

機関番号：82658

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560457

研究課題名（和文） 腐食した鉄筋コンクリート部材の付着割裂メカニズムの解明

研究課題名（英文） Clarification on Bond Splitting Mechanism for Corroded Reinforced Concrete Member

研究代表者

大屋戸 理明 (OYADO MICHIAKI)

構造物技術研究部・主任研究員

研究者番号：10425910

研究成果の概要（和文）：本研究は、腐食鉄筋のコンクリートとの付着性能を評価するためのメカニズムを解明することを目標とし、付着応力-すべり関係の算出因子と鉄筋腐食に伴う変状因子の関係を考慮した供試体試験により影響を評価した。その結果、腐食によるコンクリート内部のひび割れ性状はかぶりにより異なること、腐食量の増加に伴う最大付着応力の低下勾配はかぶりが大きいほど顕著であること、横拘束力がある場合の腐食量の増加に伴う最大付着応力の低下は小さいことが確認できた。

研究成果の概要（英文）：The experimental study considering the effect of deterioration on the relationship between bond stress and slippage was carried out in this study, in order to clarify the bond splitting mechanism of corroded reinforced concrete member. From the test results, the conditions of internal cracks are different between cases of cover concrete. It is clarified that the reduction rate of maximum bond stress due to corrosion will become larger when the thickness of cover concrete is large, and will become smaller when the lateral confinement is applied.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学 地震工学 維持管理工学

キーワード：コンクリート構造 腐食 付着

1. 研究開始当初の背景

持続可能な社会経済活動を支える上で、既存の社会資本の安全性を確保することは喫緊の課題であり、構造物の材料劣化に伴う構造性能の低下を明確に把握することが重要である。特にコンクリート構造物における鉄筋の腐食については、安全性への影響が多いため、その影響を的確に評価する必要がある。

現在までに、腐食がRC部材の構造性能に及ぼす影響について、国内外の機関で研究が進められている。それらは実際にRC部材を製作し、暴露や電食等の方法により鉄筋を腐食させた後に加力実験を行うか、これを模擬した数値解析を行うことにより検討を行っている。これらの結果のうち、例えば部材の曲げ剛性については、腐食による引張鉄筋自体の力学性能の低下に加えて腐食鉄筋の付

着すべりを考慮する必要があるとされている。またせん断耐荷性能については、鉄筋の付着が腐食により失われることに伴ってせん断耐荷機構に占めるアーチ機構の卓越が生じるとされている。さらに、鉄筋端部定着部や重ね継手部などの構造細目については、腐食鉄筋の付着の低下が鉄筋負担力の著しい低下をもたらし、RC 部材の耐荷機構を損なう場合があるとされている。このように、腐食した RC 部材の構造性能に関して、腐食鉄筋の付着性状の把握は重要な意味を持つ。

腐食鉄筋の付着性状を対象とした研究について概観すると、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し、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。しかしながらその評価については、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、現象解明は容易ではない。

2. 研究の目的

筆者らは、健全な RC 部材の付着割裂性状について、局所の付着応力-すべり量関係とグローバルな平均付着性状との関連性に着目して研究を行ってきた。この中で、付着割裂における局所の付着応力-すべり量 (τ - s) 関係は、横補強のない（すなわちコンクリートの割裂性状に支配される）場合と、横補強による拘束効果が発揮される場合との加算で表現できることを明らかにした。ただし、この両者が付着強度を発揮するときのすべり量は、コンクリート強度、かぶり、横補強の程度等、種々の要因に影響され、単純に両者を加算することはできない。

本研究では、鉄筋が腐食した場合について、この仮定の適用性を検討する。図 1 に、鉄筋が腐食した場合の局所の τ - s 関係の加算の仮定（イメージ）を示す。拘束がなくコンクリートの割裂が支配的な場合は、鉄筋の腐食により周辺コンクリートに内部ひび割れが発生し損傷することで、直接付着力の低下に結びつき、拘束がある場合は、鉄筋腐食に伴うプレストレス効果により、付着強度が増大すると考えられる。このため、加算後の局所付着応力-すべり量関係は、かぶりや横拘束量の大小により増減すると考えられる。このように本研究では、腐食した場合における付着メカニズムの解明のため、鉄筋腐食に伴う変状因子と τ - s 関係の算出因子との関係を明らかにする。

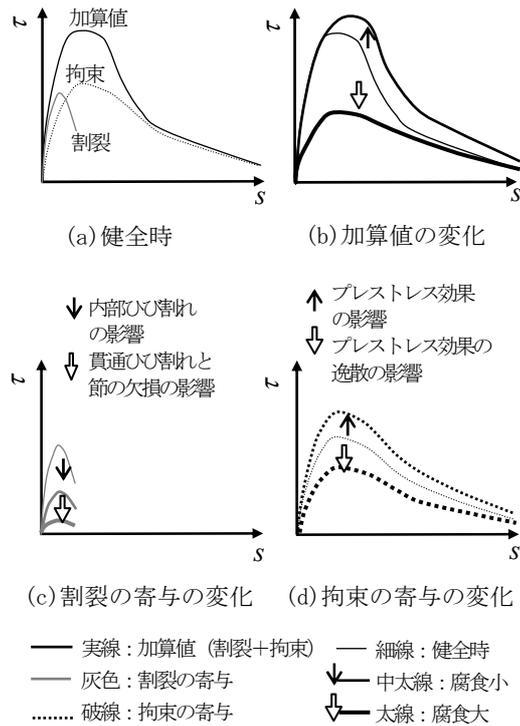


図 1 鉄筋が腐食した場合の局所の τ - s 関係の加算の仮定

3. 研究の方法

本研究では、腐食 RC 部材中における付着性状を把握するため、模擬試験体の引抜試験により検証する。まず、健全 RC 部材中の付着割裂における局所の τ - s 関係を、横補強のない場合（コンクリートの割裂の寄与）と、横補強による拘束効果が発揮される場合との加算で表現する。次に腐食 RC 部材において、鉄筋引抜時の付着割裂ひび割れ（図 2①）

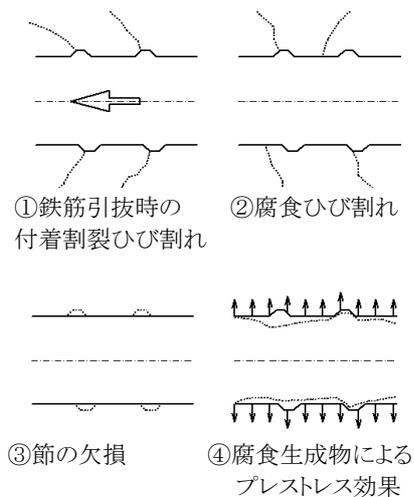


図 2 付着割裂ひび割れと腐食鉄筋周囲の状況の概念

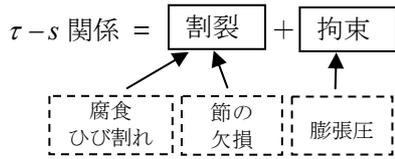


図 3 τ - s 関係の算出因子（実線枠）と鉄筋腐食に伴う変状因子（破線枠）の関係

のほかに腐食ひび割れ（図 2②）や節の欠損（図 2③）がコンクリートの割裂の寄与に影響を与えると仮定する。さらに、腐食生成物によるプレストレス効果（図 2④）が拘束効果に影響を与えると仮定する。本研究で仮定する τ - s 関係の算出因子と鉄筋腐食に伴う変状因子の関係を図 3 に示す。本研究では、鉄筋腐食に伴うそれぞれの変状因子を考慮し、これと付着性状との関係を模擬試験体の引抜試験によって調査することにより、腐食 RC 部材における腐食鉄筋の基本付着性状を確認する。

鉄筋腐食に伴う各変状因子の評価のうち、②腐食ひび割れによるコンクリートの損傷評価は、腐食後の試験体を鉄筋軸方向に多断面で分割し、各断面でひび割れを観察することで行う。ただし、載荷後の試験体を分割して調査した場合、引抜き力によるコンクリートの割裂ひび割れが腐食ひび割れと区別できなくなる恐れがあるので、同一試験体をそれぞれ 2 体ずつ作製し、一方は腐食ひび割れによる内部損傷の調査に充て、他方は鉄筋の付着引抜き試験に供する。

試験体中の鉄筋を電食等で実際に腐食させる場合、鉄筋腐食に伴う変状因子は通常同時発生し、独立して変動させることは困難であり、各変状因子の変動が有意な範囲で得られないと予想される。そこで、②腐食ひび割れによるコンクリートの損傷の影響については、これを模擬した樹脂板を鉄筋に沿って接着し、引抜き試験に供することで検討を行う。さらに、④プレストレス効果の影響については、腐食生成物によるプレストレスを模擬した外力を試験体外部から与えて引抜き試験を実施する。

4. 研究成果

(1) 腐食鉄筋の基本付着性状試験

① 実験概要

鉄筋腐食に伴う各変状因子と付着性状との関係を調査し、腐食 RC 部材における腐食鉄筋の基本付着性状を確認した。

試験体の概要を図 4 に示す。試験体は断面幅 300mm のコンクリート平板の中心に異形鉄筋 D16 (SD490) を 1 本埋め込んだものであり、割裂ひび割れがサイドスプリットモードと

なるように扁平な断面とした。この鉄筋を電食により腐食させた後、載荷試験に供した。試験体のパラメータは、腐食程度（電食時の積算電流量）のほか、鉄筋径、かぶりと鉄筋径の比 (C/ϕ) ならびにコンクリート強度とした。

試験体 A と A2、ならびに B と B2 は同じ積算電流量で電食し、引抜試験用 (A, B) の内部腐食状況を損傷調査用 (A2, B2) の内部腐食状況により推定した。A2, B2 は腐食による内部ひび割れや腐食生成物を観察するため、腐食後の試験体を鉄筋軸方向に約 50mm 間隔で分割した。変動因子はコンクリートのかぶり C および鉄筋の腐食程度とし、後者については積算電流量の大小による 2 種類を設定した。

② コンクリート損傷調査結果

各試験体の側面には、鉄筋軸方向に沿って 1 本の腐食ひび割れが生じ、腐食生成物が漏出している状態が確認された。コンクリート表面のひび割れはいずれの試験体も片面のみ顕著に開口し、他方の面はかぶりの小さい試験体 ($C/\phi = 1.5$) を除いてほとんど開口しなかった。これは、鉄筋腐食の進展に伴ってコンクリート内部でひび割れが進展し、片面に割裂ひび割れが達した後は、その面のみで集中的に腐食が進行したためと考えられた。試験体の切断面の腐食ひび割れ状況の例を図 5 に示す。 $C/\phi = 1.5$ の試験体は、 $C/\phi = 2.5$ や $C/\phi = 3.5$ の試験体に比べ、鉄筋腐食による割裂ひび割れが放射状に多数生じている。 $C/\phi = 2.5, 3.5$ の試験体では、少数の内部ひび割れが質量減少率の増加に伴って進展し、コンクリートかぶりを貫通して試験体表面に達していることが確認できる。

③ 載荷試験結果

各試験体の平均付着応力-荷重端すべり量関係を図 6 に、基準化付着強度-質量減少率関係を図 7 に示す。平均付着応力は引張荷重を周長と付着長で除した値であり、荷重端

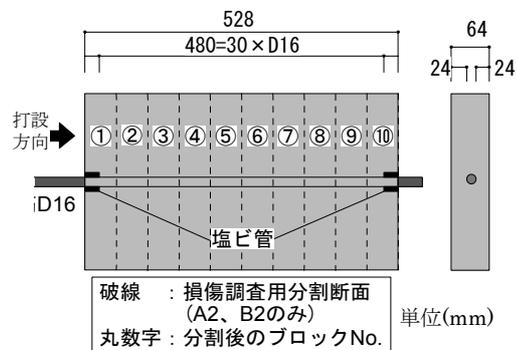


図 4 試験体の概要 ($C/\phi = 1.5$ の例)

すべり量は計測値から試験区間外での鉄筋の伸びを除いた値である。また、基準化付着強度は、各々の最大付着応力 τ_m を健全試験体の最大付着応力 τ_{mc} で基準化した値である。図 6 より、同一の荷重端すべり量において、 C/ϕ が小さいほど、また質量減少率が大きいほど平均付着応力が小さくなることからわかる。図 7 より、最大付着応力においては、 C/ϕ が大きい場合、質量減少率の付着応力の低下勾配が大きいことが確認できる。

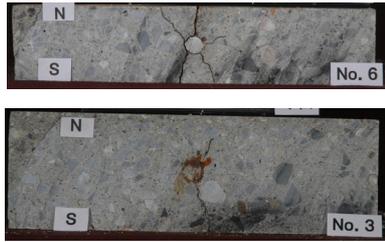


図 5 腐食ひび割れ状況の例
(上: $C/\phi=1.5$ 下: $C/\phi=2.5$)

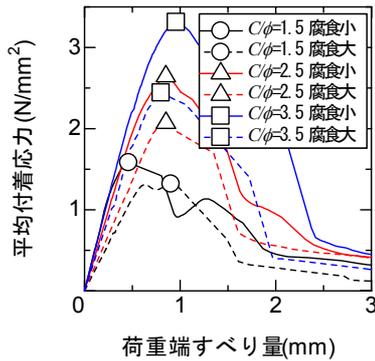


図 6 平均付着応力-荷重端すべり量関係

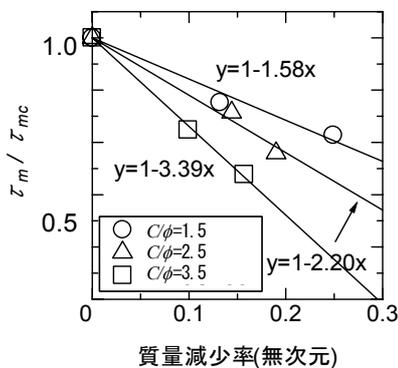


図 7 基準化付着強度-質量減少率関係

(2) 腐食による膨張圧の影響

①実験概要

腐食による膨張圧が付着性状へ及ぼす影響を把握するため、腐食試験体を用いた実験を行った。

試験体の概要を図 8 に示す。試験体は幅 300mm のコンクリート平板の中心に異形鉄筋 D16 (SD390) を 1 本埋め込んだものである。鉄筋の腐食分布が不均一となることを考慮し、付着区間における平均的な性状を評価することとして、付着長は 480mm (鉄筋径の 30 倍) と長く設定した。腐食による鉄筋周囲の状態の変化を模擬するため、作製後に目標質量減少率を 7.5% 又は 15% として電食により腐食させた。横拘束力を鉄筋のみに作用させ、付着性状に対するコンクリートの割裂の影響を除去するため、腐食試験体にはダイヤモンドカッターで切込みを、健全な試験体にはスリットを設け、コンクリートブロックを中央で完全に分離した。引抜試験終了後、鉄筋を採取し除錆して質量減少率を求めた。引抜試験では、鉄筋に対して単調に引抜力を与えた。横拘束力は 6 個のオイルジャッキによりコンクリートブロックに直接作用させ、加力中は目標値を一定に保つように制御した。

②実験結果

図 9 に最大付着応力-拘束応力関係を、図 10 に基準化付着強度-質量減少率関係の例を示す。なお、鉄筋が降伏した試験結果は図示していない。図 9 より、拘束応力の増大に伴う最大付着応力の増大が確認でき、かつ C/ϕ の影響は殆どない。図 10 より、質量減少率に対する基準化付着強度の低下勾配は横拘束のない場合より小さい ($1.24 < 1.58 \sim 3.39$ 、図 7 参照) ことから、膨張圧による横拘束力が作用する場合、腐食による最大付着応力の低下は低減されることが分かる。

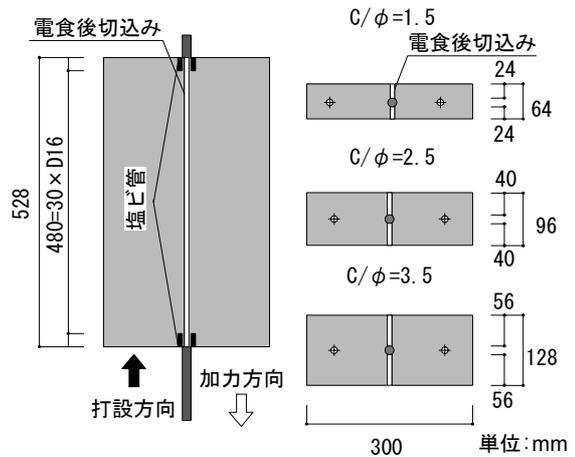


図 8 試験体の概要

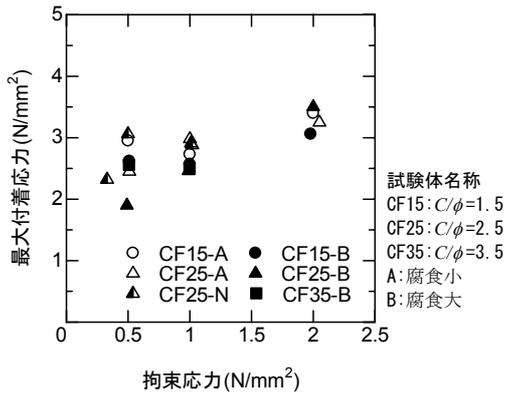


図 9 最大付着応力 - 拘束応力関係

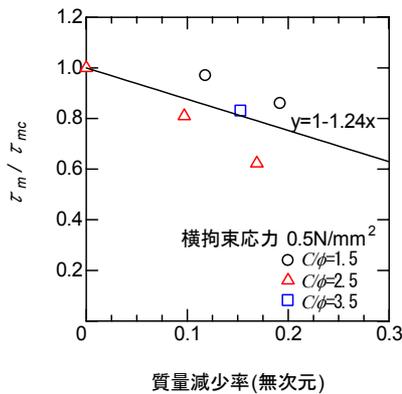


図 10 基準化付着強度 - 質量減少率関係の例

(3) 腐食による内部ひび割れの影響

①実験概要

腐食ひび割れによるコンクリートの損傷の影響については、損傷を模擬した樹脂板（スリット）を接着した鉄筋を用いた試験体を作成し、これを引抜き試験に供することで検討を行った。試験体の概要を図 11 に示す。試験体は、鉄筋に D16 異形鉄筋を用いた付着長 64mm (=4φ) の片引き試験体である。試験体は全 16 種類で、C/φ は 1.5、2.5 および 3.5 の 3 水準に設定した。損傷を模擬するスリッ

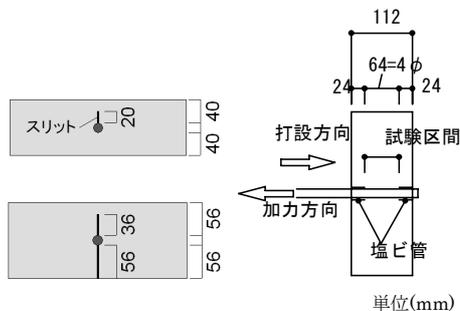


図 11 試験体の概要（左図は例）

トは、片側のかぶりのみ配置する試験体（図 11 左上）と、両側のかぶりに配置する試験体（図 11 左下）の 2 種類を設定した。C/φ、スリットの位置および長さを変動因子として腐食状況の違いを模擬した。加力は各々 3 体ずつ計 48 体について、鉄筋を単調に引抜くことにより行った。

②実験結果

全ての試験体がコンクリートの割裂により荷重低下し破壊に至った。両側のかぶりに健全部を有する試験体では、かぶり面に割裂ひび割れが荷重端側から自由端側に瞬時に発生し、急激に荷重低下した。一方、片側のかぶりがスリットで分断された試験体では、付着強度は小さいものの割裂ひび割れの進展は緩やかで、荷重は徐々に低下しており、ひび割れ状況の違いが荷重の軟化域に影響を及ぼすことが確認された。

各試験体の付着割裂強度の評価は、ひび割れ状況（スリットの配置）に応じて、Tepfers の付着割裂強度算定式を適用して行った。なお、片側のかぶりがスリットで分断された試験体の場合、Tepfers の理論では付着割裂強度は 0 となるが、電食させた試験体の載荷試験結果によれば、内部ひび割れが片側のかぶりを貫通した試験体においてもある程度の付着強度を有しており、新たな付着割裂強度の評価方法が必要となる。そこで、鉄筋が周辺コンクリートを押し広げる力によりひび割れが開口し、健全部のかぶりに曲げモーメントが生じるといった応力状態を仮定し、力の釣合いより以下の付着割裂強度算定式を導出した（図 12）。

$$\tau_b = \sigma_b \cdot \frac{C'^2}{6 \cdot \phi \cdot e} \cdot \cot \alpha$$

ここで、 τ_b ：付着応力、 σ_b ：コンクリートの曲げ強度、 C' ：健全部の割裂線長さ、 e ：鉄筋中心と健全部中心間の距離、 α ：支圧応力の鉄筋軸方向となす角である。 α は、スリットのない試験体の実験結果から、 $\alpha=40.9^\circ$ とした。

各試験体の付着割裂強度について、実験値と先述した算定式より求めた解析値との比較を図 13 に示す。図より、Tepfers の算定式ならびに導出（上記）した算定式は、概ね良好な対応を示していることが確認できる。

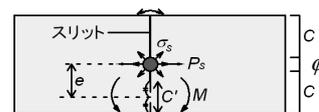
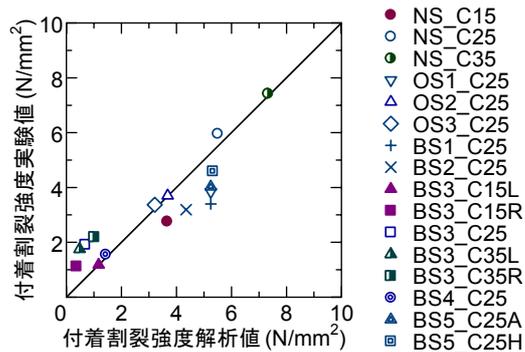


図 12 内部ひび割れが片側のかぶりを貫通した場合の応力状態の仮定



試験体名称 C15: C/φ=1.5, C25: C/φ=2.5, C35: C/φ=3.5
 NS: スリットなし, OS: 片側スリット配置, BS: 両側スリット配置

図 13 付着割裂強度の実験値と解析値

これらのことから、鉄筋の腐食により生じる内部ひび割れが鉄筋とコンクリートの局所付着性状に及ぼす影響を評価できることが確認できる。

(4) まとめ

腐食鉄筋のコンクリートとの付着性状に着目して、この評価メカニズムを解明することを目的とし、実験的研究を行った。この結果、以下の事柄が明らかになった。

- ①腐食による内部ひび割れや腐食生成物を観察するため、コンクリートの損傷調査を行った。その結果、試験体表面のひび割れは片面に集中すること、かぶりが小さい試験体は放射状に腐食ひび割れが生じていること、腐食の進行に伴い割裂ひび割れが進展し、かぶりを貫通することを確認した。
- ②腐食した RC 部材中における付着性状の把握および付着割裂メカニズムの解明を行うために、かぶりと腐食程度を実験因子とした腐食 RC 部材の引抜試験を行った。その結果、最大付着応力は腐食量の増加に伴い小さくなり、その低下勾配はかぶりが大きいほど顕著であった。
- ③腐食に伴う膨張圧が鉄筋とコンクリートの付着性状へ及ぼす影響について模擬実験により検討を行った結果、腐食部材においても横拘束力の増大に伴って最大付着応力が増加し、質量減少率の増大に対する最大付着応力の低下の程度は、引抜力により割裂ひび割れが生じる場合のそれよりも小さくなる傾向が確認された。
- ④腐食膨張に伴う周辺コンクリートの内部ひび割れに着目し、付着性状への影響について明確にすることを目的として、スリットにより種々の内部ひび割れの進展状況を模擬した実験を行った。この結果、片側のかぶりが割裂した試験体は、最大荷重後の荷重低下が緩やかであった。また、腐食による内部ひび割れの進展状況に応じて、付着割裂強度を評価することができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 2 件)

- ① Oyado, M., Kanakubo, T., Yasojima, A., and Nakayama, Y., "Pullout Test on Bond Splitting Property of Corroded Reinforced Concrete Member," *Proc. of the 3rd ACF Int. Conf, Taipei, November-December 2010, Tue-S4.3-05.* (査読有)
- ② 保坂剛、八十島章、大屋戸理明、金久保利之：腐食による鉄筋の断面減少が付着性状へ及ぼす影響、コンクリート工学年次論文集、査読有、Vol. 31, No. 1, 1222, 2009, pp. 1369-1374

〔学会発表〕(計 5 件)

- ① 大屋戸理明、中山裕司、八十島章、金久保利之：鉄筋の腐食による膨張圧が付着性状へ及ぼす影響に関する実験的研究、土木学会第 65 回年次学術講演会、V-198, 2010, pp. 395-396
- ② 八十島章、保坂剛、大屋戸理明、金久保利之：鉄筋の腐食による内部ひび割れが付着性状へ及ぼす影響に関する実験的研究、土木学会第 65 回年次学術講演会、V-199, 2010, pp. 397-398
- ③ 大屋戸理明、中山裕司、八十島章、金久保利之：腐食した鉄筋コンクリート部材の付着割裂性状に関する引抜試験、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集、V-244, 2009, pp. 485-486
- ④ 中山裕司、大屋戸理明、八十島章、金久保利之：腐食した鉄筋コンクリート部材の付着割裂性状に関する腐食損傷調査、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集、V-245, 2009, pp. 487-488
- ⑤ 保坂剛、八十島章、大屋戸理明、金久保利之：腐食による鉄筋の断面減少が付着性状へ及ぼす影響、土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集、V-251, 2009, pp. 499-500

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大屋戸理明 (OYADO MICHIAKI)
 公益財団法人鉄道総合技術研究所・構造物技術研究部・主任研究員
 研究者番号：10425910

(2) 研究分担者

金久保利之 (KANAKUBO TOSHIYUKI)
 筑波大学・システム情報工学研究科・准教授
 研究者番号：90261784
 八十島章 (YASOJIMA AKIRA)
 筑波大学・システム情報工学研究科・助教
 研究者番号：80437574