

論文 腐食ひび割れを有する鉄筋コンクリートプリズムの付着特性

宇田 好一郎^{*1}・HUSSEIN Nour-Allah^{*2}・Louis A. Darmawan^{*3}・佐藤 良一^{*4}

要旨： 載荷時にコンクリート部が引張応力を受けるように作製した鉄筋コンクリートプリズム供試体を電食させ、引抜き試験を行った。任意の腐食ひび割れ幅に対して、それぞれの付着強度、付着応力-すべり関係、付着応力-ひび割れ幅関係等を明らかにすると共に、付着特性に及ぼす影響を短期載荷試験により考察した。付着強度と腐食ひび割れ幅との間には、腐食電流密度の違いに拘わらず、高い相関関係が認められた。

キーワード： 鉄筋腐食, 付着破壊, 腐食ひび割れ, 耐久性, 腐食電流密度

1. はじめに

現在,コンクリート構造物性能照査体系への移行にむけ,耐久性に関する研究が盛んに行われている。鉄筋コンクリートにおける耐久性低下の主原因の一つとして鉄筋腐食があげられる。鉄筋腐食に関する研究はこれまでに数多く行われてきたが,現状では腐食ひび割れ発生を耐久性の限界とする見方がもっとも一般的である¹⁾。しかし,実際には腐食ひび割れを有している構造物が供用されており,腐食後の性能照査技術の確立に至っているとは言えない。

これまでも付着特性に及ぼす鉄筋腐食の影響を把握するためにコンクリートを圧縮場においた片引き試験が行われている^{例えば2)}。しかしいずれの場合もコンクリート部は圧縮応力場におかれており,実構造物では引張応力状態であることから,実現象を正確に表しているとは言えない。そこで,本研究では載荷時にコンクリート部が引張応力状態になるように作製した RC プリズム供試体を用いて,短期引抜き試験を行った。また過去に行われている研究では腐食程度を表すパラメータとして腐食重量減少率が用いられていたが,腐食ひび割れ幅を用いて比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1に示す 150×150×400mm の RC プリズム供試体を一種作製した。実験パラメータは腐食度であり,あわせて腐食電流密度の影響も評価した。鉄筋は断面中心(かぶり 67mm)に長手方向に独立して2本配し,それぞれの片側にネジ加工を施しもう片方を 85mm,塩ビ管を通すために加工した。それは摩擦が生じないように内側にグリスを塗布した塩ビ管を通じ,2本の鉄筋を連結することにより,鉄筋軸を一軸に保つためである。腐食区間は短い方の鉄筋に 64mm(最低付着長 4×D)設けた。載荷端での劣化域の影響を取り除くために,コンクリート界面から 16mm(1×D)を非付着区間とし,ビニルテープにより付着を絶った。

また打設の際,ブリージングによって生じる鉄筋周りの空隙の影響を最小限に抑えるため,鉄筋リブをコンクリート投入方向に順に並ぶように配置した。ブリージング水,レイタンス等が節の間に留まり,欠陥部となるのを妨げられると考えられる。

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し,水セメント比は 60%を採用した。コンクリートの示方配合を表-1に示す。粗骨材には,最大

*1 広島大学 工学部第四類 (正会員)

*2 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻 工修 (正会員)

*3 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻

*4 広島大学 大学院工学研究科 社会環境システム専攻教授 工博 (正会員)

表－1 コンクリート示方配合

最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 a
20	10±2.5	4.5±1	180	300	790	1015	0.15

寸法 20mm, 比重 2.74, 粗粒率 6.35 の広島産ホルンフェルス砕石を, 細骨材には比重 2.66, 粗粒率 2.88 の同じくホルンフェルス砕砂を使用した。

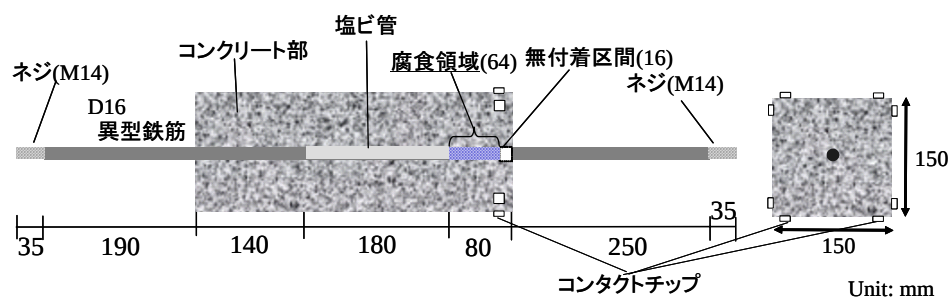
鉄筋は SD295A, D16 を用い, 不動態皮膜の厚さの影響を排除するために, 10%塩酸に約 30 分間浸漬し, 不動態皮膜を取り除いた。鉄筋の化学成分はそれぞれ, 炭素 0.19%, ケイ素 0.12%, マンガン 0.52%, リン 0.028%, 硫黄 0.039% であった。

コンクリート打設後 24 時間経過してから脱型し, 温度 20℃, 湿度 100% の養生室にて 28 日間気中養生を行った。同一環境における材齢 28 日のコンクリートの圧縮強度は 36.0N/mm², 引張強度は 3.29N/mm², ヤング係数は 30.0kN/mm² であった。28 日経過後電食試験までのおよそ 135~215 日間, 供試体は海水相当 3%NaCl 水溶液中に浸漬し, コンクリートを飽水状態に保った。電食は 1~2 週間行い 2, 3 日十分乾燥させた後, 載荷を行った。載荷は材齢 151~231 日に順次行い, 材齢 218 日における圧縮強度は 32.2N/mm², 引張強度は 3.18N/mm², ヤング係数は 29.2kN/mm² であった。

2.2 促進腐食試験

腐食促進方法においては主として, 電食, 腐食促進環境に暴露, 塩水噴霧, 自然環境下に暴露等があげられるが, 本研究では比較的早期に目的の腐食レベルが得られ, またそのコントロールも容易である電食試験法を採用した。

電食試験装置の概要を図－2 に示す。容器に海水相当 3%NaCl 水溶液を満し, RC プリズム供試体を浸漬する。金属板で作製したリングをカソード, 鉄筋をアノードとし直流安定化電源装

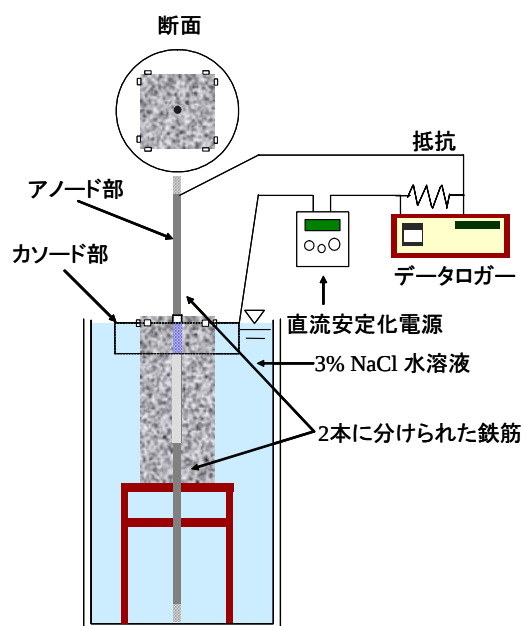


図－1 RC プリズム供試体

置にて腐食電流密度 1000 μ A/cm² 相当 30mA の一定電流を印加した。また, 腐食電流密度 4000 μ A/cm² の研究³⁾と比較した。その間, それぞれの電流電圧を一定間隔でデータロガーを用いて測定した。同時に平行して, コンタクトゲージ(精度 1/1000mm)を用いて鉄筋腐食による軸方向ひび割れ幅を測定した。腐食度は腐食電流印加時間にて制御し, 所要の腐食ひび割れ幅を得られたものから載荷試験を行った。

2.3 載荷試験

本研究にて使用された載荷試験装置の概要を図－3 に示す。2 重錘てこ式引張クリープ試験機を使用して変位制御で載荷を行った。供試体は腐食ゾーンを上方に配置し, 載荷フレームに固定されたアームと下端のスクリージャッキとの間にカップラーを用いて固定されている。供試体上方に接続された鋼製プレートに固定した高感度変位計を用いてすべり量を測定した。すべり量測定位置は図に示されるとおり, 鉄筋から各 5mm 離れた鉄筋近傍(In と記す)とコンクリートエッジから同じく 5mm つまり, 鉄筋表面から 62mm の位置(Out と記す)である。また, 荷重と共に拡大するひび割れ幅を, 図－1 に示すコンタクトチップの位置に, パイ型変位計を取り付けて測定した。付着応力は以下に表される平均付着応力を用いた。



図－2 電食試験装置

$$\tau_b = \frac{P}{u \cdot l} \quad (1)$$

ここで P は荷重, u は鉄筋の公称周長, l は付着長である。

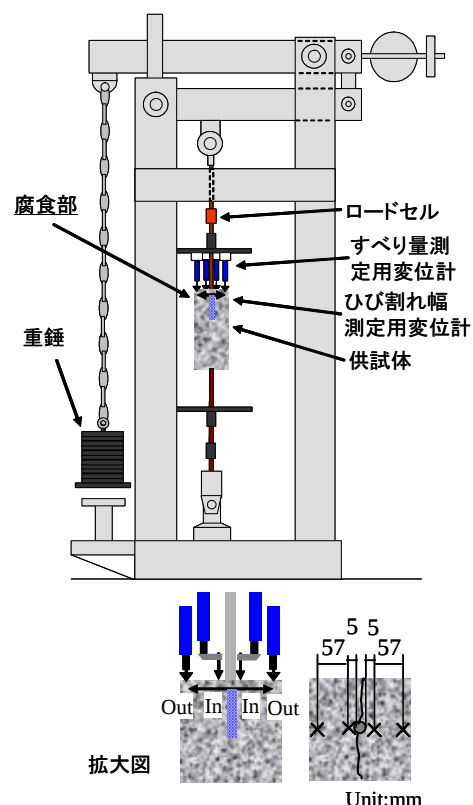
載荷試験後,供試体から腐食鉄筋を取り出し腐食度を測定した。本研究では腐食重量減少率を用いて評価した。供試体から取り出した腐食鉄筋を 10%クエン酸二アンモニウム水溶液(常温)に約 1 日間浸漬し腐食生成物を取り除いた。その後,腐食区間を切り出し,旋盤にて鉄筋断面を平面に仕上げ,アセトンにより脱脂した後重量を測定した。腐食量は,鉄筋節の配置の相違による影響を除するため,同じ節配置となるようにカットした無腐食鉄筋と比較することにより求めた。

3. 実験結果

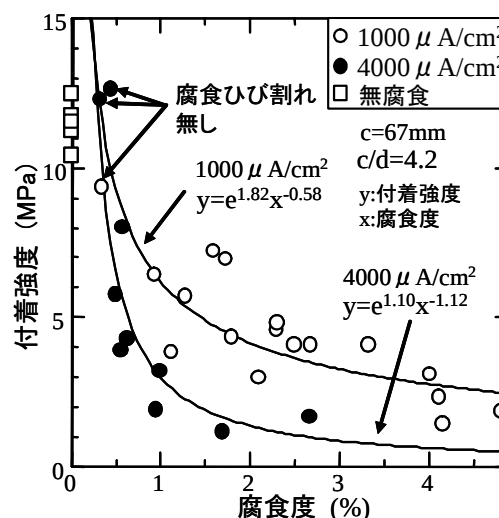
3.1 付着強度に及ぼす腐食の影響

まず付着強度－腐食度関係を近似曲線とともに図－4に示す。腐食度の上昇と共に付着強度の低下が見られ,既往の研究²⁾と一致している。

腐食電流密度 $4000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ における結果³⁾では,腐食度 0.5%前後で急激な付着強度の低下が見られる。また $1000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ も同様の傾向であるが,低下の程度は小さい。これら腐食度 0.5%前後に存在する 3つの供試体はいずれも腐食ひび



図－3 引抜き試験装置及び変位計測定位置



図－4 付着強度－腐食度関係

割れを有さず,それ以上ではすべて腐食ひび割れを有していた。また, $1000 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ におけるばらつきは後にも説明するが,ひび割れ本数の違い等によるものであると思われる。

本電食試験においては,大まかに 2 種類のひび割れパターンであった。一つは 2 本の腐食ひび割れが鉄筋に対し対面に発生したものであり(図－5),もう一つは腐食ひび割れを 3 本有するものであった(図－6)。3 本生じた場合の腐食ひび

割れの詳細を表－２に示す。この場合１本の卓越したひび割れ幅と、残り２本のひび割れ幅の和がすべての供試体において、ほぼ同じ値を示した。付着強度の低下は、鉄筋周辺コンクリートの拘束力の低下、すなわち総腐食ひび割れ幅に依存すると考えられるが、ひび割れ本数によらず統一的に評価し、かつ、上記したように、主たるひび割れの幅にほぼ等しいことから、付着強度低下の指標として、次式で定義する平均的な腐食ひび割れ幅を以下に用いることとした。

$$w_{corr,av} = \sum w_{corr} / 2 \quad (2)$$

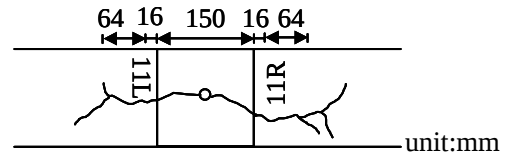
ここで $w_{corr,av}$ は平均腐食ひび割れ幅、 w_{corr} はそれぞれの腐食ひび割れ幅である。

上式の平均腐食ひび割れ幅を用いて、付着強度に及ぼす鉄筋腐食の影響を $4000 \mu A/cm^2$ の結果³⁾もあわせて図－７に示す。図中の近似曲線でもわかるように、平均腐食ひび割れ幅と付着強度の間には、腐食電流密度及び腐食ひび割れ本数による影響は認められず、付着強度はひび割れの拡大とともに対数関数的に減少しているといえる。

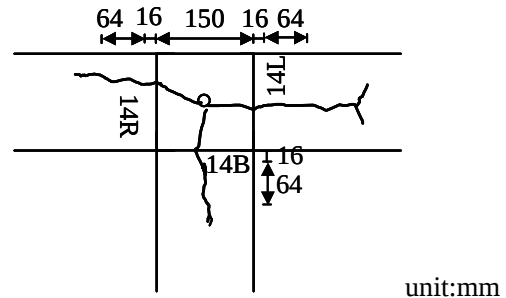
3.2 平均腐食ひび割れ幅－腐食度関係

腐食電流密度の違い、ひび割れ本数によってそれぞれ分類して腐食度と平均腐食ひび割れ幅の関係を図－８に示す。図中の曲線は分布の傾向を示した近似曲線である。田森ら⁴⁾によると腐食ひび割れ発生時の腐食量にはある値が存在し、腐食ひび割れ幅と腐食量には相関関係があると指摘されている。本実験の場合、実測腐食量から腐食度を算出しているが、腐食度の低い部分では多少のばらつきが認められたが、それぞれの腐食電流密度において比較的高い相関が認められる。

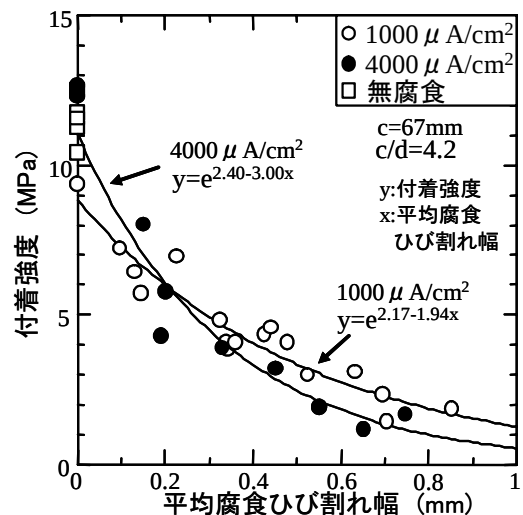
腐食電流密度の影響については、腐食度が同じでも $1000 \mu A/cm^2$ の方が平均腐食ひび割れ幅が小さく、同じく付着強度は大きかった。この理由として腐食電流密度が小さい場合、腐食生成物の生成速度が遅く、そのため細孔中に侵入しやすく、その結果膨張圧も低下したためと考えられる⁵⁾。以上のことは腐食電流密度が低いほどひび割れ発生に必要な腐食量が多いという過去



図－５ 腐食ひび割れパターン(2本)



図－６ 腐食ひび割れパターン(3本)



図－７ 付着強度－平均腐食ひび割れ幅関係

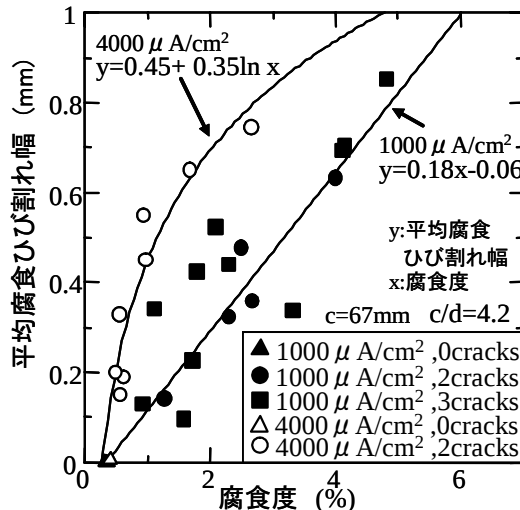
の研究⁵⁾と整合性が取れる。またひび割れ後のひび割れ界面を比較すると、 $4000 \mu A/cm^2$ のものに比べ $1000 \mu A/cm^2$ の方がコンクリートに付着している腐食生成物の量が明らかに多かったことは、これと対応する結果と思われる。したがって、同じ腐食ひび割れ幅であっても、自然腐食では、より多くの腐食度であると思われる。

3.3 付着応力－すべり関係

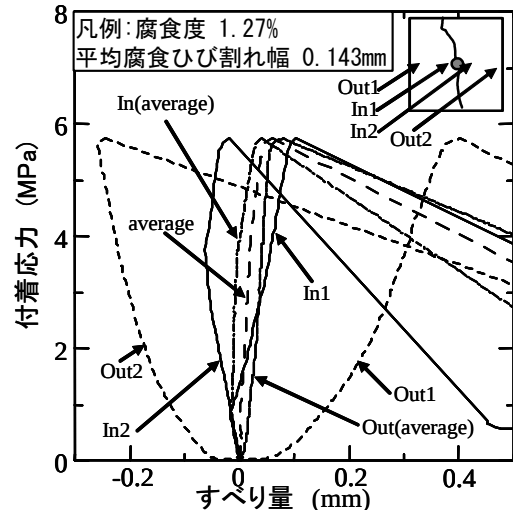
例として腐食ひび割れを２本有する場合の付着応力－すべり関係を図－９に示す。In(average), Out(average) はそれぞれ In1 と In2, Out1 と Out2 の平均、average は In(average), Out(average)の平均である。この図に示されているように、腐食ひび割れが生じている

表－２ 供試体詳細(ひび割れ３本)

供試体名	腐食ひび割れ幅(mm)				付着強度 (MPa)	腐食度
	最大	2本(小1、小2) の和	小1	小2		
42	0.723	0.666	0.106	0.560	2.340	4.11%
40	0.114	0.146	0.076	0.070	6.449	0.92%
25	0.325	0.349	0.149	0.200	4.087	3.32%
22	0.098	0.095	0.057	0.038	7.247	1.58%
14	0.443	0.436	0.279	0.157	4.600	2.29%
12	0.321	0.362	0.085	0.277	3.856	1.11%



図－８ 平均腐食ひび割れ幅－腐食度関係



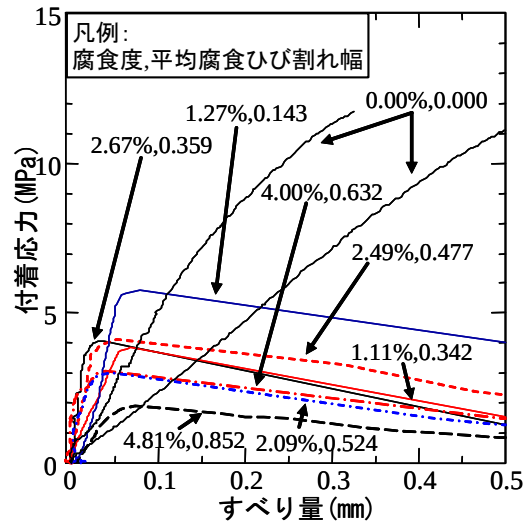
図－９ 付着応力－すべり関係(一例)

ことも手伝って、すべり量は大きくばらつく。これは節のかみあいが高ブロックで異なることが考えられるが、特にピーク後は高ブロックの一体化が薄れ大きくなる。

付着応力とコンクリートエッジ部にて測定された平均すべり量との関係を腐食ひび割れ幅と関係付けて図－10 に示す。腐食ひび割れを有するため応力の低い段階で値のばらつきが見られるが、腐食の程度に依存しつつも、ひび割れ後も剛性を有していること、さらにピーク付着応力に達した後も急激に応力は低下することなく徐々に低下していることが認められる。これは、後述するように、ひび割れ幅が横節高さより小さいとかみあいが起こり、これにより耐荷機構が形成されていると思われる。よって、スターラップにより拘束される場合は、さらに優れた付着性能を有することは容易に推定できる。

3.4 付着応力－ひび割れ幅関係

破壊に至るまでの全体的な付着応力－ひび割



図－10 付着応力－すべり関係

れ幅関係を図－11 に示す。平均ひび割れ幅は平均腐食ひび割れ幅と載荷に伴うひび割れ幅の和であり、後者は載荷に伴い拡大するひび割れ幅増加量であり、付着応力との関係を図－12 に示す。

付着強度は先にも述べたように、ひび割れ幅に依存して異なる。このひび割れ幅の影響は軟化

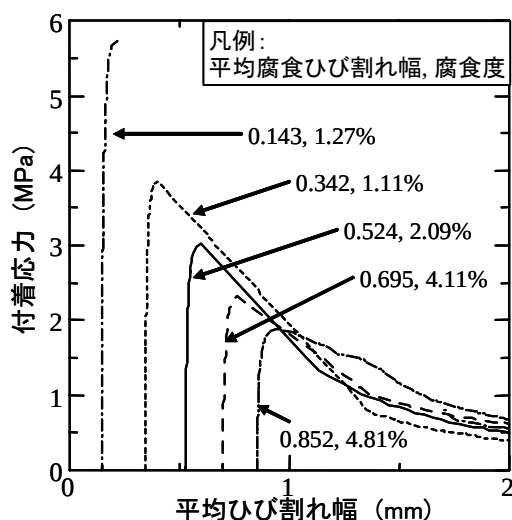


図-11 付着応力-平均ひび割れ幅関係

域にも見られ、腐食度および腐食ひび割れ幅が異なるにも拘らず、同一のひび割れ幅では、ほぼ同一の付着応力を示し、ひび割れ幅は付着特性に強い影響をもたらすことがわかる。载荷に伴うひび割れ幅は、詳細に見れば、図-12 に示すように腐食ひび割れ幅によって異なり、徐々に増大しながらピーク応力に達し、その後軟化しながら破壊するのが認められる。

4. 結論

本研究の範囲で、以下のような結論を得た。

- (1) 付着強度-腐食度の関係は腐食電流密度の影響を受ける。しかし、付着強度-平均腐食ひび割れ幅関係には腐食電流密度の影響は大きくない。
- (2) 腐食ひび割れを有する場合、付着応力-すべり関係は特にすべりが小さい段階の値にばらつきがあるが、腐食の程度に依存しつつも、ひび割れ後も剛性を有していること、さらにピーク付着応力に達した後も急激に応力は低下することなく徐々に低下する。これは、横節のかみあい効果と考えられ、スターラップがあるとさらに効果的になると考えられる。
- (3) 载荷に伴うひび割れ幅増加量は、腐食ひび割れ幅によって異なり、徐々に増大しながら、ピーク応力に達する。しかし、軟化域の

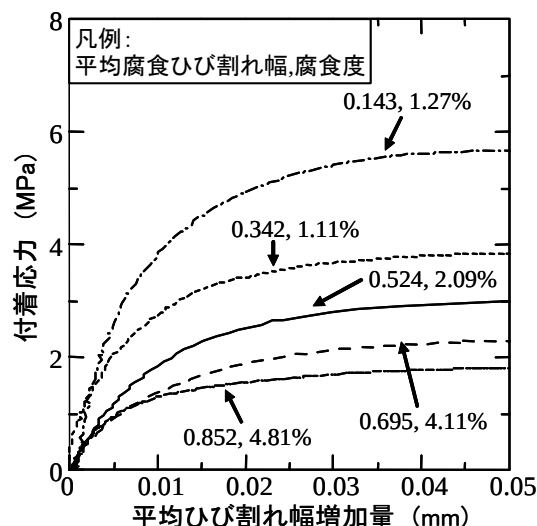


図-12 付着応力-平均ひび割れ幅増加量関係

付着応力は腐食ひび割れ幅を含む全平均ひび割れ幅に依存して低下する。

- (4) 以上より、付着性状に及ぼす鉄筋腐食の影響を見る上で、腐食ひび割れ幅で評価するのが有効である。

謝辞 本研究は中国電力技術研究財団の助成により実施したもので、謝意を表する。

参考文献

- 1) 森川 雅行ら：鉄筋の腐食膨張によるひび割れの発生機構に関する基礎的研究，土木学会論文集，第 378 号，V-6，pp.97-105，1987.2
- 2) 佐々木 淳ら：鉄筋の発錆が付着性状に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.13，No.2，pp.139-144，1991
- 3) Nour-Allah HUSSEIN et al. : Experimental Study on Corrosion Effect on Time Dependence of Bond : コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.985-990，2003
- 4) 田森 清美ら：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ性状に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，No.2，pp.505-510，1988
- 5) Task Group Bond Models : Bond of reinforcement in concrete bulletin 10, fib, p.191, Aug 2000