

## 誘発目地の周辺に発生するひび割れに関する数値解析的検討

## NUMERICAL DISCUSSION ON CRACK OCCURRING AROUND CONTROL JOINT

山野 はるか<sup>1)</sup>, 吉田 秀典<sup>2)</sup>, 檜垣 勝久<sup>3)</sup>, 三馬 寛之<sup>4)</sup>

Haruka YAMANO, Hidenori YOSHIDA, Katsuhisa HIGAKI and Hiroyuki SANMA

1) (株) 穴吹工務店 (〒 760-8520 高松市藤塚町 1-11-22, E-mail: haruka-yamano@mb.anabuki.co.jp)

2) 香川大学工学部 (〒 761-0396 高松市林町 2217-20, E-mail: yoshida@eng.kagawa-u.ac.jp)

3) (株) 穴吹工務店 (〒 760-8520 高松市藤塚町 1-11-22, E-mail: katsuhisa-higaki@mb.anabuki.co.jp)

3) (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)

Concrete carbonation which is accelerated by the cracks occurring in the concrete brings about not only reinforcement corrosion but also disfigurement from the viewpoints of architectural design. Thus, the control joint is set so that the cracks occur intensively in the joint. However, some of cracks occur outside the joint. In this study, heat-deformation coupled analysis and fluid-deformation coupled analysis are carried out to discuss the cracks occurring around the joint. In the result, it is turned out that the occurrence of cracks strongly depends on a constraint condition, and that the cracks occurred by moisture diffusion rather than heat diffusion are dominant in some constraint conditions.

**Key Words:** Control Joint, Crack, Moisture and Heat Diffusion, Finite Element Method

## 1. はじめに

コンクリートは、打設後、セメントの水和作用にともなう発熱によってコンクリート内の温度が上昇し、その値は数日で最大となり、その後、放熱によって温度は徐々に低下する。この過程において、(1) コンクリート表面と内部との温度差による拘束（内部拘束）、(2) コンクリートが温度低下する際に地盤や既設コンクリートより受ける拘束（外部拘束）などにより部材には温度応力が発生する。この時の応力がコンクリートの引張強度より大きくなるとひび割れが発生する。(1) は材齢初期に発生し、ひび割れはごく表面付近の被り（表面から鉄筋までの領域）の範囲か、被りを少々超える範囲に収まるのが一般的である。(2) はある程度時間が経過した後にひび割れが発生し、断面を貫通する場合が多い。このひび割れの特徴は、ひび割れが発生した時点より内部の温度が下がり、全体温度が均一になるにしたがってひび割れ幅が大きくなることである。これらの温度ひび割れは部材が大きいほど、外気温が高いほど顕著に現れる。

ひび割れが発生すると、そこからコンクリートの中性化が促進され、その結果、鉄筋腐食が生じる危険があるほか、建築意匠的にも美観を損なうという課題がある。そこで、あらかじめ温度ひび割れが発生する位置を計画的に定め、所定の間隔で断面欠損部、つまり誘発目地（以降、単に目地と称す

る）を設けることによって、その位置にひび割れを集中的に発生させるという施工法がある。目地を外れて、目地に平行なひび割れが生じることもあり、目地に適切にひび割れを誘発することを目的として、目地における断面欠損率に関する研究も行われている<sup>(1)</sup>。神崎ら<sup>(1)</sup>よれば、断面欠損率によっては、弱齢期に目地周辺にひび割れが発生せず、およそ一ヶ月程度でひび割れが発生している。一ヶ月が経過してひび割れが発生しているものの、この研究では、コンクリートの養生（7日間）後、コンクリートを乾燥させており、このようなひび割れも、温度応力によるものとは断定しにくい。

コンクリートは時間の経過にともなう乾燥によっても収縮する。乾燥収縮はコンクリート中のセメントペーストが乾燥することにより収縮するもので、この収縮が何らかの拘束を受けるとひび割れが発生する。このひび割れも温度ひび割れと同様に内部拘束によるものと外部拘束によるものがあり、それらのひび割れ形態は異なる。

目地の設計については、一般に、温度応力の発生にともなうひび割れを念頭に熱伝導解析が行われることが多いが、目地に発生するひび割れは、内部あるいは外部の拘束を受けることで生じることから、拘束の条件によっては、ひび割れの発生と進展を支配しているのは温度応力ではなく、乾燥収縮である可能性もある。そこで本研究では、熱伝導および乾燥収縮の両解析を通して、目地およびその周辺におけるひび割れの発生について考察を加える。

2010 年 9 月 29 日受付, 2010 年 11 月 8 日受理

†Dedicated to the memory of Prof. Masataka TANAKA

## 2. 力学モデル

温度，すなわち熱拡散の問題も水分移動の問題も，基本的には拡散場の問題であることから，扱う支配方程式は拡散方程式（熱伝導方程式）である．また，本研究では，温度あるいは水分の拡散の影響で発生するひび割れの問題を取り扱うことから，熱あるいは水分拡散と変形の問題を連成して解析を行う．以下に，拡散方程式の定式化，弱形式の誘導，および離散化について説明を行う．

### 2.1. 拡散方程式

フーリエの法則より，熱流速ベクトル  $\Phi$  と温度場  $T(x)$  の関係は，次式にて表される．

$$\Phi = -\lambda \nabla T(x) \quad (1)$$

ここで， $\lambda$  は熱伝導率であり，温度勾配と熱流速を対応づける．

一方，熱量保存の法則により，

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -\nabla \cdot \Phi + q \quad (2)$$

が成り立つ．ここで， $\rho$  は密度， $c$  は比熱， $q$  は単位体積あたりの発熱量である．

式 (1) の両辺の発散をとり，

$$\nabla \cdot \Phi = -\nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (3)$$

式 (3) を式 (2) を代入すると，以下のように熱拡散方程式が得られる．

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q \quad (4)$$

$\lambda$  はテンソル量であるが，等方的な物性の場合には温度勾配と熱流速ベクトルの方向が一致するため，スカラー量として扱うことができる．また，熱伝導率が一定であることを仮定すると次式を得る．

$$\rho c \frac{dT}{dt} = \lambda \nabla^2 T + q \quad (5)$$

境界条件を

1. 表面領域  $S_1$  上で  $T = T_1$  が与えられる
2. 表面領域  $S_2$  上で単位面積あたりの熱流入量  $Q$  が与えられる

と仮定すると，これらの境界条件と支配方程式より，次式のような弱形式が得られる．

$$\int_V (\rho c \delta T \dot{T} + \lambda \nabla \delta T \nabla T) dV = \int_V \delta T q dV + \int_S \delta T Q dS \quad (6)$$

ここで， $V$  と  $S$  はそれぞれ対象領域とその表面領域を表す．

本研究では，有限要素解析を実施することから，最終的に得られた弱形式を離散化する．

### 2.2. 拡散係数

熱伝導解析においては，熱拡散係数  $D$  を定義する必要がある．式 (4) より，熱拡散係数  $D$  は熱伝導率  $\lambda$ ，密度  $\rho$  および比熱  $c$  を用いて

$$D = \lambda / (c \cdot \rho) \quad (7)$$

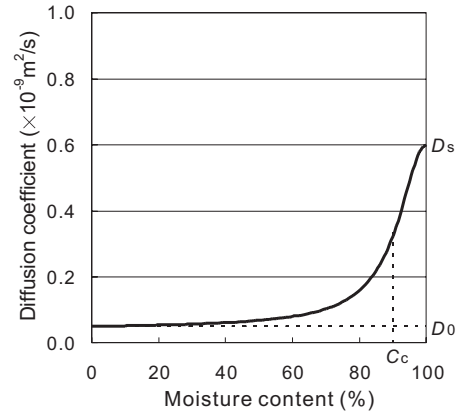


Fig.1 Moisture content v.s. diffusion coefficient

にて定義される．したがって， $\lambda$ ， $\rho$  および  $c$  を与えれば自動的に定まるが，本研究では，土木学会コンクリート<sup>(5)</sup> 標準示方書にて，その特性値として  $0.003 \text{ m}^2/\text{h}$  を用いてよいとされていることから，本研究ではこの値を用いる．

水分移動の解析においては，熱拡散係数を水分拡散係数に置き換えることとなる．阪田ら<sup>(3)</sup> は，大きさの異なるコンクリート供試体の乾燥試験の結果から，相対含水率と拡散係数の関係を以下の近似式 (Fig.1 参照) で表している．

$$D(C) = D_0 + \frac{D_s - D_0}{1 + ((100 - C)/(100 - C_c))^n} + \frac{D_s - D_0}{1 + (100/(100 - C_c))^n} \frac{C - 100}{100} \quad (8)$$

ここで， $D_s$  は飽和状態での拡散係数， $D_0$  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， $n$  は定数である． $n$  については，コンクリートの場合， $0.50 \sim 2.00$  の範囲であるとされており，一般に，水セメント比が大きいほど  $n$  は小さく，また，若齢期においても  $n$  は小さな値をとるという傾向が認められるが，相違の程度はそれほど顕著なものではない．Fig.1 は  $n = 2.00$  とした時の相対含水率と拡散係数の関係である．阪田らにより実験的に導出されたこの相対含水率と拡散係数の関係は，相対含水率が高い範囲においては拡散係数が急激な勾配を描き，相対含水率が  $70 \sim 80\%$  程度以下ではほぼ一定値になる傾向を呈している．この傾向は Bazant ら<sup>(2)</sup> が提案したモデルとほぼ同じであった．実験的に相対含水率と拡散係数の関係を導出する研究は，その後，秋田ら<sup>(4)</sup> によっても試みられているが，相対含水率と拡散係数の関係は，阪田らと同様の結果が得られている．したがって，多くの研究者の検討より，相対含水率と拡散係数の関係は式 (8) にて表現が可能であることから，本研究でもこの関係式を採用する．

しかしながら，この拡散係数の値はコンクリート中の含水率との関係から導出されたものであることから，周囲の環境湿度を境界条件とする解析などでは式 (8) を直接用いることはできず，コンクリート中の含水率と湿度との関係が必要となる．また，含水率と湿度の関係は Fig.2 に示すように乾燥過程と吸湿過程では異なる経路をたどる．そこで，秋田

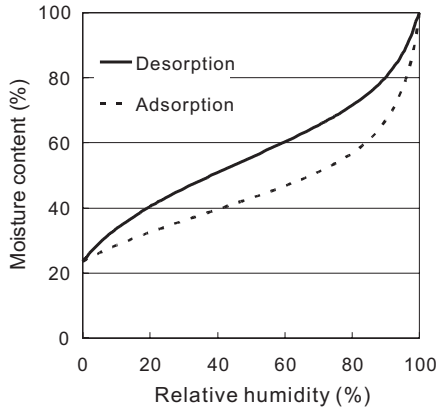


Fig. 2 Relative humidity v.s. moisture content

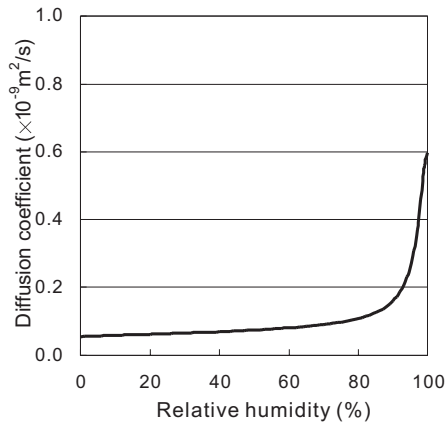


Fig. 3 Relative humidity v.s. diffusion coefficient

ら<sup>(4)</sup>は実験よりこの関係について、乾燥過程に関しては、

$$C = 296/(109 - H) - 447(21 + H) + 0.295H + 42.1 \quad (9)$$

吸湿過程に関しては、

$$C = 359/(107 - H) - 370(32 + H) + 0.189H + 31.7 \quad (10)$$

という近似式で提案している。ここで、 $H$ は相対湿度を表す。

式(8)に式(9)あるいは式(10)を代入することで、水分拡散係数は含水率ではなく湿度の関数となり、これによって境界条件として湿度を用いることが可能となる。本研究では、ひび割れが発生しやすい乾燥過程を取り上げ、式(8)に式(9)を代入した場合を考える (Fig.3 参照)。

### 2.3. 膨張係数

一般に、硬化コンクリートの熱膨張係数は、 $6 \sim 13 \times 10^{-6}$ /の範囲にあり、土木学会コンクリート標準示方書では、一般に  $10 \times 10^{-6}$ / (一定値) を用いてよいとされている。

また、硬化コンクリートは、乾燥によってコンクリート中の水分が逸散・移動し、それともなう水分量の変化により収縮する。このメカニズムとしては、組織内部に存在する水分と組織の固体壁との間における応力のやりとりによって組織が変形するというのが一般的である (毛細管張力説)。しかしながら、コンクリート中の微視的レベルの応力のやりと

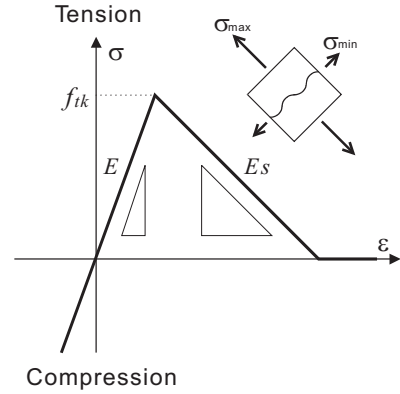


Fig. 4 Tension - softening model

りは観察/計測が不可能であり、この説も類推の域を出ない。しかも、前述の定式化の過程で明らかのように、コンクリート中の微視的機構に基づく水分移動モデルも、直接には検証不可能な多くの仮定の上に成り立っており、加えて実験より定まるパラメータも多々含んでいる。こうした状況の下で、毛細管張力説に基づいた収縮変形モデルを用いた解析が、必ずしも高精度で現象を再現できるとは限らない。

水分 (湿度) の増減によってコンクリートがどれだけ伸縮するかについては、古くより実験的に把握がなされている<sup>(6)</sup>。本研究では、多くの仮定や類推を含んだ毛細管張力説は採用せずに、過去の研究事例より、水分増分 (相対湿度増分)  $dH$  とコンクリートのひずみ増分  $\epsilon^h$  の関係を

$$d\epsilon^h = \alpha dH \quad (11)$$

と定義する。ここで、 $\alpha$ は材料定数 (以降、水分膨張係数と称する) となるが、これは熱膨張係数と同じような物理的意味を有する。無論、 $\alpha$ は湿度の大きさに依存するパラメータと思われるが、簡便性を重視し、本パラメータを定数として用いる。また、本研究では、このような膨張あるい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、

$$d\epsilon_{ij}^h = \alpha_{ij} dH \quad (12)$$

$$\alpha_{ij} = \alpha \delta_{ij} \quad (\delta_{ij} \text{はクロネッカーのデルタ}) \quad (13)$$

と、式(11)を拡張して用いる。熱膨張の問題では、式(12)の水分膨張係数を熱膨張係数に置き換えればよい。

### 2.4. ひび割れの発生と進展

ひび割れ挙動のモデル化に際しては、引張軟化曲線を定義することによりひび割れ発生モデル化を行う。引張側では、コンクリートの弾性係数 ( $E$ ) を有しながら引張強度 ( $f_{tk}$ ) まで上昇し、引張強度に達した後は、勾配 ( $E_s$ ) を有しながら下降する。各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度に達した場合、最大主応力方向 ( $\sigma_{max}$ ) に対して垂直方向にひび割れが入るものとしている。この場合、ひび割れの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じ、他の2方向については軟化はさせず、弾性係数を保つものとしている。ひび割れ発生にともなう応力 - ひずみ関係の

概要を Fig.4 に示す．なお，本研究では，収縮によって発生する応力のレベルで解析を行うことから，圧縮域における構成則は弾性体としている．

本研究では，上述した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う．

### 3. 数値解析

#### 3.1. 熱伝導解析

##### (a) 解析概要

コンクリートの密度 (式 (2) の  $\rho$ ) は  $23.0 \sim 26.0 \text{ kN/m}^3$  であることから，本研究では， $\rho = 24.5 \text{ kN/m}^3$  とする．

コンクリートの熱拡散係数  $D$  は  $0.003 \sim 0.004 \text{ m}^2/\text{h}$  であるが，2章で述べた通り，本研究では  $0.003 \text{ m}^2/\text{h}$  を用いる．

コンクリートの比熱 (式 (2) の  $c$ ) は  $1.0 \sim 1.3 \text{ kJ/kg}$  であり，土木学会コンクリート標準示方書では，その特性値として  $1.05 \text{ kJ/kg}$  を用いてよいとされている．通常のコンクリートでは，使用材料や配合による影響をほとんど受けない．なお，比熱  $c$  は， $c = 3.03 \times 10^3 / \rho$  にて推定することが可能である．

コンクリートの熱伝導率 (式 (1) の  $\lambda$ ) は  $7.5 \sim 13.0 \text{ kJ/mh}$  であり，土木学会コンクリート標準示方書では，その特性値として  $9.2 \text{ kJ/mh}$  を用いてよいとされている． $0 \sim 60$  の常温範囲では，温度が高いほど，あるいは含水率が大きいほど熱伝導率は大きくなるが，本研究では，簡易的にこの値を一定値として用いる．式 (7) と上述した比熱  $c$  の推定式を組み合わせることで，熱伝導率は熱拡散係数  $D$  を用いて定義される．熱拡散係数  $D = 0.003 \text{ m}^2/\text{h}$  を代入して熱伝導率  $\lambda$  を算出すると  $\lambda = 9.09 \text{ kJ/mh}$  と求まり，上述した  $9.2 \text{ kJ/mh}$  に近い値となっている．

コンクリートの熱膨張係数は，2章で述べたとおり， $10 \times 10^{-6}$  (一定値) を用いる．その他，変形解析に必要な弾性係数，ポアソン比については，コンクリートおよび鉄筋とも，それぞれ一般的な値を採用し，コンクリートの弾性係数とポアソン比を  $23,600 \text{ MPa}$  と  $0.2$ ，鉄筋の弾性係数とポアソン比を  $206,000 \text{ MPa}$  と  $0.3$  とした．また，コンクリートの引張強度  $f_{tk}$  についても，コンクリートとして一般的な値である  $2.0 \text{ MPa}$  と設定した，なお，局所ひび割れ (マイクロクラックではなく最終的に卓越したひび割れ) が  $100 \text{ mm}$  程度の間隔で発生し，その開口幅が  $0.1 \text{ mm}$  程度になると仮定すると，ひび割れによるひずみは  $10^{-3}$  となる．前述の引張強度  $f_{tk}$  ( $2.0 \text{ MPa}$ ) とこのひずみのレベルから，コンクリートにおける引張軟化時の勾配 (軟化係数) を  $2,000 \text{ MPa}$  と設定した．

供試体の寸法としては，集合住宅のバルコニー部 (片持ちスラブ) における規格を参考にして，スラブ厚を  $180 \text{ mm}$ ，張り出し部の長さを  $1,560 \text{ mm}$  とした．スラブの幅については，集合住宅のバルコニー部全体について解析を行うのではなく，目地間の1ブロック (ブロック間  $2,000 \text{ mm}$ ) についてのみ行うこととした．また，目地間の1ブロックのスラブは対称性が確保されると仮定し，半分の領域 (スラブ幅  $1,000 \text{ mm}$ ) にて解析を行うこととした．寸法とメッシュ割を Fig.5 に示す．ま

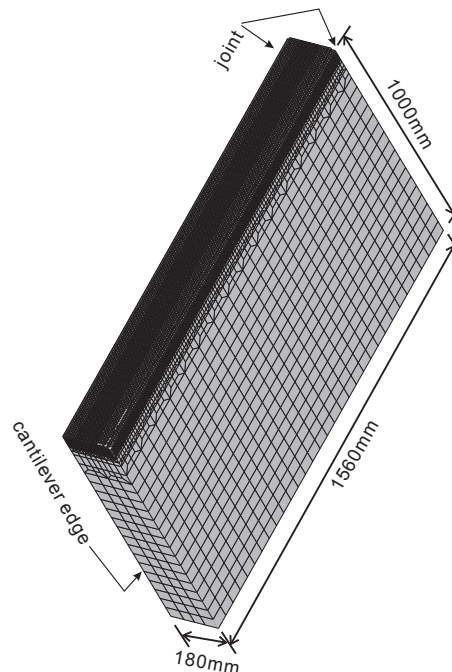


Fig. 5 Analysis mesh (solid element)

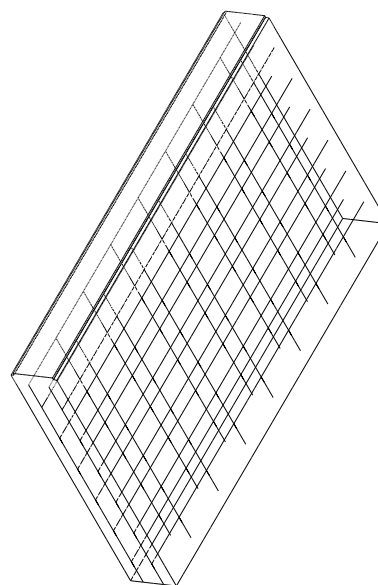


Fig. 6 Analysis mesh (steel-bar element)

た，鉄筋については，対象としている片持ちスラブに用いる素材 (弾性係数とポアソン比は上述の通り) を仮定し，主筋には直径  $14.0 \text{ mm}$  の鉄筋を，また，配力筋には直径  $11.0 \text{ mm}$  の鉄筋を用い，その配置についても，実施工の規格通りとした．鉄筋の配筋を Fig.6 に示す．なお，コンクリート部については8節点の立体要素を，鉄筋部については2節点を結ぶトラス要素を用いている．目地の幅は，表面側で  $20 \text{ mm}$ ，内部側で  $15 \text{ mm}$ ，深さが  $15 \text{ mm}$  で，断面形状としては等脚台形となるが，本解析では，目地間の1ブロックにて解析を行うので，幅はそれぞれ半分となる．目地はスラブの表面および裏面に設ける．解析メッシュの総要素数は  $104,032$  要素，総節

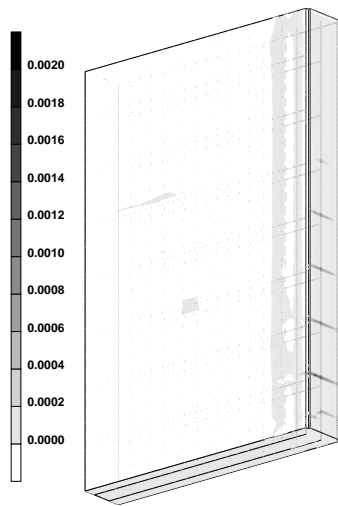


Fig. 7 Distribution of crack strain (thermal, upper surface)

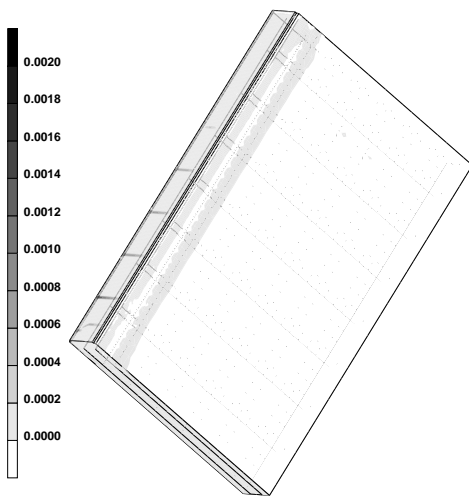


Fig. 8 Distribution of crack strain (thermal, lower surface)

点数は 111,435 点である。

境界条件としては、片持ち部の断面 (cantilever edge) におけるすべての節点の 3 方向変位を 0 (変位固定) とした。また、目地 (joint) のある断面およびその反対断面については、すべての節点において、断面に対して垂直方向の変位のみを 0 (変位固定) とした。打設直後のコンクリートは水和反応によって高温となるため、空気に触れた面より 50mm の深度までは 50 に、それより内部は 70 に設定した。空気に触れた面については、3 日程度で外気温度 (30 ) になり、その後 11 日間は 30 (一定) とした。解析期間は、コンクリート内部の温度が平衡に達すると言われている 14 日間とした。

#### (b) 解析結果

14 日後における、発生したひび割れの最大主ひずみに関して、Fig.7 に表面の分布状況を、Fig.8 に裏面の分布状況を示す。ひび割れは目地の付近に卓越しており、それを外れてはほとんど発生していない。また、発生している方向も、片持ち端部と平行となる方向に、ほぼ等間隔で発生している。

目地と平行となっているものはない。これは、スラブの自重によって、スラブの表面では目地と平行方向に引張応力が作用しており、こうした初期的な応力の影響を受けた形になっている。目地を外れて、目地に平行なひび割れが認められないことから、目地を外れて発生するようなタイプのひび割れは、本研究で解析対象とした片持ちスラブに限れば、温度変化によるものではないことが類推される。

### 3.2. 水分拡散解析

#### (a) 解析概要

解析における条件は、熱伝導解析とほぼ同じであり、相違点は、温度の代わりに湿度を設定する程度である。解析では、夏の終盤に打設し、秋から冬へと外気の湿度が低下していく際の乾燥収縮ひび割れの発生状況を再現することとした。供試体の初期湿度については、打設直後はコンクリートは硬化していないことから、スラブ全体の相対湿度を 100% とした。コンクリートは表面はすぐに乾かないため、一日かけて線形的に 60% (夏場の平均的な湿度) まで低下させて、その後、153 日目 (22 週間) まで線形的に 40% (冬場の平均的な湿度) まで低下させた。

文献<sup>(3)</sup>を参考に、式 (8) における  $D_S$  を 0.787、 $D_0$  を 0.04、 $C_C$  を 80%、 $n$  を 0.905 として解析に用いた。式 (11) における  $\alpha$  (水分膨張係数) については、本研究とは別に実施している実験を基に設定している。当該実験では、直径 100mm、長さ 400mm あるいは 1,000mm の円柱供試体に径の異なる鉄筋 (D10、D13 および D16) を導入し、脱型後、湿度 40% の恒湿室に設置して、経過日数と乾燥収縮ひずみの関係を取得している。それより、鉄筋の有無によって乾燥収縮量が大きく異なっており、また、鉄筋径の太さの違いによって乾燥収縮量が若干異っていた。当該実験の結果を整理することにより、鉄筋近傍領域 (鉄筋から概ね 50mm の範囲にある領域) で  $\alpha = 0.9 \times 10^{-5}/\%$ 、鉄筋から離れた領域 (鉄筋より概ね 50mm 以遠の領域) で  $\alpha = 1.0 \times 10^{-5}/\%$  という値を得ていることから、本研究では、この値を採用した。当該実験に関しては、別の機会に詳細に報告したいと考えている。他の解析パラメータと節点に関する拘束状況については、熱伝導解析と同様とした。

#### (b) 解析結果

22 週間後 (154 日後) における、発生したひび割れの最大主ひずみ分布を Fig.9 に、片持ち部近傍を拡大したものを Fig.10 に示す。なお、紙面の関係から、本結果はスラブの裏面のみの結果を示す。ひび割れは、目地に沿って発生しており、この点は温度解析と大きく異なる。また、本来、目地の導入は目地に沿ったひび割れの発生を期待するものであることから、このようなひび割れの入り方は、ある意味、予想通りということになる。一般には、温度ひび割れで目地に沿ったひび割れが入るという議論もあるが、本結果はそれを支持しないものとなっている。ひび割れのレベルも 10 倍ほど乾燥収縮の方が大きく、目に見える顕著なひび割れとしては、乾燥収縮が主となると考えられる。

目地においては、裏面からも表面からもコンクリート深部

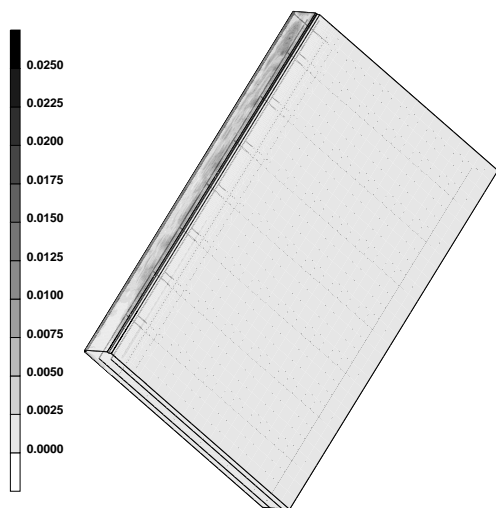


Fig. 9 Distribution of crack strain (shrinkage, depth=15mm)

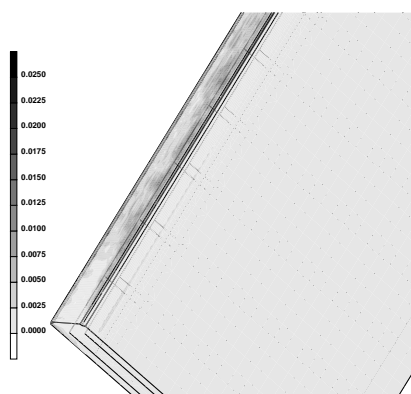


Fig. 10 Distribution of crack strain (shrinkage, depth=15mm, zoom)

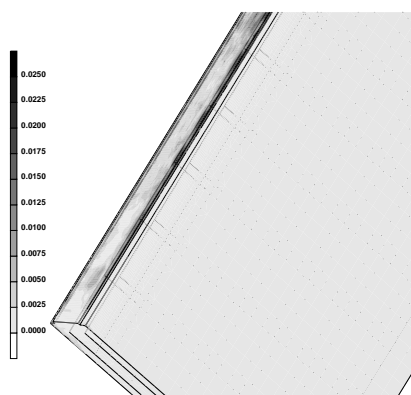


Fig. 11 Distribution of crack strain (shrinkage, depth=20mm, zoom)

方向（厚み方向）にひび割れが進展しているが、裏面からの方がより顕著となっている。また、Fig.10より、片持ち部近傍においては、目地から50mmほど離れた箇所に、ほぼ目地と平行にひび割れが見られるが、これは、実構造物でも確認されるタイプのひび割れである。目地は、誘発目地と称されているとおり、ここにひび割れが入ることには何ら問題はな

いが、目地から外れた表面にひび割れが発生することは、建築意匠の観点から問題となる。

一般に、目地の深さを深くして、コンクリートの断面欠損率を大きくすることで、より効果的に目地にひび割れが誘発される。目地の深さは構造物の厚さに対して20%以上で、30%程度が望ましいとされているが、本解析では、 $30/180 \times = 16\%$ しか確保されていない。そこで、目地の深さを25mm、つまり構造物の厚さに対して27.8%を確保する解析を追加した。その結果をFig.11に示す。Fig.10と比較すると、僅かではあるがFig.10で確認できる片持ち端部付近のひび割れが短くなっていることがわかる。また、裏面の目地近傍にひび割れが集中し、コンクリート深部へひび割れ進展が抑制されていることも分かる。目地の深さを深くすることで、目地の特定箇所にひび割れを局所化させ、かつ、目地以外の箇所でのひび割れの発生を抑制させる効果があることが確認された。さらに目地を深くすると、上述した傾向がより顕著となる可能性があるが、建築意匠上、あまり深くできないという事情もあり、深さとしては、15mmよりも大きく、25mm程度にするというのが現実的な選択肢ではないかと考える。

#### 4. 結言

本研究では、片持ちスラブについて熱伝導および水分拡散解析と変形解析を連成的に実施し、その際のひび割れ状況について考察を加えた。片持ちスラブの拘束性を考えると、温度変化によるひび割れよりも乾燥収縮によるひび割れが卓越すること、また、目地を深くして断面欠損率を高めることで、より効果的にひび割れを目地に誘発できることが判明した。今後は、実現象との比較と通して、目地周辺におけるひび割れの発生メカニズムを詳細に検討したい。

#### 参考文献

- (1) 神崎浩二, 米澤 朗, 樋口 晃, 村上祐治: 2径間ラーメンボックスカルバートの温度応力に対する誘発目地間隔と形状の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1 (2004), pp.1341-1346.
- (2) Bazant, Z. P. and Najjar, L. J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, No.25 (1972), pp.3-20.
- (3) 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, No.316 (1981), pp.145-152.
- (4) 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, (1990), pp.61-69.
- (5) 土木学会編: コンクリート標準示方書 設計編, 土木学会, (2007).
- (6) 小林一輔: コンクリート工学, 森北出版, (1975), pp.81-84.