

論文 両引き試験による鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着特性の評価

金 螢来^{*1}・長井 宏憲^{*2}・野口 貴文^{*3}

要旨: コンクリート中における不均一な鉄筋腐食のパターンを考慮した一軸引張試験体に対する両引き試験を行い、部位ごとの鉄筋の腐食程度に応じた腐食ひび割れおよび引張荷重による横ひび割れの発生、鉄筋とコンクリートとの平均応力ひずみ関係を把握した。また、実験結果に基づき、ひび割れ面における付着強度と鉄筋腐食率との関係を求め、ひび割れ幅から算出したひび割れ面におけるすべりと鉄筋腐食率との関係を用いた有限要素法による逆解析を行い、せん断剛性と鉄筋腐食率との関係を導くことによって、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着要素の構成則を提案した。

キーワード: 鉄筋腐食, 両引き試験, 付着応力, すべり, せん断剛性

1. はじめに

有限要素法によって鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の耐力を解析する際、鉄筋とコンクリートとの付着要素のモデル化方法としては、接合要素をコンクリート要素と鉄筋要素の境界面に挿入させる方法があり、付着要素の物性である付着強度と付着せん断弾性係数を実験によって求めるのが通常である。有限要素解析で用いる付着要素の構成則を得るために、既往の研究においては、鉄筋が腐食していない健全試験体と同様に、鉄筋が腐食した試験体に対しても引抜き試験により、腐食鉄筋とコンクリートとの付着応力-すべり関係が求められ、様々なモデル式が提案されてきた。しかし、引抜き試験によって鉄筋とコンクリートとの付着特性を評価することは、鉄筋コンクリート部材、特に引張側の主鉄筋が腐食した梁部材の場合、部材の中央部における鉄筋とコンクリートとの付着状況を十分に反映できず、実際より過酷な実験条件になることが予想される。その問題点を考慮し、両引き試験による鉄筋とコンクリートとの付着特性を把握するための研究が行われているが^{1), 2), 3)}、まだ十分ではなく、鉄筋の腐食程度分布や腐食区間などの影響を考慮した研究例はほとんどない。

そこで、本研究では鉄筋の腐食程度分布及び腐食区間などが鉄筋とコンクリートとの付着特性に与える影響を把握し、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の有限要素解析において用いられる付着要素の構成則を提案することを目的とする。そのために、まず、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの一軸引張試験体に対する両引き試験を行い、コンクリートの応力分担による引張剛性効果を把握し、腐食形態に応じたひび割れの分散効果およびひび割れ幅の変化を検討した。また、腐食程度分布に応じた付着応力およびすべりの特性の検討を行い、鉄

筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着要素の構成則を導いた。

2. 実験

2.1 実験の概要

(1) 実験因子および水準

実験因子としては表-1 に示すようにコンクリート中における鉄筋の腐食部位および腐食程度とした。まず、鉄筋の腐食部位においては、鉄筋コンクリート部材における鉄筋腐食区間の長さや腐食発生部位に応じた鉄筋とコンクリートとの付着特性の変化を検討した。

表-1 実験の因子と水準

実験因子	実験水準	水準数
鉄筋腐食の部位	全区間腐食 (A) 半分区間腐食 (H) 中央部局部腐食 (C) 側部局部腐食 (S)	4
鉄筋腐食の程度 (腐食区間のみの腐食 減量率の平均値)	3% 5% 10%	3

腐食区間としては、図-1 に示すように 70cm 区間に渡る全面腐食(A, All Corrosion)、試験体の長さの片側半分のみを腐食させる半分区間腐食(H, Half Local Corrosion)、試験体中央部の 20cm 程度の局部区間のみを腐食させる中央部局部腐食(C, Center Local Corrosion)、片側部における 20cm 程度の局部区間のみを腐食させる側部局部腐食(S, Side Local Corrosion)などの四つの腐食区間を設定し、鉄筋を腐食させない健全試験体と比較した。そして、鉄筋の腐食程度は腐食区間のみの平均値で 3%、5%、10%の腐食減量率が得られることを目安とした。

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻卒, 現代建設(株) 次長 博 (工) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 助教 博 (工) (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 准教授 博 (工) (正会員)

表-2 コンクリートの調合および力学的特性

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)			AE 減水剤	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	
			水	セメント	砂				砂利
普通	55	46.0	170	309	837	1005	C×0.4%	34.5	27.2

表-3 健全鉄筋の物理的特性

鉄筋種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	伸び (%)
D13	325	444	196000	21.3

(2) 使用材料および試験体製作

表-2 には両引き試験体の製作に用いたコンクリートの調合および力学的特性を表した。鉄筋は SD295 A の D13 であり、物理的特性を表-3 に示す。

両引き試験体は一辺が 100mm の正方形断面を持つ 800mm 長さのコンクリートの中心部に長さ 1,000mm の鉄筋を一本埋め込んだ一軸引張試験体として、その形状を図-1 に示す。

(3) 試験方法

コンクリート中における鉄筋腐食においては、コンクリート打設面を下にして図-2 に示すように上面にプールを作り、その中に銅板を入れて鉄筋と銅板との間に 1mA/cm² の電流を流した。コンクリート上部のプールは、塩水溶液がコンクリートの表面から内部へ浸み込んで影響範囲が広がることを考慮して設けた。

また、鉄筋が腐食するため、コンクリート中に埋め込んだ鉄筋の部位ごとのひずみ分布を測定できないので、図-3 に示すようにコンクリート両端の変位を測定するとともに、部分的なひずみを測定した。また、コンクリートのひび割れの発生状況を把握することを目的とし

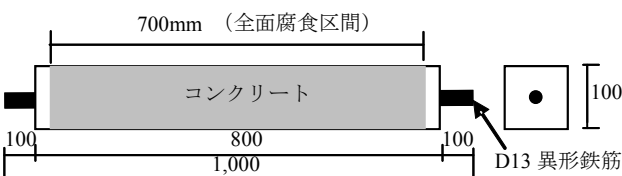


図-1 両引き試験体

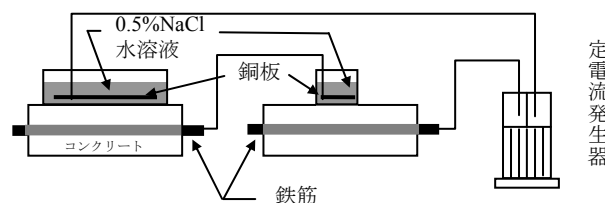


図-2 電気腐食試験

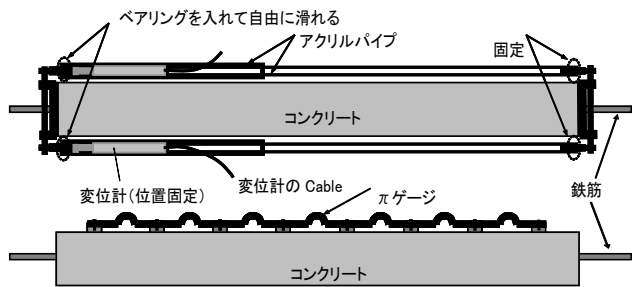


図-3 試験体の変位測定方法

て、 π ゲージをコンクリートの表面に貼り付けた。一方、試験体の全長の変位を測定するためには、コンクリートの両端にアルミニウムチャンネルを固定し、その間にかけたアクリルパイプの中に変位計を入れて固定した。

2.2 実験結果および考察

(1) 鉄筋腐食およびひび割れ発生

鉄筋を腐食させた試験体の部位ごとの腐食減量率の分布を図-4~図-6 に示す。また、鉄筋からコンクリートへの応力が伝達されることによってコンクリートに

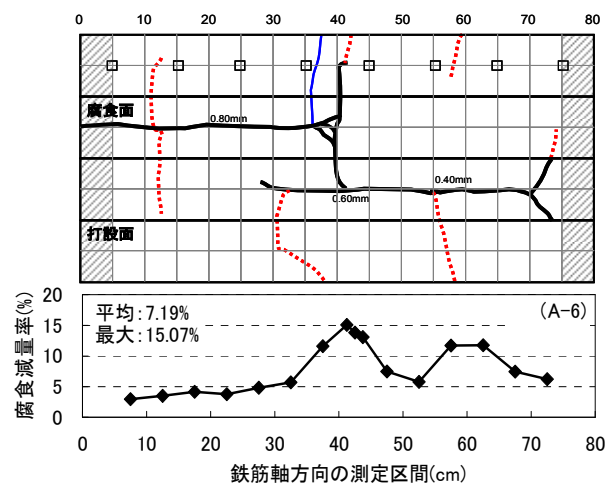


図-4 全面腐食試験体の腐食分布及びひび割れ (A-6)

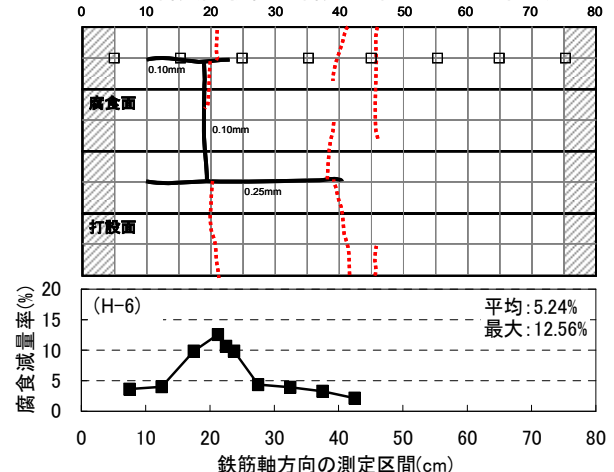


図-5 半分腐食試験体の腐食分布及びひび割れ (H-6)

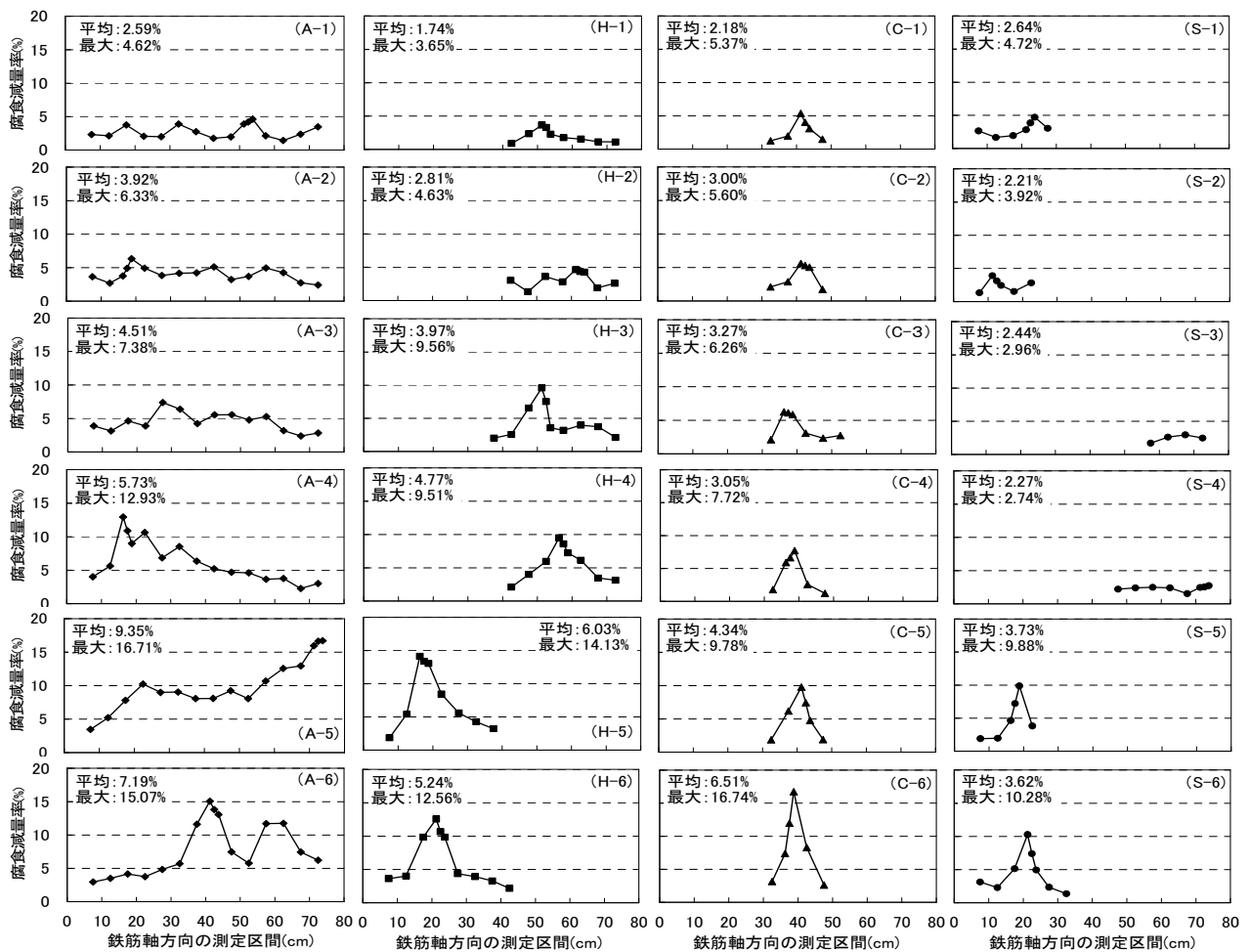


図-6 鉄筋が腐食した両引き試験体の部位ごとの鉄筋腐食率の分布

生じたひび割れの発生状況を図-4と図-5に示す。

本実験では、腐食減量率が2.04%を超えない限り、鉄筋腐食により鉄筋に沿った腐食ひび割れは発生しなかった。また、コンクリートの一面から腐食電流を印加したので、腐食ひび割れは電流印加面のみ、または、電流印加面と側面の両面に発生した試験体が多かった。

全面腐食の場合、試験体の全長にわたって軸方向のひび割れが生じ、腐食減量率が高いほど横方向のひび割れが生じた場合も多い。半分腐食の場合は同程度の腐食減量率でも腐食により生じたひび割れの幅が全面腐食よりは小さくなった。中央部の局部腐食および片側部の局部腐食の場合には、軸方向の腐食ひび割れよりは横方向の腐食ひび割れの方が多かった。これは鉄筋が腐食した区間が短く、かぶりコンクリートが厚くないので、局所的に鉄筋腐食程度が高い部分を中心として軸方向の膨張力が生じたことに起因すると推測される。

図-7に試験体の全長にわたる鉄筋の腐食減量率の平均値と両引き試験で生じたひび割れ本数との関係を示す。鉄筋が腐食していない試験体の場合、3本の引張ひび割れが生じ、一般的に鉄筋の腐食減量率の平均値が大きくなると引張ひび割れの本数は減ることが確認され、鉄

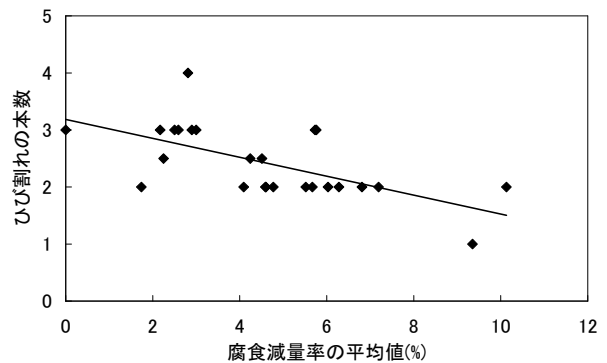


図-7 鉄筋腐食率と引張ひび割れとの関係

筋腐食によるひび割れの分散性が悪くなる結果が得られた。一方、本研究では試験体の長さが80cmと長くないので、引張ひび割れの発生に対し、事前に生じた横方向の腐食ひび割れの影響が大きいことが予想された。

(2) コンクリートの引張剛性効果

図-8に鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート両引き試験体の引張荷重と平均ひずみの関係および鉄筋とコンクリートとの付着により生じるコンクリートの引張剛性効果から求められたコンクリートの平均応力と平均ひずみとの関係を示す。

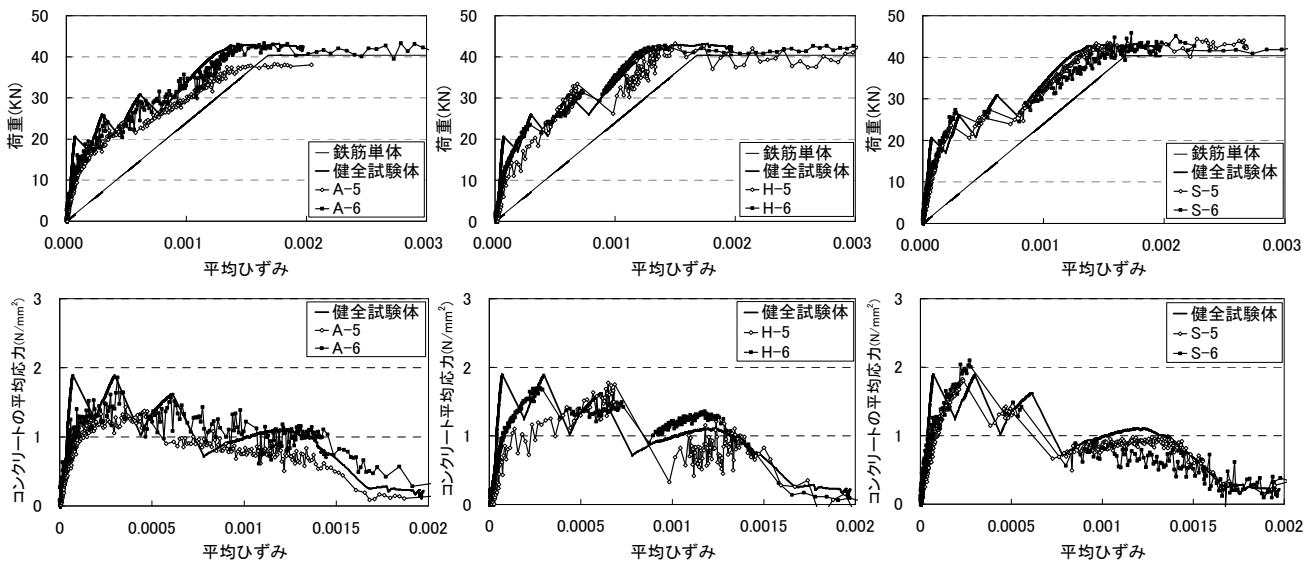


図-8 鉄筋腐食によるコンクリートの引張剛性効果の低下

全面腐食の場合、A-5 および A-6 のように鉄筋腐食に伴う横方向のひび割れが生じた試験体では、引張ひび割れが生じるまでの最初の剛性が低くなり、コンクリートのひび割れ発生応力を表す最初のピークがなくなる形となった。また、全般的に、ひずみ 0.002 におけるコンクリートの残存応力は、鉄筋の腐食程度が大きくなるほど減少する傾向が現れるが、その差は大きくない。また、鉄筋の腐食程度が大きくなるほど応力によって生じるひび割れの本数が少なくなり、鉄筋腐食により発生した横方向ひび割れの周辺でのすべりが増加するため、引張力により生じる新しいひび割れの発生瞬間の変位が小さくなった。しかし、引張ひび割れの発生後には縦方向ひび割れに起因する鉄筋とコンクリート間のすべりの影響で、全般的には鉄筋の腐食程度が大きいほど同一な応力時の平均ひずみが大きくなった。

鉄筋の片側半分のみを腐食させた場合、H-5 のようにコンクリートに腐食ひび割れが生じると、鉄筋腐食程度の増加によってコンクリートの引張剛性増強効果（テンションスティフニング効果）が急に減少することが確認できる。中央部局部腐食の場合と側部局部腐食の場合、荷重と平均ひずみの関係およびコンクリートが分担する応力と平均ひずみの関係に示されるように、鉄筋の腐食程度に応じた付着力が損なわれることによって、コンクリートの引張剛性増強効果も減少することが確認された。しかし、全面腐食や半分腐食の場合に比べて、健全全部位の応力分担程度が大きいことが分かる。

一般的に、鉄筋コンクリート部材において、引張力による横方向のひび割れが生じると、ひび割れ部分における鉄筋のひずみは増加するが、鉄筋が腐食している場合にはそのひずみの増加量はさらに大きくなることが分かる。

その理由としては、鉄筋腐食による付着力の損失だけでなく、鉄筋自体の腐食による断面減少にも関係があるためであり、そのことよりひび割れ発生後のコンクリートの分担応力は鉄筋が腐食しても大きく低下しないことが分かる。ただし、周囲に比べて局部腐食程度が卓越した場合にはコンクリートの引張剛性増強効果の減少が著しい。

(3) 付着応力とすべり

コンクリート中における鉄筋が腐食すると鉄筋周囲に腐食生成物が堆積し、膨張によってコンクリートにひび割れが生じて鉄筋とコンクリートとの付着が劣化し、すべりが発生する⁴⁾。一方、板ボンド要素を使う有限要素解析で用いる鉄筋とコンクリートとの付着要素の構成則は、付着強度とせん断剛性で表現でき⁵⁾、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着要素の構成則を求めるためには、鉄筋の腐食率と付着強度およびすべりとの関係を定式化することが必要である。

本研究では、鉄筋とコンクリート間の付着力とコンクリートにひび割れが生じる際の引張力との力の平衡条件より付着応力を求めることとした。すなわち、引張力によって鉄筋周囲のコンクリートにひび割れが生じると、図-9 に示すように、生じる鉄筋とコンクリートの応力分布が部位ごとに異なる。鉄筋とコンクリート間の

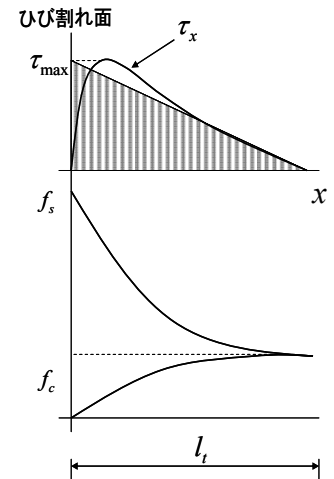


図-9 付着応力の分布

引張ひずみの違いによって付着応力が発生するため、付着応力は鉄筋周囲のコンクリートにおける横方向ひび割れの発生荷重に対し、式(1)のように表現することができる。

$$A_c \sigma_{ct} = \pi d_b \int_0^{l_t} \tau_x dx \quad (1)$$

A_c : コンクリートの断面積、 d_b : 鉄筋の直径
 σ_{ct} : コンクリートの引張強度(ひび割れ発生時)
 τ_x : 付着伝達区間における鉄筋とコンクリートとのひずみ差がゼロである中央支点からひび割れ方向へのある位置における付着応力
 l_t : 付着伝達区間の長さ

また、この力の平衡関係を図-9に示すように簡単な線形分布で近似させれば、次の式(2)および式(3)の変換によって付着強度が求められる⁶⁾。

$$A_c \sigma_{ct} = \frac{1}{2} \pi d_b l_t \tau_{\max} \quad (2)$$

$$\tau_{\max} = \frac{2(N+1)A_c \sigma_{ct}}{\pi L} \quad (3)$$

τ_{\max} : 付着強度、 r : 鉄筋の半径、 L : 部材の長さ
 N : 部材に生じた引張ひび割れの本数

本研究の鉄筋コンクリート試験体を用いた鉄筋腐食実験および両引き試験を通じて求めた鉄筋の腐食減量率と付着強度の関係を図-10に示す。また、鉄筋の腐食減量率と付着強度との関係から導いた付着強度の算定式は次の式(4)のとおりである。

$$\tau_{c,\max} = \tau_{s,\max} (1.306e^{-0.0948\Delta W}) \quad (4)$$

$\tau_{c,\max}$: 腐食鉄筋の付着強度(N/mm²)
 $\tau_{s,\max}$: 健全鉄筋の付着強度(N/mm²)
 ΔW : 鉄筋の平均腐食減量率(%), $\Delta W \geq 2.04$ (%)

一方、引張力による鉄筋とコンクリート間の部位ごとのひずみ差より計算できるすべりは、ひび割れ間のコ

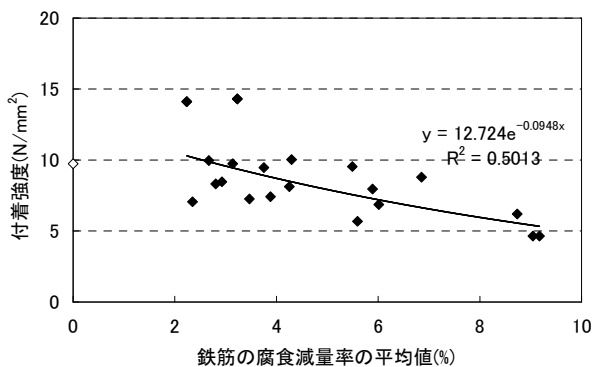


図-10 鉄筋腐食率と付着強度との関係

ンクリートの表面ひずみの変化がほぼ無視できることを考慮すると、コンクリートに生じるひび割れ幅から近似的に求めることができる。CEB-FIP MODEL CODE 1990(MC-90)⁷⁾で定めている式(5)の最大ひび割れ幅の予測式から、鉄筋コンクリートにおける鉄筋とコンクリート間のすべりは最大ひび割れ幅の1/2となることがわかる。したがって、式(5)におけるひび割れの間隔(s_r)と最大ひび割れ幅(W_{\max})の関係は式(6)のように変換できる。

$$W_{\max} = s_r (\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{cm}) \quad (l_t \leq s_r \leq 2l_t) \quad (5)$$

$$S(x) = l_t (\varepsilon_s - \varepsilon_c) = \frac{1}{2} s_r (\varepsilon_s - \varepsilon_c) = \frac{W}{2} \quad (6)$$

W : ひび割れ幅

$S(x)$: 一軸引張荷重を受ける鉄筋コンクリートにおける鉄筋とコンクリート間で生じる最大すべり(ひび割れ面でのすべり)の平均値、本研究では荷重30kNにおける変位から求めた。

鉄筋が腐食した場合について、式(6)より求めたすべりと鉄筋の腐食減量率との関係を図-11に示す。鉄筋の腐食程度が大きくなることによって鉄筋とコンクリート間の部位ごとのひずみ差、すなわち、すべりは大きくなる結果が得られた。

3. 有限要素解析

3.1 有限要素解析の概要および要素分割

本研究では鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート試験体の両引き試験を通じて得られた実験結果から鉄筋の腐食減量率と付着強度との関係および腐食減量率とすべりとの関係を求めた。鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の有限要素解析において、板ボンド要素による付着要素は、付着応力とせん断剛性で表現される。一方、有限要素解析におけるせん断剛性(Ds)は、すべりと付着要素の厚さ(t)との関係から求められるせん断ひずみ(γ)と付着応力との関係から式(7)のように計算できる。

$$\gamma = \frac{S}{t}, \quad \tau_{\max} = Ds \cdot \gamma \quad (7)$$

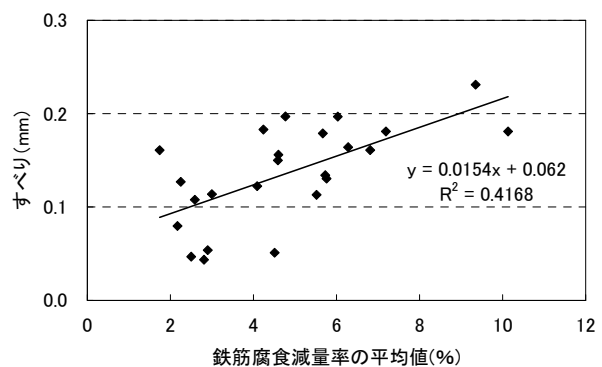


図-11 鉄筋腐食率とすべりとの関係

そこで、本解析では付着要素の厚さを0.1mmとし、両引き試験を通じて得られた付着応力とすべりの関係よりせん断剛性を算出し、そのデータを用いて有限要素解析を行った。ただし、実験で求めたすべりは、一つの鉄筋コンクリート試験体に生じた数個の引張ひび割れの幅から平均的に算出されたものである。したがって、解析結果が実験結果に近似できるように逆解析を行い、10cm 間隔の鉄筋腐食減量率の平均値に応じたせん断剛性を求めた。

有限要素解析は2次元弾塑性有限要素法によって行った。付着要素としては4節点アイソパラメトリック板ボンド要素を用い、コンクリート要素は等方性材料で4節点アイソパラメトリック平面応力要素を用いた。コンクリートのひび割れに対しては分散ひび割れ手法を用いた。ひび割れの発生後のひび割れ直交方向の残留特性はひずみ依存型を適用した。鉄筋はトラス要素で表現し、降伏条件としては Von Mises の降伏条件式⁹⁾を用いた。軸方向の要素の大きさは2.5cm、横方向のコンクリート要素の大きさは1cmとした。材料要素の基礎物性は実験で使われたコンクリートと鉄筋の物性値を使用した。

3.2 有限要素解析の結果

解析においては、実験での荷重-平均ひずみ曲線に近似させ、区間ごとの鉄筋腐食程度によって異なるせん断剛性を求めた。また、解析結果が実験結果をよく再現できる付着要素のモデルは、同時解放型の剛性と定数型の応力で表現できるバイリニア形であり、健全試験体と鉄筋が腐食した試験体とも同じモデルを適用できると判断される。すなわち、鉄筋が腐食した鉄筋コンクリートの付着要素は、鉄筋の腐食程度に応じた付着応力およびせん断剛性の低下で表現し、解析することができる。両引き試験の有限要素法による逆解析を通じて求めた鉄筋の腐食程度とせん断剛性との関係を図-12に示す。

4. まとめ

腐食鉄筋とコンクリートとの付着要素の構成則を導出するための実験を行った結果、下記の知見が得られた。

- (1) 両引き試験において、鉄筋の腐食減量率が大きいほど、引張ひび割れの本数が少なくなり、鉄筋の腐食によるひび割れの分散性が悪くなった。
- (2) 鉄筋の腐食によるコンクリートの引張剛性の低下は、腐食させた区間が長いほど大きくなる傾向があり、鉄筋が腐食してもコンクリートにひび割れが生じてない場合および局部区間における腐食率が5%未満の場合には健全試験体と同等、または、それ以上の引張剛性が得られた。しかし、局部区間での鉄筋腐食の場合にも局部での最大腐食率が10%以上で、局部的に卓越した場合には引張剛性の減少が著しくなった。

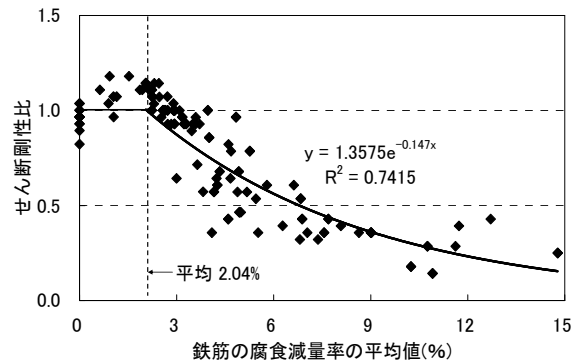


図-12 鉄筋腐食重量減少率とせん断剛性との関係

(3) 付着強度は、ひび割れ安定化段階におけるひび割れ間の付着力分布を線形に近似し、ひび割れ発生時の引張力と付着力との平衡条件から求め、付着伝達区間における鉄筋腐食率の平均値との関係で定式化した。

(4) 付着せん断剛性は、平均ひび割れ幅から求めたすべりと腐食率の関係を用いて両引き付着試験を有限要素解析し、逆解析を通じて付着せん断剛性を求めて付着伝達区間での鉄筋腐食率の平均値との関係で定式化した。

謝辞：本研究は、「国土交通省・建設技術研究開発助成金」を受けて実施した。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 加藤絵万ほか：鉄筋とコンクリート間の付着性能に及ぼす鉄筋腐食の影響，港湾空港技術研究所資料，No.1044，17p.，2003年3月
- 2) 松尾洋ほか：鉄筋が腐食した鉄筋コンクリート部材の引張剛性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.1327-1332，2001
- 3) 吉村満ほか：鉄筋とコンクリート間の付着応力-すべり関係に及ぼす各種要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.613-618，2007
- 4) 青山敏幸ほか：塩害により鉄筋が腐食したRC部材の曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.883-888，1998
- 5) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991
- 6) 碓本大ほか：両引き試験による鉄筋腐食と付着強度の関係に関する研究，土木学会第60回年次学術講演会，pp.341-342，2005.9
- 7) CEB-FIP：CEB-FIP Model Code 1990，Committee Euro-International Du Beton，Paris，1991
- 8) 葉山益次郎：大学課程「塑性学と塑性加工」(第2版)，オーム社，1982