

論文 両引き試験による鉄筋腐食と付着強度に関する研究

碓本 大^{*1}・荒木 弘祐^{*2}・服部 篤史^{*3}・宮川 豊章^{*4}

要旨：電食させた RC 供試体の両引き試験を行い，両引き試験で生じたひび割れの間隔とコンクリート引張強度から付着強度を算出する手法を提案した。また，鉄筋の腐食減少率(腐食減少量(g)を健全鉄筋質量(g)で除し，100 を掛けた値(%)とする)および，コンクリート表面の腐食ひび割れ幅と付着強度の関係を考察した。その結果，付着強度は，腐食ひび割れ発生前は変化せず，腐食ひび割れ発生後は，腐食減少率の増加とともに減少することが確認できた。

キーワード：鉄筋腐食，両引き試験，付着強度，電食

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物において，コンクリート中の鉄筋の腐食は鉄筋の付着強度や鉄筋の伸び性能や強度の低下を招き，部材の耐荷性に影響を与えると考えられている¹⁾。特に付着性能に着目すると，多くの実験解析方法が提案されており，その多くが片引き試験による付着応力-すべり関係を用いた研究である²⁾³⁾。しかし，しばしば用いられる 10cm 角の供試体を用いた片引き試験は，実験供試体の付着長さが実構造物の定着長さに比べ短く，また，コンクリート内部の応力状態が圧縮状態であり，実構造物の応力状態と異なることも多いため，得られた実験結果をそのまま実構造物に直接適用することは難しい⁴⁾。また，両引き試験により付着強度を算出する際，付着応力-すべり関係を求める実験においては，コンクリート内の鉄筋表面にひずみゲージを多数貼る必要がある。しかし，ひずみゲージ設置による付着への影響が考えられ，また電食を用いる場合は，電気抵抗の変化を用いて計測を行なうひずみ計測の正確性には若干の疑問が残る。そこで本実験では，片引き試験用供試体より付着長さを長く設定可能な両引き試験用 RC 供試体を作成し，その載荷結果から付

着強度算出を検討することとした。付着強度の算出には，両引き試験における軸直角方向ひび割れ(以下，載荷ひび割れ)間の付着応力分布を求める必要があるが，本研究ではひずみゲージを使用しないため，付着応力分布を直接推定することはできない。そこで本研究では付着応力分布をパラメータが最大付着応力(付着強度)のみとしたいくつかの単調増加関数を用いて表し，そのモデルの妥当性を検討することとした。鉄筋は，丸鋼および異形鋼棒を使用し，鉄筋腐食を電食で模擬した。また，得られた付着強度と腐食減少量，腐食ひび割れ幅との関係を既往の研究と比較検討した。

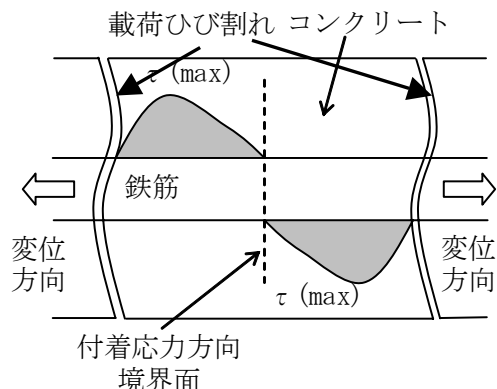


図-1 載荷ひび割れ間の付着応力分布の概念図

*1 京都大学 大学院工学研究科 (正会員)

*2 西日本旅客鉄道 施設部 (正会員)

*3 京都大学 大学院工学研究科 助教授 (正会員)

*4 京都大学 大学院工学研究科 教授 (正会員)

2. 両引き試験による付着強度算出理論

荷重ひび割れ間の付着応力状態は、細長い両引き型試験体に引張り荷重を加えた場合の部材の変形とひび割れ発生機構に関する既往の研究⁵⁾を参考とした。図-1に荷重ひび割れ間の付着応力分布の概念図を示す。付着応力の最大値は、図-1のような曲線のピークであると考えられる。本研究では鉄筋比が大きくコンクリートの引張り応力が断面に一樣に分布すると仮定し、付着応力分布を図-2のように荷重ひび割れ部で最大付着応力(付着強度)となる関数とした。付着応力分布は、一次関数、二次関数、対数関数、指数関数モデルを用いた。図-3(a)に一次関数モデル、図-3(b)に二次関数モデル1、図-3(c)に二次関数モデル2、図-3(d)に指数関数モデル、図-3(e)に対数関数モデルの概念図を示す。これらのモデルを用いると、有効付着長さ L (mm)、コンクリートの引張強度 σ_t (N/mm²)、実験結果より得られた荷重ひび割れ本数 N (本)より、付着応力とコンクリートの内部応力の力の釣り合い式から付着強度を求めることができる。式(1)に釣り合い式を示し、式(2)に式(1)を整理して算出される付着強度算出式を示す。

$$\frac{L}{N} \times \frac{1}{2} \times \alpha \times \tau \times 2\pi r = \sigma_t \times B \quad (1)$$

$$\tau = \frac{N\sigma_t B}{\alpha\pi r L} \quad (2)$$

ただし、 r :鉄筋半径(mm)、 τ :付着強度(N/mm²)、 B :コンクリートの有効断面積(mm²) (供試体断面積から鉄筋の断面積を引いた値であり、母材コンクリートの断面積)、 α :付着応力分布により決まる係数(一次関数モデルでは0.50、二次関数モデル1では0.33、指数関数モデルでは0.37、二次関数モデル2では0.67、対数関数モデルでは0.56)である。

あらかじめ σ_t 、 B 、 r 、 L を得ておくことで式(2)を用いて荷重ひび割れ本数から本モデルにおける付着強度を算出することとする。

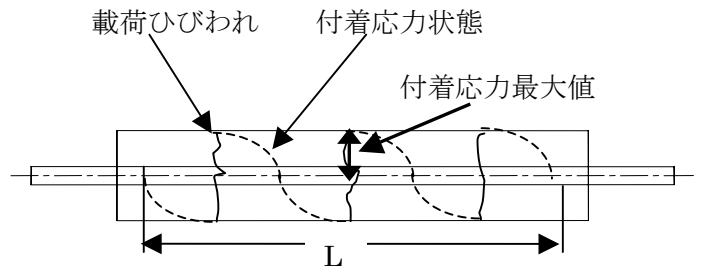


図-2 付着応力分布モデル

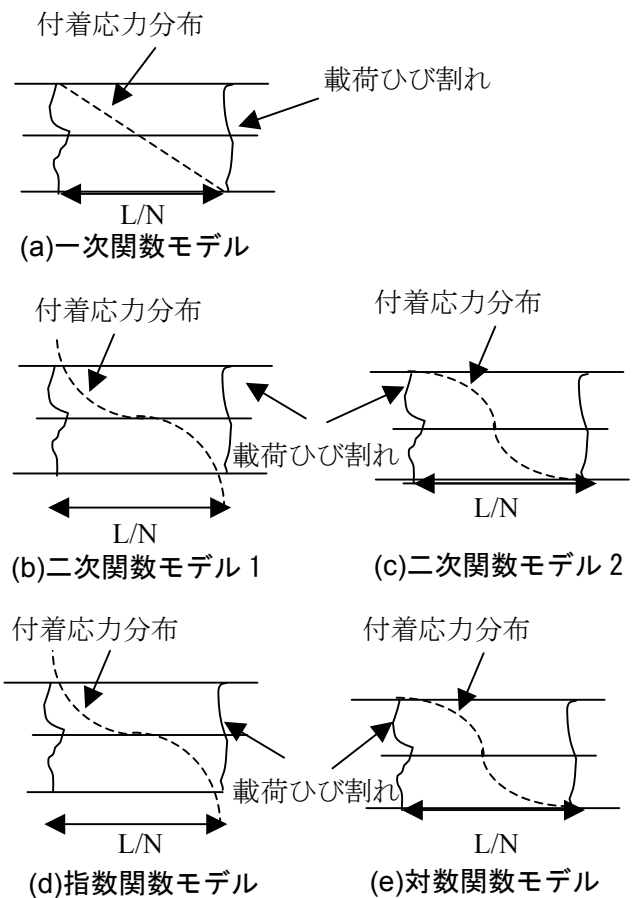


図-3 付着応力分布モデル

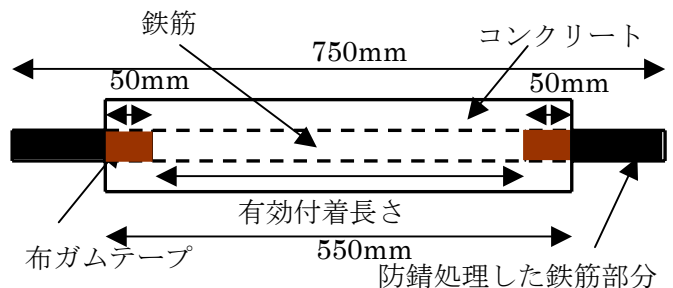


図-4 供試体概要

3. 実験概要

3.1 供試体概要

供試体の作成前に、鉄筋の質量測定を行った。通電性確保のため、細骨材置換として 5kg/m^3 の NaCl を混入し、打設した。外形寸法は $52\text{mm} \times 52\text{mm} \times 550\text{mm}$ とし、断面4辺の中央部に D19、 $\phi 19$ で長さ 750mm の鉄筋を配置した。端部 50mm の付着を除去するため、端部に幅 50mm の布ガムテープを巻き、有効付着長さを 450mm とした。以上の概要を図-4 に示す。なお、コンクリートは圧縮強度が 37.4N/mm^2 、引張強度 3.49N/mm^2 であった。

3.2 電食処理概要

鉄筋腐食の模擬は電食により行なった。鉄筋の突出部にリード線をハンダ付けした。突出部全体に防錆ペンキを塗り、ブチルゴムテープを巻くことにより突出部を防錆処理した。電食の陰極板として銅板を用いた。電食槽の電解溶液には $5\% \text{NaCl}$ 水溶液を使用した。供試体を電食槽に設置し、陽極を鉄筋に陰極を銅板に結線した。電流は直流電源装置を用いて鉄筋単位表面積 (1cm^2) あたり 1mA の電流を所定の時間通電した。また、丸鋼を用いた供試体では、供試体の陽極(鉄筋)と、陰極(銅板)の間の電位差をデータロガーを用いて計測した。電食の回路を図-5 に示す。

本研究では、積算電流量と腐食減少量の関係をファラデーの式から求めた。ファラデーの式を式(3)に示す。

$$W = \frac{Ait}{ZF} \quad (3)$$

ただし、W:腐食減少量理論値 (g), A:鉄の原子量(55.847g/mol), I:電流(A), t:通電時間(s), Z:鉄の原子価, F:ファラデー定数(96480C/mol) とする。通電時間は腐食減少量理論値を用いて設定した。異形鋼棒供試体は腐食減少率が 0% から 10%程度に設定した。丸鋼供試体は、腐食ひび割れ発生前の付着強度の変化を算出することを目的とした。電食では鉄筋表面積 1cm^2 あたり 10mg 以上腐食するとひび割れが発生するといわ

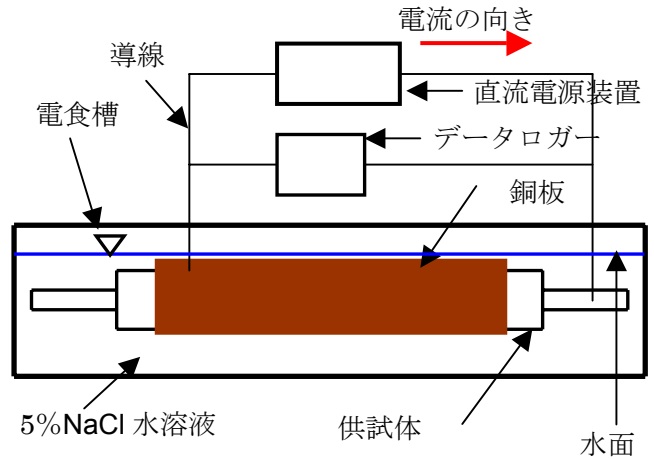


図-5 電食回路

表-1 異形鋼棒供試体通電時間

供試体本数	通電時間(h)	腐食減少率理論値(%)
3	0	0.00
3	13	0.36
4	26	0.72
3	39	1.08
4	52	1.45
3	78	2.18
3	104	2.91
3	156	4.39
3	209	5.88
4	263	7.39

表-2 丸鋼供試体通電時間

供試体本数	通電時間(h)	腐食減少率理論値(%)
4	0	0.00
3	3	0.08
3	6	0.16
3	9	0.25
3	12	0.34
3	15	0.42
3	18	0.51
3	21	0.59
3	24	0.67
3	30	0.84
3	336	9.44

れている¹⁾。これを参考に多くの供試体で腐食ひび割れが発生しないよう腐食減少率を設定した。異形鋼棒供試体の通電時間を表-1、丸鋼供試体を表-2 に示す。なお本研究では、腐食減少量を腐食減少量理論値で除した値を電食効率とすると 0.2~1.0 程度であった。

電食処理後、供試体軸方向に腐食ひび割れが発生した供試体は、クラックゲージを用いて供試体軸方向長さ 50mm 毎、計 10 箇所の腐食ひび割れ幅を計測し、平均することで腐食ひび割れ幅とした。

3.3 両引き試験概要

電食処理後，万能試験機に供試体を設置した。載荷速度は既往の研究⁶⁾を参考とし，5kN/分とした。載荷の終了は，鉄筋の降伏点とした。載荷装置停止後，変位を保ったまま，載荷ひび割れをマジックでトレースし，本数を測定した。

両引き試験終了後，鉄筋をはつりだし，60℃，10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液に24時間浸せきした。浸せき後，鉄筋を水洗いし，錆を除去した。乾燥後，重量測定を行い，腐食減少量を算出した。

4 実験結果および考察

4.1 付着強度の算出

図-6(a)に腐食なしの異形鋼棒供試体の載荷ひび割れの一例を示し，(b)には腐食ひび割れが発生した場合を示す。丸鋼供試体については同様にして図-7に示す。図は腐食ひび割れ発生面を正面とし左右面，背面の4面を表した展開図であり，点線は電食による腐食ひび割れ，実線が載荷ひび割れである。異形鋼棒供試体，丸鋼供試体ともに，母材コンクリート表面にほぼ等間隔に載荷ひび割れが発生した。これにより，本研究では局所的な付着力の差異がないと考えられ，有効付着長さを載荷ひび割れ本数で除した値を載荷ひび割れ間隔とした式(1)の仮定が適切であったと考えられる。

本研究の腐食なしの異形鋼棒供試体，丸鋼供試体に関して式(2)を用いて求めた各モデルの付着強度を表-3に示す。腐食なしの異形鋼棒供試体の付着強度は5.96~11.99N/mm²，腐食なしの丸鋼供試体では，2.81~5.71N/mm²となった。一方，健全な異形鋼棒を用いた既往の研究で，付着強度は付着応力すべり関係を使った両引き試験による研究⁶⁾では6.9N/mm²($f_c=41.7\text{N/mm}^2$)，RILEM法を用いた研究⁷⁾では8.0N/mm²($f_c=45\text{N/mm}^2$)という結果が得られている。健全な丸鋼を用いた供試体の付着強度に関する既往の研究⁸⁾では，付着強度が3.3N/mm²($f_c=41.7\text{N/mm}^2$)という結果が得られている。付着強度はコンクリート

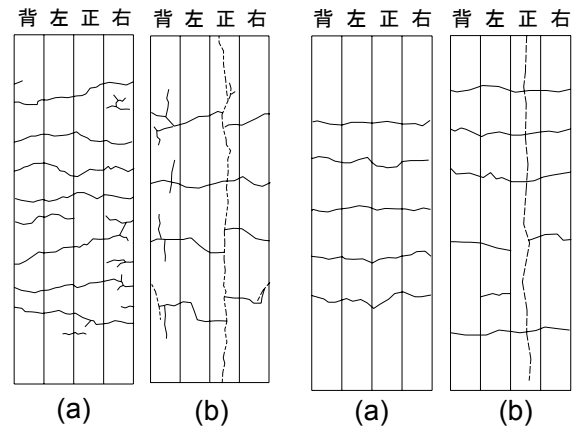


図-6 異形鋼棒供試体ひび割れ図

図-7 丸鋼供試体ひび割れ図

表-3 異形鋼棒供試体での各付着応力モデルを用いて求めた付着強度(N/mm²)

	一次関数	二次関数1	二次関数2	指数関数	対数関数
異形	7.99	11.99	5.96	10.80	7.01
丸鋼	3.77	5.71	2.81	5.09	3.37

強度に関係すると言われているが¹⁾，本研究で使用したコンクリートの圧縮強度(37.4 N/mm²)は既往の研究と概ね同様と考えられるため，本研究での付着強度は既往の研究の付着強度と同程度であると考えられる。表-3のうち既往の研究と同程度の付着強度となるのは，一次関数モデルと対数関数モデルである。本研究ではモデル化が簡易であることを考慮し，一次関数モデルを用いて付着強度を算出する。

本研究においては，腐食した供試体において，載荷ひび割れ間隔の最大値が腐食なしの丸鋼での値に近く，最小値が腐食なしの異形鋼棒での値に近いこと，ひび割れ間隔の長さの違いによる付着応力分布の形状の変化はないと考えられる。よって鉄筋腐食した供試体についても付着応力分布を一次関数分布として付着強度を算出する。

4.2 異形鋼棒供試体の付着強度比

本実験では，付着強度を電食なしの供試体の付着強度で除した値を付着強度比とした。異形鋼棒供試体の付着強度比と腐食減少率の関係を

図-8に、付着強度比と腐食ひび割れ幅の関係については図-9に示す。腐食減少率と付着強度比に関する既往の研究結果をまとめた報告¹⁾によると、腐食減少率が1~3%では、腐食生成物に起因したコンクリートと鉄筋の噛み合い効果により、付着強度比が1を上回ることがある。腐食減少率が1~3%以上となると腐食ひび割れが発生し、付着強度比は徐々に低下する。本研究では、付着強度比が1を上回ったケースが2体の供試体で確認された。しかし、腐食減少率に対する付着強度比の傾向としては、単調減少であると言える。これは、本研究では電食を行った異形鋼棒供試体全てに腐食ひび割れが発生しており、コンクリートと鉄筋の噛み合い効果が得られなかったことが原因と考えられる。

付着強度比と腐食ひび割れ幅の関係は、既往の研究と比較すると腐食ひび割れの増加に対する付着強度比の減少が緩やかであった。これは、既往の研究で算出された付着強度は片引き試験を用いた結果であり、本実験では両引き試験を用いていることによる違いであると考えられる。

4.3 丸鋼供試体の付着強度比

丸鋼を用いた供試体での付着強度比と腐食減少率の関係を図-10に示す。腐食ひび割れ幅と付着強度比の関係を図-11に示す。この結果より、丸鋼を用いた供試体では腐食減少率が1%以内では、付着強度は、鉄筋健全時の付着強度より大きくなり、腐食減少率が4%以上では、腐食ひび割れが発生しても鉄筋健全時の付着強度と同程度になることが確認された。これは、丸鋼の表面が腐食したことにより鉄筋表面の構造が粗くなり、鉄筋表面とコンクリート間に噛み合い効果が生じるからであると考えられる。

4.4 丸鋼と異形鋼棒との付着強度の比較

鉄筋腐食を生じた異形鋼棒供試体では、鉄筋表面の腐食や腐食ひび割れの発生により付着強度比の低下が見られることが確認された。異形鋼棒供試体の場合、鉄筋表面の性状により機械的付着が存在するが、鉄筋が腐食することによって機械的付着力が低下することが考えられる。

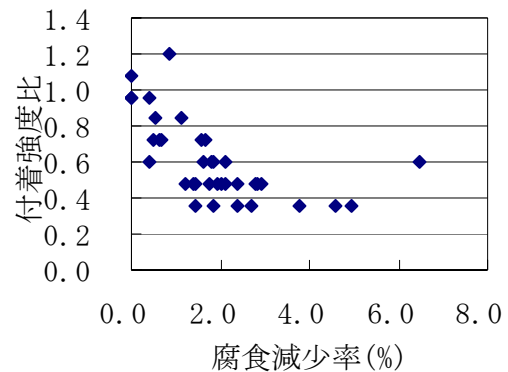


図-8 異形鋼棒供試体での腐食減少率と付着強度比の関係

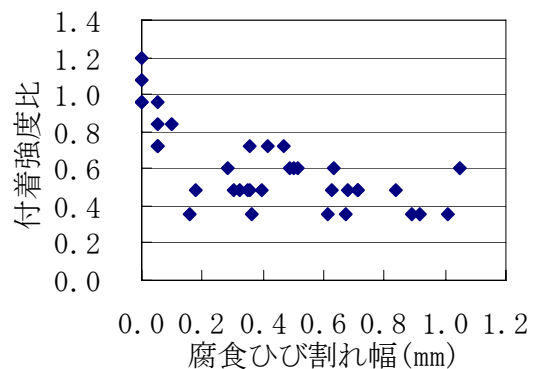


図-9 異形鋼棒供試体での腐食ひび割れ幅と付着強度比の関係

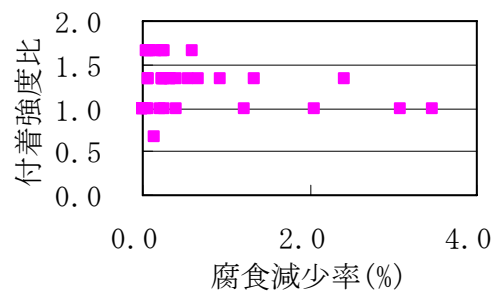


図-10 丸鋼供試体での腐食減少率と付着強度比の関係

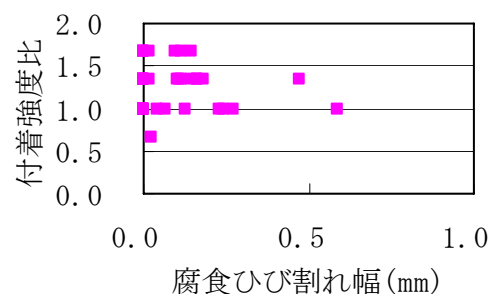


図-11 丸鋼供試体での腐食ひび割れ幅と付着強度比の関係

既往の研究では、異形鋼棒が腐食減少率 20%以上になると、リブが喪失し、機械的付着がなくなるとされている⁹⁾。そこで、鉄筋腐食した異形鋼棒供試体と丸鋼供試体の付着強度を比較することにより、異形鋼棒の機械的付着の減少について考察する。図-12 に丸鋼を用いた供試体の腐食減少率との関係と異形鋼棒を用いた供試体の腐食減少率と付着強度の関係を示す。この図より、本実験において鉄筋腐食減少率が 2%程度になると丸鋼と異形鋼棒の付着強度の差がなくなるとい結果が確認された。今実験では丸鋼供試体と異形鋼棒供試体の供試体寸法は変わらない。よって、本実験供試体では、腐食減少率が 2%程度で異形鋼棒供試体の機械的付着力の低下と丸鋼供試体の付着力の増加により異形鋼棒供試体の付着強度と丸鋼供試体の付着強度が同様になることが考えられる。

6 まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 両引き試験を用いて付着強度を算出する際、付着応力を載荷ひび割れ部で最大とした一次関数モデルを用いて付着強度の算出が可能であることが示された。
- (2) 異形鋼棒を用いた供試体において腐食減少率が増加するにつれて付着強度が減少する結果となり、既往の研究と同様の結果であった。しかし、腐食ひび割れ幅と付着強度の関係は、既往の研究と比較すると腐食ひび割れの増加に対する付着強度比の減少が緩やかであった。これは片引き試験と両引き試験の試験方法の違いであると考えられる。
- (3) 丸鋼を用いた供試体での付着強度比と腐食減少率の関係は、腐食減少率が 1%以内では、付着強度は、鉄筋健全時の付着強度より大きくなり、腐食減少率が 4%になっても鉄筋健全時の付着強度と同程度になることが確認された。
- (4) 本実験において鉄筋腐食減少率が 2%程度になると、丸鋼と異形鋼棒の付着強度の差がなくなるとい結果が確認された。

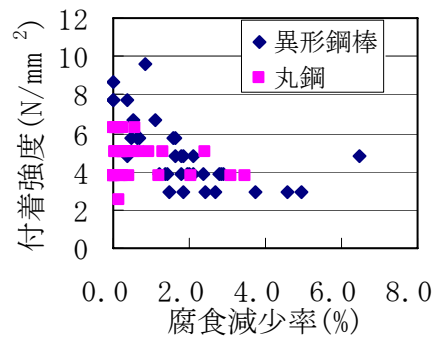


図-12 丸鋼と異形鋼棒の付着強度の比較

参考文献

- 1) 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：日本コンクリート工学協会，1998.10.
- 2) 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 13-1, pp.663-668 , 1991
- 3) 李 翰承，友澤 史紀，野口 貴文：鉄筋腐食が RC 単筋梁の耐力性能低下に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文，No.49 ， pp.732-737, 1995
- 4) 土木学会コンクリート標準示方書(構造性能照査偏)：土木学会，2002
- 5) 森田 司郎：コンクリートにおける付着とひび割れに関する研究，京都大学学位論文 ， 1967.4
- 6) 田村 二郎，河合 紘茲：両引き試験による鉄筋コンクリートのひびわれ分散性に関する研究，土木学会論文集，No.378/V-6 ， 1987.2
- 7) Mangat : Bond characteristics of corroding reinforcement in concrete beams Materials and Structures , Vol.32, March 1999, pp.89-97
- 8) 森田 司郎：鉄筋コンクリートにおける付着とひびわれ，コンクリートジャーナル，Vol.7 No.4 ， pp1-9 ， 1969.4
- 9) 李 翰承，友澤 史紀，野口 貴文：鉄筋腐食が鉄筋とコンクリートの付着性状に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集 ， No.50 ， pp534-539 ， 1996