

# 論文 コンクリートひび割れ面の一般化形状特性と粗さ密度の2次元分析手法の開発

和田 俊良\*1・高瀬 裕也\*2・小松 憲一\*3

要旨：コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達において、ひび割れ面の形状特性は重要な要素であり、その数学モデルに形状特性の傾きが組み込まれてきた。しかし、これまで複数ひび割れ面から傾きや深さの形状特性を一般化する手法もなく、その粗さを評価する手法も触れられずにいる。本論文では、粗面としての乱雑さを有する複数ひび割れ面を合理的に取扱うデータ処理について解説し、ひび割れ面の傾きと深さの一般化2次元密度関数を導出している。さらには、ひび割れ面の傾きと深さを連成させた新たな「粗さ密度2次元関数」を誘導し、実際のひび割れ面の分析結果から本手法の妥当性について検証を加えている。

キーワード：コンクリートひび割れ、傾斜密度関数、深さ密度関数、粗さ密度関数

## 1. はじめに

コンクリートひび割れ面のせん断応力伝達機構<sup>1)</sup>を構成する力学要素の中で、ひび割れ微小面凹凸の傾きと深さ(roughness)は極めて重要な位置を占め、実際に、せん断応力伝達を記述する数学モデル<sup>例えば2)</sup>にひび割れ微小面の傾きが形状特性として組み込まれてきている。周知のようにコンクリートひび割れ面は粗面であるため、限られた計測対象領域からその形状特性の一般化は難しい。しかし、上述の「傾き」はたった一つ(単体)のひび割れ面から分析・抽出されたものであり、データの少なさがひび割れ面の一般的な傾きを物語っていないのは明白である。また新たに、傾きの他に「深さ」の概念を取込んだ「粗さ(roughness)」を数学モデルに組み入れることは、その適合性のさらなる向上から有効であると考えられる。

これまで、ひび割れ微小面の傾きや深さの形状特性を高精度で系統的に2次元ならびに3次元で分析<sup>3),4)</sup>した例は本研究シリーズ以外にはなく、ましてや、複数のひび割れ面の3次元座標データから一般化された傾きや深さ

の形状特性(以下、一般化形状特性と呼ぶ)や粗さが分析・同定されたことは皆無のようである。

コンクリートひび割れ面は粗面であり、その乱雑さが原因してデータの単純な相加平均演算から一般化形状特性を算定することは不可能である。現状では、ひび割れ面の形状特性を整合させて一般化する手法や粗さ分析手法の開発は手付かずのままにある。

本論文では、別個に測定した「複数ひび割れ面の3次元座標値データ」から2次元断面の一般化形状特性と粗さを同定する手法を構築し、実際のコンクリート引張りひび割れ面を分析して、本手法の適合性について検討を加えることをその目的としている。

## 2. 複数ひび割れ面から定まる一般形状特性の分析手法

コンクリートひび割れ面の形状は、その基準面の傾き・位置(global roughness)とそこに展開される凹凸(local roughness)の2成分<sup>3)</sup>で構成されると看做されており、複

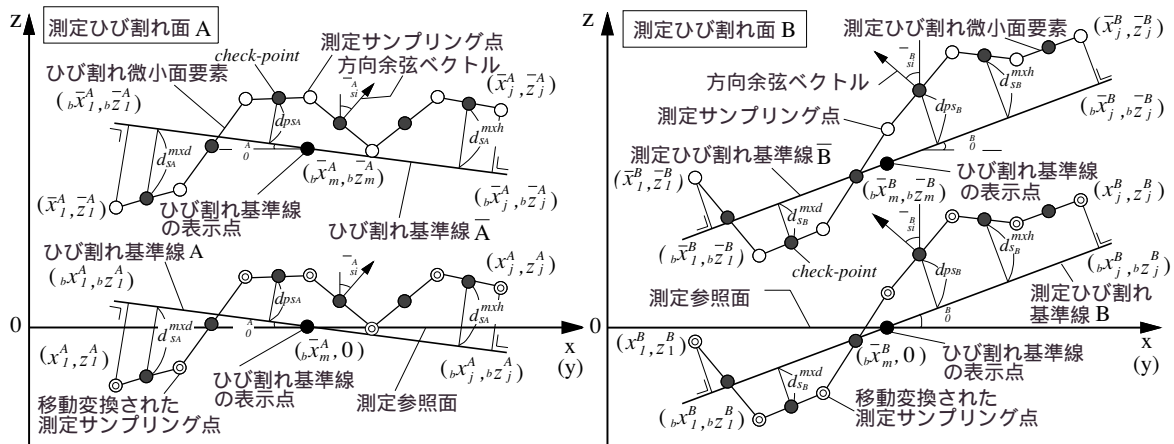


図 - 1 異なるコンクリートひび割れ面の2次元断面モデルとその測定参照面への移行

\*1 北海道職業能力開発大学校建築科講師 工博(正会員)  
 \*2 飛鳥建設技術研究所 工博(正会員)  
 \*3 北海道職業能力開発大学校建築科講師

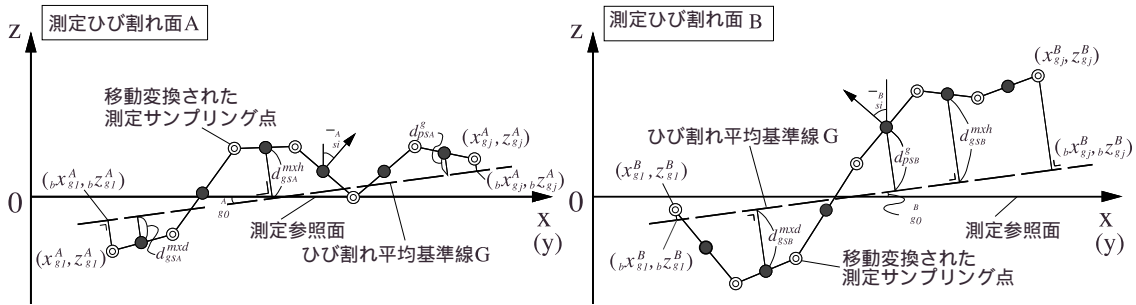


図 - 2 平均基準線座標系におけるひび割れ面の 2 次元形状分析

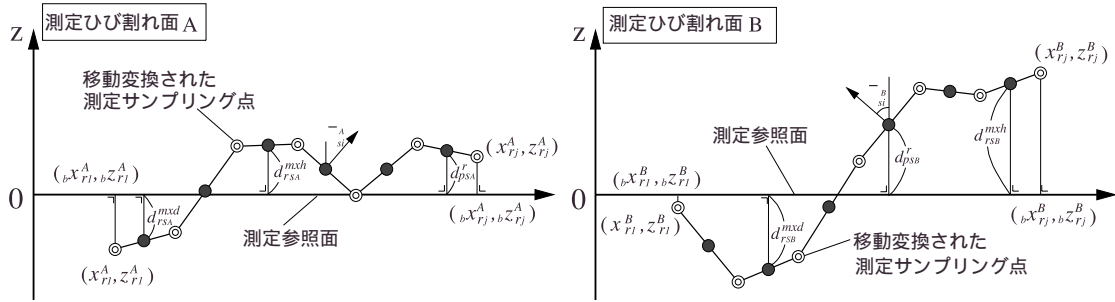


図 - 3 測定参照面座標系におけるひび割れ面の 2 次元分析形状

数のひび割れ面からその一般化形状特性を分析するには、各ひび割れ基準面相互の位置 (*global roughness*) のズレが少なからず影響を与える。

このため本論文では、ひび割れ面ごとに設定される 2 次元分析のための基準線<sup>3)</sup>の位置を揃えるように、ひび割れ面の測定 3 次元座標値を測定参照面へと移行して、ひび割れ微小面の傾きと深さの合成密度関数と粗さ密度関数を定式化することとする。同時にこの定式化では、A) ひび割れ面ごとに独立している基準線座標系 (以下、基準線座標と呼ぶ)、B) 全ひび割れ面から算定される平均基準線座標系 (以下、平均基準線座標と呼ぶ)、C) 測定参照面座標系での計 3 種の分析手法が設定可能であり、本 2 節ではこれについて論述する。

### 2.1 ひび割れ面形状特性としての合成密度 2 次元関数

本分析では、図 - 1 に、異なる 2 つのひび割れ面 A と B の測定 3 次元座標値デジタルデータから、設定間隔 (1 mm) ごとにプログラムソフトを用いて切り出 (サンプリング) した 2 つの断面プロフィールモデルを描画する。先の既報<sup>3)</sup>では、「一つの試験体に形成されたひび割れ面の基準線について傾斜密度関数と深さ密度関数を定式化した」が、最初にその誘導過程を再掲し、これに次いで新たに「複数ひび割れ面の傾きと深さを一般化する合成」と「粗さ密度」の概念について解説を加える。なお、式 (1) 以外は著者らが導出した式である。

ひび割れ微小面の傾き  $\theta_s$  は式 (1) と式 (2) で算定され、 $z_i$  は  $z$  座標値、 $x_i$  は  $x$  座標値、 $\theta_0$  は基準線の傾きである。そして  $i$  は、サンプリング点の番号とする。

$$\bar{\theta}_{si} = \tan^{-1} \left\{ \frac{z_{i+1} - z_i}{x_{i+1} - x_i} \right\} \quad (1)$$

$$\theta_{si} = \bar{\theta}_{si} - \theta_0 \quad (2)$$

これより傾斜密度関数  $\Omega_s$  は式 (3) である。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_s(\theta_s) d\theta_s = 1 \quad (3)$$

つぎに、各ひび割れ面ごとの無次元化深さ  $\eta_s$  は式 (4) であり深さ密度関数  $K_s$  は式 (5) で表示される。 $d_s^{mxd}$  は最高ひび割れ深さ、 $d_s^{mxh}$  は最高ひび割れ高さである。

$$\eta_s = 2(d_{ps} - d_s^{mxh}) / (d_s^{mxh} - d_s^{mxd}) + 1 \quad (4)$$

$$\int_{-1}^1 K_s(\eta_s) d\eta_s = 1 \quad (5)$$

上の展開が著者ら自身が、従前に単体コンクリートひび割れ面を対象とした定式化過程である。

さらに複数のひび割れ面から抽出される一般的な傾き、つまり、「一般化形状特性としての傾き」を求めるためには、全ひび割れ面の測定座標データに式 (3) 式を一括適用して合成傾斜密度関数  $\Omega_{cs}$  とし、式 (6) の合成傾斜密度関数  $\Omega_{cs}$  を定義する。ただし、合成を表す  $c$  を各変数に添え、傾き  $\theta_s$  を  $\theta_{cs}$  と添字を変更する。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_{cs}(\theta_{cs}) d\theta_{cs} = 1 \quad (6)$$

そして新たに合成無次元化深さ  $\eta_s^c$  の式 (7) を式 (5) 導入して、式 (8) の合成深さ密度関数  $K_{cs}$  とする。

$$\eta_s^c = 2(d_{ps} - d_{cs}^{mxh}) / (d_{cs}^{mxh} - d_{cs}^{mxd}) + 1 \quad (7)$$

$$\int_{-1}^1 K_{cs}(\eta_s^c) d\eta_s^c = 1 \quad (8)$$

ここに断面プロフィールの全 *check point* から、最高ひび割れ深さ  $d_{cs}^{mxd}$  と最高ひび割れ高さ  $d_{cs}^{mxh}$  が、それぞれ式 (9) と式 (10) で求めら、A と B はひび割れ面を表している。

$$d_{cs}^{mxd} = \min (d_{SA}^{mxd}, d_{SB}^{mxd}, \dots) \quad (9)$$

$$d_{cs}^{mxh} = \max (d_{SA}^{mxh}, d_{SB}^{mxh}, \dots) \quad (10)$$

## 2.2 ひび割れ面 3次元座標値データの測定参照面への移行

先に述べたように、複数のひび割れ面のひび割れ基準面（もしくは、ひび割れ基準線）の測定座標に対する位置は互いに一致しないので、このままでは、各測定座標データを整合させて分析することはできない。

図 - 1 に示すように、 $n$  本のひび割れ面の各断面プロフィールの両端のサンプリング点  $b\bar{z}_j$  と  $b\bar{z}_1$  からひび割れ基準線へ垂線を下し、その2つの交点座標値の相加平均をとって「ひび割れ面基準線の表示点の  $b\bar{z}_m$  座標」を式(11)で算定する。

$$b\bar{z}_m = \frac{\Sigma(b\bar{z}_j - b\bar{z}_1)}{n} \quad (11)$$

そして、各ひび割れ面ごとの上記の値が測定参照面と一致するように、全測定座標データを垂直移動させる。この処理により、粗面である複数のコンクリートひび割れ面の形状特性が統合された一つの座標系で評価される可能性が高まるものと思われる。

## 2.3 平均基準線座標系での2次元形状特性関数

図 - 2 に、複数ひび割れ面の測定座標全サンプリング点から算定されるただ一本のひび割れ平均基準線  $G$  を図示する。この「平均基準線」の概念によると、平均基準線  $G$  に対するひび割れ微小面の傾き  $\theta_{gs}$  と無次元深さ  $\eta_s^g$  は、それぞれ式(12)と式(13)で記述される。以後、各変数には  $g$  を添えて平均基準線座標系であることを表記することとする。

$$\theta_{gsi} = \bar{\theta}_{si} - \theta_{g0} \quad (12)$$

$$\eta_s^g = 2(d_{ps}^g - d_{gs}^{mxh}) / (d_{gs}^{mxh} - d_{gs}^{mxd}) + 1 \quad (13)$$

ここに全ひび割れ面を通して、平均基準線  $G$  上の最高ひび割れ深さ  $d_{gs}^{mxd}$  と最高ひび割れ高さ  $d_{gs}^{mxh}$  が、式(14)と式(15)で算出れる。

$$d_{gs}^{mxd} = \min (d_{gsA}^{mxd}, d_{gsB}^{mxd}, \dots) \quad (14)$$

$$d_{gs}^{mxh} = \max (d_{gsA}^{mxh}, d_{gsB}^{mxh}, \dots) \quad (15)$$

上の式(12)と式(13)の傾き  $\theta_{gs}$  と無次元深さ  $\eta_s^g$  をそれぞれ式(3)と式(5)に導入すると、平均基準線座標の傾斜密度関数  $\Omega_{gs}$  と深さ密度関数  $K_{gs}$  が式(16)と式(17)で求められる。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_{gs}(\theta_{gs}) d\theta_{gs} = 1 \quad (16)$$

$$\int_{-1}^1 K_{gs}(\eta_s^g) d\eta_s^g = 1 \quad (17)$$

## 2.4 測定参照面座標系での2次元形状特性関数

図 - 3 に、測定座標で表示されるひび割れ微小面の傾き  $\theta_{rs}$  と深さ  $d_{ps}^r$  を示す。前掲の図 - 2 で測定参照面へと移行されたひび割れ断面プロフィール上の微小面の傾きは、何らの処理が施されることのない式(18)の  $\theta_{rs}$  である。以後、 $r$  は測定参照面座標系であることを示す。

$$\theta_{rsi} = \bar{\theta}_{si} \quad (18)$$

また無次元化深さ  $\eta_s^r$  は式(19)で、その最高深さと最高高さはそれぞれ式(20)と式(21)で表示される。

$$\eta_s^r = 2(d_{ps}^r - d_{rs}^{mxh}) / (d_{rs}^{mxh} - d_{rs}^{mxd}) + 1 \quad (19)$$

$$d_{rs}^{mxd} = \min (d_{rsA}^{mxd}, d_{rsB}^{mxd}, \dots) \quad (20)$$

$$d_{rs}^{mxh} = \max (d_{rsA}^{mxh}, d_{rsB}^{mxh}, \dots) \quad (21)$$

上の式(18)と式(19)の傾き  $\theta_{rs}$  と無次元深さ  $\eta_s^r$  を式(3)と式(5)へ導入すると、測定参照座標の傾斜密度関数  $\Omega_{rs}$  と深さ密度関数  $K_{rs}$  が定められ、式(22)と式(23)として求められる。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_{rs}(\theta_{rs}) d\theta_{rs} = 1 \quad (22)$$

$$\int_{-1}^1 K_{rs}(\eta_s^r) d\eta_s^r = 1 \quad (23)$$

## 3. ひび割れ面の粗さ密度2次元分析関数の定式化

コンクリートひび割れ面の形状は、その界面の応力伝達機構を支配する物理因子とされ、特にその傾斜密度関数はひび割れ面相互の接触率を記述する役割を担ってモデル化されている。この接触率には傾斜密度だけではなく、深さ密度も考慮されるべきと思われる、著者らはひび割れ界面の接触率  $C_s$  が式(24)として表現できる可能性が高いと推察しているが、勿論これを実証するには、この接触率  $C_s$  を組込んだ数学モデルを作成してひび割れ面のせん断応力実験値を追跡する必要がある。

$$C_s = F(X_s(\theta_s, \eta_s)) \quad (24)$$

$F$  は単に数学関数を表しており、ひび割れ微小面の傾きと無次元化深さを連成させる「粗さ(roughness)密度2次元関数  $X_s$ 」を新たに提示する。この粗さ密度関数は、前出の傾斜密度や深さ密度の分析概念を拡張するものであり、その分析結果からは「コンクリートひび割れ面形状の傾き  $\theta_s$  と深さ  $\eta_s$  の関係の連関」について、当然のことながら、検証が加えられることになる。

### 3.1 基準線座標での粗さ密度2次元分析関数の導出

著者らの粗さ密度関数を各ひび割れ面ごとに定式化することは容易であるが、本論文では一般化形状特性とし

での粗さの定量を目的としているので、複数ひび割れ面の測定座標データから同定される式(2)のひび割れ微小面の傾き  $\theta_s = \theta_{cs}$  と式(4)の合成無次元化深さ  $\eta_s^c$  を分析変数とする粗さ密度2次元関数  $X_s^c$  を式(25)に定義する。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 X_s^c(\theta_{cs}, \eta_s^c) d\eta_s^c d\theta_{cs} = 1 \quad (25)$$

この密度関数を増分表示すると式(26)となり、同式の  $A_{SC}^{suf}$  は全試験体の総和ひび割れ面積である。

$$dA_{X_s^c} = A_{SC}^{suf} X_s^c(\theta_{cs}, \eta_s^c) d\eta_s^c d\theta_{cs} \quad (26)$$

### 3.2 平均基準線座標での粗さ密度2次元分析関数の誘導

上述の粗さ密度関数は、平均基準線座標へと変換され、ひび割れ微小面の傾き  $\theta_{gs}$  を式(12)で、その無次元化深さ  $\eta_s^g$  を式(13)で算定して、式(27)が再記述される。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 X_s^g(\theta_{gs}, \eta_s^g) d\eta_s^g d\theta_{gs} = 1 \quad (27)$$

$A_{SC}^{suf}$  を総和ひび割れ面積として、上式を増分形で表示すると式(28)となる。

$$dA_{X_s^g} = A_{SC}^{suf} X_s^g(\theta_{gs}, \eta_s^g) d\eta_s^g d\theta_{gs} \quad (28)$$

### 3.3 測定参照面座標での粗さ密度2次元分析関数の誘導

測定参照面座標の粗さ密度関数  $X_s^r$  のひび割れ微小面の傾き  $\theta_{rs}$  を式(18)で、その無次元化深さ  $\eta_s^r$  を式(19)で表示され、 $X_s^r$  は式(29)で定義される。

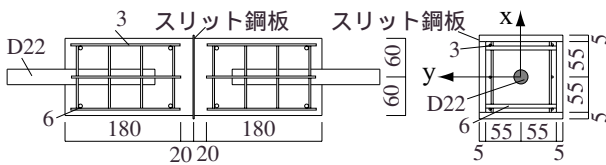


図 - 4 引張試験体詳細

表 - 1 引張試験体一覧

| 試験体記号         | 寸法諸元        | 加力形式 | 測定方向 | 試験体数 |
|---------------|-------------|------|------|------|
| Tn1-1 ~ Tn1-5 | 130x130x400 | 直引張  | X軸   | 5    |

表 - 2 コンクリートの配合

| 種類   | 呼び強度                 | スランブ   | 骨材最大寸法 |
|------|----------------------|--------|--------|
| 普通   | 30 N/mm <sup>2</sup> | 18 cm  | 20 mm  |
| 骨材種類 | セメント                 | 水セメント比 | 細骨材率   |
| 碎石   | N                    | 48.0%  | 47.7%  |

表 - 3 コンクリートの材料性状

| 名称   | スランブ    | 圧縮強度                   | 割裂強度                   |
|------|---------|------------------------|------------------------|
| S18- | 21.5 cm | 36.2 N/mm <sup>2</sup> | 26.4 N/mm <sup>2</sup> |

表 - 4 測定条件

| 入射角度 | スリット幅  | 平行光線間隔 | 分解能          | サンプリング間隔 | 測定光線数 |
|------|--------|--------|--------------|----------|-------|
| /4   | 0.2 mm | 1.0 mm | 0.125 mm/dot | 1.0 mm   | 61    |

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-1}^1 X_s^r(\theta_{rs}, \eta_s^r) d\eta_s^r d\theta_{rs} = 1 \quad (29)$$

$A_{SC}^{suf}$  を総和ひび割れ面積として、この式(29)を増分形表示すると式(30)となる。

$$dA_{X_s^r} = A_{SC}^{suf} X_s^r(\theta_{rs}, \eta_s^r) d\eta_s^r d\theta_{rs} \quad (30)$$

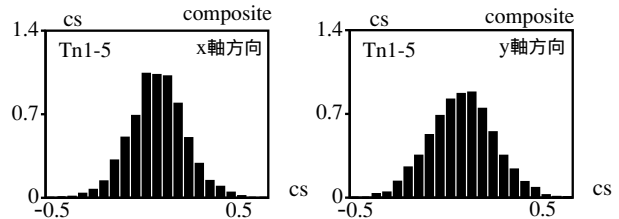
なお、導出諸関数をひび割れ面の3次元座標値データに適用するが、本研究シリーズでは分析結果を「分布」と呼んで検証を加えており、本論文でも同様に取扱う。

## 4 引張ひび割れ面の合成密度2次元分布

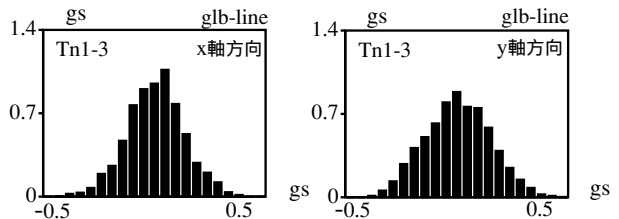
既報<sup>3)</sup>のコンクリートひび割れ形成実験の中から、新たに提案したひび割れ面の2次元形状特性の基本傾向を把握するために、応力状態が安定している「引張モード」を分析対象とする。このひび割れ実験の詳細<sup>3)</sup>は報告済みなので、概要のみを簡潔に以下に示すに止める。

### 4.1 引張ひび割れ実験の概要

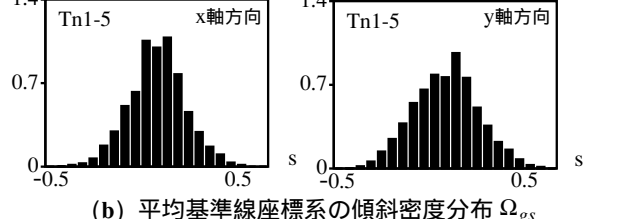
図 - 4 に引張試験体詳細を、表 - 1 に引張試験体一覧を掲げるが、5体の本試験体は直引張加力されてひび割れ面が形成されている。コンクリートの配合と材料性状



(a) 基準線座標系の合成傾斜密度分布  $\Omega_{cs}$

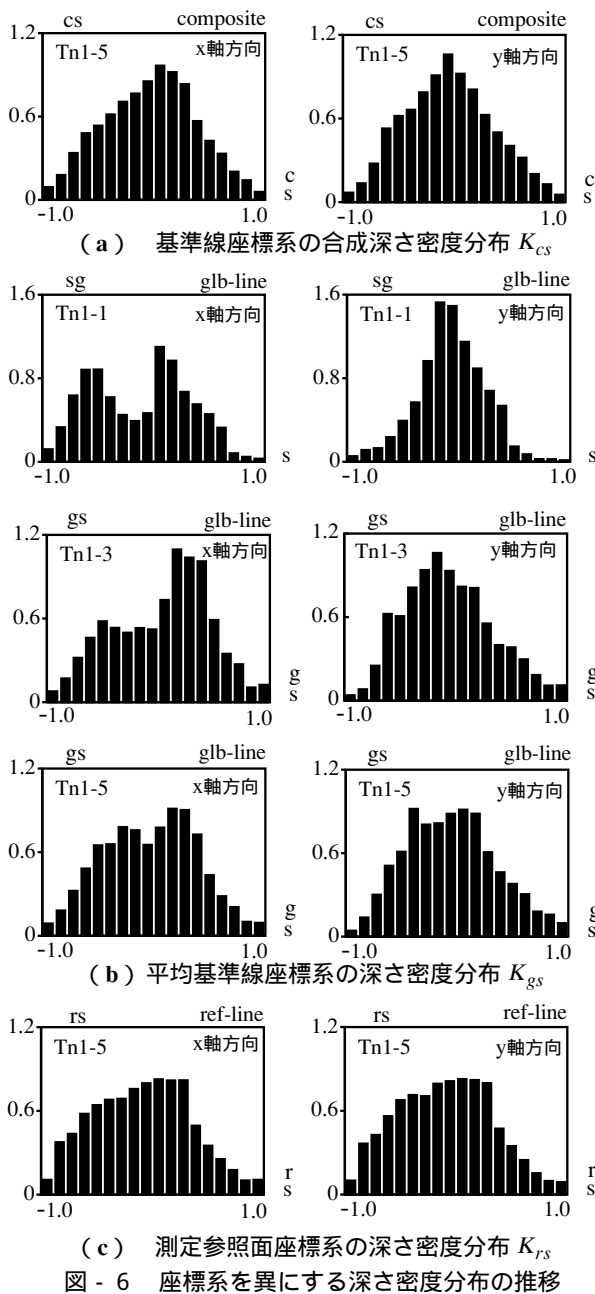


(b) 平均基準線座標系の傾斜密度分布  $\Omega_{gs}$



(c) 測定参照面座標系の傾斜密度分布  $\Omega_{rs}$

図 - 5 座標系を異にする傾斜密度分布の推移



はそれぞれ表 - 2 と表 - 3 に記載し、ひび割れ面の測定・分析の設定条件を表 - 4 に示しておく。

#### 4.2 傾斜密度の分布状況

図 - 5 に引張りひび割れ面の傾斜密度の分布状況を示す。本分析方向は、測定参照面座標のx軸方向とy軸方向の2方向である。ここに、x軸方向は先の図 - 4 の引張試験体断面の鉛直方向であり、y軸方向はその水平方向である。また、試験体数を漸次1から5へ増やして分析しているが、紙幅の都合からこれらの図には一部を除いて全5体の結果のみを掲載している。ここでは、先述したA)ひび割れ面ごとに独立している基準線座標系(基準線座標)、B)ただ一本のひび割れ平均基準線を有する平均基準線座標系(平均基準線座標)、C)測定参照面座標系の順に検証してゆくこととする。

まず最初に、基準線座標系で別個に評価された傾斜の

合成密度値分布を図 - 5 (a) に調べると、傾斜密度分布は上に凸の山形を呈し、同時に傾斜角零に関して対称性に富んでいることが判る。同時にx軸方向のほうがy軸方向よりも平坦なひび割れ微小面がやや多く形成されている。平均基準線座標系で整理された図 - 5 (b) の分布状況には分析試験体数を3とするTn1-3と試験体数5のTn1-5を掲載した。分析試験体数を3と少なくしても、傾斜密度対称性は保持されるが、傾斜が平坦な領域で僅かな相違が読み取れる。合わせて、測定座標系で評価した分布の図 - 5 (c) によると、平坦領域の傾斜密度がやや大きい、これまでの傾斜密度分布状況との乖離は認められない。

紙幅の都合より、試験体数を3とした基準線座標系や測定座標系の傾斜密度分布を掲載できないが、試験体数3としても安定した傾斜密度分布が得られている。

#### 4.3 深さ密度の分布状況

図 - 6 に引張りひび割れ面の深さ密度の分布状況を示す。全5体の深さ密度分布を総覧すると、上に凸の山形分布を呈しており、図 - 6 (a) の基準線座標系、図 - 6 (b) の平均基準線座標系、図 - 6 (c) の測定参照面座標系の順に僅かに深さの出入りが増している。この中の図 - 6 (b) には、分析試験体数を1, 3そして5としたTn1-1, Tn1-3, Tn1-5の結果を描画しており、複数ひび割れ面の分析によって深さ密度の分布が一般化されて行く経緯が観察される。Tn1-3ではx軸方向の分布がやや偏っているようであるが、他方のy軸方向においておおよその収束が認められる。

以上より、本分析手法によって傾斜密度分布の一般化形状特性を得るには、3体程度のひび割れ面を用いれば良いようである。一方、深さ密度分布に関しては、複数ひび割れ面の分析なしにその形状特性を一般することはできず、試験体数3である程度の傾向を読み取れそうであるが、他の曲げモード、せん断モード、割裂モード下での分析結果をも合わせて総合的な結論を導くべきと考えられる。

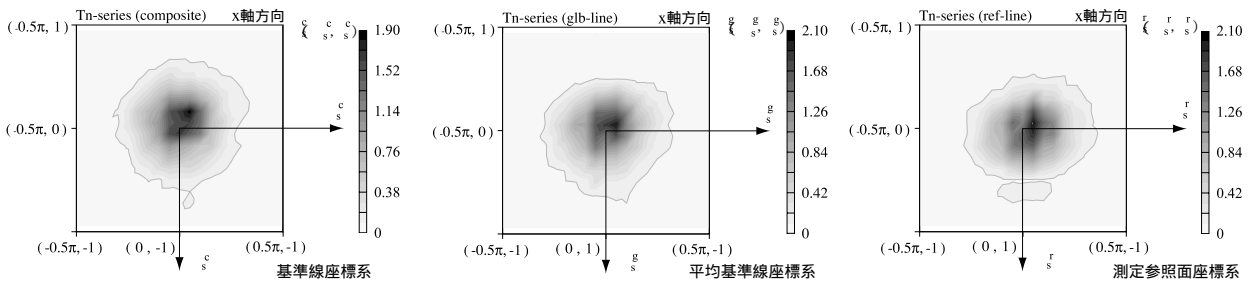
#### 5. 引張りひび割れ面の粗さ密度2次元分布の比較・考察

本節では、著者らがひび割れ微小面の傾きと深さを連成させて定式化した「粗さ密度2次元分析関数」を引張りひび割れ面に適用した結果について、4節と同様にA)基準線座標系、B)平均基準線座標系、C)測定参照面座標系の順に検証してゆく。

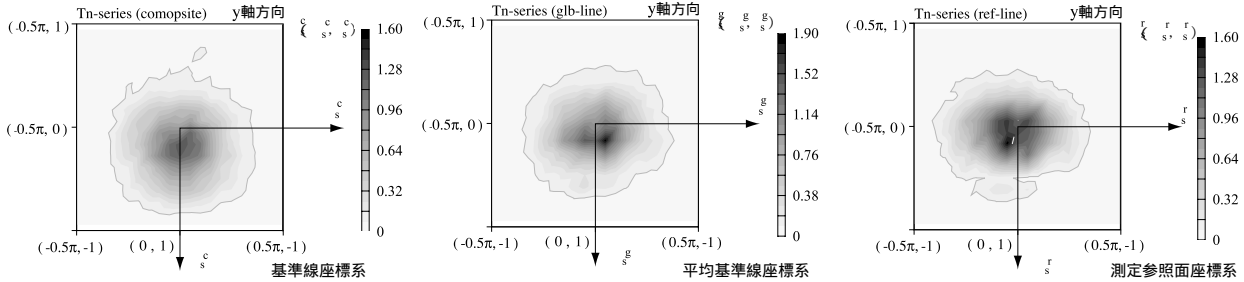
##### 5.1 3種の座標系で分析された粗さ密度2次元分布

図 - 7 に、引張りひび割れ面の「粗さ密度分布  $X_s$ 」を掲げる。この密度分布の表示法は横軸に傾斜角を-0.5 から0.5 に取り、同時に縦軸に無次元化深さの値を-1.0から1.0に取って、その密度値分布を等高線処理し、その密度





(a) ひび割れ面の粗さ密度分布 ( x 軸方向 )



(b) ひび割れ面の粗さ密度分布 ( y 軸方向 )

図 - 7 座標系を異にする粗さ密度分布の推移

値変化をグラデーションを付して表現したものである。

図 - 7 より、全般に、粗さ密度 2 次元分布は密度値ピークを原点近傍に有する等円分布を呈し、傾斜角と無次元化深さが小さくなるほどその密度値を大きくする概形を示した。この分析状況は、以前の同一ひび割れ面の形状分析結果のパラッキの程度から認識されるものよりも、遙かに端正な等円を描いている。これは、複数ひび割れ面による一般化手法による有用性を示すものと判断される。

図 - 7 (a)のx軸方向分布でも、同図(b)のy軸方向の分布でも、各ひび割れ面ごとの粗さ密度を式 (25) によって合成したA)基準線座標系の分布と式 (27) のB)平均基準線座標系の分布を比較すると、平均基準線座標系の方が、ひび割れ微小面の傾きと無次元化深さが小さい領域で粗さ密度がやや大きく算定されており、分布が原点関にして対称性を富ませていることを知る。さらに、式 (29) のC)測定参照面座標系では、原点近傍で傾斜角に沿った分布に若干の乱れが見てとれるようである。

## 6. まとめ

本論文では、A)基準線座標系、B)平均基準線座標系、C)測定参照面座標系において、複数のコンクリートひび割れ面の傾斜密度と深さ密度を合成算定し一般化する手法を提示し、さらにひび割れ微小面の傾きと無次元化深さを連成させて評価する「ひび割れ面の粗さ密度 2 次元分析関数」を新たに定式化した。これらの関数を用いて引張ひび割れ面を 2 次元分析したが、得られた結果を要約すると以下のものである。

- 1) 傾斜密度分布はおおよそ山形であり、座標系の設定によらず対称性に富んでおり、試験体数 3 で一般化される。

- 2) 深さ密度は複数ひび割れ面の分析から試験体数 3 以上で一般化傾向が読取れそうであり、基準線座標系、平均基準線座標系、測定参照面座標系の順にやや深さの変化を激しくしてゆく。

- 3) 粗さ密度 2 次元分布を等高線表示すると密度ピークを原点近傍に有する端正な等円分布を呈示し、複数ひび割れ面による一般化手法の有用性が示された。

本分析結果は、引張ひび割れ面を対象とした限られたものである。今後、他のモードで形成されたひび割れ面の分析結果について、稿を改めて報告する予定である。

## 参考文献

- 1) Bzant, Z.P. and Gambarova, P.G.: Crack Shear in Concrete : Crack band Microplane Model, J. of the Structural Division, ASCE, Vol.110, No.9, 1998.2.
- 2) 高瀬祐也, 和田俊良, 上田正生: ひび割れ微小面のせん断軟化現象を考慮した 2 次元せん断伝達モデルの提案とその適合性の検証 - コンクリートひび割れ面のせん断伝達機構に関する研究 その 2 -, 日本建築学会構造系論文集, 第630号, 2008.8.
- 3) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線によるひび割れ面形状測定手法の開発とデータの 2 次元分析手法の提案 - コンクリートひび割れ面の形状特性分析に関する基礎的研究 (その 1) -, 日本建築学会構造系論文集, 第490号, 1996.12.
- 4) 和田俊良, 佐藤龍司, 石川千温, 上田正生: レーザビーム光線を用いて測定したコンクリート亀裂面画像データの 3 次元分析手法の提案 - コンクリート亀裂面の形状特性分析に関する基礎的研究 (その 3) -, 日本建築学会構造系論文集, 第524号, 1999.10.