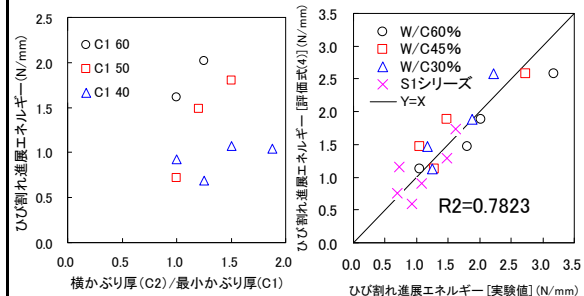


図11 Gと C_2/C_1 (S1シリーズ)

図12 評価式(4)と実験値の比較

れ進展エネルギーの増加は小さい傾向を示した。これは、最小かぶり厚が小さいほど、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 12 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)は比較的良好な一致が得られる。

(4) 拘束圧評価モデル

図 6, 9 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、前述した実験結果より、かぶり厚と圧縮強度に依存する値であるとされる。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 13 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 13(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 13(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 6, 9 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な一致を示した。

(5) 拘束圧に基づく付着劣化性状評価

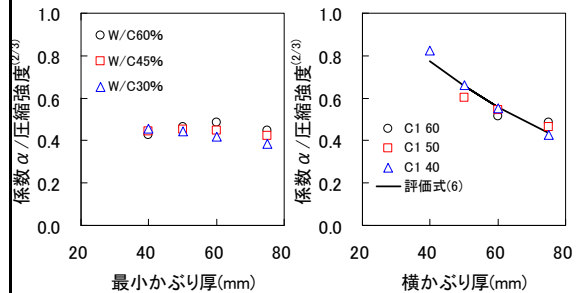
前述したように RC 部材の付着割裂機構は摩擦作用などの影響を無視して、鉄筋節の幾何学的な拘束圧のみを考えると、付着応力と拘束圧の関係は式(1)に示すようになる。式(1)に示すように、拘束圧と付着応力は角度 θ によって関連付けされる。本研究では、腐食前後で角度 θ は一定であると仮定した。また、本実験における最大拘束圧が、非腐食主鉄筋を引抜いた際に生じる拘束圧とすれば、任意の腐食ひび割れ幅の時点における付着強度と非腐食時の付着強度との比は式(3)から式(6)より、式(7)に示すようになる。

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

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

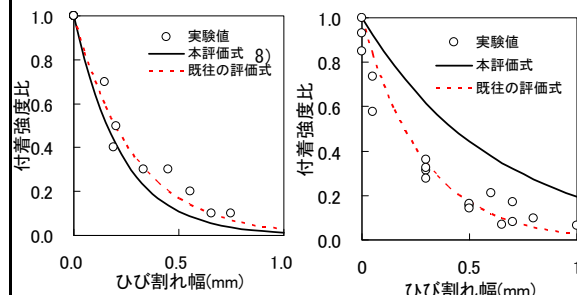
$$(40 \leq C_2 \leq 75, \quad 22.6 \leq f'_c \leq 55.6)$$

ここで、 τ/τ_{n-max} : 付着強度比である。この評価式を宇田ら、米田ら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



(a) (S0 シリーズ) (b) (S1 シリーズ)

図 13 係数 α とかぶり厚の関係



(a) 宇田らの研究 (b) 米田らの研究

図 14 付着強度比とひび割れ幅の関係

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 14(a)に宇田ら、図 14(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。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

- 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。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 長岡和真、佐藤綾桂、村上祐貴、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、コンクリート工学年次論文集、査読有り (2011 年 7 月掲載決定)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 阿部哲雄、長岡和真、佐藤綾桂、村上祐貴、鉄筋腐食により損傷を受けた RC 部材のコンクリートの拘束度の評価、土木学会関東支部第 38 回技術研究発表会、V-46、2011 年 3 月 11 日、法政大学、査読無し
- ② 番場俊介、長岡和真、村上 祐貴、鉄筋腐食を生じた RC 部材のかぶりコンクリートの拘束圧に関する解析的検討、土木学会関東支部第 38 回技術研究発表会、V-47、2011 年 3 月 11 日、法政大学、査読無し
- ③ 長岡和真、村上祐貴、鉄筋腐食を生じた鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究、第 28 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会、V 部門、pp.334-337、2010 年 11 月 25 日、ハイブ長岡、査読無し
- ④ 佐藤綾桂、村上祐貴、鉄筋腐食膨張圧がコンクリートの拘束効果に及ぼす影響、土木学会第 65 回年次学術講演会、V 部門、pp.391-392、2010 年 9 月 3 日、北海道大学、査読無し

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 祐貴 (MURAKAMI YUKI)

長岡工業高等専門学校・環境都市工学科・助教

研究者番号：70509166

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし