

論文

[2021] 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

石本陽一*1・島 弘*2

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の変形挙動を解析するには、構造物の構成材料であるコンクリートと鉄筋との各構成則に加えて、鉄筋とコンクリートとの付着の構成則が必要である。

一般に、付着構成則は局所付着応力-すべり関係で表され、今までにいくつかの付着構成式が提案されている。しかし、それらのほとんどは静的な単調載荷実験によって求められたものであるので、実際の構造物に作用する、衝撃荷重・地震荷重・静的荷重・持続荷重などの、極めて広範囲な載荷速度をもった全ての荷重に対して適用できるとは限らない。

この問題に関して、睦好らによって、載荷端から5D（D：鉄筋直径）においては、載荷速度が大きいほど付着応力は大きくなることが報告され[1]、遠藤・青柳は、静的解析により動的付着性状を近似的に表現する方法を提案している[2]。しかし、載荷速度を考慮した付着構成則はないのが現状である。

そこで、本研究では、衝撃荷重に相当する載荷速度から極めてゆっくりとした載荷速度までの、数段階の載荷速度で付着試験を行い、付着応力-すべり関係に及ぼす載荷速度の影響を調べた。

2. 実験概要

2.1 実験条件

実験要因は、載荷速度である。表-1に示すように、6体の供試体にそれぞれ異なった載荷速度の荷重を作用させた。ここで、小谷[3]の報告によると、衝撃荷重のひずみ速度は $10^{-2} \sim 10^3/s$ 程度、地震荷重のひずみ速度は $10^{-3} \sim 10^{-1}/s$ 程度になるとのことであるから、供試体番号Iでの載荷速度、 $\dot{\epsilon} = 1.2 \times 10^{-2}/s$ は衝撃荷重に相当し、また、供試体番号IIでの載荷速度、 $\dot{\epsilon} = 4.5 \times 10^{-3}/s$ は地震荷重に相当する。そして、供試体IVは通常の静的試験程度であり、供試体V、VIはそれよりも遅いものである。試験方法は、定着長を自由端すべりが生じないように約24Dとした片引き試験である。

表-1 実験条件

供試体番号	載荷ひずみ速度 (/s)	f'c (MPa)
I	1.2×10^{-2}	26.0
II	4.5×10^{-3}	23.2
III	9.4×10^{-5}	23.5
IV	1.7×10^{-6}	25.0
V	5.5×10^{-7}	26.3
VI	2.1×10^{-9}	30.2

f'c : コンクリート強度

2.2 供試体の性質

(1) 形状・寸法

供試体としては、図-1に示すように、断面300mm×300mm、高さ600mmのコンクリートブロックの中心に鉄筋を鉛直に埋め込んだものである。この断面の寸法は、縦ひびわれが発生せず、反力

*1 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 徳島大学助教授 工学部建設工学科, 工博 (正会員)

によるコンクリートの圧縮応力が小さくかつ均等になるように十分大きくした。また、荷端近傍におけるコンクリートの拘束条件の違いによる影響を無くすために、鉄筋をシースで覆う方法により、長さ約15cm(約7D)の非定着部を設けた。この非定着長は、山尾ら[4]の荷端から5Dまでの領域で様々な影響により付着応力が大幅に低下するという報告から7Dに設定した。鉄筋軸方向のひずみを測定するために、鉄筋の裏表6箇所にひずみゲージを6・6・8・8・9・9フシ間隔で貼り付けた。

(2) 使用した鉄筋

鉄筋は、全ての供試体において、表-2にその性質を示すSD35でD19のねじふし鉄筋を使用した。この鉄筋は、縦リブがないので、ひずみゲージを貼付するためにリブを削る必要がなく、断面欠損による影響は生じない。

(3) コンクリート

コンクリートの配合を表-3に示す。W/C=70%、目標スランプが8cm、圧縮強度が25MPaとなるように配合設計した。コンクリートは、鉄筋軸と同方向になるように鉛直方向に打ち込んだ。各供試体における試験時のコンクリート強度は表-1に示すとおりである。

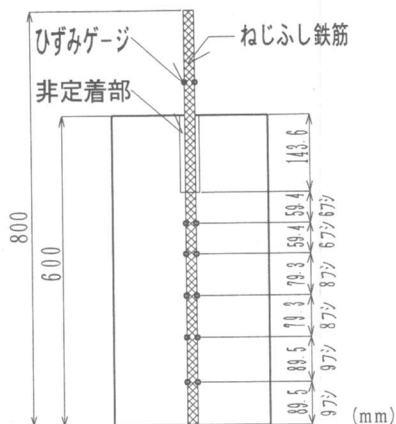


図-1 供試体の概形

表-2 鉄筋の性質

鉄筋の種類	SD35
呼び名	D19
鉄筋直径(mm)	19.5
降伏ひずみ(μ)	2266
降伏強度(MPa)	422
ヤング係数(GPa)	184

表-3 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m^3)						
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			混和剤 高性能減水剤
						5~10 mm	10~20 mm	20~25 mm	
25	70	48	185	264	869	281	562	80	0.5%

2.3 実験方法

実験は、図-2に示すように、供試体をPC鋼棒で、各19.6kNを4点に作用させて反力床に固定して行った。固定の際に供試体に生じる応力は0.4MPa程度であるので、この横方向応力が付着作用に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。水平ジャッキによって、鉄筋軸と同方向に鉄筋の降伏荷重に近い引張力を、応力速度制御で作用させた。本研究では、荷重速度を、鉄

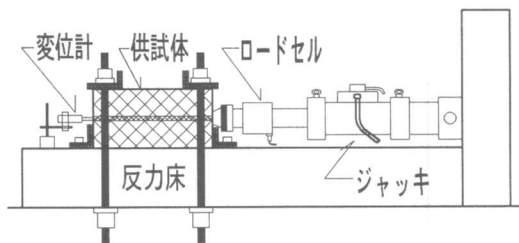


図-2 荷重装置

筋のひずみ履歴曲線の傾きによって求めた「ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ 」で表す。測定項目は、鉄筋のひずみに加えて、荷端における引張荷重、自由端における鉄筋のすべり量である。なお、動的荷重に相当する供試体番号I・IIについては、デジタル型動ひずみ測定器によって計測した。

3. 実験結果と考察

3.1 ひずみ分布

ひずみ分布は、鉄筋に沿った各位置におけるひずみの測定値によって求めることができる。各位置におけるひずみの値は、鉄筋に貼った裏表2枚のゲージの読みの平均値とした。ここで、ひずみゲージの番号を、荷端から自由端方向へゲージNo.1～No.6とした(図-1)。供試体番号I～VIのひずみ分布を各々図-3～図-8に示す。

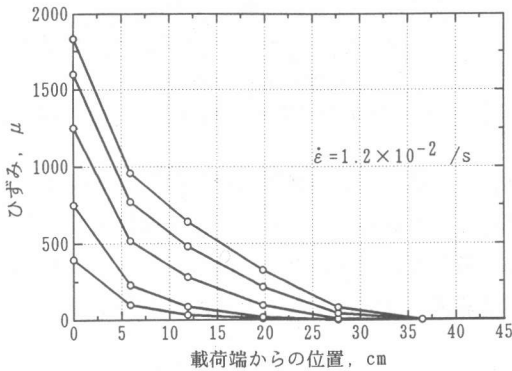


図-3 供試体番号Iのひずみ分布

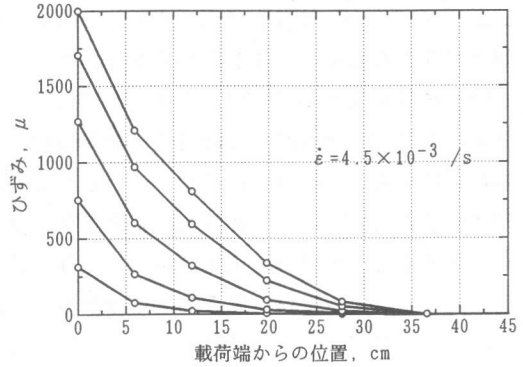


図-4 供試体番号IIのひずみ分布

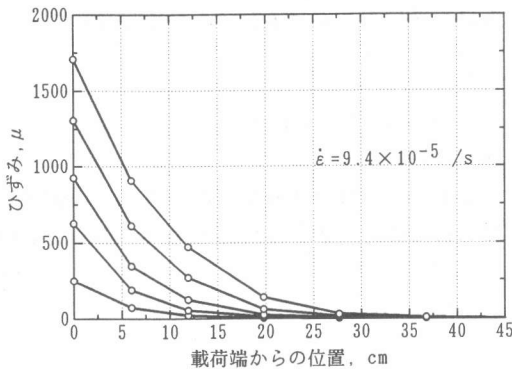


図-5 供試体番号IIIのひずみ分布

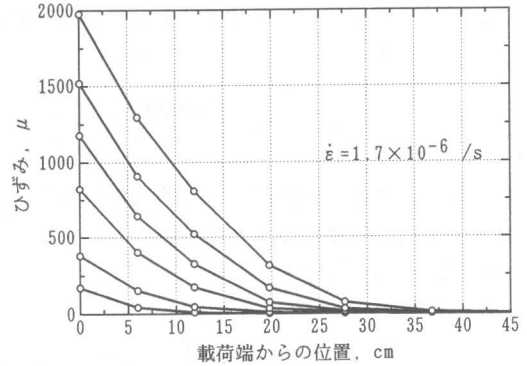


図-6 供試体番号IVのひずみ分布

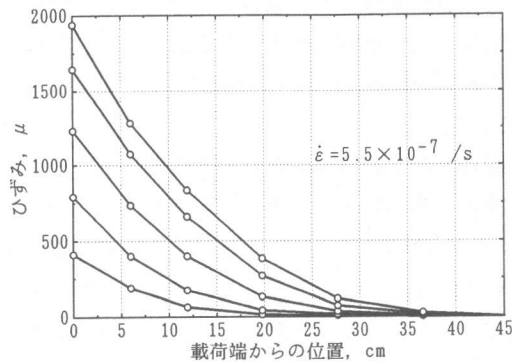


図-7 供試体番号Vのひずみ分布

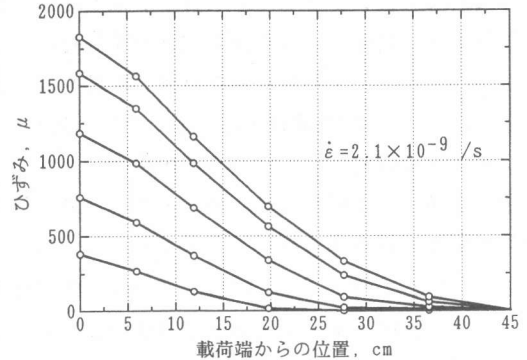


図-8 供試体番号VIのひずみ分布

載荷速度によってひずみ分布が異なることを明らかにするために、載荷端（ゲージNo.1）におけるひずみが同じ値をとるときのひずみ分布を比較する。供試体番号Ⅰ・Ⅴ・Ⅵで、載荷端におけるひずみが 1600μ に達した時のひずみ分布を比較したものを図-9に示す。この図により、載荷速度が大きくなる程、載荷端からゲージNo.2（59.4mm）付近までのひずみ分布曲線の傾きは大きくなっていることが分かる。このことは、載荷速度が小さい程、鉄筋の引張力が供試体内部まで伝達され、その結果、鉄筋のひずみが大きくなるということを示している。これは、コンクリートの弾性係数がひずみ速度により増加すること〔5〕から考えると、載荷速度が小さいとフシ間のコンクリートが局所破壊し、すべりが増大するために付着応力は小さくなり、逆に載荷速度が大きいとフシ間のコンクリートは圧壊しにくく、フシに作用する支圧応力が増大し、付着応力は大きくなると考えられる。

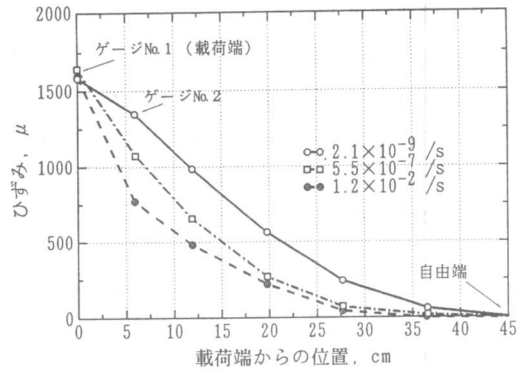


図-9 ひずみ分布に及ぼす載荷速度の影響

3.2 付着応力-すべり関係

(1) 実験結果

供試体番号Ⅰ～Ⅵから得られた載荷端における局所付着応力-すべり関係を図-10に示す。ここで、鉄筋に沿った各位置における局所付着応力は、その点におけるひずみ分布曲線の傾きから求められる。

$$\tau = \frac{ED}{4} \times \frac{d\varepsilon}{dx} \quad (1)$$

ただし、Eはヤング係数、Dは鉄筋直径、そして、 $d\varepsilon/dx$ はひずみ分布の各位置での傾きを表す。また、鉄筋に沿った各位置におけるすべりは、自由端からその位置までのひずみ分布曲線の積分値で表される。

$$S = \int \varepsilon dx \quad (2)$$

なぜなら、コンクリートブロックは鉄筋に対して十分に大きいためにコンクリートのひずみは無視でき、自由端すべりは定着長が十分長いために生じないからである。付着応力-すべり関係からコンクリート強度と鉄筋直径の影響を無くすために、付着応力を（コンクリート強度）の2/3乗で、すべりを鉄筋直径で除することで正規化している〔6〕。

載荷端の付着応力-すべり関係を図-10に、載荷端から59.4mmの位置での付着応力-すべり関係を図-11に示した。図-10から分かるように、載荷速度が大きい程、同じすべりにおける付着応力は大きくなっているといえる。たとえば、正規化すべりが0.5%では、供試体番号Ⅰ（ $\dot{\varepsilon} = 1.2 \times 10^{-2}/s$ ）での付着応力は、供試体番号Ⅵ（ $\dot{\varepsilon} = 2.1 \times 10^{-9}/s$ ）の約3倍になっている。また、図-11からもほぼ同様のことがいえる。このことから、鉄筋コンクリート構造物の変形挙動に付着作用が大きく影響される場合には、付着特性に載荷速度を考慮する必要があると思われる。

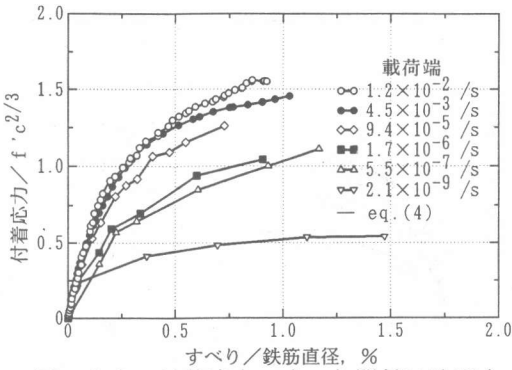


図-10 付着応力-すべり関係に及ぼす
 載荷速度の影響

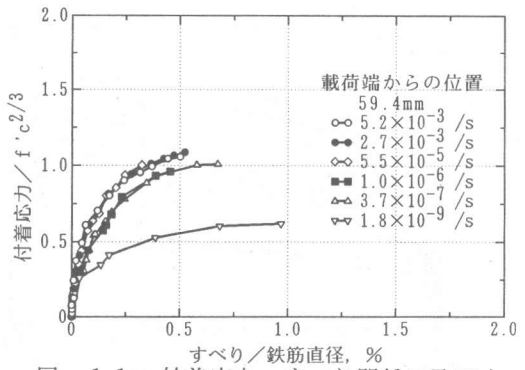


図-11 付着応力-すべり関係に及ぼす
 載荷速度の影響

(2) 最大付着応力

載荷速度と最大付着応力との関係について調べたものを図-12に示す。縦軸の最大付着応力 ($\tau_{\max}(\dot{\epsilon})/f'c^{2/3}$) は、定着長の十分長い場合の静的付着試験の結果から得られた島ら[7]の提案している付着応力-すべり関係式の曲線形が適用できると仮定し、実験結果の曲線に近くなるようにこの曲線式をあてはめたときに得られた最大付着応力である。図-12より、本実験の範囲内では、最大付着応力は載荷速度の対数に対して直線的に変化することがわかる。また、このことから非定着部を設けることによって、載荷端近傍領域での付着応力低下を抑えることができたといえる。なお、図中の直線は、次の式である。

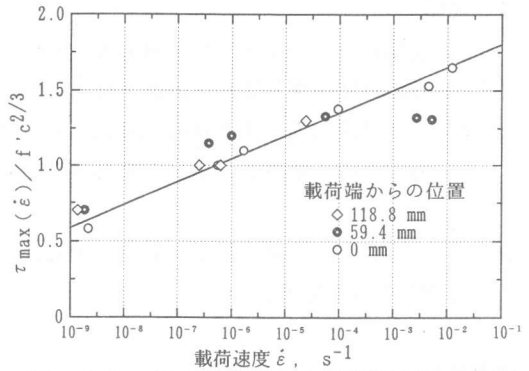


図-12 最大付着応力と載荷速度との関係

$$\tau_{\max}(\dot{\epsilon})/f'c^{2/3} = 1.94 + 0.153 \times \log(\dot{\epsilon}) \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{\max}(\dot{\epsilon})$ は最大付着応力 (MPa)、 $f'c$ はコンクリート圧縮強度 (MPa) および $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度 (s^{-1}) である。

(3) 曲線形

上で得られた最大付着応力を島らの式に適用すると、

$$\tau(\dot{\epsilon}) = \tau_{\max}(\dot{\epsilon}) \times (1 - \exp(-40 s^{0.6})) \quad (4)$$

となるが、付着応力-すべり曲線の実験結果と式(4)とを比較したものを図-13、図-14に示す。曲線式と実験結果とはよく似た形をしている。これより、載荷速度により異なる付着応力-すべり関係の曲線形は、静的試験から得られた付着応力-すべり曲線を付着応力の軸方向に拡大・縮尺することで表すことができるといえる。

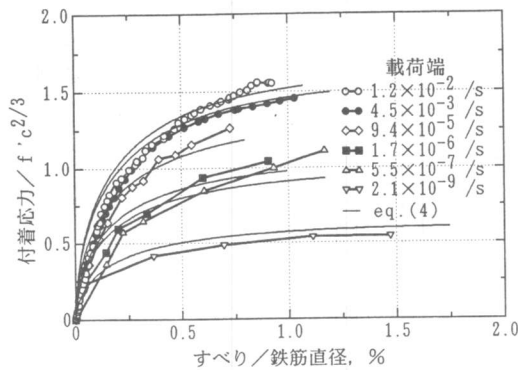


図-13 付着応力-すべり関係の実験結果と式(4)との比較

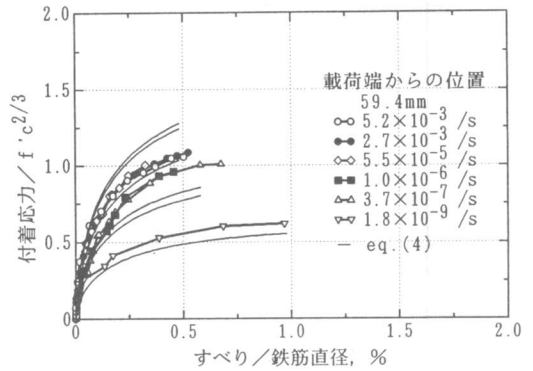


図-14 付着応力-すべり関係の実験結果と式(4)との比較

4. 結論

- (1) 鉄筋とコンクリートの付着応力-すべり関係は、载荷速度によって大きく影響される。
- (2) 载荷速度が異なるときの最大付着応力は、载荷速度の対数に対して直線的に変化する。
- (3) 载荷速度が異なるときの付着応力-すべり関係の曲線形は、静的試験から得られた付着応力-すべり曲線を付着応力の軸方向に拡大・縮尺することで表すことができる。

謝辞：本研究は、文部省科学研究費補助金（一般研究C04650425）を受けて行ったものである。ここに謝意を表します。

参考文献

- [1] 睦好・町田・根岸：载荷速度が鉄筋の付着特性におよぼす影響，土木学会第41回年次学術講演会，pp.155~156，1986.11
- [2] 遠藤・青柳：鉄筋コンクリートの動的せん断伝達特性および動的付着特性に関する実験的研究，電力中央研究所報告・研究報告：U88005，1988.10
- [3] 小谷：鉄筋コンクリートにおける载荷速度の影響，コンクリート工学，Vol.21，No.11，pp.23~34，1983.11
- [4] 山尾，周，岡村：定着長さ・コンクリート強度が局部付着応力-すべり関係に及ぼす影響，第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp.405-408，1983.
- [5] 睦好・町田：動的外力を受ける鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究，土木学会論文集，第354号/V-2，pp.81~90，1985.2
- [6] 山尾・周・二羽：付着応力-すべり関係に関する実験的研究，土木学会論文報告集，第343号，pp.219~228，1984.3
- [7] 島・周・岡村：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-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号/V-6，pp.165~174，1987.2