

論文 持続荷重下における異形鉄筋の付着—すべり関係

近藤 吾郎^{*1}

要旨：鉄筋とコンクリート間の付着挙動は時間依存性を持ち，時間的にすべりが増加する，いわゆるクリープすべりが生じることがよく知られている。本研究では局所の付着特性に及ぼす持続荷重の影響を調査することを目的として，付着区間の短い片引き付着試験法を用いた持続載荷実験を実施したものである。また，持続載荷後静的実験を行い持続荷重が静的付着強度に及ぼす影響についても調査した。これらの持続載荷実験から持続応力が作用する異形鉄筋のすべり挙動について検討し，その結果に基づき時間依存性を考慮した付着すべり挙動のモデル化を行った。

キーワード：異形鉄筋，付着応力—すべり関係，持続荷重，付着強度

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材における鉄筋とコンクリート間の付着は時間依存性を持ち，付着応力が作用する状態では時間の経過に伴ってすべりが増加することが知られている。このすべりの増加（クリープすべり）は，例えば，固定端からの鉄筋の抜け出しによる曲げ材のたわみの増加や曲げひび割れ幅の増大の要因となるので，付着作用の時間依存性を明らかにすることは部材の長期性能を評価する上で極めて重要である。

このような付着挙動の時間依存性を扱った研究には，長滝ら[1]，島ら[2]，大野ら[3]による報告があり，CEB-FIBのモデルコード[4]にも取り入れられている。しかし，実部材における付着応力は，荷重変動やコンクリートの体積変化，ひび割れの発生による応力再配分などにより影響を受け，このような複雑な応力履歴に対する付着挙動の理解は十分ではないと思われる。

そこで，本研究では，付着挙動の時間依存性を解明し，鉄筋コンクリート部材の長期挙動の解析精度を向上させることを目的として，付着長さの短い片引き試験法を用いた持続載荷実験を実施したものである。これらの実験結果から局所の付着挙動に及ぼす時間効果を検討するとともに，鉄筋のふし形状が及ぼす影響についても検討を加えた。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体は，片引き付着試験体とした。図-1に示すように断面200mm×200mm長さ250mmの寸法で，試験鉄筋は断面中心に埋め込んだものである。横補強筋等の試験鉄筋以外の補強筋は用いていない。付着区間は，図-2に示すように鉄筋ふし間隔の2～3倍とし，供試体の中心に設けた。付着区間外では付着絶縁のため塩ビパイプを用いた。

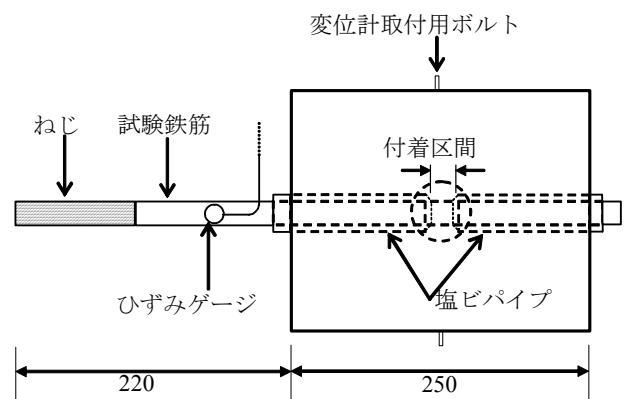


図-1 供試体

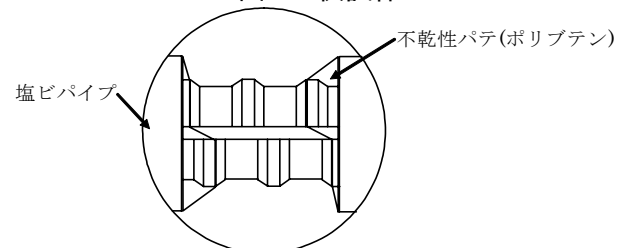


図-2 付着区間の詳細

^{*1}千葉大学 工学部都市環境システム学科助教授 (正会員)

載荷荷重は、鉄筋露出部に貼付したW.S.G.によるひずみから換算した。すべりはコンクリートの体積変化の影響を避けるため供試体側面中央部と供試体背面位置における鉄筋の相対変位として、変位計（感度1/1000mm）を用いて計測した。供試体は材齢3日で脱型し、材齢7日まで湿布養生を行った後実験室内で気中放置した。載荷実験開始材齢は6～10週である。なお、供試体4体を1シリーズとして、同一バッチのコンクリートから作製した。

2.2 使用材料

コンクリートには調合強度30と60N/mm²の2種類の強度レベルを用いた。各調合を表-1に示す。セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材には山砂、粗骨材には砕石(最大骨材寸法20mm)を使用した。60N/mm²のコンクリートには高性能AE減水剤をセメント量の0.15%添加した。試験鉄筋には市販のD16竹ふし筋に加え、ふし間隔が鉄筋径の1.0倍,0.4倍の2種類、ふし高さhが0.10倍,0.05倍の2種類となるD19相当の切削鉄筋(名称はふし間隔とふし高さを表す)を使用した。鉄筋の詳細ならびに鉄筋種毎に設定した付着区間ふし数を表-2に、ふし形状を図-3に示す。付着応力は載荷荷重を付着面積（公称周長×付着区間長）で除して算出するものとした。

載荷は、試験体前面にテフロンシートを挟んで鋼製載荷台を取り付けたのち、試験鉄筋先端のナットを締め込みことにより、所定の荷重を与えた。時間経過に伴って生じるすべりにより載荷荷重は減少するので、持続載荷開始直後は20分毎に荷重の調整を行うなどして5%程度の誤差内で荷重を制御した。なお、持続載荷の環境条件は、図-4に示すように、精度の高い恒温状態ではないが空調機によって温度制御を行った実験室内で実施した。また、静的載荷にはセンサーホールジャッキを用いた。

3. 実験結果の概要

3.1 定持続載荷実験結果

定持続載荷実験には竹ふし鉄筋を用い、各調

合について載荷期間を5週と13週とする計4シリーズ（それぞれ、調合強度-載荷期間をシリーズ名とする）の供試体を使用した。実験開始時におけるコンクリート圧縮強度を表-3に示す。また、各シリーズ1体は静的載荷実験（載荷速度は毎分1mmのすべり速度を標準とする）を行い、付着強度を求めた。そこで得られた静的付着-すべり関係を図-5にまとめて示す。

定持続載荷実験におけるすべりの履歴を図-6に調合毎にまとめて示す。これらの図では、供試体ごとに、載荷期間5週におけるすべり量に対する相対量として表したもので、次の長滝・佐藤式[5]、CEB-FIPモデルコード式[4]と比較したものである。

表-1 コンクリートの調合表

調合強度 (N/mm ²)	W/C (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)			
			W	C	S	G
30	67	2.5	175	261	783	975
60	35	4	169	483	630	964

表-2 試験鉄筋の詳細

鉄筋名称	公称径 db	ℓ (mm)	h (mm)	W (mm)	α (deg)	付着区間 ふし数
竹ふし	16	10.0	1.0	2.0	33	2
04-010	19	7.6	2.0	2.0	45	3
04-005	19	7.6	1.0	2.0	45	3
10-010	19	19.1	2.0	2.0	45	2
10-005	19	19.1	1.0	2.0	45	2

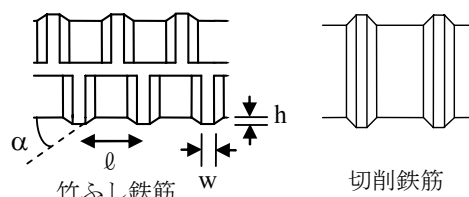


図-3 試験鉄筋形状

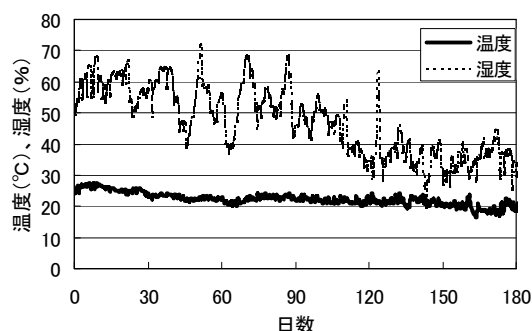


図-4 実験の実施環境

表-3 コンクリート強度

シリーズ名	30-5	30-13	60-5	60-13
圧縮強度 (N/mm ²)	27.8	33.9	70.0	72.7

長滝・佐藤式：

$$\frac{S}{S_0} = \begin{cases} (1 + 0.32t) & (t \leq 1) \\ 1.32 + \frac{1.32(t-1)}{1.64(t-1)+134} & (t > 1) \end{cases} \quad (1)$$

CEB-FIPモデルコード式：

$$\frac{S}{S_0} = (1 + 240t)^{0.08} \quad (2)$$

ここで、 S は載荷日数 t (日)におけるすべり量、 S_0 は静的載荷時のすべり量を表す。

調合強度 30N/mm^2 の図-6 (a)では、載荷直後のクリープすべりが著しく増加する傾向を両式とも表現できており、持続応力レベルの違いも静的載荷時のすべり量で評価することでおおよそよい対応を示すことがわかる。一方、調合強度 60N/mm^2 (図-6 (b)) については、比較的付着応力レベルの低い場合には載荷開始直後のすべり速度が緩やかとなる傾向を示している。

3.2 静的載荷実験結果

定持続載荷供試体は、所定の載荷期間後直ちに静的載荷実験を行った。持続載荷開始から静的載荷まで含めた付着応力とすべりの関係の例として30-13および60-13シリーズについて図-7に示す。図中の●—●間が持続載荷期間におけるすべりの変化を表し、破線は図-5の静的付着応力-すべり関係を比較のため加えたものである。持続応力の除荷から再載荷までは直線的な履歴を示し、この直線関係は持続応力を超えれば静的付着応力-すべり曲線に達するまで維持されていることが特徴である。なお、いずれの供試体

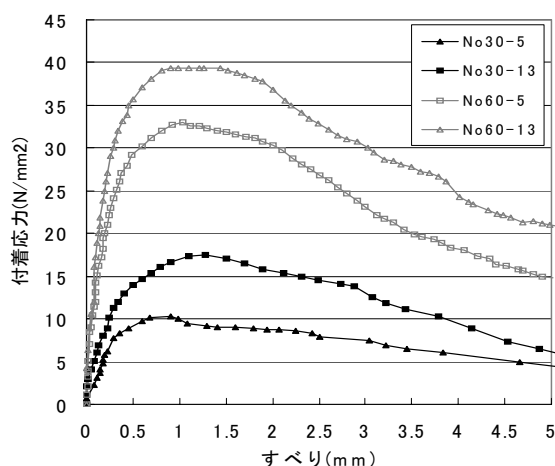


図-5 静的付着応力-すべり曲線

においても、直接静的載荷を行った供試体と同じく、鉄筋ふし間のコンクリートがせん断される破壊モードである。また、計測された最大付着応力とそのときのすべり量を表-4に静的付着強度と併せて示す。最大付着応力は持続載荷供試体の方が大きくなる傾向が認められるが、

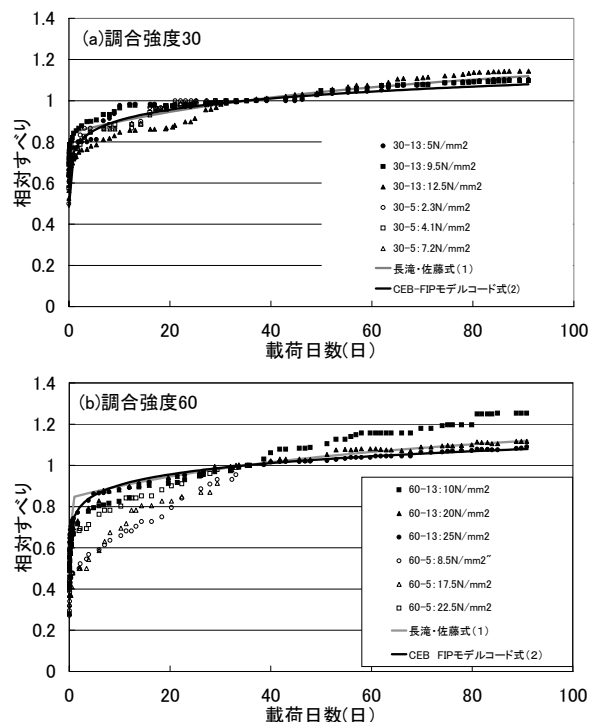


図-6 定持続応力下におけるすべりの経時変化

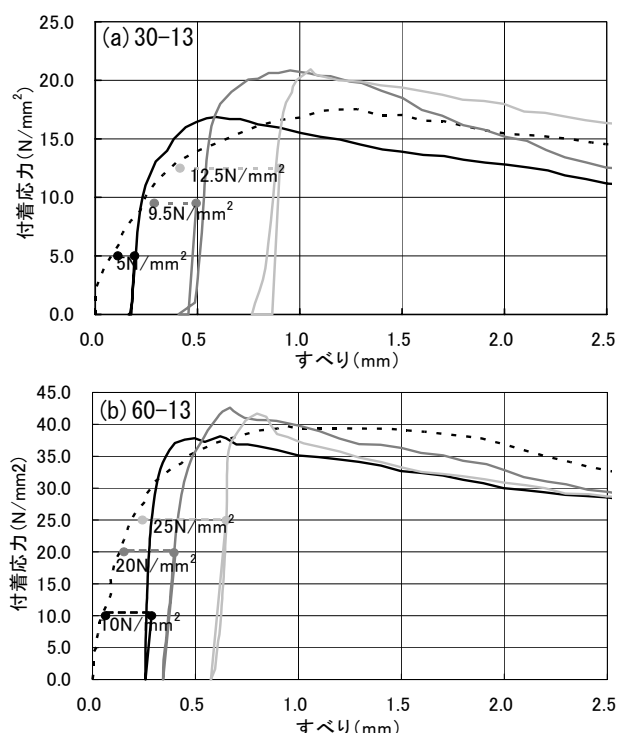


図-7 持続載荷後の付着応力-すべり関係

試験材齢の違いを考慮すれば変動範囲にあると考えられ、最大付着応力とその時のすべり量には、載荷期間や応力レベルの影響は見られないと判断できそうである。

3.3 変動持続載荷実験結果

持続応力の変化がすべり挙動に及ぼす影響を調査するため、持続応力を載荷開始後14日と33日に変化させた4体の供試体（竹ふし鉄筋、調合30N/mm²、載荷開始時圧縮強度29.7N/mm²）のすべりの履歴をまとめて図-8に示す。図中括弧内の数値が当該期間の定持続応力 (N/mm²) を表している。応力変化時には図-7に示したようにその変化に対応するすべりが瞬時に生じるが、載荷開始時における応力変化に対応するすべり変化に比べて小さく、コンクリートのクリープのような重ね合わせの原理が成立しないことがわかる。また、持続応力を減じた載荷期間におけるすべりの変化はほとんど生じず、回復クリープ現象は認められない。持続応力を減じた後持続応力を復帰させると処女載荷直後に見られた著しいすべりの増加はない。

持続載荷終了時のすべりを比較すると、供試体毎のばらつきを考慮すれば応力履歴に関わらず顕著な相違はないと判断できる。

3.4 応力緩和実験結果

すべり量を固定した状態での付着応力の緩和実験を行った5体の供試体（竹ふし鉄筋、調合強度30、載荷開始時圧縮強度27.3N/mm²）の応力履歴をまとめて図-9に示す。拘束したすべり量は0.1mm,0.2mm,0.4mm,0.8mm,1.3mm（静的付着強度時）であり、それぞれ付着強度(16.8N/mm²)に対する比で付着応力を表し、図中の●はそれぞれ静的載荷により所定のすべりに到達した瞬間の付着応力を表している。載荷初期にクリープすべりの増進が著しいことに対応してこのときの応力緩和が進行するが、図-6に示したクリープすべりに比べ早期に応力緩和が終局となっている。応力が安定するとみなせる載荷日数14日における緩和応力を初期応力で除した応力緩和率を表-5に示すが、拘束すべり量に対し

表-4 静的載荷時における最大付着応力

シリーズ	持続応力 (N/mm ²)	最大付着応力 (N/mm ²)	最大付着応力時すべり (mm)
30-13	静的載荷	17.5	1.28
	5	16.8	0.61
	9.5	20.8	0.98
	12.5	21.0	1.05
30-5	静的載荷	8.9	0.79
	2.3	11.0	1.19
	4.1	10.7	1.33
	7.2	10.9	1.01
60-13	静的載荷	39.8	1.29
	10	38.0	0.62
	20	42.6	0.67
	25	41.7	0.81
60-5	静的載荷	33.0	1.03
	8.5	36.8	0.93
	17.5	35.8	0.94
	22.5	35.6	1.00

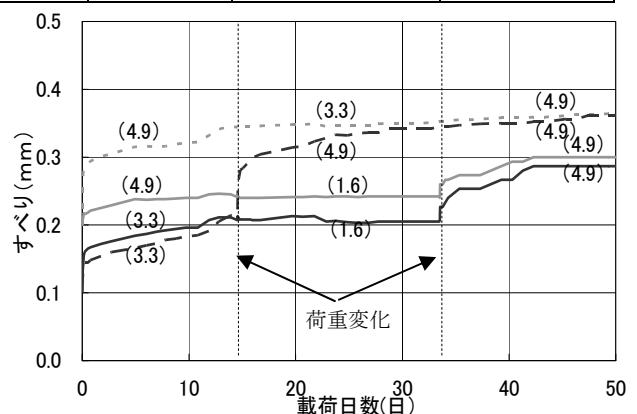


図-8 すべりの経時変化(変動持続応力)

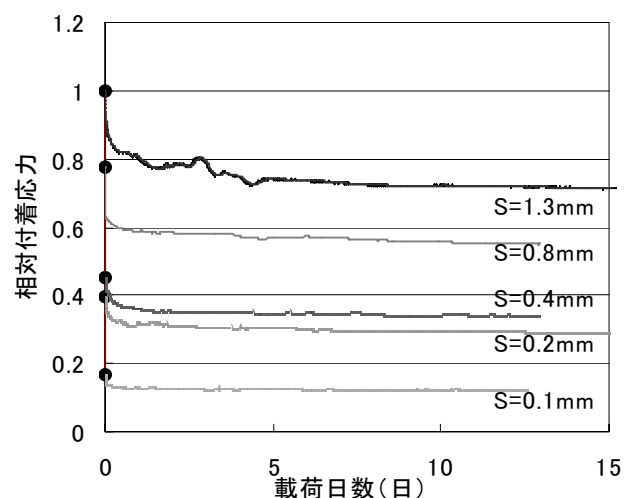


図-9 応力緩和特性

表-5 応力緩和率

拘束すべり (mm)	0.1	0.2	0.4	0.8	1.3
応力緩和率 (%)	29.1	27.0	24.8	28.8	29.8

て顕著な影響は見られない。この応力緩和率を、式（１），（２）と比較した結果を図-10に示す。この図では実線で表した静的付着応力-すべり関係には次のCiampi式[6]を用いた。

$$\frac{\tau}{\tau_{\max}} = \left(\frac{S_0}{S_1} \right)^{0.4} \quad (3)$$

ここで、 $\tau_{\max}$ は付着強度、 S_1 は付着強度時のすべり量を表し、実験結果から $\tau_{\max}$ を16.8N/mm²、 S_1 を1.3mmとした。式（１），（２）から、定付着応力をおおよそクリープすべりが緩慢となる13週の持続载荷した時のすべりを評価したものである。この図から付着応力-すべり図における、クリープすべりと応力緩和の終局値はおおよそ一致しているといえ、すべりが減少しない（終局状態から除荷経路に入らない）範囲では载荷経路がクリープすべり量に及ぼす影響は二次的であるといえる。

3.5 切削鉄筋試験結果

4種類のふし形状の異なる切削鉄筋を使用した供試体（調合強度30N/mm²，载荷開始時圧縮強度24.4N/mm²）について、付着応力を3.0および6.0N/mm²とする4週の定持続载荷実験から得られたすべり履歴を図-11に示す。静的载荷時のすべりは鉄筋表面のふし形状の凹凸が著しいほど小さい[7]が、持続载荷終了時のすべりについても同様の傾向が認められる。

付着応力6.0N/mm²を4週間持続载荷した場合のすべり量に対するすべりの履歴を図-12に示す。ふしが高く間隔の小さいほど载荷開始直後のクリープすべりの増進が穏やかになる傾向があり、特に表面凹凸の極端な04-010のすべりは絶対量が小さくその判断は困難であるが、他のふし形状を持つ鉄筋とは異なる傾向を見せている。

4. 付着応力-すべり関係のモデル化

これらの実験結果から、時間依存性を考慮した付着応力-すべり関係のモデル化を試みる。

定持続応力 σ におけるすべり量が式（２）により表すことができるとすると、すべり速度は次

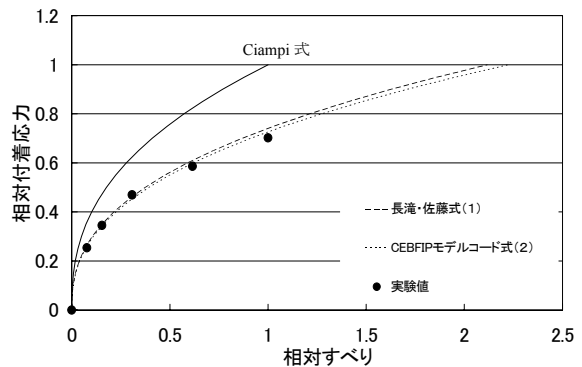


図-10 クリープすべり評価式と応力緩和率の関係

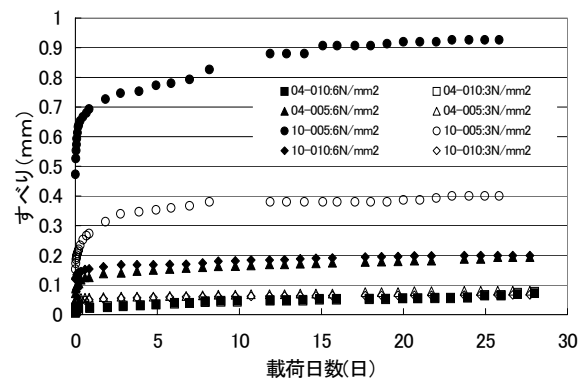


図-11 切削鉄筋のクリープすべり

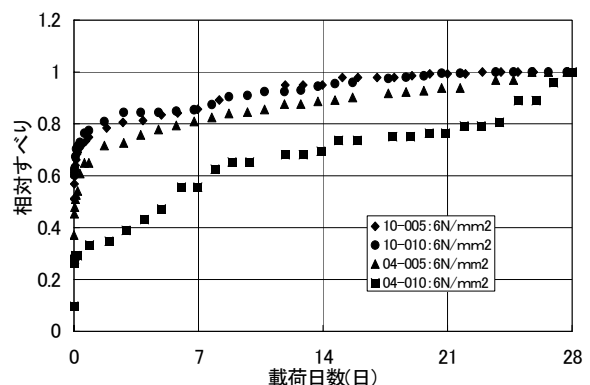


図-12 切削鉄筋のクリープすべりの経時変化の比較

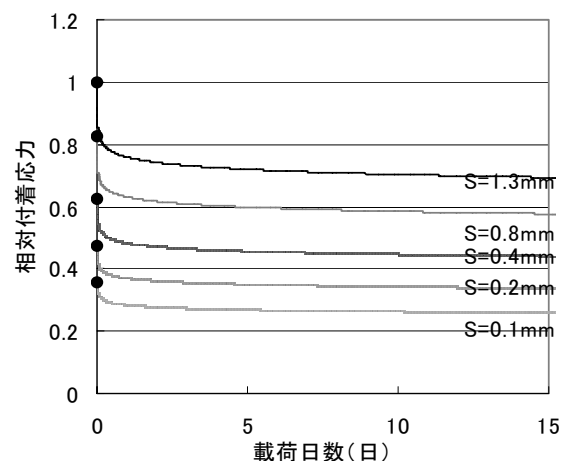


図-13 応力緩和の解析結果

のように表すことができる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 19.2S_0(1 + 240t)^{-0.92} \quad (4)$$

ここで、 S_0 は付着応力 τ に対応する静的載荷時の付着すべり量を表す。

さらに、載荷経路の影響が無視できると仮定すると、式(2)から式(4)の t を消去し、すべり量を用いてすべり速度を表現できる。その結果次式が得られる。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = 19.2S_0^{\frac{1}{0.08}} S^{-\frac{0.92}{0.08}} \quad (5)$$

このすべり速度は付着応力が変化しない場合に対応するので、すべり速度が与えられた場合の付着応力速度は次式となる。

$$\frac{\partial \tau}{\partial t} = K_d \left(\frac{\partial S}{\partial t} - 19.2S_0^{\frac{1}{0.08}} S^{-\frac{0.92}{0.08}} \right) \quad (6)$$

ここで、 K_d は付着剛性を表す。

この式による応力緩和実験条件での計算結果を図-13に示す。ここで、静的付着応力-すべり関係は式(3)に従うとした。また、付着剛性 K_d は、図-7の除荷・再載荷剛性の平均値(100 N/mm³)とした。図-9の実験結果と比較すると、すべりが0.1mmの場合には式(3)による付着応力が実験値と対応していないため直接比較は困難であるが、全体的な応力緩和特性は再現できていると判断できる。

5. まとめ

局所の付着-すべり関係について持続載荷実験を実施して付着クリープ特性について検討を行った結果から、本実験結果の範囲で得られた主な知見をまとめると以下ようになる。

(1) 普通強度のコンクリートにおいては、一定の付着応力が作用するときのクリープすべりは、既往の算定式(長滝・佐藤式[5]やCEB-FIPモデルコード式[4])で評価可能である。

(2) 変動する付着応力履歴を受ける場合には、コンクリートのクリープのような重ね合わせの原理は成立せず、応力減少による回復クリープ

現象も見られない。

(3) 過去に経験した持続荷重履歴は、その後の静的な付着特性や付着クリープ挙動には二次的な影響しか及ぼさない。

(4) クリープすべり速度は載荷履歴の影響を受けないと仮定して、既往のクリープすべりの算定式から、付着応力の緩和特性を評価することができる。

(5) 異形鉄筋のふし形状は、その凹凸が大きくなると、静的すべりと同様クリープすべりも小さくなる。

[謝辞] 実験の実施に際しては本学卒業生和田誠君の協力を得た。また、本研究は科研費補助金の交付を受けた。併せて謝意を表します。

参考文献

- 1]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, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.553-556, 1984。
- 2]山田圭一, 島弘, 原口華世子: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.2, pp.133-138, 1991。
- 3]鈴木計夫, 大野義照, 李振宝, 太田崇士: 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力～すべり関係, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.51-56, 1992。
- 4]CEB: CEB-FIP Model Code 1990。
- 5]長滝重義, 佐藤良一: 持続引張荷重を受けるRC部材の変形・ひびわれ解析に関する一考察, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.5, pp.461-464, 1983。
- 6]Ciampi, V., Eligehausen, R., Bertero, V. and Popov, E.P.: Analytical model for deformed bar bond under generalized excitations, IABSE colloquium Delft, Vol.34, pp.53-67。
- 7]赤司二郎, 藤井栄, 森田司郎: コンクリート強度と鉄筋のふし形状が付着特性に与える影響, コンクリート工学年次論文報告集, 第13巻, pp127-132, 1991。