

論文 鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅の算定

劉 勇*1・大野義照*2・中川隆夫*3

要旨：ひび割れが生じている部材を想定した鉄筋コンクリートプリズム両引き試験体の単調載荷試験及び持続載荷試験を行い，付着応力～すべり関係を検討した。その結果を用いた付着解析によって，鉄筋(D6,D10,D13)を埋設したコンクリートの一軸拘束ひび割れ試験で得られた乾燥収縮ひび割れ幅の算定を試み，付着解析より得られる鉄筋ひずみから乾燥収縮によるひび割れ幅を算定できることを示した。

キーワード：一軸拘束試験，乾燥収縮，ひび割れ幅，付着解析，鉄筋ひずみ

1. はじめに

壁などにおける乾燥収縮等に起因する乾燥収縮ひび割れの幅は，既報¹⁾において，鉄筋ひずみ分布を捉えることができれば，収縮ひび割れ幅を算定できることを示した。

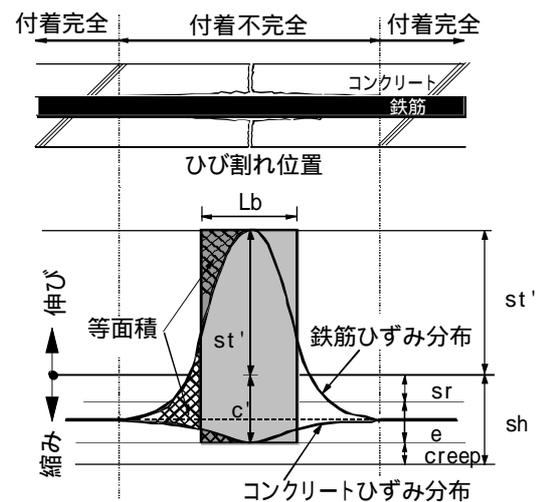
本報は，鉄筋を埋設した角柱体のJIS原案²⁾に準拠して行った一軸拘束ひび割れ試験結果において，RCプリズム両引き試験体の単調載荷試験及び持続載荷試験より得られた付着応力～すべり関係を用いた付着解析によって，乾燥収縮ひび割れ幅の算定を試みた。本報で対象とするひび割れでは，梁の曲げひび割れの場合と異なって鉄筋比が小さくひび割れ定常状態（応力が増加しても新たなひび割れが生じない状態）に至っていない。従って，ひび割れ間において鉄筋とコンクリート間にずれが生じていない領域が存在している。なお，収縮応力の他に曲げ応力あるいは引張応力が加わるひび割れ定常状態のひび割れ幅の算定には，曲げひび割れ幅の計算法³⁾を用いることができよう。

2. ひび割れ幅の算定式

2.1 基本的な考え方

鉄筋を埋設した一軸拘束ひび割れ試験体におけるひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートのひずみ分布を模式的に示せば図-1のようになる。コンクリートの乾燥収縮によってひび割れ発生直前におけるRC拘束試験体ひずみは sh sr で，ひび割れが発生するとひび割れ位置の鉄筋

ひずみは増大して st' となる。一方，ひび割れ近傍のコンクリートのひずみは付着による拘束がなくなり， sh $creep$ となる。ひび割れ幅は鉄筋の伸びとコンクリートの収縮変形差で表され，図中の曲線で囲まれた部分の面積に相当する。



- sh：ひび割れ発生直前の自由乾燥収縮ひずみ
- sr：外部拘束鋼材によって拘束されたコンクリートひずみ
- e：ひび割れ発生直前のコンクリートの伸び弾性ひずみ
- creep：コンクリートのクリープひずみ
- st'：ひび割れ位置の鉄筋ひずみ

図-1 ひび割れ近傍模式図

*1 大阪大学大学院 工学研究科建築工学専攻 工修（正会員）
 *2 大阪大学教授 工学研究科建築工学専攻 工博（正会員）
 *3 大阪大学助手 工学研究科建築工学専攻 （正会員）

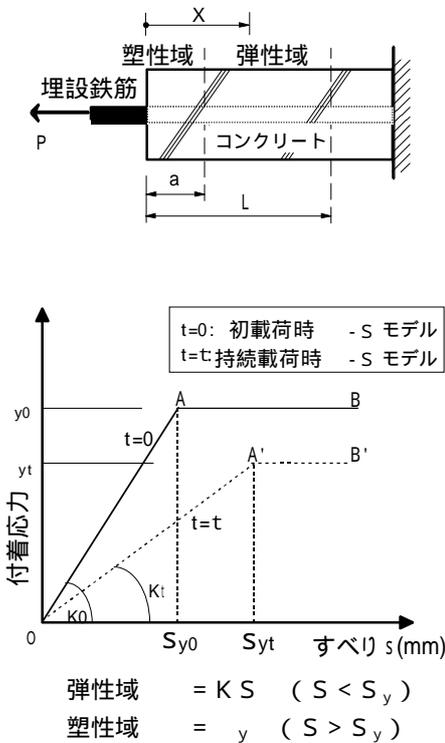
また等価付着消失長さ $L_b^{(1)}$ を定義すれば、ひび割れ幅 W は式(1)で計算される。

$$W = \{ \varepsilon_{st} + (\varepsilon_{sh} - \varepsilon_{creep}) \} \times L_b \quad (1)$$

2.2 鉄筋ひずみ分布の計算

(1) 付着解析モデル

付着解析は、鉄筋とコンクリート間の付着応力～相対すべり量 s 関係を用いて鉄筋ひずみ分布を解析的に定量化することである。ここでは、ひび割れ位置から片側の試験体を取り出した図-2に示す解析モデル⁴⁾を用いて、付着解析を行う。



k_0, y_0 : 単調荷重時 ($t = 0$) における
～S曲線の付着剛性 k , 付着応力 y
 k_t, y_t : 持続荷重時 ($t = t$) における
～S曲線の k, y

図-2 付着解析モデル

(2) 基本式

図-2に示す片引き材を考え、端部に作用する力を P として、コンクリートひずみに引張クリープと乾燥収縮を考慮すると次の付着基本式が誘導できる。

$$\frac{dS_x(x)}{dx} = \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_c A_c} \right) P_{sx}(t) - \frac{P}{E_c A_c} + \varepsilon_{sh}(t) \quad (2)$$

$$\frac{d^2 S_x(t)}{dx^2} = \frac{1+n' p_t}{E_s A_s} U \tau_x(t) \quad (3)$$

ただし: $n' = E_s / E_c$, $E_c = E_c / (1 + \phi)$

$$p_t = A_s / A_c$$

E_s, A_s, U : 鉄筋のヤング係数, 断面積, 周長

E_c, A_c : コンクリートのヤング係数, 断面積

: コンクリートのクリープ係数

上式において $\tau_x(t) = f(S_x(t))$ という付着応力～すべり S 関係が与えられれば、境界条件を与えることにより、鉄筋ひずみ分布が求まる。

3. 実験概要

3.1 使用材料

コンクリートは普通ポルトランドセメントを用いたレデューミクストコンクリートで、表-1にコンクリートの力学的性質を示す。スランブは20.0cm, 空気量は4.0%であった。鉄筋は横ふし異形鉄筋D6, D10及びD13を用いた。

表-1 コンクリートの強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)
7日	22.6	2.1	23.7
14日	30.5	2.1	24.1
21日	30.2	2.2	22.3
28日	33.1	2.6	25.6

試験体の種類を表-2に示す。拘束ひび割れ試験体及びRCプリズム両引き試験体の形状を図-3に示す。拘束ひび割れ試験体は各条件に対して2体製作した。比較のため、無筋の拘束ひび割れ試験体も2体製作した。拘束鋼材比は市販の軽みぞ型鋼(呼び名1173, $100 \times 40 \times 40mm$, 厚さ2.3mm, 断面積は $397mm^2$)を用いた7.9%のRタイプと、厚さ1.6mmの平板を加工して製作した軽みぞ型鋼($100 \times 50 \times 50mm$, 断面積約 $310mm^2$)を用いた6.2%のSタイプの2種類である。

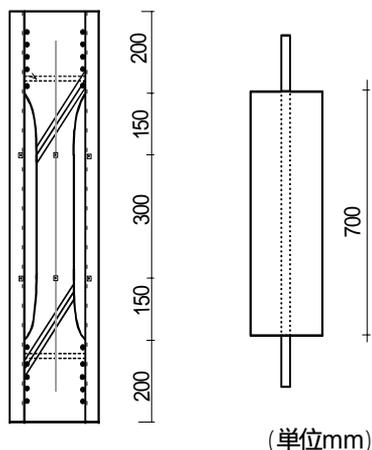
表 - 2 試験体の種類

a)拘束ひび割れ試験体

試験体記号	呼び名	拘束鋼材比	試験区間断面高さ×幅 (mm)
RD06	D 6	7.9%	100×100
RD10	D 10		100×100
RD13	D 13		100×100
RD00		無筋	100×100
SD06	D 6	6.2%	100×100
SD10	D 10		100×100
SD13	D 13		100×100
SD00		無筋	100×100

b)RC両引試験体

試験体記号	呼び名	寸法 (mm) (長さ×高さ×幅)
BD06	D 6	700×130×130
BD10	D 10	700×170×170
BD13	D 13	700×180×180



a)拘束試験体形状 b)両引き試験体形状

図 - 3 試験体形状

乾燥収縮試験体は100×100×500(mm)と180×180×500(mm)の2種類の角柱体を、圧縮クリープ試験体は100×100×500(mm)の角柱体を各2体製作した。RCプリズム両引き試験体は梁に比べて鉄筋比の少ない壁などを対象とするため、鉄筋D6、D10及びD13を埋設した試験体断面はそれぞれ130×130mm、170×170mm及び180×180mmで、鉄筋比はそれぞれ0.18%、0.25%、0.39%である。試験体長さはいずれも700mmで、単調載荷用試験体は各2体、持続載荷用試験体は各1体製作した。

3.3 実験方法及び測定方法

(1) 拘束ひび割れ試験

試験は20±1%RH、60±5%の恒温・恒湿室で実施した。製作及び試験は「JIS原案のコンク

リートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」に準拠して行った。各試験体ともコンクリート打設後、型枠のまま湿潤養生し、材齢7日に脱型後、乾燥を開始した。なお、ひび割れを試験体中央に生じさせるため、同位置両側面に厚さ2mmのプラスチック板を深さ15mmまで埋設したスリットを設けた。ひび割れ幅を測定のため、コンタクトストレインゲージ(C.S.G)を用いて、試験体中央部長手方向(検長100mm)で5区間の変位を測定した。また箔ゲージ(F.S.G)を用い、埋設した鉄筋のひずみや拘束鋼材のひずみの経時変化を4時間毎に計測した。鉄筋D6、D10、D13における箔ゲージの貼付間隔はそれぞれ50mm、52mm、55mmである。

(2) RCプリズム試験体の単調載荷

試験体はコンクリート打設後、型枠のまま湿潤養生し、材齢7日に脱型後、載荷日まで20±1%RH、60±5%の恒温・恒湿室で保存した。材齢21日に100tアムスラー試験機を用いて載荷を行った。鉄筋ひずみは拘束ひび割れ試験と同様に鉄筋D6、D10、D13にはそれぞれ50mm、52mm、55mm間隔で貼付した箔ゲージによって測定した。

(3) RCプリズム試験体の持続載荷

20±1%RH、60±5%の恒温・恒湿室で実施した。試験体はコンクリート打設後、材齢14日まで湿潤養生し、同材齢から図-4に示す持続載荷を開始した。持続荷重の大きさは用いた鉄筋のほぼ長期許容応力度に相当する6700N、14000N、25300Nである。鉄筋ひずみは単調載荷試験と同様にして求めた。

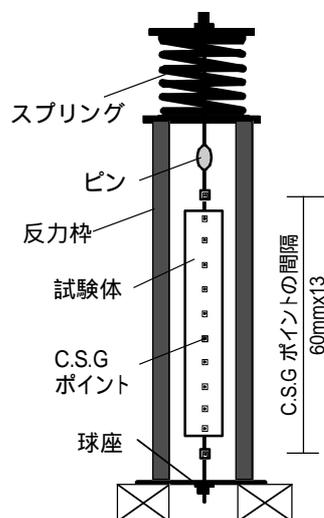


図 - 4 持続載荷装置

コンクリートの乾燥収縮及び圧縮クリープ試験(載荷開始材齢:14日 ,持続圧縮応力:6N/mm²)では,コンクリートのひずみはC.S.G (検長300mm)にて測定した。

4 実験結果及び考察

4.1 乾燥収縮・クリープ係数

乾燥収縮ひずみ, 圧縮クリープ係数の経時変化を図-5に示す。図中の曲線は最小自乗法により求めた回帰式による曲線である。

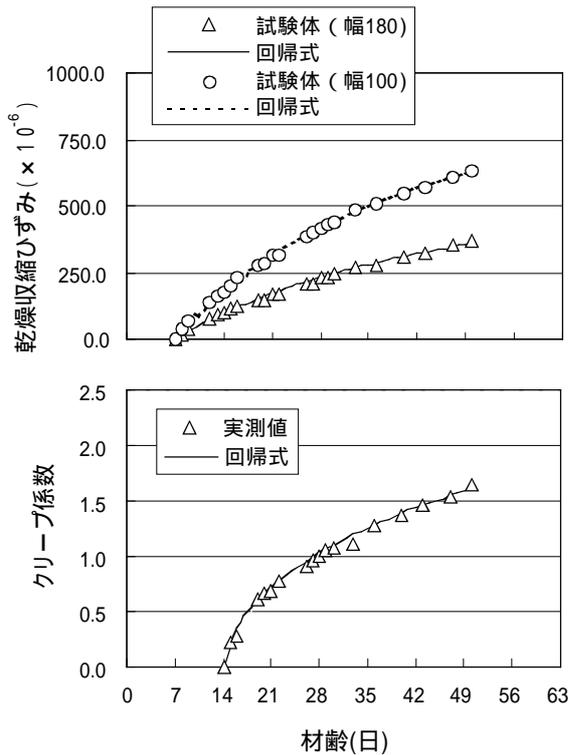


図 - 5 乾燥収縮ひずみ, クリープ係数

4.2 RCプリズム試験体の単調載荷試験

(1) 付着応力 ~ すべり s の関係

単調載荷試験から得た付着応力 ~ すべり s の関係の1例を, 図-6に示す。

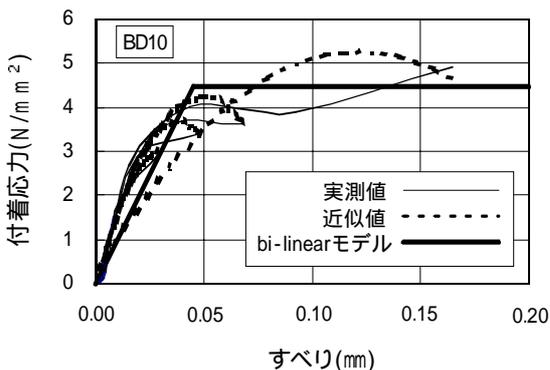


図 - 6 単調載荷時の ~ s 関係

ここで, 付着応力 τ は隣接する位置の鉄筋ひずみ差から算定した中央位置における付着応力である。図中の細実線は実測値で, 破線は実測値を3次曲線で表した回帰曲線である。太実線は近似曲線を $\tau_y = 0.9\tau_{max}$ としてbi-linearで表した ~ s モデル曲線である。各試験体における各特性値を表-3に示す。

表 - 3 単調載荷時 ~ s モデルの特性値

試験体名	K(N/mm ² /mm)	y (N/mm ²)
BD06	1200	5.3
BD10	1200	4.5
BD13	1200	5.3

(2) 鉄筋ひずみ分布

図-7に1例としてBD10試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。記号は測定値で, 曲線は前述のモデル化した付着応力 ~ すべり s 関係を用いた付着解析による解析値である。解析値はほぼ実験値を捉えている。

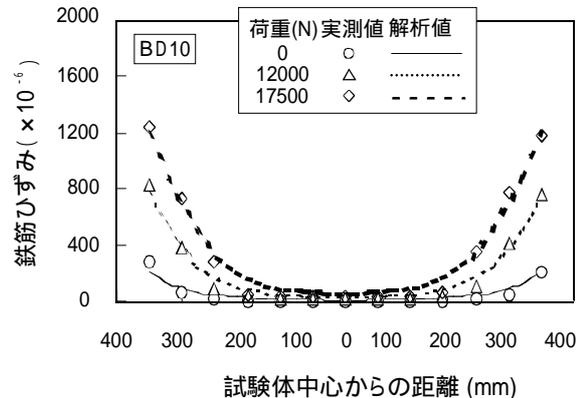


図 - 7 単調載荷試験体の鉄筋ひずみ

4.3 RCプリズム持続載荷試験

(1) 付着応力 ~ すべり s の関係

既往の研究⁴⁾では, 持続荷重下において付着応力の緩和によって持続載荷材齢 t 日における付着剛性 K_t 及び τ_{yt} は単調載荷時より大きく低下する。そこで, 単調載荷試験で得られた ~ s 関係をモデル化した関係を基に, 付着剛性 K_t を次式のように時間 t の関数で表した。t は持続載荷日数である。

$$K_t = (0.25 + 0.5t^{0.2}) / t^{0.2} K_0$$

$$\tau_{yt} = 0.75\tau_0 \quad (4)$$

(2) 鉄筋ひずみ分布

図-8に持続荷重日数0, 7, 36日におけるBD10試験体の鉄筋ひずみ分布を示す。記号は測定値で、実線は前述の $\sim s$ モデルを用いた付着解析による解析値である。端部近傍では持続荷重中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が若干増加しているが、中央部では鉄筋はコンクリートと一体になって収縮している。

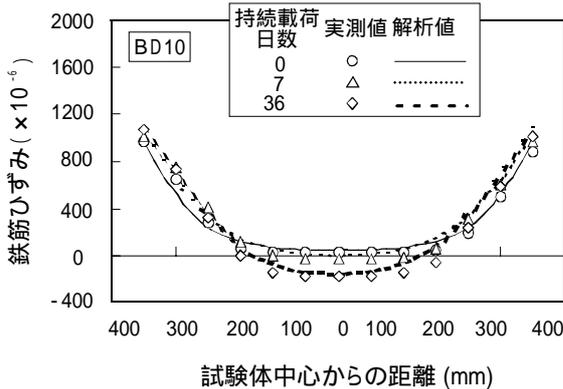


図 - 8 持続荷重試験体の鉄筋ひずみ

4.4 一軸拘束試験

(1) 鉄筋ひずみ分布

以下にひび割れ位置の鉄筋応力が a) 既知の場合、b) 未知の場合について鉄筋ひずみ分布を計算する。

a) 試験体 RD06 のひび割れ近傍の鉄筋ひずみ実測値を図-9に示す。ひび割れ位置における鉄筋応力はひび割れ断面の鉄筋ひずみ測定値から与え、前述の $\sim s$ モデルを用いて、付着解析より求めた材齢 21 日、50 日における鉄筋ひずみ分布の解析値を同図に示す。解析値は実測値とほぼ一致している。

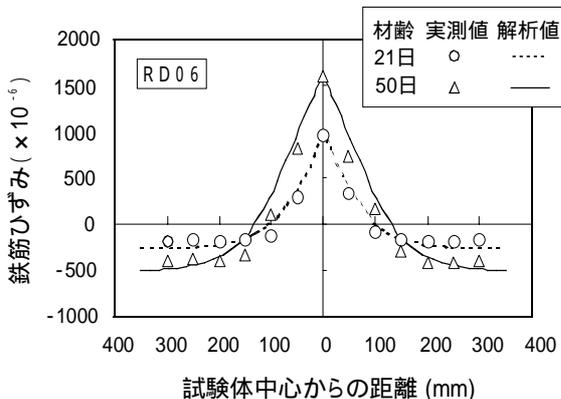


図 - 9 拘束試験体の鉄筋ひずみ分布 (1)

b) 一軸拘束試験体では、ひび割れが発生すると拘束鋼材と鉄筋による拘束度が低下するので、鉄筋ひずみは図-10に示す鉄筋と拘束鋼材の変形及び力の釣合条件から求められる。

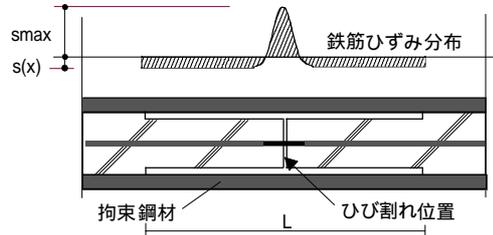


図 - 10 鉄筋ひずみ分布模式図

試験体の区間 L の鉄筋と拘束鋼材の変形が等しいことにより式 (5) が、

$$\int_0^L \epsilon_s(x) dx = \epsilon_R L \quad (5)$$

また、力の釣合条件により式 (6) が得られる。

$$\epsilon_{s \max} E_s A_s = \epsilon_R E_s A_R \quad (6)$$

ここでは ϵ_R : 拘束鋼材ひずみ A_R : 拘束鋼材の断面積で、 E_s, A_s は鉄筋のヤング係数、鉄筋の断面積である。式 (5) に式 (6) を代入して次式 (7) が得られる。

$$\int_0^L \epsilon_s(x) dx = \epsilon_{s \max} \frac{A_s}{A_R} \cdot L \quad (7)$$

式 (7) を収束計算することにより鉄筋ひずみ分布が求まる。前述した $\sim s$ モデルを用いた付着解析と収束計算によって求めた材齢 21 日、50 日における試験体 RD06 の鉄筋ひずみ分布の解析値を図-11に示す。

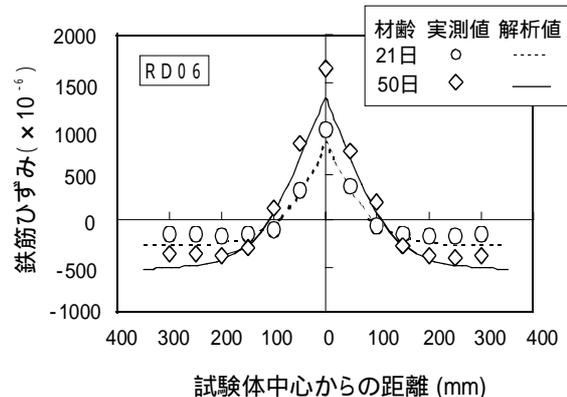


図 - 11 拘束試験の鉄筋ひずみ分布 (2)

同図には、実測値も示している。ひび割れ位置の鉄筋ひずみの解析値は実測値とほぼ一致し、解析した鉄筋ひずみ分布も実測値と対応している。

4.5 ひび割れ幅

上述のb)の方法によって得られた鉄筋ひずみ分布から計算した材齢21日、材齢50日における収縮ひび割れ幅 W を計算値1として表-4に示す。同表には、ひび割れ幅の実測値及び実測した鉄筋ひずみ分布から計算したひび割れ幅(計算値2)を示している。ひび割れ幅計算値1は、鉄筋ひずみ分布の解析値が実測値とほぼ一致しているから計算値2とほぼ対応している。また、ひび割れ幅の計算値は実測値とほぼ一致している。同表には、式(1)で定義した L_b も示している。 L_b の計算値1,2はそれぞれ鉄筋ひずみの計算値及び実測値から算出した値である。等価付着消失長さ L_b は式(1)から分るように曲げひび割れ幅計算式におけるひび割れ間隔に相当する。D6, D10, D13の等価付着消失長さはひび割れ発生直後で70~118mm, 材齢50日では、127~182mmであった。

表-4 ひび割れ幅計算値と付着消失長さ L_b

材齢	試験体	ひび割れ幅 W (mm)			L_b (mm)	
		実測値	計算値1	計算値2	計算値1	計算値2
21日	RD06	0.10	0.10	0.11	92	90
	RD10	0.06	0.09	0.08	122	104
	RD13	0.08	0.07	0.06	119	91
	SD06	0.09	0.10	0.11	110	100
	SD10	0.04	0.06	0.08	111	118
	SD13	0.01	0.02	0.02	93	70
50日	RD06	0.26	0.30	0.28	150	127
	RD10	0.22	0.24	0.22	168	153
	RD13	0.14	0.17	0.16	151	147
	SD06	0.24	0.28	0.26	162	129
	SD10	0.16	0.23	0.23	168	163
	SD13	0.14	0.14	0.18	143	182

5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) RCプリズム両引き試験における付着応力~すべり s の関係をbi-linear曲線にモデル化し、そのモデルを用いた付着解析によって、拘束試験体のひび割れ発生後の鉄筋ひずみ分布を捉えることができた。また、鉄筋ひずみ分布から収縮ひび割れ幅が算定できた。
- (2) コンクリートのクリープ及び乾燥収縮を考慮

した付着解析によって、長期の収縮ひび割れ幅も計算できる。

- (3) 曲げひび割れ幅計算式におけるひび割れ間隔に相当するD6, D10, D13の等価付着消失長さはひび割れ発生直後で70~118mm, 材齢50日では、127~182mmであった。

謝辞 本研究は本学学生田和正充君及びタイコー千里工場の協力を得て行ったものであり、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 劉勇, 大野義照, 中川隆夫, 林田都芳: コンクリートの収縮ひび割れ幅に及ぼす鉄筋量の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, No.2, pp.751~756, 2001
- 2) 鈴木計夫, 大野義照, 中川隆夫, 太田寛: コンクリートの収縮拘束ひびわれ試験, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.25~28.1988
- 3) 鈴木計夫, 大野義照: プレストレスト鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅に関する研究その1, 日本建築学会論文報告集, 第303号, pp.9~19, 1981,5
- 4) 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型鉄筋の付着応力~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