

# 論文 狭小なサンプリング間隔によるコンクリートひび割れ面の一般化 2次元形状特性分析

和田 俊良<sup>\*1</sup>・高瀬 裕也<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本論文では, 従来にない高精度下でコンクリートひび割れ面の3次元座標値をCAD *stl-data* として取得した。膨大な *stl-data* から本形状特性分析に必要なサンプリング点を特定するために正規化格子点検索手法を開発し, その解析効率から本手法の有用性を明示した。サンプリング間隔 SI を 0.125 mm へ狭小化して一般化2次元形状特性分析したが, 傾斜密度分布 $\Omega_s$ とひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ は, 分析方向や座標系の違いの影響を殆ど受けなかったことから, 精度の高い安定した分析にサンプリング間隔 SI の狭小化は有意と判断された。

**キーワード:** コンクリート, ひび割れ面, サンプリング間隔, 傾斜密度関数, ひび割れ面積増加率

## 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は複雑でありながら, これまで比較的簡素な接触論に依拠して説明されてきた。しかし, 著者らのダイラタンシー比  $\alpha$  (ひび割れせん断変位の増大に惹起されるひび割れ幅の増加率) を一定とするせん断実験<sup>1)</sup>では, 従来の接触論では説明し難いせん断軟化挙動が計測され, 接触論の修正の必要性が浮き彫りにされたようである。

接触論には, 著者らが計測・分析している「ひび割れ面の傾きを表示する傾斜密度分布<sup>2)</sup>」が繰込まれているが, これだけではなく, 深さを表示する深さ密度分布などの形状特性<sup>2)</sup>が重要なファクターと見定めることは自然なことと思われる。

最近の研究を概覧したところ, コンクリートひび割れ面や打継面を対象とし, その破壊エネルギーを面積増加率やフラクタル次元で説明する実験と解析例<sup>3)</sup>が報告されている。しかし, 本研究のように傾斜密度や深さ密度などの形状特性を分析した例は見当たらずである。

ここ十年来, 3次元座標値測定の精度が飛躍的な向上を見せ, ひび割れ面の膨大な高精度座標値が得られるようになった。具体的には, 精度の向上はひび割れ形状分析におけるサンプリング間隔 SI の狭小化を意味する。

測定3次元座標値が *Cad stl-data* などのように不規則性を有する場合, 本形状特性分析<sup>2)</sup>で必要とする測定参照面の正方形格子点から定まる3次元座標値(サンプリング点)を一般的な方法で求めるには長大な時間を要し, その演算処理が非現実的であることは容易に推察される。

そこで本論文では, ひび割れ面の高精度3次元座標値データからサンプリング点を高速解析する手法を新たに開発する。また, 3次元座標値データの高精度化は, 種々の座標系で記述される傾斜密度分布 $\Omega_s$ やひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ などのひび割れ面の形状特性分析結果を変容させる

可能性があり, ここではサンプリング間隔 SI の狭小化が分析結果に及ぼす影響について若干の検証を行うこととする。

## 2. サンプリング点の高速解析手法の開発

本計測では, コンクリートのひび割れ面の画像撮影と3次元座標値の取得に表-1に掲げた非接触型3次元デジタイザーを使用した。光源にクラス2の半導体レーザーを搭載し, 照射レーザーの反射光を131万(1280×1024)画素の高性能CMOSセンサーで受光する。測定原理は光切断法とし, 座標値の精度は±0.04 mm (最大誤差0.08 mm) である。

本論文では, 通常打設されることが多い圧縮強度 Fc を 40MPa とするコンクリートを分析対象としており, その

表-1 非接触型3次元デジタイザーの仕様

測定原理	光源	画素数	精度
光切断法	半導体レーザー クラス2	1310720 (1280×1024)	±0.04mm 最大0.08mm

表-2 コンクリート Fc40 の調合表

W/C (%)	配合 (kg/m <sup>3</sup> )				
	水	セメント	粗骨材	細骨材	混和剤
39.5	180	456	974	715	4.56

表-3 コンクリート Fc40 の材料性状

圧縮強度 (MPa)	割裂強度 (MPa)	最大骨材寸法 (mm)	スランプ (cm)
45.0	5.6	20	18.8

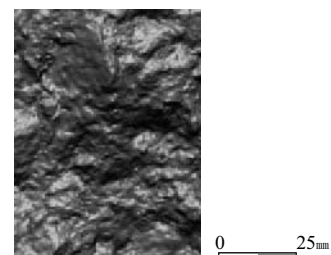


写真-1 3次元デジタイザーで撮影されたひび割れ面

\*1 秋田職業能力開発短期大学校 住居環境科教授 工博 (正会員)

\*2 飛島建設 技術研究所 工博 (正会員)

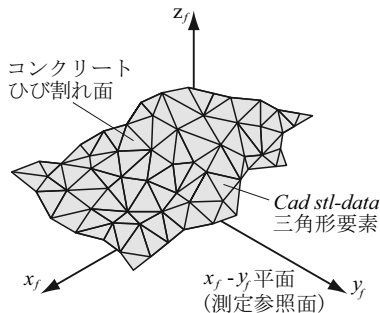


図-1 コンクリートひび割れ面の CAD stl-data の概要

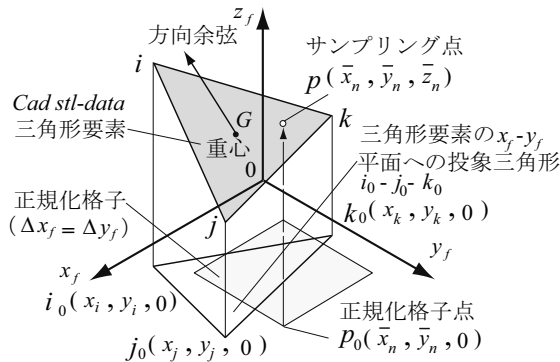


図-2 CAD stl-data の詳細

調査表を表-2に、その材料特性を表-3に示す。合わせて写真-1には、コンクリートひび割れ試験体<sup>1)</sup>を既報の鋼製加力フレーム<sup>1)</sup>に装填し、4軸のマイクロジャッキの直引張加力によってひび割れを形成させた試験体表面の撮影画像を示す。

本測定では、光切断法によって得られた上記のひび割れ試験体表面の3次元座標値を図-1の測定座標軸を $x_f$ - $y_f$ - $z_f$ とするCAD stl-data (以後、stl-dataと呼ぶ)へと変換している。その詳細を図-2に描画しており、stl-dataにおいては物体表面に三角形平面要素 $i$ - $j$ - $k$  (以下、三角形要素と呼ぶ)を貼付し、その3頂点の3次元座標値がテキストデータとして記述され、三角形要素間に間隙は存在しない。合わせて、後述の解説に備えて図-2では、測定参照 $x_f$ - $y_f$ 平面上に隣接サンプリング点間隔SIを $\Delta x_f = \Delta y_f$ とする正方形の格子、即ち「正規化格子」を組んでおり、その「正規化格子点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ 」から、直上のstl-data三角形内のサンプリング点を算出することとなる。

本研究では、コンクリートひび割れ微小面の傾きや面積増加率などの形状特性を2次元と3次元で分析を行っている。これには図-3のとおり、ひび割れ面のstl-dataから断面プロフィール(crack profile)を切出し、プロフィール上のサンプリング点を算定する必要がある。

勿論、stl-dataの3頂点はサンプリング点と一致するはずもなく、 $x_f$ - $y_f$ 平面上の所与の正規化格子の点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$  (以後、正規化格子点と呼ぶ)に対応するただ一つのstl-dataの三角形要素を無数の中から検出し、そ

の三角形要素の平面方程式より座標値 $\bar{z}_n$ を算定して「サンプリング点 $P(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$ 」が求められる。

## 2.1 Stl-data 三角形要素検索手法

先に触れたように、近年、3次元座標値の測定精度は飛躍的な向上を見せ、当然、取得データ容量が従来よりも著しく大きくなっている。このため、本研究で必要とされるサンプリング点の検索手法によっては、その作業時間が長大となる可能性が十分に指摘される。

サンプリング点の検索手法としてまず想起されるのは、図-4のように、一つの正規化格子点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ の対となるサンプリング点 $P(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$ を内包する一つの三角形要素を全stl-dataから逐次検索する手続き(procedure)であると思われる。本研究では、これを「Stl-data 三角形要素検索手法」と呼んでおり、同図-4では説明の都合から $x_f$ - $y_f$ 水平面を鉛直平面へ回転させている。

その検索アルゴリズムにおいて、前出の図-2と図-3に描画するとおり、サンプリング点 $P(\bar{x}_n, \bar{y}_n, \bar{z}_n)$ がstl-data三角形要素 $(i$ - $j$ - $k)$ 領域内に内包されると言うことは、取りも直さず、 $x_f$ - $y_f$ 平面(測定参照面)上の正規化格子点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ が三角形要素の $x_f$ - $y_f$ 平面への投影三角形 $(i_0$ - $j_0$ - $k_0)$ 領域に内在することと同義であり、ここに三角形 $(i_0$ - $j_0$ - $k_0)$ を「投影三角形」と略称する。従って、所与の正規化格子点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ を固定し、stl-data三角形要素を逐次読み、その投影三角形が $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ を内在させれば、当該のstl-data三角形要素が検出されたことになる。

投影三角形による判定は、図-5のように全て $x_f$ - $y_f$ 平面上で行われ、正規化格子点 $P_0(\bar{x}_n, \bar{y}_n, 0)$ から3頂点 $i_0, j_0, k_0$ へのベクトル線のなす角の総和を取りその総和角が

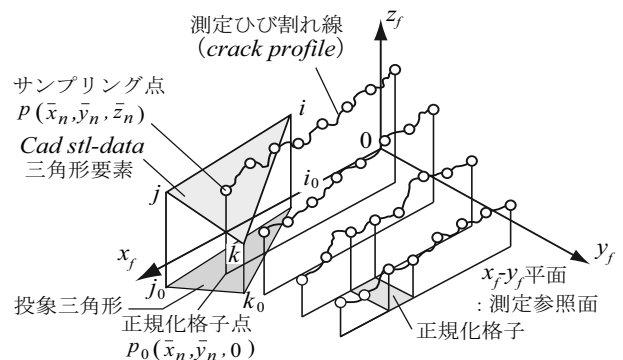


図-3 コンクリートひび割れ面のサンプリング点の検出

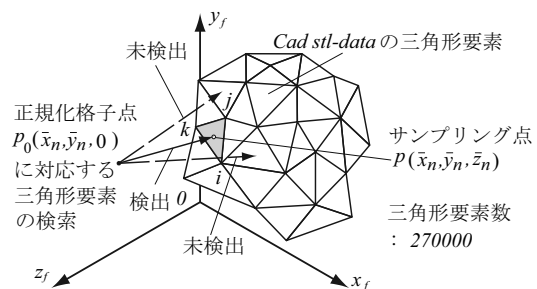


図-4 正規化格子の固定点からの三角形要素の逐次検索

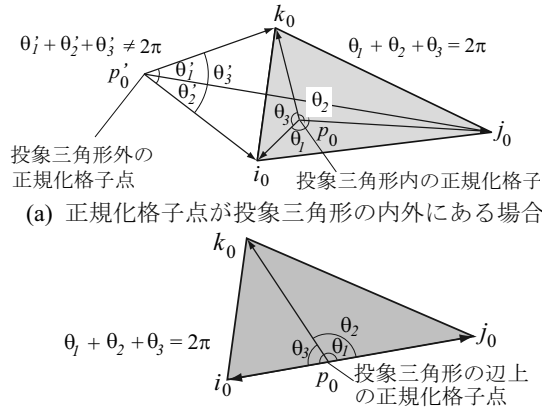


図-5 投影三角形領域による正規化格子点の判定

$2\pi$  の場合、 $p_0(x_n, y_n, 0)$  はその直上の三角形要素の領域内もしくは辺上にあるとされる。 $2\pi$  を満たさない場合、次の投影三角形について同様に総和角を算定し、それが  $2\pi$  を満たすまで検索を繰り返す。

実際には、本解析のサンプリング点数は  $700 \times 870$  (609000) であり、*stl-data* の三角形要素数は 270000 を超えるものである。上記の手法を試行したが、1つのサンプリング点の検出に 10 秒程度を費やし、雑駁な推算ではあるが、全点で約 100000 時間以上を要するようであった。この時間の長さは非現実的で、検索プログラムの検証さえ困難にし、解析アルゴリズムの変更は必至となる。なお、使用 Personal Computer の仕様は、Microsoft Windows XP professional Version 2002, Intel(R) Core(TM)2 Duo CPU U9400 @1.4GHz 1.4GHz, 1.95GB RAM である。検索プログラムは、Fortran 77 で作成している。

## 2.2 正規化格子点検索手法

前項 2.1 での過大な演算時間の原因は、1つのサンプリング点に対して 270000 (平均すれば 135000) もの三角形要素の逐次判定にあり、その全点の作業の組合せは  $8.2215 \times 10^{10}$  の膨大な演算作業に及ぶ。

これを回避するには、図-4 とは逆に、図-6 のように *stl-data* の一つの三角形要素に内包されるサンプリング点を検出してゆく手法が考えられる。これを詳述すると、 $x_f - y_f$  平面上への投影三角形  $i_0 - j_0 - k_0$  領域内の正規化格子点を求め、この格子点から三角形要素のサンプリング点を特定するものである。この手法の特徴は、三角形要素の座標値の読込回数を 1 度に止め、かつ正規化格子点の検索に限られることを活用して、その演算回数を上記の  $8.2215 \times 10^{10}$  より遥かに少なくするところであり、本研究ではこれを「正規化格子点検索手法」と呼ぶ。

図-7 に正規化格子点検索手を示す。図-7 では、 $x_f - y_f$  平面上の投影三角形  $i_0 - j_0 - k_0$  を囲う正規化格子による最小矩形領域を算定し、この矩形領域内の点群の内、投影三角形  $i_0 - j_0 - k_0$  に内在する正規化格子点を先の図-5 の判定によって拾い上げ、そのサンプリング点を定めるもの

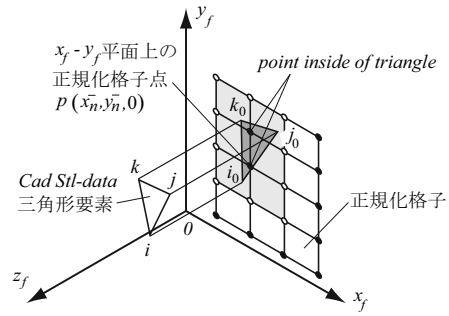


図-6 任意の三角形要素からの正規化格子点の検索

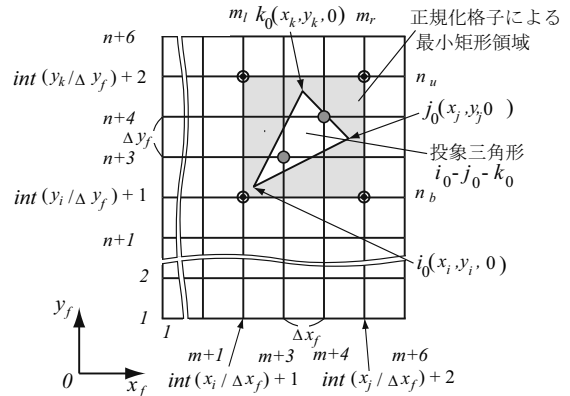


図-7 正規化格子点による投影三角形の囲い込みと検索

である。

投影三角形  $i_0 - j_0 - k_0$  を囲うには、正規化格子点にアドレス番号を付し、左下片隅を 1 番目の正規化格子点に据え、任意点を  $x$  方向の  $m$  番目と  $y$  方向の  $n$  番目として表示する。

正規化格子点は、先述のとおりその隣接間隔を  $\Delta x_f = \Delta y_f$  としているので、当該投影三角形を囲む最小の矩形領域は容易に求められる。矩形領域の左下点座標を  $(m_l, n_b)$ 、右上点座標は  $(m_r, n_u)$  とし、その隅角点のアドレスは下の式 (1) から式 (4) で記述される。

$$n_l = \text{int}(x_i / \Delta x_f) + 1 \quad (1)$$

$$n_r = \text{int}(x_j / \Delta x_f) + 2 \quad (2)$$

$$m_b = \text{int}(y_i / \Delta y_f) + 1 \quad (3)$$

$$m_u = \text{int}(y_k / \Delta y_f) + 2 \quad (4)$$

なお、上記の式中の *int* は浮動小数点数以下切捨ての整数化関数である。

これにより、正規化格子点と対となるサンプリング点がどの三角形要素に属しているのか、同時にその存在の有無も識別され、著者らが「正規化座標マップ」と呼ぶ情報マップがここに作成される。

## 2.3 Stl-data からの最大矩形領域の設定

ひび割れ面の *stl-data* の外形は、先の図-1 や図-8 のように不整形であるので、解析対象とする  $x_f - y_f$  平面上の最大矩形領域を切出す必要があり、ここではその設定に 1)

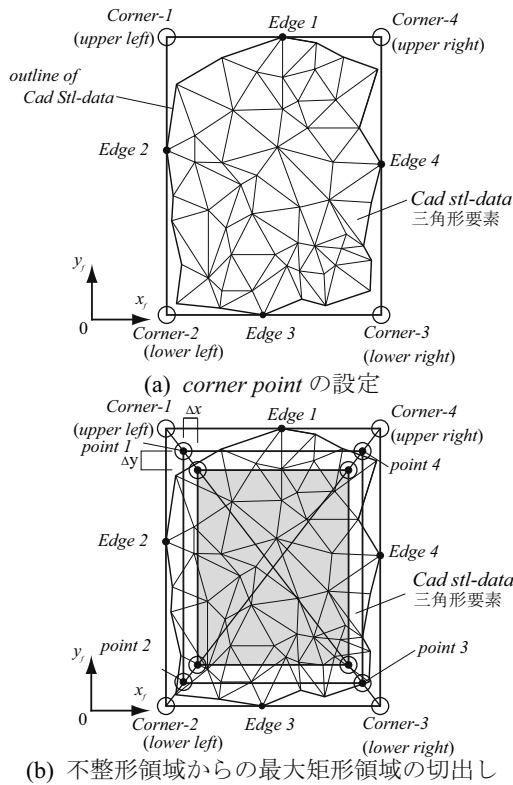


図-8 *Stl-data* の収縮処理による最大矩形領域の設定

収縮処理と 2) 膨張処理を試みる。

### (1) 収縮処理による最大矩形領域の切出し

収縮処理は、図-8(a)のように取得 *stl-data* の  $x_f$ - $y_f$  平面への投影外形となる *Edge point* を調べ、これを通る水平線と鉛直線の交点に4つの *corner point* を置く。次に適当な増分量  $\Delta x$  を与え、図-8(b)の対角線上を辿るように、矩形領域を逐次縮小 (*trimming*) させてゆき、矩形領域の各辺が投影三角形内に位置するまで削ってゆく。

計算を実行したところ、ひび割れ面によっては収斂性が良好ではなかった。この原因は、 $x_f$ - $y_f$  平面上の投影三角形の辺が水平や鉛直に極めて近い場合、最大矩形領域の辺との一致判定において数値演算上の誤差が呼ばれるためと考えられる。従って、収縮処理による最大矩形領域の切出しは収斂性に若干の問題があるようである。

### (2) 膨張検索による最大矩形領域の設定

収縮処理に替えて、先に作成した「正規化座標化マップ」を用いて最大矩形領域を設定する膨張処理を試みることにする。同図-9の○印は正規化格子点が存在するアドレスである。

初期設定領域は、正規化座標マップの中央あたりの適当な大きさの矩形とする。ファーストステップとして、その左上隅部のアドレス  $(m_{x_0}, n_{y_0})$  を初期検索ポイントとし、次いで検索ポイントをその1つ左上のアドレス  $(m_{x_0-1}, n_{y_0+1})$  へ移行させ、初期設定領域に沿って反時計方向に外周させる。この時、正規化格子点が全て存在すれば検索ポイントはもとの左上隅の  $(m_{x_0-1}, n_{y_0+1})$  へ戻り、さ

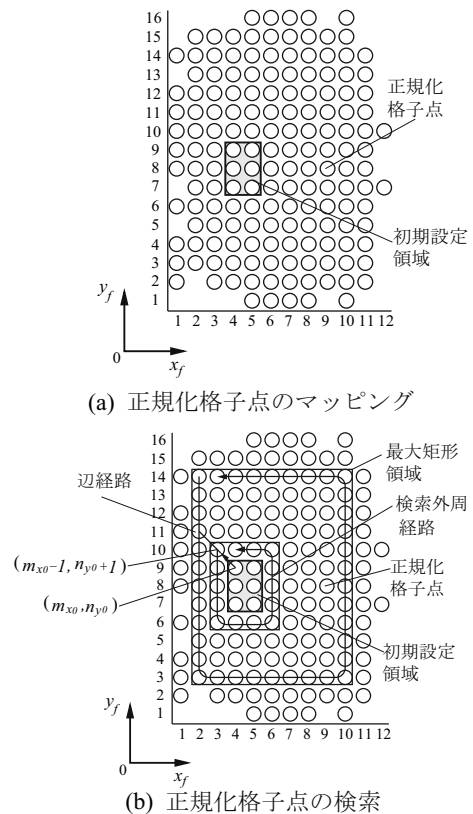


図-9 正規化座標マップによる最大矩形領域の膨張検索

らに  $(m_{x_0-2}, n_{y_0+2})$  で始まる次のステップへ進み、反時計方向に1ステップ前の矩形領域に沿って外周する。 $x_f$  軸もしくは  $y_f$  軸に平行な辺経路において正規化格子点が1つでも存在しない場合には、これに対応する1つ前の辺経路を固定する。このシンプルなアルゴリズムで確実に最大矩形領域が設定可能となった。

本解析では、実際にコンクリートひび割れ面の約609000点に及ぶサンプリング点を「正規化格子点検索手法」によって *CAD stl-data* から算定し、その最大矩形領域を正規化座標マップを用いた「膨張処理」から設定可能とした。これの解析所用時間は約10分間に短縮され、本手法の有用性が十分に示された。

## 3. ひび割れ面の一般化2次元形状特性分析手法の概要

既報<sup>2)</sup>において、コンクリートひび割れ面の一般化2次元形状特性分析手法については論述済みである。詳細は既報<sup>2)</sup>に譲り、ここではその概要について解説する。

### 3.1 傾斜密度関数 $\Omega$

コンクリートひび割れ微小面は、先の図-3のひび割れ面の測定断面プロフィールの隣接サンプリング点を結ぶ直線としてモデル化している。 $x$  方向での微小面の傾き  $\theta_{si}$  は、 $i$  番目の  $x$  座標値  $x_i$  と  $z$  座標値  $z_i$  から式(5)と式(6)で算定され、基準線の傾き  $\theta_0$  によって補正される。 $\theta_0$  は座標系によって異なり、本解析では a) ひび割れ面ごとに基準線を設定する「基準線座標」、b) 全てのひび割れ面から

一つの基準線を設定する「平均基準線座標」、c) 測定参照面と一致する「測定座標」の3つの座標系を定義しており、詳細は既報<sup>2)</sup>を参照されたい。

$$\bar{\theta}_{si} = \tan^{-1} \left\{ \frac{(z_{i+1} - z_i)}{(x_{i+1} - x_i)} \right\} \quad (5)$$

$$\theta_{si} = \bar{\theta}_{si} - \theta_0 \quad (6)$$

得られた微小面の傾斜角 $\theta_{si}$ を式(7)で確率密度化し、これを傾斜密度関数 $\Omega_s$ とする。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_s(\theta_s) d\theta_s = 1 \quad (7)$$

### 3.2 ひび割れ面積増加率 $\gamma_s$

ひび割れ表面積 $\gamma_s$ は、その凹凸からもとの面積よりも増加する。ひび割れ面の全体の面積増加率 $\gamma_s$ を式(8)とし、式(9)による $x$ 方向の増加率 $\gamma_{sx}$ と式(10)による $y$ 方向の $\gamma_{sy}$ との乗算とする。 $c_{cx}$ は $x$ 方向のひび割れ表面の積分経路、 $c_{bx}$ は $c_{cx}$ の各基準線座標への投影経路であり、 $c_{cy}$ と $c_{by}$ は $y$ 方向におけるそれである。また、 $S_x$ は $x$ 方向のひび割れ表面の形状関数であり、 $\bar{S}_x$ は $S_x$ の各座標系の基準線上の投影直線関数であって、 $S_y$ と $\bar{S}_y$ は $y$ 方向のそれである。

$$\gamma_s = \gamma_{sx} \cdot \gamma_{sy} \quad (8)$$

$$\gamma_{sx} = \int_{c_{cx}} S_x dx / \int_{c_{bx}} \bar{S}_x dx \quad (9)$$

$$\gamma_{sy} = \int_{c_{cy}} S_y dy / \int_{c_{by}} \bar{S}_y dy \quad (10)$$

本論文では、繰返しになるが3つの異なる座標系によって傾斜密度分布 $\Omega_s$ とひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ を記述している。これらの表記を詳述するには限りがあるので、傾斜密度分布 $\Omega_s$ の添字を、基準線座標でcs、平均基準線座標でgs、測定参照座標でrsと表記し、ひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ は凡例表記によって明示する。

### 4. ひび割れ面の一般化2次元形状特性分析結果の検証

既報<sup>2)</sup>で著者らは、コンクリートひび割れ面の3次元座標値を分解能0.125 mm/dot、サンプリング間隔SIを1.0 mmとして計測・分析し、3種の座標系を用いて、一般化2次元形状特性分析を行った。

著者らの光切断法による以前の3次元座標値計測システムでは、 $y$ 方向の測定プロフィール間隔をサンプリング間隔SIと一致させており、これ以上に測定間隔を狭くしての計測は作業効率から限界に近かった。

今日では前掲の表-1のとおり、最高精度0.08 mmまで向上し、測定方向を問わずに理論上サンプリング間隔SIを0.08 mmとする自動計測と分析が可能となっている。

そこで本論文では、試験体数3、分析対象領域60 mm × 80 mm、サンプリング間隔SIを1.0 mmから0.5 mmそして0.125 mmへと3段階に狭小化させ、ひび割れ面の一般化2次元

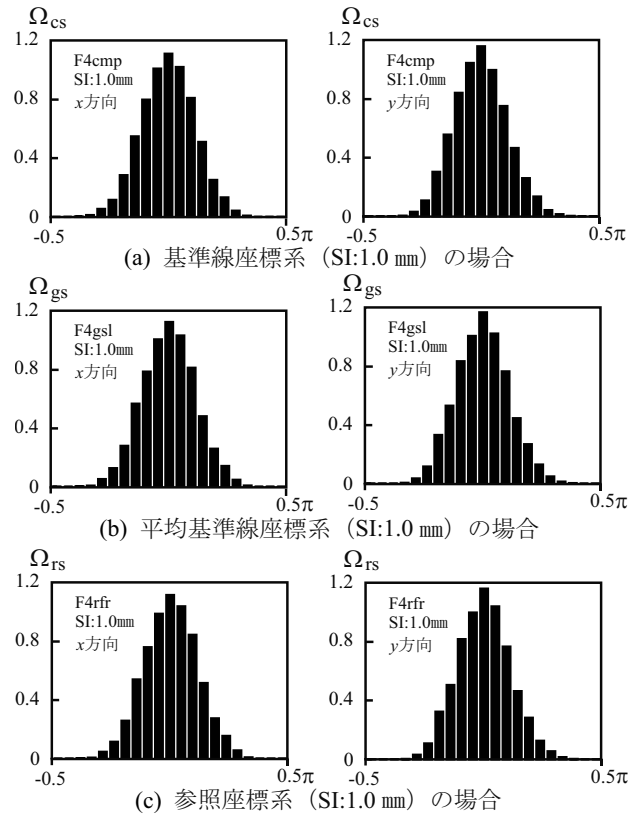


図-10 座標系の相違が傾斜密度分布に及ぼす影響

形状特性分析結果について若干の検証を加える。

なお、本論文では紙幅の制約から一般化2次元形状特性を記述する全データは掲げられないので、傾斜密度分布 $\Omega_s$ とひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ のみを掲げることとする。

#### 4.1 座標系の相違が2次元形状特性に及ぼす影響

前出の2次元形状特性の定義より理解されるように、座標系によってその分析結果が変容する可能性が指摘される。そこで、図-10にサンプリング間隔SIを既報<sup>2)</sup>に倣い1.0 mmとし、座標系を(a)基準線座標、(b)平均基準線座標、(c)測定座標とする2次元の傾斜密度分布 $\Omega_s$ を示す。なお本分析では、同図-10の傾斜密度分布 $\Omega_s$ の横軸のクラスを傾斜全角幅 $\pi$ の21等分、即ち、 $\pi/21$ としている。また、ここでSIを1.0 mmとしたのは、既報<sup>2)</sup>との比較から本解析結果の動向を調べるためである。傾斜密度分布 $\Omega_s$ の概容は、すべて傾斜角 $\theta_s$ 零に関してほぼ対称な上に凸の山形分布を呈示しており、従前の分析よりも僅かであるが急峻な傾斜角の密度値が表示されている。分析方向が互いに直交する分布を観ると $x$ 方向よりも $y$ 方向においてやや平坦であるが、その差異は小さい。

座標系の相違にはひび割れ面の *global roughness* が反映されるが、殆ど同じ分布形を描いていることから、座標系に依拠せずに安定した分析結果が得られている。

続いて、ひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ の推移を1/SIを横軸に取った図-11に観察する。同図-11によれば、従前の分析結果とは異なり、 $x$ と $y$ の分析方向の相違によるひび

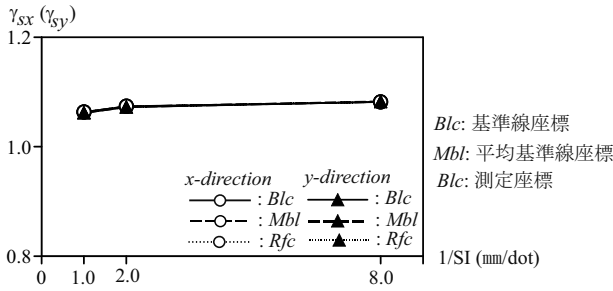


図-11 ひび割れ面積増加率の推移

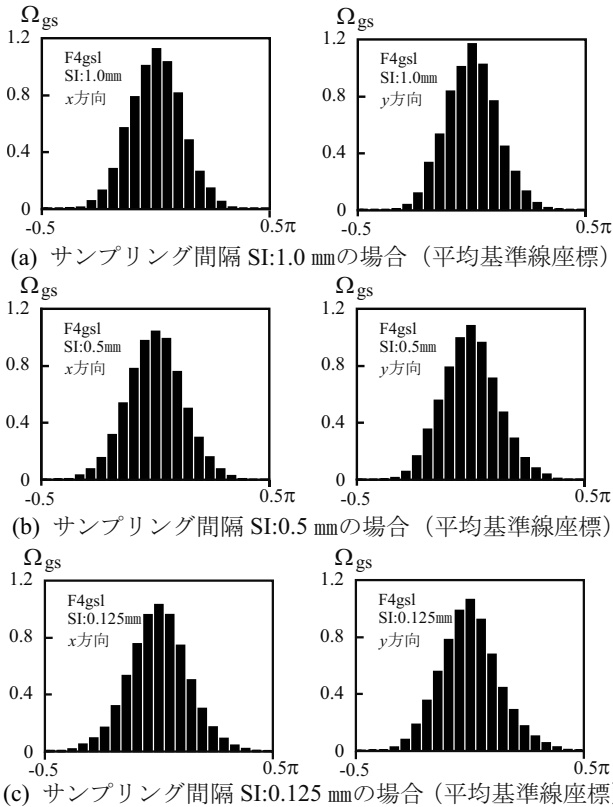


図-12 サンプル間隔が傾斜密度分布に及ぼす影響

割れ面積増加率 $\gamma_s$ に違いは全く見受けられない。これは、本分析手法がかなり安定したひび割れ面積分析精度を保持していることを示しており、適切に *global roughness* の影響を除去していることの一証左と言えそうである。

#### 4.2 サンプル間隔が2次元形状特性に及ぼす影響

図-12に、サンプル間隔SIを1.0mm、0.5mm、0.125mmと3段階に変動させた平均基準線座標での傾斜密度分布 $\Omega_s$ を掲載するが、SIを0.125mmとした場合に急峻な傾斜角の分析精度が僅かに向上している。ひび割れ微小面のせん断接触現象は、その傾斜角の急峻領域から始まるので、この精度の向上は今後のひび割れ面の形状分析において有用となる可能性がある。

また、先の図-11のひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ を見ると、サンプル間隔SI0.5mm以下でほぼ収斂していることより、ここにもSIを狭小化させた効用があると判断される。

以上より、本論文で触れたひび割れ面の一般化2次元形状特性の分析結果の範囲では、精度の高い安定した検証を行うためには、サンプル間隔SIの0.125mmへの狭小化は有意と判断される。

しかし今後、深さ密度分布など他の形状特性についても検証する必要があると考えている。

#### 5. まとめ

本論文では、これまでになく高精度下でコンクリートひび割れ面の3次元座標値をCAD *stl-data*として取得した。

*Stl-data*の量は膨大であるがため、本形状特性分析に必要なサンプル点を特定するための高速化手法を開発した。任意のサンプル点を内包する *stl-data*の三角形要素を検索する一般的な手法では、検索に約100000時間を要すると推算された。

そこでこれとは逆に、三角形要素の $x_f - y_f$ 平面(測定参照面)への投影三角形に内在する正規化格子点を著者が開発した「正規化格子点検索手法」によって検索してサンプル点を算定し、さらに正規化座標マップを利用して最大矩形領域を膨張手法によって設定した。本手法を適用することにより、サンプル点の算定時間は約10分に短縮され、本手法の有用性が明示された。

得られたサンプル点を用いてその間隔SIを0.125mmへ狭小化して一般化2次元形状特性分析を行い、傾斜密度分布 $\Omega_s$ 、ひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ の様相を検証した。傾斜密度分布 $\Omega_s$ とひび割れ面積増加率 $\gamma_s$ は分析方向や座標系の違いの影響を殆ど受けなかった。本分析結果の範囲では、精度の高い安定した分析を行うには、サンプル間隔SIの0.125mmへの狭小化は有意と判断された。

今後は、他の深さ密度分布などの形状特性についても検証を重ねる必要があり、その結果については後日報告する予定である。

#### 参考文献

- 1) 和田俊良, 高瀬裕也: コンクリートひび割れ面の変位経路を可変動制御したせん断実験-圧縮強度 $F_c$ : 40MPaの場合-, 日本建築学会全国大会(中部), 2012年9月, pp.147-148
- 2) 和田俊良, 高瀬裕也, 小松憲一: 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, コンクリート工学会年次論文集第33巻2号, 2011年7月, pp.685-690
- 3) 佐藤あゆみ, 山田寛次, 石山智: コンクリートの破面解析に用いる主要特徴量に関する実験的検討, 日本建築学会構造系論文集, 第698号, 2014年4月, pp.437-444