

# 両引き試験による若材齢コンクリートと 異形鉄筋の付着特性の評価

三村陽一<sup>1</sup>・吉武 勇<sup>2</sup>・辻 和秀<sup>3</sup>・田中 浩<sup>4</sup>・浜田純夫<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 株式会社エイトコンサルタント 岡山支社 (〒700-8617 岡山県岡山市津島京町 3-1-21)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 山口大学助手 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社エイトコンサルタント 岡山支社 (〒700-8617 岡山県岡山市津島京町 3-1-21)

<sup>4</sup>正会員 株式会社栗本鐵工所 大阪臨海工場 (〒590-0977 大阪府堺市大浜西町 2 番地の 2)

<sup>5</sup>正会員 Ph.D. 山口大学教授 工学部 社会建設工学科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

マスコンクリートの温度応力(ひび割れ)予測の高精度化には、若材齢期におけるコンクリートの力学特性の把握が必要とされる。そこで本研究では、コンクリートのひび割れ発生応力場となるべく両引き試験を行い、若材齢期を中心に時系列な付着特性について検討を試みた。また、一部の供試体については再載荷試験を実施し、若材齢期に応力履歴を受けた場合における付着特性の変化についての検討を行った。その結果、材齢 1 日では付着効果がほとんど見込めないこと、および材齢 1~7 日にかけて付着特性が大きく変化することが確認された。さらにその破壊機構に関して、既往の研究にて報告された鉄筋ふしを起点とする斜めひび割れは認められず、鉄筋ふしによるせん断破壊の影響が大きくなる可能性が伺えた。

*Key Words* : young-aged concrete, bond stress, slip, loading age, axially loaded tension test, reloading

## 1. はじめに

マスコンクリートの温度応力(ひび割れ)予測には、若材齢期におけるコンクリートの力学特性が適切に評価されなければならない。そのため、コンクリート標準示方書(施工編)<sup>1)</sup>では、若材齢期における圧縮・引張強度の推定式が示されており、またひずみを応力に変換する上で必要不可欠な(有効)ヤング率の推定式も併記されている。長年にわたる研究成果によって、マスコンクリートの温度ひび割れはある程度正確に予測できるようになっているが、そのさらなる精度向上を行うためには、若材齢コンクリートの詳細な力学特性の把握が必要とされる。特に、温度応力に直接的に影響する若材齢期のクリープについては近年盛んに研究が行われ、様々な研究成果が報告されている<sup>2),3)</sup>。しかしながら、いずれの研究もコンクリート単体のクリープ現象を捉えたものであり、その成果をそのまま実構造物に準用するには限界があるものと思われる。

温度応力の発生が顕著な構造物表面近傍には、一般に鉄筋が多く配置されることから、コンクリートのクリープ変形過程において、コンクリート~鉄筋間に複雑な応力交換が行われることが予想される。また温度ひび割れ幅の予測においても、鉄筋とコン

クリートの付着が問題となり、若材齢期の付着特性の時系列な評価が必要とされる。山崎<sup>4)</sup>は、壁状マスコンクリートの温度ひび割れ幅算定法の提案を行っており、その中において構造物表面近傍の鉄筋引張力が及ぼす影響を課題に挙げている。

そこで本研究では、クリープ過程におけるコンクリート~鉄筋間の応力交換や温度ひび割れ幅算定の基礎的データを資するべく、主に若材齢期におけるコンクリートと異形鉄筋の付着特性について、既往の評価方法(鉄筋付着応力-相対すべり関係)および新たに考案した簡易評価方法を用いながら実験的検討を試みた。

## 2. 鉄筋の付着に関する既往の研究

鉄筋とコンクリートの付着問題は、ひび割れ幅の算定やそれに伴う鉄筋配置に極めて重要な項目である。そのため付着の強度や付着機構を解明すべく、古くより実験的あるいは解析的な観点から数多くの研究がなされている。そこでわが国における鉄筋の付着に関する既往の研究を概観するとともに、諸実験パラメータを表-1にまとめて示す。

後藤・大塚<sup>5)</sup>は、太径鉄筋の両引き試験により、各

表-1 コンクリートと鉄筋の付着に関する既往の研究

文献	載荷方法	鉄筋径	定着長	最小かぶり	28日圧縮強度	試験材齢
5)	両引き	R16,R22,D32,D41,D51	2~3m	44~65mm	29.4MPa	——
6)	片引き	D13, D16, D19, D22	300mm	64~69mm	26.5~39.2MPa	28日
7)	片引き	D16~D57	6~10D	1~10D	19.6~39.2MPa	28日
8)	片引き・押抜き	R, D 共に 13~25	300, 400mm	63~89mm	24.5~58.8MPa	5,7,28日
9)	片引き	R, D 共に 13~25	255mm	62~69mm	37.9~39.2MPa	7日
10)	両・片引き	D19	150, 250mm	41~66mm	32.5MPa(14日)	——
11)	両・片引き	D19~D25	150~300mm	2.3~66mm	36.0MPa	——
12)	両・片引き	R16, D16, D19	50~3300mm	67~115mm	38.8~41.7MPa	——
13)	片引き	D19, D25, D32	10~50D	244mm	15.7~41.7MPa	9~19日
14)	片引き	D22	15~75mm	——	29.4MPa	28日
15)	両・片引き	D19, D25, D32	2~50D	約240mm	18.5~50MPa	14日
16)	両・片引き	D19	40D	65~240mm	29.4~33.0MPa	25~55日
17)	両・片引き	D16, D19	10D~40D	66~240mm	21.9~44.4MPa	25~66日
18)	片引き	D13, D19	1.5~4.5D	2D~3D	19.6MPa(3日)	3,6日
19)	両引き	D16	1000mm	48, 92mm	29.1MPa(11日)	11日~
20)	片引き	D13, D19	3D	2D	17.3MPa(3日)	3日

種ひび割れの発生状況・発生機構の解明を行っている。関・赤塚<sup>6)</sup>は、打設方向すなわちブリージングが付着強度に及ぼす影響に着目した研究を行っており、付着強度の低下範囲を示している。村田・河合<sup>7)</sup>の研究は、鉄筋の表面形状やコンクリート強度が付着強度に及ぼす影響について検討している。

水野・渡辺<sup>8)</sup>は鉄筋中心部を切削した溝にひずみゲージを貼り付ける手法を用いて、引抜きおよび押抜き試験における鉄筋ひずみ分布を測定している。その結果、丸鋼および異形鉄筋の付着応力分布や鉄筋に沿った部位ごとの付着応力は異なることを報告している。田・島田<sup>9)</sup>は、静的および低周期繰返し引抜き載荷を行い、付着応力とすべりの関係(以下、 $\tau$ - $S$ 関係と略す)を用いて丸鋼と異形鉄筋の付着機構の相違を報告している。中島・山本<sup>10)</sup>は、引抜きおよび両引き試験を行った後、除荷あるいは負の荷重を与えることで $\tau$ - $S$ 関係への影響を調べている。また、池田<sup>11)</sup>はコンクリート~鉄筋間の応力伝達を、軸要素モデルおよびばね系有限要素モデルを用いてモデル化を行うとともに、平板供試体を用いて内部ひび割れの発生~成長過程を観察するほか、縦ひび割れの影響やひび割れ間隔の下限值、相対すべり( $S/D$ )評価の有効性を報告している。

ここで、鉄筋コンクリートのひび割れ幅や鉄筋抜け出し量を算定する目的から、一般に付着の定式化には $\tau$ - $S$ 関係が用いられている。これは、異形鉄筋の付着がふしの機械的作用を主としており、付着応力 $\tau$ はすべり $S$ の関数として考えられるというもの

であり、古くより数多くの実験式が提案されている。

森田<sup>12)</sup>は定着長が比較的短いものから長いものまでの実験により、 $\tau$ - $S$ 関係式の提案を行っている。山尾・周ら<sup>13)</sup>の研究では、定着長が $\tau$ - $S$ 関係に及ぼす影響について検討を行っており、定着長の増加に伴い、同一すべり量に対する付着応力が低下することを報告している。また同報において、 $\tau$ - $S$ 関係が一定となるには、定着長が鉄筋径の25倍以上必要とするとしている。長友・角<sup>14)</sup>は横ふしを1個のみもつ異形鉄筋を用いて付着機構を単純化した実験を行い、コンクリート強度 $f_c$ や鉄筋径 $D$ が及ぼす影響に対し、 $\tau/f_c^{1/2}$ - $S/D$ 関係で整理することの有効性を報告している。島・周ら<sup>15)</sup>は定着長や境界条件の異なることによる種々の $\tau$ - $S$ 関係を1つの式で表すため、定着長が短い場合および十分に長い場合の各々において鉄筋ひずみ $\epsilon$ の影響を組み込んだ式( $\tau$ - $S$ - $\epsilon$ 関係)を提案している。壹岐・清宮ら<sup>16)</sup>の研究では、 $\tau$ - $S$ 関係に影響を及ぼす要因を明確にするため、コンクリートの応力場や打設方向等を考慮した実験を行い、島・周ら<sup>15)</sup>の提案式に対する各種補正係数の提案を行っている。さらに、彼らは各種の載荷試験を通じてコンクリートの軸方向応力状態が異形鉄筋の付着特性に与える影響について検討し、その影響を組み込んだ補正式を提案している<sup>17)</sup>。

米山・米倉ら<sup>18)</sup>の研究では、マスコンクリートの温度ひび割れ幅予測の基礎データを資する目的から、若材齢コンクリートを対象に、鉄筋の付着クリープについて検討されている。佐藤・氏家ら<sup>19)</sup>はひび割

れ間要素の挙動解明の基礎実験として、ひび割れ間要素を両引き供試体にモデル化し、早期に持続荷重を導入した実験を行っている。その実験より、時間経過に伴う付着応力の低下は、比較的早期に現れること、および端部における鉄筋の抜け出し量の増加の要因は、荷重初期では付着クリープ、その後は乾燥収縮であることを報告している。また、JCIマスコングクリートの温度応力研究委員会の報告書<sup>20)</sup>では、若材齢期(材齢3日)の付着実験をもとに、森田<sup>12)</sup>の提案する $\tau$ - $s$ 関係式を用いて温度ひび割れ幅予測の解析例が示されている。

このように、若材齢期のコンクリートと鉄筋の付着特性に関する研究は、いくらか報告がなされているものの、付着特性や付着機構といった基礎的資料は極めて少ない現状にあると思われる。また、これらの研究例のほとんどが、主に試験材齢3日以降の試験結果をもとに検討されている。若材齢期の付着特性の解明および付着挙動の時系列な評価を行う上で、材齢3日以前の付着試験データは、有効な資料になり得るものと思われる。

### 3. 実験および評価方法

#### (1) 実験供試体の詳細

本研究では、図-1に示されるようにコンクリート断面中心に、D13およびD19の横ふし型異形鉄筋(SD295A, 一般市販品)を両端より張り出し埋設したコンクリート供試体を作製した。なお、コンクリート供試体の断面寸法は、100×100×400mm, 150×150×520mm(以下、各々Case10, Case15と表す)である。本研究におけるコンクリートと鉄筋の定着長は、いずれも320mmとしたことから、D13鉄筋では約25D, D19鉄筋では約17Dに相当する。ここで、本研究では鉄筋とコンクリートがともに引張応力場となるマスコングクリートの内部を模するため、定着部を除いたコンクリート中における鉄筋両端部は、グリスを塗布したテープで被覆し非定着部とすることで、荷重端におけるコンクリートの面外変形の影響を小さくした。本研究で作製した供試体の詳細を表-2にまとめて示す。なお、供試体はコンクリート打設後直ちに養生室内(20℃, R.H.85%)に搬入し、材齢1日において脱型した。また、脱型後は養生室内において水中養生を施したことから、本研究で取り扱うコンクリートの材齢はいずれも有効材齢に相当するものとなる。

本研究では、定着部における鉄筋ひずみを測定するため、供試体の対称性を考慮し、供試体中央より

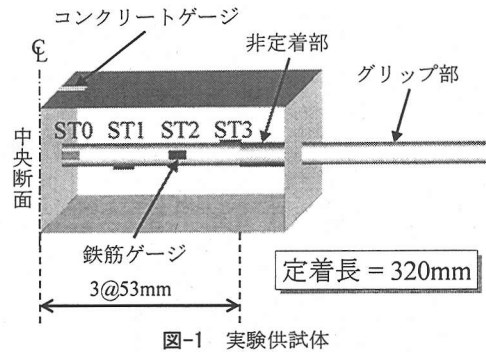
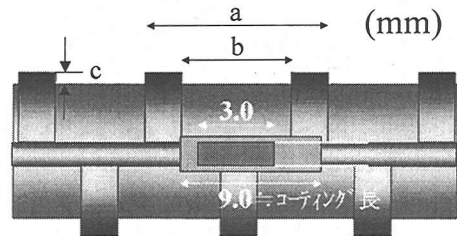


表-2 実験供試体の詳細

鉄筋径	断面寸法	最小かぶり	定着長	非定着長
D13	Case10	44mm	320mm (25D)	40mm×2
	Case15	69mm		105mm×2
D19	Case10	40mm	320mm (17D)	40mm×2
	Case15	65mm		105mm×2



D13: (a, b, c) = (5.8, 9.4, 1.0)

D19: (a, b, c) = (10.0, 14.9, 1.5)

図-2 ひずみゲージの貼り付け状況の概略図

片側部にひずみゲージ(Gauge Length: 3mm)の貼り付けを行った。なお、鉄筋には必要最小限にふしやリブを切削した平滑面を設け、D13鉄筋ではらせん状に、D19鉄筋ではリブ部片側2ヶ所ずつ各々計4ヶ所において等間隔53mmで貼り付けた。ひずみゲージの貼り付け状態を図-2に示す。また、コンクリート表面部への応力伝達状況を確認するため、シアノアクリレート系接着剤を用いてコンクリートひずみゲージ(Gauge Length: 60mm)を供試体表面中央部に貼り付けた。なお、試験材齢1日における実験では、脱型後速やかに供試体表面の水分を除去し、コンクリートひずみゲージの貼り付けを行った。

#### (2) 実験方法

マスコングクリートの温度ひび割れをもたらず温度応力(拘束応力)は、鉄筋とコンクリートの自由熱膨張差に起因するもの等を除くと、いずれも引張応力場にあると考えられる。したがって本研究では、図-3に示すように供試体の両端面より張り出した鉄筋

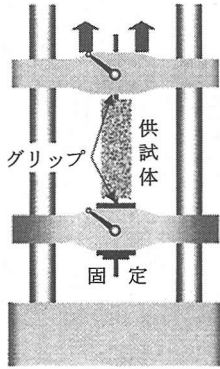


図-3 荷重方法

表-3 実験項目

記号	Case	鉄筋径	試験材齢 X (day)
D13-X(10)	10	D13	1, 2, 3, 7, 28
D13-X(15)	15		
D19-X(10)	10	D19	
D19-X(15)	15		
STEEL	---	D13	---
	---	D19	---

※D13-1については材齢2,3,7日に再荷重を実施

表-4 使用材料と配合条件

W/C %	s/a %	単位量 kg/m <sup>3</sup>				AE 減水剤 %/m <sup>3</sup>
		W	C	S	G	
55.0	44.6	165	300	812	1047	0.75
セメント C	密度	プレーン	細骨材 S		密度	F.M
OPC	3.15 g/cm <sup>3</sup>	3200 cm <sup>2</sup> /g	粗骨材 G		2.60	2.25
					密度	Max
					2.70	20mm

(自由部鉄筋)をグリッパで固定し、油圧式万能試験機(Max 980kN)を用いて引張力を導入する両引き試験とすることで、鉄筋とコンクリートいずれも引張応力場とした。

温度ひび割れをもたらすような温度応力程度では、鉄筋降伏に至らないことが予想されるため、本研究における荷重は、鉄筋降伏直前(D13→39.2kN, D19→88.2kN)とし、そのうち除荷を行った。なお、荷重は応力制御とし、荷重および除荷速度はいずれも約60N/sec程度で行った。

ここで荷重～除荷過程において、D13鉄筋では0.98kN, D19鉄筋では1.96kNごとに、各ひずみの計測を行った。計測はデータロガーからRS232Cインターフェースを経由してパソコン内のFDに記録した。

### (3) 実験項目

本研究では、若材齢期のコンクリートと異形鉄筋の付着特性の変化を把握する目的から、D13およびD19鉄筋を用い、2種類の断面寸法を有するコンクリ

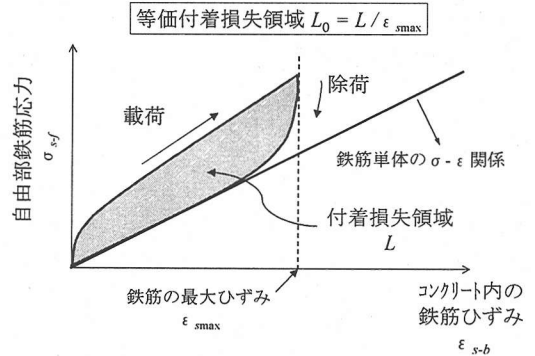


図-4 付着損失領域および等価付着損失領域の定義

ート供試体に対し、材齢1,2,3,7,28日で両引き試験を行った。本研究における主な実験項目の詳細を表-3に示す。また、強度が十分に発現していない若材齢期において応力履歴を受けた場合、鉄筋周辺のコンクリートの損傷が著しくなり、付着機構が影響されることが予測される。そこで本研究では、試験材齢1日における両引き試験の実験供試体(Case10, 鉄筋径D13)を用いて、再度同様の両引き試験を行い、若材齢期の応力履歴が付着特性に及ぼす影響について検討した。

### (4) 使用材料と配合条件

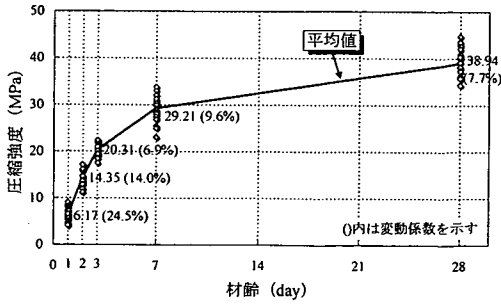
本研究では、コンクリートの配合条件が鉄筋の付着特性に及ぼす影響に対しては検討しておらず、平均的なコンクリートの配合とした。本研究で利用した材料および配合条件の詳細を表-4に示す。なお、用いた細骨材は北九州若松産の海砂(密度2.60g/cm<sup>3</sup>, FM2.25)、粗骨材は山口県宮野産の安山岩砕石(密度2.70g/cm<sup>3</sup>, 最大寸法20mm)である。

### (5) 付着特性の評価方法について

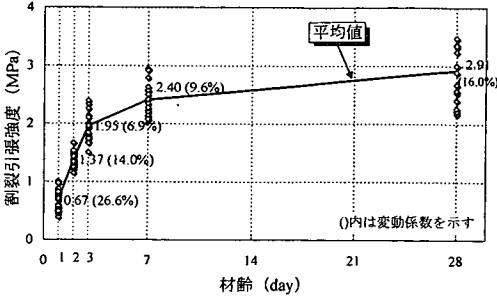
#### a) 付着応力(τ)とすべり(S)の決定方法

一般に鉄筋の付着応力分布やコンクリートのひび割れ幅を推定するために、鉄筋の付着応力(τ)はすべり(S)の関数として表されており、これまで数多くの実験式が提案されている。ここで島・周ら<sup>15)</sup>や壹岐・清宮ら<sup>16,17)</sup>の研究では、鉄筋ひずみ分布を求めるにあたり、着目する点およびその両隣の3点を2次放物線で回帰し、鉄筋の付着応力算定を行っている。

本研究における荷重方法は、供試体より張り出した鉄筋の両引き試験であることから、供試体中央部における鉄筋のすべりはないものと仮定できる。本研究では供試体中央部を不動点(原点)と仮定し、既往の研究同様に着目点およびその両隣の点における鉄筋ひずみを2次放物線で回帰を行った。ここで得られた回帰曲線を基に、鉄筋に沿う任意の点にお



A) 圧縮強度



B) 割裂引張強度

図-5 コンクリート強度試験結果

導関数を用いて、付着応力を求めるとともに、原点から着目する点までの鉄筋ひずみの積分によりすべりの算定を行った。付着応力およびすべりの算定式を以下に示す。

$$\tau = \frac{D}{4} \cdot \frac{d\sigma_s}{dx} = \frac{DE_s}{4} \cdot \frac{d\varepsilon_{s-b}}{dx} \quad (1)$$

$$S(x) = \int_0^x \varepsilon_{s-b}(x) dx \quad (2)$$

ここに、

$\tau$ : 付着応力,  $D$ : 鉄筋径,  $\sigma_s$ : 鉄筋応力

$x$ : 鉄筋に沿う位置,  $E_s$ : 鉄筋のヤング率

$\varepsilon_{s-b}$ : コンクリートによる付着拘束を受ける鉄筋ひずみ

$S$ : すべり量

を表す。

実際には、計測点4点のうち、荷端近傍の鉄筋ひずみ(記号: ST3)は、コンクリートによる付着拘束を受けない鉄筋ひずみと同程度のひずみとなったことから、本研究における付着応力とすべり量の評価には、供試体中央部より2番目の点(記号: ST1)のみ着目し付着応力およびすべりの算定を試みた。

b) 等価付着損失領域の定義と評価方法について

本研究では、コンクリートとの付着による鉄筋ひずみの拘束度を定量化する目的で、コンクリートに

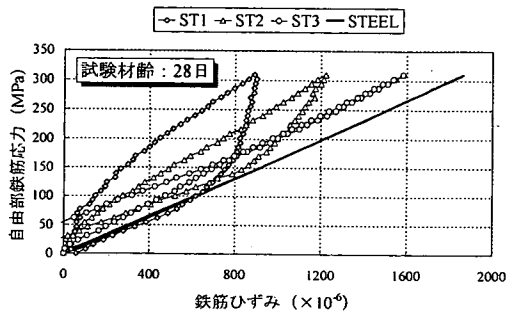
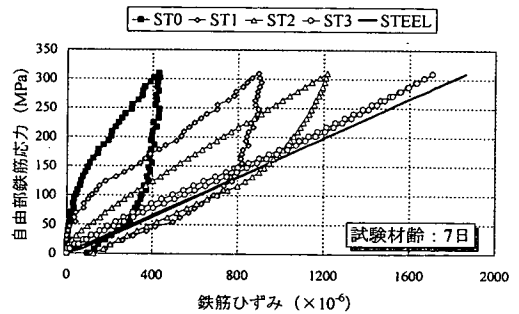
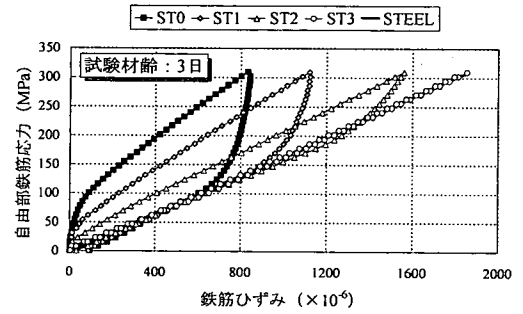
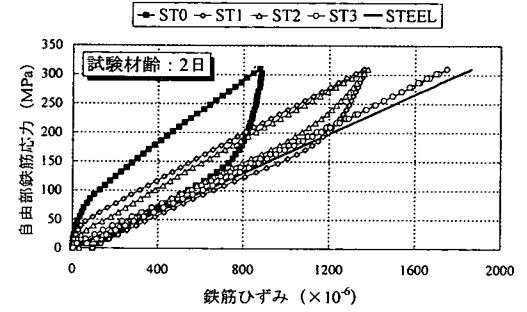
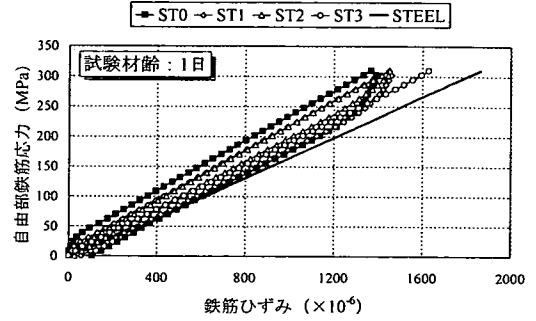


図-6 付着拘束を受ける鉄筋ひずみ (Case10)

よる付着拘束を受けない鉄筋(自由部鉄筋)の応力  $\sigma_{s-f}$  とコンクリート中の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  曲線において、 載荷～除荷過程から内部に形成される面積を用いて評価を試みた<sup>21)</sup>。 以後、本研究では同面積を付着損失領域  $L$  と表すとともに、コンクリート中の各部位ごとの最大鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,max}$  に対する付着損失領域  $L$  を等価付着損失領域  $L_0$  と定義する。 図-4に付着損失領域  $L$  と等価付着損失領域  $L_0$  の模式図を示す。

鉄筋とコンクリートの付着効果が高くなるほど、コンクリートへの応力伝達が大きくなり、 載荷過程では鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  の進展は抑制されるとともに、 除荷過程における鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  は保持されようとするものと予想される。 したがって、付着効果が高いものほど内部に形成される付着損失領域  $L$  と等価付着損失領域  $L_0$  は大きくなる傾向にあると考えられる。 本研究で提案した付着の評価手法は、算定される値がそのままコンクリートへの応力伝達度やひび割れ幅算定に用いることはできないが、付着効果の数量化に関し、時間(材齢)的・場所的变化を簡易的に評価することができるものと思われる。

#### 4. 実験結果と考察

##### (1) コンクリート強度試験結果

本研究では、若材齢期におけるコンクリート強度の増進(水和の進行)が、鉄筋との付着特性に及ぼす影響の把握を主眼とすることから、付着試験と同時に圧縮・割裂引張強度試験を行った。なお、用いた供試体は円柱型( $\phi 100 \times 200\text{mm}$ )であり、圧縮・割裂引張強度試験のおおの2~3本を試験した。各材齢における圧縮・割裂引張強度の試験結果を図-5に示す。同図では、全ての強度試験結果を記載しており、水和反応の進行程度により、強度の発現にばらつきが生じやすい材齢1日では他の試験材齢と比較して変動係数(圧縮強度: 24.5%, 割裂引張強度: 26.6%)が大きくなっているものの、それ以降の材齢における変動係数は7~16%程度となっており、材齢28日において概ね圧縮35~45MPa、引張2.0~3.5MPaの範囲内にある。

##### (2) 付着拘束を受ける鉄筋ひずみ、 $\tau$ - $S$ 関係および等価付着損失領域の材齢変化

コンクリートによって付着拘束を受ける鉄筋ひずみの材齢変化の一例として、Case10(供試体寸法:  $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ )における鉄筋径D13の試験結果を図-6に示す。ここで同図における縦軸は、鉄筋単体の応力である自由部鉄筋応力(載荷力/鉄筋断面積)

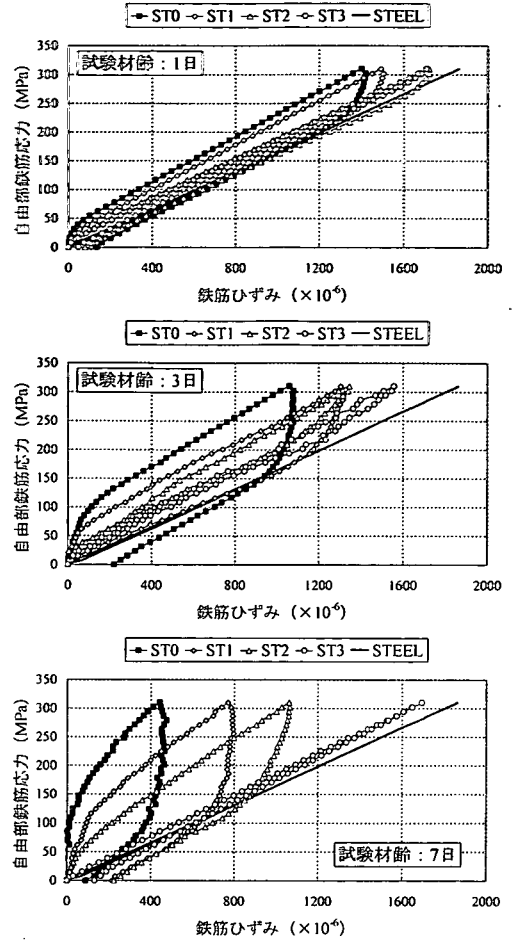


図-7 付着拘束を受ける鉄筋ひずみ(Case15)

を表し、横軸はコンクリートによって付着拘束を受けた鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  である。また、比較のため鉄筋単体(記号: STEEL)の応力-ひずみ関係も併記している。なお、Case10の供試体による試験材齢28日のST0では、ひずみゲージの損傷のため、同図から省いている。

さらに補足のため図-7には、鉄筋径D13を用いたCase15(供試体寸法:  $150 \times 150 \times 520\text{mm}$ )の材齢変化のうち、特徴的なひずみ分布となる試験材齢1,3,7日における試験結果を示す。

両図より、いずれの試験材齢においても、除荷過程では、鉄筋単体(記号: STEEL)のひずみ挙動に漸近していく傾向があった。また、試験材齢1日ではコンクリート中の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  とSTEELのひずみに大きな相違はみられないが、試験材齢が進行するにつれ、コンクリート中の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  が小さくなっており、付着拘束の効果が生じていることがわかる。このような傾向はCase10およびCase15に共通するものであるが、Case10とCase15との相関性、すなわち

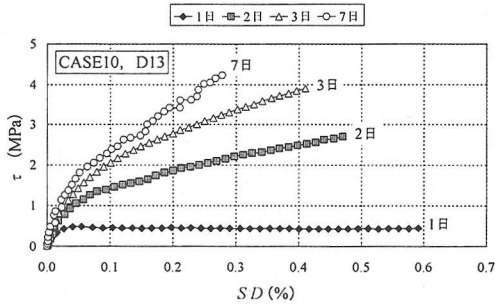


図-8 付着応力(τ)と相対すべり(S/D)関係の材齢変化

コンクリート断面寸法(鉄筋かぶり)が及ぼす影響の定量性が認められなかったことから、本報では以降において主にCase10の結果を中心に考察を進めることとする。

さらに、Case10供試体における試験材齢7日と28日を比べれば、両者の鉄筋ひずみに大きな差異はみられないことが認められる。なお、試験材齢7日以降の全ての付着試験において、鉄筋ひずみ挙動に有意な差異は認められなかったことから、以下では試験材齢1~7日の付着試験の結果を中心にまとめ、必要に応じて試験材齢28日の結果を示すものとする。

両引き試験により得られた鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,b}$  を基に、式(1)(2)を用いて算出される付着応力(τ)および相対すべり(S/D)の関係について、CASE10における材齢変化(試験材齢1~7日)を図-8に示す。図-8より、いずれの鉄筋径においても試験材齢が進行するにつれ、相対すべり量(S/D)が小さくなるとともに、付着応力が大きくなっていることがわかる。

また、既往の研究<sup>13),15)</sup>に基づいてコンクリートの圧縮強度の2/3乗で正規化した付着応力( $\tau/f_c^{2/3}$ )と相対すべり(S/D)関係の材齢変化を図-9に示す。この付着応力の正規化には、コンクリートの圧縮強度、あるいはその2/3乗および1/2乗する方法など、各種の方策がとられている。これらは、鉄筋の付着強度が、コンクリートの圧縮強度あるいは引張・せん断強度に支配されるとの考えに基づくものと推察される。本研究においては、後述するように付着抵抗機構に、コンクリートの圧縮強度より、むしろ引張やせん断

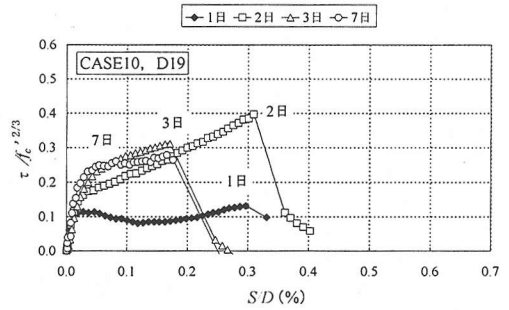
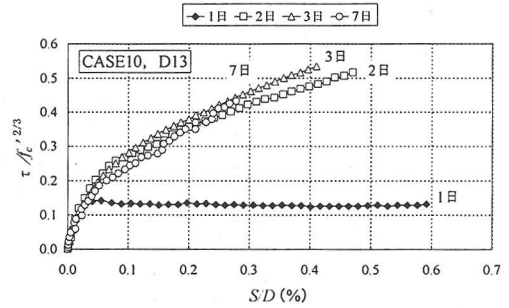


図-9 圧縮強度で正規化した付着応力とすべり関係 ( $\tau/f_c^{2/3}$ -S/D 関係)

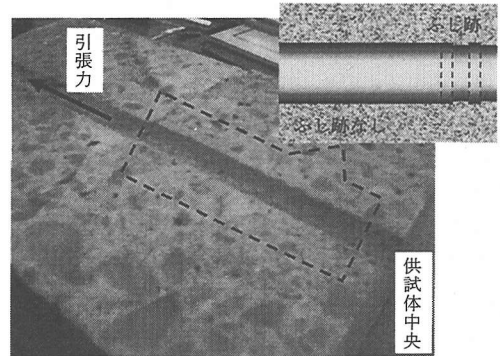


写真-1 両引き試験後のコンクリート内部の損傷状況 (試験材齢1日, 実験供試体: Case10, D13)

強度の影響が著しい傾向にあることが伺えたため、付着応力の正規化に際し、コンクリートの圧縮強度をそのまま用いるのではなく、同強度の2/3乗で整理することとした。

図-9において、 $\tau/f_c^{2/3}$ -S/D関係が急変しているCase10, 鉄筋径D19の実験では、載荷過程において供試体中心部に貫通ひび割れが生じたことによるものである。ここで試験材齢2~7日の結果に着目すると、いずれの鉄筋径においても、概ね同様の曲線にあることがわかる。一方、試験材齢1日におけるコンクリート中の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,b}$  結果では、いずれの部位においても鉄筋単体に類似したひずみ挙動を示したことから、付着応力τが極めて小さい傾向にあるとともに、 $\tau/f_c^{2/3} = 0.1$ 程度以降で $\tau/f_c^{2/3}$ の増加が収束し、

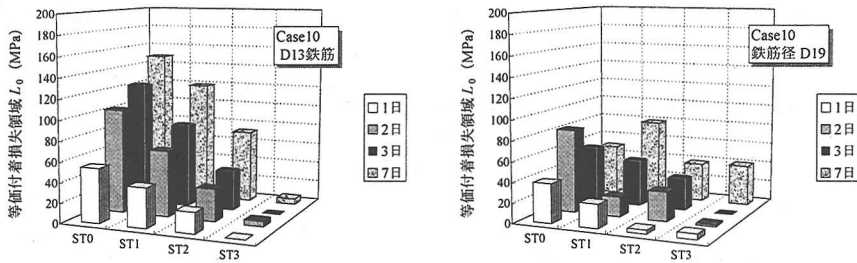


図-10 等価付着損失領域  $L_0$  の材齢変化

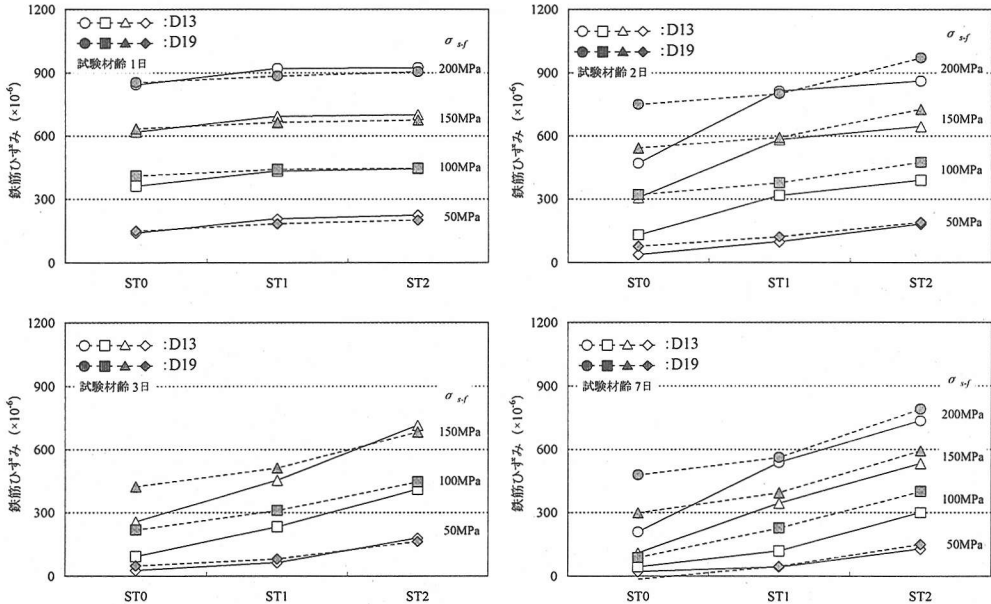


図-11 鉄筋径の違いが荷重過程の鉄筋ひずみに及ぼす影響

$S/D$ のみが増進していることがわかる。両引き試験後における鉄筋周辺のコンクリートの損傷状況によると、鉄筋ふしを頂点とする斜めひび割れの発生が認められず、局部的に鉄筋ふしの跡がなく平滑となっていた(写真-1参照)。これは、鉄筋ふし前面のコンクリートが鉄筋の引き抜き時にせん断による損傷を受けるためと考えられ、この損傷の影響により、 $S/D$ の増進に依らず、付着応力  $\tau_{ef}$ <sup>2/3</sup> が頭打ち状態になったものと推察される。また、試験材齢2日以降においては、試験材齢1日のように目視可能となるほどの顕著なコンクリートのせん断損傷は認められなかった。同時にアセトン塗布により後藤・大塚ら<sup>5)</sup>の提唱する斜めひび割れの検出を試みたが、斜めひび割れの発生は確認されなかった。これは、本研究に用いた供試体寸法が比較的小型であったことから、コンクリート～鉄筋間の相対すべりが小さく、コンクリートの伸び能力を超える鉄筋ひずみを鉄筋ふし前面

におけるコンクリートの微小なせん断損傷により吸収されたためと考えられる。

しかしながら、鉄筋径D19の供試体(Case10)については、いずれの試験材齢においても供試体中央部に貫通ひび割れが生じている(D19, Case15の供試体ではいずれの供試体においても貫通ひび割れは生じていない)。これは、Case10の供試体におけるコンクリートのかぶりはいずれの供試体もほぼ同程度(D13:44mm, D19:40mm)であるが、鉄筋ふしの高さがD13では1.0mm, D19では1.5mmと異なることから、鉄筋径D13の供試体に比べ鉄筋ふしからコンクリートへ作用する応力が増すことで、コンクリートにひび割れが生じたものと考えられる。また、D19の供試体におけるコンクリートのかぶりはCase10の40mmに対し、Case15は65mmと約1.5倍のかぶりを有している。したがって、鉄筋より伝達される荷重を負担するコンクリートの断面積がCase10に比べCase15が2



表-5 ひび割れ発生時の自由部鉄筋応力 ( $\sigma_{sf}$ ), コンクリートひずみ ( $\epsilon_{cmax}$ ) およびコンクリート強度

材齢 (day)	ひび割れ発生時		コンクリート強度 (MPa)	
	$\sigma_{sf}$ (MPa)	$\epsilon_{cmax}$ ( $\times 10^{-6}$ )	圧縮	引張
1	244.7	39	8.23	0.89
2	279.3	59	15.82	1.33
3	188.3	86	22.21	2.17
7	229.3	95	33.03	2.65
28	163.6	88	36.59	3.71

倍強となり負担応力が小さくなることから、コンクリートがひび割れ発生まで至らなかったものと考えられる。これらの現象を鑑みると、若材齢期の付着破壊機構は、コンクリートのかぶりおよび鉄筋径(ふしの高さ)の程度に応じて、ひび割れ発生の有無、および斜めひび割れ型およびせん断破壊型のいずれかが卓越するものと考えられる。さらに、その破壊機構の解明には、本研究で示した実験よりすべり量の大きくなるような手法、さらに多くの鉄筋径(ふしの高さ)およびコンクリートかぶりの供試体を用いた実験が要されるものと考えられる。

図-10に試験材齢の進行に伴う等価付着損失領域  $L_0$  の変化を示す。なお、鉄筋径D19の実験では、貫通ひび割れが生じたため、鉄筋径D13の結果と大きく異なっている。図-10よりいずれの試験材齢においても供試体中心部ほど(すなわちST3→ST0)、等価付着損失領域  $L_0$  が大きくなっていることがわかる。特にST3では、鉄筋ひずみ単体とほぼ同様のひずみ挙動となったことから、ST0～ST2に比べ著しく小さな値となり、逆に鉄筋径D13、試験材齢7日におけるST0の等価付着損失領域  $L_0$  は150MPa程度と大きな値となっていることが分かる。このような現象は、コンクリート部が負担する応力が増加し、逆に鉄筋負担応力が小さくなっていることを示すものと考えられる。また、試験材齢の進行に伴い、コンクリート強度は増加することから、付着拘束の影響は増大し、等価付着損失領域  $L_0$  は大きくなっているものと思われる。

### (3) 鉄筋径の違いが付着特性に及ぼす影響

本研究の主たる目的は、若材齢期におけるコンクリート～鉄筋間の付着特性の明確化にある。しかしながら、実験条件の違いによって鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  の発生状況は影響を受けるため、実験条件が付着特性に及ぼす影響の傾向を把握する必要があると思われる。そこで、本研究では、鉄筋径の違いが付着特性に及ぼす影響に着目し検討を試みた。

供試体内において付着拘束の影響を受ける鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s-b}$  の分布状況(ST0～ST2)の、鉄筋径の相違による違いを図-11に示す。同図は、供試体内の鉄筋ひ

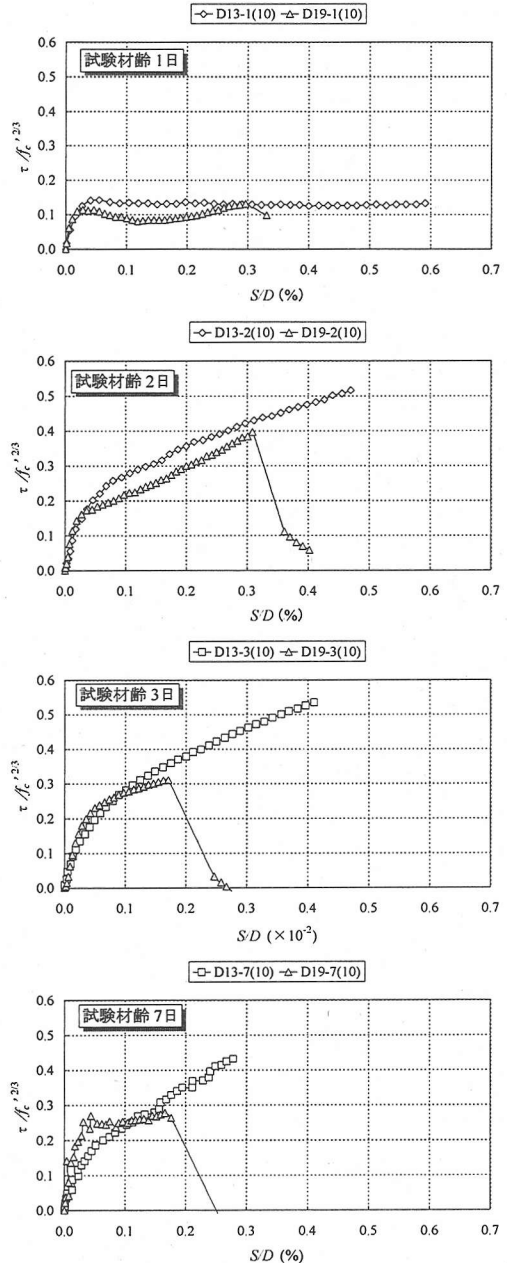


図-12 鉄筋径の違いによる  $\tau/f_c^{2/3}$ -SD 関係

ずみ分布を自由部鉄筋応力 ( $\sigma_{sf}$ ) 50MPaごとに示しており、D19鉄筋供試体の貫通ひび割れ発生以降については、比較の対象から外れるため、同図より除外している。ここで、貫通ひび割れ発生時のコンクリート供試体の表面ひずみは、いずれの試験材齢においても約100  $\mu$  程度(データロガーによる目視観察)であった。ひび割れ発生時における載荷応力(自由部鉄筋応力)ならびに各試験時におけるコンクリート強度の詳細を表-5に示す。なお、本研究では、荷重

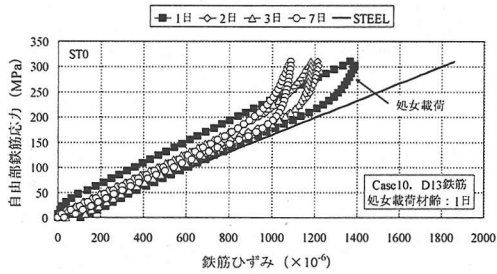


図-13 再載荷に伴う各試験材齢の鉄筋ひずみ (処女載荷：材齢1日)

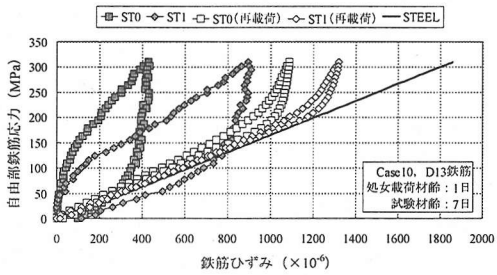


図-14 再載荷に伴う鉄筋ひずみ(処女載荷：材齢1日)

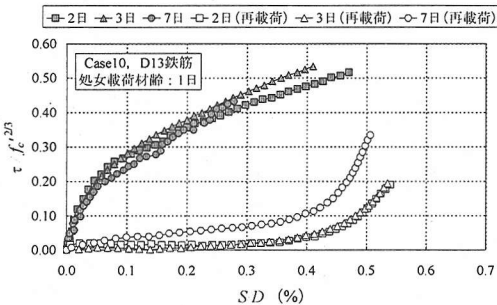


図-15 再載荷に伴う  $\tau/f_c^{2/3}$ - $S/D$  関係 (処女載荷：材齢1日)

制御による各種ひずみの計測としたことから、同表におけるコンクリートの最大ひずみ  $\epsilon_{max}$  は、破断直前に計測されたひずみである。ここで、直接引張力を受けるコンクリートにおいても、局所的な2次曲げの発生により、強度のばらつきは大きい傾向にある<sup>22)</sup>。本研究のような鉄筋との付着を介した引張応力下では、特にその傾向は著しいものと考えられる。

図-11に示す付着拘束を受ける鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,b}$  の分布状況に着目すると、前述したように試験材齢1日での付着応力が極めて小さいため、鉄筋径の違いによる差異がほとんど認められない。また、試験材齢2日以降では、同一の自由部鉄筋応力  $\sigma_{sf}$  において、付着応力  $\tau$  を算出するST1の位置での鉄筋ひずみ分布の勾配 ( $d\epsilon_{s,b}/dx$ ) が鉄筋径D19に比べ鉄筋径D13が大きくなっていることがわかる。

図-12に試験材齢1~7日における鉄筋径の違いに

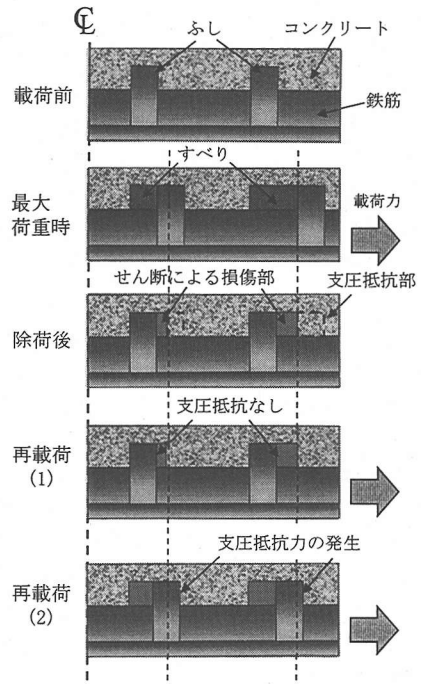


図-16 再載荷におけるコンクリートの付着抵抗機構

よる  $\tau/f_c^{2/3}$ - $S/D$  関係を示す。図-12において、同一付着応力 ( $\tau/f_c^{2/3}$ ) 時の相対すべり量 ( $S/D$ ) の差に着目すると、試験材齢2日において最大で0.1%程度となっているが、他の試験材齢においては大きな差異は認められないことがわかる。また、試験材齢2日におけるすべり量 ( $S/D$ ) の差 (0.1%程度) は、比較的マシブで、かつ長い定着長を有する場合の  $\tau/f_c$ - $S/D$  関係 (例えば文献15の両引き試験では、中心から15Dの位置の  $S/D_{max} = 3.8\%$ ) と比べると極めて小さな差異であるものと思われる。このことより、本研究の行った実験の範囲内では若材齢コンクリートにおいても鉄筋すべり量 ( $S$ ) を相対すべり ( $S/D$ ) で評価することで、付着すべり特性に及ぼす鉄筋径の影響を低減できるものと考えられる。なお、本研究は付着特性の材齢変化を捉えるべく、比較的小型の供試体を用いた両引き試験であることから、生じるすべり量は相対的に小さく、すべり量が比較的大きい場合の付着特性の解明には自ずと限界があることに留意することが望ましい。

#### (4) 再載荷の影響

本研究では、若材齢期に引張応力を受けた異形鉄筋の付着特性を調べるため、両引き試験を行った数種類の実験供試体に対し、後日、再度同様の両引き試験 (以下、再載荷と略す) を試みた。

図-13に材齢1日において両引き試験を行った実験

供試体 (Case10, 鉄筋径D13) に対し, 材齢2, 3, 7日において再載荷を行った際の供試体中央部 (記号: ST0) の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,b}$  を示す. 同図より, 試験材齢1日にて引張力を受けた鉄筋のひずみは, 再載荷過程において試験材齢1日の場合や鉄筋単体のひずみ (記号: STEEL) と同様, ほぼ直線的なひずみ挙動を示していることがわかる.

また, 図-13に示される再載荷を行った試験結果に対し, 材齢7日目に処女載荷を行った実験の鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,b}$  を図-14に示す. 同図では, 再載荷を行った実験における自由部鉄筋応力が約150MPa程度までは, 鉄筋単体 (記号: STEEL) とほぼ同様のひずみ挙動を示し, 鉄筋周辺部コンクリートの付着拘束の効果はほとんど認められないことが分かる. しかしながら, 自由部鉄筋応力が150MPa以降の応力域においては, 徐々にコンクリートの付着拘束効果が現れ, 結果的にST0およびST1の最大鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,max}$  は, それぞれ約  $1100 \times 10^{-6}$ ,  $1300 \times 10^{-6}$  程度となった. これは, 材齢7日目に処女載荷を行った際の最大鉄筋ひずみ  $\epsilon_{s,max}$  の約1.6~2.8倍に相当する鉄筋ひずみである.

ここで, 試験材齢2~7日において処女載荷した場合, および再載荷を行った場合の  $\tau/f_c^{2/3}$ - $S/D$  関係を図-15に示す. 図-15より, 再載荷を行ったものは載荷初期においてほとんど付着応力が生じていないことが分かる. これは, 若材齢期にはコンクリートの強度が十分に発現しておらず, 鉄筋周辺部のコンクリートの損傷が顕著であり, 再載荷時においてふし前面の支圧抵抗力の損失が大きいとと考えられる. また,  $S/D=0.4$ 程度以降において急変的に付着応力が発生しているが, 最大荷重時における付着応力は処女載荷のものに比べ低下する傾向にあった.

再載荷を行った供試体において, ある応力域以降から, 急変的にコンクリートの付着拘束効果が生じる現象の要因に, 次のような機構が考えられる. 異形鉄筋の付着機構には, 鉄筋ふしの機械的作用が支配的と考えられることから<sup>23)</sup>, 処女載荷時において鉄筋ふしからの支圧力により, コンクリート部が損傷を受ける部分と支圧力に応じて弾性的に変形する部分 (すなわち支圧抵抗部) が生じる. 前述したように, 試験材齢1日における鉄筋周辺の付着破壊は鉄筋ふし前面のコンクリートのせん断による損傷が著しいため, 再載荷時には鉄筋ふしによってせん断による損傷を受けたコンクリート部は, 鉄筋ふしとの支圧抵抗力が生じるまで鉄筋の変形に対し, ほとんど寄与しないことが予想される. Lundgren・Gylltoft<sup>24)</sup> は, このような再載荷時における付着効果の減退を付着モデルとして構築する際, 鉄筋ふしのすべりによる鉄筋ふし前面のコンクリート損傷部に対して,

コンクリート~鉄筋間の摩擦係数を減じる手法で対処を行っている. このような損傷部を再載荷時における鉄筋ふしが通過するとコンクリート部の支圧抵抗力が再度発生し, コンクリートは鉄筋の変形に対し付着拘束効果を発揮するものと推察される. 以上を図で表すと, 図-16に示すものとなる. このように, 若材齢期において, 大きな引張力を負担した場合, 材齢が進行しても, ある応力域までほとんど付着力の効果は期待できないものと思われる.

## 5. まとめ

本研究は, マスコンクリートの温度応力・ひび割れ (幅) 予測の精度向上を目的に, 若材齢コンクリートと異形鉄筋の付着特性について実験的な検討を試みたものである. 特に, 温度ひび割れ発生時の応力場を模擬すべく, 本研究では両引き試験を採用し, その際における局所付着応力とすべりの相関性, あるいは新たな付着特性の評価指標を用いて, 若材齢期における異形鉄筋の付着特性を調べた. さらに, 再載荷試験による鉄筋の挙動, および試験後の供試体内部の損傷状況観察を踏まえて, 若材齢期における異形鉄筋の付着機構の一例を示した. 本研究の範囲内において得られた結論を以下に要約する.

- ① 試験材齢1日では, コンクリートによる付着効果はほとんど生じず, 鉄筋単体とほぼ同様のひずみ挙動となる. また, 試験材齢2~7日にかけて付着効果が大きく現れるとともに, 試験材齢7日以降では, コンクリート中の鉄筋ひずみは試験材齢7日とほぼ同程度のものとなる.
- ② 試験材齢1日の  $\tau/f_c^{2/3}$ - $S/D$  関係では, 試験材齢2日以降に比べ付着応力は著しく小さい傾向にある. また, 試験材齢2~7日における鉄筋径が付着すべり挙動に及ぼす影響は, 相対すべり ( $S/D$ ) を用いることで低減できる.
- ③ 本研究で示した付着度の簡易指標である等価付着損失領域は, 供試体中央側ほど, および試験材齢が長期のものほど大きくなる傾向にある.
- ④ 若材齢期に大きな引張力を受けたコンクリートが再載荷を受ける場合, 鉄筋近傍のコンクリートの損傷が著しく, ある応力域までほとんど鉄筋の付着効果は発揮されない.

なお, 本研究では比較的小型の試験供試体を用いたことから供試体内に生じるすべり ( $S$ ) は, 既往の研究等における比較的マッシブな供試体による試験と比して小さいものとなった. したがって, すべり量が比較的大きい場合の付着特性の解明には自ずと限

界があることから、今後、すべりが増大(定着が長い)した場合における試験を行う必要があると考えられる。さらに、本研究では鉄筋かぶりが付着特性に及ぼす影響を把握するため、2種類の供試体寸法による試験を実施したが、両者の付着特性は傾向を同じくするものの、鉄筋かぶりの及ぼす影響について定量的な評価にまで至らなかった。これについては、コンクリートの若材齢期を中心とした鉄筋周辺の応力伝達状況を定量的に評価できる実験を試みる必要があると考える。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、山口大学工学部中村秀明助教授、高海克彦助教授および松尾栄治助手より、適切な御意見を頂きました。実験に際しては、仁尾彰一郎氏(現 株式会社エイトコンサルタント)、山口佳起氏(現 株式会社銭高組)に多大な協力を受けました。ここに記して深甚の謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書(施工編)：土木学会，pp.41～54，2002.
- 2) 入矢桂史郎：若材齢コンクリートのクリープに関する研究，名古屋工業大学博士論文，1999.3.
- 3) 吉武 勇：マスコンクリートに適用する若材齢コンクリートのクリープに関する研究，山口大学博士論文，2000.3.
- 4) 山崎敏敏：壁状マスコンクリートのひび割れ幅算定方法，コンクリート工学論文集，Vol.10，No.1，pp.1～11，1999.1.
- 5) 後藤幸正，大塚浩司：引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究，土木学会論文集，No.294，pp.85～100，1980.2.
- 6) 関 博，赤塚雄三：コンクリート柱に水平に埋込んだ異形鉄筋の付着強度，土木学会論文集，No.164，pp.45～51，1969.5.
- 7) 村田二郎，河合糺茲：引抜き試験による異形鉄筋の付着強度に関する研究，土木学会論文集，No.348/V-1，pp.113～122，1984.8.
- 8) 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，No.93，pp.23～30，1963.5.
- 9) 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，No.217，pp.87～98，1973.9.
- 10) 中島 亨，山本康弘：鉄筋コンクリートの付着応力度の履歴とひびわれの復元性に関する研究，土木学会論文集，No.219，pp.95～105，1973.11.
- 11) 池田尚治：鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリートの応力伝達に関する研究，土木学会論文集，No.307，pp.85～97，1981.3.
- 12) 森田司郎：鉄筋コンクリートにおける付着とひび割れ，コンクリートジャーナル，Vol.7，No.4，pp.1～9，1969.4.
- 13) 山尾芳秀，周 礼良，二羽淳一郎：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文集，No.343，pp.219～228，1984.3.
- 14) 長友克寛，角 徹三：横ふし1個のみをもつ異形鉄筋の付着特性に関する研究，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.177～186，1986.8.
- 15) 島 弘，周 礼良，岡村 甫：マッシュ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-ひびき関係，土木学会論文集，No.378/V-6，pp.165～174，1987.2.
- 16) 笠岐直之，清宮 理，山田昌朗：付着応力-すべり関係に影響を及ぼす要因の実験的研究，土木学会論文集，No.550/V-33，pp.73～83，1996.11.
- 17) 笠岐直之，清宮 理：コンクリートの軸方向応力を考慮した異形鉄筋の局所付着特性，土木学会論文集，No.676/V-51，pp.65～76，2001.5.
- 18) 米山紘一，米倉亜州夫，宮次伸吾，井上 毅：若材令コンクリートにおける鉄筋付着の時間依存性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.8，pp.341～344，1986.
- 19) 佐藤良一，氏家 勲，秋田克彦，笠井識敬：早期に受ける持続荷重下の付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.359～364，1987.
- 20) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書～温度応力ひび割れ幅算定方法についての提案～，1992.9.
- 21) 三村陽一，吉武 勇，浜田純夫，永井泉治：若材齢コンクリートの付着特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1213～1218，2000.6.
- 22) 秋田 宏，小出英夫，外門正直：コンクリートの直接引張試験法に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.52，pp.604～609，1998.
- 23) 大塚浩司，庄谷征美，外門正直，原 忠勝：鉄筋コンクリート工学，技報堂出版，1989.4.
- 24) Lundgren, K. and Gylltoft, K. : A model for the bond between concrete and reinforcement, *Magazine of Concrete Research*, No.1, pp.53～63, 2000.

(2002.8.9 受付)

# EVALUATION OF THE BOND CHARACTERISTICS OF DEFORMED BARS WITH YOUNG-AGED CONCRETE BY THE AXIALLY LOADED TENSION TEST

Yoichi MIMURA, Isamu YOSHITAKE, Kazuhide TSUJI,  
Hiroshi TANAKA and Sumio HAMADA

Mechanical properties of young-aged concrete influence the prediction of thermal cracks of mass concrete structures. This paper presents an experimental study on the bond characteristics between the young-aged concrete and deformed bars by the axially loaded tension test in order to reproduce the tensile stress field. The experimental factors of the present study are mainly bar diameter and cover thickness, these tests were carried out through various concrete ages. As the test results, the tendency that bond characteristics change along with concrete age was confirmed, and its bond mechanism was influenced by shear failure due to reinforcement.