

# 論文 コンクリートの乾燥収縮モデルに関する研究

小澤 満津雄\*1・中村 恭香\*2・永井 拓太\*3・森本 博昭\*4

**要旨:** 界面の状態方程式にもとづく界面張力モデルを用いたコンクリートの乾燥収縮予測モデルを提案した。モデルの適用性を検討するために、コンクリート中に鉄筋を配置した供試体の収縮応力の算定を試みた。水分移動解析結果に本モデルを適用することにより、乾燥収縮応力を解析することが可能であることを明らかにした。

**キーワード:** 乾燥収縮, 乾燥収縮モデル, 界面張力モデル, 相対湿度, 乾燥収縮応力

## 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮によるひび割れは構造物の諸性能を低下させる原因となる。そのため、その解析手法の確立は重要である。乾燥収縮に関する研究は、現在までに種々の観点からのアプローチがなされているが、乾燥収縮発生メカニズムを統一的に説明できる理論は未だに確立されていないのが現状である<sup>1)2)</sup>。著者らのグループは、コンクリートの乾燥収縮応力解析手法の確立を目指し、湿気移動解析から収縮応力算定までの一連の手法についての検討を進めている<sup>3)4)</sup>。本研究では、コンクリートの乾燥収縮挙動の解析において必要となるコンクリートの相対湿度と乾燥収縮ひずみの関係（以下、乾燥収縮ひずみ特性と記す）を実験により明らかにし、これをもとに乾燥収縮ひずみの合理的な推定モデルの提案を目指すものである。さらに得られた推定モデルを用いて、鉄筋を配置したコンクリート供試体の乾燥収縮による変形と拘束応力の解析を行い、解析値と実験値の比較、検討を行った結果について述べる。

## 2. 乾燥収縮ひずみ特性と推定モデルの提案

### 2.1 微視的構造に基づく乾燥収縮モデルの提案

本研究では、次式に示す界面の状態方程式<sup>5)</sup>にもとづく界面張力モデルを用いた乾燥収縮推定モデルを提案する。

$$\phi_{ig} [A_{ig} + 2A_{sg} \cos \theta_w] = -\frac{RT \ln(h)}{\nu} \cdot V_w \quad (1)$$

ここで、 $\phi_{ij}$ : 界面張力(N/m),  $A_{ij}$ : 界面の面積(m<sup>2</sup>),  $\theta_w$ : 接触角(°),  $R$ : 気体定数(J/K・mol),  $T$ : 絶対温度(K),  $\nu$ : 水分子の比容積(m<sup>3</sup>/mol),  $h$ : 相対湿度(%),  $V_w$ : 吸着水の体積(m<sup>3</sup>)である。

(1)式において右辺の最初の係数は水分のポテンシャルに関する量であり、本研究ではこれを収縮駆動力とする。セメントマトリックスに作用する収縮駆動力に対して、収縮駆動力の作用程度に関する係数  $A_s(h)$ , およびマトリックの線形変形係数  $E_c$  を導入する。これにより、乾燥収縮ひずみ  $\epsilon_d(h)$  と相対湿度  $h$  の関数である収縮駆動力との関係を表す構成式が式(2)のように定義される。

表-1 示方配合

| W/C<br>(%) | 単位水量(kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |      |
|------------|--------------------------|-----|-----|------|------|
|            | W                        | C   | S   | G    | Ad   |
| 57         | 170                      | 298 | 780 | 1034 | 2.98 |

\*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科助手 博士(工学) (正会員)

\*2 岐阜大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 学生 (非会員)

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 学生 (非会員)

\*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科教授 工博 (正会員)

$$\varepsilon_d(h) = \frac{As(h) RT \cdot \ln(h)}{k \cdot E_c \nu} \quad (2)$$

ここで、 $As(h)$ ：収縮駆動力の作用程度に関する係数、 $\varepsilon_d(h)$ ：乾燥収縮ひずみ、 $E_c$ ：変形係数(Pa)、 $k$ ：乾燥開始材齢に関する補正係数、 $h$ ：相対湿度である。

## 2.2 係数 $As(h)$ の同定

収縮駆動力の作用程度に関する係数  $As(h)$  を同定するために、温度と湿度がコントロールできる環境試験室中で温度 20°C 一定環境下での乾燥収縮試験を実施した。実験で使用した配合を表-1に示す。W/Cは57%とし、単位水量は170kg/m<sup>3</sup>とした。セメントの種類は普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤はAE減水剤(リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体)を使用した。粗骨材の最大寸法は10mmとした。供試体寸法は40×40×300mmである。乾燥開始材齢は1日および28日とした。供試体は乾燥開始まで温度20°Cの恒温で湿布養生を行った。供試体数はそれぞれ3本とした。供試体は上下面をシールし、側面4面を乾燥面として、軸方向の収縮量をダイヤルゲージにより計測した。湿度は80%から40%まで段階的に低下させた。図-1, 2に乾燥開始材齢1日と28日の乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。各図に示すように、80%~40%の各相対湿度における乾燥収縮ひずみの終局値を推定した。図-3に、相対湿度と乾燥収縮ひずみの終局値との関係を示す。図より、相対湿度を10%刻みでの乾燥収縮ひずみの終局値を推定し、これらの乾燥収縮ひずみの終局値と相対湿度の関係を表(2)に代入して  $As(h)$  の同定を行った。ただし、変形係数  $E_c$  については、ここでは材齢28日の標準養生時の弾性係数とした。同定された  $As(h)$  と湿度の関係を図-4に示す。図より、乾燥開始材齢1日および28日ともに  $As(h)$  の値は、相対湿度100%では0.5で、湿度の低下とともにほぼ直線的に減少し、相対湿度40%では0.2前後の値を示した。乾燥開始材齢が1日から28日に変化すると  $As(h)$  の値は若干小さくなるが、全体的にその影響はわずかである。これ

は、図-3に示す実験から得られた乾燥収縮ひずみ特性において、乾燥開始材齢の影響が小さくなったことに起因している。この点については、さらに実験を追加して検討する予定である。

## 2.3 係数 $k$ と $E_c$

乾燥開始材齢に関する補正係数  $k$  は、材齢に伴う変化を表す係数であるが、ここでは、乾燥開始材齢1日と28日のいずれにおいても  $k=1.0$  とし、変形係数  $E_c$  も材齢28日の標準養生時の弾性係数を用いた。しかし、結果的には  $As(h)$  の値は乾燥開始材齢1日と28日ともほぼ同等であった。係数  $k$  と  $E_c$  の取り扱いについては今後の課題としたい。

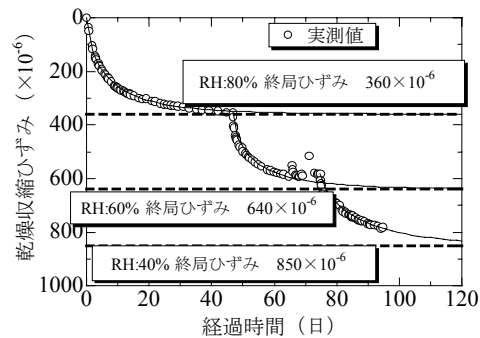


図-1 乾燥収縮ひずみの経時変化 (乾燥開始材齢 1日)

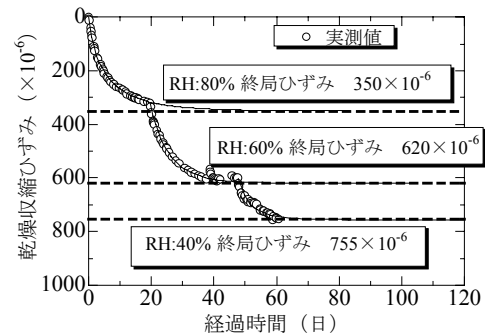


図-2 乾燥収縮ひずみの経時変化 (乾燥開始材齢 28日)

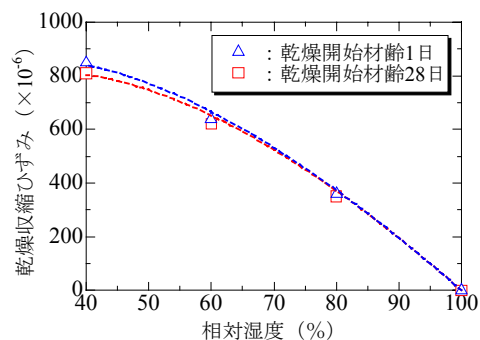


図-3 相対湿度と乾燥収縮ひずみの終局値との関係

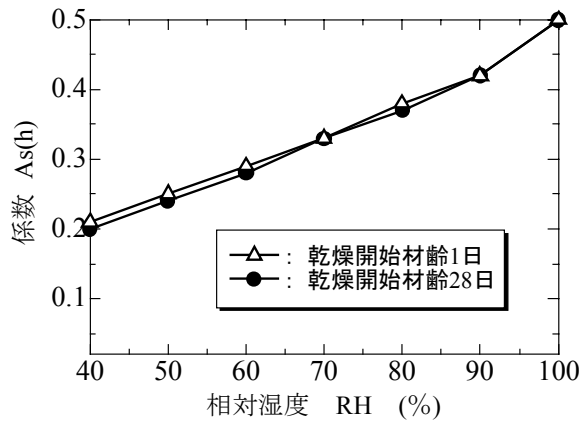


図-4 係数  $A_s(h)$  と湿度の関係

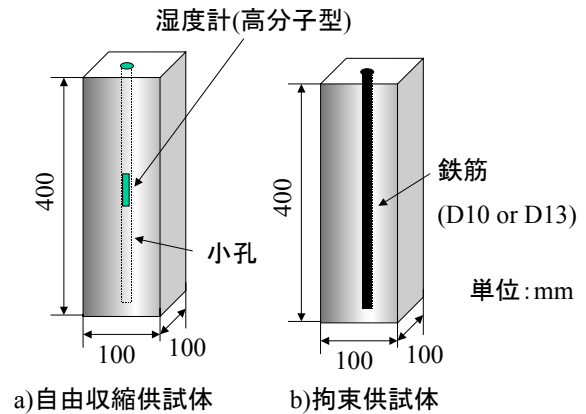


図-5 供試体の寸法形状

表-2 供試体の種類

| 種類      | 寸法(mm)      | 使用鉄筋 | 鉄筋比(%) | 供試体数(本) |
|---------|-------------|------|--------|---------|
| 自由収縮供試体 | 100×100×400 | /    | /      | 2       |
| 拘束供試体   |             | D10  | 0.7    | 2       |
|         |             | D13  | 1.3    | 2       |

表-4 強度と弾性係数

表-3 フレッシュコンクリートの性状

| スランプ<br>(cm) | Air<br>(%) | 温度<br>(°C) |
|--------------|------------|------------|
| 0.5          | 4.5        | 23         |

| 材齢<br>(日) | 圧縮強度<br>(MPa) | 静弾性係数<br>(GPa) |
|-----------|---------------|----------------|
| 1         | 13.0          | 15.7           |
| 7         | 35.8          | 28.4           |
| 28        | 42.0          | 31.0           |

### 3. 鉄筋コンクリートの乾燥収縮による拘束応力に関する実験的検討

#### 3.1 実験概要

本研究で実施した実験の概要を以下に示す。実験では、鉄筋を配置した拘束供試体と無鉄筋の自由収縮供試体を作製した。供試体は上下面をシールし、側面からの4面乾燥として、軸方向の収縮量をダイヤルゲージにより計測した。得られたひずみの計測結果から鉄筋とコンクリートの拘束応力を求めた。コンクリートの配合を表-1に示す。供試体の寸法形状を図-5に示す。寸法は100×100×400mmとし、拘束供試体は断面中心部に鉄筋を埋設した。自由収縮供試体は、断面中心部に小孔を設け、内部に高分子湿度計(S社製SK-80P4型)を設置し、内部の相対湿度を計測した<sup>3)</sup>。供試体の概要を表-2に示す。拘束供試体中心に異形鉄筋D10とD13を配置した。鉄筋比はそれぞれ0.7%と1.2%である。供試体

は、材齢28日まで温度20°C一定の環境下で湿布養生し、乾燥開始材齢は28日とした。環境条件は温度20°C一定とし、周囲の相対湿度は80%から40%まで段階的に低下させた。表-3, 4に使用したコンクリートのフレッシュ性状(スランプ、空気量、温度)および材齢1日と7日および28日の圧縮強度と弾性係数を示す。

#### 3.2 拘束応力の算定方法

実験より得られた供試体ひずみと式(3)~式(4)からコンクリート拘束応力と鉄筋応力を算定することができる。

$$\Delta\sigma_s = -E_s \cdot \Delta\varepsilon_r \quad (3)$$

$$\Delta\sigma_c = \frac{A_s t}{A_c} \cdot \sigma_s \quad (4)$$

ここで、 $\Delta\sigma_s$ : 鉄筋の拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)、 $\Delta\varepsilon_r$ : 拘束供試体ひずみ、 $E_s$ : 鉄筋の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>)、 $\Delta\sigma_c$ : コンクリートの拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)

$A_{st}$  : 鉄筋の断面積(mm<sup>2</sup>),  $A_c$  : コンクリート部材の断面積(mm<sup>2</sup>)

#### 4. 乾燥収縮による拘束応力の解析

提案した式(2)の乾燥収縮推定モデルを用いて、供試体のコンクリート拘束応力と鉄筋応力の解析を行った。解析は、時間増分による Step by Step 法を採用し、重ね合わせ法によりクリープの影響を考慮した。解析手順は、まず供試体の水分移動解析<sup>4)</sup>より部材内部の相対湿度分布を求める。次に、相対湿度分布に乾燥収縮推定モデルを適用して供試体内の乾燥収縮ひずみ分布を推定する。供試体断面の乾燥収縮ひずみ分布から平均ひずみ  $\Delta \varepsilon_d(h)$  を求めた後、式(6)~式(12)を用いて応力を算定する。なお、クリープひずみは W/C57%のコンクリートを乾燥状態で一軸圧縮クリープ試験を実施した実験結果(基本クリープ+乾燥クリープ)をもとに求めたものを使用した。単位クリープ関数を式(13)に示す。

$$\Delta \varepsilon_{ri} = \frac{A_c \cdot E_c}{A_c \cdot E_c + A_{st} \cdot E_s} \cdot \Delta \varepsilon_{di}(h) \quad (6)$$

$$\Delta \varepsilon_{ei} = \Delta \varepsilon_{ri} - \Delta \varepsilon_{di}(h) \quad (7)$$

$$\Delta \sigma_{esi} = -E_s \cdot \Delta \varepsilon_{ri} \quad (8)$$

$$\Delta \sigma_{eci} = E_c(t) \cdot \Delta \varepsilon_{ei} \quad (9)$$

$$\Delta \varepsilon_{cri} = \sum_{i=1}^n \Delta \sigma_{eci} \cdot Cr_i(t) \quad (10)$$

$$\Delta \sigma_{scri} = -E_s \cdot (\Delta \varepsilon_{ri} - \Delta \varepsilon_{cri}) \quad (11)$$

$$\Delta \sigma_{ccri} = E_c(t) \cdot (\Delta \varepsilon_{ei} - \Delta \varepsilon_{cri}) \quad (12)$$

$$Cr_i(t) = 40.6 \cdot (1 - \exp(-0.114 \cdot t^{0.774})) \quad (13)$$

ここで、 $\Delta \varepsilon_{ri}$  : 拘束供試体ひずみ(乾燥収縮ひずみモデルからの計算値),  $\Delta \varepsilon_{ei}$  : 弾性ひずみ,  $\Delta \varepsilon_{di}(h)$  : 推定した乾燥収縮ひずみ,  $h$  : コンクリートの相対湿度(%),  $E_s$  : 鉄筋の弾性係数(N/mm<sup>2</sup>),  $E_c(t)$  : コンクリートの弾性係数

(N/mm<sup>2</sup>)  $\Delta \sigma_{esi}$  : 鉄筋の弾性応力(N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \sigma_{eci}$  : コンクリートの弾性応力(N/mm<sup>2</sup>),  $Cr_i(t)$  : 単位クリープ関数(1/N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \varepsilon_{cri}$  : 全クリープひずみ,  $\Delta \sigma_{scri}$  : クリープを考慮した鉄筋応力(N/mm<sup>2</sup>),  $\Delta \sigma_{ccri}$  : クリープを考慮したコンクリートの拘束応力(N/mm<sup>2</sup>)

#### 5. 実験および解析結果

##### 5.1 内部相対湿度の経時変化

図-6 に自由収縮供試体中心部の相対湿度の経時変化を示す。実験値は供試体断面中心の相対湿度である。解析値は中心部と断面の平均値を示す。図より、実験値と解析値ともに周囲の湿度の低下に伴い湿度の低下を示している。解析値は実験値よりも材齢の進行にともなう湿度の低下率をやや大きく評価する傾向にあるが、全体的には湿度推移を良く捉えている。

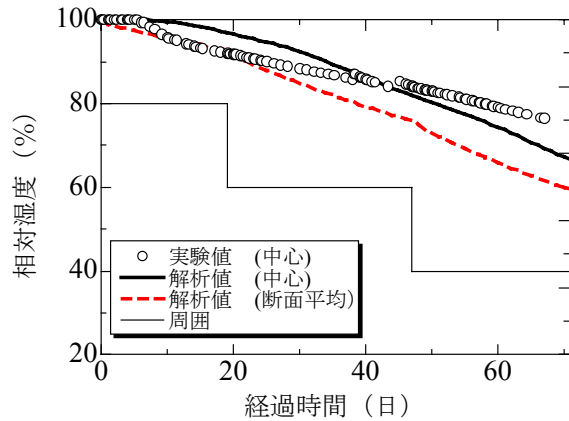


図-6 内部相対湿度の経時変化  
(自由収縮供試体)

##### 5.2 拘束および自由収縮ひずみの経時変化

図-7 に鉄筋比  $p=0.7\%$ の拘束ひずみと自由収縮ひずみについての実験値と解析値を示す。図より、拘束ひずみと自由収縮ひずみの実験値は湿度 80%の範囲で、ほとんど差は見られないが、湿度が 60%以下となると鉄筋による拘束の影響が次第に大きくなる。一方で、解析値は、周囲の湿度低下が進んでも拘束ひずみと自由収縮ひずみとの差が大きくなり、結果として実測値を精度よく再現できなかった。次に、図-8 に鉄

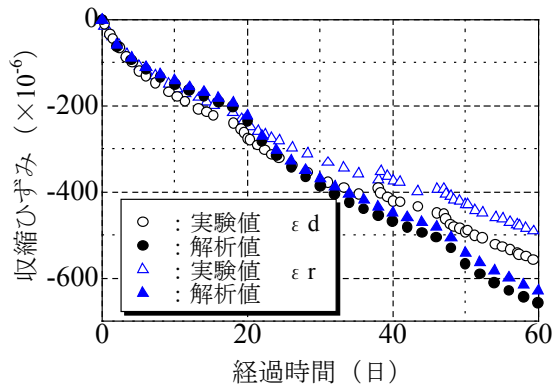


図-7 拘束および自由収縮ひずみの経時変化  
(D10 鉄筋比 p=0.7%)

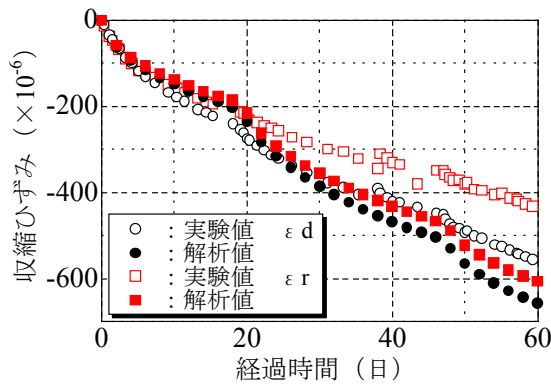


図-8 拘束および自由収縮ひずみの経時変化  
(D13 鉄筋比 p=1.2%)

筋比 p=1.2%の拘束ひずみと自由収縮ひずみの経時変化の実験値と解析値を示す。図より、拘束ひずみと自由収縮ひずみの実験値は湿度 80%の範囲で、ほとんど差は見られないが、湿度が 60%以下となると乾燥開始後 40 日で  $130 \times 10^{-6}$  程度の差となる。湿度が 40%となると差は  $170 \times 10^{-6}$  程度となり、鉄筋による拘束が顕著となる。一方で、解析値は、鉄筋比 p=0.7%と同様、周囲の湿度低下が進んでも、拘束ひずみと自由収縮ひずみとの差は実測値に比べ小さな値となった。

この原因については、式(6)の拘束ひずみ算定式はクリープの影響(コンクリートの剛性低下)が考慮されていないことなどが考えられる。

### 5.3 コンクリートの拘束応力と鉄筋応力

図-9~10 に鉄筋比 p=0.7%と 1.2%におけるコンクリートの拘束応力の実測値と弾性解およびクリープ解析解を示す。図より、実測値は湿度

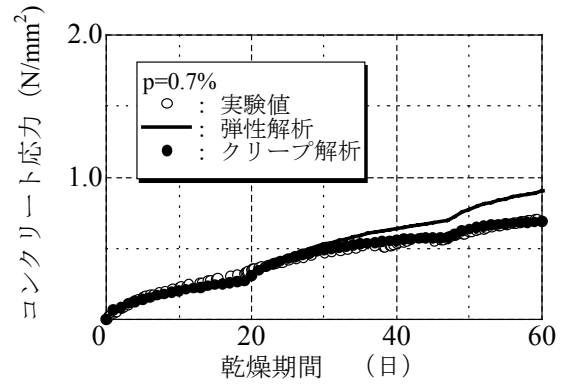


図-9 コンクリートの拘束応力の経時変化  
(D10 鉄筋比 p=0.7%)

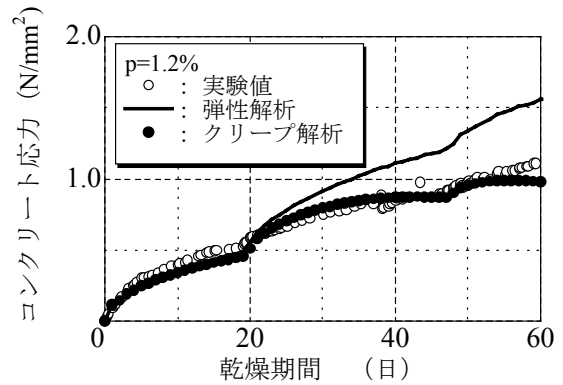


図-10 コンクリートの拘束応力の経時変化  
(D13 鉄筋比 p=1.2%)

の低下と共に増加している。乾燥期間 60 日程度で鉄筋比 p=0.7%と 1.2%はそれぞれ約  $1.0 \text{ N/mm}^2$  と約  $1.1 \text{ N/mm}^2$  を示している。次に、弾性解による収縮応力も湿度の低下とともに増加し、乾燥期間 64 日程度で鉄筋比 p=0.7%と 1.2%はそれぞれ約  $0.9 \text{ N/mm}^2$  と約  $1.56 \text{ N/mm}^2$  を示している。クリープ解析解は乾燥期間 60 日程度で鉄筋比 p=0.7%と 1.2%はそれぞれ約  $0.68 \text{ N/mm}^2$  と約  $0.98 \text{ N/mm}^2$  を示している。クリープ解析解は、乾燥開始後 20 日まで、応力の低減は見られない。しかし、乾燥開始後 20 日以降においてクリープによる応力の低減が顕著となる傾向を示し、実測値をよく評価できていることが分かる。

次に、図-11~12 に鉄筋比 p=0.7%と 1.2%における鉄筋応力の実測値と弾性解およびクリープ解析解を示す。図より、実測値は湿度と共に増加している。乾燥期間 60 日程度で鉄筋比

p=0.7%と1.2%はそれぞれ約 $-98\text{N/mm}^2$ と約 $-86\text{N/mm}^2$ を示している。次に、弾性解による拘束応力は湿度の低下とともに増加し、乾燥期間60日程度で鉄筋比p=0.7%と1.2%はそれぞれ約 $-126\text{N/mm}^2$ と約 $-121\text{N/mm}^2$ を示している。クリープ解析解は乾燥期間60日程度で鉄筋比p=0.7%と1.2%はそれぞれ約 $-95\text{N/mm}^2$ と約 $-76.5\text{N/mm}^2$ を示している。クリープ解析解は、コンクリート応力と同様に、乾燥開始後20日以降においてクリープによる応力の低減が顕著となる傾向を示した。

以上、提案した乾燥収縮モデルより乾燥収縮によるコンクリートと鉄筋の応力を算定した結果と実測値との比較を行ったが、本提案モデルを用いることにより、ある程度の範囲で乾燥収縮応力を推定することが可能であることが明らかとなった。ただし、推定精度を向上させるためには、乾燥収縮ひずみ予測については、湿気移動解析の精度向上、乾燥収縮推定モデルについての実験データの蓄積、また、クリープ解析についてはクリープひずみ推定精度の向上が課題となる。

## 6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 界面の状態方程式にもとづく界面張力モデルを用いた乾燥収縮ひずみ評価モデルを提案した。また、乾燥収縮ひずみと湿度の実測値をもとにモデルに含まれる係数 $A_s(h)$ の値を同定した。
- 2) 乾燥開始材齢が1日から28日に変化すると $A_s(h)$ の値は若干小さくなるが、全体的にその影響はわずかである。
- 3) 提案した乾燥収縮ひずみ評価モデルを用いて鉄筋コンクリート部材の収縮応力を算定した結果、実測の収縮応力をある程度の範囲で推定できることが示された。今後の課題として、湿気移動解析の精度向上、乾燥収縮実験データの蓄積およびクリープひずみの予測精度向上が挙げられる。

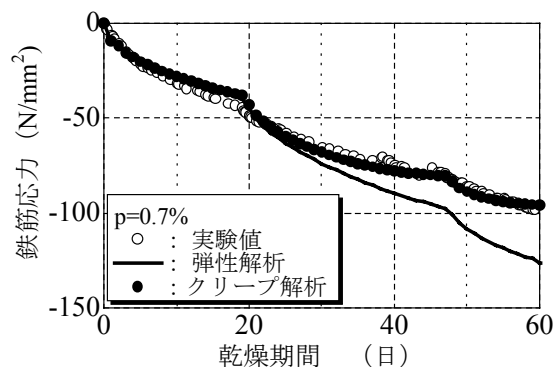


図-11 鉄筋応力の経時変化  
(D10 鉄筋比 p=0.7%)

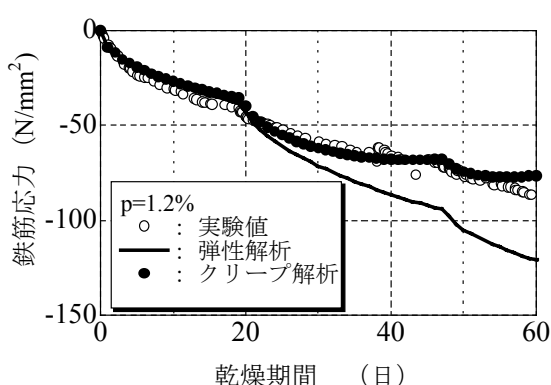


図-12 鉄筋応力の経時変化  
(D13 鉄筋比 p=1.2%)

## 参考文献

- 1) 多田眞作：水分移動と乾燥収縮機構，コンクリート工学 Vol.43, No.5, pp.43-50, 2005.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム，日本コンクリート工学協会，2001.
- 3) 籠橋忍，小澤満津雄，森本博昭：コンクリートの湿気移動解析に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22, No.2, pp.655-660,2000
- 4) 堀部謙，森川友博，中村恭香，森本博昭：コンクリート中の水分移動解析手法について，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.1, pp.603-608,2004
- 5) 多田眞作，内海秀幸：セメント硬化体の有効比表面積とケルビン式，コンクリート工学年次論文集，Vol.25, No.1, pp.563-568,2003