

論文

[2019] 鉄筋とコンクリートの付着特性に及ぼす荷重の繰返しと時間の影響

正会員○山田 圭一 (徳島大学大学院)

正会員 島 弘 (徳島大学建設工学科)

原口華世子 (大林組大阪本店)

1. 目的

鉄筋コンクリート構造の変形解析を精度よく行うためには、鉄筋とコンクリート間の相互作用を表す構成則である付着応力-すべり関係を用いる必要がある。これまでに提案されている付着応力-すべりモデルは、ほとんどがゆっくりとした単調荷重においての実験から求められている。しかし、実際の荷重である衝撃、地震、疲労、クリープ荷重などについて統一的に解析するためには、付着応力-すべり関係に時間と荷重の繰返しの影響を取り入れたものが必要となる。

付着特性に対する時間あるいは繰返しの影響に関する既往の研究としては、森田ら [1] , 高橋ら [2] , 長滝ら [3] , 睦好ら [4] , Sakulら [5] , のものがある。しかし、実構造物のように定着長が長いものに対する付着応力-すべり関係に関するものはない。

そこで、本研究は、時間と荷重の繰返しを取り入れた載荷履歴を考慮できる付着応力-すべり関係をモデル化する基礎資料を得るために、単調持続荷重下および高速繰返し荷重下における付着応力-すべり関係を実験的に求め、付着応力-すべり関係に及ぼす時間経過と荷重の繰返し回数の影響を検討するものである。

2. 実験概要

2.1 実験条件

付着応力-すべり関係に及ぼす時間経過の影響を調べるために、持続荷重を載荷する付着クリープ試験、および荷重の繰返し回数の影響を調べるために高速繰返し片引き試験を1体ずつ行った。それぞれの実験条件を表-1に示す。

2.2 供試体

(1) 形状・寸法

供試体は、図-1に示すように、断面が40cm×40cm高さが70cmのコンクリートブロックの中心に鉄筋を鉛直方向に埋め込んだものである。定着長は、鉄筋の降伏荷重を載荷しても自由端すべりが生じないだけ十分に長い鉄筋直径の30倍とした。供試体の上部には、載荷端付近におけるコンクリートの拘束条件の違いの影響をなくすために、シースを用いて鉄筋径の約5倍の長さの非定着部を設けた。

鉄筋軸方向のひずみ分布を測定するために、長さが

表-1 実験条件

供試体	D (mm)	f'c (MPa)	定着長 (D)	非定着長 (D)
クリープ試験	19.5	25	30	5
高速繰返し試験		21		

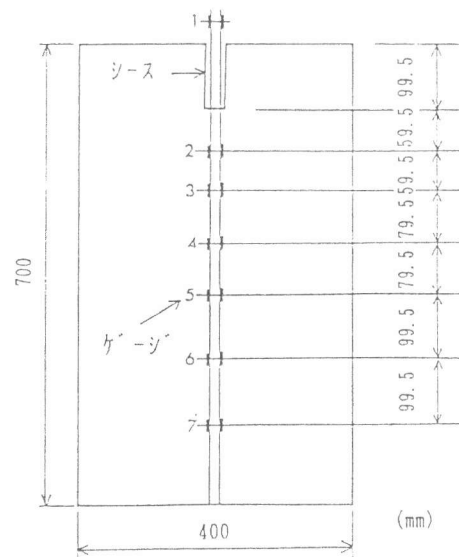


図-1 供試体の形状・寸法

5 mmのひずみゲージを、非定着部およびコンクリート中は間隔3 D (D:鉄筋直径) 4 D、および5 Dで鉄筋の裏表に貼付した。

## (2) 材料

鉄筋は、縦リブがなく、ひずみゲージを直接貼付することができるD19のねじふし鉄筋を使用した。鉄筋はSD30およびSD35であり、それらの性質を表-2に示す。

また、コンクリートの配合を表-3に示す。特徴としては、水セメント比を70%と大きくしたことである。コンクリート強度は、クリープ試験の供試体が載荷時においては25MPa、繰返し試験の供試体が21MPaである。

## 2.3 クリープ試験

### (1) 載荷方法

試験は片引き試験を行い、付着クリープ試験の載荷装置としては、図-2に示すように、この原理を利用して鉄筋に持続引張力を作用させるものである。持続荷重は鉄筋の応力で315MPaとした。目標の持続応力に達するまでの時間を60秒としたため、載荷速度は載荷端の鉄筋ひずみで28 $\mu$ /secとなる。

### (2) 環境条件

試験は温度が20 $\pm$ 4 $^{\circ}$ Cの恒温室において実施した。

## 2.3 高速繰返し試験

### (1) 載荷方法

高速繰返し試験の載荷装置を図-3に示す。載荷方法としては、アクチュエーターを使用して鉄筋に引張荷重をかけ、1Hzの一定周期のSIN波で繰返しを行った。

### (2) 荷重制御方法

制御方法として応力制御を用いた。第1荷重段階として、最大荷重を鉄筋の降伏応力の約半分の140MPa、最小荷重を0MPaとした繰返し引張力を10000回載荷した。

表-2 鉄筋の性質

	降伏ひずみ ( $\mu$ )	降伏強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)
クリープ試験	2125	425	196
高速繰返し試験	2010	382	190

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 <sup>3</sup> )			
			水 W	セメン ト C	細骨材 S	粗骨材 G
25	70	43	170	242	785	1056

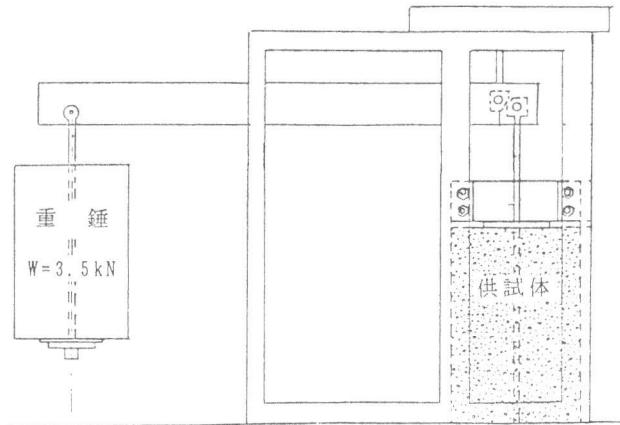


図-2 付着クリープ試験の載荷装置

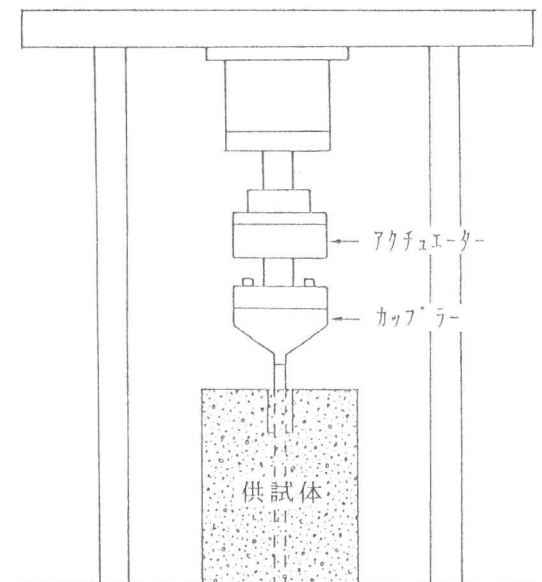


図-3 高速繰返し試験の載荷装置

その後、2倍の280MPaを最大荷重、0MPaを最小荷重とした引張力でさらに1000回載荷した。

ひずみ分布の測定は、それぞれの荷重段階で、載荷回数が、 $10^n$  ( $n=0, 1, 2, 3, 4$ )回で荷重を静的に0まで往復させながら行った。ひずみの測定値に対する繰返しによる温度上昇の影響の可能性を調べるために、載荷停止後から定期的にひずみを測定した。その結果から得た温度の影響が十分になくなる約30分の時間をひずみ測定の前にとり、温度上昇の影響をなくした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 クリープ試験

##### (1) ひずみ分布

ひずみ分布が時間の経過によって変わる様子を図-4に示す。実験結果から明らかのように、時間が経過するにつれて供試体内部でひずみが増加している。また、最大荷重が大きいものほどひずみの変化が著しい。

##### (2) 付着応力-すべり関係

図-4に示したひずみ分布から求めた付着応力-すべり関係を図-5に示す。図中の1本の曲線上の丸点は鉄筋軸上の位置を示しており、右端が載荷端である。この図から、付着応力は、すべりが大きいほど時間の経過によって付着応力が大きく低下していることがわかる。

また、載荷直後 ( $t=0$ ) では、付着応力はすべりが大きいほど大となるが、載荷から14日後には、すべりがある量以上になるとすべり量にかかわらず付着応力はほぼ一定となっている。

経過時間が短い段階では、付着応力の低下が著しくみられるが、ある程度時間が経過すると付着応力の低下は小さくなる。これは、コンクリートのクリープ性状と同じである。

#### 3.2 高速繰返し試験

##### (1) ひずみ分布

高速繰返し試験によるひずみ分布の変化を図-6に示す。この図より、載荷回数の増加とともにひずみ分布に変化がみられる。載荷端でのひずみを一定として載荷しているが、供試体内部においては、ひずみは繰返し回数の増加にともない増加している。

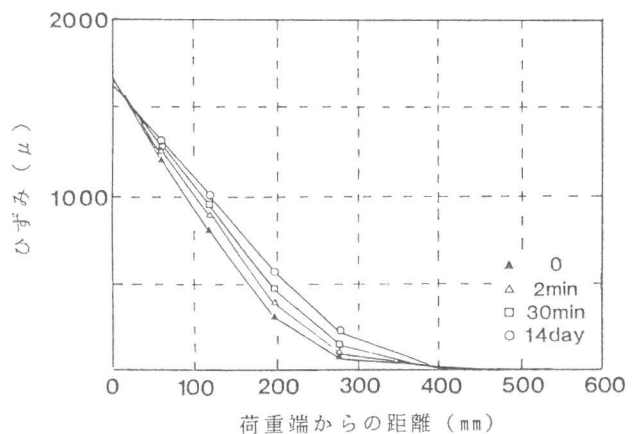


図-4 時間の経過によるひずみ分布

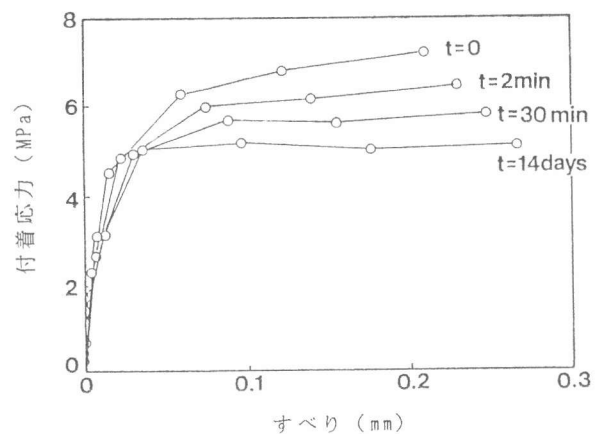


図-5 付着応力-すべり関係

(2) 付着応力-すべり関係

図-6 に示した鉄筋のひずみ分布から求めた最大応力が280MPaの荷重段階での付着応力-すべり関係を図-7 に示す。繰返し回数の増加にともない付着応力は大きく減少している。とくに、荷重端から6Dの範囲において付着応力の低下が著しい。

荷重端付近での付着応力は、繰返し回数が1回のもを1000回のもと比較すると、約30%程度に低下している。荷重端での荷重の減少時においてはコンクリート中の鉄筋には負の付着応力が働くため、ある位置よりも深いところでは繰返しによる鉄筋の応力変化は極めて小さくなる。したがって、荷重端近傍において付着応力が大きく低下するのは、繰返しの応力振幅が荷重端に近いほど大きいためと思われる。

(3) 付着応力-すべり履歴曲線

繰返し回数が1, 10, 100, 1000回における荷重-除荷-再荷重時の荷重端での付着応力-すべり履歴曲線を図-8 に示す。ここでは、コンクリート強度および鉄筋径の影響を取り除くために、横軸はすべりを鉄筋径で割ったもの、縦軸は付着応力をコンクリート強度の2/3 乗で割ったもので表した。塑性すべりは繰返し回数によって変化が少ないようであるが、最大付着応力点と最小付着応力点間の勾配を平均的な剛性と考えると、剛性は荷重の繰返しによって極端に小さくなっている。

(4) 繰返しの影響を取り入れた定式化の方法

付着応力-すべり-繰返し回数関係を定式化するために、次式で示すように、繰返し荷重下の付着応力を繰返しのない条件での付着応力を基準として、それからの変化を繰返し回数およびすべり量の関数で表すことを考えた。

$$\tau = \tau_0 \cdot f(N, s) \tag{1}$$

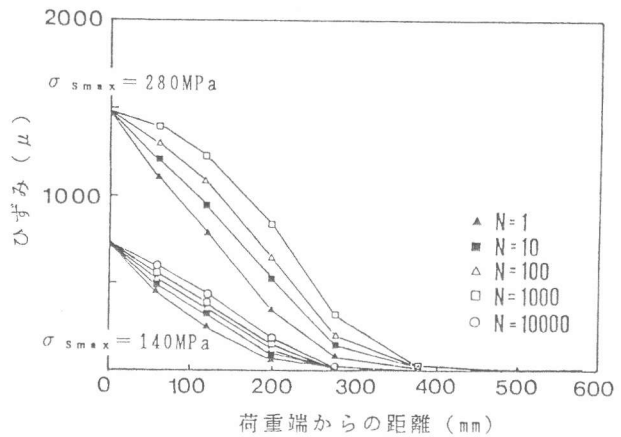


図-6 高速繰返し試験によるひずみ分布

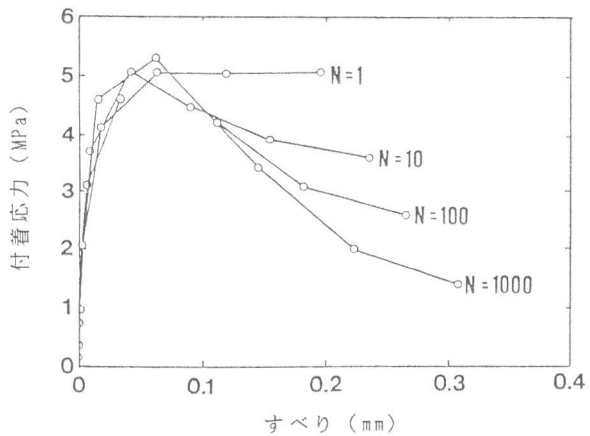


図-7 付着応力-すべり関係

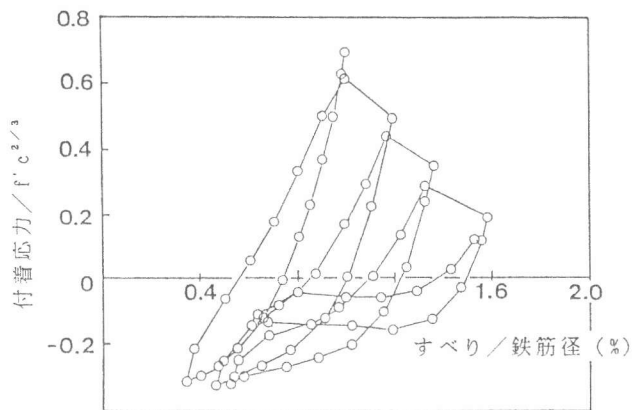


図-8 荷重端での付着応力-すべり履歴曲線

ここで、 $\tau_0$ は単調荷の時の任意のすべり量に対する付着応力であり、定着長が十分長い場合には $\tau_0 = F(s)$ で表される。(1)式を導くために基準となる $\tau_0$ を、本研究では島ら [6] が提案しているコンクリート強度および鉄筋径の影響を考慮した定着長が長い場合に成立する次式を用いた。

$$\tau_0 = 0.9 f'c^{2/3} (1 - \exp(-40s^{0.6})) \quad (2)$$

ここで、 $\tau_0$ は付着応力 (MPa)、 $f'c$ はコンクリート強度 (MPa)、 $s = S/D$ であり、 $S$ および $D$ はそれぞれすべり量および鉄筋直径である。

付着応力は、繰返し回数の増加とともに低下しているの、任意のすべり量に対しての各繰返し回数における付着応力 $\tau$ を計算し、基準とする $\tau_0$ に対する比 $\tau/\tau_0$ を求める。これにより、繰返し回数に対する付着応力の変化がわかる。これより付着応力変化-すべり-繰返し回数関係を図-9に示す。任意のすべりにおいて付着応力は $\log(N)$ に対して、ほぼ直線的に低下している。これらの関係は、本来ならば $\log(N)$ が0のときにはいかなるすべりにおいても $\tau/\tau_0$ は1となるべきであるが、今回は次式で示すように、実験結果に忠実にしたがって切片が変化する直線で表した。

$$\tau/\tau_0 = (b_n + a_n \times \log(N)) \quad (3)$$

ここで、 $a_n$ 、 $b_n$ はそれぞれこの直線の傾きおよび切片であり、 $a_n$ 、 $b_n$ は $S/D$ の関数として次式のようになる。

$$a_n = 0.05 - 14 \times S/D \quad (4)$$

$$b_n = 1.12 - 34 \times S/D \quad (5)$$

しかし、 $a_n$ 、 $b_n$ ともに $S/D$ の関数で表したために実際の値とは少しずれたものとなった。

各々の繰返し回数における実験結果と計算結果との比較を図-10に示す。この図より、この計算方法は荷重の繰返しによる付着応力-すべり関係の変化を表すことができていることがわかる。

ただし、これらの式における値は荷重振幅などここでは考慮していない要因によって変化すると考えられる。

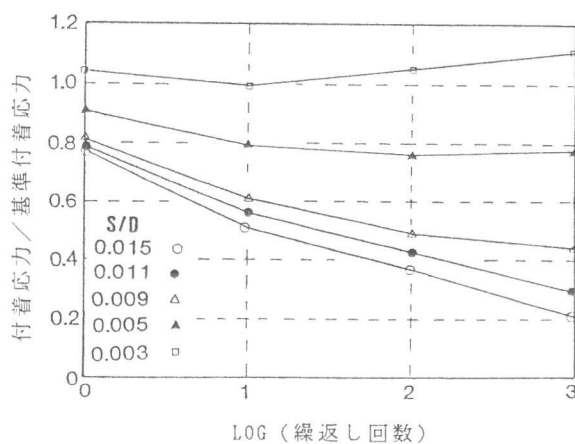


図-9 付着応力-すべり繰返し回数関係

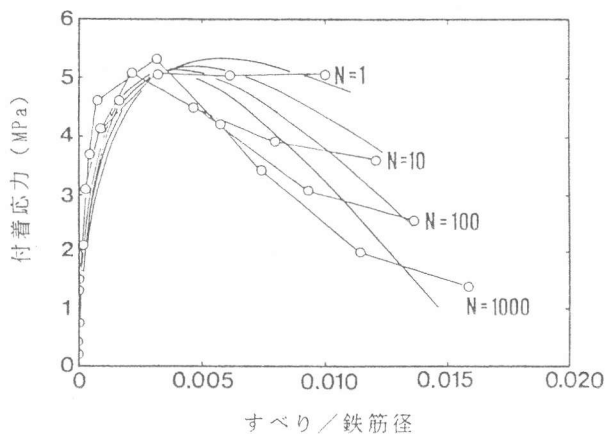


図-10 解析結果

また、荷重は1秒間に1回の割合で繰り返したために、荷重開始から第2荷重段階の1000回目までは約6時間が経過している。このため、付着応力-すべり関係の実験結果には時間の影響も含まれており、厳密には時間の影響を差し引かなければならない。したがって、時間の影響を定式化することをはじめとしてさらなる研究が期待される。

#### 4. まとめ

- (1) 時間の経過による付着応力の低下は、すべりが大きいほど大である。
- (2) 荷重の繰返しによる付着応力の低下は、応力振幅が大きくなる荷重端に近いほど大となる。
- (3) 荷重の繰返し回数の増加によって、塑性すべりは大きく変化しないが、付着剛性が著しく低下する。
- (4) 付着応力-すべり-繰返し回数の関係を定式化する一例として、単調荷重における付着応力-すべり関係からの変化をすべり量と繰返し回数の関数で表す方法を示した。

謝辞：ねじふし鉄筋は住友金属㈱に提供して頂きました。ここに、深く謝意を表します。

#### 参考文献

- [1] 森田司郎，角徹三：繰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，No. 229，pp. 15-24，1975. 3
- [2] 高橋久雄，小柳光生，武田寿一：鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状に関する研究，第1回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 465-468，1978
- [3] 長滝重義，佐藤良一，鯉淵芳伸：異形鉄筋とコンクリートの付着クリープ性状，第6回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 553-556，1984
- [4] 睦好宏史，町田篤彦，根岸範明：荷重速度が鉄筋の付着性状におよぼす影響，土木学会第41回年次学術講演会，pp. 155-156，1985. 11
- [5] Sakul, P. and Tom, H. : Bond-Slip Model for Generalized Excitation Including Fatigue, ACI Material Journal, V. 86, No. 5, Sep./Oct. 1989
- [6] 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-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号，／V-6，pp. 165-174，1987. 2