

論文

[2008] 持続荷重下における異形鉄筋の付着応力～すべり関係

正会員 鈴木計夫 (大阪大学建築工学科)
 正会員 ○大野義照 (大阪大学建築工学科)
 正会員 李 振宝 (大阪大学大学院)
 太田崇士 (大阪大学学部生)

1. まえがき

鉄筋コンクリート部材のたわみやひび割れ幅は持続荷重下において、コンクリートの乾燥収縮、クリープや時間経過に伴うコンクリートと鉄筋間のすべり（以下付着クリープと呼ぶ）による付着応力の緩和によって時間の経過とともに増大する。さらに、片持スラブや梁、および両端固定の部材においてはスタブ定着部からの付着クリープによる鉄筋の抜け出しによって、ひび割れ幅は増大し、過大なたわみを生じさせる。この付着クリープは、異形鉄筋の付着機構を支配している鉄筋のふしからの新たな内部ひび割れの発生などによって生じると考えられるが、長期間にわたる実験に多くの労力を要する関係ことから十分な解明がなされていない。

本研究ではひび割れが生じている梁引張部を想定したRCプリズム両引試験体の持続載荷試験を行い、鉄筋ひずみや端部すべり量の経時変化などを調べるとともに、持続荷重下における付着応力～すべり関係を求め、モデル化を行い、その妥当性を既往の実験結果の付着解析によって検討した。また、コンクリート強度をパラメータに、両引試験体の単調載荷試験を行い、初載荷時の付着応力～すべり関係を調べた。

表1 試験体の種類

	試験体名	コンクリート目標強度(kgf/cm ²)	持続応力(kgf/cm ²)	シールの有無
実験 I	S-280	280	単調載荷	無
	S-350	350		
	S-450	450		
実験 II	L-1	350	小(945)*	無
	L-2		大(1953)	
	Ls-1		小(956)	有
	Ls-2		大(1711)	

*: () 内は鉄筋実際持続応力。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状と種類

試験体の形状を図1に、その種類を表1に示す。試験体の形状は1種類で、試験体の長さはおおむね厚さ(5cm)に応じるひび割れ間隔(27cm)とし、各2体を作製した。実験Iはコンクリート強度を実験変数とする単調載荷試験である。実験IIは長期持続載荷実験で、実験変数はコンクリートの乾燥収縮量(エポキシ樹脂の塗布によるシールによって制御)および鉄筋持続応力(1000kgf/cm²と2000kgf/cm²)とした。

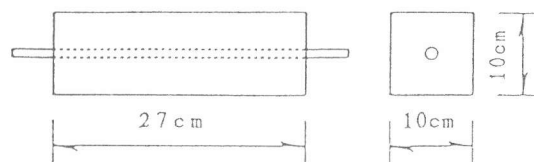


図1 試験体の形状

2.2 使用材料

コンクリートには早強ポルトランドセメント、山砂および最大粒径15mmの碎石を用い、実験Iの水セメント比は65%、55%、45%とし、実験IIは58%とした。表2に実験Iの試験時および実験IIの

表2 コンクリートの力学的性質

	試験体名	圧縮強度 [*] (kgf/cm ²)	割裂強度(kgf/cm ²)	ヤング係数 × 10 ⁵ (kgf/cm ²)
実験 I	S-280	273	25.5	2.49
	S-350	365	30.2	2.79
	S-450	437	34.0	2.97
実験 II		365(388)**	32.5	2.60(2.64)

*: 試験時材令: 実験I-7日、実験II-14日。

**:() 内は材令28日の性質。

持続荷重開始時のコンクリートの力学的性質を示す。

鉄筋は図2に示すような横ふし異形鉄筋D19 (SD295、降伏点応力度は 3780kgf/cm^2)を用いた。なお、ワイヤストレーンゲージ (W.S.G) を貼付するため、鉄筋には縦リブを削って溝が設けられている。

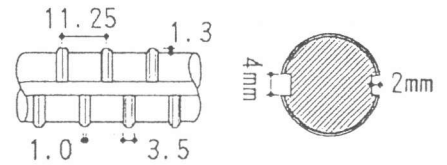


図2 鉄筋ふしおよび断面形状

2.3 荷重および測定方法

(1) 単調荷重 (実験 I)

試験体は荷重日まで湿布養生を行い、コンクリート材令7日に100tアムスラー試験機を用いて荷重を行った。鉄筋ひずみは2ふし (2.25 cm) 間隔に貼付した検長2 mmのW.S.Gにより、端部すべり量は精度1/1000 mmの高感度変位計にて測定した。

(2) 持続荷重 (実験 II)

試験体は荷重日まで湿布養生を行い、図3に示すような持続荷重をコンクリート材令14日から開始した。鉄筋ひ

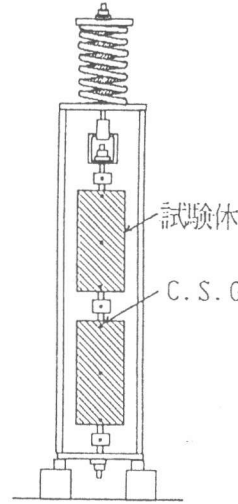


図3 持続荷重装置

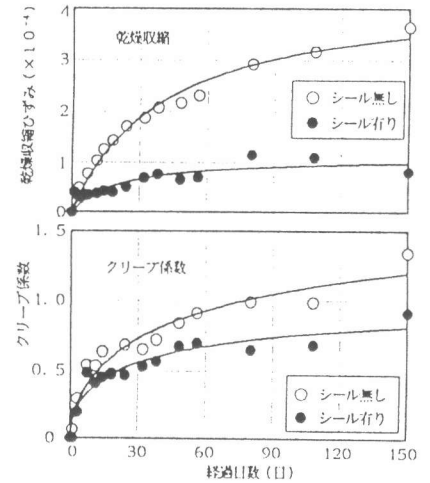


図4 乾燥収縮とクリープ性状

ずみは実験 I と同様に貼付したW.S.Gにより、コンクリートひずみはコンタクトストレインゲージ (C.S.G) にて測定し、端部すべり量は鉄筋に溶接固定した金具とコンクリート試験体端部との間の変位をC.S.Gにて測定することによって求めた。コンクリートの乾燥収縮およびクリープ (圧縮、持続応力 60kgf/cm^2) は両引試験体と同じ断面形状のコントロール試験体においてC.S.Gにて測定した。図4に乾燥収縮 S_h およびクリープ係数を示す。なお持続荷重実験は温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の恒温恒湿室で行い、174日経過した現在も継続中である。

3. 実験結果および考察

3.1 単調荷重実験 (実験 I)

(1) 鉄筋ひずみ分布

図5に鉄筋ひずみ分布を強度別に示す。記号は実測値、曲線は後述のモデル化した $\tau \sim s$ 関係を用いた解析値を示す。強度の増加とともに、鉄筋ひずみ分布の谷が深くなる傾向がみられる。

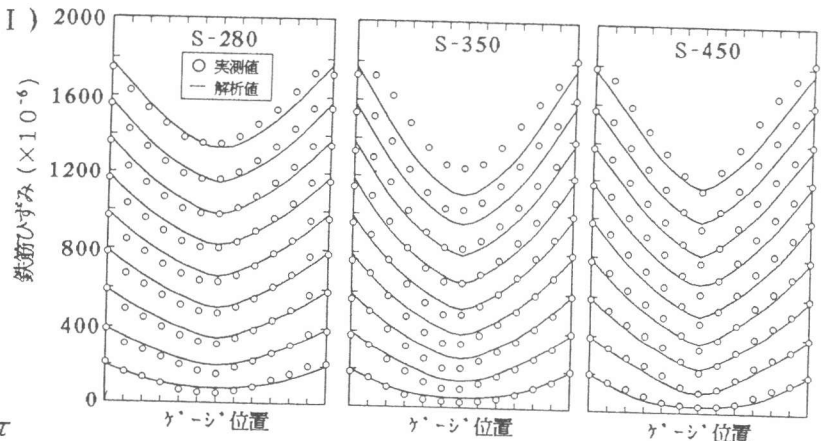


図5 単調荷重時の鉄筋ひずみ分布

(2) 単調荷重時の付着応力 τ ~ すべり s 関係

図6に鉄筋が降伏するまでの鉄筋ひずみ分布から算出した隣接する2枚のゲージの中央位置の付着応力(τ) ~ すべり(s)関係の一例として試験体S-350における $\tau \sim s$ 関係を示す。同図から、すべりが増大し、 τ がある点 (τ_a) を超えると付着剛性 K が低下することがわかる。これは内部

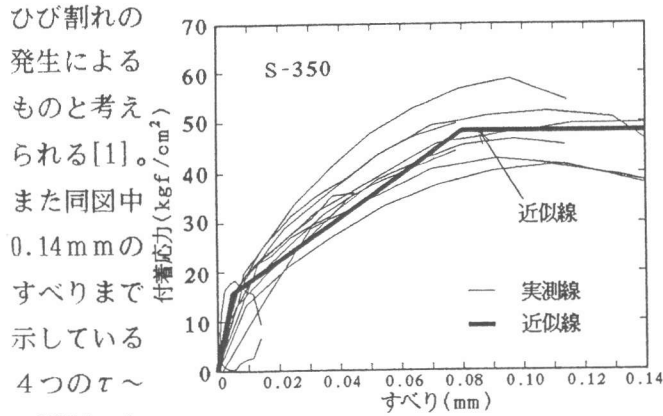


図6 単調載荷時の $\tau \sim s$ 関係

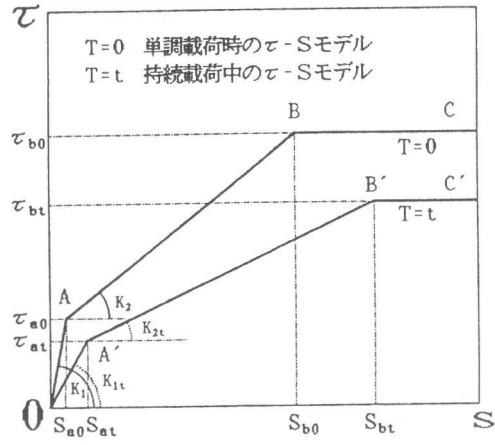


図7 $\tau \sim s$ 関係モデル

ひび割れの発生によるものと考えられる[1]。また同図中0.14mmのすべりまで示している4つの $\tau \sim s$ 関係のうち、最大付

着応力の小さい2つは両端近傍における値で、内部ひび割れの進展によって付着強度が低くなっている。 $\tau \sim s$ モデル曲線としてbilinear曲線、e関数曲線等があるが、ここでは比較的近似度がよく、解析も簡便なtrilinear曲線で近似した。同図中にその近似線を太実線で示す。

図7に単調載荷時 $\tau \sim s$ 関係のモデル(O-A-B-C)を持続載荷中の $\tau \sim s$ モデルとともに示す。各特性値(K_1 、 K_2 、 τ_a 、 S_b)を表3に示す。

(3) 端部すべり量

図8に試験体端部すべり量の1例を示す。記号は変位計による測定値、破線は鉄筋ひずみ実測値の半材長における積分値、および実線は上記のモデル化した $\tau \sim s$ 関係を用いた解析値である。解析値は積分値と実測値ともにほぼ一致している。

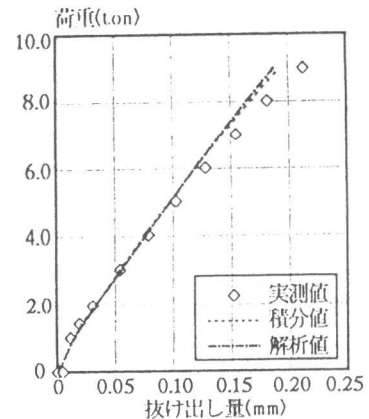


図8.単調載荷時の端部すべり量

3.2 持続載荷実験(実験II)

(1) 鉄筋ひずみ分布の経時変化

図9(a)に試験体L-1、L-2の持続載荷中の鉄筋ひずみ分布の経時変化の実測値を記号で示す。載荷直後は内部ひび割れの進展などによる付着応力の緩和によって鉄筋ひずみは増加し、その後、コンクリート乾燥収縮によるすべりが生じるので付着応力が増大し、L-1試験体は大略2~3日後、L-2試験体は一週間後から逆にやや減少している。図9(b)にコンクリート表面をシールして乾燥収縮を制御した試験体L_s-1、L_s-2の鉄筋ひずみの経時変化を示す。これらの試験体では乾燥収縮の影響を殆

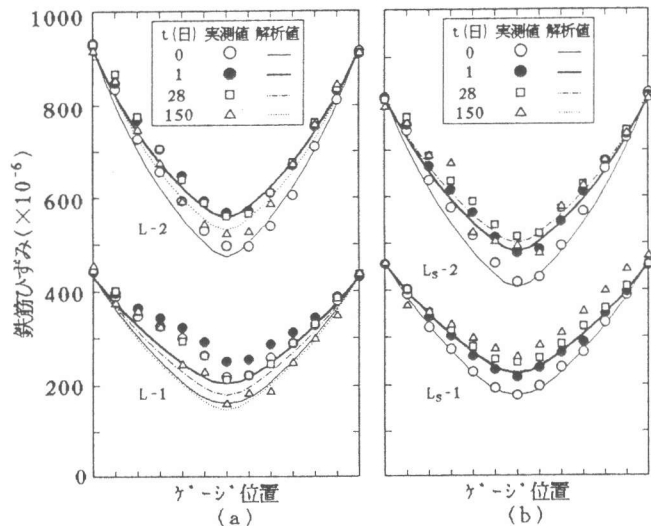


図9 鉄筋ひずみ分布の経時変化

ど受けていないため、付着応力の緩和によって鉄筋ひずみは1日以内に大きく増加していた後も若干増加している。同図中の曲線は後述の $\tau \sim s$ モデルを用いた解析値を表わしている。

(2) 持続荷重下の $\tau \sim s$ 関係

1) $\tau \sim s$ 関係

図10(a)、(b)にそれぞれ乾燥収縮を制御していないL-2試験体および制御したL_s-2試験体における鉄筋ひずみ分布から求めた単調および持続荷重下の $\tau \sim s$ 関係を示す。図中、原点から1つ目の記号○までは持続応力までの単調増加時の $\tau \sim s$ 関係で、○印は持続荷重開始時、2つ目の記号●は持続荷重開始後1日目、後は持続荷重中の関係を示している。両試験体において持続荷重開始後1日間ですべりが増加するとともに付着応力が大きく減少している。その後L-2試験体では初荷重時よりやや小さい傾きでsの増大とともに τ も増加し、L_s-2試験体では乾燥収縮が少ないためすべり量が小さく、持続荷重開始時にすべりの大きい端部における $\tau \sim s$ 関係を除いて τ はほぼ一定値を保持している。

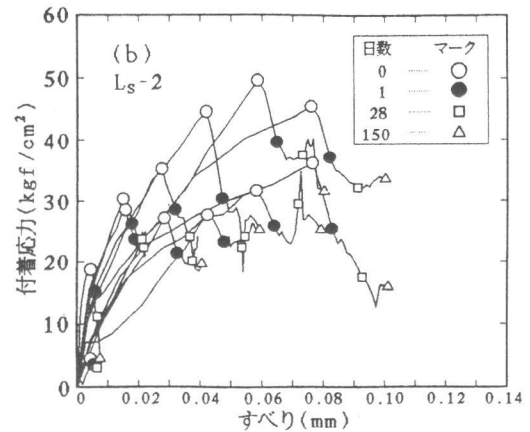
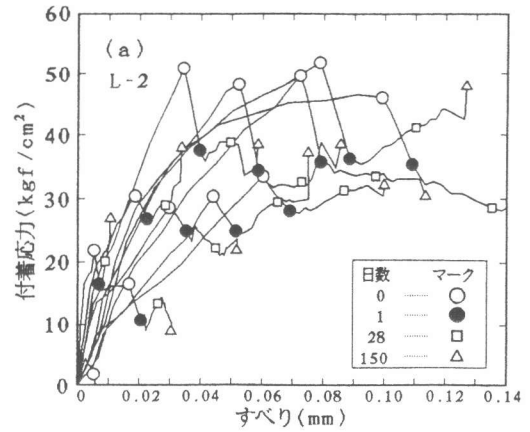


図10 $\tau \sim s$ 関係の経時変化

2) τ 、Kの経時変化

図11(a)および(b)に、それぞれ各測定位置の付着応力 τ および付着剛性K(点(τ, s)と原点と結んだ直線の傾き)の初荷重時の値に対する比の平均値の経時変化を示す。(a)図から、1日目に τ が初荷重時の0.75倍に、その後、シールしている試験体はほぼ一定値を示し、シールしていない試験体は時間とともに回復していることがわかる。(b)図からは、シールに関係なく両試験体ともに最初の1日間に付着応力の緩和によって付着剛性Kは大きく低下して、初荷重時の0.75倍になり、その後ゆっくり低下し、28日後は初荷重時の0.6倍で一定を保持している。このような現象は既報[2]の実験においても得られている。

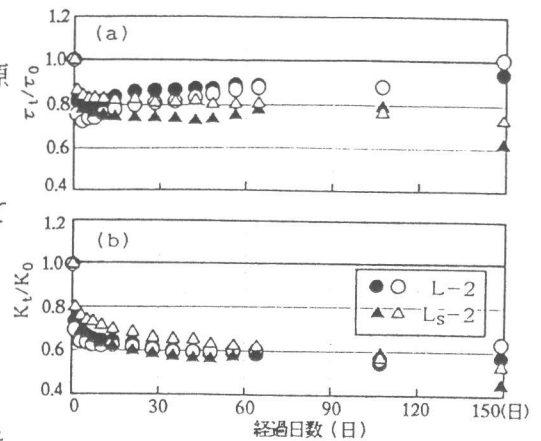


図11 τ 、Kの経時変化

3) モデル化

持続荷重開始1日以降の持続荷重中の $\tau \sim s$ 関係を、上述の τ とKの経時変化から、前掲図7に示すようなtri-linear(O-A'-B'-C')で近似化した。第1の屈折点A'の τ_{at} および付着剛性 K_{1t} 、 K_{2t} は次のとおりである。

$$\tau_{at} = 0.75 \tau_{a0} \quad t \geq 1$$

τ_{a0} : $t = 0$ の時の τ_a

$$K_t = \begin{cases} 0.75 K_0 & t = 1 \\ (0.75 - 0.05(t-1)^{1/3}) K_0 & 1 < t < 28 \\ 0.6 K_0 & t \geq 28 \end{cases}$$

K_0 : $t=0$ の時の K 、 t : 荷重日数

また第2屈折点 B' の S_{bt} は今回の実験は持続応力が低く、 B 点付近のデータが得られなかった
ので、既報[2]の実験結果を参考にして、 $S_{bt} = 1.2 S_{b0}$ とした。

4) 付着解析

コンクリートの引張クリープを考慮した持続荷重時における付着基本式は次のように表せる[2]

$$\frac{d^2 s_x(t)}{dx^2} = \frac{1+n'p}{E_s A_s} U \cdot \tau_x(t) \quad (1)$$

$n' = E_s / E_c'$ 、 $E_c' = E_c / (1 + \phi)$ 、 $p = A_s / A_c$

E_s 、 A_s 、 U : 鉄筋のヤング係数、断面積、周長。

E_c 、 A_c 、 ϕ : コンクリートのヤング係数、断面積、クリープ係数

図7に示す $\tau \sim s$ 関係を用いて、境界条件および連続条件を満足するように式(1)の微分方程式を解けばすべり分布が求まり、それより付着応力、鉄筋ひずみの分布が求まる。本文中の解析値はすべて本解析法を用いて解析した。

(3) 端部すべり量の経時変化

図12に持続荷重開始後の端部すべり実測値と解析値を示す。

端部すべりは荷重後1日に付着応力の緩和によって急増し、その後は乾燥収縮の影響を受けて緩やかに増加している。上述の $\tau \sim s$ モデルおよび付着解析法を用いた解析値も同図中に示しているが、端部すべりの時間経過に伴う増加量の解析値は実測値をほぼ捉えている。

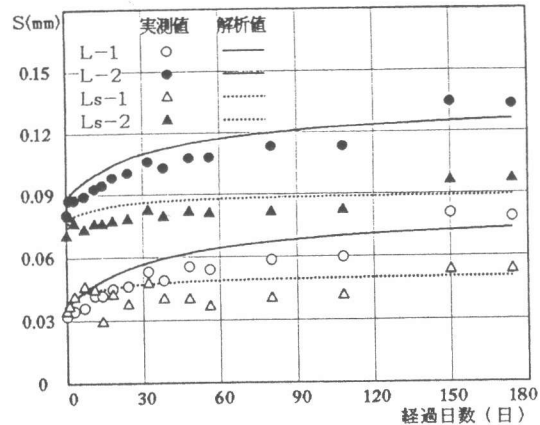


図12 端部すべり量の経時変化

4. 既往実験結果の解析

上記に提案した持続荷重下における $\tau \sim s$ モデルの適用性を検証するため、既往の実験結果の解析を試みた。

(1) 本学の研究[3]

実験はRC両引試験体の234日間にわたる持続荷重実験である。ただしL-15-1とL-15-2は147日間である。試験体は断面 10×10 cm、長さ22.5 cmおよび断面 15×15 cm、長さ31.5 cmのコンクリート柱体の断面中央にD19の横ふし異形鉄筋を埋め込んだRCプリズムである。試験変数は鉄筋応力(1000と2000kgf/cm²)および乾燥収縮量である。解析用データとして乾燥収縮ひずみ、クリープ係数は当該の実験のデータを、 $\tau \sim s$ 関係は本論文に

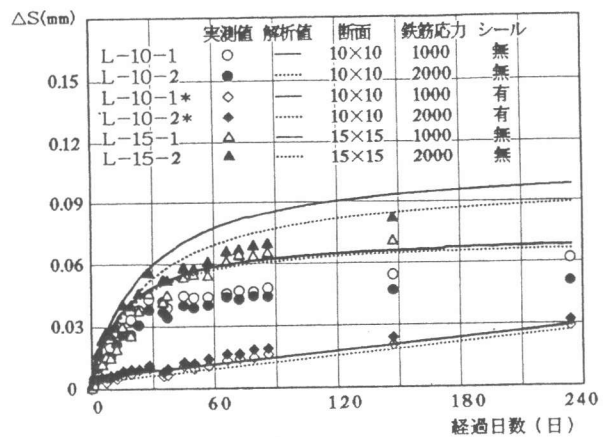


図13 抜け出し量の経時変化

提案したものをを用いて、持続荷重中の端部抜け出し量の増加量を解析した。その結果を図13に示す。解析値はほぼ実測値を捉えている。

(2) 長滝、佐藤、鯉淵の研究[4]

実験はコンクリートの若材令期における付着クリープ特性の把握を目的に実施されたRC両引試験体の49日間にわたる持続荷重実験である。試験体は断面20×20cm、長さ100cmのコンクリート柱体の断面中央にD16の横ふし異形鉄筋を埋め込んだRCプリズムである。鉄筋応力が2000kgf/cm²で大

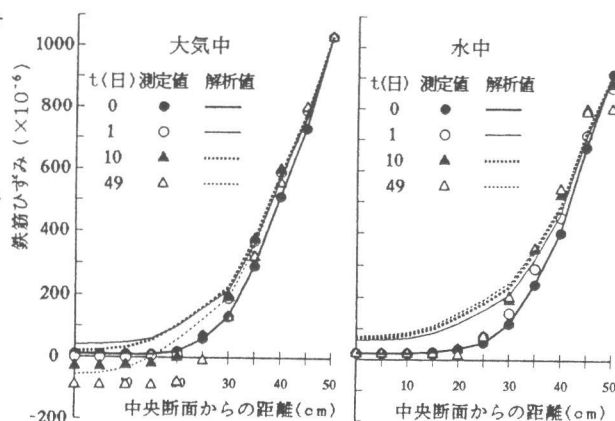


図14 鉄筋ひずみ分布

気中と水中に保存試験された二つの試験体について、持続荷重中の鉄筋ひずみ分布を解析した。乾燥収縮ひずみ、クリープ係数は参考文献[4]から読み取り、 $\tau \sim s$ 関係は本文に提案してものを用いた。その結果を図14に示す。解析値はほぼ実測値を捉えている。

以上、二つの既往の実験の検討からも本実験から得られた持続荷重中の $\tau \sim s$ モデルの妥当性が確かめられた。

5. 結論

1) 単調荷重から得られた $\tau \sim s$ 関係をtri-linear近似し、そのモデルを用いた付着解析によって、鉄筋ひずみ分布やすべり量をよく算定できた(図5、図8)。

2) 持続荷重下における付着応力 τ とすべり s は荷重後1日間に大きく動き、以後は主に乾燥収縮に応じて徐々に変化する(図10)。乾燥収縮を受けている試験体は s の増大するとともに τ も徐々に増加するに対して、乾燥収縮を受けていない試験体は s の増大量は少なく τ がほとんど変わらない。

3) 持続荷重下における $\tau \sim s$ 関係をモデル化し、これを用いてコンクリートのクリープ、乾燥収縮を考慮した付着解析を行い、鉄筋ひずみ分布および端部すべり量の経時変化を解析的に把握することができた(図9、図12、図13、図14)。

謝辞 本研究の実験、データ整理において本学大学院生の鍋沢斤吾君に多大な協力を頂いた。また本研究は文部省科学研究費補助金(一般B:代表者 鈴木計夫)の交付を受けた研究の一部として実施したもので、ここで合わせて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 藤井・森田: 異形鉄筋の付着応力~すべり関係に関する考察、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、pp.37~44、1983.10
- 2) 鈴木・大野・横田: 持続荷重下における異形鉄筋とコンクリートの付着特性、セ技年報40 pp.514~517、1986
- 3) 鈴木・大野・堀・李: 持続荷重下における付着応力~すべり関係と片持梁の長期たわみ、日本建築学会近畿支部研究報告集、第31号構造系、pp.53~57、1991.5
- 4) 長滝・佐藤・鯉淵: 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