

博士論文

引抜き試験における低強度コンクリートと丸鋼の
付着性状に関する研究

(Bond behaviors between low strength concrete and plain round bars
in pull-out tests)

2014 年 3 月

広島大学大学院工学研究科 建築学専攻
建築耐震工学研究室

洪 成

引抜き試験における低強度コンクリートと丸鋼の付着性状に関する研究

—目次—

第1章	序論	
1.1	本研究の背景と目的	1
1.2	既往の研究と本論文の位置付	2
1.2.1	低強度コンクリート	2
1.2.2	付着	3
1.2.3	エポキシ樹脂補修	5
1.3	本論文の構成	5
1.4	関係論文	7
	第1章の参考文献	9
第2章	単調引抜き試験	
2.1	はじめに	12
2.1.1	引抜き試験	12
2.1.2	過去の引抜き試験による最大付着応力度	13
2.1.3	付着応力度—抜け出し変位関係	14
2.1.4	本章の構成	15
2.2	実験概要	16
2.2.1	試験体	16
2.2.2	使用材料	18
①	コンクリート	18
②	鉄筋	19
③	エポキシ樹脂	19
2.2.3	載荷方法	20
①	加力方法	20
②	計測方法	20
2.2.4	補修方法	20
2.3	実験結果	22
2.3.1	付着強度	22
①	丸鋼・水平筋（上端）	22
②	丸鋼・水平筋（中央）	23
③	丸鋼・水平筋（下端）	25

④ 丸鋼・垂直筋	26
⑤ 異形鉄筋 (D13)	27
2.3.2 平均付着応力度－抜け出し変位関係	28
2.3.3 材齢と付着強度の関係	30
2.4 各変数が付着強度に与える影響	33
2.4.1 鉄筋位置,鉄筋径,コンクリート強度と付着強度の関係	33
2.4.2 水平筋,垂直筋と付着強度の関係	33
2.4.3 鉄筋種類と付着強度の関係	34
2.4.4 付着応力度－抜け出し変位関係の基準化	34
2.5 結論	37
第2章の参考文献	38
第3章 繰り返し引抜き試験	
3.1 はじめに	40
3.2 実験概要	41
3.2.1 試験体	41
3.2.2 載荷方法	41
3.2.3 使用材料	42
3.3 実験結果	44
3.3.1 付着強度	44
3.3.2 補修しない試験体の付着履歴性状	44
① 大振幅1回繰り返し載荷 (シリーズ1)	45
② 片振幅漸増繰り返し載荷 (シリーズ2)	45
③ 正負交番漸増繰り返し載荷 (シリーズ3)	46
3.3.3 補修した試験体の付着履歴性状	47
① 大振幅1回繰り返し載荷 (シリーズ1)	47
② 片振幅漸増繰り返し載荷 (シリーズ2)	47
③ 正負交番漸増繰り返し載荷 (シリーズ3)	48
3.4 実験考察	49
3.4.1 付着応力度の低減率	49
3.4.2 エネルギー吸収量	50
① 片振幅漸増繰り返し載荷	50
② 正負交番漸増繰り返し載荷	51
3.4.3 等価粘性減衰定数	53
3.5 結論	55
第3章の参考文献	56

第4章	復元力特性のモデル化	
4.1	はじめに	57
4.2	補修しない試験体のモデル曲線	59
4.2.1	単調包絡線	59
4.2.2	履歴特性	60
	① 履歴特性の包絡線	60
	② 正負繰り返し履歴特性	61
4.3	補修した試験体のモデル曲線	64
4.3.1	単調包絡線	64
4.3.2	履歴特性	64
	① 履歴特性の包絡線	65
	② 正負繰り返し履歴特性	67
4.4	提案したモデル曲線妥当性についての検討	70
4.4.1	付着応力度一抜け出し変位履歴関係	70
4.4.2	耐震性能	73
4.5	結論	77
	第4章の参考論文	78
第5章	局所付着応力度	
5.1	はじめに	79
5.2	実験概要	81
5.2.1	試験体	81
5.2.2	使用材料	83
5.2.3	載荷方法	84
5.2.4	鉄筋引張応力度,付着応力度及び相対抜け出し変位の計算方法	84
5.3	実験結果	86
5.3.1	引張荷重と付着力の関係	86
5.3.2	各載荷段階における鉄筋引張応力度,付着応力度の分布	87
	① O-A 領域	88
	② A-B-C 領域	89
	③ C-D-E 領域	90
	④ E-F-G と E'-F'-G' 領域	92
	⑤ 第2サイクル～6サイクル	92
5.3.3	局所付着応力度一相対抜け出し変位関係	94
5.4	実験考察	98
5.4.1	付着応力度分布の進展状況	98

5.5 結論	101
第 5 章の参考論文	102
第 6 章 結論	103
付録	108
謝辞	115

論文の要旨

題目：引抜き試験における低強度コンクリートと丸鋼の付着性状に関する研究
(Bond behaviors between low strength concrete and plain round bars in pull-out tests)

氏名 洪 成

1995年の兵庫県南部地震以後、全国的に既存建物の耐震診断・改修が行われ、その結果によると、既存建物の中には耐震診断基準の適用範囲として定められたコンクリート圧縮強度の下限值 13.5MPa を下回る低強度コンクリートが存在することが分っている。また、このような建物は主に 1970 年前後に建てられたもので、その多くに主筋として丸鋼が用いられている。主筋に丸鋼を用いた部材では付着劣化によるコンクリートからの抜け出し(付着滑脱)が主筋の降伏に先行して発生することが報告されている。付着力はコンクリート強度に大きく依存し、低強度コンクリート部材では更に付着滑脱しやすくなると考えられ、部材の曲げ強度確保が困難になることが予想される。

一方、主筋の付着滑脱が予想される柱部材の耐力評価法として、付着力に応じて低減される主筋の相関降伏曲線と無筋コンクリート断面の相関降伏曲線の一般化累加による曲げ終局強度式が提案されている。しかし、提案された推定法では丸鋼の付着強度を仮定する必要がある。現在丸鋼の付着力に関して提案されているものは無く、RC 規準の許容付着応力度式を便宜に用いているのが現状である。既存建物を精度よく耐震診断をするためには、低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状を把握する必要がある。

本研究はこのような背景を受けて、低強度コンクリートプリズムに丸鋼を埋設した試験体を用いて引抜き試験を実施することによって、コンクリートと丸鋼の付着特性を実験的に調べることが主たる目的である。また、低い丸鋼の付着力を改善する方法としてエポキシ樹脂を丸鋼回りに注入することによって、付着性能回復について検討している。また、今後の解析的検討に資するために実験で得られた付着履歴特性を回帰分析することで、そのモデル化を試みている。

本論文は第1章から第6章までで構成されており、各章の内容は以下のとおりである。

第1章「序論」では、丸鋼を主筋とした低強度コンクリート部材の研究背景および本研究の位置付けと目的を示している。

第2章「単調引抜き試験」では、低強度コンクリートプリズムに埋め込まれた丸鋼の単調引抜き試験を行っている。付着強度に影響を及ぼすものとしてコンクリート強度、鉄筋径、鉄筋の埋め込み位置、コンクリート打設方向、鉄筋の種類、コンクリート材齢などを変数として取り上げ、それらの付着強度及び付着応力度－抜け出し変位関係を相互に比較し、低強度コンクリート中の丸鋼の付着性能に対する影響を調べている。また、

付着性能改善を目指して、微小変位を与えて固着力を喪失させた試験体にエポキシ樹脂注入で補修し、その付着力上昇効果について検討している。それらの結果では、低強度コンクリート中の丸鋼の付着強度は異なる鉄筋の埋め込み位置による明確な違いが見られた。また、付着応力度－抜け出し変位関係は本論文で採用している変動因数にあまり影響を受けず、補修をしない丸鋼試験体における曲線関係の特性点は Abrams の提案例とほぼ対応していることを述べている。

第3章「繰り返し引抜き試験」では、第2章と同様なコンクリートプリズム試験体を用いて、変位制御で繰り返し引抜き試験を行っている。載荷履歴の影響に加えて、鉄筋径、コンクリート強度等の各変数が復元力特性に与える影響について検討している。また、前章と同様、エポキシ樹脂注入した試験体の付着履歴性状の改善状況についての検討も行っている。それらの結果では、付着強度以降の付着応力度の低下率は繰り返し回数が多いほど大きい。また、エポキシ樹脂注入は付着履歴性状に大きな影響を与えており、部材の耐力、エネルギー吸収能力の上昇に著しく有効であることを述べている。

第4章「復元力特性のモデル化」では、既往の異形鉄筋の付着履歴モデルを参考にして、第2章、第3章で実験的に得られた付着応力度－抜け出し変位履歴特性の各基準点を回帰分析することによって、復元力特性のモデル化を試みている。第3章で述べたエポキシ樹脂補修による付着応力度－抜け出し変位履歴に大きな違いがあるため、補修の有無によって分けてモデル曲線を提案している。最後に、提案したモデル曲線の妥当性について、実験結果と比較して検証している。結果では、モデル曲線は実験曲線とほぼ一致しているが、繰り返しによる鉄筋とコンクリート間の摩擦力の劣化が顕著な大変形領域においては十分に追跡できていない部分も見られることを報告している。

第5章「局所付着応力度」では、丸鋼内部にひずみゲージを貼付することによって、鉄筋表面の付着性状を乱すことなく繰り返し引抜き時における付着応力度分布を調べている。変動要因は鉄筋の付着長とコンクリート打設方向である。最後に、エポキシ樹脂を注入した丸鋼の付着応力度分布状況を検討している。付着長が $10d \sim 20d$ (d : 鉄筋径) の水平筋の引張応力度分布および付着応力度分布性状の推移を把握する。付着長が $5d$ の短い試験体はコンクリートと鉄筋の接触面積が小さいため鉄筋への拘束力が小さく、他の試験体と異なっている。実験結果から繰り返し載荷時の各載荷段階における付着応力度の推移を説明している。一方、局所付着応力度－相対抜け出し変位曲線のループ性状は全体の付着応力度－抜け出し変位曲線とほぼ同じであることを示している。

第6章「結論」では論文全体の総括を行い、今後の展望と課題を述べている。

第 1 章 序論

第1章序論

1.1 本研究の背景と目的

1995年の兵庫県南部地震以後、「耐震改修促進法」が施行されたことにより、全国的に既存建物の耐震診断・改修が行われている。耐震診断の結果によれば、既存建築物の中には耐震診断基準¹⁾の適用範囲として定められたコンクリート圧縮強度の下限値 13.5MPa を下回る 10MPa 程度の低強度であるもの（以下、低強度コンクリートと記す）が存在することがわかっている²⁾。現在、耐震診断基準の適用範囲外である低強度コンクリートの鉄筋コンクリート（以下 RC）部材に対して、現行の耐力・剛性等の評価式を適用できる確証は得られていない。しかしながら、低強度コンクリートで造られた建物も現行の評価式を準用し、診断・改修しているのが現状であり、低強度コンクリート部材の抵抗機構に基づいた適切な性能評価法の確立が急務となっている。

このような背景によって低強度コンクリートを用いた RC 部材の耐力や変形能力についての研究が鋭意進められているが、それらの研究³⁾では、コンクリート強度の影響を強く受ける RC 部材のせん断耐力の評価を主な課題としており、これまで曲げ耐力については、既往の曲げ略算式によって適正に評価できると考えられてきた。しかし、低強度コンクリート建物は主に 1970 年前後に建てられたもので、その多くに主筋として丸鋼が用いられている。主筋に丸鋼を用いた場合、丸鋼の付着劣化によるコンクリートからの抜け出し（付着滑脱）が主筋の降伏に先行して発生することは既に知られているところである⁴⁾。付着力はコンクリート強度に大きく依存し、低強度コンクリートの部材では更に付着力が小さくなることが想定され付着劣化が起こり易い。従来設計法で曲げ破壊先行型に設計された柱試験体においても実験値が曲げ耐力計算値に達しない事例や、せん断破壊先行型とされた柱試験体においてもせん断破壊せず、部材端部において圧縮側コンクリートの圧壊により最大耐力・破壊形式が決定されるケースが報告されている⁵⁾。写真 1-1-1 は研究室で行った耐震診断基準によるせん断耐力/曲げ略算耐力=0.83 の柱の最終破壊状況である⁵⁾。せん断補強筋比 $p_w=0.15\%$ であるが、試験体中央部にはせん断ひび割れは見られず、柱上下端部の



せん断破壊先行型
 断面 $b \times D$: 300mm \times 300mm
 柱内法高さ h : 900mm
 シアスパン比 : $M/QD=1.5$
 コンクリート強度 σ_B : 11.5MPa
 せん断補強筋比 p_w : 0.15%
 主筋 : 8-13 ϕ
 軸力比 η : 0.3

写真 1-1-1 せん断破壊先行型試験体の破壊性状⁵⁾

コンクリート圧壊によって破壊形式が決定している。主筋の付着滑脱が予想される柱部材に対する耐力評価法として、付着力に応じて低減される主筋部分の相関降伏曲線とコンクリート断面の相関降伏曲線の一般化累加による曲げ終局強度式が提案されている⁶⁾。これによると鉄筋の抜け出しが先行する抵抗機構に基づいて終局強度を推定出来ると報告している。しかし、提案された推定法では丸鋼の付着強度を仮定する必要がある。文献⁶⁾では付着強度として1991年版の鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（以下RC規準）⁷⁾にある丸鋼の短期許容付着応力度を使用している。しかしながら、この付着許容応力度にしても低強度コンクリートに対するものでなく、少なくとも1958年に改訂されたRC規準にある13.5MPa以上のコンクリートに対するものである。従って、低強度コンクリート部材の性能を把握するためには低強度コンクリート中に配筋された丸鋼の付着力特性を知る必要がある。丸鋼の付着特性についてはおよそ数十年前の付着の研究が始められた頃にその情報をみることができるのが現状である。近年になって既存鉄筋コンクリート建物の問題が顕在化する中で、日本では南ら³⁾を中心に研究が進められているが、日本以外でもFeldman⁸⁾、Verderame⁹⁾らによって丸鋼の付着特性について普通強度のコンクリートではあるが研究が再開されるようになってきている。

本研究は上記のような背景を受けて、コンクリートプリズム（詳細は第2章の実験概要を参考にされたい）に丸鋼を埋設した試験体を用いて引抜き試験を行うことによって、低強度コンクリートと丸鋼の付着特性を実験的に調べることが主たる目的である。また、低い付着力を改善する方法としてエポキシ樹脂を鉄筋まわりに注入することによって、付着性能回復について検討を行っている。さらに、今後の解析的検討に資するために実験で得られた付着履歴特性を回帰分析することで、そのモデル化を試みている。

尚、樹脂注入工法は注入カプセルが2重構造のスプリング加圧力を有し、加圧状態で締固め（硬化）出来る機能を持っており、この点に特徴を有するものである。

1.2 既往の研究と本論文の位置付

1.2.1 低強度コンクリート

図1-2-1に中国地方の竣工年別のコンクリートの推定圧縮強度の関係を示す¹⁰⁾。コンク

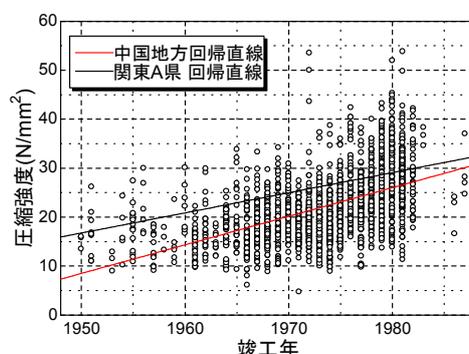


図 1-2-1 竣工年別コンクリートの推定圧縮強度¹⁰⁾

リートの需要が高まった1950年代後半から1970年代前半にかけて耐震診断基準の下限値である13.5MPaを下回る建物が集中して存在しており、その割合は全体の6.1%程度に及んでいる。これらの主な原因としては高度経済成長期におけるコンクリート需要の高騰により、コンクリートの生産効率を優先させたこと、また量産体制をとったことでコンクリート材料の不足による品質の悪化などに起因するものと考えられる¹¹⁾。図中には文献²⁾より参照した関東A県における学校校舎の推定圧縮強度の回帰直線を示す。赤線は中国地方、黒線は関東A県における学校校舎のコンクリート推定圧縮強度の回帰曲線である。図中の回帰直線を比較すると、中国地方の回帰直線は関東A県の回帰直線を前領域で下回る結果となった。その理由は明確ではないが、施工における熟練度やコンクリートの使用骨材などに違いがあるためと考えられている。そこで低強度コンクリート建物の性能評価方法の確立を目的として、低強度コンクリート部材を用いて構造実験を行い既往の耐力評価式、主としてせん断耐力の検討がなされている^{12)~17)}。その成果として山本等¹²⁾が提案したせん断強度評価式(荒川式)に低減係数を用いてせん断耐力をほぼ評価できることが示されている。一方、曲げ破壊先行型の部材の破壊形式は付着滑脱となる場合があることが示されている。主筋は曲げ降伏しないため部材は設計耐力を発揮できないことになる。低強度コンクリートとなると付着強度が低下するため鉄筋とコンクリート間での力の伝達が出来なくなっていることを示している。

このような背景を受けて、本研究ではコンクリート設計強度7MPaから9MPaのコンクリートプリズムに丸鋼を埋設した試験体を作成して、引抜き試験を実施した。低強度コンクリートの作成方法は水セメント比だけで調合設計している。比較のために18MPaの普通強度のコンクリート試験体の引抜き試験も行っている。

1.2.2 付着

異形鉄筋と丸鋼の付着抵抗機構は基本的に異なる。異形鉄筋の場合は鉄筋表面のふしとコンクリートが機械的に噛み合うことによって鉄筋に発生する引張力、圧縮力をコンクリートに伝達しているのに対し、丸鋼は鉄筋表面とコンクリート間に存在する固着力(Adhesive bond resistance)によって鉄筋に発生している力をコンクリートに伝達している。固着力喪失後は摩擦力(Frictional bond resistance or Sliding resistance)によって伝達している。以後は丸鋼の付着性状に注目して既往の研究について検討する。付着特性に関する研究は古くから行われており、初期の学術的研究では実験を中心とするAbrams¹⁸⁾のものが代表例としてあげられる。図1-2-2に引抜き荷重方法を転載する。Abrams¹⁸⁾の研究は初期のものとはいえ幅広い実験を行っている。変数としては鉄筋径、付着長さ、加力方法、打設方向、コンクリート強度、鉄筋位置、鉄筋種類、コンクリート養生条件などを取り上げている。付着力を評価する方法としては鉄筋に与える荷重を鉄筋がコンクリートに接する面積で除した平均付着応力度(Average Bond Stress)で基準化し、変位については図に示すように荷重側と反対側の鉄筋自由端部の変位量を計測して抜け出し変位(Slip Length of

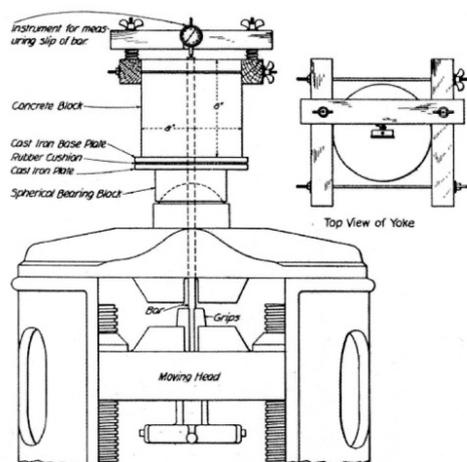


FIG. 3. PULL-OUT SPECIMEN IN MACHINE READY FOR TEST.

図 1-2-2 Abrams の引抜き試験¹⁸⁾

Bar)としている。コンクリートは普通強度を使用しているが材齢を変数とした実験も実施している。材齢とともに強度上昇し、それに伴い付着力も上昇することが示されている。一方、丸鋼の付着力はコンクリート強度ばかりでなく、鉄筋の配置にも大きく依存するとされている。特に横架材上端部の鉄筋下部はブリージング水がたまり易く、付着力が低下すること、上端筋でなくても水平筋と垂直配置された鉄筋との相違があることが示されている。

一方、日本では Abrams¹⁸⁾の研究が行われた直後の 1916 年に茂庭¹⁹⁾によって国外の主だった付着に関する研究例が紹介されている。その後、森垣²⁰⁾が鉄筋の付着強度を確認する試験を実施している。吉田²¹⁾は水平筋と垂直筋の付着強度が異なっていることに着目し実験を実施している。その後、許容付着応力度として日本土木学会²²⁾で 5.5kg/cm^2 、日本建築学会²³⁾で 7kg/cm^2 (異形鉄筋は 10kg/cm^2) を提示している。1958 年に日本建築学会では設計基準強度 F_c の下限値として 135kg/cm^2 が明記されることになるが、それまでは設計基準強度としては許容付着応力度の記述のみであった。日本建築学会では 1950 年代から加藤²⁴⁾、佐治²⁵⁾、狩野²⁶⁾らによって付着に関する実験が行われるようになる。しかし、いずれも普通強度のコンクリートを対象とし、佐治²⁵⁾の研究を除き異形鉄筋の付着性状を主な検討対象としている。その後多くの付着に関する研究が実施されているが、この傾向は変わっていない。

低強度コンクリートを対象とする引抜き試験は荒木²⁷⁾、八十島²⁸⁾らによって進められているが十分とは言えない状況である。日本では診断・改修の対象となる丸鋼を使用した建物には低くても 13.5MPa 以上の設計基準強度が設定されている。低強度コンクリートと判定された建物を耐震改修していくためには、 13.5MPa 以下の低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状に関して明らかにしておく必要がある。

本研究では Abrams¹⁸⁾が行った引抜き試験と同様の加力方式を採用して低強度コンクリ

ートプリズム中に埋設した丸鋼の付着強度について検討を行った。また、部材の繰り返し載荷実験では鉄筋が抜け出すことにより、耐力の確保が難しいことばかりでなく、その復元力特性が極端なスリップ性状となり、耐震性能上問題であると指摘されている³⁾。本研究では一方向引抜き試験だけでなく、Verderameら⁹⁾が行ったように引抜き力を繰り返し載荷することでその影響も調べている。一方、これまで研究の多くは平均付着応力度を対象としているのに対して、本研究ではFeldmanら⁸⁾が行った研究のように低強度コンクリートプリズム中における丸鋼の付着応力度の分布状況を実験的に調べている。

1.2.3 エポキシ樹脂補修

日本では被災した建物の復旧技術としてエポキシ樹脂による補修方法があり、1978年の宮城県沖地震で被災した建物の補修²⁹⁾に使用されたのをはじめとして、日米共同研究³⁰⁾、それに続いて行われた総合プロジェクト研究³¹⁾において開発推進されてきた。その結果、得られた結論としては、補修前後で同じ破壊形式で破壊するものは損傷前の耐力をほぼ回復できることなどが挙げられている。一連の研究の中で主筋に丸鋼を使用した滝口ら³²⁾、犬飼ら³³⁾の研究は貴重なものである。特に滝口ら³²⁾の研究は比較的低強度のコンクリートの試験体を用いて実験を行い、高い補強効果（耐力上昇）が得られることを示している。しかし、これらの研究ではエポキシ樹脂注入に際して、損傷を受けたコンクリートをすべて除去し高強度のモルタルを使用し断面補修したものに再加力を行っている。その結果、抵抗機構が変化するとともに、耐力が上昇することが報告されている。しかし、このような抵抗機構の変化や耐力上昇に対してエポキシ樹脂および補修モルタルがどのような割合で影響しているのか、あるいは鉄筋の付着力上昇がどのような影響を与えたかについては明確には言及されていない。永山ら³⁴⁾が行った梁の載荷実験では付着滑脱によって生じたひび割れにエポキシ樹脂を注入し、再加力すると初期載荷に比べ耐力が著しく上昇することが報告されている。これは主筋の付着力が上昇することで、付着滑脱を防止し、そのことが部材耐力の上昇に大きく寄与すると考えられる。

本論文ではエポキシ樹脂を鉄筋周りに注入することによって、丸鋼の付着性能がどのように上昇するのかを確認することも目的の一つである。

1.3 本論文の構成

本論文では第1章序論から第6章結論までである。

第1章では本論文の背景と目的を述べた。

第2章「単調引抜き試験」は低強度コンクリートで製作されたコンクリートプリズムに埋め込まれた丸鋼の単調引抜き試験を行い付着応力度一抜け出し変位量を抽出し、考察を加えている。考慮した変数はコンクリート強度、鉄筋に対するコンクリートの打設方向、プリズム内での位置、鉄筋径であり、それらの最大付着応力度（付着強度）に対する影響

を調べている。付着性能改善を目指してエポキシ樹脂注入も行い、その付着力上昇効果についても検討を加えている。

第3章「繰り返し引抜き試験」は第2章と同様な試験体を用いて変位制御で繰り返し引抜き試験を行っている。載荷履歴の影響やコンクリート強度等の各変数が復元力特性に与える影響について検討している。エポキシ樹脂注入の効果も検討している。

第4章「復元力特性のモデル化」では異形鉄筋の付着履歴特性のモデル曲線を参考にして、第2章、第3章で実験的に得られた付着応力度－抜け出し変位特性の各基準点を回帰分析することによって、復元力特性のモデル化を試みている。実験結果と比較することによって提案したモデル曲線の妥当性について検討した。

第5章「局所付着特性」では鉄筋内部にひずみゲージを貼付することによって鉄筋に沿った付着応力度分布を調べている。特に、繰り返し引抜き力を受けることによる付着応力度分布の推移について抵抗機構と結び付けて検討した。

第6章「結論」では各章で得られた成果を要約し、本研究の結論とし、今後の課題と展望を述べてまとめとしている。

1.4 関係論文

A. 論文発表

- 1) 荒木秀夫, 吉田俊太郎, 洪成, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果; コンクリート工学年次論文報告集, 第32巻, 第2号, pp.883-888, 2010
- 2) 洪成, 荒木秀夫: 繰り返し荷重下の低強度コンクリートと丸鋼の付着性状に関する研究; 日本建築学会技術報告集, 第18巻, 第38号, pp.171-176, 2012
- 3) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼部材の履歴付着特性のモデル化; コンクリート工学年次論文報告集, 第34巻, 第2号, pp.589-594, 2012
- 4) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: エポキシ樹脂補修による丸鋼付着履歴特性のモデル化; コンクリート工学年次論文報告集, 第35巻, 第2号, pp.511-516, 2013
- 5) 洪成, 荒木秀夫: 繰り返し荷重下での丸鋼と低強度コンクリート間の付着応力度分布に関する研究; 日本建築学会技術報告集, 第20巻, 第45号, pp.557-562, 2014

B. 国際会議論文

- 1) Cheng HONG and Hideo Araki : Bond-Slip Relationship between Low Strength Concrete and Plain Round Bar under Reversal Loadings ; Proceedings of 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, CD, No.1072, 2012
- 2) Cheng HONG and Hideo ARAKI : Study on Hysteretic Bond Mechanisms of Plain Round Bar; Proceedings of The 3rd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Kyoto, CD, No.139, 2013
- 3) Cheng HONG and Hideo ARAKI : Empirical Models for Hysteretic Bond Behaviors of Plain Round Bars, fib Congress, Mumbai, CD, No.27, 2014

C. 口頭発表(筆頭者が口頭発表)

- 1) 洪成, 荒木秀夫, 吉田俊太郎: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度 (その1: 丸鋼の付着強度), 日本建築学大会学術講演概集, 構造IV pp.105-106, 2010
- 2) 荒木秀夫, 洪成, 吉田俊太郎: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度 (その2: エポキシ樹脂注入の補修効果), 日本建築学大会学術講演概集, 構造IV pp.107-108, 2010
- 3) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: 繰返し荷重を受ける丸鋼と低強度コンクリートの付着力の履歴特性に関する研究, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第35巻 2012.3
- 4) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: 繰返し荷重を受ける低強度コンクリートと丸鋼の付着特性, 日本建築学大会学術講演概集, 構造IV pp.73-74, 2011
- 5) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着履歴についてのモデル化, 日本建築学大会学術講演概集, 構造IV pp.131-132, 2012
- 6) 洪成, 荒木秀夫: エポキシ樹脂補強による丸鋼部材の付着履歴性能, 日本建築学会中国支部研究報告集 第35巻 2013.3
- 7) 洪成, 荒木秀夫, 加川順一: エポキシ樹脂注入による丸鋼付着履歴に関するモデル化, 日本建築学大会学術講演概集, 構造IV pp.451-452, 2013

D. その他

- 1) 洪 成 ; 各繰り返し荷重を受ける丸鋼の付着性能とその補修効果, 2010 年度広島大学
大学院博士課程前期 修士論文 指導教員 荒木秀夫

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2001年改定版既存鉄筋コンクリート建築物の耐震診断基準・同解説, 2001.1
- 2) 坂巻健太, 広沢雅也, 清水泰, 周建東：既存鉄筋コンクリート造建築物のコンクリート強度に関する研究(その1)設計基準強度の変遷および圧縮強度の分布, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.801-802, 2001.9
- 3) 日本コンクリート工学協会中国支部；低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書, 2009.2
- 4) 広沢雅也：鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究(その49：破壊モードについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.1509-1510, 1977.10
- 5) 荒木秀夫, 伊木勇人：主筋に丸鋼を用いた低強度コンクリート部材の耐震性能評価, 日本建築学会技術報告集, 第17巻, 第35号, pp.167-170, 2011年2月
- 6) 上田洋一, 他3名：低強度コンクリートの建物に対するRC巻き立て工法と鋼板内臓コンクリート補強工法の併用補強に関する実験的研究(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.649-650, 2010.9
- 7) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1991
- 8) Lisa R. Feldman and F. Michael Bartlett：Bond stress along plain steel reinforcing bars in pullout specimens, ACI Structural Journal, November-December, pp.685-692, 2009
- 9) GM Verderame, P Ricci, G De Carlo, G Manfredi (2009)：Cyclic bond behaviour of plain bars. Part I: Experimental investigation. Construction and Building Materials 34 3499-3511 Part II: Analytical investigation. Construction and Building Materials 34 3512-3522, 2009
- 10) 吉本侑生：中国地方の学校校舎の耐震性能について, 2012年度広島大学工学研究科 修士論文
- 11) 益尾潔, 木村芳幹, 大野義照：一般地域の既存建物と地震被害建物におけるコンクリートの圧縮強度, コンクリート工学年次論文報告集, 第21巻, 第2号, pp.673-678, 1999
- 12) 山本泰稔：地震と補強—耐震改修における低強度コンクリートの問題点, 第30回建築士事務所全国大会埼玉大会分科会, pp.77-91, 2005.9
- 13) 永坂具也, 大川善丈：コンクリートが特に低強度な場合のRC柱のアラミド繊維テープによる巻き付け補強(その1～その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造IV, pp.375-378, 2006.9
- 14) 伊藤嘉則, 榎谷榮次, 沢崎詠二：種々の方法で耐震補強された低強度コンクリートRC柱の補強効果, 日本建築学会構造系論文集, 第613号, pp.97-104, 2007.3
- 15) 田才晃, 雨宮牧子, 帆足勇磨, 増田安彦：低強度コンクリートRC柱の炭素繊維シートによる補強効果に関する実験的研究(その1～その4), 日本建築学会大会学術講演梗概

- 集, C-2, 構造 IV, pp.495-502, 2007.8
- 16) 谷口博亮, 八十島章, 荒木秀夫: 低強度コンクリート RC 梁の耐力評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, 第 30 巻, 第 3 号, pp.265-270, 2008.7
 - 17) 根口百世, 川上裕佳, 高月行治, 南宏一: 10N/mm² 級の低強度コンクリートを用いた RC 柱のせん断破壊性状, コンクリート工学年次論文集, 第 30 巻, 第 3 号, pp.1129-1134, 2008.7
 - 18) Duff A. Abrams: Tests of bond between concrete and steel, Published 1913 by University of Illinois in Urbana, 1913
 - 19) 茂庭忠次郎: 鉄筋と混凝土の付着強度に就て, 土木学会誌, 論説報告, 第 2 巻第 6 号, pp.1505-1593, 1916.12
 - 20) 森垣龜一郎: 鉄筋混凝土に関する試験報告, 土木学会誌, 論説報告, 第 6 巻第 6 号, pp.971-1029, 1920.12
 - 21) 吉田徳次郎: 新しい混凝土の沈下と鋼と混凝土との粘着強度, 土木建築画報, 第 6 巻第 4 号, pp.3-9, 1930.4
 - 22) 土木学会: 鉄筋コンクリート標準示方書, 1931.6
 - 23) 建築学会: 鉄筋コンクリート構造設計規準 (第二讀會案), 1933.7
 - 24) 加藤六美: 異形鉄筋コンクリートの付着, 日本建築學會研究報告, 第 12 号, pp.179-182, 1951.6
 - 25) 佐治泰次: 附着強度に関する研究 (その 1 - 主として附着強度とコンクリート強度の関係について), 日本建築學會研究報告, 第 21 号, pp.339-320, 1953.3
 - 26) 狩野春一, 仕入豊和: 生コンクリートの沈下による鉄筋附着強度の減少と二三の対策: 普通 A.E. 軽量コンクリートに就て, 日本建築學會論文集, 第 49 号, pp.34-41, 1954.9
 - 27) 荒木秀夫, 吉田俊太郎, 洪成, 加川順一: 低強度コンクリートと丸鋼の付着強度とその補強効果; コンクリート工学年次論文報告集, 第 30 巻, 第 2 号, pp.883-888, 2010.7
 - 28) 八十島章: 低強度コンクリート部材の付着性状に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 第 33 巻, 第 2 号, pp.613-618, 2011.7
 - 29) 今井弘, 近藤実, 横山晶好: 地震被害を受けた宮城県泉高等学校の補修・補強方法とその裏付け, コンクリート工学, 第 17 巻, 第 10 号, pp.9-22, 1979.10
 - 30) 関口秀治, 中田慎介, 川島俊一: RC 梁柱部材のエポキシ樹脂注入による補修効果に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造系, pp.1631-1632, 1982.10
 - 31) 岡田恒男, 広沢雅也, 他: -総合プロジェクト・鉄筋コンクリート造震災構造物の復旧技術の開発-(その 1)~(その 13), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.2173-2198, 1983.9
 - 32) 滝口克己, 市之瀬敏勝, 他: 丸鋼を用いた RC 柱の被災度及び補修効果に関する実験 1 実験目的・方法-総合プロジェクト・鉄筋コンクリート造震災構造物の復旧技術の開発 (その 14~16) 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, pp.2141-2146, 1984.10, (そ

の29) ,pp.65-66, 1985.10

- 33) 犬飼瑞郎, 田才晃, 小谷俊介, 青山博之: 丸鋼を用いた鉄筋コンクリート柱の復旧に関する研究(その1, せん断抵抗に関する考察), 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp.503-504, 1987, (その2, 補修方法の検討), pp.337-338, 1988.10
- 34) 永山正幸, 八十島章, 加川順一, 荒木秀夫: エポキシ樹脂注入による既存 RC 梁の補修効果; コンクリート工学年次論文報告集, 第30巻, 第3号, pp.1615-1620, 2008.7

第 2 章 単調引抜き試験

第2章 単調引抜き試験

2.1 はじめに

コンクリート中における鉄筋の付着性状に関しては序章でも述べたとおり Abrams(1913)¹⁾の実験的研究をはじめとして約 100 年の歴史を有している。日本国内の学術研究としては吉田(1930)²⁾が同様の装置を用いて引抜き実験を実施しているのが最初と思われる。吉田²⁾の実験と前後して 1933 年に日本建築学会から RC 規準³⁾が刊行され、その中に許容付着応力度 7kg/cm^2 (この時点で長期、短期の区別はない) の記述が初めて出てきている。この値は外国におけるそれまでの研究成果を基にしたと考えられる。その後、日本では 1954 年までこの許容付着応力度が採用されている(詳しくは付録の許容付着応力度の変遷を参照にされたい)。1950 年代から加藤ら^{4),5)}によって付着の研究が本格的に始まる。それ以降、鉄筋⁶⁾やコンクリートの種類⁷⁾、鉄筋の配置⁸⁾、施工方法⁹⁾が付着性能に与える影響を調べるために数多くの研究が行われるようになる。これは使用材料や施工方法などが時代とともに改善されてゆく過程で付着強度を調べ、許容付着応力度との関係を確認する必要が出てきたためと思われる。その中で丸鋼を使用し、若材齢コンクリートの引抜き試験を行っている滝本ら⁹⁾の研究は本研究に関連する貴重なものといえる。本論文で参考としている丸鋼の付着に関する研究はほぼこの時期のもので 1950~1960 年代の古いものとなっている。1960 年代以降の研究は異形鉄筋の普及とともに普通強度コンクリート中における異形鉄筋の付着割裂破壊(Bond split failure)が主な研究対象となってゆく。丸鋼の抜け出し破壊(Bond slip failure)に対する研究は殆ど見られなくなる。付着割裂破壊では鉄筋の節によるコンクリートの支圧破壊がその主たる抵抗機構であるが、丸鋼の抜け出し破壊は丸鋼表面とコンクリートの固着力と固着力喪失後の摩擦力がその抵抗因子であるため、コンクリート材料の性能、施工状況に大きく影響を受ける。従って、低強度コンクリートとなる原因として考えられている加水行為や風化セメントの使用は丸鋼の付着性能に大きな影響を与えていることは容易に想像できる。既存建物で問題となっている低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状を新たに調べなおすことは、低強度コンクリート部材の付着滑脱破壊等の抵抗機構を解明するために重要であると考えられる。

2.1.1 引抜き試験

鉄筋の付着性状を調べる方法としては様々なものが提案されている。研究初期の Abrams¹⁾ や吉田²⁾ の研究では単純な引抜き試験が行われている。序論の図 1-2-2 に示すように一般的な材料試験機(アームスラー万能試験機)を用いて、プリズム試験体に挿入した鉄筋を引き抜くことは最も簡便にかつ多くの実験を実施することができるためと思われる。この引抜き試験はコンクリート試験体に圧縮力が作用するなど、そのまま設計に用いるには様々な制約があるが、コンクリート強度や鉄筋位置などの各種変数に関する相互比較には適しているとされる¹⁰⁾。この方法は図 2-1-1 に示すように日本国内ばかりでなく世界中

表-1 標準引抜き着試験法

規格	日本コンクリート工学協会 引抜き試験方法案	ASTM C 234	RILEM	CP 110	建研試験センター (JMC 委員会案)																																																																
項目	異形鉄筋の付着性能比較	コンクリートの特性が付着強度 に与える影響	異形の異形鉄筋の付着性能の比較	異種の異形鉄筋の付着性能の比較	異種の異形鉄筋の付着性能の比較																																																																
供試体 寸法	 <table border="1"> <tr><td>$d_b \sim$</td><td>B cm</td><td>L cm</td><td>D cm</td></tr> <tr><td>$d_b < 16 \text{ mm}$</td><td>10×10</td><td>10</td><td>8~10</td></tr> <tr><td>$19 < d_b < 29$</td><td>15×15</td><td>15</td><td>12~15</td></tr> <tr><td>$d_b > 32$</td><td>20×20</td><td>20</td><td>16~20</td></tr> </table>	$d_b \sim$	B cm	L cm	D cm	$d_b < 16 \text{ mm}$	10×10	10	8~10	$19 < d_b < 29$	15×15	15	12~15	$d_b > 32$	20×20	20	16~20	 <table border="1"> <tr><td></td><td>B cm</td><td>L cm</td></tr> <tr><td>D 19</td><td>15×15</td><td>15</td></tr> </table>		B cm	L cm	D 19	15×15	15	 <table border="1"> <tr><td></td><td>B cm</td><td>L cm</td></tr> <tr><td></td><td>$10 d_b$</td><td>$5 d_b$</td></tr> </table>		B cm	L cm		$10 d_b$	$5 d_b$	 <table border="1"> <tr><td></td><td>B cm</td><td>L cm</td><td>D cm</td></tr> <tr><td>$d_b \leq 20$</td><td>15×15</td><td>$f_y d_b$</td><td>14.5</td></tr> <tr><td>$d_b > 20$</td><td>25×25</td><td>28</td><td>24.5</td></tr> </table>		B cm	L cm	D cm	$d_b \leq 20$	15×15	$f_y d_b$	14.5	$d_b > 20$	25×25	28	24.5	 <table border="1"> <tr><td>呼び名</td><td>一回の長さ</td><td>付着長</td><td>非付着長</td></tr> <tr><td>D 16</td><td>10</td><td>6.4</td><td>3.6</td></tr> <tr><td>D 25</td><td>15</td><td>10.2</td><td>4.8</td></tr> <tr><td>D 32</td><td>20</td><td>12.7</td><td>7.3</td></tr> <tr><td>D 41</td><td>25</td><td>16.5</td><td>8.5</td></tr> <tr><td>D 51</td><td>30</td><td>20.3</td><td>9.7</td></tr> </table>	呼び名	一回の長さ	付着長	非付着長	D 16	10	6.4	3.6	D 25	15	10.2	4.8	D 32	20	12.7	7.3	D 41	25	16.5	8.5	D 51	30	20.3	9.7
$d_b \sim$	B cm	L cm	D cm																																																																		
$d_b < 16 \text{ mm}$	10×10	10	8~10																																																																		
$19 < d_b < 29$	15×15	15	12~15																																																																		
$d_b > 32$	20×20	20	16~20																																																																		
	B cm	L cm																																																																			
D 19	15×15	15																																																																			
	B cm	L cm																																																																			
	$10 d_b$	$5 d_b$																																																																			
	B cm	L cm	D cm																																																																		
$d_b \leq 20$	15×15	$f_y d_b$	14.5																																																																		
$d_b > 20$	25×25	28	24.5																																																																		
呼び名	一回の長さ	付着長	非付着長																																																																		
D 16	10	6.4	3.6																																																																		
D 25	15	10.2	4.8																																																																		
D 32	20	12.7	7.3																																																																		
D 41	25	16.5	8.5																																																																		
D 51	30	20.3	9.7																																																																		
コンクリートの 品質	$f_c' = 300 \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$ スランプ=8±2 cm	—	$f_c' = 300 \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$	$f_{c28} = 300 \sim 375 \text{ kgf/cm}^2$ (立方体強度)	$f_c' = 300 \pm 30 \text{ kgf/cm}^2$ スランプ 10±2 cm																																																																
養生	21±3°C 水中養生	23±1.7°C 湿度状態	20°C 60% RH	—	20±3°C 水中																																																																
材令	28 日	28 日	28 日	—	28 日																																																																
個数	3 個	3 個	3 表面形状に対して大中小3種の径について25個。同一条件で5個	6 個	3 個																																																																
荷重速度	3 t/min 以下	2.3 t/min 以下	$5 d_b^3 \text{ kgf/sec}$	0.5 fy/min	500 kgf/cm ² /min																																																																
加圧板穴径	10×10×10……2.5 cm 15×15×15……4.0 cm 20×20×20……5.5 cm	—	2 d_b	—	2 d_b																																																																
測定事項 結果の報告	自由端すべり 基準すべり量 0.05, 0.10, 0.25 mm において基準鉄筋に対する 付着応力比を示す。	自由端すべり, 荷重端すべり 荷重端すべり量 0.25 mm 以下 で等間隔5点の平均付着応力 により評価	自由端すべり $\tau = 0.0637 \frac{P}{d_b^2} \frac{300}{f_c'}$	自由端すべり	自由端すべり, $\tau = \frac{P}{4\pi d_b^2} \frac{300}{f_c'}$ (自由端すべり量が 0.002 d_b において $\tau > 30 \text{ kgf/cm}^2$ 最大付着 応力度は 80 kgf/cm ² 以上)																																																																
鉄筋位置	水平筋	鉛直筋 加圧面にキャッピング 水平筋	水平筋	鉛直筋 加圧面にゴム板また は合板	水平筋																																																																

図 2-1-1 標準引抜き試験方法¹⁰⁾

で標準化されており、本論文ではこの引抜き試験方法を採用している。丸鋼の抜け出しによる付着性状を対象としているためコンクリートプリズム試験体に割裂防止筋は配筋していない。抜け出し変位は図 2-1-1 に示す日本コンクリート工学協会、ASTM 等の指針を参考に載荷側と反対の鉄筋自由端部の変位を計測している。

2.1.2 過去の引抜き試験による最大付着応力度

1960 年代に行われた代表的な丸鋼の引抜き試験結果について、コンクリート強度と最大付着応力度（以下、付着強度）の関係を再掲したものが図 2-1-2、図 2-1-3 である。図 2-1-2

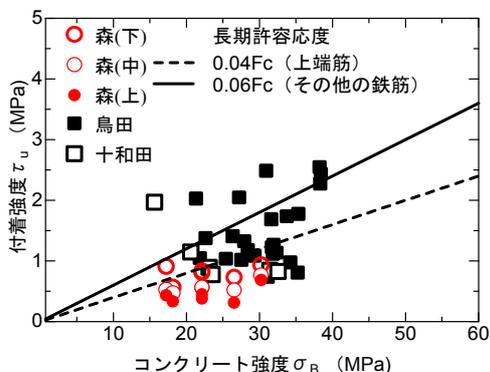


図 2-1-2 水平筋の付着応力度^{11)~13)}

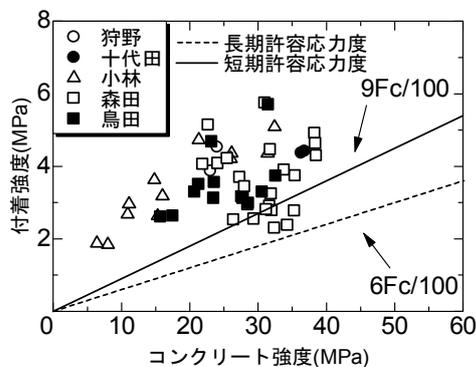


図 2-1-3 垂直筋の付着応力度^{13)~17)}

は付着長 150mm, 鉄筋 13φ の試験体を用いた研究^{11)~13)}について示したものである。ここでは鉄筋を水平に配置してコンクリートを打設した水平筋の付着強度を採用している。また, 図中に 1971 年代の RC 規準に示される上端筋及びそれ以外の長期許容付着応力度式も挿入した。森ら¹²⁾の研究では試験体幅は 150mm であるが高さを 450mm とし, 鉄筋位置を上中下 3 段にして, 鉄筋下面位置からのコンクリートの厚さについて検討している。鉄筋下のかぶりコンクリート厚さが大きくなるほど付着強度が下がることがわかる。これは鉄筋下部のコンクリートの厚さが大きくなるとブリージング水が鉄筋下面に溜り易くなるためである。最も低いものは 0.5MPa を下回っている。十和田¹⁴⁾, 鳥田¹⁶⁾の実験値を同図中に示すが, いずれの値も大きくばらついており, しかも長期許容付着応力度の値を下回っているものが多い。同じ付着長 150mm で鉄筋を垂直にしてコンクリートを打設した垂直筋の付着強度を取り出したものを図 2-1-3 に示す^{13)~17)}。図中に上端筋以外の長期及び短期許容付着応力度式も挿入した。すべての垂直筋の付着強度は長期許容付着応力度を上回っている。また, コンクリート強度が大きくなると, 付着強度も大きくなる傾向が見られる。しかし森田¹⁶⁾の研究から得られた結果はばらつきが大きいため, そのような傾向が明確でない。垂直筋の試験体の付着強度は水平筋と比べ, 明らかに高くなることが分かる。

以上の研究の多くは普通コンクリートを対象としたものであり, 10MPa 以下の低強度コンクリートは小林らの研究⁵⁾に見られるが, 若材齢で特殊コンクリート(鉄鋼スラグセメントによるコンクリート)を対象としており, 通常のコンクリートとは言い難い。低強度コンクリートに関するデータは僅かであり, 低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状を明らかにする必要があると思われる。

2.1.3 付着応力度—抜け出し変位関係

本研究の目的の一つは第 4 章の付着履歴特性のモデル化であり, 付着強度ばかりでなく,

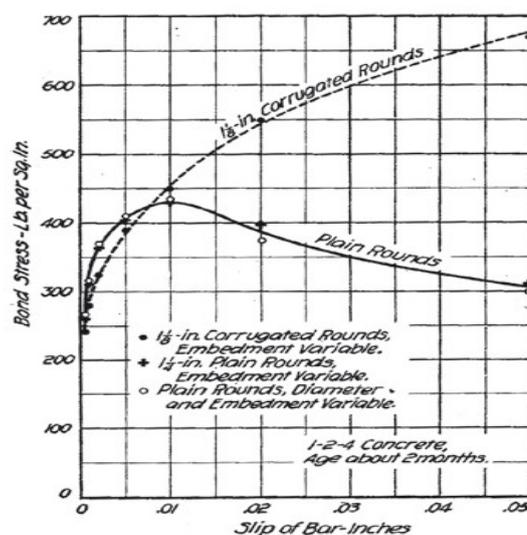


図 2-1-4 Abrams の研究¹⁾ (τ -S 関係)

抜け出し変形に応じた付着応力度の変化についても本論文で解明したい点である。このことについて Abrams¹⁾は引抜き実験から得られた付着応力度—抜け出し変位 (以下 τ -S 関係) に基づいて、丸鋼とコンクリート間の付着抵抗メカニズムを2段階に分類してモデル化を図っている。図 2-1-4 に代表例を転載する。

- 1) 鉄筋とコンクリート間の純粋な固着力で抵抗する(Adhesive bond resistance)。
- 2) 鉄筋とコンクリート間に相対変位が生じ、鉄筋とコンクリート間の摩擦力で抵抗する(Frictional bond resistance or Sliding resistance)。

図中の実線を見ると、初期においては付着応力度が増大しても、鉄筋自由端に抜け出し変位は発生しない。ある付着応力度に達すると鉄筋自由端に抜け出し変位が発生し始める。Abrams¹⁾はほぼ 0.01 inch (0.254mm)の変位になると付着強度に達するとしている。その後、抜け出し変位の増大により、付着応力度は徐々に低下する。

本論文では付着強度ばかりでなく、単調引抜き試験による τ -S 関係についても検討する。

2.1.4 本章の構成

本章では低強度コンクリート中に配置した丸鋼の「**単純引抜き試験**」を行い、その付着性状を検討している。検討した変数は以下のとおりである。

コンクリート設計強度：Fc7, Fc9, Fc18

鉄筋：丸鋼 (13φ, 19φ) 異形鉄筋 (D13)

鉄筋位置：上 (上端鉄筋を想定⇒鉄筋下に 30cm 以上のコンクリート厚さ), 中, 下

付着長：5d, 10d, 15d (d：鉄筋径)

鉄筋配置：水平, 垂直

材齢：1週～52週

補修：エポキシ樹脂注入の有無

既往の実験結果からもわかるように付着性状はばらつきが非常に大きい。そのため個々の変数につき3体以上を基本として引抜き試験を実施している。

2.2 実験概要

2.2.1 試験体

本章では付着強度に影響を及ぼすものとしてコンクリート強度，鉄筋径，鉄筋の埋め込み位置，コンクリート打設方向，鉄筋の種類，コンクリート材齢などを変数として取り上げ，それらの付着強度を相互に比較するとともに，エポキシ樹脂による補修を行って，付着性能の改善について検討した。低強度コンクリート試験体および普通強度コンクリート試験体一覧を表 2-2-1 及び表 2-2-2 に示す。また，試験体詳細図を図 2-2-1 に示す。同じ変数をもつ試験体においてもばらつきが大きいいため，それぞれ 2～8 個の試験体を用意した。補修は建物が中小地震を経験したことを想定して，鉄筋とコンクリートの固着力が喪失するとされる一定の変位を与え(0.2mm)，一旦除荷した後にエポキシ樹脂の注入を行った。

表 2-2-1 低強度コンクリート試験体一覧

試験体名	試験体数	呼び強度	断面(mm)	位置	付着長	鉄筋	主筋方向	補修
HR13-9-N	8	Fc9	150×150	中央	10d	13φ	水平	—
HR13-9-R	5			—				
HR13-9-NT	6		150×382	上端				—
HR13-9-RT	2			—				
HR13-9-NB	6			下端				—
HR13-9-RB	3							—
HR19-9-N	8		150×150	中央	19φ	—		
HR19-9-R	5			—				
HR19-9-NT	6		150×382	上端				—
HR19-9-RT	3			—				
HR19-9-NB	6			下端				—
HR19-9-RB	3							—
HR13-7-N	8	Fc7	150×150	中央	15d	13φ	—	
HR13-7-R	5			—				
HR13-7-NT	6		150×382	上端			—	
HR13-7-RT	3			—				
HR13-7-NB	6			下端			—	
HR13-7-RB	3						—	
HR19-7-N	7		150×150	中央	19φ	—		
R19-7-H-R	4			—				
HR19-7-NT	5		150×382	上端			—	
HR19-7-RT	3			—				
HR19-7-NB	6			下端			—	
HR19-7-RB	3						—	
VR13-9-N	8	Fc9	150×150	中央	10d	13φ	—	
VR13-9-R	5					—		
VR19-9-N	8					19φ	—	
VR19-9-R	5						—	
HD13-9-N	6				5d	D13	水平	—
HD13-9-R	3						—	
VD13-9-N	4					垂直	—	
VD13-9-R	2						—	

表 2-2-2 普通強度コンクリート試験体一覧

試験体名	試験体数	呼び強度	断面	位置	付着長	鉄筋	主筋方向	補修
HR13-18-N	8	Fc18	150×150	中央	15d	13φ	水平	—
HR13-18-R	5			—				
HR13-18-NT	6		150×382	上端				—
HR13-18-RT	3			—				
HR13-18-NB	6			—				
HR13-18-RB	3			—				

ここで、付着長は鉄筋径の 5d, 10d, 15d (d : 鉄筋径) とした。コンクリートプリズム試験体は 150×150×300mm を基本としている。鉄筋位置に関する試験体の断面は 150×382mm としている。鉄筋位置は図 2-2-1 に示すようにプリズムの中央に鉄筋を埋め込んだ基本試験体とコンクリートの上下に鉄筋を配置した試験体を用意した。低強度コンクリートの基準設計強度（呼び強度）は 7MPa および 9MPa である。丸鋼には 13φ および 19φ (SR245) を用いた。異形鉄筋には D13(SD295) を用いている。異形鉄筋の場合も割裂防止筋を入れていない関係上、コンクリート断面の中央に鉄筋を配置した付着長 5d の試験体のみとしている。コンクリートの打設方向の影響を調べるため、付着長 5d の試験体及び付着長 10d について、鉄筋を垂直に配置した試験体を用意している。コンクリート強度が付着強度を及ぼす影響を調べるために、Fc18 の普通コンクリート試験体の引き抜き試験を行っている。プリズム試験体形状は低強度コンクリートのものと同じである。鉄筋は丸鋼 13φ

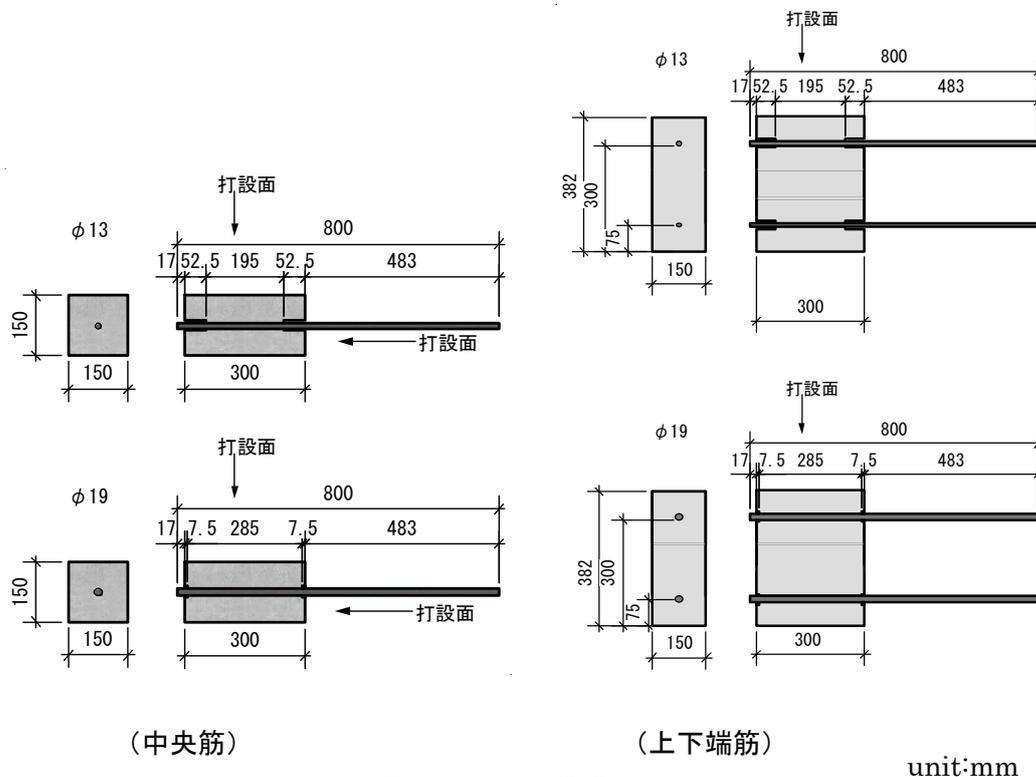


図 2-2-1 基本試験体詳細

のみである。なお、鉄筋端部についてはコンクリート表面が鉄筋の抜け出しにつれて変形することを防止するため、コンクリート端部に深さ 7.5mm 以上の溝を設けている。付着長はこの長さを考慮して設定されている。すべての変数につきにエポキシ樹脂補修を行っている。

2.2.2 使用材料

① コンクリート

低強度コンクリートは試験練り後に調合計画を決定している。普通強度コンクリートは生コン工場の標準調合である。各コンクリートの調合計画および、フレッシュ特性をそれぞれ表 2-2-3, 表 2-2-4 に示す。

それぞれのコンクリートの力学的特性を調べるために直径 100mm, 高さ 200mm の円柱供試体を作成して圧縮試験及び引張試験を実施した打設 28 日後と載荷試験後に材料試験を行った。供試体は現場封緘養生とした。試験体は室内での気中養生である。圧縮試験では

表 2-2-3 コンクリート調合計画

呼び強度	単位量 (Kg/m ³)					水セメント比 (%)
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	
Fc7	154	215	941	861	1.54	140
Fc9	195	215	923	864	1.95	110
Fc18	269	215	892	892	2.69	80

表 2-2-4 コンクリートのフレッシュ特性

呼び強度	スランプ (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
Fc7	18.0	5.1	25.0
Fc9	18.0	4.8	22.0
Fc18	15.1	4.3	21.0

表 2-2-5 コンクリートの力学特性

呼び強度	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_T (MPa)	ヤング係数 E_C (GPa)	圧縮強度ひずみ ϵ (μ)
Fc7	5.24	0.49	8.23	3229
Fc9	7.65	0.85	12.7	2305
Fc18	15.00	1.78	23.21	2118

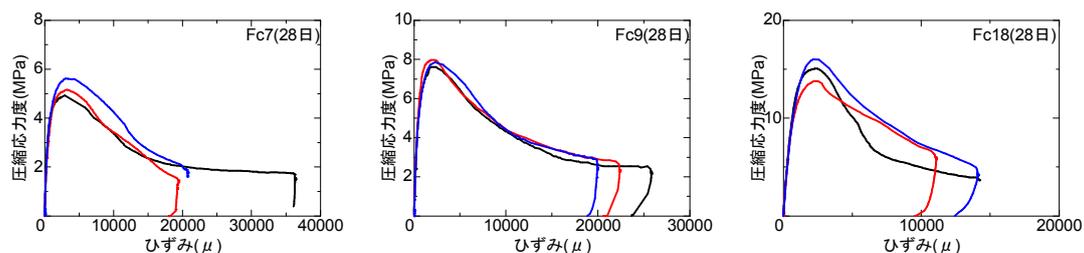


図 2-2-2 コンクリートの圧縮応力度—ひずみ関係

コンプレッソメーターを用い、圧縮強度 σ_B 、ヤング係数 E_c を求めた。コンクリートの力学特性については表2-2-5に示す。

材齢4週のコンクリートの圧縮応力度－ひずみ関係を図2-2-2に例示する。また、圧縮試験は引抜き試験終了後にも行っているが材齢4週のものとは大きな差は見られなかったためここでは割愛する。また、図2-2-2に示す圧縮応力度－ひずみ関係において2種類の低強度コンクリートに大きな相違はなく、最大耐力以降、徐々に耐力低下することが見られた。最大2000 μ までひずみ計測出来ている。このような傾向は既往研究¹⁸⁾に示されるものと同じであり、低強度コンクリート特有のものである。

② 鉄筋

本実験で使用した丸鋼13 ϕ 、19 ϕ 、異形鉄筋D13の材料試験として、それぞれ3本ずつ引張試験を行った。鉄筋の力学特性を表2-2-6に示す。表中の値はそれぞれの平均値である。得られた鉄筋の引張応力度－ひずみ関係を図2-2-3に示す。

表 2-2-6 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)	降伏ひずみ ϵ (μ)
13 ϕ	269	367	147	1853
19 ϕ	233	328	150	1566
D13	271	398	147	2083

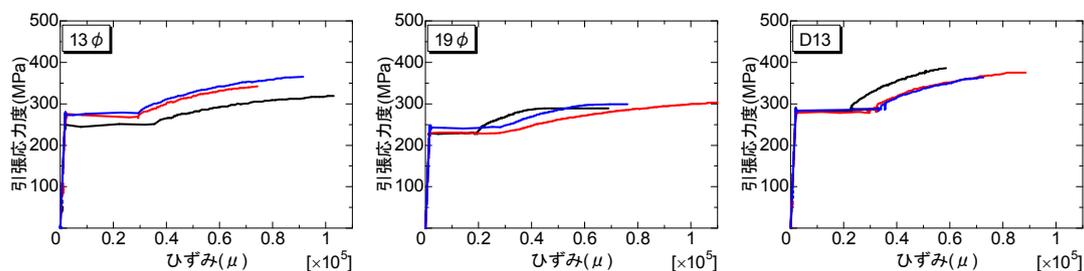


図 2-2-3 鉄筋の引張応力度－ひずみ関係

③ エポキシ樹脂

本実験で使用したエポキシ樹脂の材料特性を表 2-2-7 に示す。なお、表中の値はカタログのデータを記載したものである。エポキシ樹脂は 0.2mm 以下の微細なひび割れにも注入可能な超低粘度である。スプリングを用いて低圧で注入することによって固着力喪失後の鉄筋とコンクリートの間にエポキシ樹脂を注入可能である。湿潤面にも良く硬化し、硬化樹脂は無収縮で高物性を示す。

表 2-2-7 エポキシ樹脂の材料特性

	曲げ強度 (MPa)	圧縮強度 (MPa)	付着強度 (MPa)
エポキシ樹脂(E-396H)	58.8	83.3	6.0~

2.2.3 載荷方法

① 加力方法

鉄筋の付着強度を求める試験は引抜き試験、押ぬき試験、梁曲げ試験等あるが、本実験ではできるだけ簡便に丸鋼の平均付着応力度を求めることを目的とし、既往の研究でも多用されている引抜き試験方法を採用することとした。試験体を設置した状態の載荷装置全体図を図 2-2-4 に示す。センターホールジャッキ (SLP-505, オックスジャッキ) を用い、ロードセル (KCM-50KNA, KCM-100KNA, 東京測器研究所) を介して鉄筋に引張力を与えて載荷を行う。その反力はコンクリートに圧縮力として作用することになる。また、ジャッキと試験体との間には球座を設置し、鉄筋に曲げ荷重が加わらないようにしている。また、自由端側は試験体の下側にアンカーボルトを取り付けて、このアンカーボルトにセットした変位計 (CDP-25, ストローク 25mm, 感度 500 μ /mm, 東京測器研究所) によって自由端変位の測定を行う (引抜き試験装置は付録の写真を参考にされたい)。

② 計測方法

本実験では、引張荷重、鉄筋の抜け出し変形について測定を行う。

- (1) 引抜き荷重 センターホールジャッキに取り付けたロードセルを用いて測定した。
- (2) 引抜き変位 試験体の底面に取り付けた変位計で鉄筋の抜け出し変位を測定した。

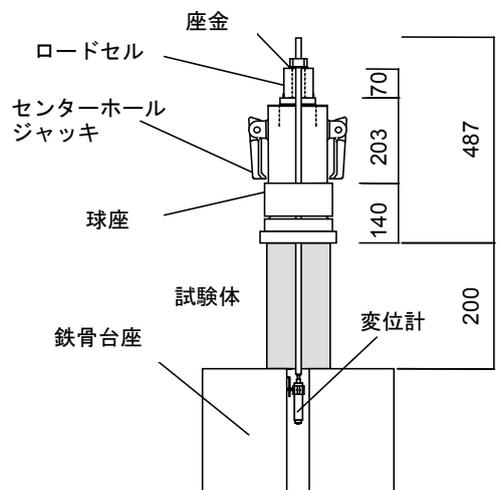


図 2-2-4 載荷装置全体図

2.2.4 補修方法

補修は載荷により丸鋼では 0.2mm、異形鉄筋の場合は 3mm 引抜いた後にエポキシ樹脂を注入した。この引抜き変位は付着強度を経験させるためのものである。以下に内圧充填エポキシ樹脂注入工法による補修方法を記す。ここでは鉄筋を中央に配置した試験体はコンクリート打設面以外の 3 方面からエポキシ樹脂を注入した。

- ① 試験体に注入ポイントをマーキングするため寸法を測る。(写真 2-2-1)

- ② マーキングしたポイントをφ7.0mmで穿孔する。(写真2-2-2) 穿孔深さは鉄筋位置までとして行った。
- ③ 注入ポイントに台座を取り付ける。注入材の漏れ防止のためにシールを塗る。(写真2-2-3)
- ④ エポキシ樹脂の入ったカプセルを台座に取り付け 0.06MPa の低圧で注入する。(写真2-2-4) 注入圧はカプセル内のスプリングによっている。また、カプセルが透明で注入状況や樹脂残量、使用量が目視により確認できる。なお、カプセル中に樹脂が残っている加圧状態で、衝撃や振動を与えないように1~2日養生硬化させる。
- ⑤ 養生完了後カプセルを取り除き、コンクリート表面の台座を取り外して補修完了となる。



写真 2-2-1 マーキング



写真 2-2-2 穿孔



写真 2-2-3 台座セット



写真 2-2-4 エポキシ樹脂注入

2.3 実験結果

2.3.1 付着強度

実験から得られた荷重は付着領域での付着応力度を一様として式2-3-1で求める平均付着応力度として基準化した。また、自由端で計測されるすべり量は鉄筋とコンクリート間のすべり変位とする。すなわち、自由端と載荷端におけるすべり量の差は無視し、付着領域で一定のすべりが生じているものとした。

$$\tau_B = \frac{P}{\phi \cdot L} \tag{2-3-1}$$

ここで P :引抜荷重(N) ϕ :鉄筋の周長(mm) L :付着長(mm)

① 丸鋼・水平筋（上端）

図2-3-1に丸鋼13φ、19φで水平上端筋（鉄筋下に300mm以上のコンクリート厚さがあるもの）の付着強度を示す。図中に上端筋の1971年RC規準に示される長期(0.04Fc)と短期許容付着応力度(0.06Fc)式を挿入した。HR13-7-NTの付着強度が0.08~0.13MPa, HR13-7-NTが0.03~0.09MPa, HR13-9-NTが0.02~0.14MPa, HR19-9-NTが0.02~0.23MPa, HR13-18-NTが0.21~0.35MPaに分布している。低強度コンクリートの試験体においてはコンクリート強度が大きくなるにつれて付着強度が上昇する傾向は明確に見られず、殆どの付着強度は0~0.2MPa以下の非常に低い範囲に分布している。そのすべての値は上端筋の長期許容付着応力度(0.04Fc)を下回っている。図2-1-2に示す森ら¹²⁾の研究における上端筋の付着強度はコンクリート圧縮強度17~30MPaで付着強度0.3~0.7MPaとなっており、本実験結果と同様の性状を示している。普通強度コンクリートの付着強度は低強度コンクリート試験体より大きい、すべての値において長期許容付着応力度を下回っている。一方、低強度コンクリートの試験体において鉄筋径の違いによる付着強度の相違は明確に見られなかった。低強度コンクリートの場合水セメント比が110%と非常に大きく上端筋の場合はブリージングの影響を受けやすく鉄筋下面の空隙が大きくなり、そのため得られる付着強度も極めて小さくなるものと思われる。図2-3-2にエポキシ樹脂注入

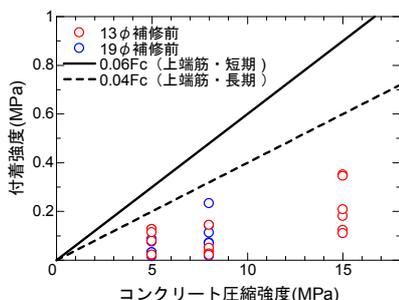


図 2-3-1 丸鋼・上端筋の付着強度

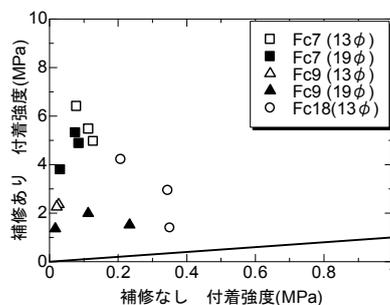


図 2-3-2 丸鋼・上端筋の補修効果

の補修効果を示す。横軸は補修前の0.2mmまで引抜いた時の付着強度である。この時点で耐力低下は確認している。縦軸は同一試験体においてエポキシ樹脂注入後、再度引抜いた時の付着強度である。縦軸と横軸の違いに注意されたい。図に示すように、補修した試験体において、付着強度は大きく上昇していることが分かる。HR13-7-RTの付着強度が4.9～6.4MPa、HR19-7-RTが3.8～5.3MPa、HR13-9-RTが2.2～2.4MPa、HR19-9-RTが1.4～2.0MPa、HR13-18-RTが1.4～4.2MPaに分布している。

表2-3-1に各試験体の付着強度一覧を示す。表中の回復率では補修前後の付着強度の割合である。ここで、最大付着強度は各シリーズの平均値を示している。鉄筋径が小さいほど補修による回復率が大きくなる傾向にある。これは鉄筋径が小さいものほど鉄筋下の空隙が相対的に大きいと考えられ、エポキシ樹脂がそれだけ鉄筋周りに充填され、付着強度が上昇したものと推察される。また、コンクリートが低強度になればなるほど回復率は大きくなる。回復率が大きくなっているのは補修しない試験体の付着強度が非常に低いため、その回復率の大きさにあまり意味はない。コンクリート調合において水セメント比が大きいほど、コンクリートの沈み込みやブリージングが大きく、鉄筋下面の空隙も大きくなり、鉄筋周囲により多くのエポキシ樹脂が注入されたと考えられる。また、普通強度コンクリートの場合も大きな回復率を示している。

表 2-3-1 上端筋の付着強度

試験体名	鉄筋	呼び強度	付着強度 τ_b (MPa)[n]*	短期許容付着 応力度 f_b (MPa)	回復率 (倍)
HR13-7-NT	13φ	Fc7	0.08[6]	0.33	70
HR13-7-RT			5.61[3]		
HR19-7-NT	19φ		0.05[5]		97
HR19-7-RT			4.66[3]		
HR13-9-NT	13φ	Fc9	0.05[6]	0.46	40
HR13-9-RT			2.02[2]		
HR19-9-NT	19φ		0.11[6]		15
HR19-9-RT			1.62[3]		
HR13-18-NT	13φ	Fc18	0.21[6]	0.90	13
HR13-18-RT			2.85[3]		

*[n]内は試験体数

② 丸鋼・水平筋（中央）

図2-3-3に中央筋配置の付着強度を示す。Fc7のHR13-7-N(R)、HR19-7-N(R)、Fc9のHR13-9-N(R)、HR19-9-N(R)、および、Fc18のHR13-18-N(R)である。図中に中央筋に対応する長期と短期許容付着応力度式を挿入した。HR13-7-Nの付着強度が0.09～0.38MPa、HR19-7-Nが0.02～0.29MPa、HR13-9-Nが0.17～0.40MPa、HR19-9-Nが0.47～0.76MPa、HR13-18-Nが0.10～0.42MPaに分布している。

Fc7の付着強度は上端筋と同じように、全ての値はブリージングの影響を強く受けて

0.2MPa以下であり、鉄筋径における違いはあまり見られなかった。一方、Fc9の場合は、鉄筋径による明確な違いが見られた。既往の研究では鉄筋径による差異はあまり報告されていない。

13φにおいて、コンクリート強度が大きくなるに従って付着強度が上昇する傾向は明確に見られない。普通強度コンクリートでは細径の鉄筋の付着強度は変わらないことがある。付着強度はほぼ長期許容付着応力度(0.06Fc)以下である。19φの場合はコンクリート強度の上昇とともに付着強度の上昇が見られる。図2-3-4にエポキシ樹脂注入の補修効果を示す。図2-3-4に示すように、エポキシ樹脂補修の効果が確認できる。HR13-7-Rの付着強度が4.8~7.8MPa、HR19-7-Rが4.5~6.4MPa、HR13-9-Rが1.6~2.0MPa、HR19-9-Rが1.0~1.9MPa、HR13-18-Rが2.9~4.6MPaに分布している。

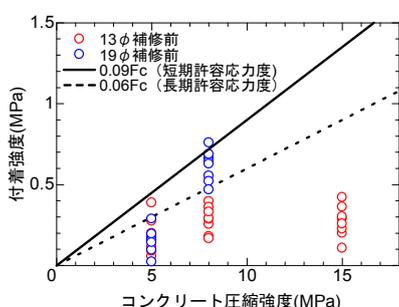


図 2-3-3 丸鋼・中央筋の付着強度

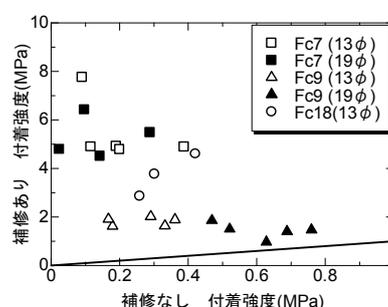


図 2-3-4 丸鋼・中央筋の補修効果

表 2-3-2 中央筋の付着強度

試験体名	鉄筋	呼び強度	付着強度 τ_b (MPa)[n]*	短期許容付着 応力度 f_b (MPa)	回復率 (倍)		
HR13-7-N	13φ	Fc7	0.20[8]	0.50	31.8		
HR13-7-R			5.45[5]				
HR19-7-N	19φ		0.14[7]		30.4		
HR19-7-R			5.61[4]				
HR13-9-N	13φ	Fc9	0.29[8]	0.69	6.2		
HR13-9-R			1.81[5]				
HR19-9-N	19φ		0.61[8]		2.4		
HR19-9-R			1.44[5]				
HR13-18-N	13φ		Fc18		0.26[8]	1.35	15.0
HR13-18-R					4.16[3]		

*[n]内は試験体数

表 2-3-2 に各試験体の付着強度を示す。表に示すように補修した試験体の値は短期許容付着応力度(0.09Fc)を大きく上回る結果となった。同じ鉄筋径の試験体において、Fc7の試験体の補修効果が最も期待される。これは、上端筋と同じように、低強度コンクリートほど鉄筋周りの空隙が大きくなり、エポキシ樹脂の充填性がよくなったことが考えられる。コ

ンクリート強度が大きな HR13-18-R の補修効果は HR13-9-R と比べて、以上と逆な結果が得られた。これはエポキシ樹脂の充填性及びエポキシ樹脂の性質などと関係があるため、ばらつきの範囲内と考えるとよいと思われる。Fc7 では上端筋と同じ様に鉄筋径における相違があまり見られず、補修した試験体にはすべてのものにおいて付着強度が大幅に上昇している。

③ 丸鋼・水平筋（下端）

図2-3-5に下端筋の付着強度を示す。適用する長期と短期許容付着応力度式を挿入した。HR13-7-NBの付着強度が0.11~0.27MPa, HR13-7-NBが0.11~0.28MPa, HR13-9-NTが0.25~0.62MPa, HR19-9-NBが0.35~0.56MPa, HR13-18-NBが0.35~0.54MPaに分布している。鉄筋径13φの試験体において、コンクリート強度が大きくなるに従って付着強度が上昇する傾向が見られた。すべての試験体においては鉄筋径の違いによる付着強度の相違があまり見られなかった。下端筋の場合において、ブリージングによる影響が少なかったと考えられる。すべての付着強度は短期許容付着応力度を下回る結果となったが一部は長期許容付着応力度を上回るものも見られた。図2-3-6にエポキシ樹脂補修した試験体の補

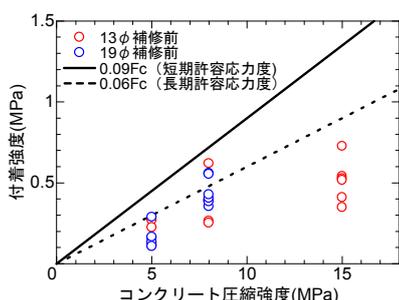


図 2-3-5 丸鋼・下端筋の付着強度

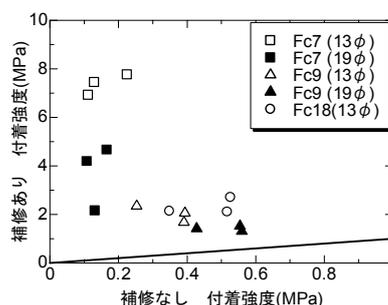


図 2-3-6 丸鋼・下端筋の補修効果

表 2-3-3 下端筋の付着強度

試験体名	鉄筋	呼び強度	付着強度 τ_b (MPa)[n]*	短期許容付着 応力度 f_b (MPa)	回復率 (倍)
HR13-7-NB	13φ	Fc7	0.13[4]	0.50	57.1
HR13-7-RB			7.37[3]		
HR19-7-NB	19φ		0.14[6]		30.4
HR19-7-RB			3.67[3]		
HR13-9-NB	13φ	Fc9	0.39[6]	0.69	5.3
HR13-9-RB			2.03[3]		
HR19-9-NB	19φ		0.45[6]		3.7
HR19-9-RB			1.41[3]		
HR13-18-NB	13φ	Fc18	0.51[6]	1.35	15.0
HR13-18-RB			2.31[3]		

*[n]内は試験体数

修効果を示す。試験体はFc7のHR13-7-N(R)B, HR19-7-N(R)B, Fc9のHR13-9-N(R)B, HR19-9-N(R)B, および, Fc18のHR13-18-N(R)Bである。下端筋でもエポキシ樹脂補修された試験体の補修効果も確認できる。HR13-7-RBの付着強度が6.9~7.8MPa, HR19-7-RBが2.2~4.7MPa, HR13-9-RBが1.7~2.3MPa, HR19-9-RBが1.31~1.52MPa, HR13-18-RBが2.1~2.7MPaに分布している。表2-3-3に下端筋の補修しない及び補修した試験体の付着強度を示す。短期許容付着応力度 ($0.09F_c$)を大きく超える補修効果があることが分かる。鉄筋径が同じの試験体において, 上端・中央筋の現象と同様に, Fc7の場合は補修した試験体の付着強度上昇幅が一番大きく, 13φの場合は他の値のほぼ3倍以上, 19φの試験体はほぼ2倍以上となった。また, Fc7, Fc9の試験体補修した試験体の付着強度を見ると, 13φの付着強度は19φのそれにより大きくなり, Fc7の場合が約2倍, Fc9の場合が約1.4倍となった。このような傾向は, Fc7の上端及び中央筋と大きい違いであった。

③ 丸鋼・垂直筋

図2-3-7に丸鋼13φ, 19φで垂直筋試験体の付着強度を示す。VR13-9-Nの付着強度が0.88~1.63MPa, VR19-9-Nが1.12~1.48MPaに分布している。鉄筋径の違いによる付着強度への影響は見られなかった。また, 全ての試験体において短期許容付着応力度 ($0.09F_c$)を上回っている。図2-3-8にエポキシ樹脂注入による補修効果を示す。試験体はFc9のVR13-9-N(R)とVR19-9-N(R)である。VR13-9-Rの付着強度が1.50~2.21MPa, VR13-9-Rが1.26~1.41MPaに分布している。補修した試験体でも鉄筋径による付着強度の違いは見

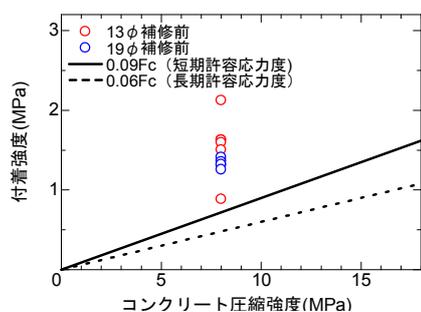


図 2-3-7 丸鋼・垂直筋の付着強度

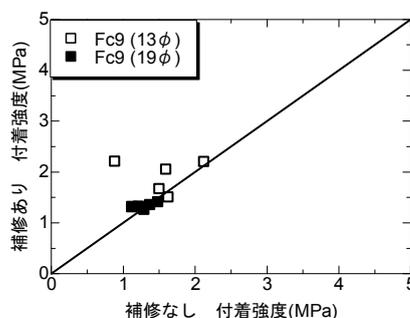


図 2-3-8 丸鋼・垂直筋の補修効果

表 2-3-4 垂直筋の付着強度

試験体名	鉄筋	呼び強度	付着強度 τ_b (MPa)[n]*	短期許容付着応力度 f_b (MPa)	回復率 (倍)
VR13-9-N	13φ	Fc9	1.38[8]	0.69	1.4
VR13-9-R			1.92[5]		
VR19-9-N	19φ		1.26[8]		1.1
VR19-9-R			1.33[5]		

*[n]内は試験体数

られなかった。表2-3-4に示す回復率を見てみると、補修しない試験体よりも若干上昇した。コンクリート打設方向に鉄筋を垂直に設置すると、ブリージングの影響をあまり受けないため、空隙が小さくなる。そのためエポキシ樹脂が十分に充填されなかったため、補修効果があまり見られなかった。

⑤ 異形鉄筋(D13)

図 2-3-9 に D13 の付着強度を示す。図中に異形鉄筋に適用する長期と短期許容付着応力度式を挿入した。本実験ではコンクリートに割裂防止筋を入れていないが、いずれの試験体もコンクリートから鉄筋が抜け出した。HD13-9-N の付着強度が 3.34~5.90MPa, VD13-9-N が 4.85~6.49MPa に分布している。付着強度は短期許容付着応力度 $0.15F_c$ に大幅に上回り、水平筋が 2.8 倍以上、垂直筋が 4 倍以上となった。丸鋼と同じく異形鉄筋の場合も垂直筋の付着強度が大きい。また、図 2-3-10 にエポキシ樹脂注入による補修効果を示す。試験体は Fc9 の HD13-9-N(R)と VD13-9-N(R)である。HD13-9-R の付着強度が 12.43~14.53MPa, VD13-9-R が 6.58~7.73MPa に分布している。異形鉄筋の場合も、垂直筋に対する補修効果は水平筋のそれに比べ、ほぼ半分に低くなっている。水平筋のほうがよりエポキシ樹脂の浸透性が高いものと考えられる。表 2-3-5 に異形鉄筋の付着強度一覧を示す。異形鉄筋でもエポキシ樹脂の補修効果があることが分かる。これは初期荷重によりコンクリート内部に発生している部分的な割裂ひび割れにエポキシ樹脂が注入され、鉄筋周りがより強固になるためと考えられる。

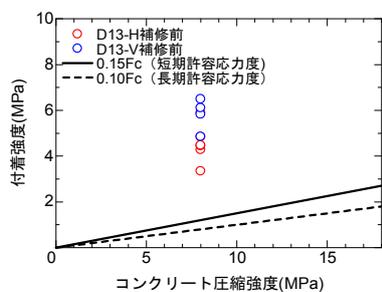


図 2-3-9 異形鉄筋の付着強度

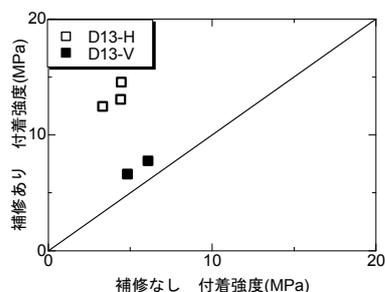


図 2-3-10 異形鉄筋の補修効果

表 2-3-5 異形鉄筋の付着強度

試験体名	鉄筋	呼び強度	付着強度 τ_b (MPa)[n]*	短期許容付着応力度 f_b (MPa)	回復率 (倍)
HD13-9-N	D13	Fc9	4.55[6]	1.16	2.9
HD13-9-R			13.33[3]		
VD13-9-N			5.82[4]		1.2
VD13-9-R			7.16[2]		

*[n]内は試験体数

2.3.2 平均付着応力度—抜け出し変位関係

図2-3-11に各変動因数による補修をしない試験体の平均付着応力度と抜け出し変位関係（以後 τ -S関係と記す）を示す。取り上げた丸鋼上端筋，中央筋，下端筋，垂直筋，および異形鉄筋に分類して示した。

比較因子は丸鋼試験体の鉄筋径およびコンクリート強度，異形鉄筋のコンクリート打設方向であり，それぞれの比較因子の中の一つを代表例として選択した。丸鋼の試験体においては荷重開始後，鉄筋自由端の変位が0のまま付着応力度が上昇する。この間，荷重端側から徐々に固着力が喪失し相対変位が出ているものと思われる。ある付着応力度になると自由端部の変位が発生し始める。続けて加力すると，付着応力度は上昇して付着強度に達する。付着強度に達する時の抜け出し変位については水平上端筋の試験体以外ほぼすべて

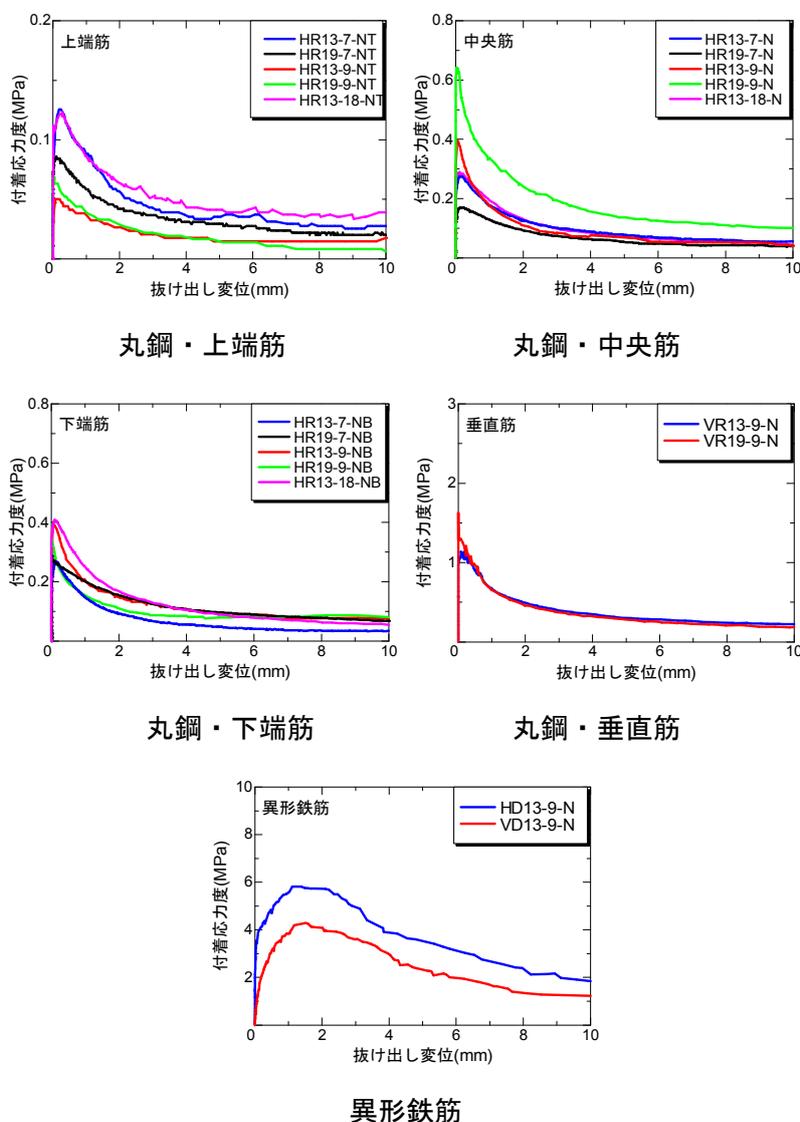


図2-3-11 補修しない試験体の τ -S関係

の試験体は0.2mm以内である。付着強度以後は変位の増加に従い付着応力度は急激に低下する。抜け出し変位が3mm程度になると、その低減傾向が緩やかとなる。その中に、自由端変位が計測された時点で付着長範囲の固着力がすべて喪失し、その後は摩擦による抵抗力のみになる。一方、異形鉄筋は丸鋼と異なり、加力の初期段階から抜け出し変位も増加する。そして抜け出し変位が3mm程度に至るまでに付着強度に達する。その後は変位の増加につれて、付着応力度が緩やかに低下し続ける。

図2-3-12にエポキシ樹脂注入で補修した試験体の τ -S関係を示す。縦軸に示す付着応力度が補修しない試験体の縦軸とは大きく異なっていることに注意されたい。補修された試験体の τ -S関係概形は補修しない試験体とほぼ同じであるが、付着応力度は付着強度ばかりでなく付着強度の低下域においても大きく上昇している。もともと0.2mmまで引抜いており、固着力が喪失した段階でエポキシ樹脂を注入している。そのためエポキシ樹脂による固着

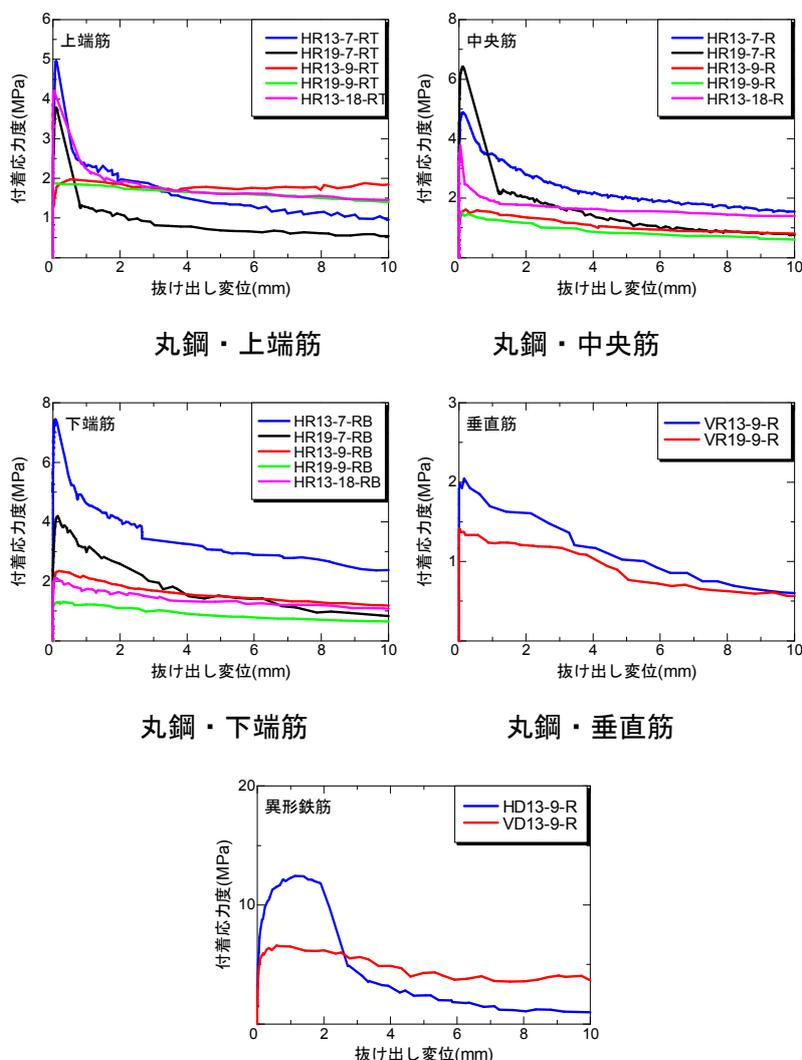


図2-3-12 補修した試験体の τ -S関係

力が発揮され、付着強度が大幅に上昇するばかりでなく摩擦抵抗領域においてもエポキシ樹脂注入の効果が表れているものと考えられる。ただし、補修しないものと同じく抜け出し変位が 0.2mm 以内で試験体の付着強度に達しているものの、補修した試験体の付着強度時の変位は大きくばらついている。低強度コンクリートの Fc7 試験体の付着強度は他の試験体に比べ大きいものの、付着強度以降の付着応力度は急激に低下する傾向にある。これはコンクリートが低強度ため横拘束力が小さく、鉄筋周りの付着しているエポキシ樹脂の外側のコンクリートが滑っているものと考えられる。異形鉄筋の水平筋は付着強度に達する前にコンクリートが割裂破壊に至ったため、急激に付着応力度低下し、その後の付着応力度もかなり低くなっている。垂直筋は付着強度に達した後、付着応力度の低減は補修しないもの比べて緩やかとなった。また、異形鉄筋と丸鋼試験体の τ -S 関係と比べると、両者の形状は大きく異なっていることが確認された。

2.3.3 材齢と付着強度の関係

付着強度に対する材齢の影響を調べるために、滝本の研究⁹⁾に基づいてコンクリート打設後1週、4週、9週、13週、26週、52週に引抜き試験を実施した。取り上げた変数はコンクリート強度 (Fc9, Fc18)、鉄筋径 (13 ϕ , 19 ϕ)、鉄筋配置 (水平, 垂直) である。水平筋と垂直筋のコンクリートの調合計画は同様であるがコンクリート打設日は異なっている。表2-3-6に試験体一覧を示す。表2-6-7に各材齢のコンクリートの力学的特性を示す。

図2-3-13に付着強度と材齢の関係、図2-3-14に付着強度に対するコンクリート強度の割合と材齢関係を示す。コンクリートの圧縮強度が水平筋と垂直筋で異なっているのは打設日が異なっていることによるものである。コンクリート強度は材齢とともに増加し、26週あたりからほぼ一定値となる。コンクリートの圧縮強度 (4週) は12.5 N/mm², 10.2N/mm²となっているがその後上昇し続け、最終的には17.8N/mm², 15.5N/mm²となる。普通強度コンクリートの圧縮強度 (4週) は17.6 N/mm², 16.7N/mm²となり、ほぼ設計基準強度の値になっている。最終的には24.3N/mm², 22.6N/mm²となる。各組コンクリートの圧縮強度 (4週) は最終の約7割となった。

表 2-3-6 コンクリート材齢に関する試験体一覧

試験体名	試験体数	呼び強度	断面	位置	付着長	鉄筋	主筋方向	コンクリート材齢				
HR13-9	36	Fc9	150×150	中央	10d	13 ϕ	水平	1,4,9,13, 26,52 (週)				
HR19-9	36					19 ϕ						
HR13-18	36	Fc18				13 ϕ						
HR19-18	36					19 ϕ						
VR13-9	36	Fc9				150×150	中央		10d	13 ϕ	垂直	1,4,9,13, 26,52 (週)
VR19-9	36									19 ϕ		
VR13-18	36	Fc18								13 ϕ		
VR19-18	36									19 ϕ		

各コンクリート材齢による試験体は3体を用意した

表 2-3-7 各材齢におけるコンクリートの力学特性

	呼び強度	材齢 (週)	圧縮強度 σ_c (MPa)	割裂強度 σ_T (MPa)	ヤング係数 E_c (GPa)	圧縮強度ひずみ $\epsilon(\mu)$
水平筋	Fc9	1	9.20	1.22	19.85	1504
		4	12.5	1.43	22.60	1969
		9	14.8	1.69	23.67	1890
		13	16.0	1.83	26.88	1670
		26	17.0	2.14	24.13	1676
		52	17.8	1.90	24.26	1911
	Fc18	1	13.7	1.38	25.10	1302
		4	17.3	1.92	25.77	1214
		9	20.9	1.91	26.09	1788
		13	23.1	2.31	22.80	1854
		26	24.3	2.70	29.50	2144
		52	24.3	3.28	26.10	2088
垂直筋	Fc9	1	6.1	0.85	12.92	2592
		4	10.2	1.27	17.58	1957
		9	12.1	1.55	20.07	1765
		13	13.2	1.77	22.13	1929
		26	14.7	1.73	22.43	2288
		52	15.5	1.56	23.58	2186
	Fc18	1	10.0	1.37	17.99	2824
		4	16.7	1.85	21.72	1836
		9	18.4	2.10	25.63	1905
		13	20.2	1.98	24.81	1780
		26	22.4	2.61	26.67	1895
		52	22.6	2.31	26.70	1965

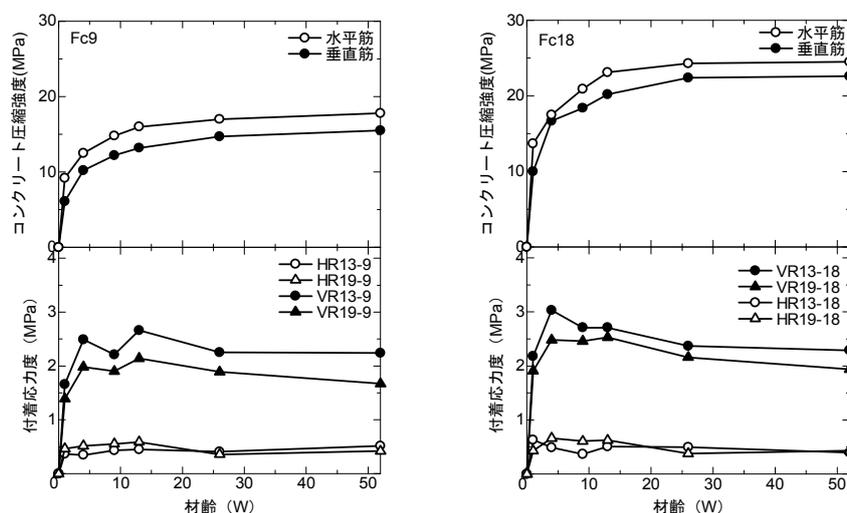


図 2-3-13 付着強度と材齢の関係

一方、水平筋の場合はコンクリート強度に関わらず、付着強度は約 0.5N/mm^2 の一定値を保っている。図 2-3-14 を見ると、すべて試験体の付着強度に対するコンクリート強度の

割合はほぼ2~5%となり、長期許容付着応力度($0.06F_c$)を下回ることが分かった。これは前節の水平中央筋の結果とほぼ同じであった。垂直筋試験体の付着強度はコンクリート強度、鉄筋径に関わらず4週でほぼ最大値になり、約 2.5N/mm^2 の付着強度に記録した後、低下傾向を示している。最終的には約 2.0N/mm^2 の付着強度の一定値に近づくことが見られる。その中に材齢1週の付着強度は4週の約7割程度となった。これは滝本ら⁸⁾の研究結果の8割程度とほぼ一致している。また、垂直筋試験体の付着強度に対するコンクリート強度の割合は初期材齢から上昇し、4週以後はほぼ一定値となる傾向が見られ、ほぼ10~30%の広い範囲に分布している。すべての値も前節の結果と同じく短期許容付着応力度($0.09F_c$)を上回っている。

Abrams¹⁾の実験ではコンクリートの圧縮強度の増大とともに付着強度も増大傾向があることが示されているが、本研究ではすべての試験体において4週以後の付着強度の上昇はほとんど見られなかった。計測が長期間に亘るため温度や湿度の変化についても検討する必要があると思われる。

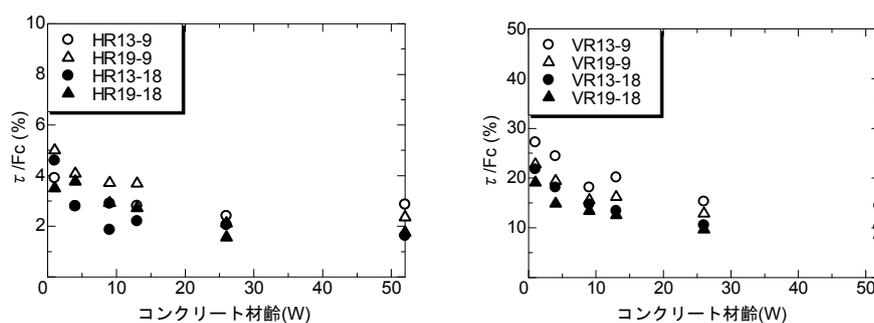


図 2-3-14 付着強度に対するコンクリート強度の割合と材齢の関係

2.4 各変数が付着強度に与える影響

考慮した各変動因数に着目し、低強度コンクリートに丸鋼を使用した試験体の付着性能についての検証を行った。

2.4.1 鉄筋位置，鉄筋径，コンクリート強度と付着強度の関係

図2-4-1に鉄筋位置，コンクリート強度，鉄筋径に関する付着強度を示す。上端筋の場合について，Fc7,Fc9の低強度コンクリートの場合は13φ，19φともに付着強度が0.2MPaと小さい値を示し，鉄筋径による違いが見られない。中央筋及び上端筋の場合はコンクリート強度が上がってくると付着強度も上昇傾向にある。普通強度のコンクリートではこの傾向がより顕著である。低強度コンクリートの上端筋の場合はブリージングの影響を受けて付着強度が殆ど期待できないことが分かる。また，普通強度のコンクリート強度であれば鉄筋位置による付着強度の違いは森ら¹⁵⁾の研究と同様の傾向となる。

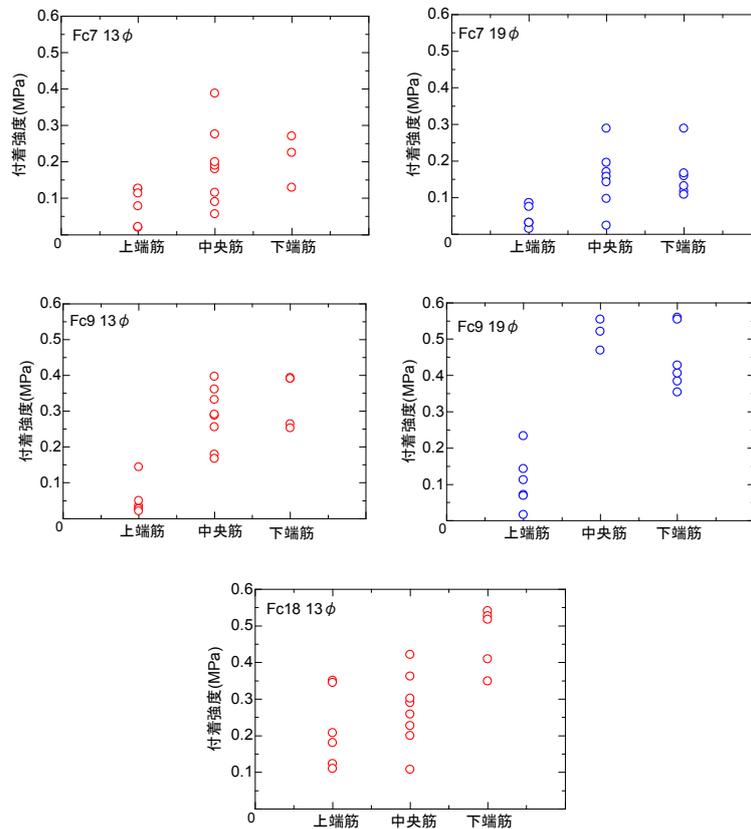


図2-4-1 各種変数（鉄筋位置，鉄筋径，コンクリート強度）による影響

2.4.2 水平筋，垂直筋と付着強度の関係

図2-4-2に打設方向に関する比較を示す。コンクリート強度はFc9のものである。図中には1971年度版のRC規準の上端筋以外の丸鋼の許容付着応力度式を載せている。13φ，19φの試験体はともに垂直筋の付着強度が水平筋の付着強度より大きく上回っている。垂

直筋の付着強度と水平筋を比較すると 13φ で 5 倍, 19φ で 1.6 倍程度になっている。この水平筋は鉄筋下部に 300mm のコンクリート厚さが無い上端筋の扱いを受けないものであるが、低強度コンクリートでブリージングの影響を強く受けると付着強度はかなり低くなるため、既往の基準を適用できないことを認識する必要がある。一方、異形鉄筋は水平筋の付着強度は垂直筋のそれより幾分小さいが丸鋼ほどの違いは見られない。異形鉄筋の付着強度は許容付着応力度を大きく上回り、低強度であっても許容付着応力度式を使用することが出来る。

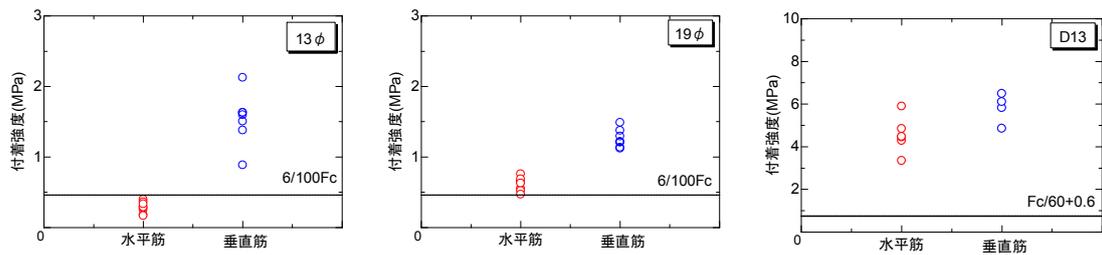


図2-4-2 各種変数（コンクリート打設方向）による影響

2.4.3 鉄筋種類と付着強度の関係

図2-4-3に鉄筋の種類の影響を示す。鉄筋径13φとD13である。異形鉄筋の付着強度は丸鋼のそれにより極めて大きくなる。水平筋で15倍、垂直筋で4倍程度となった。これは鉄筋とコンクリート間の付着抵抗機構の違いに起因すると考えられる。

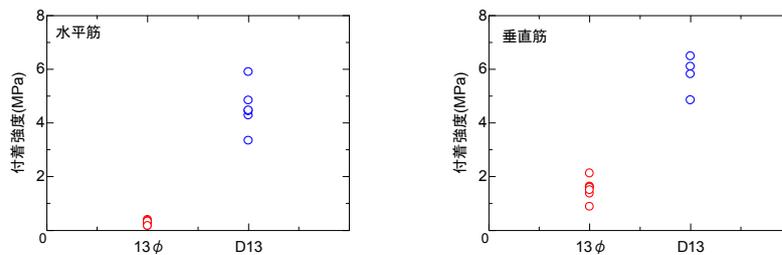


図2-4-3 各種変数（鉄筋種）による影響

2.4.4 付着応力度－抜け出し変位関係の基準化

Abrams¹⁾は付着強度を基準点として、 τ - S 関係を5つの特性点で表わされるとしている。図2-4-4に示す。提案された各特性点の座標は式2-4-1に示すとおりである。

$$\begin{aligned}
 A &= (0.6\tau_{Max}, 0), B = (0.75\tau_{Max}, 0.1S_{Max}), C = (0.95\tau_{Max}, 0.5S_{Max}) \\
 D &= (0.9\tau_{Max}, 2S_{Max}), E = (0.7\tau_{Max}, 5S_{Max})
 \end{aligned}
 \tag{2-4-1}$$

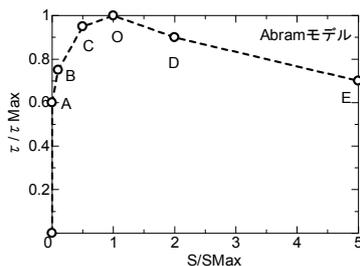


図 2-4-4 Abrams の提案例¹⁾

本研究でも同じ点を採用し、付着応力度を付着強度比(τ/τ_{Max})、変位を付着強度時の変位比(S/S_{Max})として基準化した。図 2-4-5 に Abrams¹⁾の提案する丸鋼の基準化曲線との比較を示す。図中実験値は各試験体の平均値を用いている。

本実験の場合、変位が発生し始める点(A)はコンクリート強度、鉄筋径及び鉄筋配置に関係なく、Abrams¹⁾に示される $0.6\tau_{max}$ よりやや大きく約 $0.7\tau_{max}$ となる。付着強度時変位は大きくばらつくものの、上端筋では $0\sim 0.436\text{mm}$ に分布し、その外の場合は $0\sim 0.176\text{mm}$ に分布している。Abrams¹⁾はその変位を 0.01inch (0.25mm) 以下としている。また坂¹⁹⁾によると 0.1mm で付着強度に達するとしている。本実験では Abrams¹⁾の提案より幾分小変形であり、坂の提案に近いものとなっている。B, C, D と E 点に対応する水平筋の結果はほぼ Abrams¹⁾提案に近づいているが垂直筋の試験体は若干大きくなった(変位が 0 で付着強度時を記録する試験体を除く)。

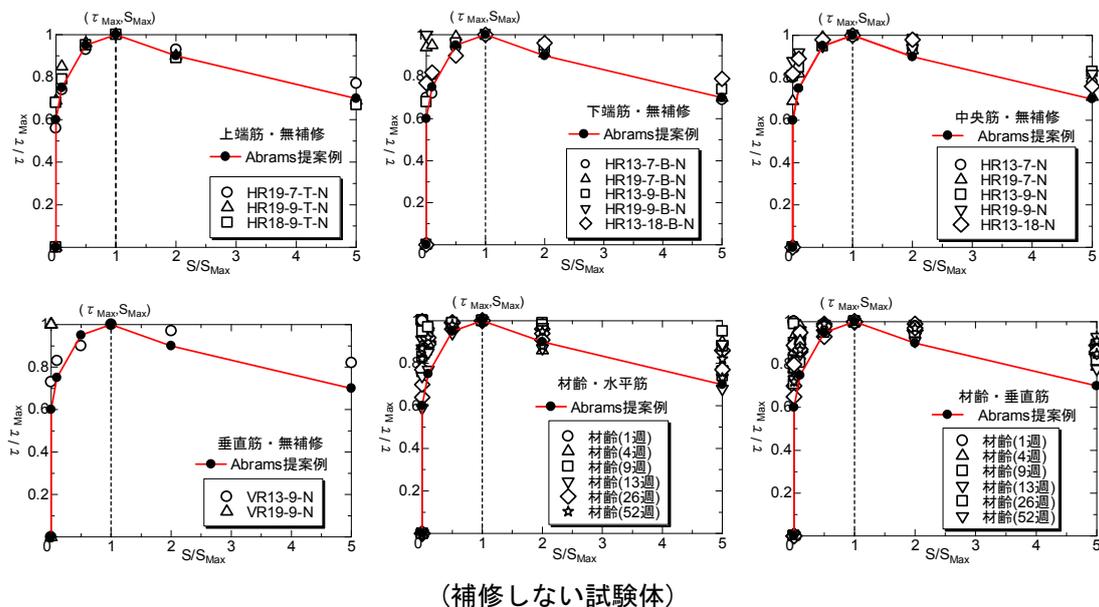
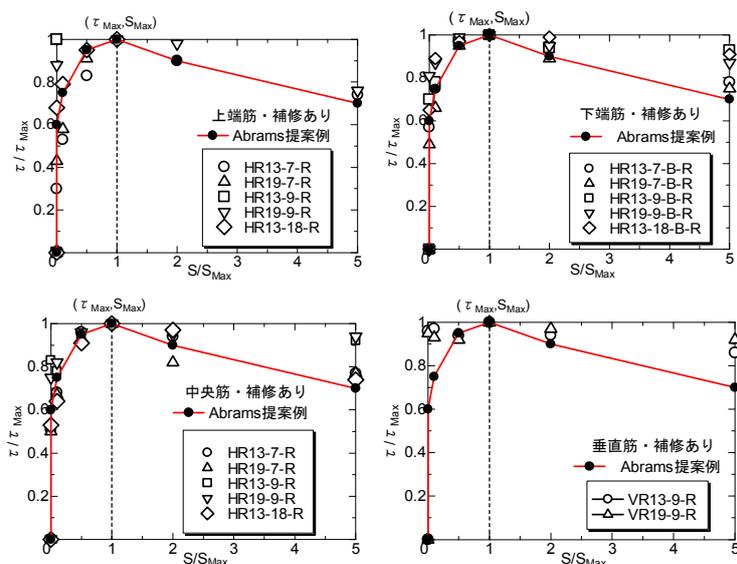


図 2-4-5 τ - S 関係の基準化



(補修した試験体)

図 2-4-6 τ - S 関係の基準化

次に、補修した試験体の場合を図 2-4-6 に示すように、変位が発生し始める点(A)は 0~1 に広く分布しており、Abrams¹⁾に示されている一つの特性点 ($0.6\tau_{max}$) で評価することが出来ない。付着強度を記録する変位についてはいずれの場合も 0.5mm 以下で発生している。その分布範囲は補修しない試験体より広く 0~0.448mm となっており、平均値は 0.2mm 程度である。また、B、C、D と E 点の付着応力度比は Abrams¹⁾に示されているものより大きい。

2.5 結論

付着強度に影響を与えるものとしてコンクリート強度，鉄筋径，鉄筋の埋め込み位置，コンクリートの打設方向，鉄筋の形状，コンクリートの材齢，補修の有無などを変数として取り上げ，単調引抜き試験を行い，以下の知見が得られた

- 1) 引抜き試験により，低強度コンクリート中の丸鋼・水平筋において大きな影響を与える要因は水セメント比の大きいコンクリートのブリージング水によって発生する鉄筋下部の空隙であることを確認した。
- 2) 低強度コンクリート中の丸鋼の付着強度と鉄筋の埋め込み位置の関係は，水平上端筋<水平中央筋≒水平下端筋<垂直筋の順となる。
- 3) 低強度コンクリート中の水平筋では鉄筋径の違いによる付着強度への影響はあまりないが，コンクリート強度が大きくなると，鉄筋径が大きくなるほど付着が確保されやすい傾向がある。
- 4) 低強度コンクリート中の水平上端筋の付着強度は殆ど期待できないと考えられる。一方，水平中央筋と下端筋に関してはコンクリート強度が大きくなるに従い付着強度は上昇する傾向がある。
- 5) 水平筋の付着強度は垂直筋のそれを大きく下回る。また，上端筋でなくても水平筋の付着強度は許容付着応力度を大きく下回り，低強度コンクリート中の水平筋と垂直筋は分けて考える必要がある。
- 6) コンクリート材齢の増加に伴う圧縮強度の増加傾向に対して，材齢4週までは付着強度も上昇傾向にあるが，それ以後は付着強度の増加傾向がほとんど見られない。
- 7) 丸鋼の付着応力度－抜け出し変位関係は本章で採用している変動因数にあまり影響を受けない。
- 8) 丸鋼の水平筋の付着応力度－抜け出し変位関係については既往の提案とは相違点があり，今後データを蓄積する必要があると考えられる。
- 9) エポキシ樹脂注入の補修効果はコンクリート強度が小さいほど，鉄筋径が小さいほど大きい。付着強度ばかりでなく，付着強度時以降の付着応力度にも著しい補修効果がある。

参考文献

- 1) Duff A. Abrams : Tests of bond between concrete and steel, Published 1913 by University of Illinois in Urbana, 1913
- 2) 吉田徳次郎：新しい混凝土の沈下と鋼と混凝土との粘着強度，土木建築画報，第6巻，第4号，pp.3-9, 1930.4
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造設計規準（第二讀會案），1933.7
- 4) 加藤六美：異形鉄筋コンクリートの付着，日本建築學會研究報告，第12号，pp.179-182, 1951.6
- 5) 加藤六美：鉄筋の付着並びに定着に対する二，三の注意，日本建築學會研究報告，第22号，pp.111-112, 1953.5
- 6) 小倉弘一郎，亀田登与三郎，池田昭男：各種形状の振り強化鉄筋の付着強度に関する研究，日本建築学会論文報告集，第69号，pp.505-508, 1961.10
- 7) 福島正人：軽量コンクリートの付着強度について，日本建築学会九州支部研究報告，第9号，pp.751-756, 1960.2
- 8) 鈴木豊郎，松原光彦：付着強度に関する研究（第2報）（複数配筋で，その本数と間隔を変化させた場合），日本建築学会論文報告集，第69号，pp.509-512, 1961.10
- 9) 滝本義一，鈴木豊郎，松原光彦，佐々木良一：付着強度に関する研究（コンクリートの練置時間及び材令の影響について），日本建築学会論文報告集，第66号，pp.425-428, 1960.10
- 10) 森田司郎：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料 シリーズ 11-付着特性(1)，建築雑誌，第94巻，第1158号，pp.59-61, 1979.12
- 11) 十代田知三：膨張頁岩を骨材とした軽量コンクリートと鉄筋の付着強度について，日本建築学会論文報告集，第89号，p.38, 1963.9
- 12) 森徹：高炉セメントを用いたコンクリートと鉄筋との付着強度について，磨き鉄筋，湿潤強度の場合（高炉セメントの使用方法に関する研究），日本建築学会論文報告集，第66-1号，pp.113-116, 1960.10
- 13) 鳥田専右：長時間混練したコンクリートに関する研究(その2)：鉄筋との付着性について，日本建築学会論文報告集，第103号，p.26, 1964.10
- 14) 狩野春一，仕入豊和：生コンクリートの沈下による鉄筋附着強度の減少と二三の対策：普通 A.E. 軽量コンクリートに就いて，日本建築學會論文集，No.49，pp.34-41, 1954.9
- 15) 小林克己，黒正清治：ネオ鉄セメントを使用したコンクリートと鉄筋の付着強度実験，学術講演梗概集 構造系，第51巻，pp.5-6, 1976.8
- 16) 森田司郎：軽量骨材コンクリートと鉄筋の付着強度，日本材料学会，第18巻，第185号，pp.151-157, 1969.2
- 17) 鳥田専右：長時間混練したコンクリートに関する研究(その2)：鉄筋との付着性について，日本建築学会論文報告集，第103号，pp.26, 1964.10

- 18) 日本コンクリート工学協会中国支部：低強度コンクリートに関する特別研究委員会報告書，2009.2
- 19) 坂静雄：鉄筋コンクリート学教程，産業図書株式会社，1952

第3章 繰り返し引抜き試験

第3 繰り返し引抜き試験

3.1 はじめに

地震時における繰り返し加力を受ける RC 部材内部の鉄筋は繰り返し引抜き力や圧縮力を受ける。丸鋼の付着特性は第2章でも述べたように、小さな抜け出し変位で付着強度に達し、付着応力度はその後急激に低下する特性を示す。つまり、固着力喪失後は摩擦力のみで抵抗し、その摩擦力は引抜き変位に影響を大きく受けるため、摩擦抵抗の繰り返し特性が、付着応力度と引抜き変位の関係に大きな影響を与えることが予想される。

日本で最初に付着に関する繰り返し履歴特性の研究を行ったのは山田ら¹⁾とされる。大喜多²⁾、石橋³⁾らの研究は一定荷重の繰り返しにより変形が増大する現象をとらえている。初期には片振幅や微小振幅繰り返しが多い中で山田ら¹⁾はこの時、既に大振幅の正負漸増振幅繰り返し実験を行っている。付着応力度-抜け出し変位履歴曲線を図3-1-1に示す。繰り返し载荷が行われるようになるのは異形鉄筋が普及し始め、その付着性能を確認するためであり、あくまでも異形鉄筋が主な研究対象であった。コンクリートも普通強度や高強度のものが使用されている。引続き森田ら⁴⁾、小坂ら⁵⁾によって異形鉄筋の付着割裂破壊を対象とした繰り返し引抜き試験が本格的に行われるようになる。国外でもその傾向は同様で Bertero 等⁶⁾によって異形鉄筋の付着履歴特性に関する研究が行われている。その後、丸鋼に関しては殆ど研究が行われてこなかった経緯があるが、近年、国外において Verderame 等⁷⁾によって、既存建物の性能照査の一環として丸鋼の繰り返し引抜き実験が報告されている。この研究は丸鋼の付着に関する復元力のモデル化に向けた実験であり、異なる振幅で繰り返し载荷を行っている。単調引抜き試験から得られた結論は付着強度とその時の抜け出し変位、そして最大摩擦力が主要な要素であるとしている。一方、繰り返し荷重下においては繰り返し回数とその振幅により付着の復元力特性は大きく影響を受け、それらの値は大きくばらつくことが指摘されている⁷⁾。図3-1-2に実験で得られた定振幅繰り返しの付着履歴特性の一例を示す。

本章では低強度コンクリート内に埋め込まれた丸鋼に繰り返し引張力を作用させた場合の付着履歴性状について検討する。Verderame らの研究⁷⁾を踏まえ、载荷プログラムを3水準とし、大振幅1回繰り返し、片振幅漸増繰り返し、正負交番漸増繰り返しを行っている。エポキシ樹脂を鉄筋周りに注入した試験体の実験も実施し、付着履歴性状の改善状況を検討した。

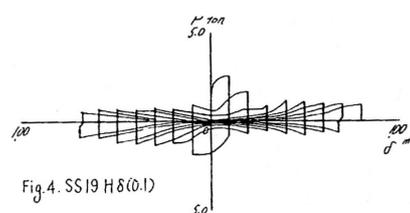


図3-1-1 山田ら(1965)¹⁾

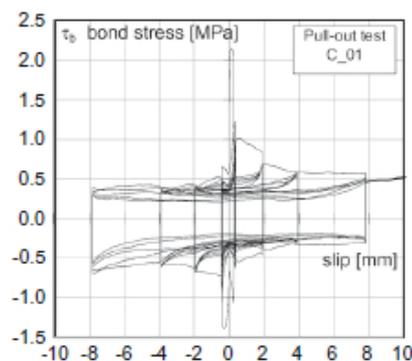


図3-1-2 Verderame ら(2009)⁷⁾

3.2 実験概要

3.2.1 試験体

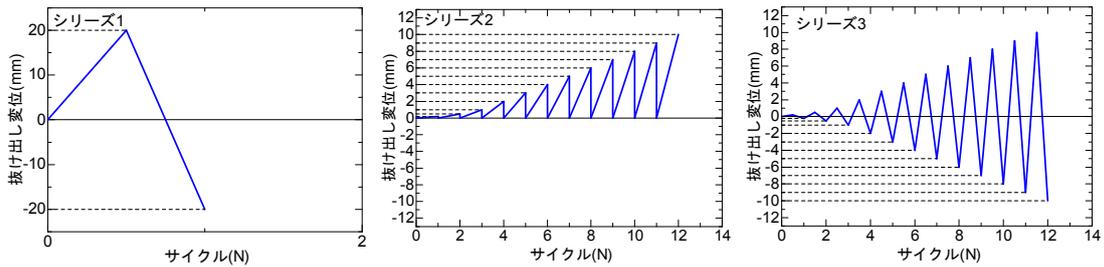
本実験では、試験体の名称及び変数について試験体一覧として表 3-2-1 に示す。基本試験体は前章と同様に断面 150mm×150mm、長さ 200mm のコンクリートプリズムの中心に鉄筋を 1 本配置した試験体である。コンクリートの設計基準強度は Fc9, Fc18 の 2 水準である。鉄筋には丸鋼 13φ, 19φ を用いた。付着長はいずれの鉄筋も 10d (d ; 鉄筋の直径) としている。載荷方法は大幅 1 回繰り返し (シリーズ 1), 片振幅漸増繰り返し (シリーズ 2), 正負交番漸増振幅繰り返し (シリーズ 3) の 3 水準である。コンクリートは鉄筋を水平にして打設しているが、鉄筋下のコンクリート厚さが 300mm 以下のため上端筋の範疇には入っていない。低強度コンクリートの場合はいずれの変数においてもエポキシ樹脂注入を行って、補修の効果を確かめている。なお、付着強度は既往の研究に指摘されているように大きくばらつくため、各変数につき複数の試験体を用意した。

表 3-2-1 試験体一覧

試験体名	試験体数	呼び強度	断面 (mm)	配筋位置	鉄筋	付着長	補修	載荷方法
RL1-R13-9-N	2	9	150×150	中央	13φ	10d	—	シリーズ 1
RL1-R13-9-R	3						エポキシ樹脂	
RL2-R13-9-N	3						—	シリーズ 2
RL2-R13-9-R	1						エポキシ樹脂	
RL3-R13-9-N	3						—	シリーズ 3
RL3-R13-9-R	3						エポキシ樹脂	
RL1-R19-9-N	2				19φ		—	シリーズ 1
RL1-R19-9-R	3						エポキシ樹脂	
RL2-R19-9-N	3						—	シリーズ 2
RL2-R19-9-R	3						エポキシ樹脂	
RL3-R19-9-N	6						—	シリーズ 3
RL3-R19-9-R	3						エポキシ樹脂	
RL1-R13-18-N	3	18			13φ	—	シリーズ 1	
RL2-R13-18-N	3					—	シリーズ 2	
RL3-R13-18-N	3					—	シリーズ 3	
RL3-R13-18-R	3					エポキシ樹脂		

3.2.2 載荷方法

既往の研究において繰り返し加力プログラムにはこれまで様々なものが採用されており、3.1 節で述べた山田ら¹⁾は正負漸増振幅繰り返し、大喜多²⁾、森田⁴⁾らは片振幅漸増繰り返しと正負漸増振幅繰り返しを行っている。本実験では、3 水準の繰り返し加力プログラムを使用した。シリーズ 1 の大幅繰り返し載荷では±20mm 振幅を 1 回繰り返ししている。シリーズ 2 は変位制御で片振幅漸増繰り返し載荷である。変位はそれぞれ 0.2mm, 0.5mm, 1mm から 1mm ごとに増加し 10mm まで合計 12 回の繰り返しである。シリーズ 3 では正負交番漸増振幅繰り返し載荷である。正負の制御変位はシリーズ 2 と同じとしている。繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の主筋には引張力と同時に、押し抜き力が発生しているこ



(a) 大変形 1 回繰り返し (b) 片振幅漸増繰り返し (c) 正負漸増繰り返し

図 3-2-1 荷重プログラム

とが想定され、本実験のようなコンクリートプリズムを用いた繰り返し試験では鉄筋に与える荷重として引張-引張および引張-圧縮の 2 種類が考えられる。本実験では加力方法が単純で、かつ一般的に採用されている正負ともに引抜き試験とした。図 3-2-1 に荷重プログラムを示す。加力方法、計測方法は前章と同じである。正負繰り返し荷重を行った試験体は埋め込んだ鉄筋の両側にねじ切りを施し、長ナットを介して加力用鉄筋を接合し、その鉄筋に引張力を与えている。ねじ切りの長さは 20mm である。正側加力が終了すると長ナットを反対側に付け替え、試験体を逆転させて試験機にセットし、同様の引張力を加える形式で荷重を行った。正負繰り返し荷重における接合部の詳細を図 3-2-2 に示す。エポキシ樹脂注入方法は前章と同じであり、一旦、抜け出し変位 0.2mm まで引き抜いた後に、注入を行っている。ここでも既に付着強度を確認している。(接合部の詳細は付録の写真を参考にされたい)

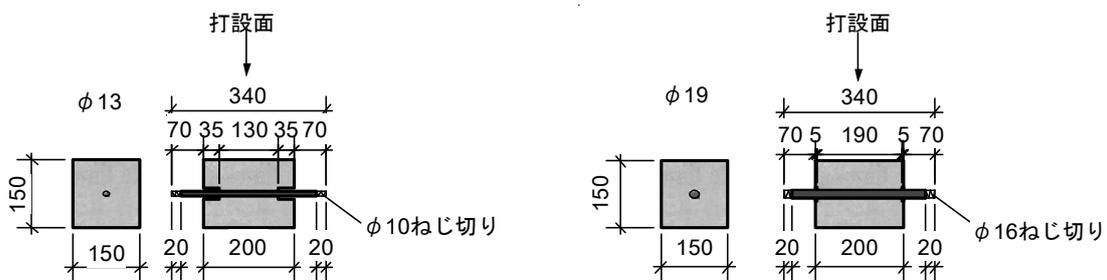


図 3-2-2 正負荷重用の試験体詳細

3.2.3 使用材料

付着履歴特性に対するコンクリート強度の影響を調べるために Fc9, Fc18 を用意した。コンクリートのフレッシュ特性、および力学特性をそれぞれ表 3-2-3, 表 3-2-4 に示す。また、鉄筋の力学特性を表 3-2-5 に示す。各力学特性ともに前章のそれと大きな違いはない。使用したエポキシ樹脂は前章と同じである。

表 3-2-2 フレッシュ特性

呼び強度	スランプ(mm)	空気量(%)	温度(°C)
Fc9	17.5	3.9	27.0
Fc18	15.1	4.6	28.0

表 3-2-3 コンクリートの力学特性

呼び強度	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_T (MPa)	ヤング係数 E_C (GPa)	圧縮強度時歪 ε_c (μ)
Fc9	11.2	1.17	19.99	1936
Fc18	18.0	1.76	23.37	1963

表 3-2-4 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_u (MPa)	ヤング係数 E_s (GPa)	降伏ひずみ ε_y (μ)
13 ϕ	325	457	195	1676
19 ϕ	327	457	192	1705

3.3 実験結果

3.3.1 付着強度

図 3-3-1 に付着強度を示す。同図中に 1971 年 RC 規準に示される許容付着応力度式を示す。この許容付着応力度は上端筋以外の許容付着応力度である。Fc9 の R13-9-N 及び R19-9-N の付着強度は 0.20~0.51MPa に分布し、すべて長期許容付着応力度を下回る結果となった。13φ および 19φ の付着強度の平均値はそれぞれ 0.33MPa、0.32MPa になり鉄筋径の違いによる差異は見られない。Fc18 の R13-18-N の付着強度は 0.33~0.75MPa に分布し、その平均値は 0.46MPa になり、長期許容応力度に下回ることは前章と同じである。R13-9-N 試験体の値と比べて、コンクリート強度が大きいほど、付着強度が大きくなることが分かった。第 2 章の水平中央筋試験体の付着強度は、13φ 試験体においてコンクリート強度と関係なく約 0.25 MPa となり、Fc9 の 19φ のものは 13φ より大きく平均値の 0.61 MPa となっており、本章の実験結果と異なった。ブリージングの影響によって低強度コンクリートの水平筋試験体の付着強度のばらつきが大きいことが分かる。

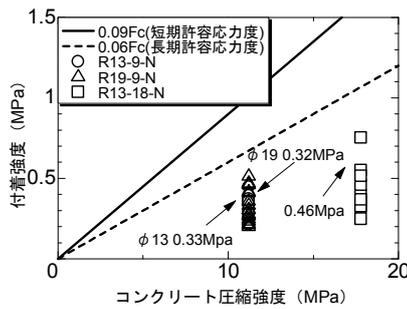


図 3-3-1 付着強度

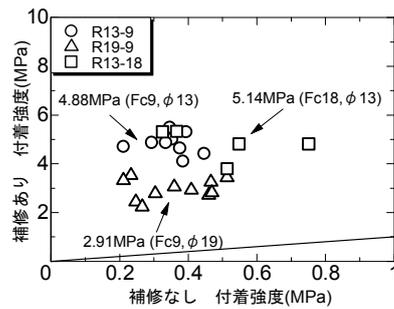


図 3-3-2 補修の有無による比較

一方、図 3-3-2 にエポキシ樹脂を注入した試験体の付着強度について、補修なしの場合の値との比較を示す。図中の表記は前章と同様である。補修したものの付着強度は補修しないものに比べて著しく上昇しているのが分かる。また、補修したものについては鉄筋径の違いが明確に表れている。R13-9-R は 4.1~5.6MPa に分布し、R19-9-R は 2.2~3.5MPa に分布し、明らかに太径のものが低い。その平均値はそれぞれ 4.88MPa、2.91MPa となる。Fc18 の R13-18-R の付着強度は 4.80~5.32MPa に分布し、その平均値は 5.14MPa になる。コンクリート強度に関かわらずに鉄筋径同じの試験体の補修効果がほぼ同じであった。径細ほど補修効果が大きくなることは前章の引抜き試験でも確認されている。

エポキシ樹脂注入によって上昇した付着強度は許容付着応力度式 $\tau_B=0.09F_c$ を用いてコンクリート強度に換算すると、Fc9 と Fc18 の試験体はそれぞれに 30MPa と 50MPa 以上になり大きな補強効果が期待できる。

3.3.2 補修しない試験体の付着履歴性状

エポキシ樹脂補修をしない試験体では付着割裂性状は見られず、最大変位に至るまで、

鉄筋が抜け出す破壊性状であった。

① 大振幅 1 回繰り返し载荷 (シリーズ 1)

図 3-3-3 に変位幅一定の繰り返し载荷における R13-9, R13-18 及び R19-9 の τ -S 履歴関係を例示する。図 3-3-3 に示すように、鉄筋径、コンクリート強度に関係なくほぼ同じ付着履歴性状であった。

载荷開始後、自由端の変位が 0 のまま付着応力度が上昇する。自由端変位が観測された時点で付着長さ全領域の固着力が喪失し、その後は摩擦による抵抗力のみになる。変位開始後の応力度の上昇は摩擦力の分布性状の変化によって生じると考えられる。変位開始後、付着応力度は一旦上昇し付着強度に達する場合もあるし、変位が 0 のまま付着強度を記録し、その後付着応力度が低下する場合もある。前者は Abrams⁸⁾の実験結果 (図 2-1-4) と同じであり、後者は本実験特有のものである。コンクリート強度が低いと固着力の喪失から摩擦抵抗への移行が一気に進むことが推測される。

シリーズ 1 の全ての試験体において、抜け出し変位 0.2mm まで引抜いた時点で既に付着強度に達していた。付着強度以後は付着応力度が急激に低下し、抜け出し変位が 5mm 程度になると、漸減傾向はあるもののほぼ一定の付着応力度となる。鉄筋を 20mm まで引抜いた後、除荷すると変位は変わらず、引抜き荷重が 0 になる。試験体を組み替えてさらに逆方向に载荷すると、変位は除荷時と変わらないまま除荷時付着応力度に近い値に達する。この時点から逆方向に変位が進み始め、変位が 0 に向かうと付着応力度が若干減少する。変位が負の領域に入ると若干上昇してから、この応力度を維持したまま、変位のみ増大して -20mm まで至る。これらの傾向はいずれの試験体でも同じであった。

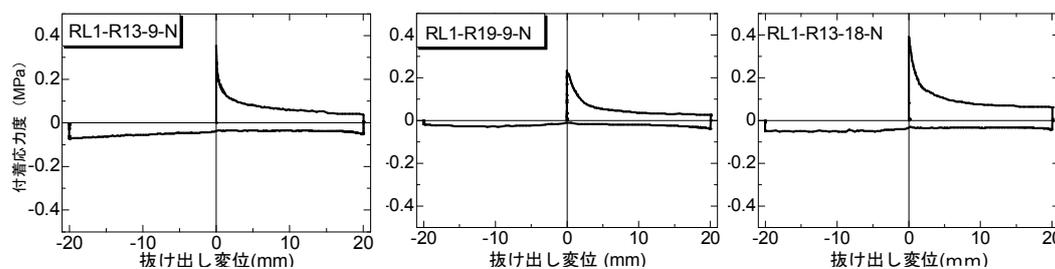


図 3-3-3 τ -S 履歴関係 (補修しないシリーズ 1 の試験体)

② 片振幅漸増繰り返し载荷 (シリーズ 2)

図 3-3-4 に片振幅漸増繰り返し载荷における R13-9, R13-18 及び R19-9 の τ -S 履歴関係を例示する。大变位の付着応力度一定領域において、鉄筋径が大きいほど、コンクリート強度が高いほど、付着応力度は大きくなる。全体的な形状はシリーズ 1 と同様に 3 種類の試験体に対する付着履歴性状はほぼ同じ形状となった。

一方向载荷状態から除荷し、荷重 0 になっても残留抜け出し変位は除荷前のものと同じである。また、再载荷によっても抜け出し変位は変化しないが、除荷前応力度のほぼ 80% 程度になると再び抜け出し変位が増大し始める。付着応力度が前除荷時応力度に達した後、

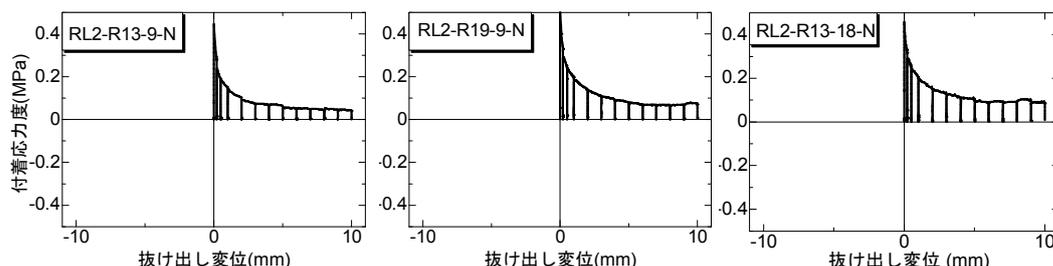


図 3-3-4 τ -S 履歴関係 (補修しないシリーズ 2 の試験体)

抜け出し変位は増大しながら、付着応力度が低下し始める。これらの履歴性状は制御変位量に関わらず同じである。一方、抜け出し変位が 4~5mm を経過したあたりから付着応力度はほぼ一定になる傾向を示す。包絡線の形状はシリーズ 1 とほぼ同じであった。

③ 正負交番漸増繰り返し荷重 (シリーズ 3)

図 3-3-5 に正負交番漸増繰り返し荷重における R13-9, R13-18 及び R19-9 の τ -S 履歴関係を例示する。この 3 種類の付着履歴性状もほぼ同じ性状を示した。シリーズ 3 では、一方向荷重状態から除荷を開始すると、抜け出し変位は変わらず荷重 0 に至る。これらの傾向はシリーズ 2 と同じである。試験体に与えた変位が小さい場合、変位は除荷時と同じままで負荷重に反転し、除荷時荷重の絶対値の約 50%の値まで上昇する。その時点から反対方向に変位し始め、付着応力度は原点付近まで幾分減少しつつ変位が増大する。変位が負側に到達すると荷重はわずかながら増大するものの変位が発生し始めた付着応力度に近づく。繰り返し回数の増加につれて τ -S の包絡線は緩やかに一定値に近づく。荷重がほぼ一定域になる大きな抜け出し変位(3mm 以上)になると、荷重を反転させても除荷時荷重とほぼ同じ荷重 (荷重方向は逆) で変位のみが増大する。これはシリーズ 1 と同じである。その応力度を維持しつつ変位のみ推移し、履歴特性は鉄筋とコンクリート間の摩擦抵抗に依存する形となる。包絡線において付着強度は固着力が喪失する最初の正側加力で決定されるものの、それ以外は正負でほぼ対称形になる。全体的な τ -S 履歴形状は図 3-1-1 に示した山田の研究¹⁾に示される履歴特性と類似したものとなった。

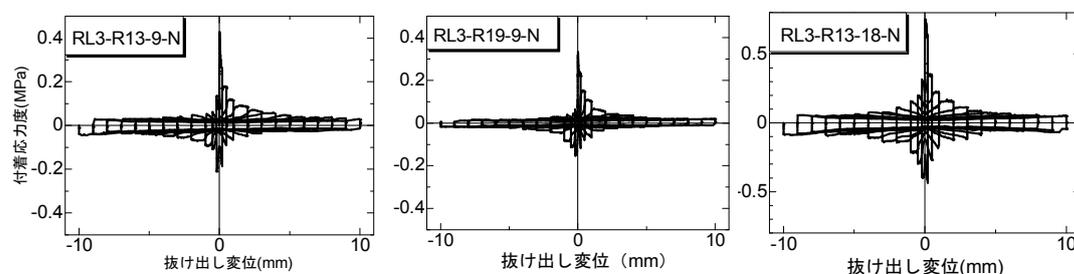
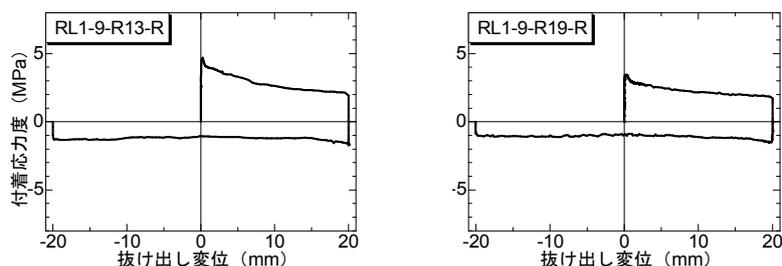


図 3-3-5 τ -S 履歴関係 (補修しないシリーズ 3 の試験体)

図 3-3-6 τ -S 履歴関係 (補修したシリーズ 1 の試験体)

3.3.3 補修した試験体の付着履歴性状

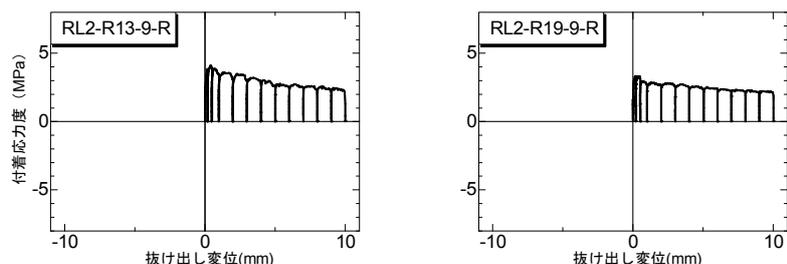
図 3-3-6～図 3-3-8 に示すエポキシ樹脂を補修した試験体の付着応力度-抜け出し変位履歴関係の図において縦軸の付着応力度の単位が前項に示した補修しない試験体の復元力特性図の縦軸の 16 倍となっていることに注意されたい。また、付着応力度の増大にもかかわらず、補修した後においても、コンクリートに付着割裂破壊は見られなかった。

① 大振幅 1 回繰り返し荷 (シリーズ 1)

図 3-3-6 に大振幅一回繰り返し荷における補修した試験体の R13-9 及び R19-9 の τ -S 履歴関係を例示する。正側の包絡線を見ると、エポキシ樹脂補修によって付着強度は大きく上昇し、その後も付着応力度は急激に低下するようなことはなく、大変形領域においてもその付着応力度は高い値を保持し続けている。復元力特性全体として見ると、付着強度以降の付着応力度低下率そのものが小さくなっている。これは固着力増大のみならずその固着力が喪失した後の摩擦抵抗においてもエポキシ樹脂注入の効果が現れていることが推測される。また、補修をしない場合に見られた大変位領域において付着応力度が一定になることはなく、徐々にではあるが低下傾向を示している。

② 片振幅漸増繰り返し荷 (シリーズ 2)

図 3-3-7 に片振幅漸増繰り返し荷における R13-9 及び R19-9 の τ -S 履歴関係を例示する。小振幅領域において、除荷時に付着応力度の減少とともに変位もわずかながら減少する。すなわちある勾配をもって付着応力度は低下する。再荷荷する場合、付着応力度は除荷時と同じ勾配に沿って上昇し、ほぼ除荷時の応力度に到達する。大変形領域になると勾配は殆どなくなり、補修しないものの履歴性状と同じになる。包絡線の傾向はシリーズ 1

図 3-3-7 τ -S 履歴関係 (補修したシリーズ 2 の試験体)

と同じで付着応力度の低下率は補修しない試験体に比べて緩やかである。

③ 正負交番漸増繰り返し荷重（シリーズ3）

図3-3-8に正負漸増繰り返し荷重におけるR13-9, R13-18及びR19-9の τ -S履歴関係を例示する。除荷においては付着応力度と変位はある勾配をもって減少することは片振幅繰り返しと同様である。さらに、付着応力度0点から逆方向に荷重を加えると、除荷の勾配と同じ勾配で、除荷前付着応力度の絶対値の約60%の値まで至る。この値は補修しない試験体と比べて、若干大きくなった。その後、続けて負側に荷重を加えると、付着応力度を保持したまま、変位0まで戻る。補修しない場合のように付着応力度が減少することは見られない。変位が負側に入ると、その後の履歴性状は補修しない試験体とほぼ同じであった。一方、繰り返し回数の増加による付着応力度の低下率は補修しない試験体と比べて緩やかになった。荷重がほぼ一定域になる抜け出し変位はほぼ5mmからである。大変形領域においてもエポキシ樹脂注入効果の影響が著しく表れている。

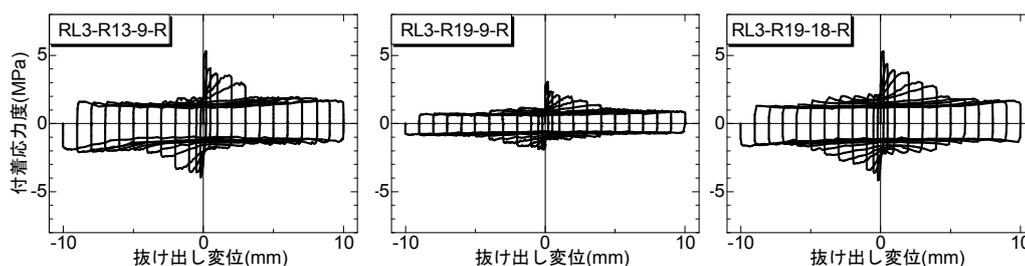


図3-3-8 τ -S履歴関係（補修したシリーズ3の試験体）

3.4 実験考察

3.4.1 付着応力度の低減率

異なる荷履歴（シリーズ1～3）に注目して τ - S 履歴関係における包絡線の低減について検討を行った。エポキシ樹脂補修前後の付着応力度低減率—抜け出し変位関係を図3-4-1に示す。縦軸は付着応力度を付着強度で除して基準化し、横軸の抜け出し変位は付着強度時を0に戻して示してある。またこれらの値はそれぞれの各シリーズで行われた複数の試験体の平均値である。

図3-4-1(a)に示すように、補修しない試験体の付着応力度低減の傾向は各加力方法において小振幅領域で急減期に低下し、その後ほぼ一定になることは同じであるが、シリーズ1から順に低減率は大きくなり、荷履歴の影響が明確に出ている。コンクリート強度、鉄筋径による差異はあまり無い。小振幅の抜け出し変位1mmにおいてシリーズ1で約50%、シリーズ3で約25%まで低下し、大変形振幅の抜け出し変位10mmにおいてシリーズ1で約20%、シリーズ3で約10%まで低下する。抜け出し変位10mmの大変形領域ではほぼ一定値になることがわかる。また、シリーズ1の付着応力度低減率と抜け出し変位関係を見ると、抜け出し変位5mmあたりから付着応力度低減率の変化が小さくなる傾向が見られるが、シリーズ2とシリーズ3の場合では、抜け出し変位3mm辺りからその変化が見られなくなった。繰り返し回数の影響を再検討する必要がある。

一方、図3-4-1(b)に示すように、エポキシ樹脂で補修した試験体の付着応力度低減率と抜け出し変位関係も繰り返しの影響が明確に見られるが、その低減の傾向は補修をしない

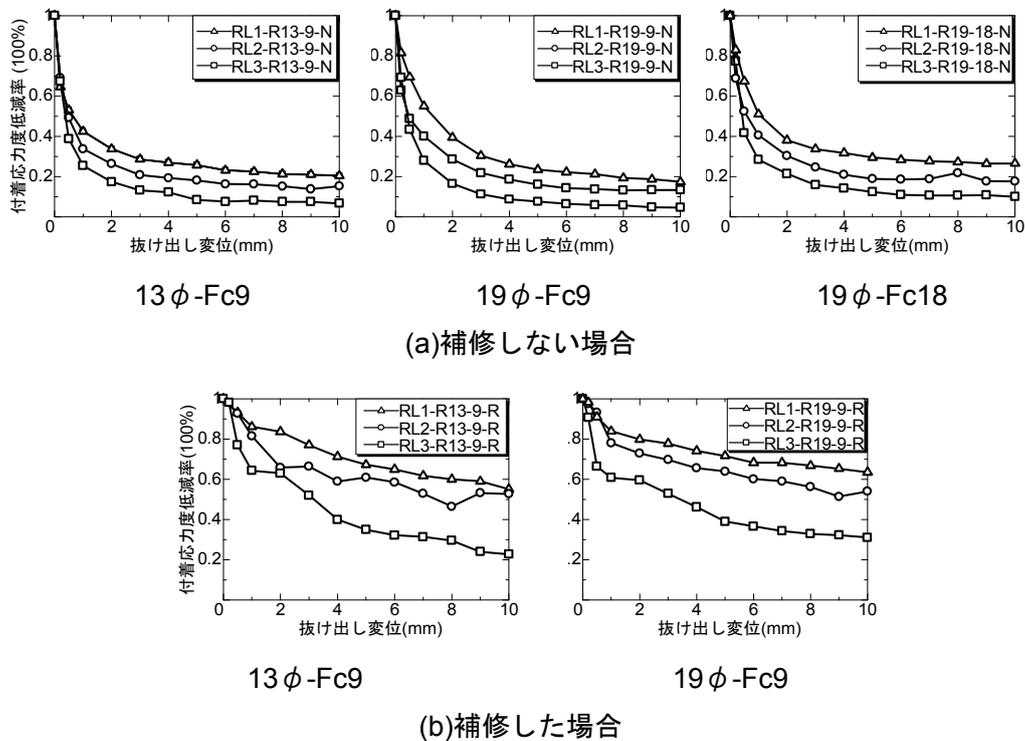


図3-4-1 付着応力度低減率—抜け出し変位関係

試験体より緩やかである。小振幅の抜け出し変位 1mm においてシリーズ 1 で約 85%、シリーズ 3 で約 60%まで低下し、大変形振幅の抜け出し変位 10mm においてもシリーズ 1 で約 55%、シリーズ 3 で約 23%まで低下する。エポキシ樹脂注入によって微小変形領域の付着応力度は付着強度に近い値を保持し、大変形領域においても高い付着性能を持っていることが分かる。鉄筋径が付着応力度低減率に与える影響はあまり見られない。また、補修した場合、付着応力度低減傾向は大振幅領域でも続いている。ただし、その低下傾向は徐々に小さくなる。

3.4.2 エネルギー吸収量

異なる履歴(シリーズ 2, 3)に注目し、 τ - S 履歴曲線におけるエネルギー吸収量について検討を行った。エネルギー吸収量から計算される等価粘性減衰定数の求め方を以下に示す。各試験体における各サイクルの履歴ループを抽出し、**図 3-4-2**に示すようにそれぞれに対して、履歴ループ正負側の除荷点 (τ_{max} , τ_{min})、等価剛性によるポテンシャルエネルギー量 (ΔAOE と ΔCOF の面積)、履歴エネルギー吸収量 (ループ ABCDA に囲まれている面積) が算出され、最後に等価粘性減衰定数を求める。その中、等価粘性減衰定数は履歴ループで吸収されるエネルギーが等価剛性によるポテンシャルエネルギー量に対して、その部材がどれだけのエネルギー量を有しているかを表す指標である。算定式を以下のように、**式 (3-4-1)**に示す。

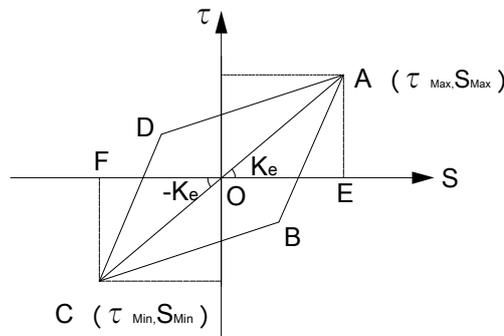


図 3-4-2 τ - S 関係の履歴モデル曲線

$$H_{eq} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\text{ループ ABCDA の面積}}{\Delta AOE + \Delta COF \text{ の面積}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta W}{W} \quad \dots\dots \text{式 (3-4-1)}$$

① 片振幅漸増繰り返し載荷

片振幅漸増繰り返し載荷の付着応力度と抜け出し変位履歴関係のエネルギー吸収量と抜け出し変位関係を**図 3-4-3**に示す。エネルギー吸収量は鉄筋とコンクリートの付着面積あたりに換算してある。また、補修した場合の縦軸は補修しない場合の 5 倍で表記してある。

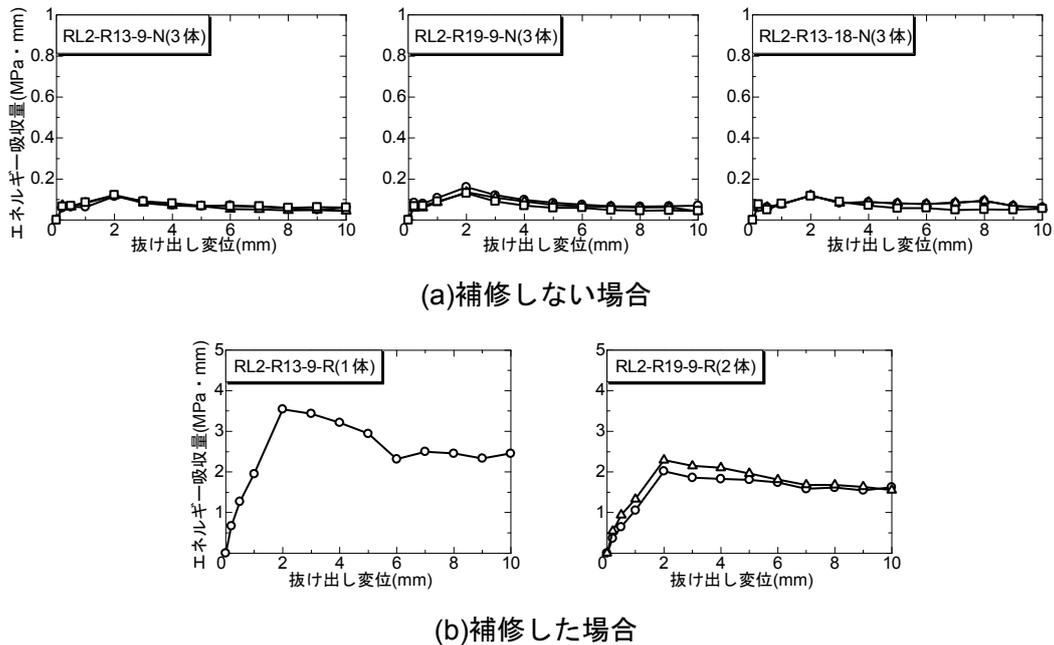


図 3-4-3 エネルギー吸収量－抜け出し変位

補修しない試験体の各サイクルのエネルギー吸収量は抜け出し変位 2mm 当たりで最大となり、その後幾分減少するがほぼ一定値になる。一定値は約 0.1MPa・mm となり、非常に低い値になった。変動因数の違いにかかわらず、全体のエネルギー吸収量と抜け出し変位の関係は同じであった。

補修した試験体における各サイクルのエネルギー吸収量は 0.67～3.54MPa・mm の値に分布し、補修しないものと同様、抜け出し変位 2mm 当たりで最大となる。RL2-R13-9-R のエネルギー吸収量の最大値は約 3.5MPa・mm となっている。一方、RL2-R19-9-R のエネルギー吸収量の最大値は約 2.3MPa・mm であり、相違が見られる。細径のほうが相対的に多量のエポキシ樹脂が注入されると推測され、注入効果が高いと思われる。補修しない試験体と比較すると、各抜け出し変位に対するエネルギー吸収量の上昇率は約 5～35 倍になった。これは付着強度の上昇ばかりでなく、その後の付着応力度低減を大幅に緩和し、その結果としてエネルギー吸収量大幅に上昇したものと考えられ、エポキシ樹脂注入の補修効果は優れていることが分かる。

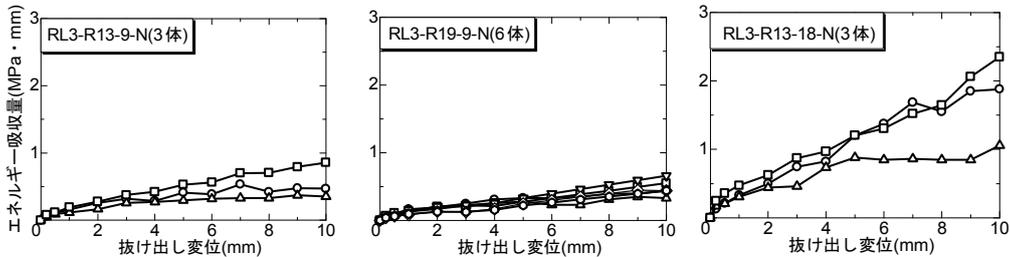
② 正負交番漸増繰り返し荷

正負交番漸増繰り返し荷におけるエネルギー吸収量と抜け出し変位の関係を図 3-4-4 に示す。補修しない場合のエネルギー吸収量は抜け出し変位の増加とともに増加する傾向にあるが、各変動因子に関わらず極めて小さい値に分布している。低強度コンクリートのエネルギー吸収量は抜け出し変位 10mm において R13-9 は約 1MPa・mm、R19-9 は約 0.7MPa・mm となっている。細径のものが太径のものより大きくなっているのは付着面積あたりに換算しているためである。一方、普通強度コンクリートの場合はエネルギー吸収

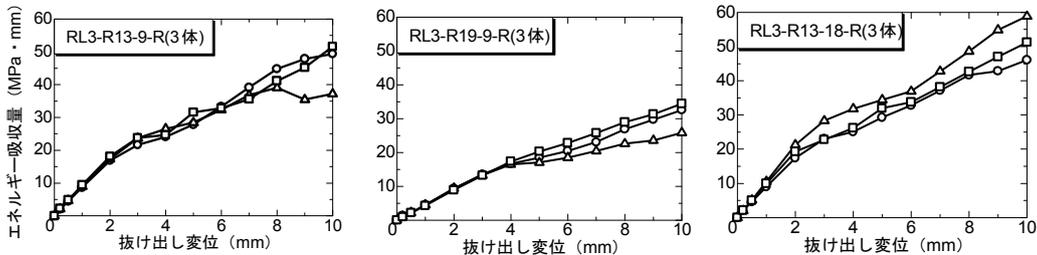
量の増加率も大きく、最大のもので $2.0\text{MPa}\cdot\text{mm}$ を超えている。

図 3-4-4 (b)に補修した試験体のエネルギー吸収量と抜け出し変位関係を示す。補修した場合の縦軸は補修しない場合の 20 倍であることに注意をされたい。エネルギー吸収量の増加傾向は補修しない場合と同じであるが、各抜け出し変位におけるエネルギー吸収量は著しく増大している。3 種類の試験体ともに抜け出し変位 5mm 以降、エネルギー吸収量の増加傾向が鈍る傾向にある。各グループにおける抜け出し変位 10mm におけるエネルギー吸収量の最大値はそれぞれ $53\text{MPa}\cdot\text{mm}$ 、 $30\text{MPa}\cdot\text{mm}$ 、 $60\text{MPa}\cdot\text{mm}$ と大きな値となっている。

図 3-4-5 にグループのエネルギー吸収量と抜け出し変位関係の平均を示す。13φ のコンクリート強度の違いについて見ると、補修の有無に関わらず普通強度のコンクリートの方が高いエネルギー吸収量を示している。鉄筋径の違いをみてみると、細径のものが太径のものが高いエネルギー吸収量を示している。この理由は前述したとおりである。

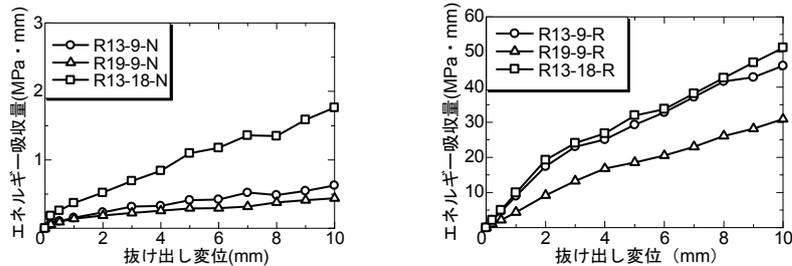


(a) 補修しない場合



(b) 補修した場合

図 3-4-4 エネルギー吸収量－抜け出し変位関係



補修しない場合

補修した場合

図 3-4-5 エネルギー吸収量－抜け出し変位関係の比較

3.4.3 等価粘性減衰定数

正負漸増繰り返し載荷における等価粘性減衰定数と抜け出し変位の関係を図 3-4-6 に示す。

補修しない場合の等価粘性減衰定数と抜け出し変位の関係を図 3-4-6(a)に示す。いずれの試験体においても、初期状態は約 0.2~0.3 となっている。R13-9-N は 3mm あたりまでは一定値を保つが繰り返し回数の増加にもかかわらず、等価粘性減衰定数の値はほぼ同様であった。その後はばらつく傾向にある。R19-9-N 及び R13-18-N では幾分増加傾向が見られる。増加率は R19-9-N が最も大きい。

補修した場合の等価粘性減衰定数と抜け出し変位の関係を図 3-4-6(b)に示す。初期状態は 0.3~0.4 となっており、補修しないものに比べ上昇している。その後は一定値もしくは増加傾向にあるがその増加率は小さい。補修しないものに比べばらつきは少なくとも安定している。最終的には 0.4~0.5 になる。

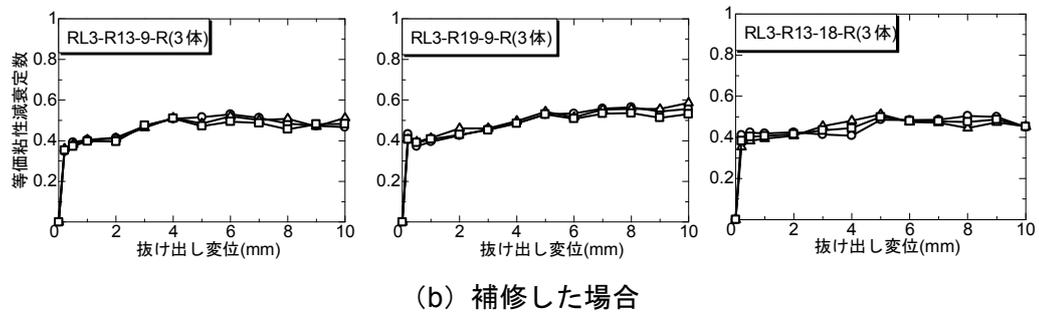
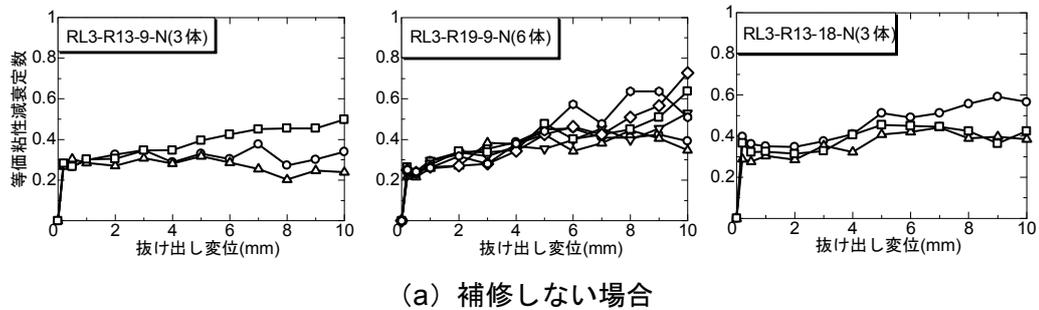
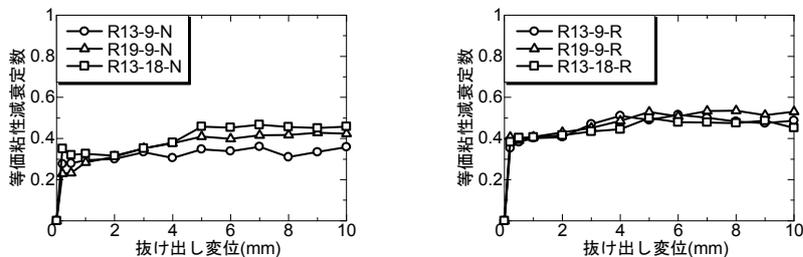


図 3-4-6 等価粘性減衰定数－抜け出し変位関係



(a)補修しない場合

(b)補修した場合

図 3-4-7 等価粘性減衰定数－抜け出し変位関係の比較

図 3-4-7 にグループの等価粘性減衰定数と抜け出し変位関係の平均を示す。その図を見ると、試験体の変動因数にもかかわらず、各サイクルにおける等価粘性減衰定数は大きな違いがなかった。補修しない場合はほぼ 0.25~0.4 となっており、補修した場合はほぼ 0.4~0.5 となっている。

3.5 結論

繰り返し引抜き試験を行い、付着強度、付着応力度－抜け出し変位関係の履歴特性について検討した。前章と同じくエポキシ樹脂注入の効果について検討を加えた。最後に、エネルギー吸収量と等価粘性減衰定数に関して各試験体の耐震性能を検討し、以下の知見を得た。

- 1) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係における包絡線を検討した結果、付着強度以降、付着応力度は急激に低下し、大変形時にはほぼ一定値に近づく。途中で除荷した場合、鉄筋の抜け出し変位は変化せず除荷時の抜け出し変位と同じ残留変位が発生する。
- 2) 片振幅漸増繰り返しにおける再載荷では、抜け出し変形は残留変形と変わらず、応力度のみ上昇し、除荷時付着応力度の 8 割程度に回復した時点で変形が増え始める。その後、除荷時の応力度に達した後、付着応力度は低下し始める。
- 3) 正負漸増振幅繰り返しにおいて除荷後、荷重を反転させると残留変形のまま荷重のみ変化し、負側のある応力度に達すると逆向きの変形が発生し始める。その付着応力度は正側の除荷時応力度と関係がある。発生した逆向きの変形が変位 0 に向うと、付着応力度は微小ではあるが減少する傾向にある。変位 0 以降、再び上昇し、元の付着応力度に近づく。
- 4) 付着強度以降の付着応力度の低下率は繰り返し回数が多いほど大きい。
- 5) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係から求めたエネルギー吸収量はコンクリート強度が大きいほど高い。また鉄筋径が細いほどエネルギー吸収能力が高い傾向があった。
- 6) 各サイクルにおける等価粘性減衰定数は各種変動因数に関係なく、ほぼ同程度であった。
- 7) エポキシ樹脂注入は付着履歴特性に大きな影響を与える。特に付着強度とその後の付着応力度の低下、再載荷における付着応力度の上昇の度合いに大きな効果があり、部材の耐力、エネルギー吸収能力上昇に有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 山田稔, 小杉英紀, 三宅勝: 繰り返し载荷を受ける鉄筋のボンドに関する実験的研究, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第5巻, pp.21-24, 1965.5
- 2) 大喜多一晃, 松村晃, 榊原克巳: 正負繰り返し応力を受ける鉄筋とコンクリートの付着に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.961-692, 1968.10
- 3) 石橋一彦, 園部泰寿, 大島久次: 繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリートの付着性状に関する研究 (第1報), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.689-690, 1968.10
- 4) 森田司郎, 角徹三: 繰り返し荷重下における鋼とコンクリート間の付着特性について (その1 実験的研究), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1251-1252, 1973.10
- 5) 小坂義夫, 谷川恭雄, 大間一美: 正負繰り返しを受けるコンクリートの付着性状, 日本建築学会東海支部研究報告, pp.29-32, 1972.4
- 6) R. Eligehausen, , E.P. Popov, and V.V. Bertero,: Local Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations, Report No.UCB/EERI 83-23,Earthquake Engineering Research Center, UCB,1983.10
- 7) GM Verderame, P Ricci, G De Carlo, G Manfredi (2009): Cyclic bond behaviour of plain bars. Part I: Experimental investigation. Construction and Building Materials 23 3499-3511, 2009
- 8) Duff A. Abrams : Tests of bond between concrete and steel, Published 1913 by University of Illinois in Urbana, 1913

第 4 章 復元力特性のモデル化

第4章 復元力特性のモデル化

4.1 はじめに

繰返し荷重を受ける丸鋼を用いた低強度コンクリート部材の復元力特性はコンクリートと鉄筋間に存在する付着応力度-抜け出し変位関係（以下 τ - S 関係と記す）によって大きな影響を受ける。このような RC 部材では耐力が発揮されないばかりでなく、鉄筋が滑り出するためその履歴特性は極端なスリップ形状となる。スリップ形状になるとエネルギー吸収能力が劣化し、結果的に地震時における耐震性能が劣ることになる。丸鋼を主筋とした低強度コンクリート部材の抵抗機構を解明するために、前章までに引抜き試験を実施することにより低強度コンクリート中の丸鋼の付着強度及び付着履歴関係を調べた。得られた丸鋼の付着履歴特性を付着滑脱する RC 部材の性能評価に用いるためには τ - S 履歴関係に関するモデル化の確立が必要である。本章では前章で得られた実験結果をもとに付着履歴特性のモデル化を試みる。

鉄筋の付着に関する τ - S 関係のモデル化は日本国内外に数多くの研究があるが、付着滑脱する丸鋼のものについてはほとんどないのが現状である。日本国内の付着履歴特性に関するモデル化の代表例として、森田ら¹⁾は異形鉄筋の付着割裂破壊を対象として、付着長さの短い試験体（付着長さ：D19-48mm，D25-66mm）に対して繰返し引抜き荷重を与え、 τ - S 関係の履歴を実験的に求め、これを数値解析に取り入れられるような形にモデル化し、**図 4-1-1**のように提案している。この履歴モデルは異なる除荷または再載荷のルートに対応した汎用性のあるものである。非常に貴重かつ先見的な研究であり、国内外で多く引用されている。そのほか、山本ら²⁾は異形鉄筋の残留変形の定量化を主目的として**図 4-1-2**のようにモデル化している。

国外では Tassios ら³⁾が曲げ応力を受ける鉄筋コンクリート部材の変形挙動を表すため、単純化した一軸引張応力及び引張・圧縮の繰返し応力を受ける鉄筋の τ - S 関係の履歴特性にスリップ性状を導入し、**図 4-1-3**のようにモデル化している。Elmorsi ら⁴⁾は柱梁接合部内の鉄筋の τ - S 関係の履歴関係をモデル化し、**図 4-1-4**のように提案している。このモデル化ではそれまでのモデルと異なり、繰返し荷重による低減についてもモデル化している。近年、Verderame ら⁵⁾は丸鋼の単調載荷及び正負繰返し載荷における τ - S 関係をそれぞれ実験的に求め、付着強度に対応する点を基準とし、それぞれの特性点を基準点に関係づけてモデル曲線を**図 4-1-5**のように提案している。その中では CEB-FIB のモデル⁶⁾を用いて付着強度とコンクリート強度の関係を結び付けている。丸鋼の付着履歴モデルに対しては Verderame ら⁵⁾の研究例が非常に貴重である。従来の設計では丸鋼を配筋する場合にはフック定着が義務付けられており、基本的には付着強度のみを考慮すればよく、付着性状の繰返し劣化にはそれほど注意を払ってこなかった経緯がある。既存建物で問題となっている低強度コンクリートの繰返しによる付着劣化特性に関しては国内外に研究が無いのが現状である。

本章では、以上のような観点を踏まえ、単調载荷及び繰返し载荷実験から得られた τ - S 関係に基づいて、履歴曲線上の特性点を回帰的に求め、モデル化曲線を提案した。また、前章で述べているエポキシ樹脂注入した試験体の τ - S 関係は補修しないものと大きく異なっており、本章では補修しないものと補修したもので分けてモデル曲線を提案した。最後に、提案したモデル曲線の妥当性については実験で得られた τ - S 履歴曲線及びエネルギー吸収量、等価粘性減衰定数の比較を行って検証した。

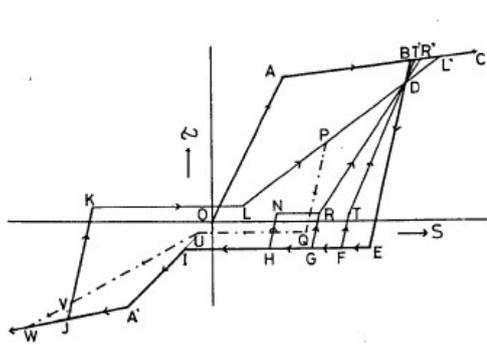


図 4-1-1 森田モデル曲線¹⁾

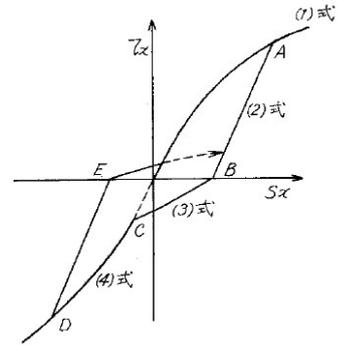


図 4-1-2 山本モデル曲線²⁾

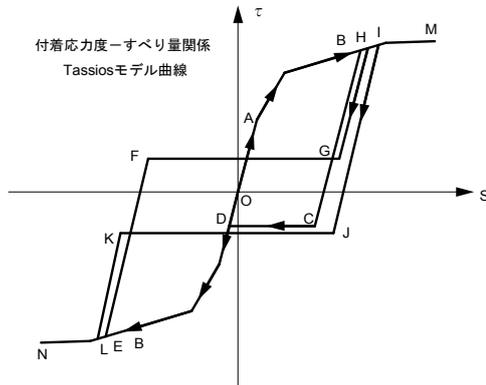


図 4-1-3 Tassios モデル曲線³⁾

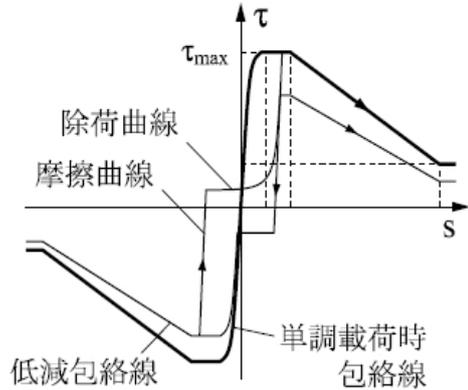
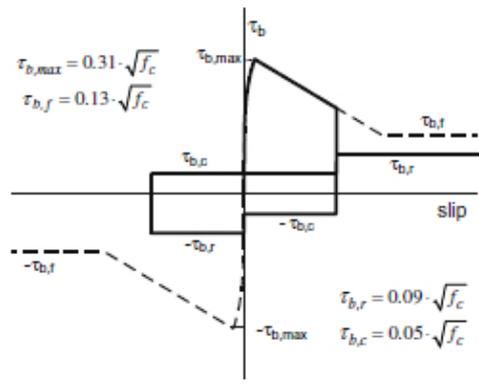
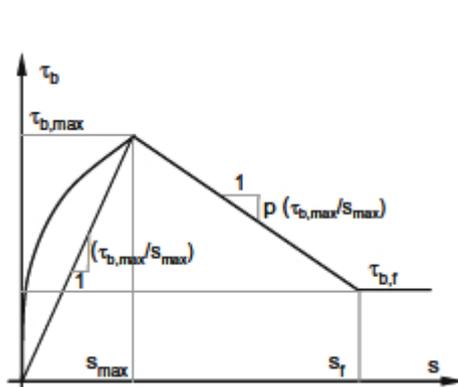


図 4-1-4 Elmersi モデル曲線⁴⁾



(単調モデル曲線)

(繰返しモデル曲線)

図 4-1-5 Verderame モデル曲線⁵⁾

4.2 補修しない試験体のモデル曲線

4.2.1 単調包絡線

単調引抜き荷重時の骨格曲線を図 4-2-1 のようにモデル化した。本分析に用いたデータは第2章の表 2-2-1 に示す単調引抜き試験体からの抽出したものである。しかし、水平筋のうち上端筋の τ - S 関係はブリージング等の影響を強く受けて他の2種類と大きな相違があったため、本章では中央筋と下端筋のデータのみを用いている。簡略化のため τ - S 関係を3領域に分け、A-B 間は付着応力度上昇域、B-C 間は付着応力度の下降域、C-D 間は付着応力度の一定領域と仮定した。単調荷重骨格曲線の各点の値を第2章の実験値から回帰的に定めた。図中において付着強度 τ_{Max} に対応する座標 B (τ_B, S_B) を基準とし、他の A, C, D 点を決める方法は Verderame ら⁵⁾が用いた手法と同じである。しかし、低強度コンクリートと丸鋼を用いた試験体の付着強度 τ_B の値がブリージングの影響に大きく左右されることによって大きくばらつくため、本章では個々の履歴特性と対応させるため実験で得られた付着強度を用いている。将来的にはデータを蓄積し、コンクリート強度等と関連付けて定量的に決定する必要があると考えている。また、特性点と基準点の割合はすべて最初二乗法で決められる。

A 点は固着力が全付着領域で喪失し、自由端部に変位が発生する時の付着応力度である。図 4-2-2 に τ_A と τ_B の関係を示す。 τ_A と τ_B には強い相関があるとされ、文献⁷⁾では普通強度のコンクリートに対してではあるが $\tau_A = 0.6\tau_B$ としている。本章では実験結果に基づいて A 点の座標を式 4-2-1 のように決めた。

$$A(\tau_A, S_A) = (0.79\tau_B, 0\text{mm}) \quad 4-2-1$$

付着強度の発生する B 点の変位については本実験では大きくばらつき、0mm から 0.174mm にかけて分布し、特に明瞭な傾向は見られなかった。Abrams⁷⁾の研究ではほぼ 0.1in. (0.254mm)、坂⁸⁾は 0.1mm としている。そのため本論文では B 点の変位 S_B を 0.1mm とした。

付着応力度は抜け出し変形が大きくなると僅かながら漸減し続ける。図 4-2-3 に実験で得られた付着強度に対する低減率を示すが、既往のモデル化⁵⁾に倣いモデル曲線ではある変位から一定と仮定し、一定となる開始点 C 点の抜け出し変位を 5mm とした。その時点の付着応力度は図 4-2-4 から、 $0.21\tau_B$ とし、C 点の座標は式 4-2-2 のように決めた。

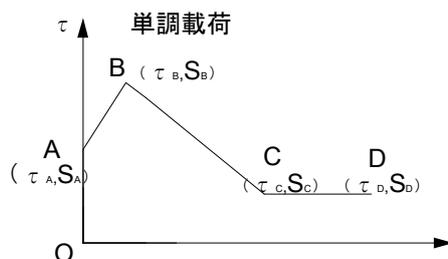


図 4-2-1 単調荷重包絡線（補修しない場合）

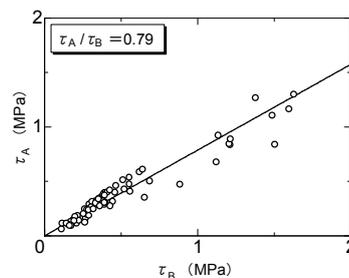


図 4-2-2 A 点の付着応力度

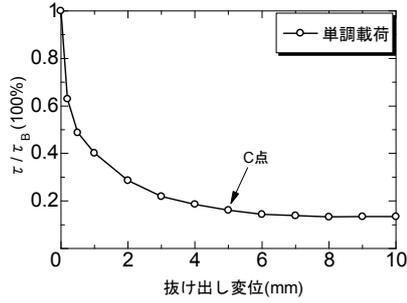


図 4-2-3 C 点の変位の決定方法

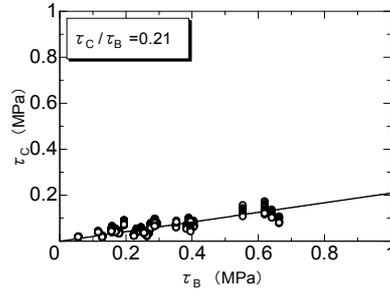


図 4-2-4 C~D 点の付着応力度

$$C (\tau_C, S_C) = (0.21\tau_B, 5\text{mm}) \tag{4-2-2}$$

最終点の D 点は C 点と同じ付着応力度を採用し、座標は式 4-2-3 のようになる。

$$D (\tau_D, S_D) = (0.21\tau_B, S > 5\text{mm}) \tag{4-2-3}$$

4.2.2 履歴特性

① 履歴特性の包絡線

主筋に丸鋼を使用した大多数の既存建物は 1970 年代に造られたため、それらの建物がこれまでに中小地震を経験し、付着履歴において既に付着強度に達したと仮定し、本章では τ - S 関係の履歴性状において付着応力度上昇域における繰り返しのモデル化は行っていない。仮定した履歴曲線の基準モデル化曲線を図 4-2-5 に示す。

負側の単調載荷包絡線は正側の包絡線を反転させたものである。単調載荷包絡線の B-C 上の O' 点から徐荷し、1 サイクル以上の履歴を経験した後の包絡線を E-F-G-Q のように決定した。負側は I-J-M-N である。E 点は再び戻ってきた時に目指す点である。E 点の変位は O' 点と同じとし、その付着応力度 τ_E は O' 点の応力度に依存し、E 点の座標を以下の式 4-2-4 のように表した。

$$E (\tau_E, S_E) = (\alpha\tau_{O'}, S_{O'}) \tag{4-2-4}$$

ここで、 α は単調載荷における骨格曲線上の除荷前付着応力度 $\tau_{O'}$ に対する 1 サイクルの履歴を経た時の付着応力度 τ_E の低減率で図 4-2-6 から以下の式 4-2-5 のように決定した。

$$\alpha = \tau_E / \tau_{O'} = 0.52 \tag{4-2-5}$$

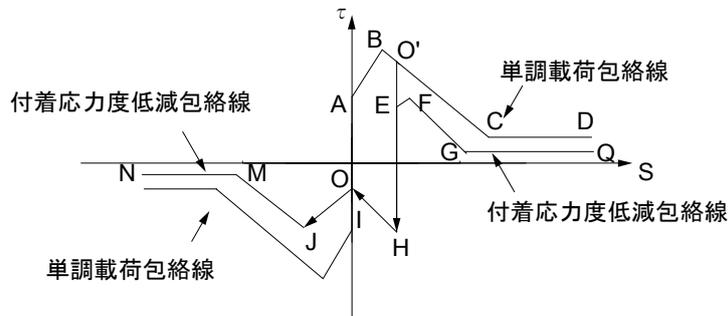


図 4-2-5 基準モデル化曲線 (補修しない場合)

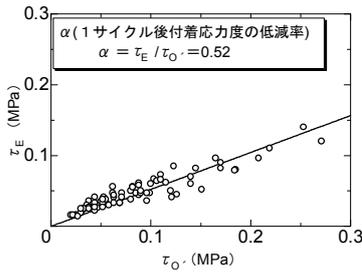


図 4-2-6 α の決定方法

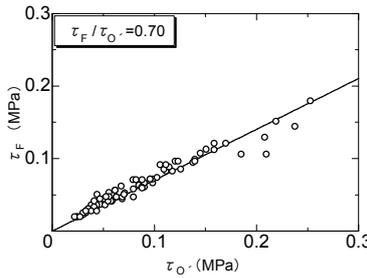


図 4-2-7 F 点の付着応力度

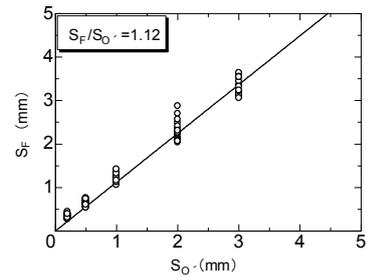


図 4-2-8 F 点の抜け出し変位

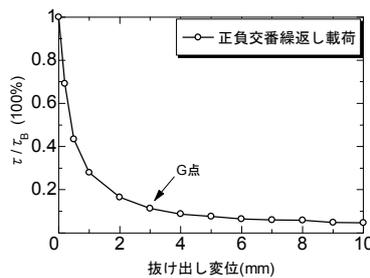


図 4-2-9 G 点の抜け出し変位

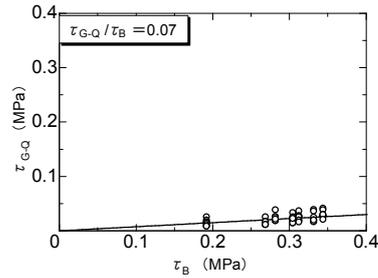


図 4-2-10 G~Q 点の付着応力度

続けて加力すると、新しい領域に入り付着応力度は F 点まで上昇する。F 点と 1 サイクル前除荷時 O' 点の関係を図 4-2-7、図 4-2-8 から以下の式 4-2-7 のように決めた。

$$F(\tau_F, S_F) = (0.70\tau_{O'}, 1.12 S_{O'}) \quad 4-2-6$$

F 点に達した後、G 点に向かう。G 点は図 4-2-9 に示すように繰り返し载荷における付着応力度がほぼ一定となる開始点である。G 点の付着応力度は図 4-2-10 から式 4-2-7 のように決定した。

$$G(\tau_G, S_G) = (0.07\tau_B, 3\text{mm}) \quad 4-2-7$$

最終の Q 点は G 点と同じ付着応力度を採用し、式 4-2-8 のように表わす。

$$Q(\tau_Q, S_Q) = (0.07\tau_B, S > 3\text{mm}) \quad 4-2-8$$

以後、付着応力度は $0.07\tau_B$ 以下になることはないと仮定した。

② 正負繰返し履歴特性

(a) B-C 間で除荷する場合

B-C 間で任意の点 O' から除荷した場合について図 4-2-11 に示すようにモデル化する。除荷すると応力度のみ減少し、荷重が負側に反転しても H 点に至るまで、除荷時と変位は同じである。また、H 点の座標は付着応力度 τ_H と除荷時直前の応力度 $\tau_{O'}$ の関係を付けて表わすと式 4-2-9 のようになる。

$$H(\tau_H, S_H) = (-\beta\tau_{O'}, S_{O'}) \quad 4-2-9$$

ここで、 β は図 4-2-12 から荷重反転時の付着応力度 τ_H と除荷時直前の付着応力度 $\tau_{O'}$ の関係から式 4-2-10 のように決めた。

$$\beta = |\tau_H / \tau_{O'}| = 0.54 \quad 4-2-10$$

H 点に達し、さらに負側に変形を増すと、付着応力度がわずかに減少しつつ変位 0 の

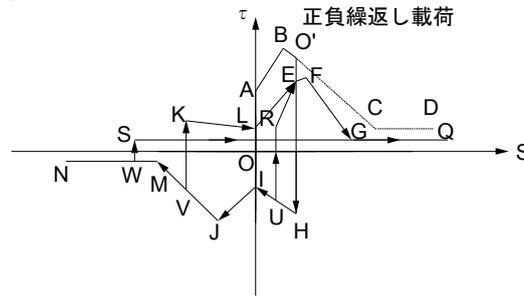


図 4-2-11 モデル化履歴曲線 (B-C 間で除荷する場合)

点に至る。変位が負側に反転すると荷重は再び増大し始める。このように微小変形領域内で荷重が増減する理由は荷重の反転によって埋め込み長さ区間内で付着応力度の分布が変化しているためと考えられ、文献⁵⁾でも指摘されていることであるがこの点については局所付着応力度分布等の検討が必要である。I 点の座標を H 点の付着応力度と関係付けて表すと以下の式 4-2-11 のようになる。

$$I(\tau_I, S_I) = (\gamma\tau_H, 0\text{mm}) \tag{4-2-11}$$

ここで、 γ は図 4-2-13 に示すように原点に到達した付着応力度 τ_I と荷重反転時の付着応力度 τ_H の割合によって式 4-2-12 のように決めた。

$$\gamma = \tau_I / \tau_H = 0.37 \tag{4-2-12}$$

変位 0 から荷重は再び増加しはじめ、J 点に至る。ここで J 点の座標は F 点の座標を負側に反転させたものと同じと仮定して、以下の式 4-2-13 のようにした。

$$J(\tau_J, S_J) = (-\tau_F, -S_F) \tag{4-2-13}$$

更に変位をそのまま負方向に増加させると、付着応力度低減骨格曲線 J-M-N を辿る。M 点、N 点は G 点、Q 点を反転させたものである。B-C 間または F-G 間で除荷した場合、図 4-2-11 に示すように除荷点変位 $S_{O'}$ の位置によって①～④に分けてモデル化した。

(1) O'-H 間で荷重が反転する場合

H-O' 間の任意点から再載荷する場合、 τ - S 履歴関係は H-O' の直線に沿って O' 点に戻り、その後の経路は元の単調包絡線を辿る。

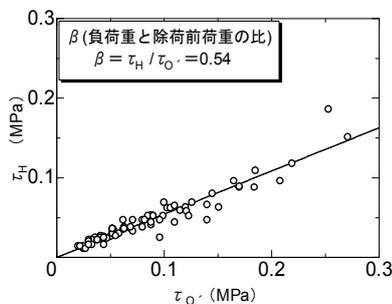


図 4-2-12 β の決定方法

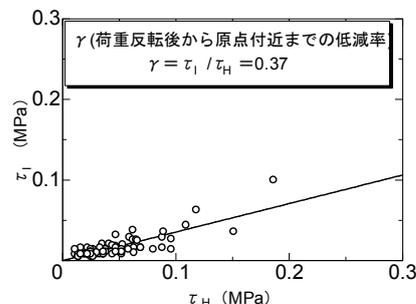


図 4-2-13 γ の決定方法

(2) H-I間で荷重が反転する場合 (U点)

経路は U-R-E-F とし, R 点の座標は式 4-2-14 のようにした。

$$R (\tau_R, S_R) = (-\beta\tau_U, S_U) \quad 4-2-14$$

また, $\tau_R = -\beta\tau_U \leq 0.07\tau_B$ の場合, τ_R の値は $0.07\tau_B$ とする。

(3) I-M間で荷重が反転する場合 (V点)

経路は V-K-L-E-F となる。各点の座標はこれまでのルールと同じとし, 以下のようにした。

$$K (\tau_K, S_K) = (-\beta\tau_V, S_V) \quad 4-2-15$$

$$L (\tau_L, S_L) = (\gamma\tau_K, 0) \quad 4-2-16$$

また, $\tau_K = -\beta\tau_V \leq 0.07\tau_B$ の場合, τ_K の値は $0.07\tau_B$ とする。その後 V から除荷また再載荷すると, 付着応力度は $0.07\tau_B$ を維持したまま, K から L に至る。その後の経路は前述した経路と同じである。

(4) M-N間で荷重が反転する場合 (W点)

経路は W-S-G となる。大変形領域で荷重が反転する場合, 応力度は低減せずそのまま反転するものとする。これは大変位になると付着応力度は付着強度 τ_B に対し, かなり低下するとともに付着応力度の鉄筋方向の分布はほぼ一樣になるためと考えられる。

$$|\tau_W| = |\tau_S| = 0.07\tau_B \quad 4-2-17$$

(b) C-D間で除荷する場合

大変形領域 C-D 間または G-Q 間で除荷する場合は図 4-2-14 に示すとおりである。O' から除荷し H 点に至る。また, 逆方向に続けて載荷すると, この応力度を維持しつつ, 変位のみ増大する。負方向に移動中に I 点から除荷する場合, 反転する応力度は $\tau_K = \tau_E = 0.07\tau_B$ とする。

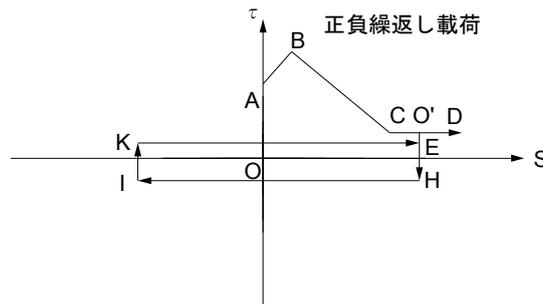


図 4-2-14 モデル化履歴曲線 (C-D 間で除荷する場合)

4.3 補修した試験体のモデル曲線

エポキシ樹脂注入で補修した τ - S 履歴関係は補修しない場合の τ - S 履歴関係と大きく異なるため新たにモデル曲線を提案する必要がある。前節と同じように、荷重変形の包絡線と繰返し履歴特性に分けてモデル化した。

4.3.1 単調包絡線

単調荷重時に仮定した包絡線を図 4-3-1 に示す。包絡線の各基準点は第2章の表 2-2-1 に示す引抜き試験からの回帰的に抽出したものである。補修しない場合と同じように付着強度に対応する座標 B (τ_B, S_B) を基準とし、他の A, C, D の各点を決めている。

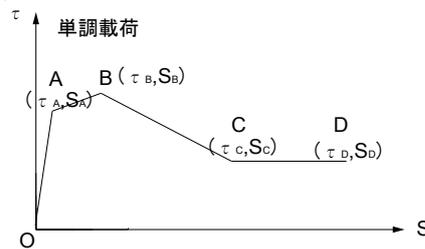


図 4-3-1 単調荷重包絡線（補修した場合）

補修しないモデル包絡線では固着力が全付着領域で喪失し、自由端部に変位が発生し始める付着応力度を付着強度 τ_B の 0.79 倍として設定していたが、補修した場合、変位が発生し始める点の応力度 τ_A と付着強度 τ_B の関係をプロットして見ると、図 4-3-2 に示すように大きくばらついていた。そこで、本提案では補修しない場合のように抜け出し変位が 0 における基準点を設定するのではなく、原点から初期勾配をもって最初の折れ点 A 点に向かうとした。すなわち、単調荷重包絡線の τ - S 関係を O-A-B 間（付着応力度上昇域）、B-C 間（付着応力度下降域）、C-D 間（付着応力度一定領域）の 3 領域に分けた。

また、付着強度 τ_B はエポキシ樹脂の充填性及びエポキシ樹脂の性質などと関係があると考えたため、補修しない場合と同様に、実験で得られた個々の付着強度を用い、それぞれの履歴特性と対応させるようにした。単調荷重包絡線の付着応力度上昇域で、最初に折れ曲がる A 点は付着強度 τ_B とその時の変位 S_B を基に図 4-3-3、図 4-3-4 から式 4-3-1 のように決めた。

$$A (\tau_A, S_A) = (0.95\tau_B, 0.40 S_B) \tag{4-3-1}$$

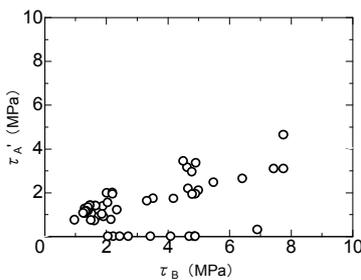


図 4-3-2 τ_A と τ_B の関係

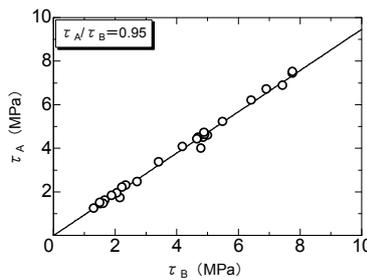


図 4-3-3 τ_A と τ_B の関係

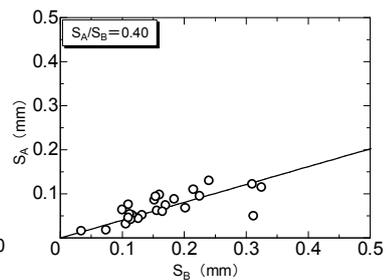


図 4-3-4 S_A と S_B の関係

その後、A点から付着強度の発生するB点に向かうものとする。補修しない場合は付着強度を発生するB点の変位 S_B は一率0.1mmに決めたが、補修した試験体の場合は0mmから0.448mmにかけて広く分布するため、本章では S_B を補修しない場合の2倍の0.2mmとした。ここで、**図4-3-1**に示すように付着応力度上昇域(O-A, A-B)における傾きはそれぞれ以下の**式4-3-2**のように表せる。

$$\begin{aligned}
 K_1 &= \tau_A / S_A = 2.375 K_B \text{ N/mm}^3 & S &\leq S_A \\
 K_2 &= (\tau_B - \tau_A) / (S_B - S_A) = 0.083 K_B \text{ N/mm}^3 & S_A &< S \leq S_B
 \end{aligned}
 \tag{4-3-2}$$

ここで、 K_B ：付着強度時の等価剛性 (N/mm^3)

付着応力度が一定となるC点は補修しない場合と同じとして5mmとした。しかし、実験では**図4-3-5**に示すように変形が大きくなるにつれて付着応力度は僅かながら漸減するが、モデル曲線ではある変位から一定値を保持すると仮定した。その時点の付着応力度は**図4-3-6**から、 $0.50\tau_B$ とした。補修しない場合に一定値となる付着応力度を $0.21\tau_B$ としたのに比較すると、エポキシ樹脂注入により付着強度からの低下度合いは半分以下になっていることが分かる。C点の座標は**式4-3-3**のようになる。

$$C(\tau_C, S_C) = (0.50\tau_B, 5\text{mm}) \tag{4-3-3}$$

載荷の最終点のD点はC点と同じ付着応力度を採用し、座標は**式4-3-4**のようになる。

$$D(\tau_D, S_D) = (0.50\tau_B, S > 5\text{mm}) \tag{4-3-4}$$

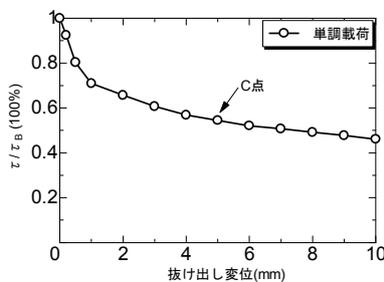


図4-3-5 C点変位の決定方法

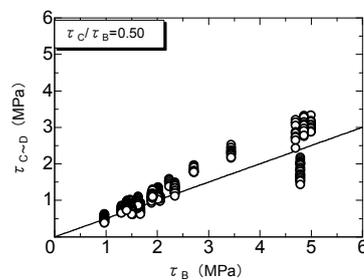


図4-3-6 τ_{C-D} と τ_B の関係

4.3.2 履歴特性

① 履歴特性の包絡線

τ - S 履歴関係における包絡線を**図4-3-7**に示す。このモデル曲線は前節に提案した補修しない場合の履歴ルールと同様に、付着応力度の上昇域O-A-Bまでは前項に示した単調載荷包絡線を辿り、その後、繰り返しにより低減された包絡線と履歴ルールに移行している。負側の包絡線は正側の包絡線に原点对称に移動したものである。 S_B 以降で荷重が反転する点をO'点とすると、負方向への τ - S 履歴関係における基準包絡線はO'-H-I-J-M-Nの経路を辿るとする。再度、荷重が反転し正側に向かう時再び戻ってくる時に目

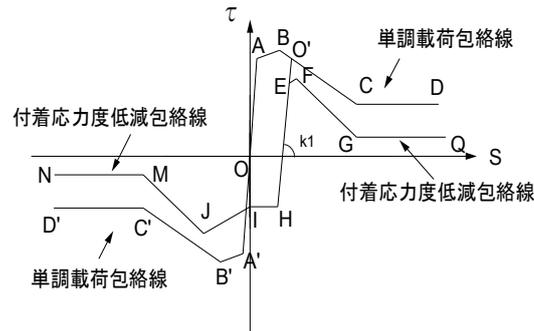


図 4-3-7 基準モデル化曲線（補修した場合）

指す点を E 点とすると，正方向へ τ - S 履歴関係における包絡線は E-F-G-Q を辿る。E 点の座標を式 4-3-5 のように示す。

$$E (\tau_E, S_E) = (\alpha' \tau_{O'}, S_{O'} - (1 - \alpha') \cdot \tau_{O'} / K_1) \quad 4-3-5$$

ここで， α' は除荷時から 1 サイクルの履歴を経験したことによる付着応力度の低減率を図 4-3-8 から式 4-3-6 のように決めた。

$$\alpha' = |\tau_E / \tau_{O'}| = 0.80 \quad 4-3-6$$

E 点から正側に加力すると，付着応力度は F 点まで上昇する。F 点は図 4-3-9，図 4-3-10 から除荷点 O' と関係づけて，式 4-3-7 のように決めた。

$$F (\tau_F, S_F) = (0.89 \tau_{O'}, 1.13 S_{O'}) \quad 4-3-7$$

F 点に到達後，G に向かう。G 点は図 4-3-11 に示すように繰返し载荷における付着応力度がほぼ一定となる点である。G 点の付着応力度と付着強度 τ_B の関係は図 4-3-12 から式 4-3-8 のように決めた。

$$G (\tau_G, S_G) = (0.22 \tau_B, 5 \text{mm}) \quad 4-3-8$$

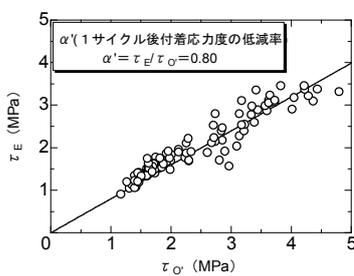


図 4-3-8 α' の決定方法

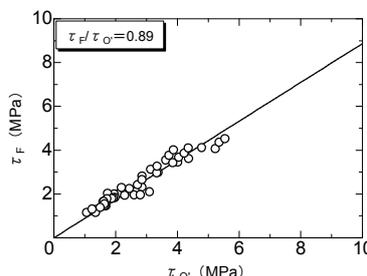


図 4-3-9 F 点の付着応力度

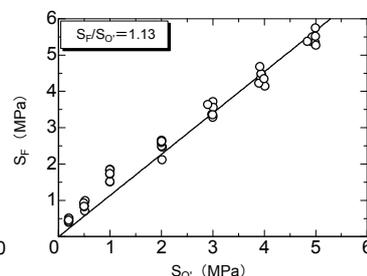


図 4-3-10 F 点の抜け出し変位

補修しない場合は付着応力度が一定となる時の付着応力度を $0.07 \tau_B$ としたので，エポキシ樹脂注入によって 3 倍以上の付着応力度を見込むことになる。最終の Q 点の座標を式 4-3-9 のように示す。

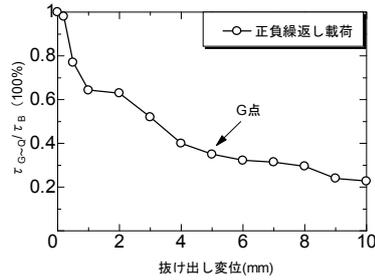


図 4-3-11 G 点変位の決定方法

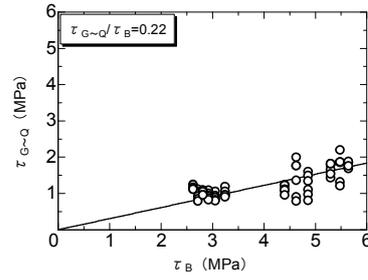


図 4-3-12 τ_{G~Q}とτ_Bの関係

$$Q(\tau_Q, S_Q) = (0.22\tau_B, S > 5\text{mm}) \quad 4-3-9$$

負側の経路 J-M-N は正側経路 F-G-Q と原点对称に移動した低減包絡線と仮定する。

② 正負繰返し履歴特性

τ-S 関係における履歴特性を除荷開始点の変位により分けて提案することとする。すなわち、付着応力度が最大となる B 点から付着応力度が一定値となる C 点の領域と付着応力度が一定値と C 点から D 点の領域である。補修しない場合と同じように、付着強度以後の B-C と C-D 域の繰返し履歴特性を以下のように検討した。

(a) B-C 間で除荷する場合

図 4-3-13 に B-C 間で除荷する場合の履歴曲線を示す。B-C 間で任意の O' 点から除荷する時、付着応力度と変位は一定の勾配をもって減少する。付着応力度 0 から更に逆方向に荷重を加えると、除荷勾配と同じ勾配で、H 点に至る。その勾配は O-A における初期勾配 K₁ とする。これは補修しない場合の除荷においては、荷重のみ減少し、変位はある応力度に達するまでは変わらない点とは大きな違いである。

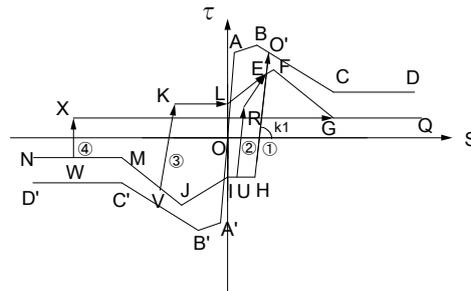


図 4-3-13 モデル履歴曲線 (B-C 間で除荷する場合)

H 点の付着応力度 τ_H とその時の変位 S_H は除荷時の O' 点との関係を付けて式 4-3-10 のように表す。

$$H(\tau_H, S_H) = (-B'\tau_{O'}, S_{O'} - (1+B')\cdot\tau_{O'}/K_1) \quad 4-3-10$$

ここで、式中の B' は除荷時付着応力度 τ_{O'} と到達付着応力度 τ_H の比率であり、図 4-3-14 のように、あまり関係性が読み取れない。これは微小変形における繰返しの影響を強く

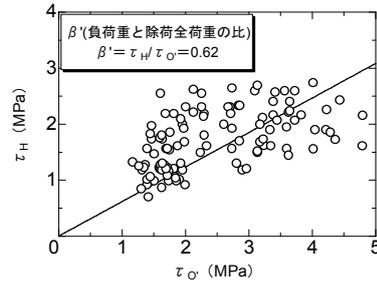


図 4-3-14 β' の決定方法

受ける領域と大変形域に近いより安定したループを描く領域の β' が混在しているためと考えられる。本章では他の因子の同じように簡便化のために原点を通る直線で表すこととした。最小二乗法による近似曲線は式 4-3-11 のように表すことができる

$$\beta' = |\tau_H / \tau_O| = 0.62 \tag{4-3-11}$$

その後、一定の付着応力度 τ_H を保持し、変位 0 まで戻る。この点を I 点に達する。さらに負側に進入すると、I 点から J 点まで応力度が上昇する。J 点、M 点、N 点の座標は正側における F 点、G 点、Q 点と原点对称の位置にあるとし、式 4-3-12 のように表す。

$$\begin{aligned} J (\tau_J, S_J) &= (-\tau_F, -S_F) \\ M (\tau_M, S_M) &= (-\tau_G, -S_G) \\ N (\tau_N, S_N) &= (-\tau_Q, -S_Q) \end{aligned} \tag{4-3-12}$$

負側の経路 H-I-J-M-N 上の O'' 点で除荷する場合、図 4-3-13 に示すように除荷点変位 $S_{O''}$ の位置によって①～④に分けてモデル化した。

(1) $S_H \leq S_{O''} < S_O$ の場合

H-O' の間の任意点から再載荷する場合、 τ - S 関係は勾配 K_1 の直線に沿って O' 点に戻り、その後の経路は元の単調包絡線を辿る。

(2) $0 \leq S_{O''} < S_H$ の場合、経路: U-R-E-F-G-Q

I-H の間の任意点 (U 点) から再載荷する時、勾配 K_1 に沿って R 点まで至り、その後、R 点から E 点に向かって上昇し、そして付着応力度低減包絡線を辿る。R 点は式 4-3-13 のように決めることができる。

$$R (\tau_R, S_R) = (-\beta' \tau_U, S_U - (1 + \beta') \cdot \tau_U / K_1) \tag{4-3-13}$$

(3) $S_M \leq S_{O''} < 0$ の場合、経路: V-K-L-E-F-G-Q

M-I の間の任意点の V 点から再載荷する時、勾配 K_1 に沿って、K 点まで至る。K 点の座標は R 点の場合と同様で、式 4-3-14 のように表す。

$$K (\tau_K, S_K) = (-\beta' \tau_V, S_V - (1 + \beta') \cdot \tau_V / K_1) \tag{4-3-14}$$

その後再載荷すると、付着応力度を維持したまま、K 点から変位 0 の L 点に至り、E 点

4.4 提案したモデル曲線妥当性についての検討

4.4.1 付着応力度—抜け出し変位履歴関係

提案したモデル曲線の妥当性を検討するために、実験値との比較を行った。比較対象は第3章の表3-2-1に示す繰り返しの補修しないものと補修した試験体のものである。補修しない試験体の比較検討例を図4-4-1~4-4-3に示す。ここで、大振幅一回繰り返しと片振幅繰り返しの包絡線は単調載荷包絡線のルールに従っている。また、片振幅漸増繰り返しの場合はB-C間で除荷する場合の第①のルールに従っている。図4-4-3に示すシリーズ3については抜け出し変位 1mm までの微小変形領域とそれ以後の大変形領域に分けて示してある。シリーズ1の正側およびシリーズ2においては繰り返しの影響を受けないため付着強度を達した後の付着応力度が急激に低下するあたりの推測があまり良くできていない。シリーズ3の比較においては微小振幅領域での復元力特性を推測し得ていると考えられる。

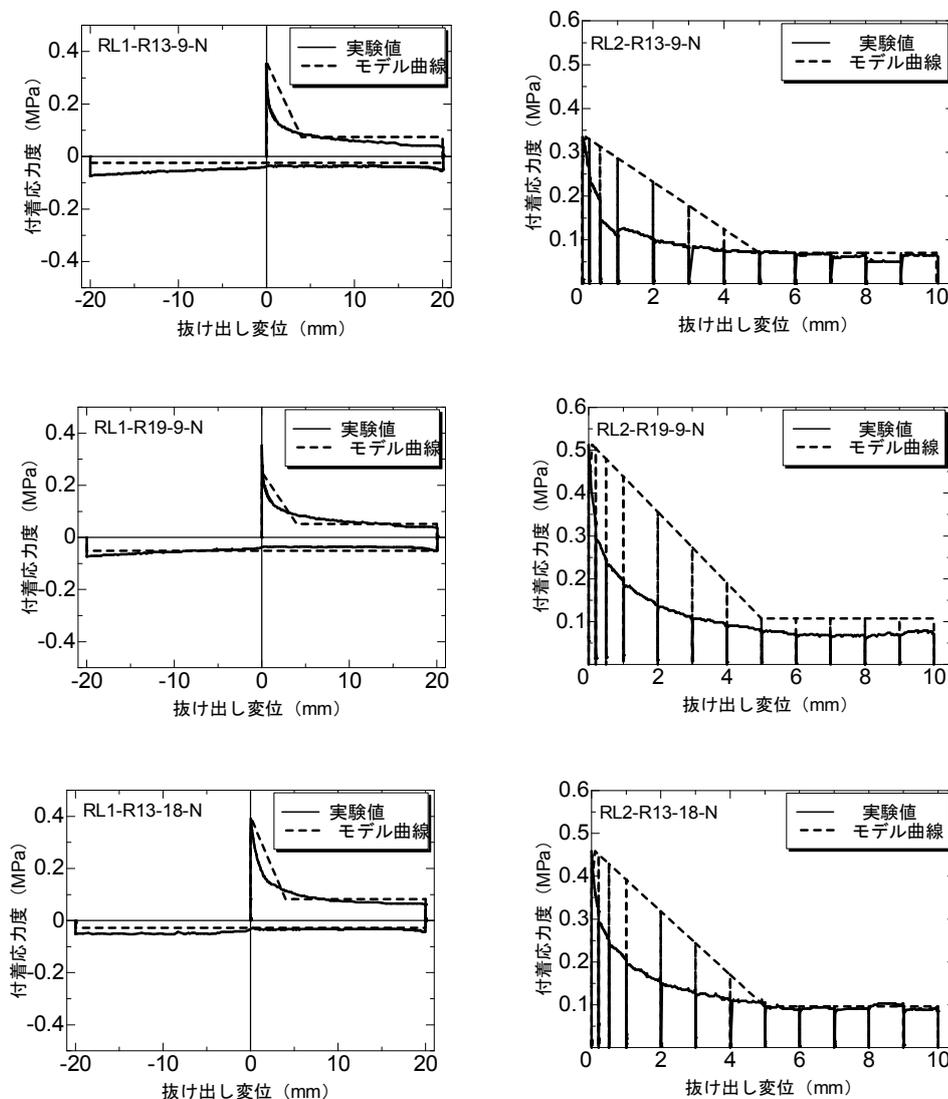


図 4-4-1 シリーズ 1 (補修しない場合) 図 4-4-2 シリーズ 2 (補修しない場合)

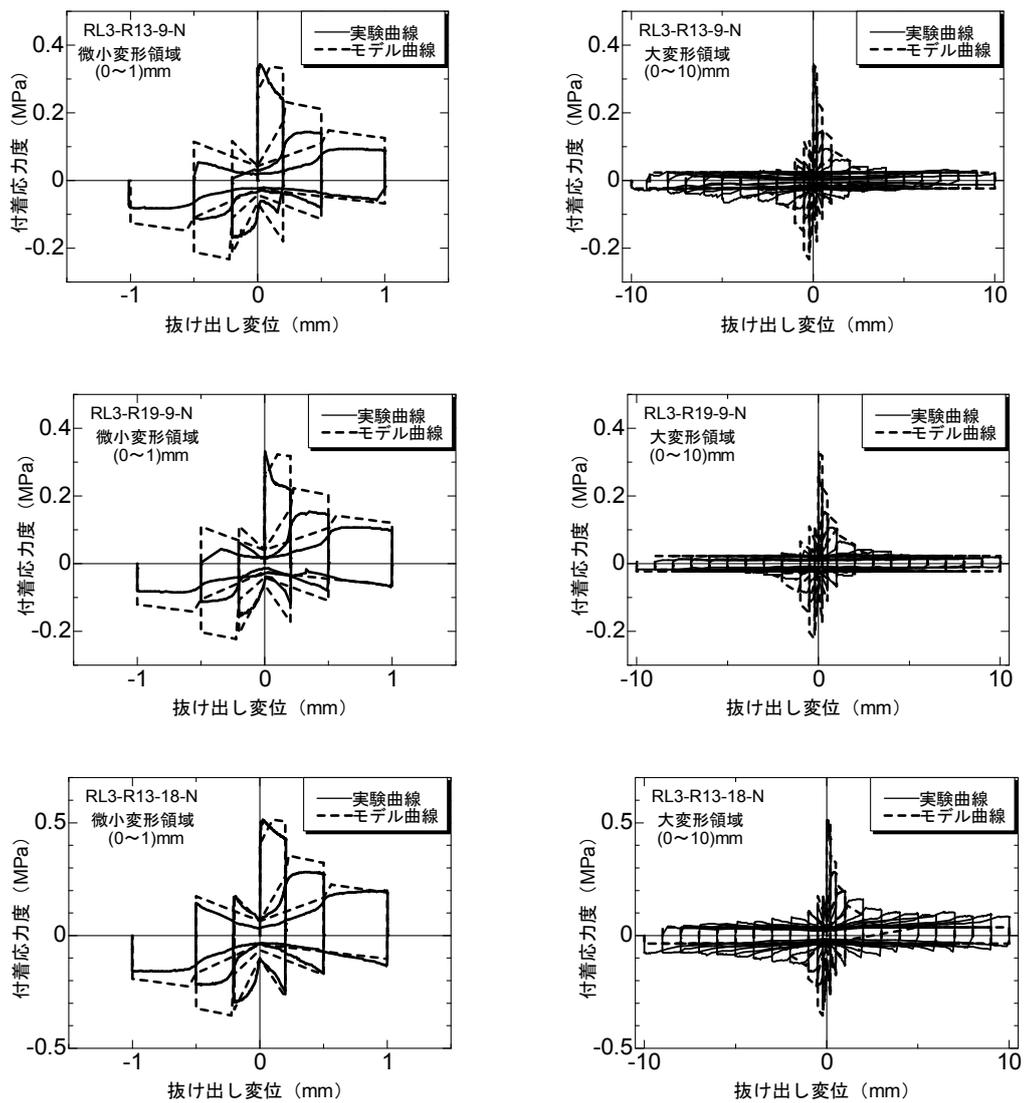


図 4-4-3 シリーズ 3 (補修しない場合)

次に、エポキシ樹脂注入で補修した試験体の実験値とモデルによる履歴特性の比較を示す。従ったルールは補修しない試験体の場合と同じである。

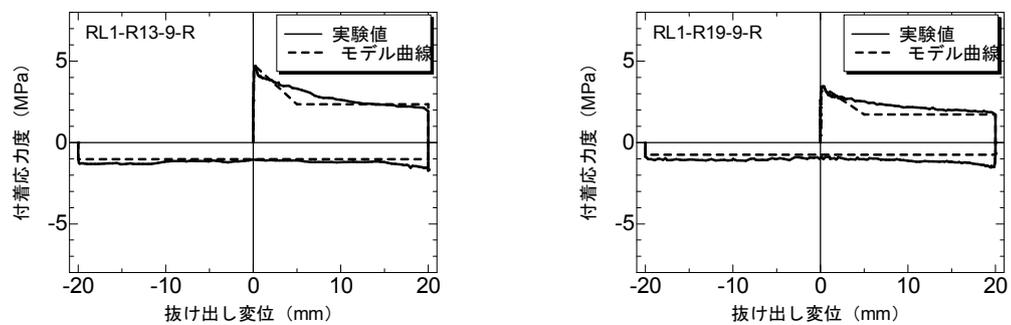


図 4-4-4 シリーズ 1 (補修した場合)

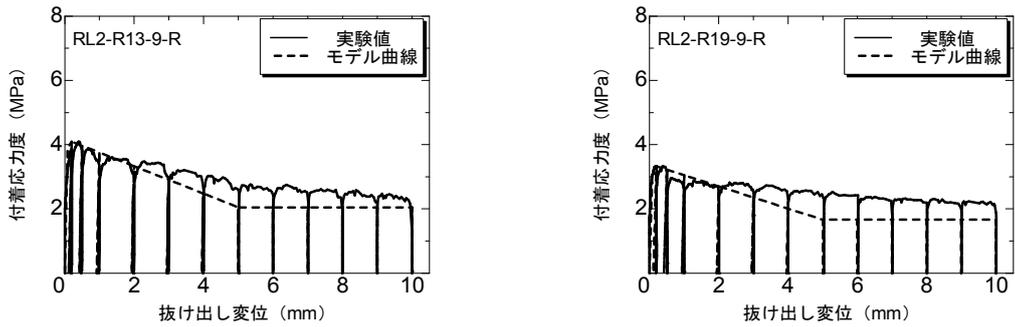


図 4-4-5 シリーズ 2 (補修した場合)

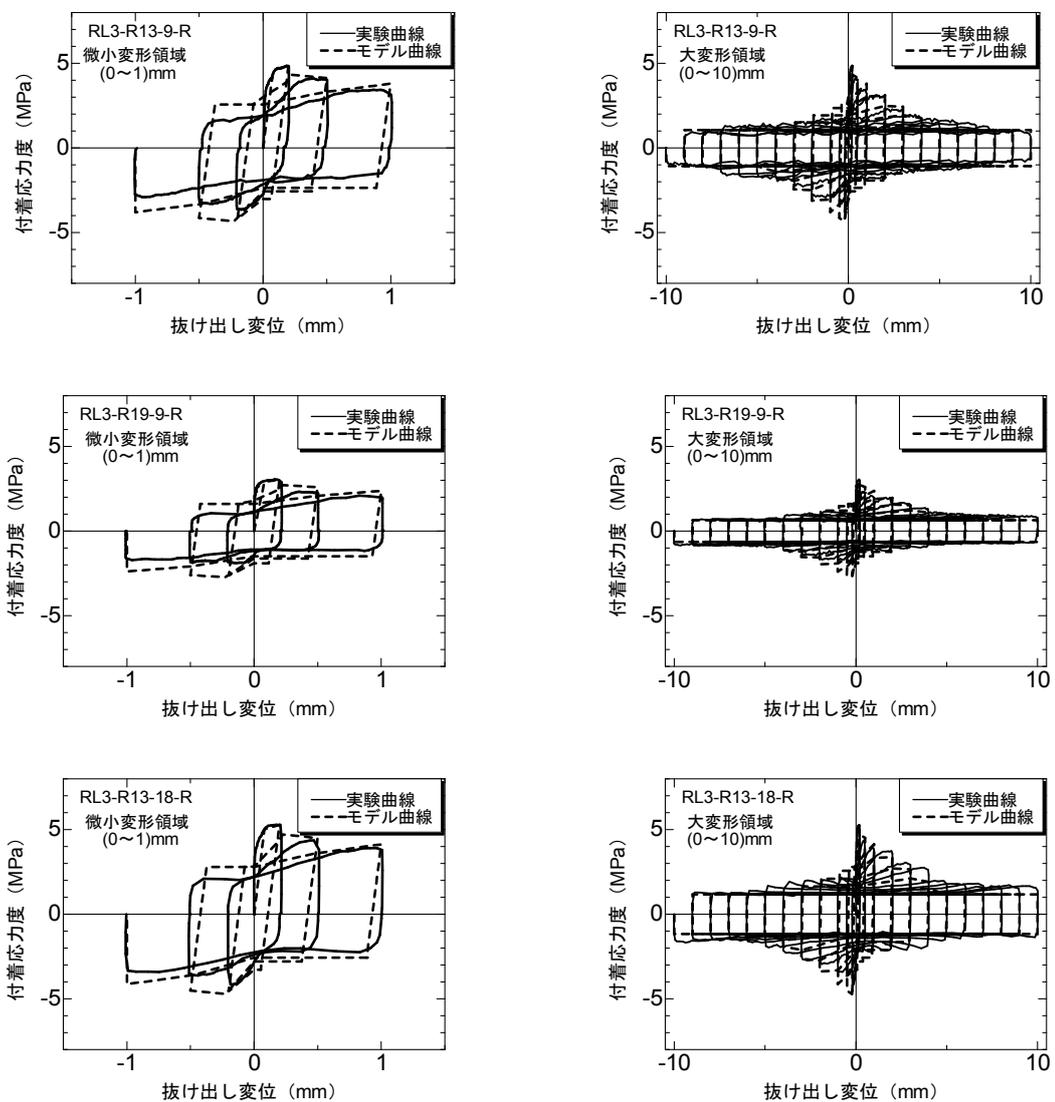


図 4-4-6 シリーズ 3 (補修した場合)

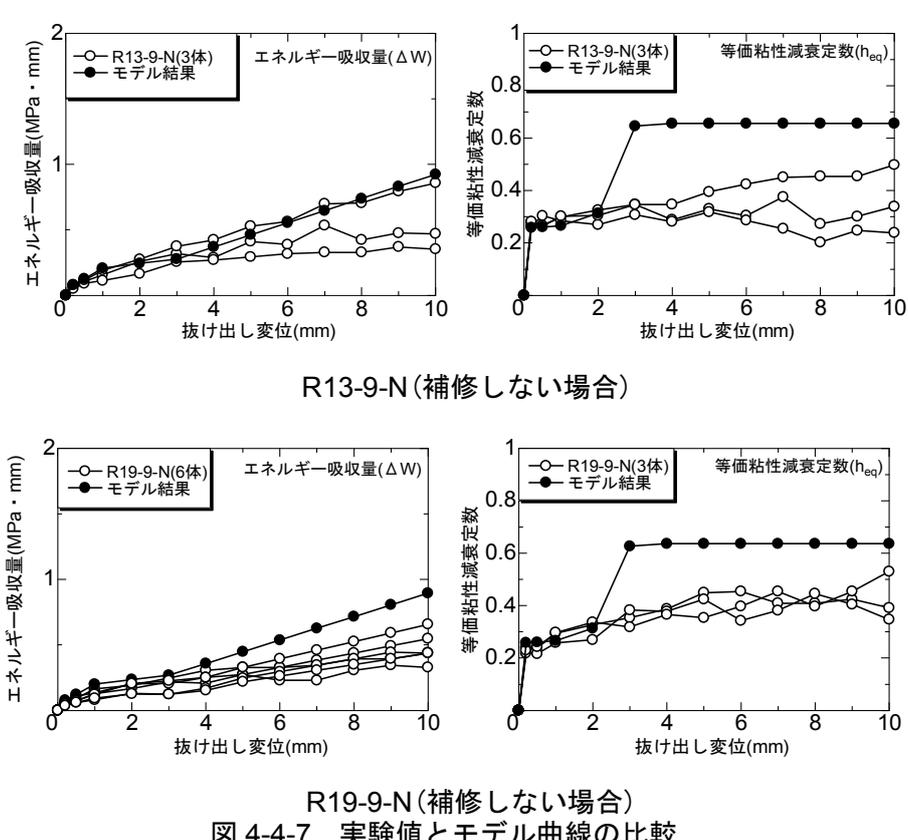
全体的に見ると、実験結果を追跡し得ていると思われる。ただし、補修しない試験体に関するパラメータ α 、 β と γ 、補修した試験体に関するパラメータ α' と β' については繰り返し回

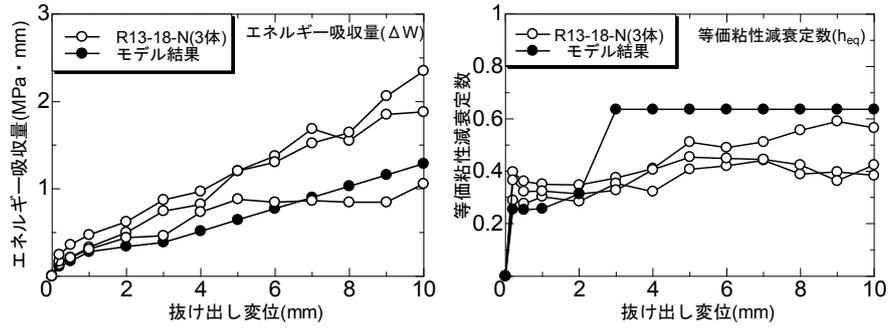
数の増加ばかりでなくコンクリート強度によっても値は変動すると考えられ、提案した履歴モデル曲線の汎用性を確保するためには、今後データの蓄積が望まれる。

4.4.2 耐震性能

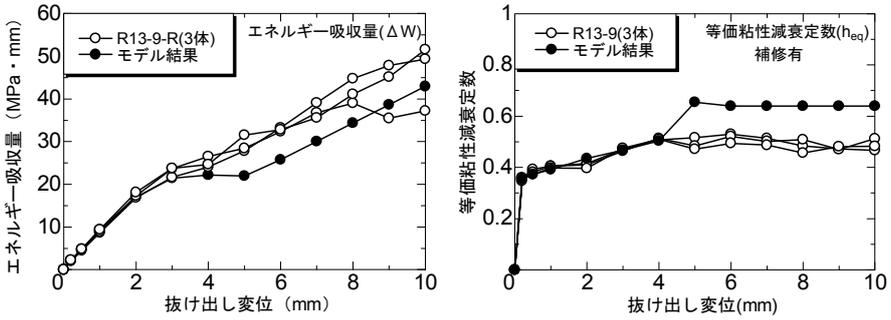
エネルギー吸収量及び等価粘性減衰定数と抜け出し変位関係を用いて、本章で提案したモデル曲線ルールによって計算した解析値との比較例を図4-4-7に示す。また、図中のモデル曲線を作成する際に用いた τ_B は複数の実験で得られた付着強度の平均値である。補修しない試験体の付着強度平均値はR13-19-N, R19-9-N及びR13-18-Nで、それぞれ0.33MPa, 0.32MPaと0.46MPaであり、補修した試験体の付着強度平均値はR13-19-R, R19-9-R及びR13-18-Rで、それぞれ4.88MPa, 2.91MPaと5.14MPaである。各サイクルのエネルギー吸収量及び等価粘性減衰定数の実験値とモデル計算値を比較して、その一致度合いを図4-4-8と図4-4-9に示す。

エネルギー吸収量及び等価粘性減衰定数の実験値と計算値の一致度合いを見ると、実験値と提案した履歴モデル曲線による推定値は比較的に対応していると考えられるが、付着応力度が一定となる大変形領域においては、十分に追跡できていない部分も見られた。これは実際に付着応力度安定域に進入しても、繰り返し载荷による摩擦力の劣化による影響を受けたと考えている。

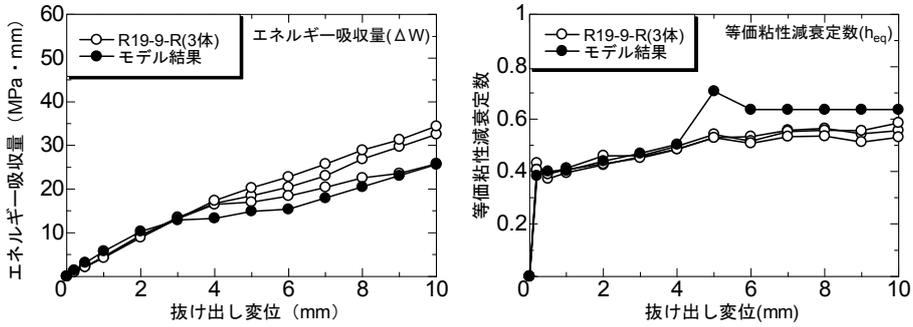




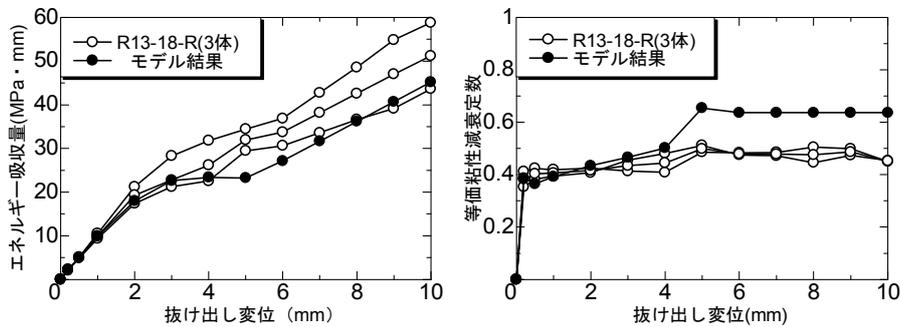
R13-18-N(補修しない場合)



R13-9-R(補修した場合)



R19-9-R(補修した場合)



R13-18-R(補修した場合)

図 4-4-7 実験値とモデル曲線の比較(続き)

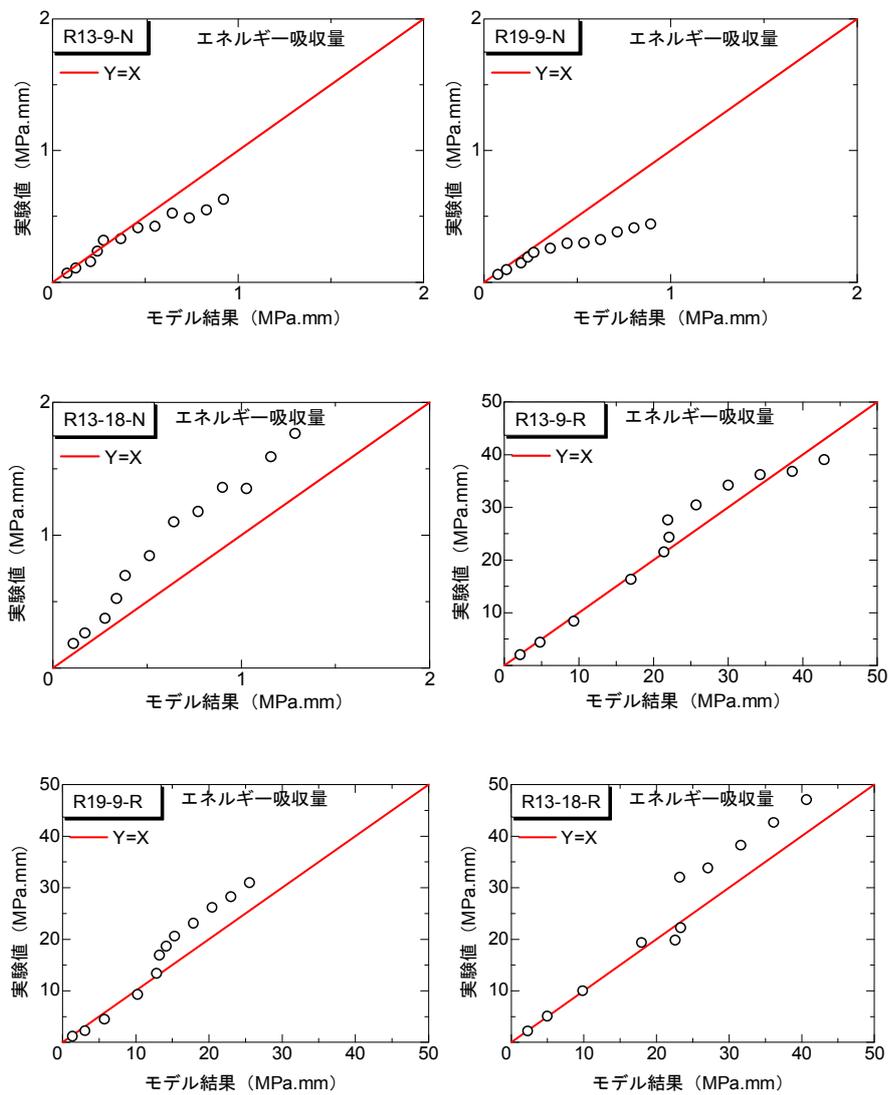


図 4-4-8 エネルギー吸収量の比較

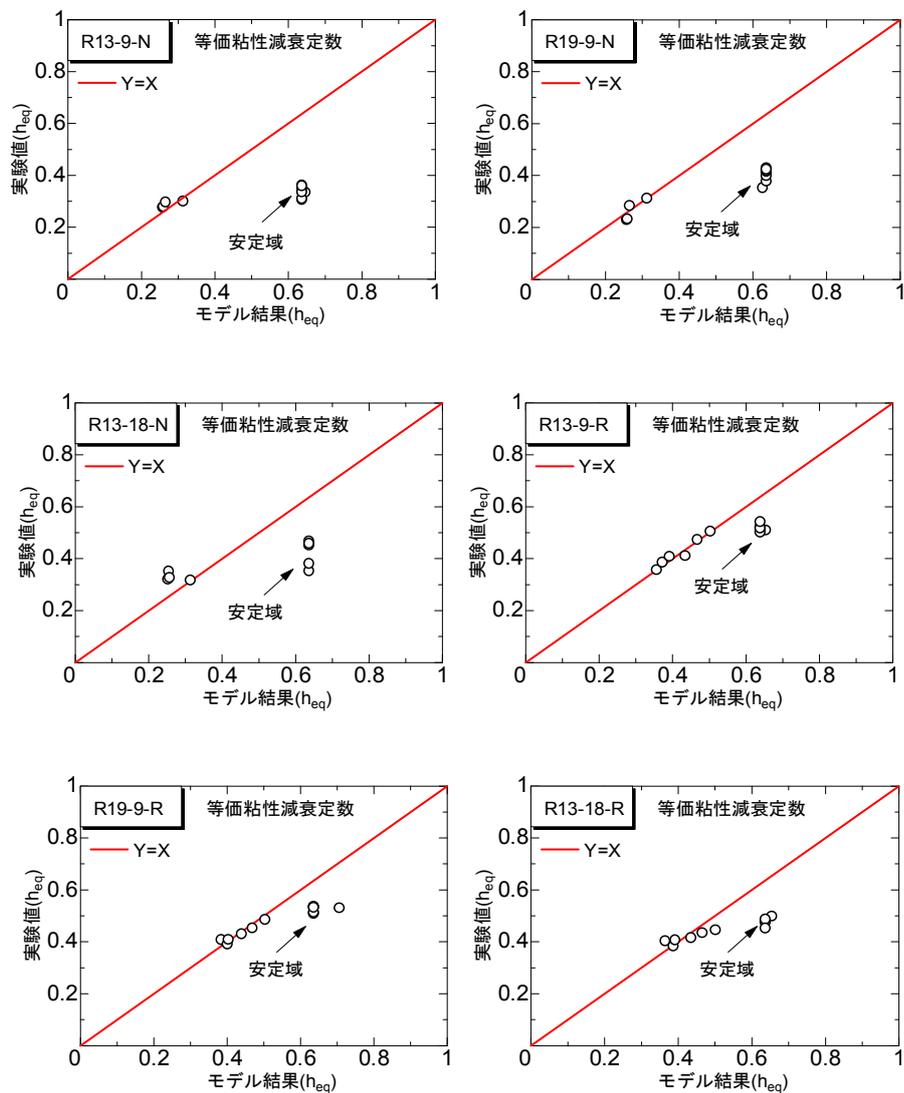


図 4-4-9 等価粘性減衰定数の比較

4.5 結論

第2章の単調載荷及び第3章の繰り返し載荷における付着応力度－抜け出し変位履歴関係に基づいて、履歴曲線の各特性点を回帰的に求め、モデル化曲線を提案した。提案したモデル曲線と実験で得られた付着応力度－抜け出し変位履歴曲線を比較することによって、その妥当性について検証した。

- 1) 単調載荷包絡線を既往の研究を参考にして付着応力度上昇域、付着応力度の低下域及び大変形時の付着応力度安定域の3領域に分類してモデル化できる。
- 2) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係における各特性点を実験結果に基づいて付着強度 τ_B に対応する座標に関係づけてモデル化した。付着強度時の変位 S_{max} を0.1mm、エポキシ樹脂を注入した場合は0.2mmと提案した。大変形時に一定となる付着応力度を付着強度 τ_B と関連付けて $0.21\tau_B$ 、補修した場合を $0.5\tau_B$ とした。また、荷重を反転させる場合や再載荷する場合には直近の除荷時付着応力度と関係付けて次の到達点の付着応力度が設定できる。
- 3) 提案したモデル曲線と実験で得られた履歴特性を比較し、推測可能であることを示した。また、履歴特性から求めたエネルギー吸収量と等価粘性減衰定数についてモデル曲線と実験値を比較しほぼ推測可能であることを示した。
- 4) 大変形領域では実験値を推測できない場合もあった。これは本提案において荷重が反転して付着応力度が回復する比率を一律に決めていることに対して、繰り返しによる鉄筋とコンクリート間の摩擦力の劣化を十分に評価していないことに原因がある。付着応力度の回復比率については今後のデータの蓄積が必要と考えている。

参考文献

- 1) 森田司郎・角徹三：繰返し荷重下における鋼とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，第 229 号，pp.15-24，1975.3
- 2) 山本康弘，中島亨，鉄筋とコンクリート部材における付着応力度の履歴に関する研究：日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.997-998，昭和 47 年 10 月
- 3) T.P. Tassios, & P.J. Yannopoulos, : Analytical Studies on Reinforced Concrete Members Under Cyclic Loading Based on Bond Stress-Slip Relationships, ACI Journal May-June, pp.206-216, 1981
- 4) M. Elmorsi, , M.R. Kianoush,&W.K. Tso, : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, pp.491-505, 2000
- 5) GM Verderame, P Ricci, R De Carlo, G. Manfredi : Cyclic bond behaviour of plain bar, Part II : Analytical investigation. Construction and Building Materials 23 3512-522, 2009
- 6) CEB-FIP, Model Code 1990. Final draft, Bulletin d information no. 213/214, 1993
- 7) Duff A. Abrams : Tests of bond between concrete and steel, Published 1913 by University of Illinois in Urbana
- 8) 坂静雄：鉄筋コンクリート学教程，産業図書株式会社，1960,11

第 5 章 局所付着応力度

第5章 局所付着応力度

5.1 はじめ

丸鋼と低強度コンクリート間の付着性能の把握を目的として、第2章及び第3章で丸鋼を埋設したコンクリートプリズムを用いた引抜き試験を実施し、第4章で実験結果に基づいて付着応力度と抜け出し変位履歴関係における各特性点を把握し、付着履歴特性のモデル化を行った。しかしながら、これまでの検討は引抜き荷重を付着領域の面積で除した平均付着応力度を対象としている。繰り返し荷重を受ける部材の鉄筋は引張や圧縮繰返し荷重を受けている。付着の抵抗メカニズムを解明するためには繰返しを受ける各荷重段階における丸鋼表面に生ずる付着応力度分布の推移を知る必要があると考えられる。

コンクリート中の鉄筋の付着応力度分布に関する研究はこれまで日本国内外で多く実施されている。国外における Watstein ら (1947)¹⁾ や Mains ら (1951)²⁾ の研究は鉄筋の引抜き試験と RC 梁の曲げ試験を通じて、各荷重段階における鉄筋のひずみ分布を計測することによって付着応力度分布を調べている貴重なものである。鉄筋のひずみ分布は鉄筋内部にひずみゲージを貼付することによって求めている。その後、この方法を用いて鉄筋の付着応力度分布を調べる基礎的研究が多く行われるようになる。日本国内では同様の実験によって水野ら³⁾、六車ら⁴⁾が一方向載荷ではあるが実験及び理論的な分析を行っている。特に、六車らの研究⁴⁾については、鉄筋引張応力度、付着応力度、相対すべり量間の関係を実験結果から定量化し、理論モデルを構築している。山本ら⁵⁾、森田⁶⁾らは繰返し荷重を受けた付着履歴に注目し、その定式化を行っている。しかし、これらの研究の多くは異形鉄筋の付着割裂破壊を対象とするものである。異形鉄筋の場合、その付着抵抗機構は鉄筋のふしによる機械的作用に支配されるため、鉄筋の応力度には付着性状が影響しないということが Edwards ら⁷⁾の研究に示されている。従って、コンクリートとの固着力及び摩擦力に支配される丸鋼の付着特性に対して、上述した理論やモデルを直接応用することができない。

一方、既存建物の耐震改修における丸鋼の付着に関する基礎的情報を得ることを目的として、Bennett ら⁸⁾及び Fledman ら⁹⁾は、丸鋼の付着応力度分布についての研究を行い、付着応力度—相対すべり量—鉄筋引張応力度の関係を調べている。また Fledman ら⁹⁾は外力の変化に対応できる解析モデルを提案している。Verderme ら^{10),11)}は丸鋼を用いて繰返し引抜き試験によって、その付着の履歴特性を調べるとともに、得られた実験結果に基づいて付着応力度と抜け出し変位の履歴特性をモデル化している。このように丸鋼の付着性能に関して再認識されているところであるが、これらの研究は普通強度のコンクリートを対象とするものである。

本章では低強度コンクリートを対象として、丸鋼内部にひずみゲージを貼付することによって、鉄筋表面の付着性状を乱すことのない状態で繰返し引抜き載荷時における付着応力度分布を調べた。一方、既往研究の考察^{1),12),13)}では、付着応力度の分布状況に最も影響を与える因子としては鉄筋の付着長及び鉄筋の種類であったことが報告されている。従

って、本章では変動要因として鉄筋の付着長の違いも検討している。最後に、実験された試験体をエポキシ樹脂に注入し、補修した丸鋼の付着応力度分布状況を再検討した。

5.2 実験概要

5.2.1 試験体

本章で用いた試験体の名称及び変数を表 5-2-1 に示す。試験体の断面はこれまでのものと様に 150mm×150mm であり、コンクリートプリズムの中心に、1本の鉄筋を埋め込んだものである。試験体の長さは付着長を変化させているので 130mm～430mm となっている。付着長は 5d, 10d, 15d, 20d (d: 鉄筋の直径) の4水準とした。コンクリートの打設方向の影響を調べるために水平筋および垂直筋を用意した。ひずみゲージを貼付するために加工した鉄筋の寸法を表 5-2-2 に示す。コンクリートの設計基準強度は Fc9 として低強度コンクリート1水準を設定し、鉄筋は丸鋼 19φ の1種類である。前章と同様割裂防止筋は配筋していない。試験体の詳細を図 5-2-1 に示す。Mains²⁾の実験を参考して、試験体に埋め込んだ丸鋼を図 5-2-2 のように、鉄筋内部にミリングマシンで溝を加工し、その中に付着長区間の鉄筋にストレインゲージ (SKF-27919, 共和電業製, ゲージ長 5mm) を貼付して鉄筋内部のひずみを計測した。曲げの影響を除去するために両半円凹の断面の相対位置にひずみゲージを貼付して、その平均値を採用した。各試験体の測点数と計測間隔を表 5-2-1 に、各鉄筋のひずみゲージ位置を図 5-2-3 に示している。防水性を考慮するため、水野³⁾と田・島田¹³⁾の方法を参考にし、鉄筋内部にドライヤーで除湿した後、エポキシ系接着剤でコーティングした。鉄筋内部に通すゲージリード線を同じ方向を外に出せるように、鉄筋の両側に 6φ の穴を設けた。最後に、加工した鉄筋の接合はエポキシ系接着剤(PC-12)による接着を行った。これは溶接接合によるゲージ過熱損傷を防ぎ、さらに鉄筋の防水性を高めるためである。詳細は付録写真を参考にされたい。付着長さ 10d の垂直筋 (VR19-L10-9-N) については実験終了後、エポキシ樹脂を注入し再度引張試験を行った (VR19-L10-9-R)。

表 5-2-1 試験体一覧

試験体名	呼び強度	鉄筋種類	打設方向	試験体長さ(mm)	付着長	測点数	測点間隔	補修
HR19-L5-9-N	Fc9	19φ	水平	135	5d	3	2.5d	—
HR19-L10-9-N				230	10d	5		
HR19-L15-9-N				235	15d	4	5d	
HR19-L20-9-N				420	20d	5		
VR19-L10-9-N			垂直	230	10d		2.5d	
VR19-L10-9-R								

表 5-2-2 加工した鉄筋の寸法

試験体名	鉄筋種類	鉄筋径(mm)	溝幅(mm)		断面積(mm ²)
			長辺(l ₁)	短辺(l ₂)	
19φ (Calibration)*	19φ	18.81	4.93	4.03	257.98
HR19-L5-9-N		19.03	4.80	4.08	264.72
HR19-L10-9-N		18.98	4.81	3.95	263.79
HR19-L15-9-N		19.01	4.93	3.90	264.57
HR19-L20-9-N		19.09	4.96	4.13	265.82
VR19-L10-9-R		19.02	4.75	4.10	264.55

19φ (Calibration)* : 鉄筋引張実験用の加工した鉄筋

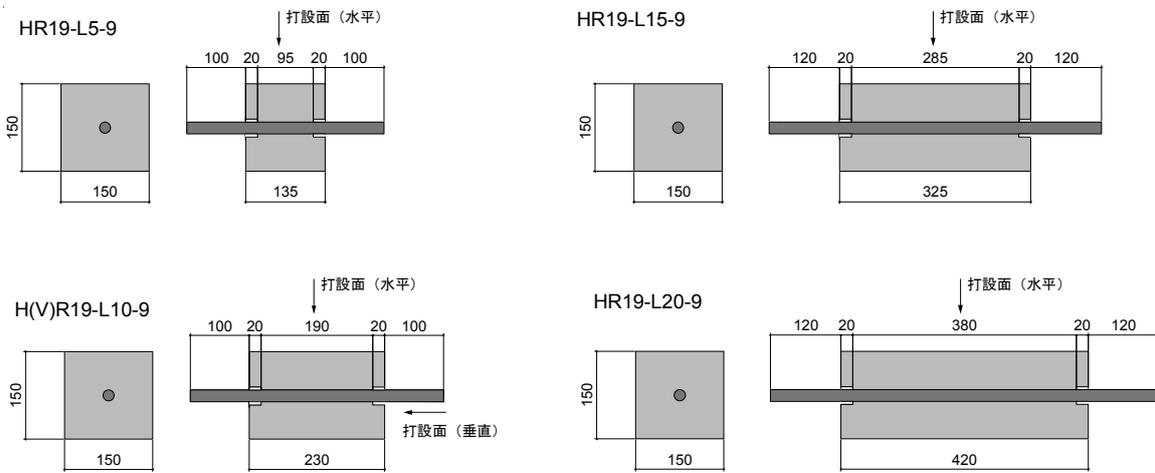


図 5-2-1 試験体詳細

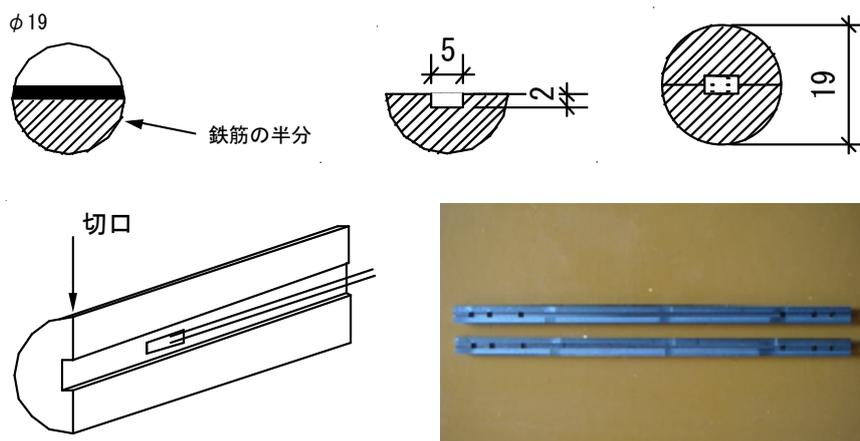


図 5-2-2 ひずみゲージ貼付用鉄筋の製作

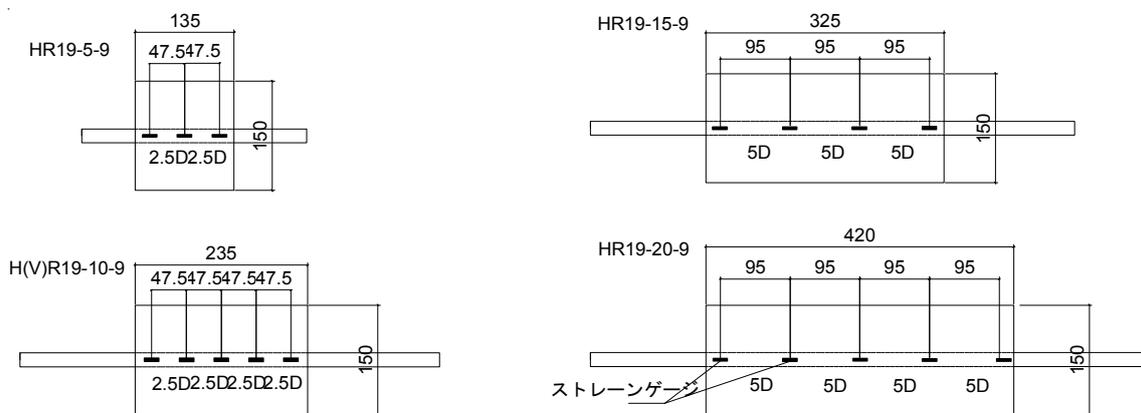


図 5-2-3 鉄筋のひずみゲージ位置

unit:mm

5.2.2 使用材料

コンクリート強度は水セメント比によってのみ調整した。表 5-2-3 及び表 5-2-4 にコンクリートの調合計画，フレッシュ特性の結果を示す。コンクリートの力学特性を表 5-2-5 に示す。19φ の鉄筋を用い引張実験を行い，その力学特性を表 5-2-6 に示す。鉄筋の引張応力度－ひずみ関係を図 5-2-5(a)に示す。また，ゲージ貼付用に切削した鉄筋も弾性範囲の引張試験を行っている。図 5-2-5(b)に示すように，切削した断面積を考慮して加工前後の鉄筋のヤング係数がほぼ同等になることを確認している。

表 5-2-3 コンクリート調合計画

呼び強度	単位量 (Kg/m ³)					水セメント比 (%)
	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	
Fc9	195	215	987	918	1.17	110

表 5-2-4 フレッシュ特性

呼び強度	スランプ(mm)	空気量 (%)	温度 (°C)
Fc9	18.0	5.1	25.0

表 5-2-5 コンクリートの力学特性

設計強度 (MPa)	圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 σ_T (MPa)	ヤング係数 E_C (GPa)	圧縮強度ひずみ ϵ (μ)
Fc9	10.4	1.46	22.06	1301

表 5-2-6 鉄筋の力学特性

鉄筋種類	降伏強度 σ_y (MPa)	引張強度 σ_U (MPa)	弾性係数 E_S (GPa)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
19φ	331	452	198	1668
19φ (Calibration)	-	-	216	-

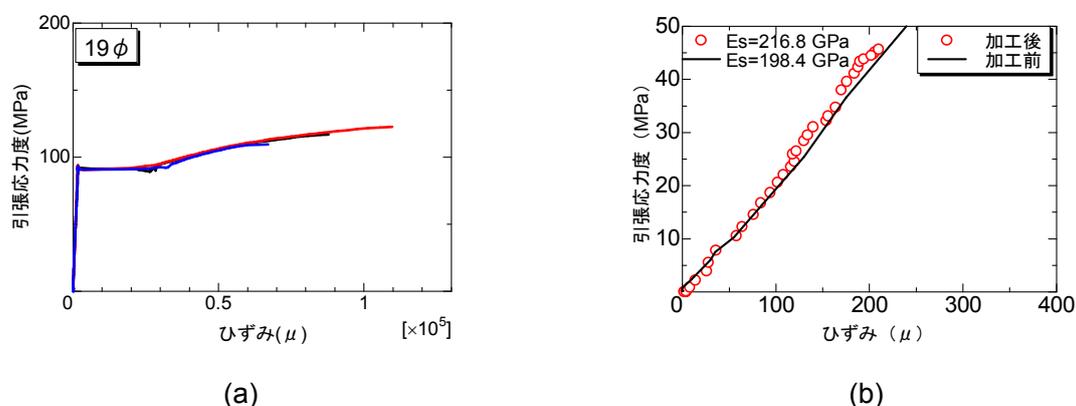


図 5-2-5 鉄筋の引張応力度－ひずみ関係（加工前後）

5.2.3 荷重方法

繰り返し荷重装置は前章と同様である。荷重プログラムは図 5-2-6 に示す正負交番漸増繰り返し荷重である。一方、この実験では最大付着長さ 20d の試験体を荷重するため、前各章と比べて荷重レンジがより大きなロードセルを用いている (KCM-200KNA, 東京測器研究所)。

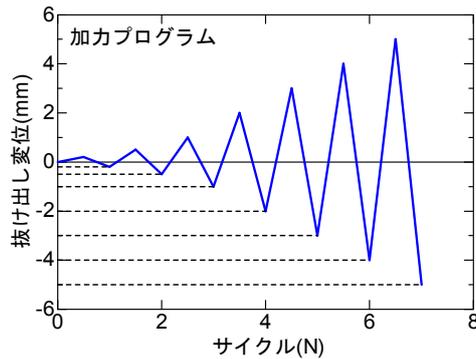


図 5-2-6 荷重プログラム

5.2.4 鉄筋引張応力度, 付着応力度及び相対抜け出し変位の計算方法

実験結果に先立ち鉄筋内部に貼付したゲージによる鉄筋ひずみ分布から局所付着応力度およびすべり量を求める方法について述べる。

鉄筋の任意の点の引張応力度は式 5-2-1 に示すように計測した各所ひずみにヤング係数を乗ずることによって求めた。ヤング係数は材料試験によって得られたものを使用する。任意の点における付着応力度は式 5-2-2 に表すように引張応力度の差分として表す。

$$\sigma = E_s \varepsilon_n \tag{5-2-1}$$

$$\tau = \frac{E_s A_s (\varepsilon_n - \varepsilon_{n-1})}{\varphi \Delta L} = \frac{\pi d^2 - 4l_1 l_2}{4\pi d} \frac{d\sigma}{dx} \tag{5-2-2}$$

ここで

φ : 加工した鉄筋の周長(mm) ΔL : 2つのゲージ間距離(mm)

E_s : 加工した鉄筋の弾性係数(GPa) d : 鉄筋の直径(mm)

ε_n : 鉄筋各所ひずみ l_1, l_2 : 溝の長辺と短辺(mm)

$d\sigma/dx$: 鉄筋の引張応力度分布曲線の傾き

一方、鉄筋に沿った任意の点におけるすべり量 $s(x)$ は鉄筋の自由端から任意の位置まで鉄筋とコンクリートのひずみを積分したものに自由端の移動量 s_0 を加えたもので式 5-2-3 のように表わすことが出来る。

$$s(x) = s_0 + \left(1 + \frac{A_s E_s}{A_c E_c}\right) \int_0^x \varepsilon_s(x) dx \tag{5-2-3}$$

ここで

E_c, E_s : コンクリートと鉄筋のヤング係数(GPa)

A_c, A_s : コンクリートと鉄筋の断面積(mm²)

s_o : 鉄筋自由端部の抜け出し変位(mm)

$\varepsilon_s(x)$: 鉄筋のひずみ, $\varepsilon_c(x)$: コンクリートひずみ

鉄筋のひずみは鉄筋が実験終了まで降伏しないと仮定して, その任意点から自由端までの伸び量を式 5-2-4 のように表わすことが出来る。

$$e_s = \int_0^x \varepsilon_s(x) dx \quad 5-2-4$$

一方, コンクリートが圧縮力を受けて, 鉄筋と同じ区間における縮み量を式 5-3-5 のように表わすことが出来る。

$$e_c = \int_0^x \varepsilon_c(x) dx \quad 5-2-5$$

その中でコンクリートのひずみは, $\varepsilon_c = -(A_s E_s / A_c E_c) \varepsilon_s$ と仮定している。これらの仮定は Feldman ら⁹⁾の研究と同じである。従って, 鉄筋に沿った任意点におけるすべり量は式 5-2-3 のように表わすことが出来る。

5.3 実験結果

5.3.1 引張荷重と付着力の関係

付着応力度分布の検討に先立ち、式 5-3-1 を用いて鉄筋の付着長における付着力の総和と引張荷重が釣り合うかどうかを検証した。ここで、鉄筋の付着長における付着力の総和では鉄筋に貼付した隣り合うゲージ間の平均付着応力度を積算した結果である。また、図 5-3-1 に示す両者の比は最初二乗法により求めたものである。その比較結果、両者は各荷重段階においてほぼ一致したものとなった。

$$P = \int_0^x \phi \tau(x) dx \tag{5-3-1}$$

ここで、 P : 引張荷重(N) $\tau(x)$: 局所付着応力度(N/mm²) ϕ : 鉄筋の周長(mm)

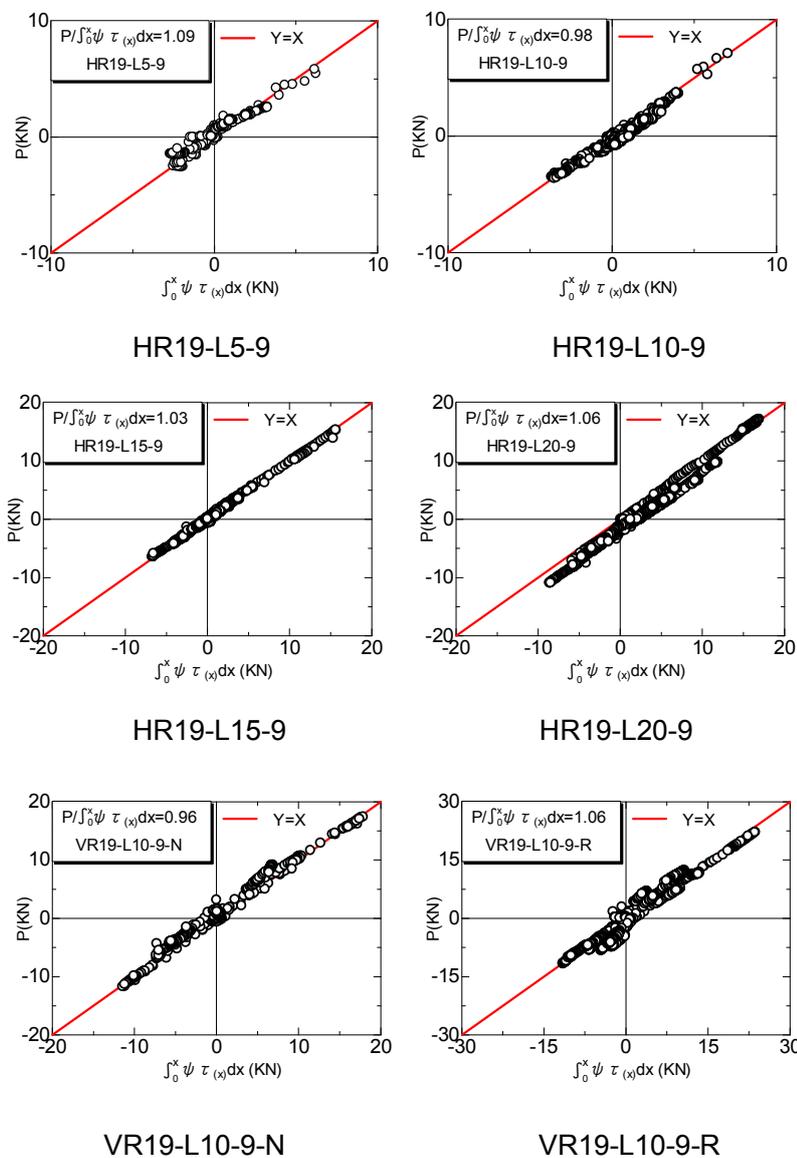


図 5-3-1 引張荷重と付着力の検証

5.3.2 各載荷段階における鉄筋引張応力度，付着応力度の分布

本章は丸鋼と低強度コンクリートを用いた引抜きにおける付着応力度—抜け出し変位関係の履歴ループ特性により，**図 5-3-2** に示すように各載荷段階の付着応力度分布に分けて検討した。

- (a) 載荷開始点から変位が発生し始める点 (**図 5-3-2 (a) O-A 領域**)
- (b) 変位が発生し始める点から付着強度を超えて最初の除荷点 (**図 5-3-2 (b) A-B-C 領域**)
- (c) 除荷点から荷重 0 点，そして負側の変位が発生し始める点 (**図 5-3-2 (c) C-D-E 領域**)
- (d) 変位が反転し始める点から変位 0 点，そして次の除荷点 (**図 5-3-2 (d) E-F-G 領域**)

以上の 4 領域に分けて図示した。また，繰返し回数の増加により付着応力度分布の推移を調べるため，第 2 サイクルから最後の第 6 サイクルの引張応力度分布，付着応力度分布も (**図 5-3-1 (d)** の位置 E-F-G 領域および E'-F'-G' 領域) において検討を加えた。

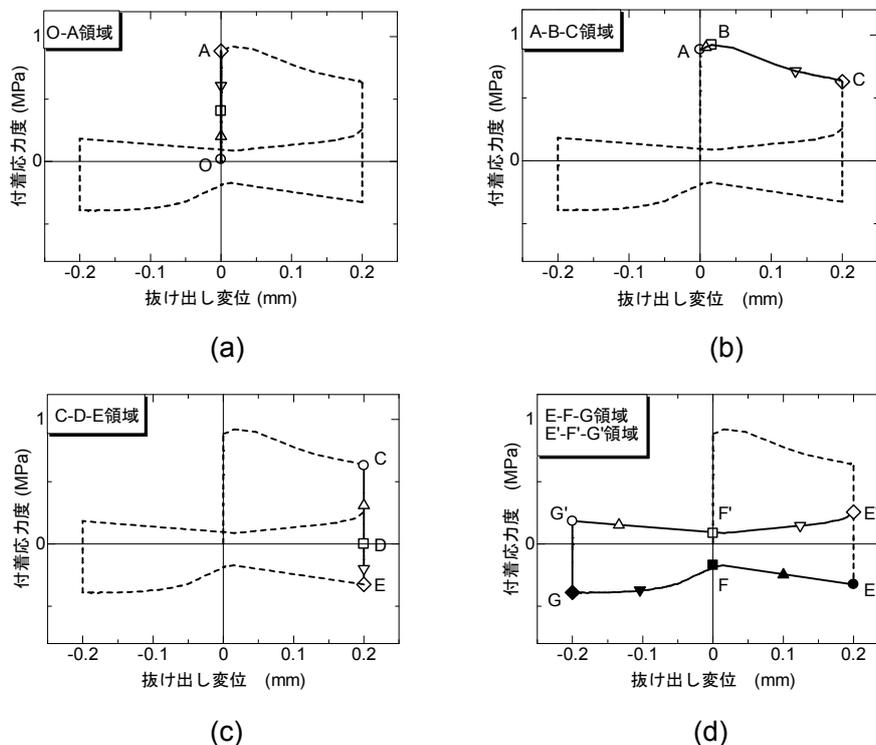


図 5-3-2 各載荷段階における検討点

各載荷段階における引張応力度，付着応力度の分布状況を**図 5-3-3**～**5-3-12** に示す。図中横軸は各ゲージ位置を鉄筋直径で除して基準化している。鉄筋内部に貼り付けた各ゲージの対応引張応力度，及び隣り合うゲージ間の付着応力度は**式 5-2-1** と**式 5-2-2** によって求めたものである。なお，これらの各点は水野ら³⁾の論文を参考に 3 次曲線でスムージングを行っている。

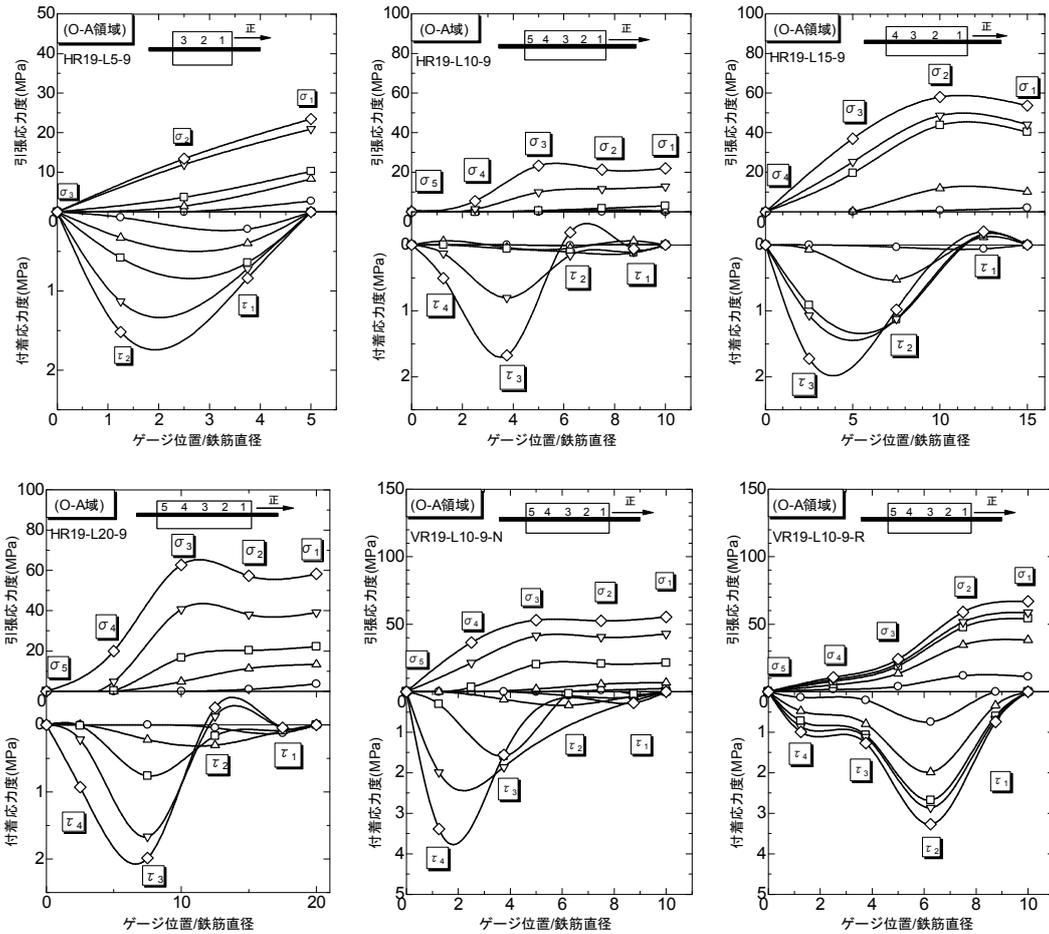


図 5-3-3 引張応力度と付着応力度分布 (O-A 領域)

① O-A 領域

自由端の変位が発生する前の O-A 領域における鉄筋の引張応力度分布，付着応力度分布を図 5-3-3 に示す。分布上のマーク (○, □, △, ◇) は図 5-3-2 の各荷重(変形)段階に対応している。荷重初期段階では荷重端から引張応力度が発生し始める。この段階では鉄筋の引張応力度は自由端部に達していない。つまり，自由端部では固着力を喪失していないことが分かる。引張応力度の増大に伴って付着長 5d のものを除いて荷重端側の引張応力度は一定値に近づくか若干低下する傾向が見られる。このような現象は図 5-3-4 のように Feldman ら⁹⁾の実験結果でも見られる。一方，付着応力度について見ると最初の段階 (○) では荷重端側に付着応力度が発生するが，その後付着応力度は増大せず，自由端側の付着応力度のみ大きくなる。付着応力度のピーク値は水平筋の場合は約 2MPa，垂直筋の場合は 4MPa 辺りである。エポキシ樹脂で補修した垂直筋の最

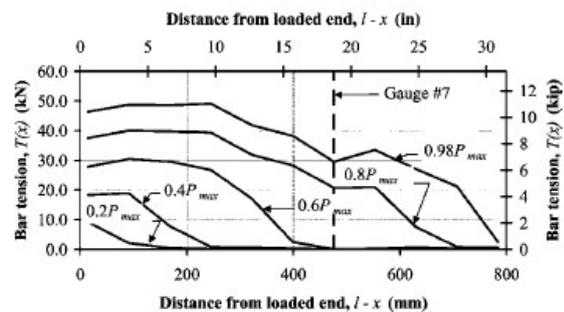


図 5-3-4 引張応力度分布⁹⁾

大付着応力度は 3MPa 程度で補修しない場合より低くなるが、その発生位置は荷端側に近い。補修をしない場合は、最大付着応力度となる位置は荷端から自由端側に移動し、荷端側の付着応力度は 0 に近づく。この傾向は図 5-3-5 に示すようにこれまでの研究結果で同様となった 1),3),9),12)。

② A-B-C 領域

単純引き抜き状態の A-B-C 領域における引張応力度，付着応力度の分布状況を図 5-3-6 に示す。A 点から最大引張荷重までの段階において，鉄筋内部に分布している引張応力度および付着応力度の形状はあまり変化しない。その中で，水平筋の最大付着応力度は 1.6~2.0MPa となっている。第 2 章で述べた付着強度（平均最大付着応力度）が 0.6~1.0MPa であるので，局所付着応力度には約 2 倍となっていることが分かる。一方，垂直筋の最大付着応力度は 4.3MPa であり，付着強度は 1.6MPa であるので 2.6 倍程度の値となっている。最大荷重点から除荷点まで移動する

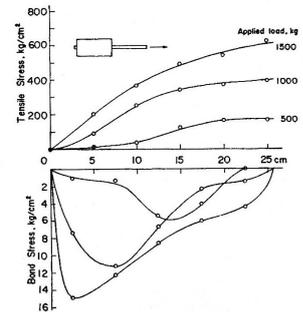


Fig. 4(b) Distribution of Tensile and Bond Stress (R 19)

図 5-3-5 引張応力度と付着応力度分布 12)

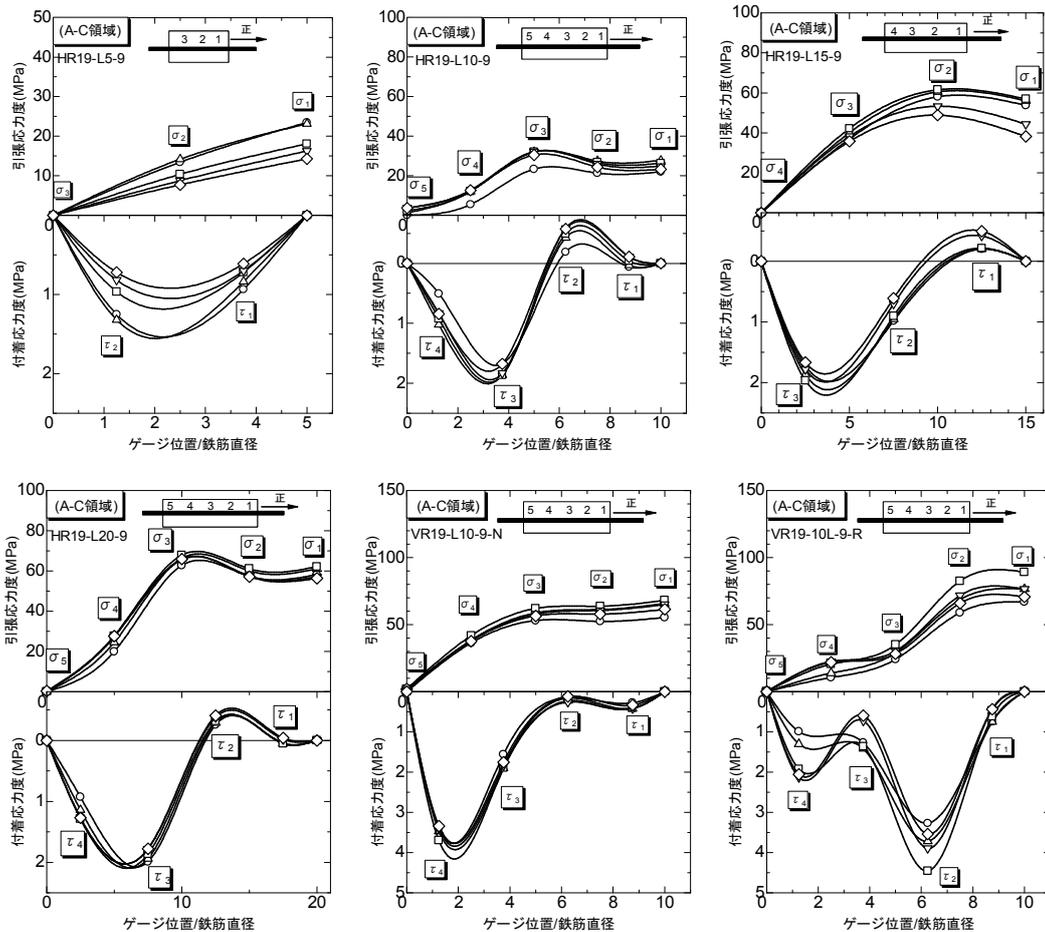


図 5-3-6 引張応力度と付着応力度分布 (A-B-C 領域)

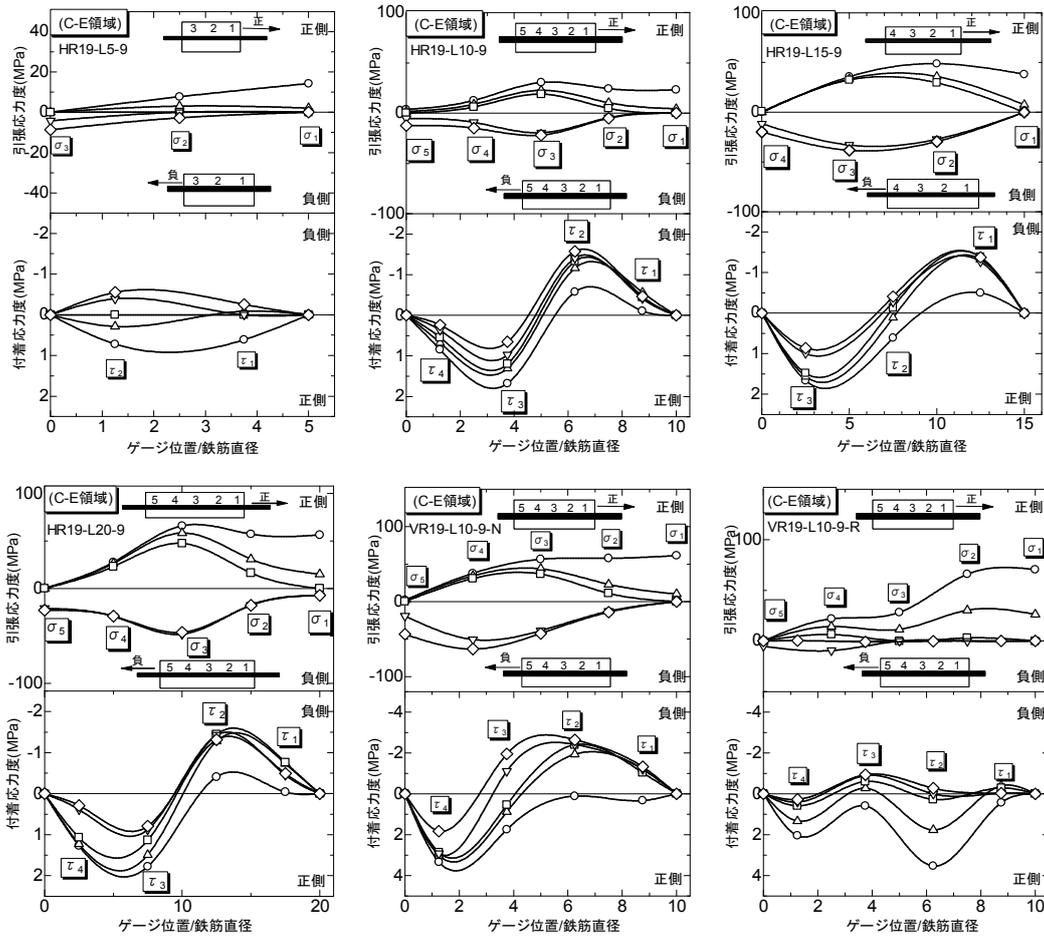


図 5-3-7 引張応力度と付着応力度分布 (C-D-E 領域)

と、荷重の減少に従い、引張応力度および付着応力度は減少する傾向が見られた。また、HR19-L10-9, HR19-L15-9, HR19-L20-9 の試験体は O-A 及び A-B-C の荷重段階から載荷端側に引張荷重に抵抗する付着応力度とは逆の応力度が出ている。これは載荷側のコンクリートが圧縮状態になっていることと関係していると思われるが今後検討を要するところである。

③ C-D-E 領域

C 点から除荷し、荷重を 0 にした後、反対側から引張荷重を加える C-D-E 領域の引張応力度、付着応力度分布の推移を図 5-3-7 に示す。C-D 領域の除荷段階において、引張応

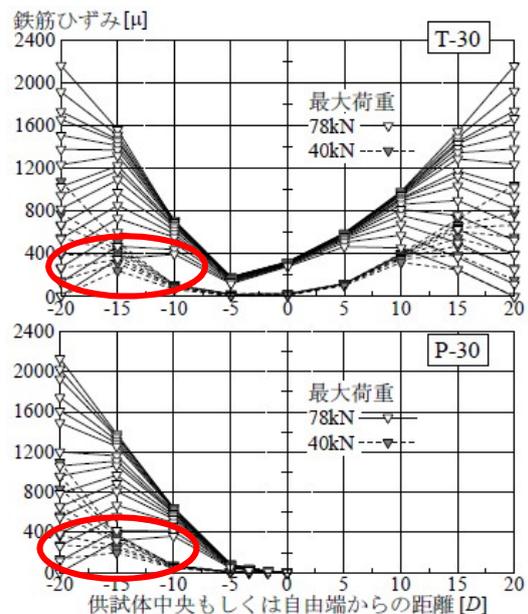


図 5-3-8 残留応力度の発生¹³⁾

力度は徐々に低下し、引張荷重が0となった時、荷端の引張応力度は0になる。この時、コンクリート内部の鉄筋には残留応力度が発生している。除荷後に内部鉄筋に残留応力度が発生していることは異形鉄筋ではあるが壹岐等¹⁴⁾の実験結果(図5-3-8は上側の一軸引張試験,下側の片側引抜試験における除荷時から除荷後の鉄筋のひずみ分布)と同様である。しかし、付着長の最も短いHR19-L5-9試験体においては、引張荷重0となっても鉄筋に残留応力度は発生しなかった。これは付着長が短い場合、コンクリートと鉄筋の接触面積が小さく鉄筋への拘束力が小さいため、鉄筋は除荷段階で弾性復元力によって引張応力度が0にまで戻るためと考えている。そして、荷重を反転させると、D-E域において、荷端側の引張応力度が徐々に増大するものの、鉄筋内部の残留応力度は解消しない。

一方、付着応力度分布を見ると除荷段階では、鉄筋が元に戻ろうとする力に抵抗するため、荷端側と逆の付着応力度が生じる。また、その負の付着応力度の分布範囲は荷端側から徐々に中央に移動する。(ここで、引張荷重を抵抗する付着応力度の方向が正と定義する)引張荷重が0の時(□印)、荷端側と自由端側に発生している付着応力度の和がほぼ釣り合っていることを示している。そして、逆の引張荷重を加えて、E点に到達すると(◇印)、最初の荷重における付着応力度分布状況とほぼ同じように、最大付着応力度が自由端側に

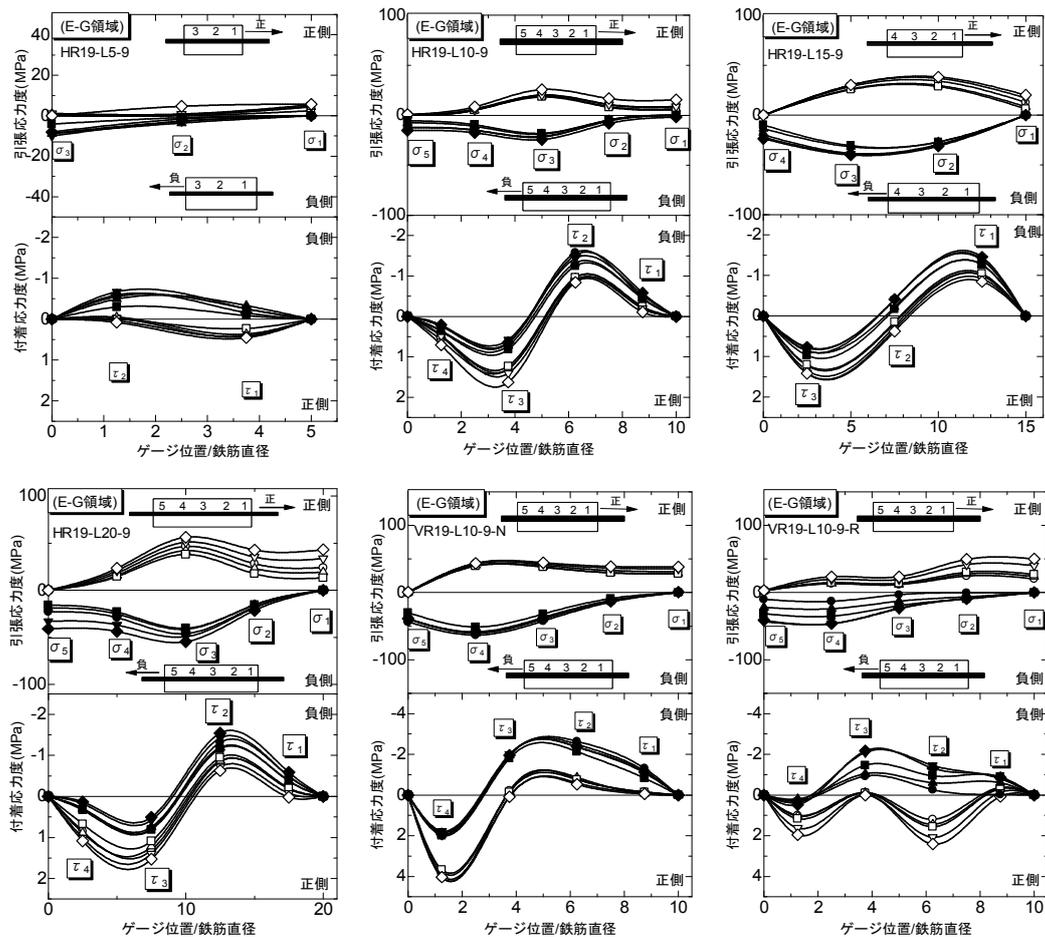


図5-3-9 引張応力度と付着応力度分布 (E-F-G と E'-F'-G 領域)

移動する。HR19-L5-9 の試験体では逆に最大付着応力度の位置が荷端に移動していく傾向が見られた。これは、除荷時における鉄筋に残留応力度が無いことによって、逆方向を再荷重しても荷端側の引張応力度の勾配が自由端側より大きいためである。垂直筋および補修した垂直筋の分布性状は左右対称でない。

④ E-F-G と E'-F'-G'領域

負荷重により変位が発生し始め、目標変位まで荷重する過程 (E-F-G 領域) 及びその正荷重の E'-F'-G'領域として図 5-3-2(d)に対応したものを示している。この荷重段階における引張応力度、付着応力度分布の推移を図 5-3-9 に示す。E-F-G 領域において、水平筋、垂直筋の引張荷重は D-E 領域と比べて大きく変わらないため、鉄筋各所における引張応力度も大きな変化はない。ただし、変位が原点付近 (□印) に近づくにつれて付着応力度分布が若干減少する傾向にあった。この現象は第3章の試験体の τ -S 履歴曲線及び Verderame ら¹⁰⁾の実験にも現われており、これは一旦抜け出した鉄筋が再度にコンクリート中に入るために起こる現象とされている。水平筋の付着応力度の分布では荷重を反転させると最大付着応力度の位置は自由端側に移動する。付着長 5d 試験体ではその逆で荷端に移動する。その理由は前述と同じである。補修した試験体は他 5 体の様な付着応力度分布形状とは異なり、乱れた形状を示している。これはエポキシ樹脂の注入のばらつき状況による影響と推察する。

E'-F'-G'領域において、水平筋を用いた試験体の鉄筋引張応力度、付着応力度分布は負側の E-F-G 領域とほぼ同じく、初期荷重状態の場合 (図 5-3-6 と図 5-3-7 に示すもの) と比べて、全体的に応力度の低下傾向が見られた。垂直筋の場合は付着長に沿った付着応力度分布に偏りがあることが確認できる。

⑤ 第2サイクル～6サイクル

E-F-G と E'-F'-G'領域における繰り返しによる引張応力度分布と付着応力度分布の推移を図 5-3-10 に示す。図は2サイクルから6サイクルまでの2、4、6サイクル時の引張応力

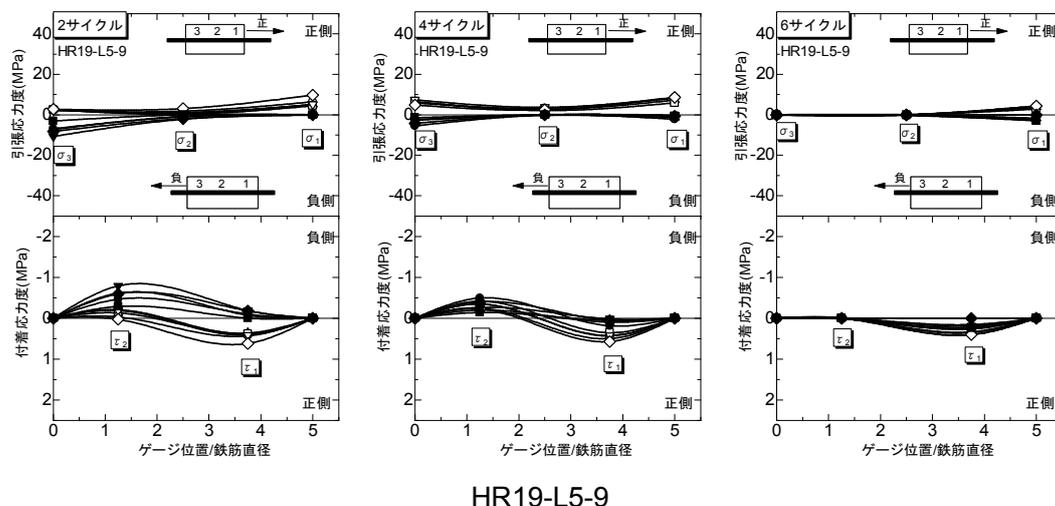


図 5-3-10 引張応力度と付着応力度分布 (2、4、6 サイクル) (続き)

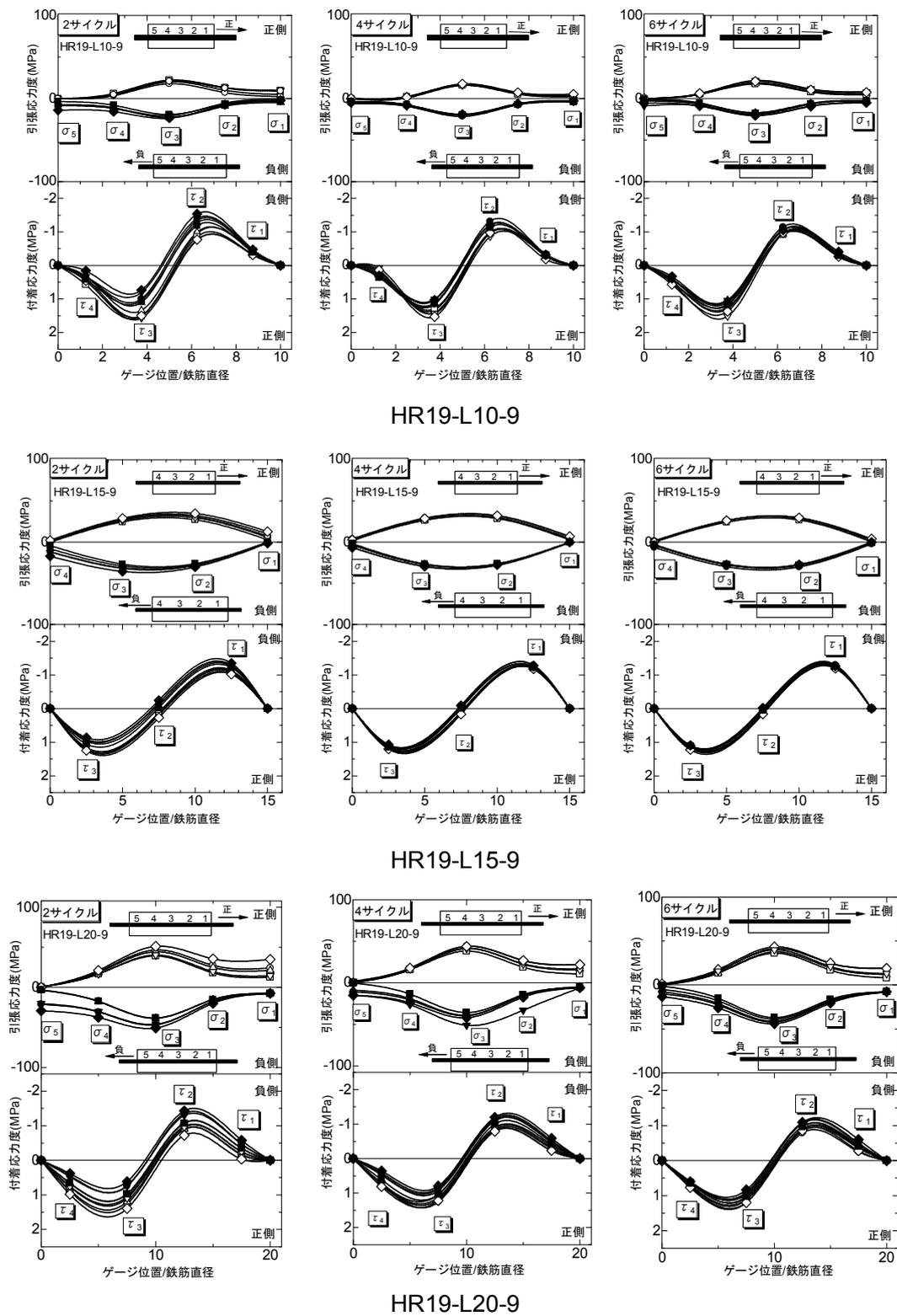


図 5-3-10 引張応力度と付着応力度分布 (2、4、6 サイクル) (続き)

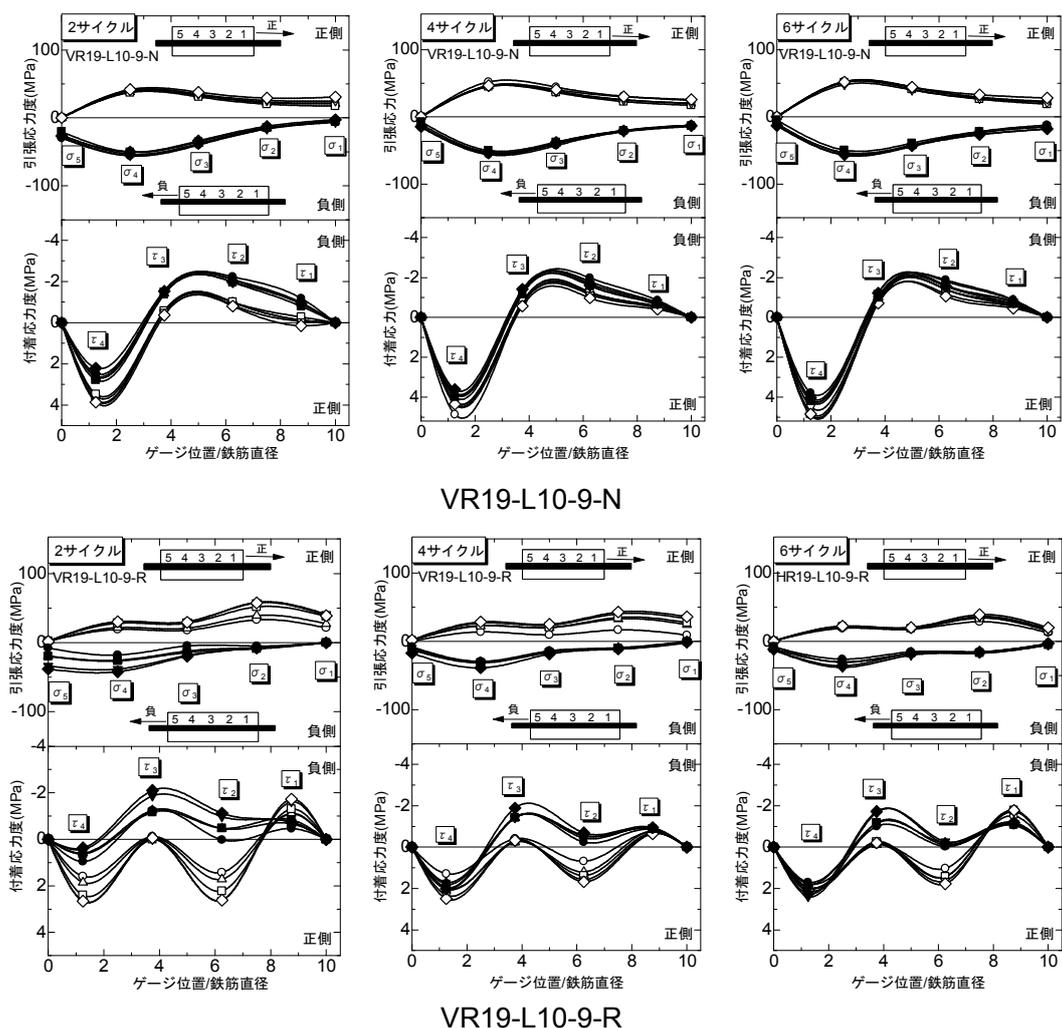


図 5-3-10 引張応力度と付着応力度分布 (2、4、6 サイクル) (続き)

度、付着応力度の分布状況を抽出して示す。小変形領域では繰返しにより付着応力度は急激に減少するが、大変形領域に入っても付着応力度は徐々に減少することは第3章で述べた。従って引張応力度、付着応力度の分布もサイクル数の増加に伴って全体的に低下してゆく傾向にある。

付着長の最も短い HR19-L5-9 試験体の引張応力度、付着応力度分布状況の低下傾向は顕著である。その他の水平筋の付着応力度のピーク値はほぼ±1.5MPa となり、最大荷重時点に対応する最大付着応力度の値と比較すると約 3/4 程度に低下した。垂直筋の場合は、繰返しの増加に関わらず、付着応力度のピーク値あまり変化しない。正荷重時 4MPa であり、負荷重が-2MPa であった。いずれの試験体もある変動領域内に収束し、その中の移動によって引張荷重に抵抗する。

5.3.3 局所付着応力度－相対抜け出し変位関係

式 5-2-2 および式 5-2-3 を用いて、各局所付着応力度 (各ゲージ間一定と仮定) と相対抜

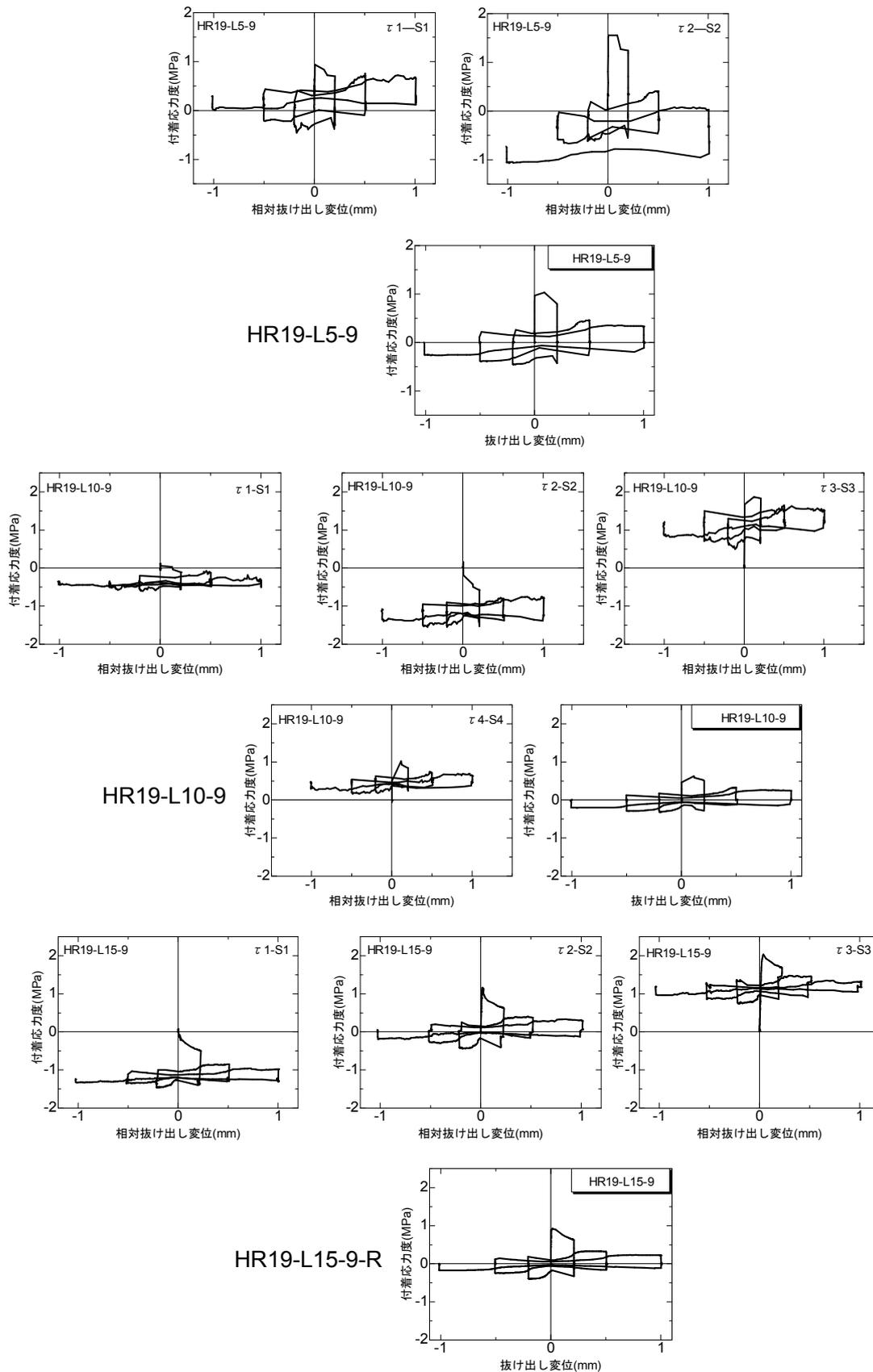


図 5-3-11 局所および全体の τ -S 関係

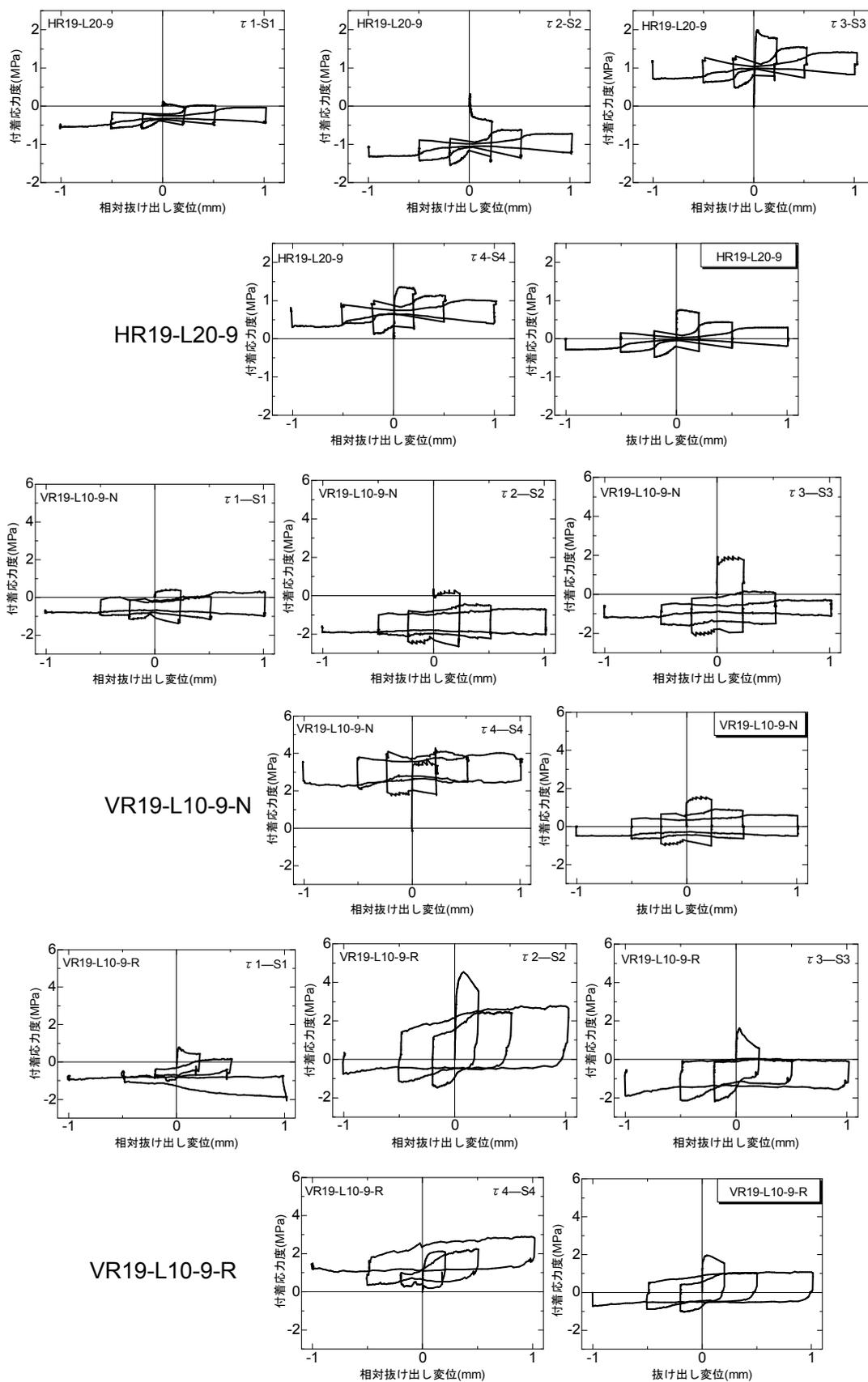


図 5-3-11 局所および全体の τ -S 関係 (続き)

け出し変位関係および各試験体の全体平均付着応力度と自由端の抜け出し変位の関係を図5-3-11に示している。抜け出し変位 $\pm 1\text{mm}$ までのデータを示している。試験体 HR19-L5-9 の局所及び全体の τ -S 関係において、初期の τ_1 -S₁ 関係は全体と類似しているがその後、正領域に移行して履歴ループを描くようになる。 τ_2 -S₂ 関係は1サイクル以後の負側に移行し履歴ループを描く。その他の水平筋の局所 τ -S 関係を見ると、荷端に近い場所の付着応力度 (τ_1 及び τ_2) はほぼ全領域で負になり逆に自由端に近い場所 (τ_3 及び τ_4 または τ_4 及び τ_5) の付着応力度の履歴ループは正になった。一方、R19-L15-9 試験体において、鉄筋のセンター位置における τ_2 -S₂ 関係ではその全体の τ -S 関係とほぼ同じであった。また、垂直筋の局所 τ -S 関係では自由端側の τ_4 のみ大きく正側に移行し、その他の τ_1 、 τ_2 、 τ_3 は負側となった。コンクリートが打設側と反対側で密実に打設されていることが分かる。補修した試験体 VR19-L10-9-R の局所及び全体の τ -S 関係では補修しない場合と同じように付着応力度の最大発生点は荷端側が全部に正側、自由端側に負側となった。また、鉄筋両端部における τ_1 -S₁ と τ_4 -S₄ 関係が乱れた形状を示しているが、鉄筋中央の τ_2 -S₂ と τ_3 -S₃ 関係は全体のループ性状とほぼ類似している。すべての試験体に対して、鉄筋に沿った異なる位置における τ -S 関係が相違していることが分かる。

5.4 実験考察

5.4.1 付着応力度分布の進展状況

前節に叙述した付着応力度の分布状況，局所における τ - S 関係及び丸鋼の付着抵抗機構が変化する様子を解明するために文献¹²⁾に従って，丸鋼の付着応力度分布の進展状況を図5-4-1のように表示する。ここで付着長は十分に長いと仮定する。ここで引張荷重方向と逆の付着応力度を正と定義する。また，各载荷段階に対応する試験体の変化状況を図5-4-2に示す。

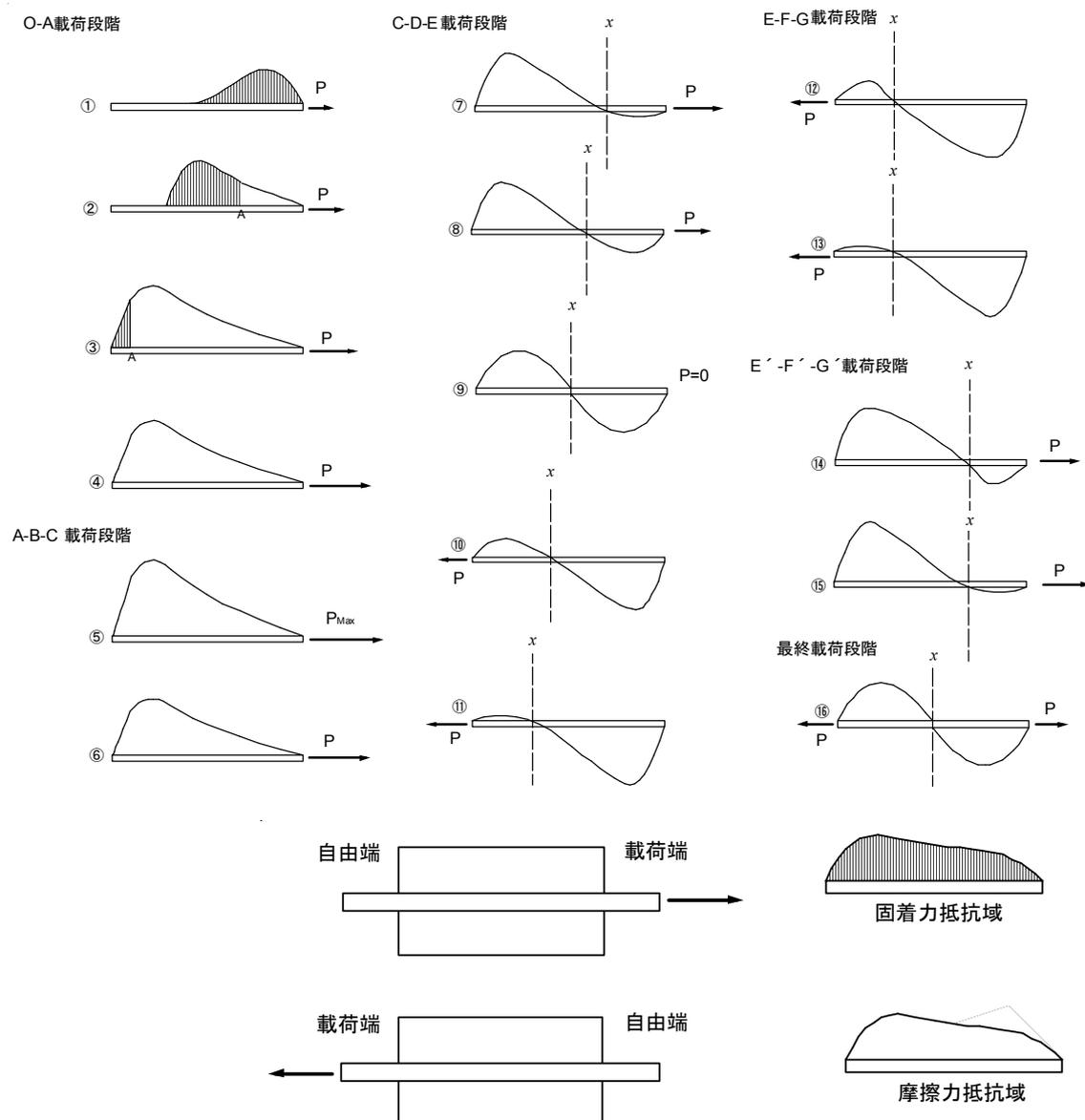


図 5-4-1 付着応力度分布の推移

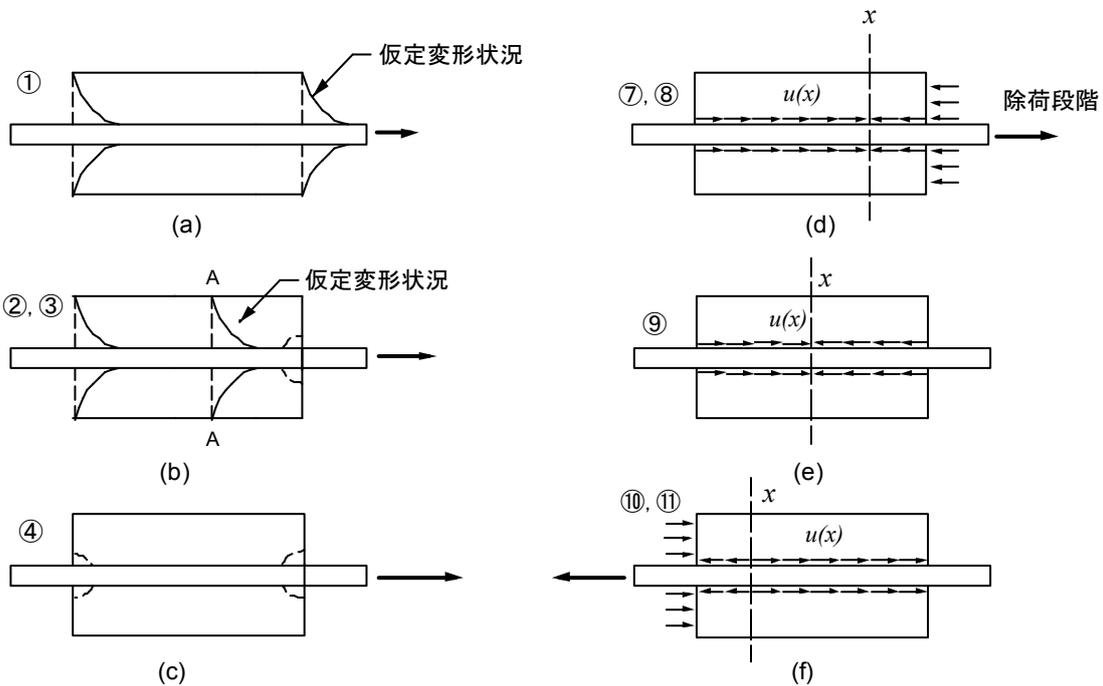


図 5-4-2 コンクリート中の力の伝達機構

① O-A 荷重段階

O-A 荷重段階に対応する鉄筋とコンクリート間の付着応力度進展状況を図 5-4-1①～④にそれぞれ示している。図 5-4-1①に示すように、最初に荷重が極端に小さい時、荷重端に最寄り鉄筋はコンクリートと共同に移動し、その間の相対すべり量がまだ 0 と仮定することによって（試験体内部の変形状態は図 5-4-2(a)に示す）、鉄筋とコンクリート間の付着応力度はすべて固着力によって抵抗する。図 5-4-1②, ③に示すように、引張荷重が増加すると、荷重端側から鉄筋とコンクリート間の固着力が喪失し、相対すべりが生じはじめる。摩擦力が抵抗する領域が広がるのに伴い、図 5-4-2(b)に示すように荷重端側のコンクリートに相対変位が発生する。図中の A 点は摩擦力と固着力の臨界点である。また、荷重の増加に従い、付着応力度の最大位置が徐々に自由端側に移動するとともに、荷重端側に分布している付着応力度が減少し、逆に自由端に近い部分の付着応力度が増大する。その後、抜け出し変位が自由端側で計測された時、図 5-4-2(a)の A 点に到達し、図 5-4-1④に示すように固着力は全付着領域で喪失し鉄筋に分布している付着応力度はすべて摩擦力による抵抗となる。（試験体内部の変形状態は図 5-4-2(c)に示す）

② A-B-C 荷重段階

引張荷重を更に増加させると図 5-3-2(b)の B 点に到達する。図 5-4-1⑤に示すように、付着強度（最大引張荷重時）に達する。図 5-4-1⑥に示すように目的点図 5-3-2(b)の C 点まで到達する間に抜け出し変位の増大とともに全体の付着応力度が減少し、引張荷重が減少す

る。この载荷階段における付着応力の最大付着応力度の位置の変化はない。また、これらの付着応力度進展状況は田・島田¹²⁾の分析と同じであった。

③ C-D-E 载荷段階

引張荷重をC点から除荷し、**図 5-3-2(c)**のD点までに対応する付着応力度分布の進展状況は**図 5-4-1(7)~(9)**のようになると推察される。最初の除荷時においては引張荷重を受けて軸方向に変形した鉄筋が元に戻ろうとする力に抵抗するため、初期の载荷時と逆の付着応力度が生じ、**図 5-4-2(d)**に示す x までの領域に負の付着応力度が発生する。また、引張荷重を0まで減力することによって、**図 5-4-2(e)**のように x は载荷端側から徐々に中央に移動し、最終的に正負側に分布している付着応力度が等しくなる。これが前節に述べたと同じく引張荷重0で残留応力度が発生している状態である。その後、荷重を逆方向に加えて**図 5-3-2(c)**のE点まで到達する時、**図 5-4-1(10), (11)**に示すように、自由端側の付着応力度は増加するとともに、载荷端側の負の付着応力度が低減する。**図 5-4-2(f)**に示すように、 x は载荷端側に移動する。

④ E-F-G と E'-F'-G' 载荷段階

E-F-G と E'-F'-G' 载荷段階に対応する付着応力度の進展状況を**図 5-4-1(12)~(15)**に示す。E-F または E'-F' に移動するによって、付着応力度が低減し、また変位がその反対側に進入すると (F-G 及び F'-G')、付着応力度が再びに増大する。同じ载荷段階において、 x の位置が载荷端側に移動し、そこにとどまる。

⑤ 2 サイクル~最終载荷段階

2 サイクルの载荷から最終载荷まで、繰返し回数の増加によって全体付着応力度の分布が徐々に低減していく。この時、载荷端側に分布している負の付着応力度が増加し、 x も载荷端側に移動していく傾向がある。最終の場合を**図 5-4-1(16)**に示すように、荷重の引張方向は正負においても、 x がほぼ中央になり、自由端側の付着応力度分布は载荷端側より若干大きい。

5.5 結論

第5章では丸鋼内部にひずみゲージを貼付し、鉄筋表面の付着性状を乱すことなく繰り返し引抜き試験を行い、付着領域内の鉄筋ひずみから付着応力度分布を求めることによって、以下の知見を得た。

- 1) 付着長が 10d 以上の鉄筋の引張応力度分布および付着応力度分布の性状はほぼ同様であったが、付着長が 5d の短い試験体と大きな違いがある。また、水平筋は繰り返し加力ではほぼ左右で正負の違いはあるものの同様の付着分布性状であったが、垂直筋では打設方向の影響が見られた。エポキシ樹脂補修については注入状況によって付着応力度分布性状に偏りが見られた。
- 2) 付着長が 10d 以上の試験体において、引張荷重が最大に達するまでの過程で、引張荷重の増大に伴って付着応力度のピーク位置は載荷端側から自由端側に移動する。この傾向はこれまでの研究結果と同様であった。
- 3) 最大引張荷重に達した後は、その付着領域内の付着応力度のピーク位置は変わらず、引張荷重の減少につれて分布形状の大きさのみ減少する。
- 4) 引張荷重を除荷することにより、載荷端に近い位置から付着応力度は減少し、引張荷重と抵抗する付着力とは逆方向の応力度が発生する。除荷後に残留付着応力度が発生する。
- 5) 繰り返し回数の増加につれて局所付着応力度の劣化が見られるが、分布状況はほぼ同じである。
- 6) 局所付着応力度一相対抜け出し変位曲線のループ性状は全体の付着応力度一抜け出し変位曲線とほぼ同じであった。
- 7) 繰り返し載荷時における付着応力度分布の推移のメカニズムを実験結果から推定した。

参考文献

- 1) D. Watstein: Distribution of Bond Stress in Concrete Pull-out Specimens, Jour. of ACI, Vol.8, No.11, Nov. ,1947
- 2) Mains, R.M.: Measurement of the Distribution of Tensile and Bond Stresses Along Reinforcing Bars, Journal of ACI, Vol.23, No.5, Nov., 1951
- 3) 水野高明, 渡辺明: 丸鋼, 異形丸鋼および異形ねじり鉄筋の付着に関する研究, 土木学会論文集, 第93号、pp.23-30,1963.5
- 4) 六車熙, 森田司郎, 富田幸次郎: 鋼とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (I 付着応力分布について-I), 日本建築学会論文報告集, 第131号, pp.1-8, 1967.1, (I 付着応力分布について-II), 第132号, pp.1-6, 1967.2, (II. 鉄筋コンクリート引張材の変形について), 第134号, pp.1-8, 1967.4, (III引き抜き試験について), 第139号 pp.1-10, 1967.9
- 5) 山本康弘, 中島亨: 鉄筋コンクリート部材における付着応力度の履歴に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.997-998,1972.9
- 6) 森田司郎, 角徹三: 繰り返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 第229号, pp.15-24,1975.3
- 7) Edwards, A.D. and Yannopoulos, P.J. : Local bond stress to slip relationship for hot rolled deformed bars and mild steel plain round bars, ACI Journal, pp. 405-420, March 1979
- 8) Bennett, E.W. and Snounou, I.G. : Bond-slip characteristics of plain reinforcing bars under varying stress, Bond in Concrete, Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete, Applied Science Publishers, London, pp.140-150, 1982
- 9) Feldman LR, Bartlett FM.: Bond stresses along plain steel reinforcing bars in pullout specimens. ACI Structural Journal, 104(6):pp.685-692,2007
- 10) Verderame G.M, Ricci P, De Carlo G, Manfredi G.: Cyclic bond behaviour of plain bars. Part I: Experimental investigation. Construction and Building Materials 34 3499-3511, 2009
- 11) Verderame GM, Ricci P, De Carlo G, Manfredi G.: Cyclic bond behaviour of plain bars. Part II: Analytical investigation. Construction and Building Materials 34 3512-3522, 2009
- 12) 田政範, 島田静雄: 鉄筋とコンクリートとの付着に関する基礎的研究; 土木学会論文集, 第217号, pp.87-98,1973.9
- 13) 島弘, 周礼良, 岡村甫: マッサージなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 第378号/V-6, pp.165~174, 1987.2
- 14) 壹岐直之, 清宮理: 除荷時における異形鉄筋の局所付着特性に関する考察; コンクリート工学年次論文集, 第24巻, 第2号, pp.817-822, 2002.7

第 6 章 結論

第6章 結論

本論文は低強度コンクリートに丸鋼を埋設した試験体を用いて引抜き試験を行い、低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状について検討したものである。加えて付着性能改善を目的としてエポキシ樹脂を鉄筋周り注入した試験体の引抜き試験を行った。以下に各章で得られた知見を示す。

第2章では、低強度コンクリートプリズムに埋め込まれた丸鋼の単調引抜き試験を行っている。付着強度に影響を及ぼすものとしてコンクリート強度、鉄筋径、鉄筋の埋め込み位置、コンクリート打設方向、鉄筋の種類、コンクリート材齢などを変数として取り上げ、それらの付着強度及び付着応力度－抜け出し変位関係を相互に比較し、低強度コンクリート中の丸鋼の付着性能に対する影響を調べている。また、付着性能改善を目指して、微小変位を与えて固着力を喪失させた試験体にエポキシ樹脂注入で補修し、その付着力上昇効果について検討して、以下の知見が得た。

- 1) 引抜き試験により、低強度コンクリート中の丸鋼においてブリージング水によって大きく影響を受けたことが確認された。それらの試験体の中の付着強度は鉄筋の埋め込み位置によって明確な違いが見られ、水平上端筋<水平中央筋≒水平下端筋<垂直筋の順となる。
- 2) コンクリート材齢の増加に伴う圧縮強度の増加傾向に対して、付着強度の増加傾向がほとんど見られない。
- 3) 丸鋼の付着応力度－抜け出し変位関係は本章で採用している変動因数にも関わらず、Abramsの実験結果と同じである。
- 4) エポキシ樹脂注入の補修効果はコンクリート強度が小さいほど、鉄筋径が小さいほど大きい。付着強度ばかりでなく、付着強度時以降の付着応力度にも著しい補修効果がある。

第3章では、第2章と同様なコンクリートプリズム試験体を用いて、変位制御で繰り返し引抜き試験を行い、付着強度、付着応力度－抜け出し変位関係の履歴特性について検討した。また、第2章と同様、エポキシ樹脂注入した試験体の付着履歴性状の改善状況を検討し、以下の知見が得た。

- 1) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係における包絡線を検討した結果、付着強度以降、付着応力度は急激に低下し、大変形時にはほぼ一定値に近づく。途中で除荷した場合、鉄筋の抜け出し変位は変化せず除荷時の抜け出し変位と同じ残留変位が発生する。
- 2) 片振幅漸増繰り返しにおける再載荷では、抜け出し変形は残留変形と変わらず、応力度のみ上昇し、除荷時付着強度の8割程度に回復した時点で変形が増え始める。その後、除荷時の応力度に達した後、付着応力度は低下し始める。
- 3) 正負漸増振幅繰り返しにおいて除荷後、荷重を反転させると残留変形のまま荷重のみ

変化し、負側のある応力度に達すると逆向きの変形が発生し始める。その付着応力度は正側の除荷時応力度と関係がある。発生した逆向きの変形が変位 0 に向くと、付着応力度は微小ではあるが減少する傾向にある。変位 0 以降、再び上昇し、元の付着応力度に近づく。

- 4) 繰返し载荷は付着応力低減率に大きいな影響を与え、繰返し回数が多いほど抜け出し変位が大きいほど低減傾向が大きい。
- 5) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係から求めたエネルギー吸収量はコンクリート強度が大きいほど高い。また鉄筋径が細いほどエネルギー吸収能力が高い傾向があった。
- 6) 各サイクルにおける等価粘性減衰定数は各種変動因数に関係なく、ほぼ同程度であった。
- 7) エポキシ樹脂注入は付着履歴特性に大きな影響を与える。特に付着強度とその後の付着応力度の低下、再载荷における付着応力度の上昇の度合いに大きな効果があり、部材の耐力、エネルギー吸収能力上昇に有効であると思われる。

第4章では、既往の異形鉄筋と丸鋼鉄筋の付着履歴モデルを参考にして、第2章、第3章で実験的に得られた付着応力度－抜け出し変位履歴特性の各基準点を回帰分析することによって、復元力特性のモデル化を試みている。第3章で述べたエポキシ樹脂補修による付着応力度－抜け出し変位履歴に大きな違いがあるため、補修の有無によって分けてモデル曲線を提案している。最後に、提案したモデル曲線の妥当性について、実験結果と比較して検証して、以下の結果が得た。

- 1) 単調载荷包絡線を既往の研究を参考にして付着応力度上昇域、付着応力度の低下域及び大変形時の付着応力度安定域の3領域に分類してモデル化した。
- 2) 付着応力度－抜け出し変位履歴関係における各特性点を実験結果に基づいて付着強度 τ_B に対応する座標に関係づけてモデル化した。付着強度時の変位 S_{max} を 0.1mm, エポキシ樹脂を注入した場合 0.2mm と提案した。大変形時に一定となる付着応力度を付着強度 τ_B と関連付けて $0.21\tau_B$, 補修した場合 $0.5\tau_B$ とした。また、荷重を反転させる場合や再载荷する場合には直近の除荷時付着応力度と関係付けて次の到達点の付着応力度を設定した。
- 3) 提案したモデル曲線と実験で得られた履歴特性を比較し、推測可能であることを示した。また、履歴特性から求めたエネルギー吸収量と等価粘性減衰定数についてモデル曲線と実験値を比較しほぼ推測可能であることを示した。
- 4) 大変形領域では実験値を推測できない場合もあった。これは本提案において荷重が反転して付着応力度が回復する比率を一律に決めていることに対して、繰返しによる鉄筋とコンクリート間の摩擦力の劣化を十分に評価していないことに原因がある。付着応力度の回復比率については今後のデータの蓄積が必要と考えている。

第5章では丸鋼内部にひずみゲージを貼付し、鉄筋表面の付着性状を乱すことなく繰り返し引抜き試験を行い、付着領域内の鉄筋ひずみから付着応力度分布を求めることによって、以下の知見を得た。

- 1) 付着長が 10d 以上の鉄筋の引張応力度分布および付着応力度分布の性状はほぼ同様であったが、付着長が 5d の短い試験体と大きな違いがある。また、水平筋は繰り返し加力ではほぼ左右で正負の違いはあるものの同様の付着分布性状であったが、垂直筋では打設方向の影響が見られた。エポキシ樹脂補修については注入状況によって付着応力度分布性状に偏りが見られた。
- 2) 付着長が 10d 以上の試験体において、引張荷重が最大に達するまでの過程で、引張荷重の増大に伴って付着応力度のピーク位置は載荷端側から自由端側に移動する。この傾向はこれまでの研究結果と同様であった。最大引張荷重に達した後は、その付着領域内の付着応力度のピーク位置は変わらず、引張荷重の減少につれて分布形状の大きさのみ減少する。引張荷重を除荷することにより、載荷端に近い位置から付着応力度は減少し、引張荷重と抵抗する付着力とは逆方向の応力度が発生する。除荷後に残留付着応力度が発生する。また、逆方向に再載荷し、負側の変位が発生し始める点までの付着応力度分布状況は直前の除荷の場合と同じであった。変位が逆方向に移動したと、変位が原点付近に近づくにつれて付着応力度分布が若干減少する傾向にあった。
- 3) 繰り返し回数の増加につれて局所付着応力度の劣化が見られるが、分布状況はほぼ同じであった。
- 4) 局所付着応力度－相対抜け出し変位曲線のループ性状は全体の付着応力度－抜け出し変位曲線とほぼ同じであった。
- 5) 繰り返し載荷時における付着応力度分布の推移のメカニズムを実験結果から推定した。

第6章では本論文の各章で得られた結論の総括を行った。

最後に本研究の今後の課題、展望について述べる。

本論文で得られた結果は単純な引抜き試験から得られたものである。これまであまり注目されることのなかった低強度コンクリート中の丸鋼の付着性状について検討してきた。現時点では丸鋼を主筋とする既存建物は日本ばかりでなく世界各地に数多く存在している。そして低強度コンクリートも同様に存在している。コンクリートが低強度になると丸鋼の付着劣化はより一層激しいものとなることが本研究で明らかになり、主筋の付着劣化が RC 建物の耐震性能に重大な影響を与えることはこれまでの研究からも明らかである。本研究で得られた成果がこのような既存建物の耐震性能把握に役立つことを期待するものである。

本研究の成果を既存建物の耐震性能把握に繋げるために、今後なすべき課題と展望を以下に述べる。

1) 低強度コンクリート中の丸鋼の付着性能の定量化について

本研究の主題である低強度コンクリート中の丸鋼の付着強度に関しては定性的な把握に限定され、許容付着応力度にあるようなコンクリート強度と関連付けられる付着強度を提案できていない。丸鋼の付着強度はその固着力に支配されている。低強度コンクリートの場合、固着力はコンクリート強度に依存する割合がもともと低く、水セメント比に代表される練り混ぜ条件やコンクリートの打設条件等に大きく左右されていることが本研究によって明らかとなっている。従って、RC 規準にあるようなコンクリート強度を変数とする「上端筋」と「その他の鉄筋」という区分では対応できないと思われる。低強度コンクリート中の丸鋼の付着性能を定量的に把握するためには今後、様々な変数に関する研究が望まれる。また、既存建物のコンクリートは施工後数十年を経ているものであり、実験室レベルで作成された低強度コンクリートが現実のコンクリートと同等かどうかについては今後検証を重ねてゆかねばならない。また、鉄筋自体もその周りの空隙等の影響を受けて劣化していることも想定される。そのため、実建物において引抜き試験等を実施することによって実際の現実の付着性能はどのようなものかを検証する必要もあると考えられる。

2) 低強度コンクリート部材の抵抗機構把握のための検証

本研究で採用した試験方法は付着長を限定した単純な引抜き試験である。この試験方法は簡便な方法であり様々な条件下での相互比較には有利であると考えられているものの、そのまま部材への適用には問題があるとされている。多軸荷重下で繰り返し载荷を受ける鉄筋コンクリート梁や柱の主筋は全付着領域で繰り返し引張力や圧縮力を同時に受けているものと考えられる。本研究で得られた局所的な付着特性が部材中の付着領域に亘って適用できるかどうかについては明快な結論を出すに至っていない。そのため既に行われている丸鋼を主筋とする低強度コンクリート部材の実験結果との照合や FEM 解析などを用いた検証研究が必要である。

3) エポキシ樹脂注入による付着性能改善効果

本論文では低強度コンクリート中の丸鋼の付着性能を改善する方法として、エポキシ樹脂を鉄筋周りに注入することを提案している。その結果、得られた付着性能は著しく改善されるというものであった。低強度コンクリートほど改善効果が大きく、コンクリートと丸鋼の付着状況によって改善効果が異なることも確認された。一方、コンクリート強度や鉄筋配置によってその効果には大きな幅があり、改善効果の定量的把握には至っていない。本実験の場合は固着力喪失後に比較的短い付着領域の複数の注入孔からエポキシ樹脂を集中的に注入するという効果が発揮されやすい注入方法を採用している。そのためエポキシ樹脂注入工法を実施する場合はエポキシ樹脂注入量と改善効果を関係づける定量的な把握が必要となってくると考えられる。

4) 今後の展望

低強度コンクリート中の丸鋼の付着機構を明らかにすることが出来れば、丸鋼を主筋と

する部材の抵抗機構をより正確に評価でき、その抵抗機構に即した改修方法の選択が可能となる。耐震性の乏しい建物は地震国日本の問題ばかりでなく世界各地の地震多発地帯の問題でもある。合理的な診断・改修設計法の開発は既存建物の耐震安全性を高めるとともに、長寿命化を促進できると考えている。

—付録—

写真 1～3. 引抜き試験体型枠

写真 4. 打設風景

写真 5. 試験体の様子

写真 6. 引抜き載荷装置

写真 7～8. 材料実験の様子

写真 9. 計測装置

写真 10. ひずみゲージの貼り付け作業

写真 11. 加工した鉄筋の引張試験

写真 12. エポキシ樹脂注入

写真 13. 異形鉄筋補修後破壊状況

写真 14. エポキシ樹脂注入状況

表 1. コンクリートに対する許容付着応力度の変遷



(13φ 水平筋)



(19φ 水平筋)



(垂直筋)



(上・下端筋)

写真 1 単調引抜き試験体型枠



(13φ)



(19φ)

写真 2 繰返し引抜き試験体型枠



写真 3 局所付着用試験体型枠



スランプ試験



空気量試験



コンクリートフレッシュ特性



材料試験用モールド



水平筋試験体



垂直筋試験体



単調載荷用試験体



繰返し載荷用試験体

写真4 打設風景



写真5 試験体の様子



写真6 引抜き载荷装



写真7 鉄筋引張実験



写真8 コンクリート圧縮・割裂実験



(b) 変位計(CDP-25)



(b) KCM-50KNA(ロードセル)



(c) KCM-100KNA(ロードセル)



(d) KCM-200KNA(ロードセル)

写真9 計測装置



ひずみゲージ(SKF-27919)



加工した鉄筋



ひずみゲージの貼り付け



鉄筋内部の除湿



PC-12によるコーティング



鉄筋の接着及び固定

写真 10 ひずみゲージの貼り付け作業



写真 11 加工した鉄筋の引張試験



エポキシ樹脂①



エポキシ樹脂②



注入カプセル

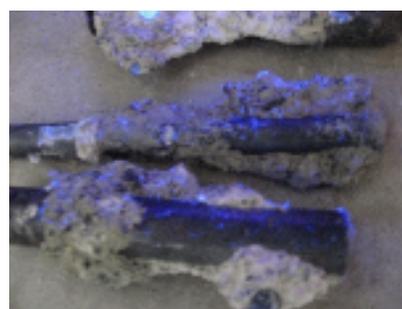
写真 12 エポキシ樹脂注入



写真 13 異形鉄筋 補修後破壊状況



(a)



(b)

写真 14 エポキシ樹脂注入状況

註：写真 12(a)は試験後にコンクリートを割裂し、鉄筋に沿ってエポキシ樹脂が入っていることを確認した。エポキシ樹脂に青色に反応する光をあてると写真 12(b)のように鉄筋周りばかりでなくコンクリートの内部にもエポキシ樹脂の注入されていることを確認した。

鉄筋コンクリート構造計算規準における許容付着応力度の変遷

1933 年日本建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準発刊

表 1 コンクリートに対する許容付着応力度の変遷

改訂年	鉄筋種	長期		短期
		上端筋	下端筋	
1933	丸鋼	7kg/cm ² 以下		
	異形	10kg/cm ² 以下		
1947	丸鋼異形	7kg/cm ² 以下		長期の 2 倍
1949	丸鋼異形	7kg/cm ² 以下		長期の 2 倍
1954	丸鋼異形	7kg/cm ² 以下		長期の 2 倍
1958	丸鋼	$\frac{4}{100}F_c$ かつ 7kg/cm ² 以下のとき 7kg/cm ²	$\frac{6}{100}F_c$	長期の 2 倍
	異形	$\frac{7}{100}F_c$	$\frac{1}{10}F_c$	
1962	丸鋼	$\frac{4}{100}F_c$	$\frac{6}{100}F_c$	長期の 2 倍
	異形	$\frac{7}{100}F_c$	$\frac{1}{10}F_c$	
1971	丸鋼	$\frac{4}{100}F_c$ かつ 9kg/cm ² 以下	$\frac{6}{100}F_c$ かつ 13.5 kg/cm ² 以下	長期の 1.5 倍
	異形	$\frac{1}{15}F_c$ かつ (9 kg/cm ² + $\frac{2}{75}F_c$) 以下	$\frac{1}{10}F_c$ かつ (13.5 kg/cm ² + $\frac{1}{25}F_c$) 以下	
1975	1971 と同じ			
1979	1971 と同じ			
1991	1971 と同じ			
1999	異形鉄筋	$0.8 \times \left(\frac{F_c}{60} + 0.6 \text{N/mm}^2 \right)$	$\frac{F_c}{60} + 0.6 \text{N/mm}^2$	長期の 1.5 倍
2010	丸鋼	$\frac{4}{100}F_c$ かつ 0.9N/mm ² 以下	$\frac{6}{100}F_c$ かつ 1.35 N/mm ² 以下	長期の 1.5 倍
	異形鉄筋	$\frac{1}{15}F_c$ かつ (0.9 N/mm ² + $\frac{2}{75}F_c$) 以下	$\frac{1}{10}F_c$ かつ (1.35 N/mm ² + $\frac{1}{25}F_c$) 以下	

—謝辞—

著者は平成 20 年 10 月に研究生として広島大学工学部・建築耐震工学研究室に籍を置き、平成 21 年 4 月に大学院博士課程前期に入学し、既存建物の耐震性能評価で問題となっている低強度コンクリートと丸鋼の付着に関する研究を始めました。その後、平成 23 年 4 月に同大学大学院博士課程後期に進学し、引続き同じテーマで研究を行ってきました。本論文は博士課程前期・後期の 5 年間を通じて行った研究を纏めたものです。

恩師・広島工業大学工学部・建築工学科・荒木秀夫教授（平成 23 年度まで広島大学大学院耐震工学研究室・准教授）は本論文を作成するにあたり、論文テーマの決定から、試験体作製、実験実施、論文作成に関して終始暖かい御指導と適切な助言を賜りました。また、研究内容の指導ばかりでなく、日常生活の援助や人生の道にどのような姿勢で取り組むかについても種々ご教示をいただきました。荒木秀夫教授の熱心なご指導の下で研究ができましたことは、著者にとって生涯の大きな喜びであります。この場をお借りしまして、尊敬の念を込めて心から感謝致します。今後ともご指導の程よろしくお願い申し上げます。

本論文の審査にあたり、広島大学大学院工学研究院社会空間部門、建築材料研究室・大久保孝昭教授、建築防災研究室・大崎純教授、建築耐震工学研究室・日比野陽准教授には貴重な時間を頂いて査読を賜り、多くの暖かいご指導や貴重なご意見を頂きました。ここにお礼を申し上げます。

広島大学技術員の京泉敬太さん、下川久義さん、平松正太郎さんには真夏の暑い日も冬の寒い日も、試験体の作製から実験実施に至るまで多くの手助けを頂きました。

また建築事務所の瀬戸川直美さん、上脇薫さんには学生生活から研究活動まで多くのお世話を頂きました。ここに併せて感謝の意を表します。

本研究における補修にかかわるエポキシ樹脂注入に関して、SG エンジニアリング(株)代表取締役加川順一氏に機材や材料の提供だけでなく、多くの技術指導を頂きました。心から感謝いたします。

実験から本論文作成に至るまで苦楽を共にした同研究室の平成 25 年度修論生・徳川達也君、星川知毅君、および卒論生・藤谷涼君に多くの手助けを頂きました。

また、平成 23 年度修了生・徳永賢駿君（現大林組）、板野昌平君（現銭高組）、家形徹君（現鹿島建設）および卒論生・佐藤真哉君（現清水建設）、平成 24 年度修論生・伊崎聖

也君（現大成建設）、吉本侑生君（現清水建設）、サウドムフマード君（現横浜国立大学大学院）、平成 23 年度研究生・崔国斌君（現拓米電子材料有限公司・中国）、平成 24 年度大学院生・宮原憲之君（現広島市役所）にも感謝したいと思います。皆さんの明るさと多くの支えを頂いたおかげで研究を無事終了し、本論文を完成することができました。有難うございました。

最後に今まで支えてくれた母国の両親、家族にも感謝の気持ちを述べたいと思います。ありがとうございました。

平成二十六年二月十五日

供 成