

論文 鉄筋が腐食した RC 部材の局所付着性状に関する研究

齋藤 祐哉^{*1}・大屋戸 理明^{*2}・金久保 利之^{*3}

要旨: 最終的にコンクリートの割裂により破壊する場合の、腐食鉄筋の局所付着性状を明らかにすることを目的とした引抜試験を行った。実験因子は試験体のかぶり厚さおよび腐食の程度であり、鉄筋は電食により腐食させた。加力は試験体が割裂する際、横方向への変位を拘束しないよう配慮し、鉄筋を単調に引抜くことで行った。実験の結果、鉄筋の質量減少率が7%程度までは最大付着応力の低下と質量減少率との対応関係が見られた。また、腐食により生じる内部ひび割れに着目し、割裂面に付着する鉄筋の錆汁を画像解析により読み取ることで最大付着応力の評価を試み、低下度合いの上限値を示した。

キーワード: 鉄筋腐食, 局所付着性状, 腐食ひび割れ, 割裂面

1. はじめに

現存する多くのコンクリート構造物は様々な劣化因子の影響によりなんらかの補修・補強を必要とする時代を迎えようとしている。今後は維持管理を見込んだライフサイクルコストの削減を考え、補修補強にかかる費用の急増を抑える必要がある。そのためには劣化の度合いに応じた適切な補修補強が必要であるが、様々な劣化因子による構造性能の低下を定量的に把握することは難しく、現在でもなお種々の検討がなされている。

鉄筋の腐食に伴う、鉄筋とコンクリートとの付着性状の変化を対象とした研究について概観すると¹⁾、鉄筋腐食により付着強度が増大する場合と減少する場合の両方が報告されている。これらは概ね鉄筋腐食の程度により相違し、腐食が軽微な場合は腐食生成物による体積膨張が鉄筋周囲に拘束圧を生じさせて強度の増大をもたらす、それ以上に腐食が進行すると周辺コンクリートのひび割れによって強度の低下をもたらすと考えられる。しかしながら、鉄筋の腐食に伴うコンクリートとの付着性状の評価については、対象部材の諸元(かぶり・鉄筋径・付着部の拘束条件その他)によってその影響が大きく異なり、現象解明は容易でない。特に、鉄筋腐食によってかぶりコンクリートにひび割れが発生し、その後、最終的に割裂破壊を生じて付着耐力が決定される場合、周辺コンクリートの拘束の程度によって付着性状が大きく異なるものと推測され、腐食によるひび割れの評価を適切に行わなければならないものと考えられる。

本研究では、鉄筋が腐食した場合に、最終的に周辺コンクリートの割裂により挙動が決定される場合の付着性状を明らかにすることを目的としている。腐食により発生する内部ひび割れを考慮した場合の付着強度の低下についての検討を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体概略を図-1に示す。試験体は断面が224×224mm、高さが112mmのコンクリートブロックの中心にD16異型鉄筋1本を埋め込んだものである。試験体の両側にはスリットを設けており、かぶりを表現すると共に付着割裂破壊を誘発させるように設計した。試験区間は64mm(鉄筋径の4倍)とし、荷重端側に付着絶縁区間として24mm(鉄筋径の1.5倍)の塩ビパイプを設けている。実験因子は試験区間における鉄筋の腐食程度、およびかぶり厚さである。かぶり厚さCは、スリットの寸法を調節することで、鉄筋径 ϕ の1.5倍、2.5倍および3.5倍の3水準とした。

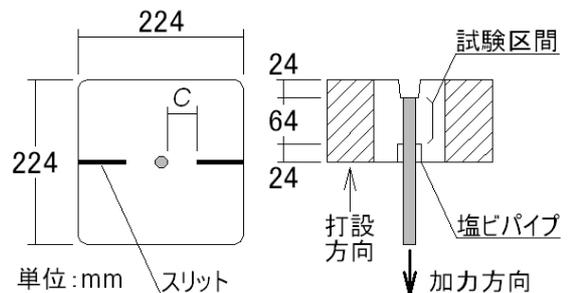


図-1 試験体概要

2.2 鉄筋腐食方法

鉄筋は定電流発生装置を用いて、電食により腐食させるものとした。装置の概略を図-2に示す。電流は0.03Aで一定であり、鉄筋を陽極、試験体を挟み込むように配置した銅板を陰極としている。水槽内には電解液として0.3%NaCl水溶液を満たしており、自由端側の鉄筋が直接電解液と接しないよう配慮した。

*1 筑波大学大学院 システム情報工学研究科 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*3 筑波大学大学院 システム情報工学研究科准教授 博士(工学) (正会員)

試験区間における鉄筋の腐食程度は通電時間を調節して制御するものとした。通電時間は116時間を基準として、基準の1倍、1.5倍、2倍、3倍、4倍の5水準としている。電食中の試験体は鉄筋からかぶりに向かって腐食ひび割れが発生しているのが確認された。錆汁は試験体底面から流出しはじめ、かぶり表面からはしばらく時間が経過してから流出した。また、電食時間が長い試験体の場合、上面のコンクリートと鉄筋との境界においても錆汁が発生しているのが確認された。

試験体一覧を表-1に示す。試験体名のLに続く数字は通電時間が基準(116時間)の何倍であるかを示しており、Cに続く数字は鉄筋径に対するかぶり厚さの比を示している。通電時間が0時間となっている試験体は電食を行っていない健全な試験体である。なお、試験体に用いたコンクリートの圧縮強度は30.9MPaであり、割裂強度は2.40MPaであった。また、鉄筋の降伏強度は383MPaであり、弾性係数は180GPaであった。

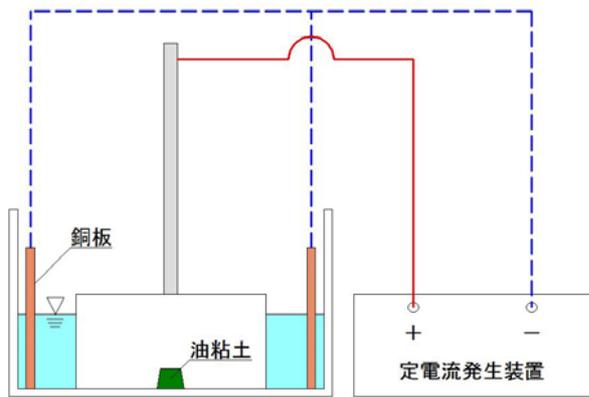


図-2 電食装置概略

表-1 試験体一覧

試験体名	かぶり厚さ (mm)	通電時間 (時間)
L0.0_C15	24 (1.5 φ)	0 (健全)
L1.0_C15		116 (基準×1.0)
L1.5_C15		174 (基準×1.5)
L2.0_C15		232 (基準×2.0)
L3.0_C15		348 (基準×3.0)
L4.0_C15		464 (基準×4.0)
L0.0_C25	40 (2.5 φ)	0 (健全)
L1.0_C25		116 (基準×1.0)
L1.5_C25		174 (基準×1.5)
L2.0_C25		232 (基準×2.0)
L3.0_C25		348 (基準×3.0)
L4.0_C25		464 (基準×4.0)
L0.0_C35	56 (3.5 φ)	0 (健全)
L1.0_C35		116 (基準×1.0)
L1.5_C35		174 (基準×1.5)
L2.0_C35		232 (基準×2.0)
L3.0_C35		348 (基準×3.0)
L4.0_C35		464 (基準×4.0)

3. 実験方法

加力方法を図-3に示す。加力は、試験体のかぶりを拘束しないようスリット間と同じ直径の孔を設けた加力板の上に試験体を設置し、鉄筋を単調に引抜くことにより行った。なお、試験体と加力板との間には割裂によるコンクリートの横方向への拘束を避けるため、4枚に分割したテフロンシートを挟み込んでいる。

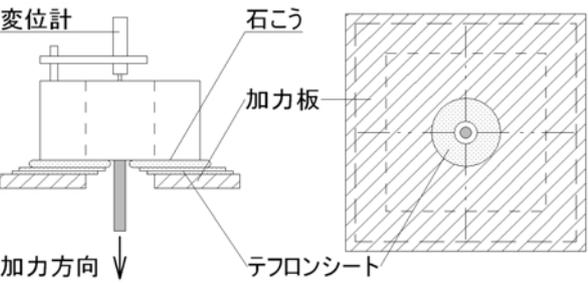


図-3 加力方法

4 実験結果

試験体は全て最終的に付着割裂により破壊した。実験から得られた付着応力-すべり量関係を図-4~図-6に、加力後の試験体の割裂面を写真-1に示す。なお、付着応力は引張荷重を試験区間の鉄筋の表面積で除して求めており、鉄筋周長は健全鉄筋の公称値とした。鉄筋のすべり量は自由端で計測された値である。

付着応力-すべり量関係は大きく分けて鉄筋が徐々に抜け出して最大付着応力に至るパターンと、ほとんど抜け出さずに最大付着応力に至るパターンが見られた。これらには腐食の程度による相関関係は見られなかった。また、電食時間が長い試験体のうち数体において、一旦付着応力が低下した後、再度付着応力が増加する現象が見られた。これは、鉄筋の腐食により節部が減少するとともに、コンクリートとの間に腐食生成物が形成され、節部との機械的噛み合い作用がある程度鉄筋が抜け出してから作用するためと考えられる。

加力後の割裂面は鉄筋側およびかぶり側から鉄筋の錆汁が浸入しているのが確認されたが、錆汁の浸入位置や程度は試験体により異なっており、特に規則性は見られなかった。



【L4.0_C35】

写真-1 割裂面の様子

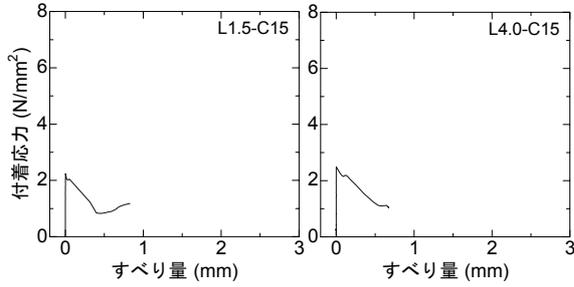
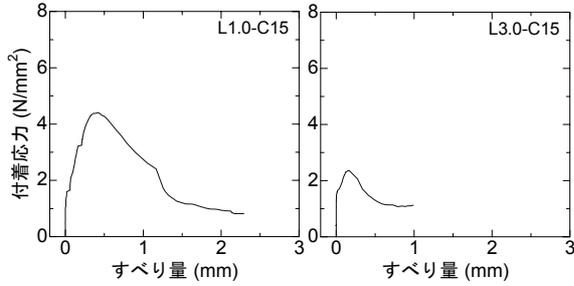
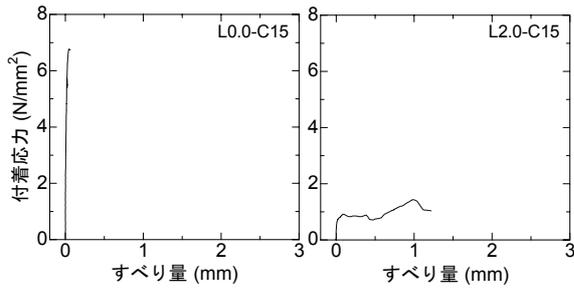


図-4 付着応力-すべり量関係 (C15)

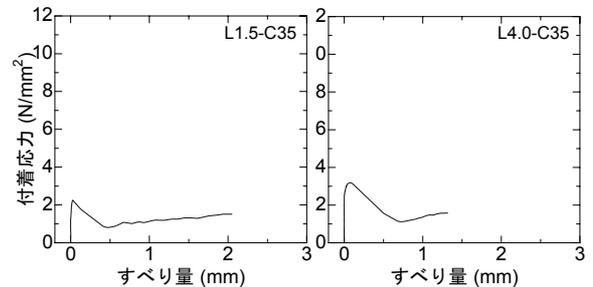
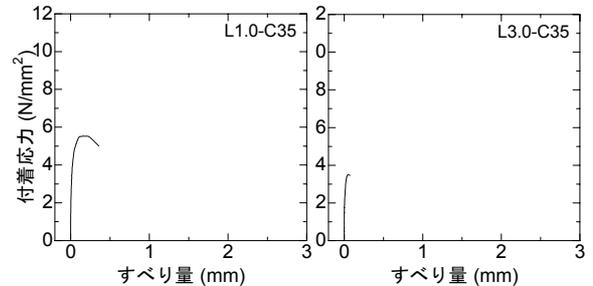
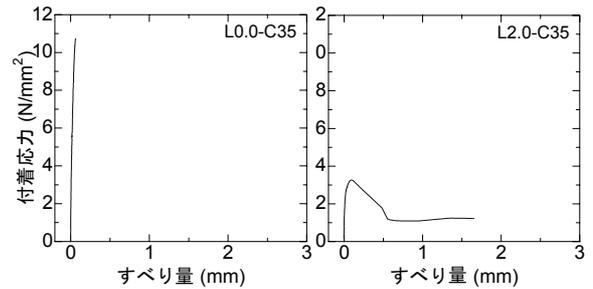


図-6 付着応力-すべり量関係 (C35)

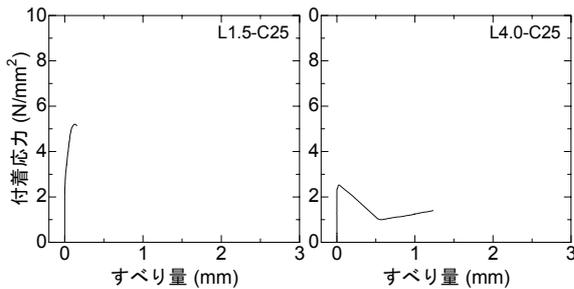
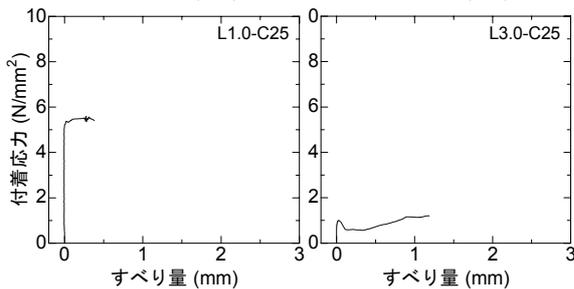
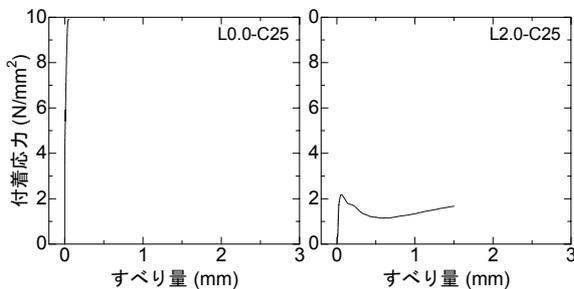


図-5 付着応力-すべり量関係 (C25)

5 実験結果の考察

5.1 質量減少率

質量減少率は加力後に試験体から取り出した鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム水溶液に浸漬して除錆し、試験区間の質量減少量を健全時の質量で除して求めた。ただし、写真-2に示すように、電食時間が長い試験体では特に試験区間外（荷重端側の鉄筋とコンクリートとの境界）での腐食が進行しており、本研究では質量減少率の算出にあたりこの部分の腐食を除外することができなかったため、電食時間が長い試験体の質量減少率は総じて大きくなっている。

実験により得られた最大付着応力の一覧を表-2に、最大付着応力-質量減少率関係を図-7に示す。なお、最大付着応力は既往の研究²⁾を参考とし、健全時の最大付着応力の計算値で除して基準化している。グラフより、質量減少率が7%程度までは右下がりの傾向が見られ、そこまでの試験体の結果(9体)により最小二乗法による回帰計算を行った結果、次の関係式を得た。

$$cor\tau_{b,max} / \tau_{b,max} = 1 - 9.86 \cdot C \quad (1)$$

ここで、

- $cor\tau_{b,max}$: 腐食鉄筋の付着割裂強度
- $\tau_{b,max}$: 健全鉄筋の付着割裂強度計算値²⁾
- C : 質量減少率

しかしながら、質量減少率が 7%程度を超えた場合、質量減少率と基準化最大付着応力とに明瞭な関係は見られない。これは、質量減少率が鉄筋の腐食を平均的に扱うものであり、コンクリートに発生する腐食ひび割れと対応するとは言いがたく、付着応力の低下を質量減少率により評価するには限界があると思われる。割裂破壊する場合の付着応力の低下の評価には、腐食によって発生するひび割れを考慮する必要があると考えられる。

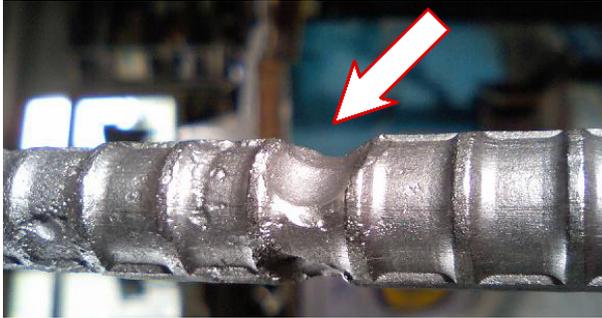


写真-2 試験区間外腐食の様子

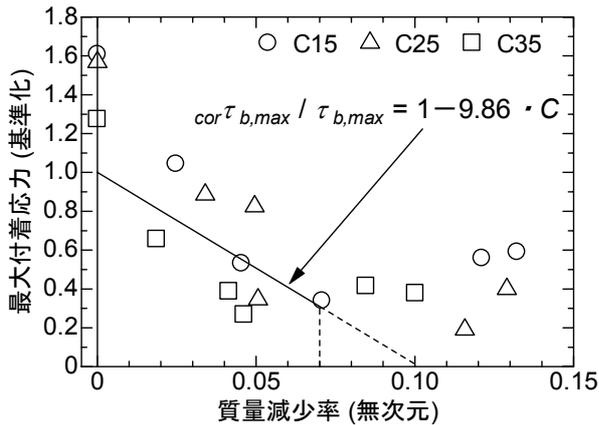


図-7 最大付着応力-質量減少率関係

表-2 最大付着応力一覧

試験体名	最大付着応力		質量減少率 (%)
	実験値(MPa)	基準化	
L0.0 C15	6.77	1.61	-
L1.0 C15	4.40	1.05	2.48
L1.5 C15	2.24	0.532	4.54
L2.0 C15	1.43	0.217	7.08
L3.0 C15	2.35	0.559	12.11
L4.0 C15	2.49	0.591	13.22
L0.0 C25	9.90	1.57	-
L1.0 C25	5.60	0.887	3.40
L1.5 C25	5.21	0.825	4.95
L2.0 C25	2.19	0.347	5.06
L3.0 C25	1.21	0.158	11.57
L4.0 C25	2.53	0.400	12.90
L0.0 C35	10.73	1.27	-
L1.0 C35	5.53	0.657	1.87
L1.5 C35	2.26	0.268	4.62
L2.0 C35	3.27	0.388	4.14
L3.0 C35	3.50	0.415	8.46
L4.0 C35	3.19	0.379	10.02

5.2 割裂面の検討

これまで鉄筋の腐食を扱った研究は数多くなされていく。特に付着強度の評価にはかぶりコンクリート表面に発生するクラックの大きさ³⁾や鉄筋の質量減少率⁴⁾と関連付けた研究が報告されているが、これらの研究ではコンクリート内部に発生する腐食ひび割れについての考慮はされていない。引抜試験において付着割裂により破壊する場合、コンクリートのかぶり厚さが重要なパラメータとなる。すなわち、鉄筋腐食によりコンクリート内部にひび割れが発生する場合、かぶりコンクリートがどれだけひび割れず健全な状態で残っているかが重要であり、付着強度の評価にはこれを考慮する必要があると思われる。また、鉄筋の腐食により生じた錆汁は内部ひび割れに沿って浸入すると考えられる。そこで本研究では、コンクリートの割裂面に付着した錆汁に着目し、割裂面の写真から画像解析を用いて錆汁の判定を行い、最大付着応力の低下を評価可能であるか検討した。

Tepfersの付着割裂に関する検討⁵⁾により提案されている健全な試験体の付着割裂強度式を式(2)に示す。これは図-8に示す、内半径 r_i 、外半径 r_u の中空シリンダーに作用する内圧を、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする力であると考えらることで求められており、 r_u はコンクリートのかぶり厚さに鉄筋半径 $d_b/2$ を加えた値、 r_i は内部ひび割れの大きさで見ることが出来る。また、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げようとする応力と鉄筋方向とのなす角 α は、コンクリートの割裂で破壊する場合、既往の研究²⁾から実験的に $\alpha=34^\circ$ であることが確認されている。

$$\tau_b = \sigma_t \cdot \frac{2r_i}{d_b} \cdot \frac{r_u^2 - r_i^2}{r_u^2 + r_i^2} \cdot \cot \alpha \quad (2)$$

ここで、

τ_b : 付着応力

σ_t : コンクリートの割裂強度

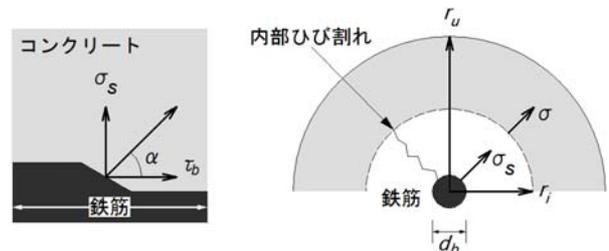


図-8 付着応力と内圧の関係

なお、式(2)を r_i で微分し、右辺=0 とすることで、

$$r_i = 0.486r_u \quad (3)$$

のとき極大値

$$\tau_{b,max} = 0.601 \cdot \sigma_t \cdot \frac{r_u}{d_b} \cdot \cot \alpha \quad (4)$$

をとることが分かる。

ここで、鉄筋軸方向のコンクリートの微小区間において鉄筋の腐食により図-9に示すような内部ひび割れが発生し、その部分に錆汁が浸入したとする。かぶり表面側のひび割れは、その部分にはじめからかぶりが存在しなかった場合と同じであり、これを考慮すると、 r_u は鉄筋の中心からかぶり表面に浸入した錆汁部分を除いた長さと考えられ、これを r_u' とする。また、鉄筋の周辺に侵入した錆汁の長さ（すでに発生していると考えられる内部ひび割れの長さ）に鉄筋半径を加えた長さを $d_b'/2$ とすると、 $d_b'/2$ が $0.486r_u'$ 未満であれば、式(2)は内部ひび割れが $r_i=0.486r_u'$ まで進展したときに極大値をとると考えられ、 r_u' を式(4)に代入することで鉄筋腐食により内部ひび割れが発生した場合の鉄筋軸方向のある微小断面における最大付着応力 $\tau_b',_{max}$ を求めることができる。ただし、 $d_b'/2$ が $0.486r_u'$ を超える場合、内部ひび割れはすでに式(2)が極大値となる r_i の長さを超えて発生していると考えられ、そこからさらに内部ひび割れが進展するとき、つまり $d_b'/2 \leq r_i \leq r_u'$ の範囲で式(2)が最大となるのは $r_i=d_b'/2$ のときである。したがって、 $d_b'/2 \geq 0.486r_u'$ の場合、 $\tau_b',_{max}$ は式(2)の r_i に $d_b'/2$ を代入することで算出するものとした。

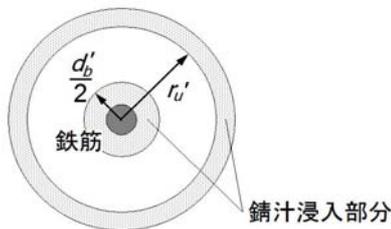


図-9 鉄筋の腐食による内部ひび割れのイメージ

画像解析を行う場合、割裂面の錆汁が浸入した部分と健全なコンクリート部分をはっきりと区別させる必要がある。そこで写真-3に示すように割裂面のデジタル画像のRGBを反転させ、彩度および色の温度を調節し、割裂面に浸入した錆汁を青く浮かび上がらせることで、健全なコンクリートと錆汁が浸入した部分を区別させることができた。

画像解析では鉄筋の軸方向に割裂面の試験区間部分をピクセル単位（今回は約0.1mmピッチ）で分割し、それぞれの断面における $\tau_b',_{max}$ を算出する。さらに全断面における $\tau_b',_{max}$ の平均値として $\tau_b',_{max,average}$ を算出した。

なお、割裂面の錆汁が浸入した部分は鉄筋の両側で異なっており、図-10に示すように4箇所錆汁が浸入した部分を足し合わせてから計算を行っている。そのため、写真は4箇所全ての割裂面を一枚に収める必要があり、割裂により2個に分かれたコンクリートを重ねる際、傾きが生じないように打設面（本研究では自由端側）をあわせて写真の撮影を行った。

また、実際の割裂面の写真を鉄筋軸方向に分割し、さらにピクセル単位で鉄筋半径方向に短冊状に区切った場合、図-10下の分割断面詳細に示すように、連続して錆汁が浸入していない部分があったが、この場合、 r_u' は鉄筋の中心から錆汁が浸入していない部分の中で最も長い区間の外側までとし、 $d_b'/2$ は鉄筋の中心からこの区間の内側までとして計算を行った。

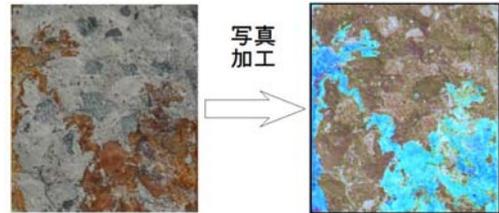


写真-3 画像解析用の写真

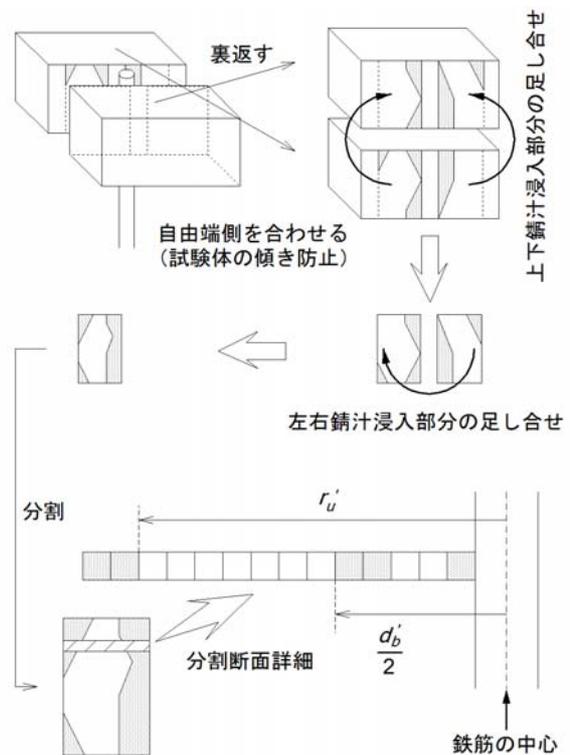


図-10 画像解析概要

実験値の最大付着応力と画像解析により算出された $\tau_b',_{max,average}$ の比較値と質量減少率との関係を図-11に、実験値と $\tau_b',_{max,average}$ の一覧を表-3に示す。

グラフより、比較値の上限はおおむね1程度（最大1.225）であり、鉄筋腐食によるコンクリートの割裂ひび割れに起因する付着強度の低下の上限値をおおよそ得ることができると考えられる。

しかしながら、グラフの矢印で示すように、比較値が0.6を下回る結果も見られ、これらと質量減少率との関係も明確ではない、これらの試験体の付着応力-すべり量関係を図-12に示す。なお、付着応力はその試験体の

付着応力の最大値で除して基準化している。これらの試験体では最大付着応力が過大なすべり量 (1mm 以上) で発生していたり、最大付着応力後の負勾配以後に再度付着応力が増加して破壊するといった現象が観察される。鉄筋健全時の付着割裂メカニズムとは異なる過程を経て破壊に至るものと考えられ、腐食生成物や鉄筋節の腐食の影響などがあると思われるが、詳細な検討は今後の課題としたい。

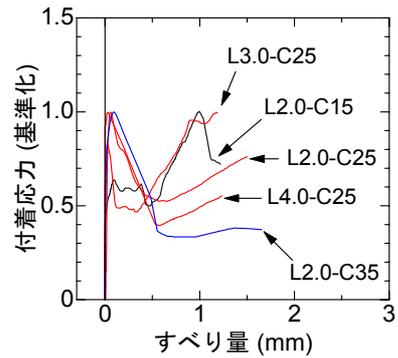


図-12 付着応力-すべり量関係 (比較値 0.6 以下)

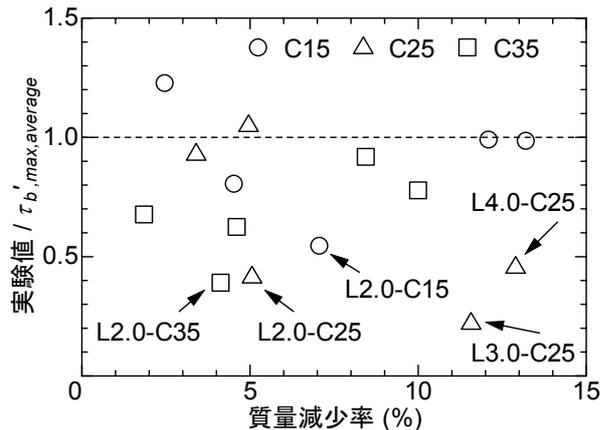


図-11 実験値との比-質量減少率関係

表-3 実験値との比較

試験体名	最大付着応力(MPa)		実験値 / $\tau_{b,max,average}$
	実験値	$\tau_{b,max,average}$	
L0.0 C15	6.77	-	-
L1.0 C15	4.40	3.59	1.225
L1.5 C15	2.24	2.79	0.803
L2.0 C15	1.43	2.64	0.543
L3.0 C15	2.35	2.38	0.988
L4.0 C15	2.49	2.53	0.983
L0.0 C25	9.90	-	-
L1.0 C25	5.60	6.03	0.928
L1.5 C25	5.21	4.97	1.048
L2.0 C25	2.19	5.29	0.413
L3.0 C25	1.21	5.51	0.220
L4.0 C25	2.53	5.56	0.454
L0.0 C35	10.73	-	-
L1.0 C35	5.53	8.31	0.674
L1.5 C35	2.26	8.38	0.622
L2.0 C35	3.27	8.42	0.388
L3.0 C35	3.50	3.82	0.916
L4.0 C35	3.19	4.12	0.775

6. まとめ

最終的にコンクリートの割裂により破壊する場合の、腐食鉄筋の局所付着性状を明らかにすることを目的とした引抜試験を行った。また、割裂面に付着する錆汁から内部ひび割れを考慮し、最大付着応力の低下が評価可能であるか検討し、以下の知見を得た。

- 1) 鉄筋の質量減少率が 7%程度までは最大付着応力と質量減少率に関係が見られ、回帰計算による実験式を得た。
- 2) 割裂面に付着した錆汁を画像解析により読み取ることで、内部ひび割れを考慮した最大付着応力を評価し、その低下度合いの上限値を示すことができた。

参考文献

- 1) 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
- 2) 金久保利之，米丸啓介，福山洋：補強コンクリート部材の付着割裂性状に関する研究（その 1：横補強のない場合の局所付着性状），日本建築学会構造系論文集，Vol.492，pp.99-106，1997.2
- 3) 米田直也ほか：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.2，1992
- 4) 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，Vol.13，No.1，1991
- 5) Tepher R.，: Lapped Tensile Reinforcement Splies, ASCE, Journal of Structural Division, Vol.108, No.ST1, pp.283-301, 1982.1