

## 論文 鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅算定法の検討

劉 勇\*<sup>1</sup>・大野義照\*<sup>2</sup>・中川隆夫\*<sup>3</sup>

**要旨：**鉄筋 D6 を埋設したコンクリートの一軸拘束ひび割れ試験体の材齢 100 日までのひび割れ挙動ならびに D10, D13 および D16 を埋設した一軸拘束ひび割れ試験体の材齢 70 日までの鉄筋ひずみ分布の変化やひび割れ挙動を調べた。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で得られた付着応力～すべり関係を用いた付着解析によって、長期乾燥収縮ひび割れ幅と等価付着消失長さ  $L_b$  を算定し、既報<sup>1) 2)</sup> で提示した収縮ひび割れ幅計算法を検証した。

**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<sup>1)</sup>において、鉄筋ひずみ分布を捉えることができれば、算定できることを示した。さらに、前報<sup>2)</sup>において、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、ひび割れ発生後の鉄筋ひずみ分布を捉え、長期の乾燥収縮ひび割れ幅も計算できることを報告した。

本報では、前報<sup>2)</sup>の鉄筋を埋設した角柱体の一軸拘束ひび割れ試験のうち、D6 を埋設した試験体の 100 日間のひび割れ挙動ならびに、新たに実施した D10, D13 および D16 を埋設した一軸拘束ひび割れ試験の材齢 70 日までのひび割れ挙動について検討する。付着解析によって、鉄筋ひずみ分布を求め、ひび割れ幅を計算するとともに、曲げひび割れ幅の算定式におけるひび割れ間隔に相当する等価付着消失長さ  $L_b$  についても考察した。なお、一軸拘束ひび割れ試験体でのひび割れ位置の鉄筋応力の計算法は前報<sup>2)</sup>で述べているので、本報では鉄筋応力は既知として実測値を用いて付着解析を行っている。

## 2. 収縮ひび割れ幅の算定式

2.1 長期収縮ひび割れ幅の算定式<sup>2)</sup>

収縮ひび割れ幅は、図-1 のように、ひび割れ近傍の鉄筋とコンクリートのひずみ分布曲線で

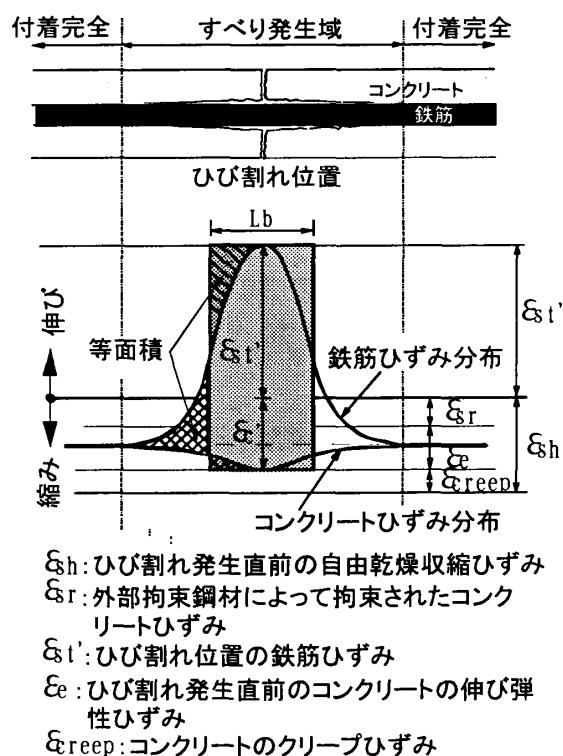


図-1 ひび割れ近傍模式図

\*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）

囲まれた部分の面積で計算される。等価付着消失長さ  $L_b$  を定義すれば、収縮ひび割れ幅は式(1)で計算される<sup>2)</sup>。

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

なお、式(1)中の記号は図-1に示している。

## 2.2 鉄筋ひずみ分布の計算

本報では、図-2に示す付着モデル<sup>3)</sup>を用いた付着解析を行い、鉄筋ひずみ分布を求めた。拘束ひび割れ試験体(I)と同時に製作したRC柱体の両引き試験から得られた付着応力  $\tau \sim$  すべり  $S$  関係から  $\tau \sim S$  モデルの特性値の  $K_0, \tau_y$  を与えた。付着剛性  $K_t$  を次式のように時間  $t$  の関数で表した<sup>3)</sup>。

$$\begin{aligned} K_t &= (0.25 + 0.5t^{0.2}) / t^{0.2} K_0 \\ \tau_{yt} &= 0.75\tau_0 \end{aligned} \quad (2)$$

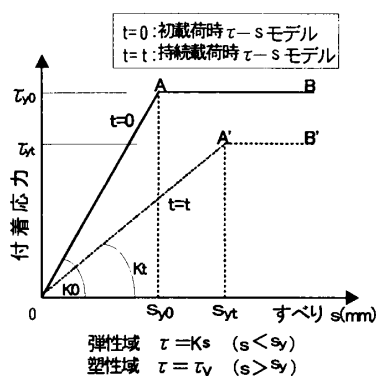


図-2 付着解析モデル

## 3. 拘束ひび割れ試験 (I)

### 3.1 使用材料及び乾燥収縮・クリープ係数

使用した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ィーミクストコンクリートである。材齢 28 日におけるコンクリートの圧縮強度は  $33.1\text{N/mm}^2$ 、引張強度は  $2.6\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数は  $25.6\text{KN/mm}^2$  であった。試験は D6, D10, D13 を用いて行ったが、明瞭な貫通ひび割れが生じた D6 試験体について検討する。

一軸拘束ひび割れ試験体の形状・寸法は JIS 原案の乾燥収縮ひび割れ試験体に準拠したもの

で、拘束材には市販の軽みぞ型鋼 ( $100 \times 40 \times 40\text{mm}$ , 厚さ  $2.3\text{mm}$ , 断面積は  $397\text{mm}^2$ ) と厚さ  $1.6\text{mm}$  の平板を加工した軽みぞ型鋼 ( $100 \times 50 \times 50\text{mm}$ , 断面積  $310\text{mm}^2$ ) を用いた (以下、それぞれ R と S と呼ぶ)。乾燥収縮試験体は  $100 \times 100 \times 500(\text{mm})$  の角柱体で、圧縮クリープ試験体は  $100 \times 100 \times 500(\text{mm})$  の角柱体であった。乾燥収縮ひずみ、圧縮クリープ係数の経時変化を図-3に示す。図中に最小自乗法により求めた実測値の回帰式による値を示している。なお、実験概要と 50 日までの結果は前報<sup>2)</sup>に報告している。

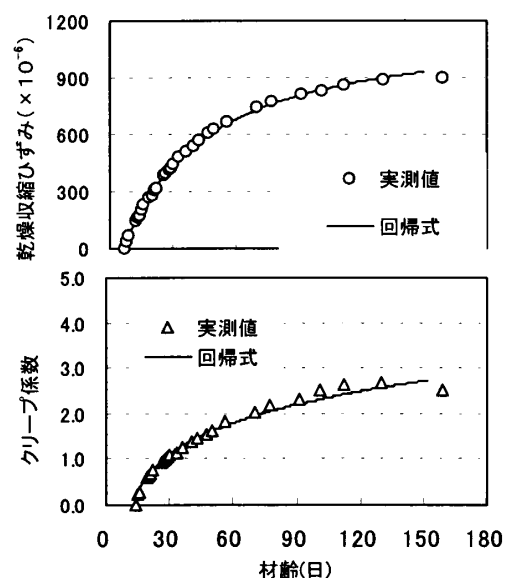


図-3 乾燥収縮ひずみ、クリープ係数 (1)

### 3.2 鉄筋ひずみ分布

材齢 21, 50, 80, 100 日における試験体 RD06, SD06 のひび割れ近傍の鉄筋ひずみ分布の実測値を図-4に示す。材齢 80 日と 100 日のひずみ分布は重なっている。付着解析 ( $\tau_y = 5.3\text{N/mm}^2$ ,  $K_0 = 1200\text{N/mm}^2/\text{mm}$ ) によって得られた同材齢の鉄筋ひずみ分布の解析値も同図中に示す。図中にコンクリートのひずみ分布も併せて示している。解析値は実測値とほぼ一致している。

### 3.3 ひび割れ幅の経時変化

RD06, SD06 試験体のひび割れ幅の経時変化を図-5に示す。同図には鉄筋ひずみ分布実測値

から計算した収縮ひび割れ幅 $W$ を計算値、付着解析によって得られた鉄筋ひずみ分布から計算した収縮ひび割れ幅 $W$ を解析値として示している。ひび割れ幅の計算値は実測値と一致している。また、鉄筋ひずみ分布の解析値が実測値

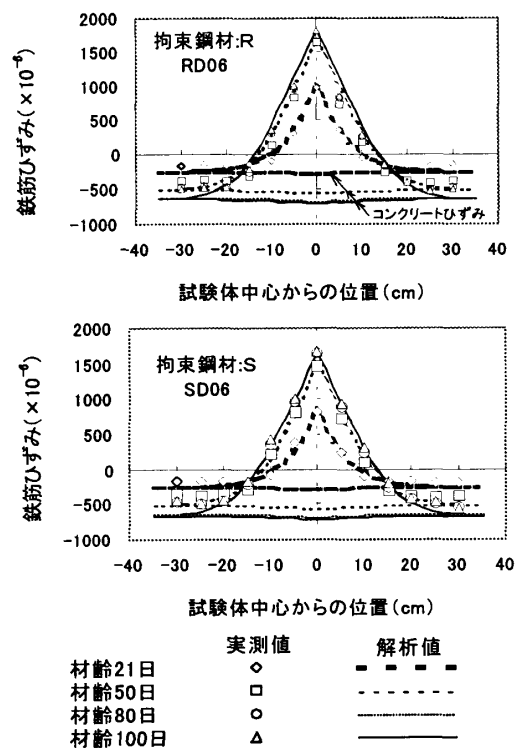


図-4 拘束試験体の鉄筋ひずみ分布 (1)

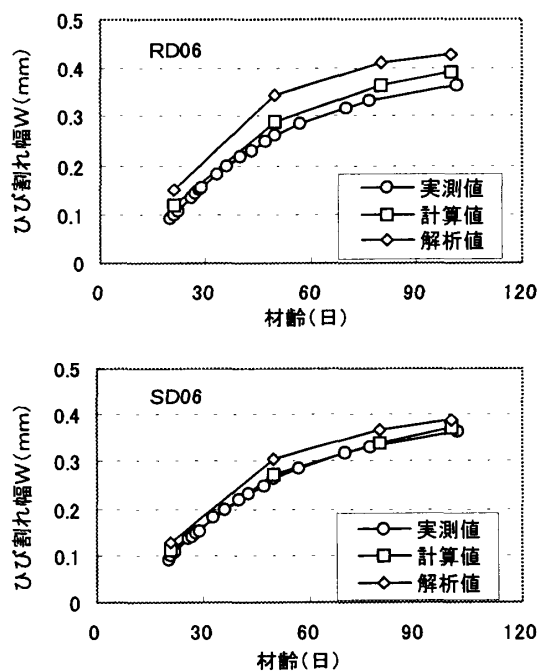


図-5 収縮ひび割れ幅の経時変化 (1)

とほぼ一致していることから収縮ひび割れ幅も解析値と実測値は一致している。

### 3.4 等価付着消失 $L_b$

式(1)から求めた等価付着消失長さ $L_b$ の経時変化を図-6に示す。 $L_b$ の計算値は実測した鉄筋ひずみ分布から算出した値であり、解析値は付着解析で得られた鉄筋ひずみ分布から算出した値である。 $L_b$ はひび割れ発生後、時間経過に伴い、増大するが、材齢80日から変化量が小さく、材齢100日での値は約160mmである。なお、その時点でのRD06、SD06の鉄筋応力は343 N/mm<sup>2</sup>、310 N/mm<sup>2</sup>であった。

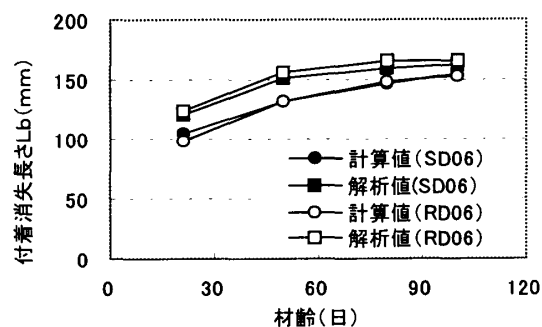


図-6 等価付着消失長さ $L_b$ の経時変化 (1)

## 4. 拘束ひび割れ試験 (II)

### 4.1 実験概要

#### (1) 使用材料

使用した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ィ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。スランプは20.0cm、空気量は4.8%である。鉄筋は横ふし異形鉄筋D10、D13及びD16を用いた。

表-1 コンクリートの強度試験結果

| 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | ヤング係数<br>(KN/mm <sup>2</sup> ) |
|-----------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 7         | 24.6                         | 2.12                         | 23.8                           |
| 14        | 30.1                         | 2.51                         | 22.6                           |
| 21        | 31.3                         | 2.15                         | 22.9                           |
| 28        | 30.2                         | 2.88                         | 25.5                           |

#### (2) 試験体の形状と種類

拘束ひび割れ試験体の形状を図-7に示す。試

験体中央のコンクリート断面は  $150 \times 150 \text{mm}$ , 試験体全長は  $1400 \text{mm}$  である。試験体の種類を表-2 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。拘束鋼材は市販の軽みぞ型鋼(呼び名 1285,  $150 \times 50 \times 50 \text{mm}$ , 厚さ  $3.2 \text{mm}$ , 断面積は  $766 \text{mm}^2$ )を用いた。拘束鋼材比は  $6.8\%$  である。乾燥収縮試験体は  $100 \times 100 \times 500 \text{mm}$ ,  $150 \times 150 \times 500 \text{mm}$  の 2 種類の角柱体を, 圧縮クリープ試験体は  $100 \times 100 \times 500 \text{mm}$  の角柱体を, 各 2 体製作した。

### (3) 実験方法及び測定方法

試験は  $20 \pm 1^\circ \text{C}$ , R.H.  $60 \pm 5\%$  の恒温・恒湿室で実施した。試験体の製作及び試験は「JIS 原案のコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」<sup>4)</sup> に準拠して行った。各試験体ともコン

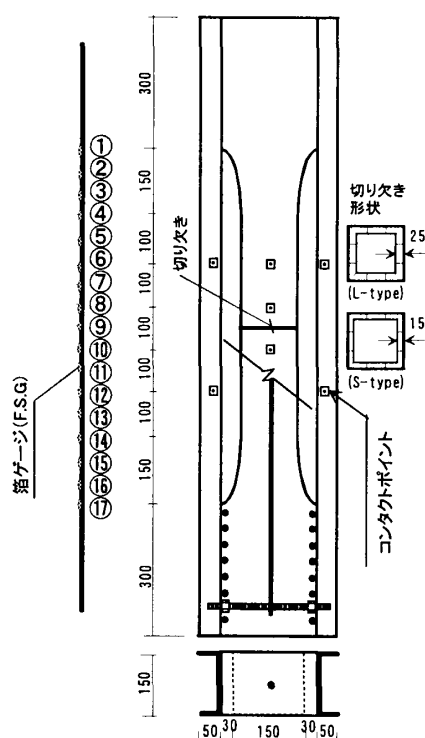


図-7 拘束試験体形状

表-2 試験体の種類

| 試験体<br>記号 | 鉄筋<br>呼び名 | スリット<br>深さ(mm) |
|-----------|-----------|----------------|
| D10(L)    | D10       | 25             |
| D10(S)    | D10       | 15             |
| D13(L)    | D13       | 25             |
| D13(S)    | D13       | 15             |
| D16(L)    | D16       | 25             |
| D16(S)    | D16       | 15             |

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発生させるため, 同位置に厚さ  $1 \text{mm}$  のプラスチック板をくり貫いて加工した切り欠き(各辺の深さ  $15 \text{mm}$  と  $25 \text{mm}$ )を設けた。ひび割れ幅の測定のため, コンタクトストレーンゲージ (C.S.G) を用いて, 試験体中央部長手方向の 3 区間 ( $100 \text{mm} \times 3$ ) 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を 4 時間毎に計測した。鉄筋 D10, D13 および D16 における箔ゲージの貼付間隔はそれぞれ  $52 \text{mm}$ ,  $55 \text{mm}$  および  $55 \text{mm}$  である。コンクリートの乾燥収縮および圧縮クリープ試験(載荷開始材齢: 14 日, 持続圧縮応力:  $6 \text{N/mm}^2$ )では C. S. G にてコンクリートのひずみを測定した。

## 4.2 実験結果および考察

### (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-8 に示す。図中に最小自乗法により求めた実測値の回帰式による値を示している。

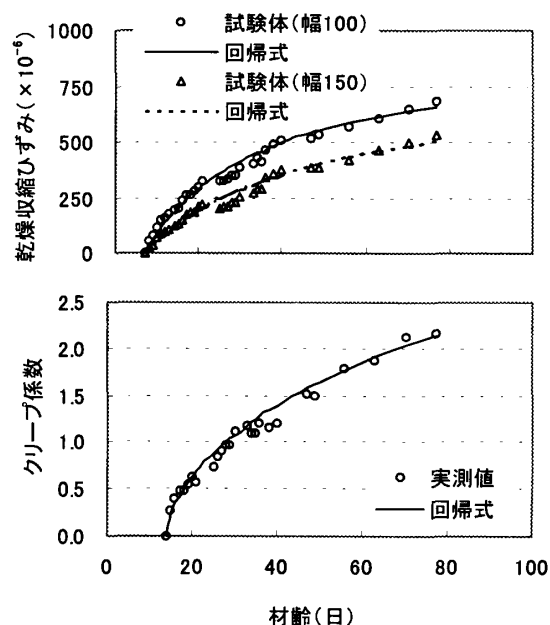


図-8 乾燥収縮ひずみ, クリープ係数 (2)

### (2) ひび割れ幅と等価付着消失長さ $L_b$

#### a) 鉄筋ひずみ分布

前述した解析モデル<sup>3)</sup>を用いて、付着解析を行った。 $\tau \sim s$ モデルの各特性値は既報<sup>2)</sup>で得られた表-3の値を用いた。

表-3  $\tau$ - $s$  関係モデルの特性値

| 試験体名 | $K_0$ (N/mm <sup>2</sup> /mm) | $\tau_y$ (N/mm <sup>2</sup> ) |
|------|-------------------------------|-------------------------------|
| D10  | 1200                          | 4.5                           |
| D13  | 1200                          | 5.3                           |
| D16  | 1200                          | 5.3                           |

試験体 D10(S), D13(L)および D16(S)の鉄筋ひずみ分布を図-9に示す。ひび割れは材齢 9~14 日に、すべての試験体において、スリットを設けた試験体中央に生じた。材齢 3 週、10 週における鉄筋ひずみ分布を付着解析より求めた。図中では実測値を記号で、解析値は曲線で示している。D16(S)試験体には 2 本のひび割れが生じ

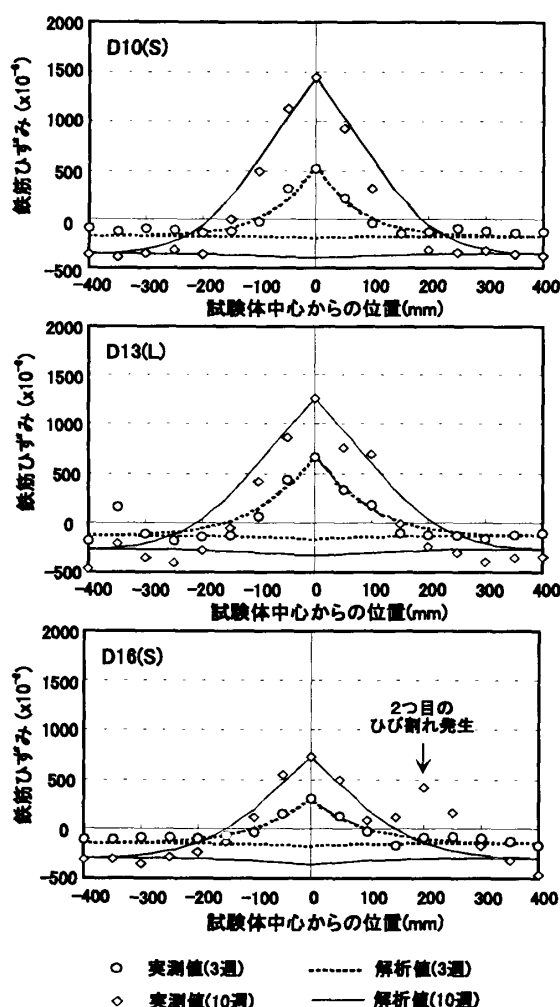


図-9 鉄筋ひずみ分布(2)

ているが、ひび割れ 1 本が生じた試験体では解析値は実測値とほぼ一致している。

#### b) ひび割れ幅

ひび割れ幅の経時変化を図-10に示す。同図には、実測値とともに、材齢 3, 5, 7, 10 週における実測の鉄筋ひずみ分布から計算したひび割れ幅を計算値、付着解析により得られた鉄筋ひずみ分布から計算した値を解析値として示している。D13(S), D16(S)におけるひび割れ幅の計算値は実測値より大きい、他の試験体ではひび割れ幅の計算値は実測値とほぼ一致している。D10(L), D10(S)のひび割れ幅解析値が計算値より大きい、他の試験体における解析値は計算値とほぼ一致している。なお、埋設した鉄筋径が大きい程、ひび割れ位置の鉄筋応力が小さく、ひび割れ幅は小さくなっている。

#### c) 等価付着消失長さ $L_b$

ひび割れ幅の計算値と解析値を用いて、式(1)から計算した等価付着消失長さ  $L_b$  をそれぞれ計算値、解析値として、図-11に示す。D10試験体では  $L_b$  の解析値が計算値より大きい、D13, D16試験体では両者ほぼ一致している。材齢 70 日における  $L_b$  の解析値(2体の平均)を比較すると、D10, D13 および D13 はそれぞれ 260, 238, および 222 mm で、鉄筋径(鉄筋比)が大きい程、 $L_b$  は小さくなった。これは鉄筋径が大きい程、鉄筋応力が 300N/mm<sup>2</sup>, 218N/mm<sup>2</sup> および 139N/mm<sup>2</sup> と小さくなったことによる。ただし、同じ鉄筋応力の場合、鉄筋径が大きい程、 $L_b$  は大きくなるので、解析値間の差は小さい。

#### 5. まとめ

以上の結果をまとめると次のようになる。

- (1) ひび割れ位置の鉄筋応力を用い、付着応力～すべり関係をモデル化して付着解析より求めた一軸拘束試験体に埋設した鉄筋のひずみ分布は実測値と一致した。また、鉄筋ひずみ分布より算定したひび割れ幅は実測

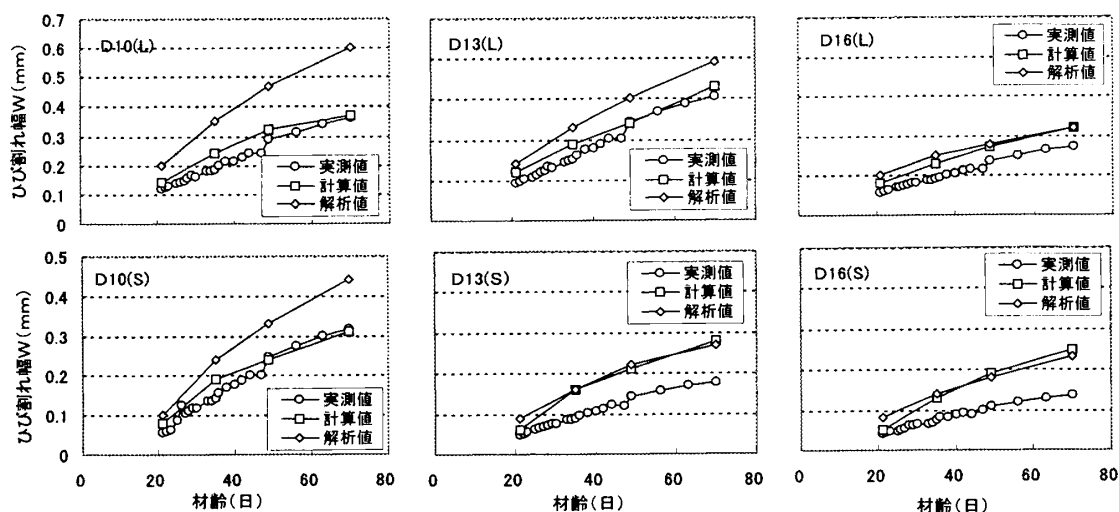
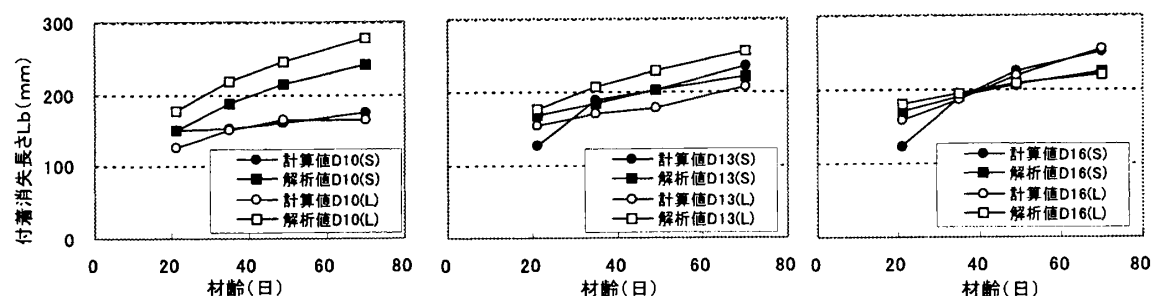


図-10 収縮ひび割れ幅の経時変化 (2)

図-11 等価付着消失長さ  $L_b$  の経時変化 (2)

値とほぼ等しかった。

- (2) 乾燥収縮による収縮ひび割れの幅は時間経過に伴って大きくなるが、埋設した鉄筋径（鉄筋比）が大きくなると、ひび割れ位置の鉄筋応力が小さくなるので、ひび割れ幅は小さく、ひび割れ幅の経時変化は緩やかになる。

- (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等価付着消失長さ  $L_b$  は、埋設した鉄筋径（鉄筋比）が大きくなるに従い、ひび割れ位置の鉄筋応力が小さくなることから、等価付着消失長さ  $L_b$ （解析値）も小さくなり、材齢 70 日における D10, D13 および D16 の  $L_b$  はそれぞれ 260, 238, 222mm であった。材齢 100 日における D6 の等価付着消失長さ  $L_b$  は約 160mm であった。

なお、本報告で得られた成果を基に付着解

析によって、鉄筋径、鉄筋応力、コンクリートの諸性状と等価付着消失長さ  $L_b$  との関係を求める予定である。

**謝辞** 本研究は本学学生松浦祥介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) 劉勇, 大野義照, 中川隆夫: コンクリートの収縮ひび割れ幅の算定, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.405~410, 2002
- 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
- 4) 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