

# 論文 乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす水分分布の影響

大野俊夫\*<sup>1</sup>・魚本健人\*<sup>2</sup>

**要旨**：JIS 原案に準拠し、一軸拘束試験体の側面の一部をシールして乾燥面の数を変化させた実験について、拘束鋼材による外部応力と断面内部の水分分布に伴う内部応力によるひずみを解析的に算定した結果、測定点間に含水率の差がない場合には外部応力のみでの解析により実験値を再現できるのに対し、含水率に差がある場合には水分分布に起因する内部応力によるひずみを考慮する必要があることが明らかになった。

**キーワード**：ひび割れ、乾燥収縮、一軸拘束試験、水分分布、内部応力、拡散解析

## 1. はじめに

コンクリートのひび割れは、セメントの水和反応の進行に伴う内部空隙組織の変化、物性値の変化、部材内部の水分分布、環境湿度・温度の変化、拘束体の形態・剛性など様々な影響を受けるため、非常に複雑な条件下で発生する。このため、これまで多くの研究者によりひび割れ発生に関する実験的、解析的研究が進められてきているものの、的確にひび割れ発生を予測するまでには至っていない。

コンクリートのひび割れ抵抗性を評価する試験方法としては、乾燥収縮、温度応力に関して部材を単純化した一軸拘束試験体による JIS 原案法がある<sup>1)</sup>。乾燥収縮自身においてはコンクリート内部の水分状態を把握することがなされているが、乾燥収縮ひび割れ試験においても断面内の水分分布により内部応力が作用していると思われる、ひび割れ発生を予測する上で内

部応力を考慮する必要があることが指摘されている<sup>2) 3)</sup>。

本研究は、種々の断面寸法や乾燥形態がひび割れ発生に及ぼす影響を把握する研究の一環として、先に報告した一軸拘束試験体の側面の一部をシールした実験 (JIS 原案に準拠)<sup>4)</sup> について、断面内部の水分分布に伴う内部応力がひび割れ発生に及ぼす影響を検討したものである。なお、一軸拘束試験体には乾燥収縮のほかに自己収縮の影響も含まれている。

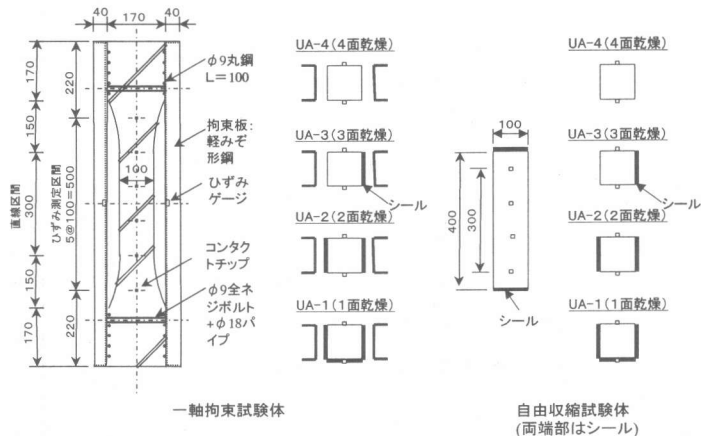


図-1 試験体の形状・寸法 (単位:mm)

\* 1 鹿島建設(株)技術研究所 土木技術研究部主任研究員 (正会員)

\* 2 東京大学教授 国際・産学共同研究センター 工博 (正会員)

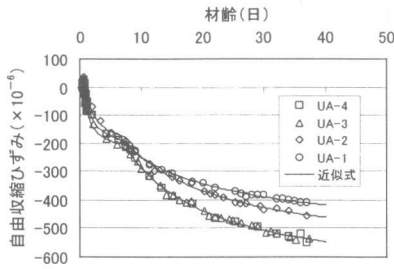


図-2 自由収縮ひずみ (3 試験体の平均)

## 2. 実験方法

図-1 に、JIS 原案に基づいて作製した一軸拘束試験体の形状・寸法を示す。試験体は材齢 7 日まで湿潤養生した後、試験体側面の一部を柔軟型エポキシ樹脂によってシールし、側面の 4 面 (記号: UA-4)、3 面 (UA-3)、2 面 (UA-2)、1 面 (UA-1) を乾燥状態とした試験体である。試験体は材齢 7 日以後、20℃、62±5% R.H. の養生室に静置し、コンクリートはコンタクトゲージにより、拘束鋼材はひずみゲージによりひずみを測定した (測定箇所: 図-1 参照)。また、乾燥面数のコンクリート内部ひずみへの影響を比較するため、埋込み型ひずみ計 (KM-100B) を一軸拘束試験体 (5 試験体中の 2 体) の断面中央に設置し、コンクリート内部のひずみを測定した。自由収縮試験体は 100×100×400mm とし、一軸拘束試験体と同様な養生、シール、ひずみの測定方法とした。なお、一軸拘束試験体は各シール面数ごとに 5 体作製し、自由収縮試験体は 3 体とした。

コンクリートの配合は水セメント比 30% であり、配合の詳細、試験体の作製方法およびコンクリートの物性試験結果については既報<sup>4)</sup>を参照されたい。

## 3. 実験結果

### (1) 自由収縮ひずみ

図-2 に自由収縮試験体 3 体の平均自由収縮ひずみ (自己収縮+乾燥収縮) の履歴を示す。温度補正を行っていないため、いずれのケース

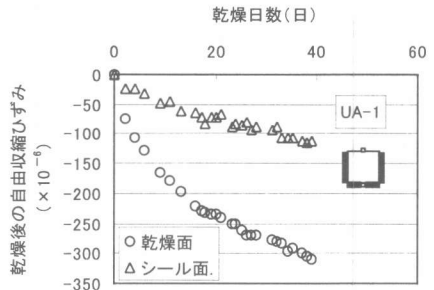
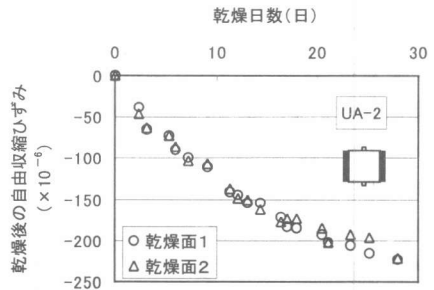
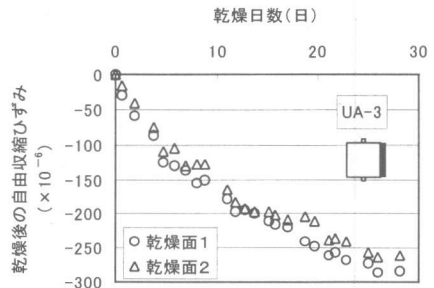
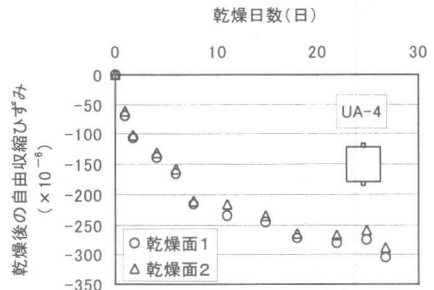


図-3 乾燥後の自由収縮ひずみの履歴 (3 試験体の測定面ごとの平均)

も材齢 14 時間程度までに  $15 \sim 40 \times 10^{-6}$  の膨張ひずみを示した後、材齢 7 日までの湿潤養生期間中に約  $200 \times 10^{-6}$  の収縮を示し、乾燥後は乾燥面の数によって異なり、自由収縮ひずみは 4 面乾燥  $\approx$  3 面  $>$  2 面  $>$  1 面の順になっている。

図-3 に、乾燥条件下に移行した後の自由収縮ひずみの履歴を示す。この履歴は測定面 2 面の各々について、各ケースごとに 3 試験体の平均値を示している。4 面 (UA-4)、3 面 (UA-3)、2 面 (UA-2) 乾燥のケースでは 2 測定面間でひずみに大きな差は認められないが、1 面乾燥のケース (UA-1) ではシール面と乾燥面を測定しており、両者の自由収縮ひずみの差が大きいことが分かる。

図-4 は自由収縮試験体の乾燥後の重量変化率の履歴、図-5 は単位乾燥面積当りの重量変化率の履歴、図-6 は平均含水率 (逸散水量 / 空隙中の全水量) と乾燥後の自由収縮ひずみの関係を示している。ここで、含水率の算定に当り、コンクリート中の空隙量は過去の研究例<sup>5)</sup>を参考にして 11.5vol.% とし、乾燥開始前は全ての空隙内に水が存在しているとした。

図-4 から乾燥後の重量変化率は乾燥面の数が多いほど大きくなっていることが分かるが、図-5 の単位乾燥面積当りの重量変化率は、乾燥面数が多いケースほど小さくなっており、水分の逸散量が乾燥面の数に比例していないことが分かる。これは試験体からの全体水分逸散量が多い場合には試験体温度が気化熱によって低下するため、結果として単位面積当りの水分逸散量が低下したものと推察された。

また、図-6 から乾燥後の自由収縮ひずみが断面の平均含水率とほぼ比例関係にあることが分かる。ごく表面部の乾燥収縮ひずみが含水率に比例する傾向は、過去の研究<sup>6)</sup>でも報告されており、今回のシールによる実験においても同様な傾向が確認された。

## (2) 拘束収縮ひずみ

図-7 に、一軸拘束試験体における 1 面乾燥状態 (UA-1) の拘束収縮ひずみの履歴例を示

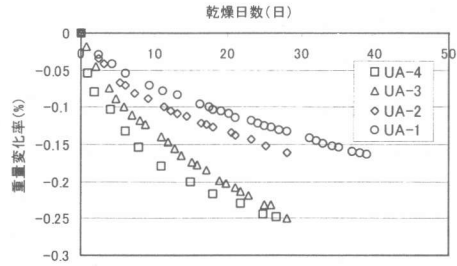


図-4 重量変化率の履歴

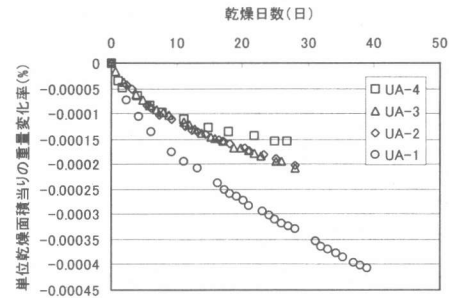


図-5 単位乾燥面積当りの重量変化率履歴

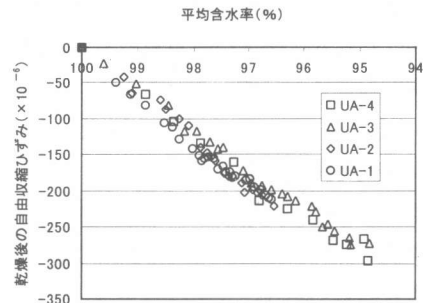


図-6 平均含水率と自由収縮ひずみの関係

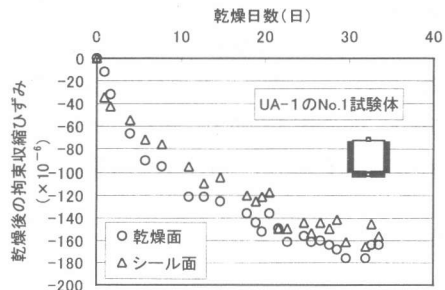


図-7 拘束収縮ひずみの履歴例

す。同図から、2 測定面の拘束収縮ひずみが同様な履歴を示していることが分かり、自由収縮

試験体において確認されたシール面と乾燥面の収縮ひずみが大きく異なる傾向は認められない。一軸拘束条件下においては拘束鋼材によってコンクリート両面のひずみが平均化され、本来の自由収縮のような変形が抑制されていると思われる。

図-8 は各ケースごと一軸拘束試験体 5 体の拘束収縮ひずみの平均値の履歴を示した図であるが、同図から乾燥面数が異なっても表面部の拘束収縮ひずみが同様な履歴を示していることが分かる。UA-4, UA-3, UA-2 では貫通ひび割れの発生前に、試験体表面に微細ひび割れの発生が認められ、表面にマイクロクラックが発生することによって内部応力が開放されたことも考えられた。

### (3) 内部の拘束収縮ひずみ

埋込みひずみ計によるコンクリート内部の拘束収縮ひずみは図-9 に示すとおりであり、乾燥面数 4 面の場合に収縮ひずみが大きくなっており、乾燥に伴う内部の収縮ひずみの進行が他のケースに比べて大きいと思われるほかは、ほぼ同様な履歴を示している。

## 4. 解析的検討手法

### (1) 一軸拘束によるひずみ

一軸拘束試験体における拘束板とコンクリートの力の釣り合い条件、ひずみの適合条件から、式(1)が求められ<sup>7)</sup>、弾性ひずみ、クリープひずみ、自由収縮ひずみの式(2)に示す関係を逐次的に変換し、式(3)に示す収縮応力を求めることができる。なお、コンクリートの自由収縮ひずみ、弾性係数、断面積は実測値を用い、クリープ係数は CEB-FIP MC-90 によって算定した。

$$\varepsilon_{r,i} = -\sigma_{c,i} A_c / E_s A_s \quad (1)$$

$$\varepsilon_{r,i} = \varepsilon_{e,i} + \varepsilon_{c,i} + \varepsilon_{f,i} \quad (2)$$

$$\sigma_{c,i} = -1 / (A_c / E_s A_s + (1 + \phi_{i,j-0.5}) / E_{c,i-0.5}) \times$$

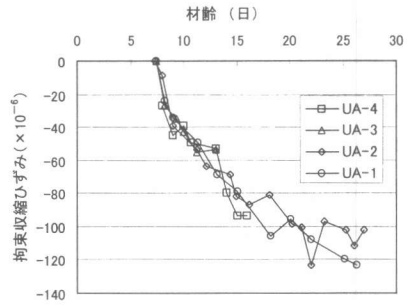


図-8 拘束収縮ひずみの履歴 (表面)

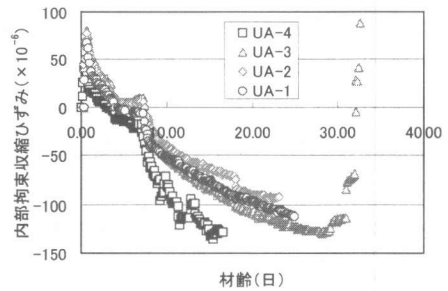


図-9 内部の拘束収縮ひずみ履歴

$$\left\{ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ (\sigma_{c,j} - \sigma_{c,j-1}) (1 + \phi_{i,j-0.5}) / E_{c,j-0.5} \right\} - \sigma_{c,i-1} (1 + \phi_{i,i-0.5}) / E_{c,i-0.5} + \varepsilon_{f,i} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon_{r,i}$  : 材齢  $i$  における拘束収縮ひずみ

$\sigma_{c,i}$  : 材齢  $i$  における収縮応力

$A_c$  : コンクリートの断面積

$E_s, A_s$  : 拘束板弾性係数, 断面積

$\varepsilon_{e,i}$  : 弾性ひずみ

$\varepsilon_{c,i}$  : クリープひずみ

$\varepsilon_{f,i}$  : 自由収縮ひずみ

$\phi_{i,j}$  : 材齢  $j$  において載荷された材齢  $i$  でのクリープ係数 ( $\varepsilon_c / \varepsilon_e$ )

$E_{c,i}$  : 材齢  $i$  におけるコンクリートの弾性係数

### (2) 水分分布に伴うひずみ

コンクリート中の水の逸散現象が、表面係数やコンクリート中の含水率の関数で示される見かけの拡散係数を用いた非線形の拡散解析によ

って求められることが報告されている<sup>6) 8) 9)</sup>。

本研究においても、拡散係数を含水率の関数とした非線形性を有する式(4)を用い、式(5)に示す表面係数によって境界条件を定めた。初期の含水率を100%、シール面で水の逸散はないものとして、コンクリート内部の水分の分布を、2次元有限要素法を用いて解析的に求めた。なお、表面係数は自由収縮試験体の重量減少が、乾燥面の数に比例しないことから、乾燥面の数ごとに重量減少量が実験値に近くなるように、また、便宜上 $C_e=0$ として設定した。解析に用いた拡散係数は既往の文献<sup>6)</sup>を参考にし、表面係数はUA-4, 3, 2, 1でそれぞれ0.0055, 0.0065, 0.0075, 0.011cm/日とした。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \text{div}[K(C)\text{grad}C] \quad (4)$$

$$K(C)\left(\frac{\partial C}{\partial n}\right) = f_n(C_e - C_s) \quad (5)$$

ここで、 $C$  : 含水率  
 $K(C)$  : 拡散係数 (cm<sup>2</sup>/日)  
 $C_e$  : 雰囲気中の含水率  
 $C_s$  : コンクリート表面の含水率  
 $f_n$  : 表面係数 (cm/日)

## 5. 解析結果

### (1) 一軸拘束によるひずみ

図-10に、式(1)~(3)の関係より逐次算定した拘束引張ひずみ(自由収縮ひずみ-拘束収縮ひずみ)の履歴を、実験値と合わせて示す。

乾燥面数が3面、2面のケース(UA-3, UA-2)では拘束引張ひずみの解析値と実験値がほぼ一致していること、乾燥面数が4面のケース(UA-4)では解析値に比べて実験値の方が少し大きいこと、1面のケース(UA-1)では解析値が実験値を大きく上回っていることが分かる。

図-2に示すように、UA-1の自由収縮ひずみはUA-2, UA-3に比べて小さいのに対し、拘束収縮ひずみは同程度であることから(図-8,

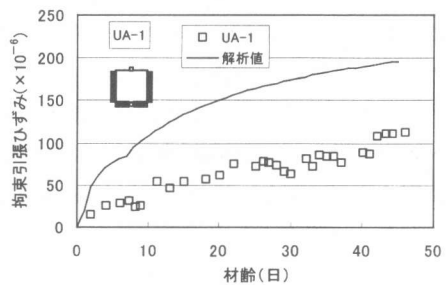
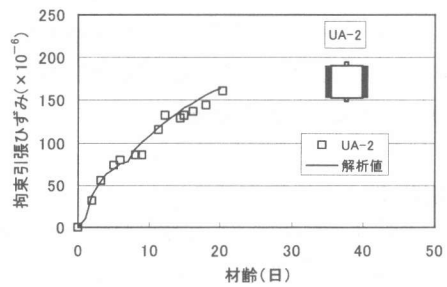
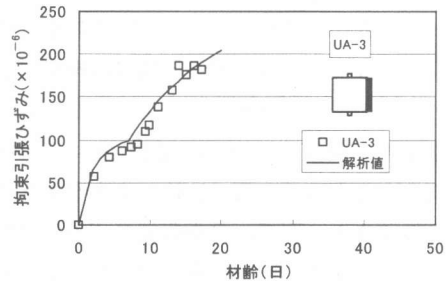
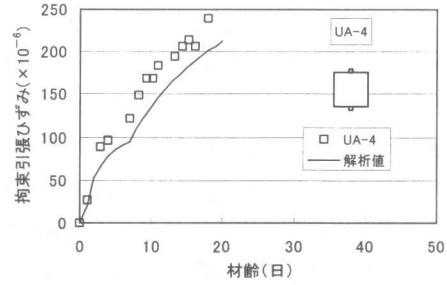


図-10 拘束引張ひずみの解析結果

9参照), 両者の差である拘束引張ひずみが他のケースに比べて小さくなっている。

### (2) 水分分布に伴うひずみ

図-11に、水分拡散・逸散解析によって得られた各ケースの乾燥開始後30日における拘束

収縮ひずみの測定点間の含水率分布を示す。乾燥面 1 面当りの水分逸散量を再現するため、表面係数を乾燥面数が少ないほど大きく設定しているため、表面部の含水率が乾燥面数が少ないほど小さくなっている。同図は測定点間の含水率分布であり、乾燥面数 4, 3, 2 面ではほぼ同様な含水率分布形状であるのに対し、乾燥面数 1 面では乾燥面とシール面間の含水率であり、他のケースと異なる傾向を示している。

図-12 は一軸拘束試験体のひび割れ発生材齢を引張伸び能力（ひび割れ発生時の拘束引張ひずみ）との関係で整理した図であるが、乾燥面数 1 面の試験体においては、図-11 に示す測定点間の含水率の差、図-6 に示す含水率と自由収縮ひずみとの関係、自由収縮ひずみに対する拘束引張ひずみの割合（拘束率）により、水分分布に伴う内部応力によるひずみを考慮することによって（図中の修正 UA-1）、他のケースと同様なひび割れ発生材齢と引張伸び能力の関係が得られることが分かる。

## 6. まとめ

JIS 原案「コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)」に準拠し、一軸拘束試験体の側面の一部をシールして乾燥面の数を変化させた実験について、拘束鋼材による外部応力と断面内部の水分分布に伴う内部応力によるひずみを解析的に算定した結果、測定点間に含水率の差がない場合には外部応力のみを解析により実験値を再現できるのに対し、含水率に差がある場合には水分分布に起因する内部応力によるひずみを考慮する必要があることが明らかになった。

## 参考文献

- 1) JIS 原案：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法(案)，コンクリート工学，Vol.23，No.3，pp.50～51，1985.3
- 2) 上田賢司ほか：コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れ予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.775～780，1999

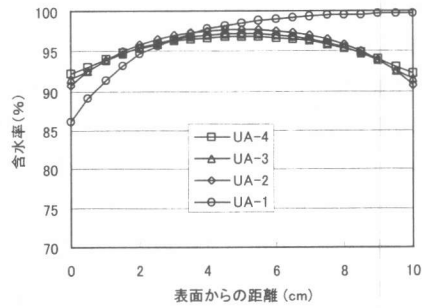


図-11 断面内の水分分布（乾燥後 30 日）

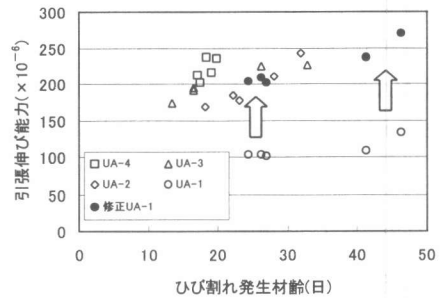


図-12 ひび割れ発生材齢と伸び能力の関係

- 3) Aoki, Y., Shimomura, T. and Obata, H.: Stress Analysis and Cracking Criteria of Concrete under Restraint Drying Shrinkage, The 7th Asia-Pacific Conference on Structural Engineering & Construction, pp.1425-1430, Aug.1999
- 4) 大野俊夫，魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす拘束の形態，乾燥面数の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.649～654，1998
- 5) 羽原俊祐：硬化コンクリートの組織及び空隙構造と物性の関係に関する研究，1992
- 6) 阪田憲次，蔵本修：乾燥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，第 316 号，pp.145～152，1981.12
- 7) 牧角龍憲，太田俊昭：外的に線拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れに関する基礎的研究，土木学会論文集，第 378 号，V-6，pp.137～146，1987.2
- 8) 上田賢司ほか：コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.637～642，1998
- 9) (社)日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の補修工法研究委員会報告書(Ⅲ)，1996.10