

# 論文 異形鉄筋の付着応力とすべり関係に及ぼす載荷速度の影響

近藤 吾郎\*1

**要旨:** 鉄筋コンクリート部材の挙動に及ぼす載荷速度の影響については、鋼材やコンクリートなどの材料レベルのひずみ速度の影響の調査例が多く報告されている。本研究で扱う異形鉄筋の付着特性については、載荷速度の増加に伴う耐力上昇や剛性増大効果が動的載荷部材実験から指摘されているものの実験自体が困難なこともあり、付着特性に及ぼす載荷速度の影響については十分解明されているとはいえない。本研究では、付着長さの短い引き抜き試験を行い、局所の付着応力とすべり関係に及ぼす載荷速度の影響を調査し、さらに、圧縮強度の速度依存と比較検討するものである。

**キーワード:** 付着強度, 引抜き試験, 載荷速度, 付着割裂破壊

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造の地震時の挙動を把握することは耐震安全性を確保するために欠かせない。その目的のために、鋼材やコンクリートなどの材料レベルのひずみ速度の影響については、多くの資料が蓄積されつつある<sup>1)2)</sup>。また、鉄筋コンクリート部材の動的実験結果からは、異形鉄筋の付着特性について載荷速度の増加に伴う耐力上昇や剛性増大効果があり、部材の耐力や変形挙動の動的効果に影響することが指摘されている<sup>3)</sup>。しかし、動的部材実験自体が困難なこともあり、その付着特性の載荷速度の効果については十分解明されているとはいえない。

付着特性の動的効果に着目した実験としては、Reinhardtら<sup>4)</sup>や島ら<sup>5)</sup>、野口ら<sup>6)</sup>、藤井ら<sup>7)</sup>により報告されているが、付着特性は実験条件など種々の要因により変化するため、定量的な評価は相違している。

そこで本研究では、付着長さの短い引抜き試験を行い、最も基本的で影響要因の少ないと考えられる付着特性に及ぼす載荷速度の影響を調査するものである。また、コンクリートの引張強度と関係が深い割裂モードについても調査を加えた。その結果をコンクリートの圧縮強度のひずみ速度効果と比較し、付着特性に関するコンクリートの特性を検討した。

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

本実験に使用したコンクリートの調合を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、粗骨材には最大寸法 20mm の砕石を使用した。調合強度は 27N/mm<sup>2</sup> とし水セメント比 65% である。特に過度なブリージングを避けるためにスランプは 8cm を目標とした。

試験鉄筋は、公称径 22mm の異形鉄筋(SD345)である。

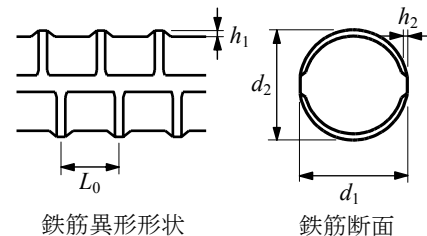
鉄筋の表面異形形状は、ふしが鉄筋軸と直交するいわゆる竹ふし鉄筋である。鉄筋の異形形状を図-1に示す。鉄筋の降伏点は 411 N/mm<sup>2</sup>、ヤング係数は 1.88 × 10<sup>5</sup> N/mm<sup>2</sup> である。

### 2.2 試験体の詳細

試験体は、詳細を図-2に示すように、断面 200mm × 200mm の断面で、断面の中心に試験鉄筋を配したものである。試験体の長さは 250mm で、中央に付着区間を設けた。試験体は付着区間長さと試験体側面のスリットの有無が異なる 3 種類とした。付着区間は、A 試験体および B 試験体ではふし間隔の 3 倍(39mm)、C 試験体ではふし間隔の 5 倍(65mm)とした。また、B 試験体および C 試験体は、割裂モードでの破壊を誘発するため、試験体の両側面に深さ 59mm のスリットを設けた。スリットは、コンクリートカッター (刃厚 2.0mm) を用いて、コンクリート硬化後付着区間のコンクリートに損傷を与えないように注意して切れ込みを入れた。

表-1 コンクリートの調合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
65	175	270	783	975



公称径: 22mm  
 実測径:  $d_1$ (リブ間)=23.3mm,  $d_2$ (ふし頂部間)=23.7mm  
 $L_0$ (ふし間隔)=13mm,  $h_1$ (ふし高さ)=1.4mm  
 $h_2$ (リブ高さ)=1.0mm

図-1 試験鉄筋の詳細

\*1 千葉大学 工学部都市環境システム学科准教授 工博 (正会員)

付着区間外は、塩ビパイプ（内径 25mm，外径 31mm）を用いて鉄筋とコンクリートを絶縁した。付着区間との境界部は不乾性パテを用いて整形し，所定のふし数での付着を確保した。なお，塩ビパイプとパテはポリ塩化ビニリデンフィルムでラップし，コンクリート硬化後抜き取り，載荷時に付着区間外での摩擦を除いた。

コンクリートの打設は，試験鉄筋が水平の状態で行い，鉄筋下面のブリージングの影響を避けるため入念に閉め固めを行った。脱型は材齢 3 日で行い，材齢 7 日まで湿布養生としたあと気中放置した。

A，B，C 試験体は，4 体を 1 組として同一バッチのコンクリートから作製し，それぞれ 2 組 8 体全 24 体を実験に供した。

### 2.3 載荷方法と計測方法

載荷方法は図-3 に示すように，コンクリートからおよそ 200mm 突出した鉄筋位置をインストロン型試験機（載荷容量：250kN，最大ストローク速度：500mm/min）に固定し，所定の速度で引き抜いた。表-2 に設定した試験機のストローク速度を示す。引き抜き反力は引抜き前面コンクリートに反力板を介して与えた。反力板は 4 本の M20 ボルトで試験機の反力台に固定されている。スリットを挟んで設けた加圧板はコンクリート面との間にテフロンシートとシリコンオイルで摩擦を低減するとともに，スリットによる割裂方向にローラーを用いて拘束を除去した。

試験鉄筋にはひずみゲージを添付し，計測ひずみから引抜き荷重を求めた。鉄筋の抜け出し量は引抜き背面コンクリートに対する鉄筋自由端の相対変位量として変位計（容量 25mm，分解能 1/500mm）を用い計測し，これをすべり量とした。

計測は，鉄筋ひずみ，変位計に加え試験機ストローク量を，載荷速度に応じて 1000Hz～0.017Hz のサンプリング速度で記録した。

なお，載荷試験はバッチ間のコンクリート強度の変動を避けるためコントロールシリンダ強度が 27 N/mm<sup>2</sup> に達したとき行うものとした。

### 3 実験結果の概要

試験結果の一覧を表-3 に示す。なお，載荷試験時の材齢は 26～55 日で，試験時のコンクリート強度は 26.3～28.8 N/mm<sup>2</sup> であった。A 試験体ではすべてふし間コンクリートのせん断破壊モードであり，B 試験体では 1 体を除いて，C 試験体ではすべてスリット間のコンクリートの割裂モードであった。付着応力は，付着面積を公称周長×付着区間長さとし，その平均付着応力とした。また，すべり量は，試験体背面で計測した鉄筋抜け出し量とした。

計測した試験機のストローク量とすべり量とを比較した載荷速度 IV の例を図-4 に示す。ストローク量は試験機反力台に対する試験鉄筋固定部の相対変位量であ

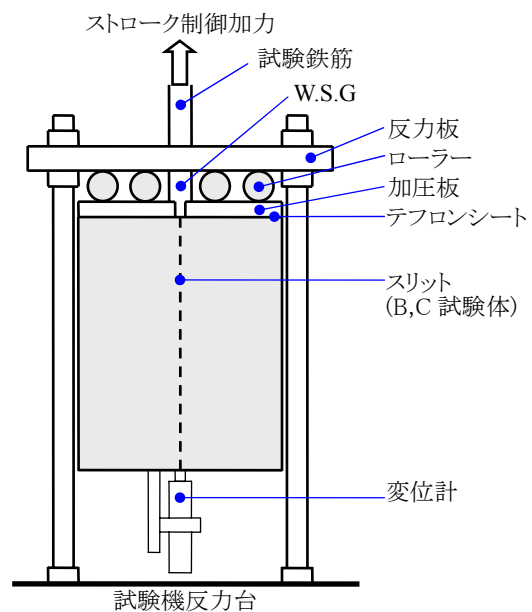


図-3 載荷方法

表-2 載荷速度

記号	ストローク速度 (mm/min)
I	0.004
II	0.2
III	10
IV	500

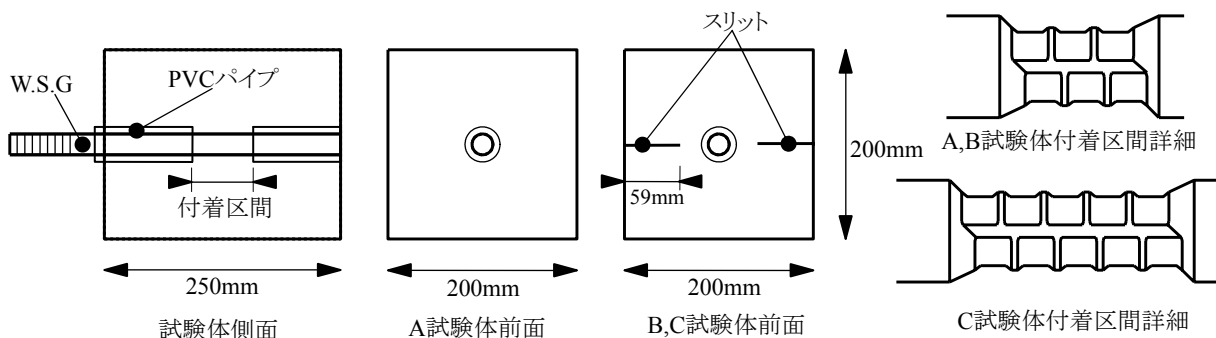


図-2 試験体詳細

るが、変位開始から設定したストローク速度に達するまで0.5秒程度要するため2mm程度の助走距離を設けている。また、治具の遊び等により載荷初期のすべり速度は小さいが、載荷荷重の増加に伴い一定となり、最大荷重以降はストローク制御速度とすべり速度は一致することがわかる。荷重増加域でのすべり速度は試験鉄筋やコンクリートの弾性係数、反力板固定ロッドなどの剛性と付着区間の付着剛性との関係で決まるため、ここでは、A試験体ではすべり量が0.2mmから最大荷重までの平均速度を、B,C試験体では付着応力が2N/mm<sup>2</sup>から最大荷重までの平均速度をすべり速度とした。

表-3より付着区間の長いC試験体のすべり速度がA,B試験体より小さいことがわかる。

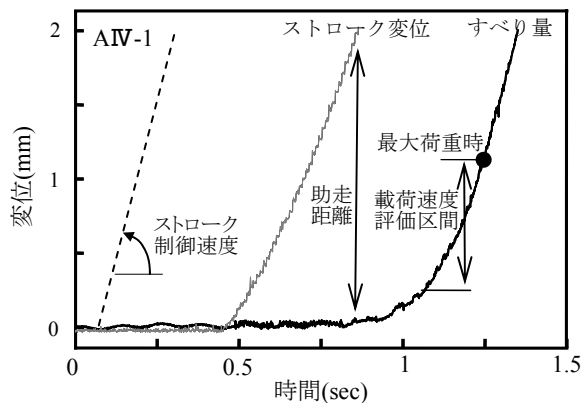


図-4 ストローク速度とすべり速度の比較

### 3.1 付着応力とすべり関係

各試験体の付着応力とすべりの関係を図-5にまとめて示す。付着応力は付着区間における平均値とし、すべりは鉄筋自由端側抜け出し量とした。いずれの試験体においても載荷速度レベルの大きいほど最大応力が大きくなる傾向が認められる。静的載荷ではコンクリート強度が高く付着強度の高いほどこの最大応力時のすべり量は小さくなるとされるが、載荷速度レベルの変化に伴う最大付着応力の増加に関しては変化しないとみなすことができ、島らの実験結果の傾向と符合する。

A試験体では拔出モードで破壊し、最大応力以降すべりがふし間隔の13mmに達するまで緩やかに応力が減少する。割裂モードで破壊した試験体については、B試験体に比べて、付着区間の大きいC試験体ではすべり挙動のばらつきが少なく付着応力とすべり曲線では比較的安定している。B試験体で拔出し破壊したBII-2では、同じ破壊モードとなったA試験体の最大応力やその時のすべり量とも大きく異なっており、鉄筋周辺のコンクリートによる付着域の拘束程度の差が表れている。

付着区間の短いA, B試験体では、C試験体に比べて載荷初期にブリージングや反力板と試験体の接触時のなじみに起因すると考えられるすべりが顕著である。この付加すべりを除くため、A試験体について、最大応力に達するまでの付着応力とすべり曲線の形状を次の曲線で表されるとして、回帰解析を行った。

表-3 実験結果の一覧

試験体	付着区間長さ	スリットの有無(かぶり厚)	ストローク速度(mm/min)	実測すべり速度(mm/sec)	最大荷重(kN)	最大付着応力(N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重時すべり量(mm)	破壊モード		
A I-1	39mm	なし(89mm)	0.004	0.44*10 <sup>-4</sup>	40.74	14.92	0.89	拔出		
A I-2			0.004	0.372*10 <sup>-4</sup>	40.68	14.90	1.42	拔出		
A II-1			0.2	0.00195	53.18	19.48	1.27	拔出		
A II-2			0.2	0.00241	40.97	15.01	1.21	拔出		
A III-1			10	0.0784	58.27	21.35	1.50	拔出		
A III-2			10	※	53.28	19.52	※	拔出		
A IV-1			500	4.36	51.17	18.75	1.13	拔出		
A IV-2			500	4.66	68.61	25.13	1.23	拔出		
B I-1			あり(30mm)		0.004	0.314*10 <sup>-4</sup>	32.41	11.82	1.04	割裂
B I-2					0.004	0.229*10 <sup>-4</sup>	34.18	12.52	0.40	割裂
B II-1					0.2	0.00117	23.38	8.56	0.33	割裂
B II-2					0.2	0.0018	35.35	12.95	2.51	拔出
B III-1	10	0.0896			36.77	13.47	0.82	割裂		
B III-2	10	0.0942			40.83	14.96	0.62	割裂		
B IV-1	500	4.07			45.51	16.67	0.83	割裂		
B IV-2	500	4.02			52.40	19.19	0.73	割裂		
C I-1	65mm				0.004	0.773*10 <sup>-5</sup>	32.87	7.22	0.10	割裂
C I-2					0.004	0.745*10 <sup>-5</sup>	36.33	7.98	0.11	割裂
C II-1					0.2	0.000559	46.75	10.28	0.17	割裂
C II-2					0.2	0.000532	31.43	6.91	0.10	割裂
C III-1			10	0.0167	33.48	7.36	0.05	割裂		
C III-2			10	0.0168	41.85	9.20	0.15	割裂		
C IV-1			500	1.31	52.58	11.56	0.17	割裂		
C IV-2			500	1.53	57.36	12.61	0.24	割裂		

※:変位計取り付け不良による計測不可

$$\tau = \tau_{\max} \left[ \frac{1}{1-\alpha} \left( \frac{s-s_0}{s_{\max}} \right)^\alpha - \frac{\alpha}{1-\alpha} \left( \frac{s-s_0}{s_{\max}} \right) \right] \quad (1)$$

ここで、 $\tau$  : 付着応力、 $s$  : すべり、 $\tau_{\max}$  : 最大付着応力、 $s_{\max}$  : 最大付着応力時のすべり、 $\alpha$  : 曲線形状を決定する係数（大きいほど直線に近くなる）をあらわす。 $s_0$  は荷重初期の付加すべりを考慮して導入した変数である。

回帰解析には計測された最大付着応力を  $\tau_{\max}$  として与え、付着応力が  $2\text{N/mm}^2$  から  $0.95\tau_{\max}$  の範囲の計測データについて最小二乗近似を行い、 $\alpha$ 、 $s_0$ 、 $s_{\max}$  を求めたものである。その結果を図-6に示す。ここで  $\alpha$  は、荷重速度 II、III、IV では  $0.7\sim 0.9$  であるのに対し荷重速度 I の場合には  $1.2\sim 1.7$  と大きい値となり付着応力

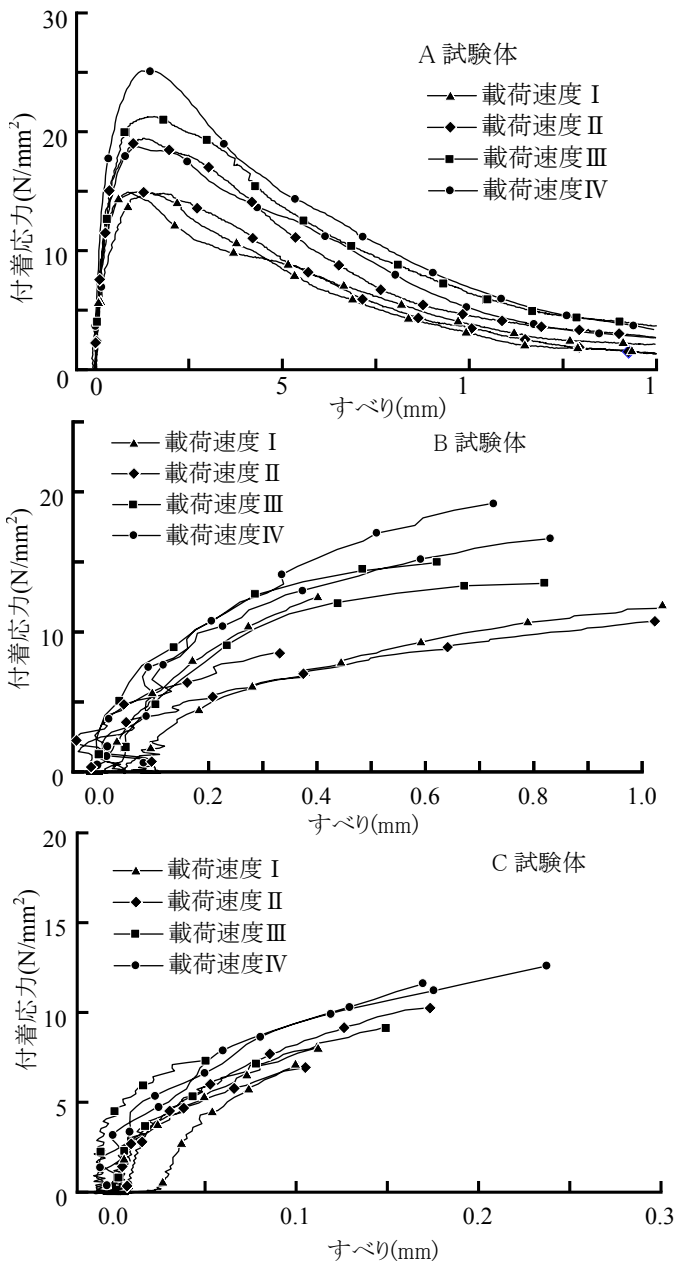


図-5 付着応力とすべりの関係

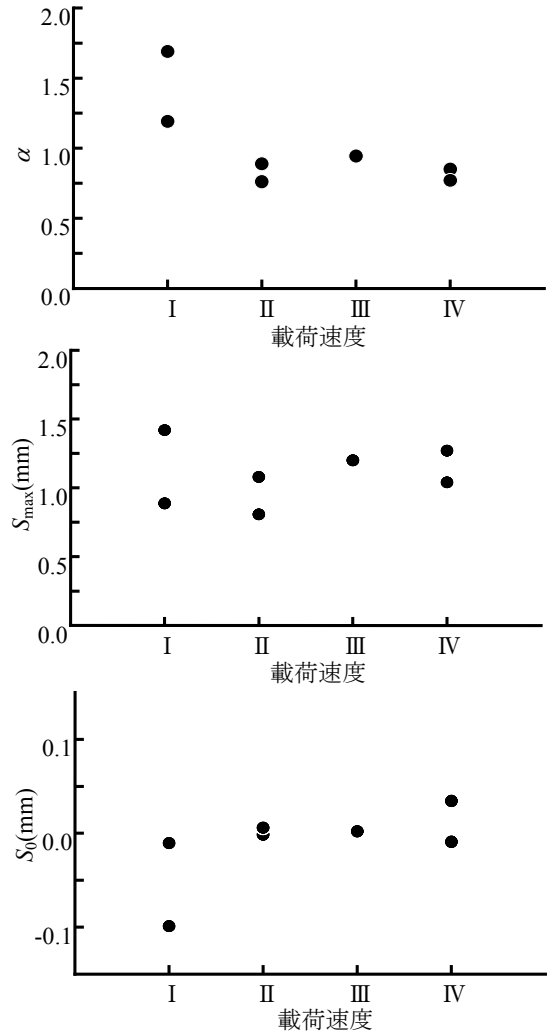


図-6 回帰解析結果

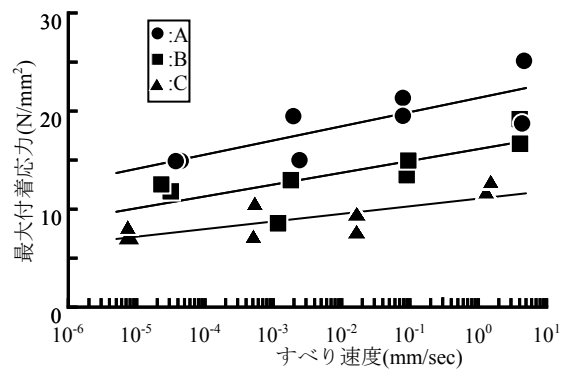


図-7 最大付着応力とすべり速度の関係

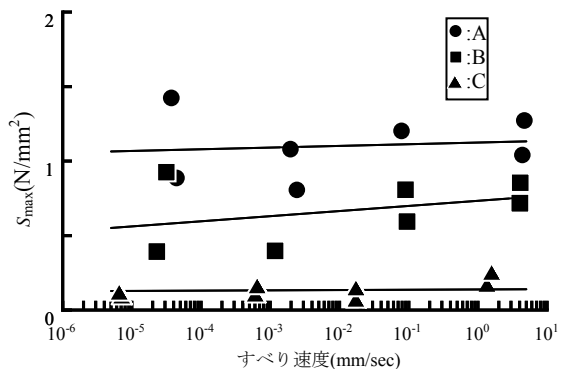


図-8 最大付着応力時すべりとすべり速度の関係

すべり曲線の形状が直線的になる。一方、静的載荷より高い速度では曲線形状に明確な傾向は見られず、付着応力-すべり曲線の形状は最大付着応力時の応力とすべりで正規化して表現できると思われる。最大応力時のすべり量  $s_{max}$  には載荷速度レベルの影響は見られない。これより、静的載荷より高い速度では、付着応力とすべりの関係は見かけの強度の増大のみを考慮すればよいといえる。

$s_0$  については、試験体ごとの固有のばらつきですべり速度に関係するものではないが、ほかの変数と同様に載荷速度レベルごとに表している。この図では、-0.1mm 程度の結果があるが、+側にのみ現れるブリージングによる付着域の緩みはほとんどないといえる。

### 3.2 付着強度に及ぼす載荷速度の影響

試験体の最大付着応力とすべり速度の関係を図-7に、最大付着応力時のすべり量とすべり速度の関係を図-8にそれぞれ示す。既往の研究では鉄筋のひずみ速度で表現されることが多く、鉄筋コンクリート部材内の強震時の載荷速度と対応が容易であるが、本実験では最大応力付近から軟化域における扱いが困難になること、また局所的な付着域のコンクリートの挙動を扱うことから直接すべり速度を用いて表すものとした。

最大付着応力時のすべり量はA試験体では回帰解析から得られた値とし、B、C試験体では付着応力が  $2\text{N/mm}^2$  の時のすべりからの相対量として与えた。また、B試験体で拔出し破壊となったBII-2試験体はすべり量の比較では除外している。各試験体について、最大付着応力  $\tau_{max}$  ( $\text{N/mm}^2$ ) とその時のすべり量  $s_{max}$  (mm) をすべり速度  $\dot{s}$  (mm/sec) の常用対数に対して直線式で近似した結果は以下ようになる。なお、すべり速度は基準速度  $\dot{s}_s = 0.005$  (mm/sec) で無次元化している。

A 試験体

$$\tau_{max} = 18.0[1 + 0.078 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (2)$$

$$s_{max} = 1.10[1 + 0.010 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (3)$$

B 試験体

$$\tau_{max} = 13.4[1 + 0.90 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (4)$$

$$s_{max} = 0.655[1 + 0.052 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (5)$$

C 試験体

$$\tau_{max} = 9.295[1 + 0.083 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (6)$$

$$s_{max} = 0.134[1 + 0.142 \log(\dot{s} / \dot{s}_s)] \quad (7)$$

いずれの試験体も、すべり速度の増加に伴って  $\tau_{max}$  が増加する載荷速度依存性が認められ、 $\tau_{max}$  の増加率は割裂破壊の場合の方が拔出し破壊より若干大きくなるという結果になった。また、前述のように A 試験体では  $s_{max}$  の載荷速度依存性は明確ではない。

## 4 付着強度と圧縮強度の載荷速度の影響の比較

コンクリートの強度特性に及ぼす載荷速度の影響は一般に応力の種類により、引張強度、曲げ強度、圧縮強度の順に影響が大きいとされ、強度レベルや使用材料によっても影響度が異なるとされる。そこで本実験に用いたコンクリートについて圧縮載荷の場合の載荷速度の影響を調査した。圧縮試験は試験機の載荷容量の関係か

表-4 圧縮試験に用いたコンクリートの調合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
62	175	280	783	968

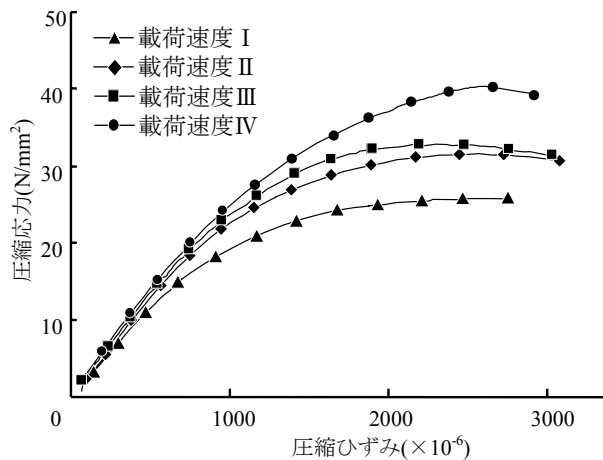


図-9 ひずみ速度の異なる圧縮応力とひずみの関係

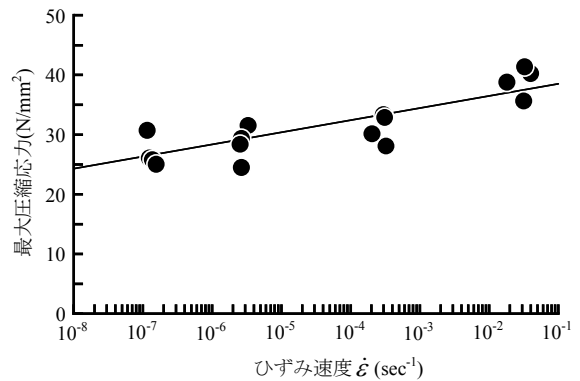


図-10 最大圧縮応力のひずみ速度依存性

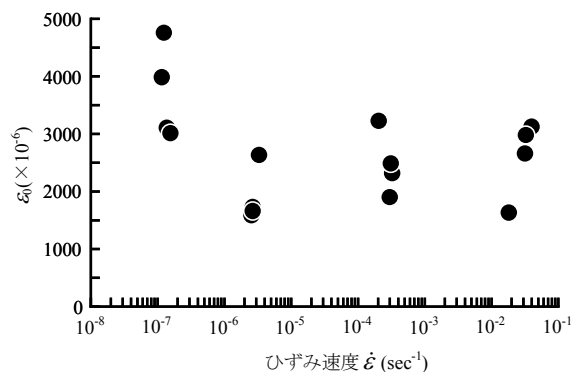


図-11 最大応力時ひずみのひずみ速度依存性

らφ50mm×100mmの円柱試験体とし、コンクリートの調合は、試験体寸法が小さいことから骨材最大寸法を15mmとしたため、付着試験に用いた調合を表-4に示すように若干修正した。

打設翌日に円柱試験体のキャッピングを行い、付着試験体の付着域のコンクリートの養生条件に近い状態とするため、直ちにポリ塩化ビニリデンフィルムでラップして封緘養生とした。圧縮試験までは20℃の恒温水槽内で恒温養生し、圧縮試験材齢は27～31日である。

圧縮試験は、脱型した円柱試験体側面にひずみゲージを添付し、再びラップして乾燥を防いだ状態で行った。

載荷速度は、4レベルとし、載荷速度Ⅰ～Ⅳはそれぞれシリンダーひずみ速度が0.1μ/sec, 10μ/sec, 0.1%/sec, 8%/secに相当する試験機のストローク速度であたえるものとした。ただし、ひずみ速度が0.1μ/secについてはクリープによる変形のため試験時間を要し、試験材齢に影響が予想されるためひずみ速度に対応する0.001N/mm<sup>2</sup>/secの荷重制御とした。試験体数は、各載荷速度レベルについて4本とした。得られた圧縮応力とひずみの曲線の例を図-9に示す。

載荷速度は、実測ひずみから求めたひずみ速度を用いて表した。荷重制御とした載荷速度Ⅰの場合には、接線剛性の低下とともにひずみ速度は増加するため、最大圧縮応力の50%におけるひずみ速度とした。ストローク制御とした場合の平均ひずみ速度はいずれの載荷速度レベルでも設定値の1/4～1/2であった。

最大圧縮応力と最大圧縮応力時のひずみとひずみ速度の関係を図-10と図-11に示す。最大圧縮応力はひずみ速度の増加に伴い増加するのに対して、最大応力時のひずみは、極端に速度の遅い場合にはクリープの影響により大きくなるが、静的載荷の速度を超えると変化はみられない。

最大圧縮応力 $\sigma_{max}$ はひずみ速度の関数として以下のように近似できる。ここで、ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ は、基準速度 $\dot{\epsilon}_s=10 \times 10^{-6}/\text{sec}$ で無次元化している。

$$\sigma_{max} = 30.4 \left[ 1 + 0.067 \log(\dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_s) \right] \quad (8)$$

ここで、最大付着応力と最大圧縮応力のひずみ速度の影響を比較する。A試験体のようにふし間のコンクリートがせん断される破壊モードでは付着強度は圧縮強度とおおよそ比例する関係にある。しかしながら、それぞれ基準速度から速度を10倍とした時の両最大応力の増加率は付着応力で7.8～9.0%、圧縮応力で6.7%で20%ほど付着応力が大きくなっている。割裂モードで破壊する場合にはコンクリートの引張強度に関係付けられる場合が多いが、得られた速度の上昇に伴う両最大応力の上

昇率は、引張強度より曲げ強度の傾向に近く、割裂面では鉄筋からの距離によって引張応力が分布する曲げ試験の危険断面の状況に近い<sup>8)</sup>ことが理由と考えられる。また、静的載荷の10<sup>3</sup>～10<sup>4</sup>倍のオーダーで動的載荷を行った藤井らの実験<sup>7)</sup>では付着割裂モードの最大付着応力の上昇率は25～30%程度になると報告しており、ここで得られた結果と対応している。

このように、最大付着応力に及ぼす載荷速度の効果はその強度を支配する材料特性から決定されるといえる。

## 5 まとめ

(1) 抜出しモードと割裂モードで破壊する場合、最大付着応力は、割裂モードのほうが載荷速度の影響を大きく受け、いずれも圧縮強度に及ぼすひずみ速度の影響より大きい。

(2) 破壊モードが抜出しの場合には最大付着応力時のすべり量は載荷速度の影響を受けない。また、最大付着応力時の付着応力とすべり量で無次元化した付着応力とすべり曲線の形状は、静的載荷以上の速度では変化しない。

## 参考文献

- 1) 小谷俊介:鉄筋コンクリートにおける載荷速度の影響, コンクリート工学, Vol. 21, No. 11, 1983.
- 2) 細矢 博,岡田恒男他:地震時のひずみ速度の影響による鉄筋コンクリート部材の耐力の増大と破壊モードとの関係に関する研究,日本建築学会構造系論文集, 日本建築学会,第 492号,1991.
- 3) 睦好宏史, 町田篤彦:動的荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の力学特性および破壊性情, 第4回コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.4, 1984.
- 4) E. Vos and H. W. Reinhardt : Influence of loading rate on bond behavior of reinforcing steel and prestressing strands, Materials and Structures, Vol.15, No.85, 1982
- 5) 石本陽一, 島弘:鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993
- 6) 野口博, 柏崎隆志:鉄筋とコンクリートの動的付着特性に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp625-626, 2000
- 7) 藤井栄, 森田司郎, 小松勇次郎:異形鉄筋の付着特性に及ぼす載荷速度の影響に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp1859-1860, 昭和1984年
- 8) Tepfers.R.:Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, Magazine of Concrete Research, Vol.31, No.106, 1979