

# 鉄筋による拘束を受けるコンクリートの 乾燥収縮挙動に関する簡易解析手法の提案

## PROPOSAL OF SIMPLIFIED ANALYSIS METHOD FOR DRYING SHRINKAGE BEHAVIOUR OF CONCRETE SUBJECTED TO CONSTRAINT FROM REINFORCING BAR

吉田 秀典<sup>1)</sup>, 柳原 久美<sup>2)</sup>, 森本 はるか<sup>3)</sup>, 三馬 寛之<sup>4)</sup>

Hidenori YOSHIDA, Kumi YANAGIHARA, Haruka MORIMOTO and Hiroyuki SANMA

- 1) 香川大学工学部 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)  
 2) 香川大学大学院工学研究科 (〒761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: s11g418@stmail.eng.kagawa-u.ac.jp)  
 3) 元 (株) 穴吹工務店  
 4) (株) 穴吹工務店 (〒760-8520 高松市藤塚町 1-11-22, E-mail: hiroyuki-samma@mb.anabuki.co.jp)

In this study, numerical analyses are conducted so as to discuss the restraint effect by reinforcing bar on the drying shrinkage of concrete. The simple numerical model which can consider the shrinkage with respect to the decrease of humidity is employed in order to analyze the drying shrinkage of concrete. The drying shrinkage of concrete subjected to constraint from reinforcing bar can be reproduced by the change of the analysis parameter of the model. It is clarified from the comparison of measured data in experiments and analyses results that the strain by the drying shrinkage of concrete strongly associates with the amount of reinforcing bar.

**Key Words** : reinforced concrete, reinforcing bar, drying shrinkage, restraint force

### 1. 緒言

鉄筋コンクリート (以降, RC と称する) 構造物の乾燥収縮は, 乾燥によって硬化したコンクリートの長さや体積が小さくなる現象である. 一方, 湿潤状態ではその長さまたは体積が大きくなることから, RC 構造物は, 長期的には乾湿の影響を受けて伸縮を繰り返すことになる. コンクリート部材の収縮変形に対して建物の基礎, 壁周囲の柱や梁, 内部鉄筋などが抵抗することによる拘束 (内部拘束), あるいは, コンクリート部材の表面と内部の乾燥の程度の違いが引き起こす拘束 (外部拘束) がコンクリート部材の表面に引張応力を生じさせ, その結果, コンクリート部材の表面にひび割れを発生させている. 一般に, 環境条件の相対湿度 (ある気温で大気中に含まれる水蒸気量 (重量絶対湿度) をその温度の飽和水蒸気量 (重量絶対湿度) で割ったもの (単位: %)) が低いほど乾燥収縮は大きく, また, 自由収縮に対する拘束度が大きいほどひび割れは発生しやすい. コンクリートの自由収縮ひずみは, コンクリート中の水分の拡散による内部水分量の変化とコンクリートの拡散を定義づける材料特性によって定まる. 日本建築学会の指針である収縮拘束応力の予測式<sup>(1)</sup>より, 拘束の程度などからコンクリートの乾燥収縮ひずみを把握するのが一般的である. しかしながら, 複雑な環境下にある, あるいは複雑な形状を有しているといった構造物に対して,

こうした予測式を適用しても, 必ずしも的確な予測値は得られない.

鉄筋により拘束されるコンクリートに関する既往の研究は多いが, 多くが実験を中心としたもので, 拘束度<sup>(2)</sup>, 鉄筋周辺の応力分布<sup>(3)</sup>, 付着応力とひび割れ<sup>(4)</sup>, に関係するものが多い. 一方, 解析的事例としては, 上田ら<sup>(5)</sup>の研究などがあるが, 数多くある解析パラメータの評価方法について, 著者自身, 検討が必要であると結論付けており, 鉄筋からの拘束を受けるコンクリートの変形量などを簡易的に評価できるものとはなっていない. このように, 鉄筋コンクリートにおける乾燥収縮挙動に関しては, 鉄筋による内部拘束があることが知られているが, その効果を勘案した解析事例は決して多くなく, 存在しても, 解析パラメータなどの評価が難しいというのが現状である.

そこで本研究では, 鉄筋より拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮挙動に対する簡易解析手法の提案を行うことを目的とした. まず, コンクリートの変形に対する鉄筋の効果を把握するために, 複雑な要因を排除した基礎的な実験を行った. 実験では, 鉄筋径・鉄筋量・供試体長さを変化させた供試体を作製し, 長さ変化・鉄筋ひずみを測定した. そして, 鉄筋拘束を受けるコンクリートの伸縮特性について, 鉄筋径や鉄筋量の関係を交えて評価し, それをパラメータとして用い, 提案手法にて数値解析を行った.

## 2. 実験概要

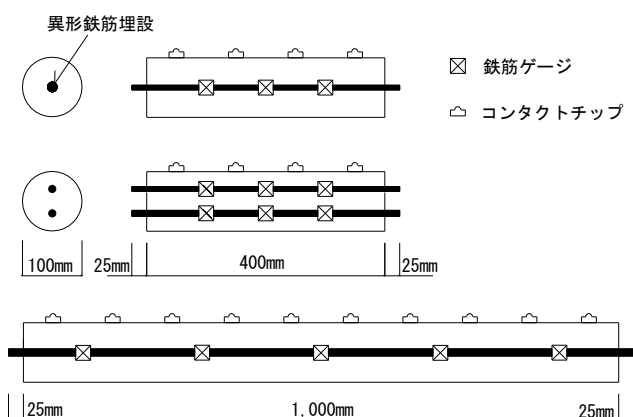


Fig.1 Outline of concrete specimen

コンクリートの使用材料を Table 1 に、調合を Table 2 に示す。コンクリートは JIS に規格されている一般的な 27-18-20N の調合（呼び強度 27 N/mm<sup>2</sup>-スランブ 18cm-粗骨材の最大寸法 20mm）を採用した。供試体は、コンクリート表面からの水分拡散および収縮が極力均一となるよう円柱形を採用した。Fig.1 に鉄筋埋設円柱供試体の概要図を示す。供試体の寸法はφ100×L400mm およびφ100×L1000mm とし、埋設する異形鉄筋は、D10、D13、D16 の 3 種とした。実験に用いた供試体を Table 3 に示す。

供試体はそれぞれ 3 本作製し、3 本の計測値の平均値を用いた。また、基準となる自由収縮ひずみ（無筋）の供試体も作製した。円柱供試体の型枠は、塩ビ製のパイプを利用し、コンクリートは同パイプに対して縦方向に打設した。打設直後、コンクリート投入口をキャップし、気中養生の後、材齢 1 日で脱型した。脱型後、水中で 7 日間養生し、その後、恒温恒湿室で乾燥させた。また、乾燥を促進させるため、環境設定を温度 20°C±1°C、湿度 40%±5%R.H とし、隣接する供試体間で湿度が変化しないよう送風ファンにて微風を与えた。実験に使用したコンクリートの物性を Table 4 に示す。鉄筋のひずみ測定は、貼付けゲージ（5 mm）を使用し、材齢 7 日よりリアルタイム計測を開始した。コンクリートの長さ変化の計測は、供試体表面にコンタクトチップを貼り付け、JIS A1129-2 法（コンタクトゲージ法）にて材齢 7 日より計測を行った。鉄筋（D10）を 2 本埋設した供試体の鉄筋のひずみは、鉄筋 2 本の平均値とした。

## 3. 解析概要

### 3.1 拡散方程式

本研究は、鉄筋コンクリートにおける乾燥収縮を対象としている。乾燥収縮とは、乾燥することによってコンクリート中の水分が逸散・移動し、水分量が変化する現象のことであり、コンクリートの含水状態によって乾燥収縮への影響の度合いが異なってくる。これらから、本解析では、こうしたコンクリート中の水分の逸散・移動を、拡散方

Table 1 Specifications of concrete materials

種類	記号	物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S1	砕砂：表乾密度 2.64g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 1.86
	S2	砂：表乾密度 2.56g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 2.28
粗骨材	G1	硬質砂岩 1505 砕石：表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 1.52
	G2	硬質砂岩 2015 砕石：表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 1.86
混和剤	AD	高性能 AE 減水剤標準 I 型

Table 2 Concrete mix

呼び強度	W/C (%)	S/a (%)	単位質量 (kg/m <sup>3</sup> )						
			W	C	S 1	S2	G1	G2	AD
27	53	49	174	328	607	253	449	449	2.3

Table 3 Specimens

供試体 No.	鉄筋の種類	鉄筋本数 (本)	供試体長さ(mm)
L4D10	D10	1	400
L10D10	D10	1	1000
L4D10×2	D10	2	400
L4D13	D13	1	400
L10D13	D13	1	1000
L4D16	D16	1	400
L10D16	D16	1	1000
L4 無筋	無筋	—	400
L10 無筋	無筋	—	1000

Table 4 Concrete properties

スランブ (cm)	16.0	
空気量 (%)	4.5	
単位容積質量 (kg/l)	2.26	
コンクリート温度 (°C)	25.5	
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	材齢 7 日	24.1
	材齢 28 日	34.4
静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	材齢 28 日	28.4

式を用いることによって表現することとした。

コンクリートの乾燥過程とは、含水量の高い領域から低い領域に向かって水分が移動し、平衡状態に向かう過程であり、含水量の空間的勾配を駆動力として水分の質量流速が生じる拡散現象と捉えられる。コンクリートによる乾燥収縮現象を水分の拡散問題として捉え、スラブやはりに対して変形の理論式や収縮応力の分布式を導いたのは Pickett である、Pickett<sup>(6)</sup> は、「コンクリート中の水分移動が蒸気の拡散によるものであり、また、コンクリート中の

水分の蒸気圧が含水量に比例し、浸透性が含水量に無関係であるならば、水分移動に対する微分方程式は拡散方程式で表される」という仮定の下、次式を導いている。

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K \left( \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

ここに、 $S$ は乾燥収縮ひずみ、 $K$ は拡散係数である。

コンクリートの乾燥過程を線形拡散モデルにて評価した場合、乾燥初期の段階では乾燥量を過小に評価し、また、乾燥後期の段階では乾燥量を過大に評価することが実験的に確認されている。このことから、水分の拡散係数は一定値ではないことがわかる。コンクリート中の含水量が多い場合、外部大気への水分の逸散は多くなり、含水量が少ない場合は水分の逸散は少なくなる。阪田ら<sup>(7)</sup>の研究で、非線形拡散型モデルによる支配方程式は次式のように表されている。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}(K \text{grad} C) \quad (2)$$

ここで、 $C$ は相対含水率と呼ばれ、次式にて定義される。

$$C(\%) = \frac{m_i - m_d}{m_0 - m_d} \quad (3)$$

ここで、 $m_i$ は供試体の質量、 $m_0$ は飽和状態の供試体の質量、そして $m_d$ は絶乾状態の供試体の質量である。

### 3.2 拡散係数

水分拡散の解析において、拡散係数を設定するには、コンクリートの相対湿度と相対含水率の関係を知らなければならない。阪田ら<sup>(7)</sup>は、固体中の拡散に関する理論である Boltzman 変換を応用し、拡散係数と含水率の関係を近似式により表している。

$$K(C) = K_0 + \frac{K_S - K_0}{1 + \left( \frac{100 - C}{100 - C_C} \right)^n} + \frac{K_S - K_0}{1 + \left( \frac{100}{100 - C_C} \right)^n} \cdot \frac{C - 100}{100} \quad (4)$$

ここで、 $K_S$ は飽和状態での拡散係数、 $K_0$ は絶乾状態での拡散係数、 $C$ は相対含水率、 $C_C$ は変曲点での相対含水率(パラメータについては Fig.2 を参照)、 $n$ は定数である。この近似式では、Fig.2 に示すように含水率が高い範囲において拡散係数は急激な勾配を描き、含水率 70~80%程度以下では、ほぼ一定値になる傾向となる。しかしながら、式(4)にて定義された拡散係数はコンクリートの相対含水率に依存することとなり、周囲の環境湿度を境界条件に設定する解析では直接は用いることができないため、コンクリートの相対湿度と相対含水率の関係を把握する必要がある。式(4)における  $K_S$ 、 $K_0$ 、 $C$ 、 $C_C$  といったパラメータは、コンクリートの調合によって異なり、また、乾燥過程と吸湿過程で異なった経路を辿ることが知られている<sup>(9)</sup> (Fig.3)。乾燥過程に関しては、

$$C = 296 / (109 - H) - 447 / (21 + H) + 0.295H + 42.1 \quad (5)$$

吸湿過程に関しては、

$$C = 359 / (107 - H) - 370 / (32 + H) + 0.189H + 31.7 \quad (6)$$

である。ここで、 $C$ は相対含水率、 $H$ は相対湿度である。

本研究では、乾燥過程のみを考慮していることから、式(4)に式(5)を代入することにより、湿度の関数となる拡散係数を定義し用いることとする (Fig.4)。

### 3.3 伸縮係数

コンクリートは内部に無数の空隙を含み、その空隙内部には水分が存在している。前章で述べた通り、乾燥収縮とは、乾燥によってコンクリート中の水分が逸散・移動し、水分

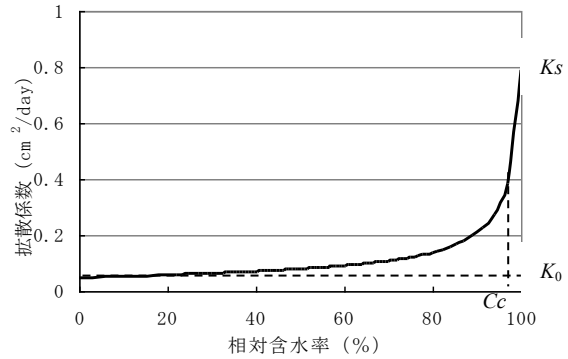


Fig.2 Moisture content v.s. diffusion coefficient

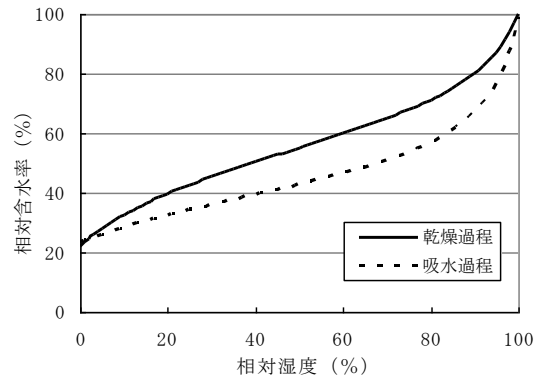


Fig.3 Relative humidity v.s. moisture content

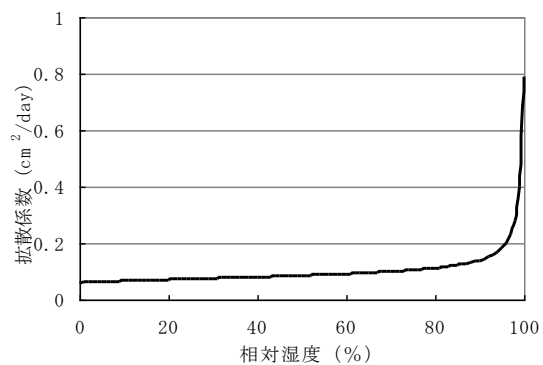


Fig.4 Relative humidity v.s. diffusion coefficient

Table 5 Shrinkage coefficients

供試体記号	伸縮係数
L4D10	$1 \times 10^{-5}$
L10D10	$1 \times 10^{-5}$
L4D10×2	$7 \times 10^{-5}$
L4D13	$8 \times 10^{-6}$
L10D13	$8 \times 10^{-6}$
L4D16	$5 \times 10^{-6}$
L10D16	$6 \times 10^{-6}$
L4 無筋	$1.5 \times 10^{-5}$
L10 無筋	$1.8 \times 10^{-5}$

Table 6 Material properties

特性値	コンクリート	鉄筋
ヤング係数(kN/m <sup>2</sup> )	$2.36 \times 10^7$	$2.06 \times 10^8$
ポアソン比	0.2	0.3

量が変化する現象のことである。その水分の減少にともないコンクリートの体積も変化し、それに連動してひずみが生じる。本解析では、水分増分（相対湿度増分）とコンクリートの乾燥収縮ひずみ増分の関係式を用いる。

$$d\varepsilon = \alpha dH \quad (7)$$

ここで、 $\alpha$ は材料定数で、これは温度伸縮における線膨張係数と同じような物理的な意味を有する。本解析では伸縮係数と称する。この値については、鉄筋が導入された供試体については鉄筋ひずみの実験値を、また、無筋の供試体については長さ変化率の実験値を基に設定した。その結果をTable 5に示す。これらの値については、次章にて詳しく述べることとする。本解析では、収縮は等方的に生じると仮定し、3次元有限要素解析では、次式よりひずみ成分を定めている。

$$d\varepsilon_{ij} = \alpha \delta_{ij} dH \quad (8)$$

ここで、 $\delta_{ij}$ はクロネッカーのデルタである。

### 3.4 材料物性と境界条件

本解析では、境界条件として、経時的に変化する表面湿度（環境湿度）の経時変化を与え、材料（コンクリート）の物性としては、相対湿度の関数となる拡散係数  $K(H)$  (Fig.4) と、式(7)の伸縮係数  $\alpha$  を設定する必要がある。供試体の表面湿度の計測をしていないことから、解析では以下のように表面湿度を仮定して用いた。まず、実験では水中養生後に計測を開始していることを鑑み、供試体全体の初期の相対湿度を 100%と仮定し、計測開始後は、7日目までに 60%まで線形的に降下、そして 14日目までに 40%まで線形的に降下、さらに 147日目まで一定と設定した。式(4)における  $K_S$ 、 $K_0$ 、 $C_C$ 、 $n$  という定数は阪田らの研究で得た数値を参考とし、 $K_S=0.787$ 、 $K_0=0.04$ 、 $C_C=97.417$ 、 $n=0.905$  と設定した。ヤング係数とポアソン比については、コンクリートに関しては静弾性試験の結果より定め、また、鉄筋に関しては一般的な値を設定した。これらをまとめて Table 6 に示す。

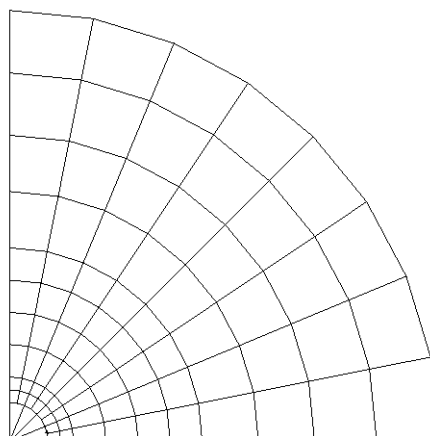


Fig.5 Analysis mesh (one rebar)

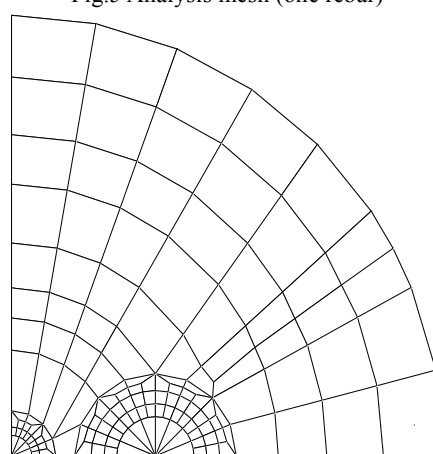


Fig.6 Analysis mesh (two rebars)

### 3.5 解析メッシュ

本研究では、上記のモデルを有限要素解析コードに組み込み、3次元の有限要素解析を行った。用いた要素は 8 節点の 3次元ソリッド要素で、解析領域としては、対称性を加味し、全体の 4分の1領域とした。軸方向については、Fig.5 および Fig.6 に示すような要素分割を行った。Fig.5 は鉄筋本数が 1本の供試体のメッシュ（断面図）で、Fig.6 は鉄筋本数が 2本のメッシュ（断面図）である。

## 4. 実験結果と解析結果の比較

2章で述べた実験の再現を目的に、3章で説明した解析手法と解析パラメータを用いて解析を行った。2章で述べた通り、実験では鉄筋のひずみ度を計測しており、この鉄筋のひずみ度について、供試体の長さ 400mm および 1000mm の解析結果を Fig.7 および Fig.8 にそれぞれ示す。鉄筋径 D10 を用いた供試体における鉄筋の最大ひずみ度はおよそ 600 $\mu$  であるのに対し、鉄筋径 D13 を用いた供試体における鉄筋の最大ひずみ度はおよそ 480 $\mu$ 、鉄筋径 D16 を用いた供試体における鉄筋の最大ひずみ度はおよそ 300 $\mu$  である。なお、無筋の解析では、鉄筋のひずみ度は抽出できないので、あくまでも参考値であるが、L4 無筋

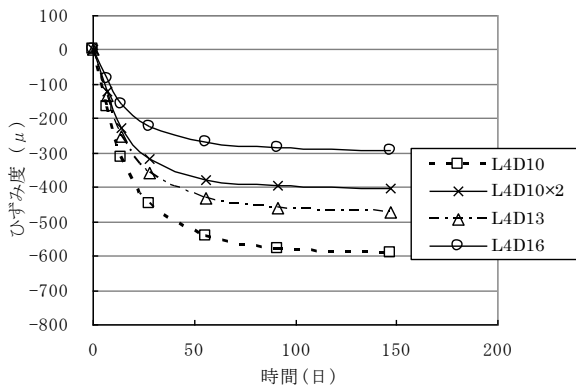


Fig. 7 Rebar strain (L4 specimen)

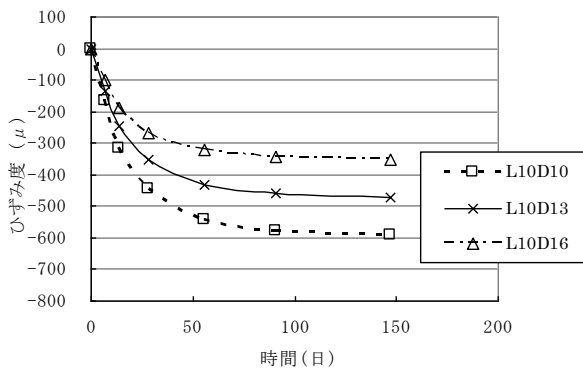


Fig. 8 Rebar strain (L10 specimen)

および L10 無筋のコンクリートのひずみはそれぞれおよそ  $900\mu$ ,  $1100\mu$  である。本解析では、そのパラメータである伸縮係数を増減させることで、上記のように、簡易的に発生ひずみ度を制御できる仕組みになっている。

次に、Table 3 にて示した各供試体に対して、上記の解析の結果と実験結果の両者（鉄筋のひずみ度）をプロットした図を Fig. 9 に示す。なお、無筋の解析については、コンタクトチップを用いて計測したコンクリートの長さ変化に関して解析と実験の比較を行っている。400mm および 1000mm の供試体とも、鉄筋径が D10 の場合は、解析と実験がほぼ一致している。鉄筋径が D13 の場合は、実験結果において材齢 56 日以降にひずみ度が減少する挙動を示したことから、解析との間に  $100\mu$  弱の差がある。鉄筋径 D16 の場合は、材齢 28 日以降に実験と解析の差が生じ、材齢 147 日では、実験と解析の違いが約  $60\mu$  となった。L4 無筋、L10 無筋の供試体では、解析と実験の長さ変化率を比較すると、材齢 28 日で約  $200\mu$ 、材齢 147 日で約  $80\mu$  の誤差が認められるがものの、両結果は概ね近い値を示している。

鉄筋径が大きいほど時間経過とともに実験と解析との間に乖離が生じる原因としては、解析では、コンクリートと鉄筋が完全に固着した状態を前提としているのに対し、実験では、鉄筋を伝うブリージングの影響などにより鉄筋がコンクリートの乾燥収縮に追従できず、コンクリートと

鉄筋の一体性が失われ、いわゆる付着切れが生じていることが原因の 1 つであると考えられる。鉄筋径が大きいほど付着切れが生じやすい原因としては、鉄筋径が大きいほど鉄筋のリブの凹凸が大きく、ブリージングの影響を受けやすいためと思われる。また、コンクリート材料は非均質な材料であり、計測する箇所によって計測値にバラツキが生じることが多く、こうしたバラツキがあることを勘案すれば、解析は、概ね実現象を再現できている。

本研究は、鉄筋より拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮挙動に対する簡易解析手法の提案を行うことが目的であるので、付着切れを生じた供試体の挙動に関しては、研究の対象としていない。解析と実験の比較より、提案した解析手法は、その解析パラメータである伸縮特性を変化させることで、コンクリートが鉄筋より受ける拘束を表現できていると考える。また、主たる解析パラメータは、この伸縮特性のみで、その他の解析パラメータの数もそれほど多くない。つまり、簡易的な解析手法を提案しているという本研究の目的を概ね達成できていると言える。

しかしながら、用いた鉄筋の径と伸縮係数に関しては、鉄筋径が大きい場合に伸縮係数の値を小さく、逆に、鉄筋径が小さい場合に伸縮係数の値を大きく設定すればよいものの、鉄筋径が与えられると自動的に伸縮係数を決定できるという段階には至っていない。両者の関係について、定量的に評価する必要があるが、実験において採用した鉄筋径のパターンが少なかったことから、本論文の中でその評価はできない。今後、異なる鉄筋径を追加し検討することで、評価も可能になると考えている。

## 5. まとめ

本研究では、鉄筋より拘束を受けるコンクリートの乾燥収縮挙動に対する簡易解析手法の提案を行うことを目的とし、基礎的な実験を行うと同時に、解析パラメータである伸縮特性の評価を行った。まず、鉄筋径・鉄筋量・供試体長さを変化させた供試体を作製し、乾燥収縮実験を実施した。その際に長さ変化率・鉄筋ひずみ度を測定し、鉄筋より拘束をうけるコンクリートの伸縮特性の評価を行った。次に、乾燥収縮時にコンクリート中の水分が拡散し、水分量の変化によってコンクリートが収縮するという事実に基づき、既往の研究を参考に、簡易的な解析手法を構築した。解析にあたっては、その主たるパラメータである伸縮係数を実験結果より定め、鉄筋量が異なる各ケースにおいて、この伸縮係数のみを変化させて解析を行った。解析手法は付着切れなどの現象に対応していないことから、このような挙動を呈した範疇において、実験結果と解析結果に乖離は見られたものの、付着切れを呈していない範囲においては、鉄筋のひずみ度の大きさと経時変化について、実験結果と解析結果は概ね合致していた。これより、本研究の目的である簡易手法の提案、つまり、多数ある解析パラメータのうち、伸縮係数  $\alpha$  のみを変化させることで、鉄

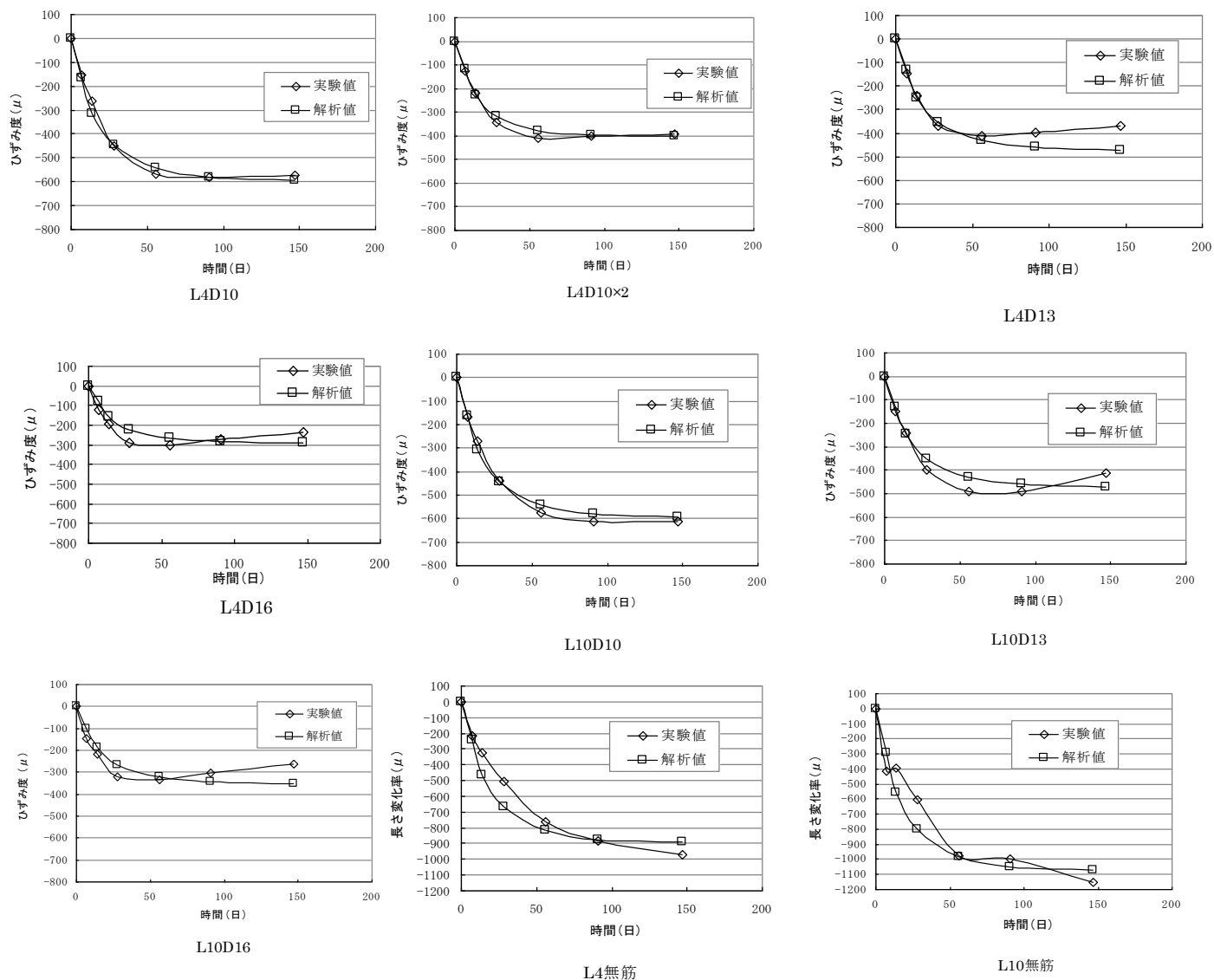


Fig.9 Relationship between strain and time (measurement data and analysis results)

筋量の異なる鉄筋コンクリートの収縮現象を表現するという事は達成できたと思われるが、伸縮係数の決定については、今後、鉄筋量や供試体長を変化させた実験を多数実施し、データを十分に蓄積した上で議論する必要がある。

### 謝辞

本研究の実施にあたっては、実験に際し有限会社宮原生コン様、佐藤機械株式会社様はじめ協力業者の皆様にご支援とご指導いただきましたこと、ここに感謝の意を表します。

### 参考文献

- (1) 日本建築学会編:鉄筋コンクリート造建築物のひび割れ制御設計施工指針(案)・同解説, pp.53-60, 2006
- (2) 鉄筋により拘束される場合の乾燥収縮について:池永博威, 大島久次, 日本建築学会大会講演梗概集. 構造系(47), pp.21-22, 1972
- (3) コンクリートの乾燥収縮と収縮拘束に関する研究: 牧角龍憲, 徳光善治, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.21-24, 1981
- (4) 丸山一平, 佐藤良一: 超高強度コンクリートを用いたRC部材中の鉄筋近傍における微細ひび割れの発見, 日本建築学会論文集構造計論文集, 第617号, pp.1-7, 2007
- (5) コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析: 上田賢司, 佐藤嘉昭, 清原千鶴, 永松静也, コンクリート年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.637-642, 1998
- (6) Pickett, G.: Shrinkage stress in concrete, Journal of the American Concrete Institute, Vol.7, No.3, pp.165-204, 1946
- (7) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥収縮に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, No.316, pp.145-152, 1981
- (8) 秋田宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動, 土木学会論文集, No.420, pp.61-69, 1990