

論文 光切断法によるコンクリート亀裂面形状特性の3次元分析手法

和田俊良*1・佐藤龍司*2・石川千温*3・上田正生*4

要旨: 本論文では、光切断法による測定亀裂面のサンプリング点に三角形平面要素を貼付する3次元モデルを構築し、亀裂面の形状特性2次元分析関数を3次元へと拡張した。この三角形平面要素の位置座標を変え得るレーザ光線照射方向は、実際の2次元検証分析結果に影響を与えず、これが測定座標値の精度を保証せしめ、3次元分析への可能性を明示した。この3次元手法をサンプリング間隔を変動させた亀裂面の形状分析に適用しところ、「サンプリング間隔を1mm程度に採れば、精度の良い3次元分析値が得られること」が明らかとなった。

キーワード: 光切断法、亀裂面、傾斜密度3次元分布、深さ密度3次元分布、無次元化深さ

1. はじめに

前報 [1] で、著者らは、光切断法に基づくコンクリート亀裂面の3次元座標測定システムを開発し、亀裂面の形状特性を2次元分析する手法を提案した。著者らの2次元分析では、測定3次元座標から断面プロフィールを切り出し、これにサンプリング点を採って基準線を定め、隣接サンプリング点間の亀裂微小面からその傾斜と深さを算出して、傾斜密度、深さ密度等を分析する。この一連の測定・分析過程で、分析値変動要因として「測定分解能(mm/dot)とサンプリング間隔」が予期され、前報では、これらをパラメータに採って、粗面を模擬した鋼製試験片とコンクリート引張亀裂面の2次元分析を行った。鋼製試験片の分析結果から、分解能を0.135mm/dot程度とすれば、溝深さを1.0mmまで分析追跡可能であること、また、引張亀裂面の分析結果から、サンプリング間隔を1mm程度にすると、十分な精度の亀裂面の2次元形状特性値が得られることが明らかとなった。

本2次元分析は、亀裂面からの断面の切り出し方向における形状特性値を表示するものであり、実際に平面的な広がり凹凸を有する亀裂面の形状特性の全体像を掌握するには、この2次元分析手法を3次元へと発展させる必要がある。この2次元手法のさらなる拡張と、亀裂面の3次元分析の可能性が実証されれば、亀裂面の形状3次元特性をダイレクトに知り得るようになるものと考えられる。

コンクリート亀裂面の3次元モデル化は比較的容易であり、このことは次章で述べることにするが、3次元モデルによる分析では、測定座標のわずかな誤差が、亀裂微小面要素の傾斜や深さの評価を変える可能性が推察される。取り分け、亀裂面に対する単一スリット光線の入射方向を変えると、反射光細線化処理方向も追隨して変動され、このことが測定・分析値をいかように変容させ得るのか確認する必要がある。ここでは、このレーザ光線の入射方向の影響を、光線入射方向を直交させて測定した引張亀裂面の測定座標データの2次元分析を行って、検証・考察することとする。

本論文では、著者らのコンクリート亀裂面の形状特性2次元分析関数を3次元へと誘導し、亀裂面へのレーザ光線入射方向の相違に起因する分析精度を確認する。そして、3次元分析でも変動要因と予期されるサンプリング間隔が亀裂面の形状3次元特性値に及ぼす影響を検討して、適切なサンプリング間隔を定めることにする。

-
- *1 北海道職業能力開発短期大学校講師 建築科、工修（正会員）
 - *2 北海道職業能力開発短期大学校助教授 情報技術科、工博（非会員）
 - *3 札幌学院大学講師 商学部、工修（非会員）
 - *4 北海道大学助教授 工学部・情報図形科学講座、工博（正会員）

2. 測定コンクリート亀裂粗面の形状特性を記述するための3次元分析関数

亀裂面の形状特性2次元分析 [1] では、亀裂微小面をモデル化するために、断面プロフィール上にサンプリング点を探り、隣接サンプリング点間に測定間隔を幅とする亀裂微小面要素を定め、同時に基準線を全サンプリング点から最小自乗法を適用して近似した。この基準線と微小面要素の位置関係より、微小面要素の傾斜ならびに深さを計算し、これらの値に、傾斜密度、深さ密度、平均深さ、無次元化平均深さそして亀裂長さ比の諸関数を適用して、亀裂面の形状特性2次元分析を執り行った。本2章では、この亀裂面の2次元モデルと分析諸関数を3次元へと拡張・展開し、これを詳述していく。

2.1 コンクリート亀裂面の3次元モデルの構築

図1に測定座標系を、図2に測定座標と基準面を示す。本測定では、レーザ光線の入射軸をz軸と重ね、x-y平面を測定参照面と設定するゆえ、測定座標値を図1の座標系で記述し、取得した単一スリットレーザの合成画像は図2のように描画される。この測定座標から亀裂微小面を3次元要素として取り扱うには、測定座標データにサンプリング点を探り、隣接する3つのサンプリング点から図3の三角形平面要素を構成して、亀裂微小面の3次元モデルを組立てることにする。この三角形微小面要素は、a、b、cならびにdを定数とする下式の平面方程式で表示される。

$$ax + by + cz + d = 0 \quad (1)$$

図2の亀裂面の基準面は、上式に最小自乗法を適用して全サンプリング点から近似する。また、図3の三角形要素の亀裂面への貼付方法として、図4のように測定x-y参照平面上でi-j-kならびにi-j-lの2通りの分割が可能であり、これら両要素を独立させて分析を執り行い、すべての分析値を相加平均して評価することとする。

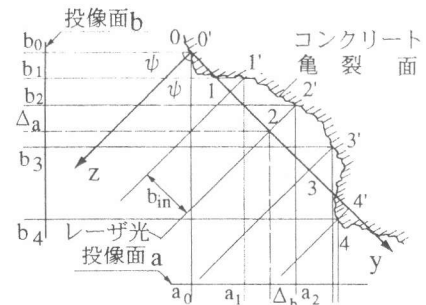


図1 光切断法による測定座標系

2.2 亀裂微小面の傾斜を表現するための密度分布関数 Ω_t の定義

図5に示した亀裂微小面要素の方向余弦ベクトルVの成分は、(1)式の定数から(l, m, n)と再表示され、これより、亀裂微小面の傾斜と深さは、1)測定参照x-y平面と2)基準面のふたつの平面に対して算定される。ここに、z軸まわりの方向角 ϕ_t とx軸まわりの傾斜角 θ_t は、それぞれ(2)式と(3)式となる。

$$\bar{\phi}_t = \tan^{-1}(m/l) \quad (2) \quad \bar{\theta}_t = \tan^{-1}(\sqrt{l^2+m^2}/n) \quad (3)$$

ここで、基準面の方向余弦ベクトルの方向角を ϕ_{t0} と θ_{t0} とすると、基準面から見た余弦ベクトルVの方向角、 ϕ_t ならびに θ_t は下式の ϕ_{t0} と θ_{t0} の回転マトリックスによる変換ベクトルVから計算される。

$$\{V'\} = [\phi_{t0}, \theta_{t0}] \{V\} \quad (4)$$

以上より、亀裂面の傾斜密度分布関数 Ω_t ($-\pi \leq \phi_t \leq \pi$ かつ $-\pi/2 \leq \theta_t \leq \pi/2$)は、下式となる。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \Omega_t(\phi_t, \theta_t) d\phi_t d\theta_t = 1 \quad (5)$$

ただし、全亀裂表面積を A_t^{surf} とすると、 Ω_t は下式を満たす。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \int_{-\pi}^{\pi} \Omega_t(\phi_t, \theta_t) A_t(\phi_t, \theta_t) d\phi_t d\theta_t = A_t^{surf} \quad (6)$$

本3次元モデルでは、図5のように、z軸の左回りの方向角 $\bar{\phi}_t$ を正に、x軸

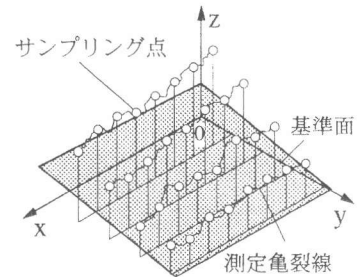


図2 測定座標値と基準面

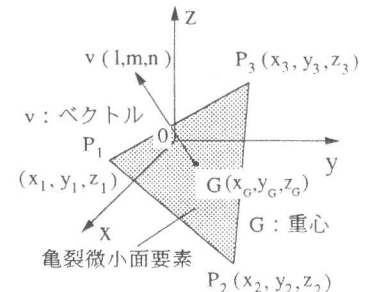


図3 平面モデルの概要

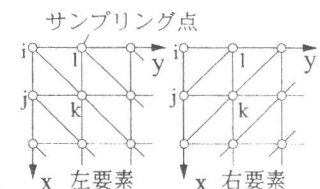


図4 平面モデルの分割

に対する傾斜角 $\bar{\theta}_t$ を正にとり、これら傾斜角のクラス設定を図6に示す。

2.3 亀裂微小面の深さ密度分布関数 K_t と平均深さの定義

亀裂微小面の深さ d_{pt} は、図7に示した如く、その重心から基準面までの距離とし、微小面要素の重心が基準面よりも上に位置すれば正、下で負と定める。亀裂の深さの最小値（以後、最小深さ d_t^{min} と称す）と最大値（以後、最大高さ d_t^{max} と称す）は、測定対象を変更するとその値が変動するので、下式で無次元化して η_t ($-1 \leq \eta_t \leq 1$) として取り扱う。

$$\eta_t = 2(d_{pt} - d_t^{min}) / (d_t^{max} - d_t^{min}) + 1 \quad (7)$$

亀裂深さの密度値は、方向角 ϕ_t と無次元化深さ η_t を変数とし、その深さ密度関数 K_t は下式と定義される。

$$\int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} K_t(\phi_t, \eta_t) d\phi_t d\eta_t = 1 \quad (8)$$

ただし、全亀裂表面積 A_t^{surf} より、 K_t は下式を満たす。

$$\int_{-1}^1 \int_{-\pi}^{\pi} K_t(\phi_t, \eta_t) A_t(\phi_t, \eta_t) d\phi_t d\eta_t = A_t^{surf} \quad (9)$$

亀裂面の平均深さ d_t^{men} は、基準面からの深さの偏差を全亀裂表面積で除してもとめることとし、下式のようなである。

$$d_t^{men} = \int_{d_t^{min}}^{d_t^{max}} |d_{pt}| A_t(d_{pt}) dd_{pt} / \int_{d_t^{min}}^{d_t^{max}} A_t(d_{pt}) dd_{pt} \quad (10)$$

上式に (7) 式の無次元化深さを導入すると、無次元化平均亀裂深さ η_t^{men} は下式となる。

$$\eta_t^{men} = \int_{-1}^1 |\eta_t| A_t(\eta_t) d\eta_t / \int_{-1}^1 A_t(\eta_t) d\eta_t \quad (11)$$

2.4 亀裂面積の増加率を記述するための γ_t の定義

コンクリート中に亀裂が形成されると、元の平面よりも面積が増加するが、前報 [1] ではこのことを測定亀裂の総長と基準線との比をとって定義した。これを3次元分析へと拡張するには、図8のように、3次元微小面要素の面積の総和をこれに対応する基準面積で除して比を求め、これを γ_t として算出することとする。 γ_t は、下式のようなである。

$$\gamma_t = \left(\int_{A_c} S dA / \int_{A_b} \bar{S} dA \right) \quad (12)$$

3. 測定亀裂面へのレーザ光線入射方向が分析値へ及ぼす影響の検討

光切断法に基づく亀裂面の形状測定手法では、単一スリットレーザ光線を測定軸系の x - z 平面に平行に照射し、亀裂面からの反射光を CCD カメラ撮影面上の座標値データとして獲得する。このシステムでは、スリット光線は 0.2 mm の幅を有し、試験体自体を平行移動させて、それぞれの単一光線を平行とし、これらの反射光データを細線化処理して、亀裂面の3次元座標を解析している。この細線化手続きならびに試験体の送り機械誤差は、亀裂面形状の画像をゆがめ、亀裂座標サンプリング点に三角形平面要素を貼付する本3次元分析値に精度低下をもたらす可能性が考えられる。細線化と試験体送り方向とスリットレーザ光線の位置関係は常に垂直であるから、これらの方向が分析値へ及ぼす影響とは

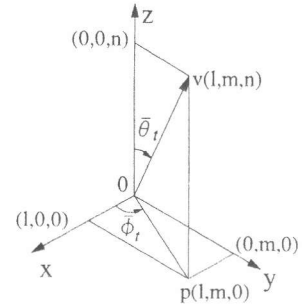


図5 方向余弦ベクトルと傾斜方向角

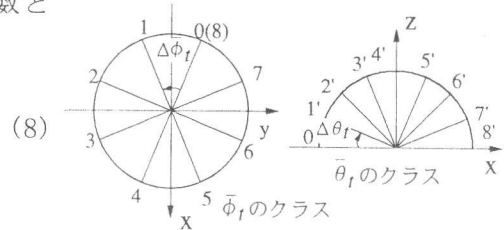


図6 傾斜方向角のクラス設定

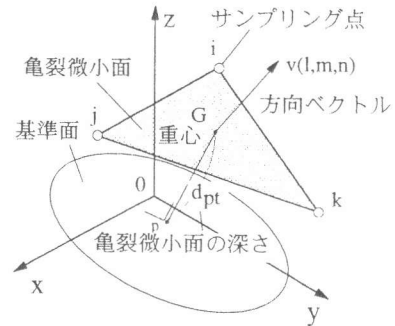


図7 亀裂微小面の深さの算定

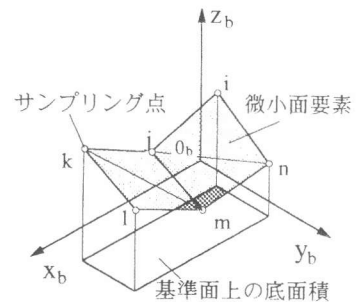


図8 亀裂面増加率 γ_t

「測定レーザ光線の亀裂面への入射方向の影響」と換言される。これより、測定レーザ入射方向の分析値への影響は、同一亀裂面にスリット光線を直交させる2種の測定座標値を2次元分析し、各軸方向で得られる2つの分析値を相互比較して検証される。本システムの構成上、亀裂面を固定して単一スリットレーザ光線を互に直交させる測定は不可能であり、このため逆に、レーザ光線を固定し、試験体自体を材軸を中心に $\pi/2$ 回転させて回転前の測定方向と直交させることにする。勿論、この2種の測定で亀裂面形状が無指向性では、試験体回転による様相の変化を検知できない。このため、亀裂面上に、実験結果として段差が測定領域内に一方向に形成したコンクリート引張試験体の一体を測定対象とする。この試験体は、前報 [1] の検証試験体と同一シリーズ中の異なるものであり、試験体諸元と加力方法は、前報を参照されたい。コンクリートの配合と材料性状を、それぞれ表1と表2に掲げ、分解能を0.125mm/dotと設定した本測定条件を表3に並記する。なお、この検証分析では、測定領域を58mm×58mmの矩形とし、x軸方向とy軸方向の傾斜密度と深さ密度の2次元分析結果を比較・検討する。

図9に亀裂面の傾斜密度2次元分析結果を示す。まず、原位置の測定分析結果から、x軸よりもy軸方向で傾斜角度がより急峻な分布を呈し、軸方向によって傾斜密度分布に相違があることがわかる。次に、この試験体を $\pi/2$ 回転させた測定・分析結果を見ると、x軸ならびにy軸ともその定性的傾向は原位置での分析値と一致している。x軸のこれらの傾斜密度分布をより詳細に見ると、原位置の分析値は、回転後の分析値よりも平坦な密度値を高く評価し、この分布傾向の様相はy軸では逆転している。

図10に、深さ密度2次元分析結果を掲げる。原位置での深さ分析結果では、深さ分布の相違が明瞭に見て取れ、x軸方向の分布で段差に起因する深さのピーク値が、無次元化深さ ± 0.5 に形成される逆W型の分布を呈し、一方のy軸方向の分布はピーク値を零近傍に一つ有する、上に凸の型となっている。試験体を回転させた分析結果では、無次元化深さ1近傍の密度値を、x軸方向で原位置の分析よりも若干小さく、y軸方向でわずかに大きく評価している。

このような、レーザ光線の入射方向の相違による傾斜と深さ密度分布への影響は、材軸を不動点とする試験体の厳密な回転が実際困難であるからであり、わずかなスリット照射位置のずれに起因しているものと考えられる。しかしながら、全般に、レーザ光線入射方向の2次元分析値への影響は小さなものであった。

4. 3次元分析による亀裂面の形状特性分析結果

著者らは、2章で2次元分析関数を3次元へと拡張し、前3章でレーザ光線照射方向が分析値と独立していることを示した。これに続き本4章では、前報 [1] で2次元分析した同一の破断面に段差のない引張亀試験体を対象として3次元分析を執り行い、「サンプリング間隔の相違が3次元形状分析結果に及ぼす影響」について検討を加える。この試験体の変更は、3次元分析の検証において、段差が形状分布の急変を惹起させ、これが分布の判読を乱すのを避けるための処理である。本測定条件を表4に掲げ、分解能0.125mm/dot、測定領域58mm×60mmとしている。

表1 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	300kgf/cm ²	18cm	20mm
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2 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-II	21.7cm	369.1 kgf/cm ²	26.9 kgf/cm ²

表3 レーザ光線入射方向の影響の検証測定条件

入射角	スリット幅	平行光線間隔	測定光線数
$\pi/4$	0.2mm	1.0mm	59

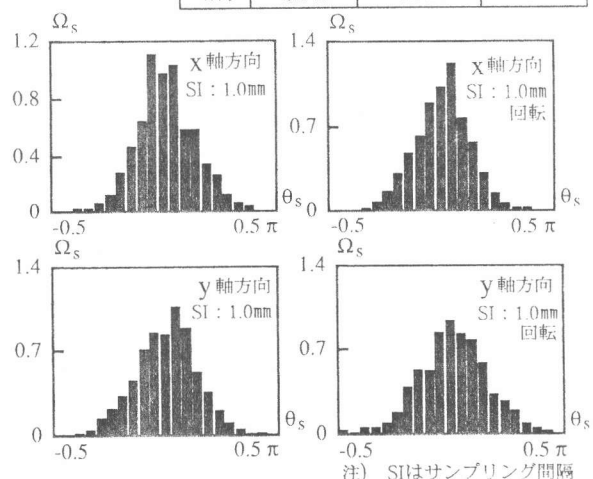


図9 レーザ入射方向の傾斜密度分布への影響

4.1 引張亀裂面の傾斜密度3次元分布の検討

本節では、サンプリング間隔を0.5mm、1.0mmそして2.0mmと3段階に変動させた場合の亀裂微小面の傾斜密度分布の推移を見ていくが、検討に先立ち、傾斜密度3次元分布の表示方法を説明する。傾斜密度分布値は、図11のように、x軸からなす角 ϕ_r で原点を通る傾斜角 $\bar{\theta}$ 軸を重ねて引き、 $\bar{\theta}$ 軸上の外周部で $\pm\pi/2$ 、原点で零と定め、z座標が密度値の大きさとなるように計算する。図12では、この密度値の分布を濃淡をつけた平面型の等高線図で描画することとする。図12(a)は、測定参照面に対する傾斜密度分布であり、図12(b)は基準面の方向余弦ベクトルによって補正を加えた結果である。まず、図12(a)の傾斜密度分布を見ると、全分布の概形は、急峻な領域で密度値が小さく、これより平坦な領域に向かって密度値を上昇させ、傾斜角 $\bar{\theta}$ が零となる近傍で密度値はほぼ零となる。サンプリング間隔0.5mmと1.0mmの分析結果を比較すると、分布傾向に大きな差異はなく、測定間隔0.5mmの分析ケースが傾斜角 $\bar{\theta}$ 零近傍での密度零領域をやや広く評価されているに過ぎない。これら2つの傾斜密度分布とサンプリング間隔2.0mmの分布を較べると、間隔2.0mmでは急峻な領域の密度値がより小さくなり、急峻な角度の分析感度が低下していることを知る。一方、基準面に対する分布図12(b)から、 θ_{i0} による補正効果、すなわち密度分布の形状変化は小さく、z軸まわり方向角 ϕ_{i0} による回転の効果が大きいことが分かる。なお、前述の2次元分析結果とこの3次元の相違は、亀裂面上の段差形状の有無に起因していると考えられる。

4.2 引張亀裂面の深さ密度3次元分布の検討

深さ密度分布値は、図13の分布形状外周部を無次元化深さ \pm

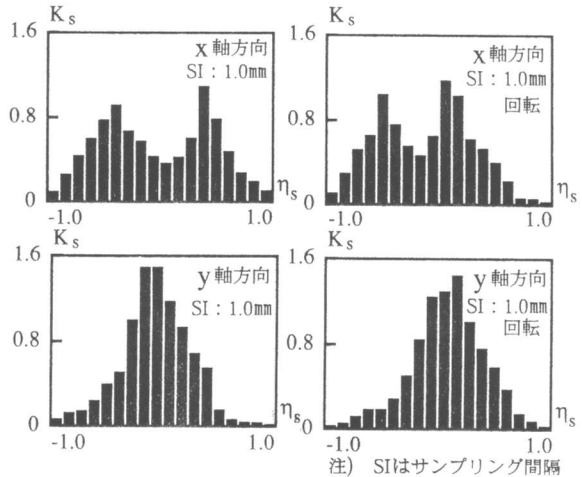


図10 レーザ入射方向の深さ密度分布への影響

表4 引張亀裂面の測定条件

入射角	スリット幅	平行光線間隔	測定光線数
$\pi/4$	0.2 mm	0.5 mm	121

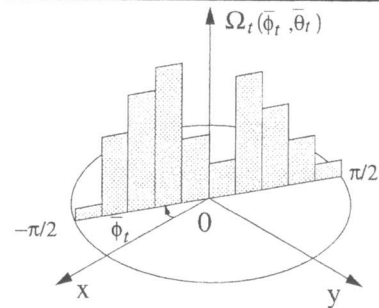


図11 傾斜密度分布の3次元表示法

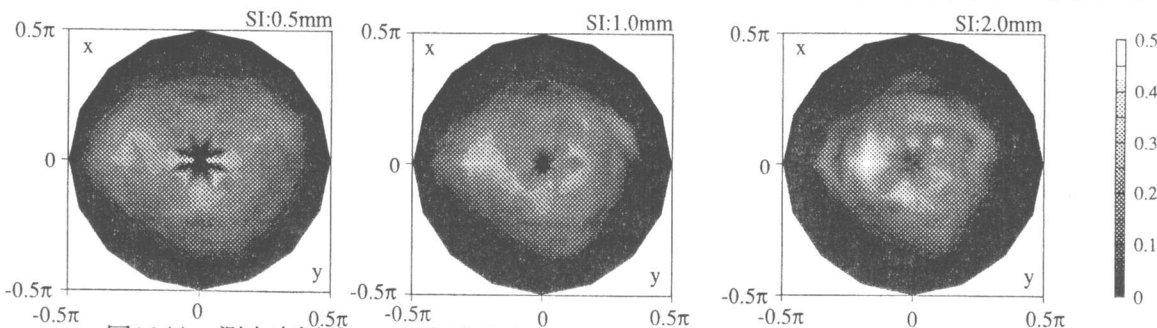


図12(a) 測定座標系での傾斜密度分布 (分解能: 0.125mm/dot SI: サンプリング間隔)

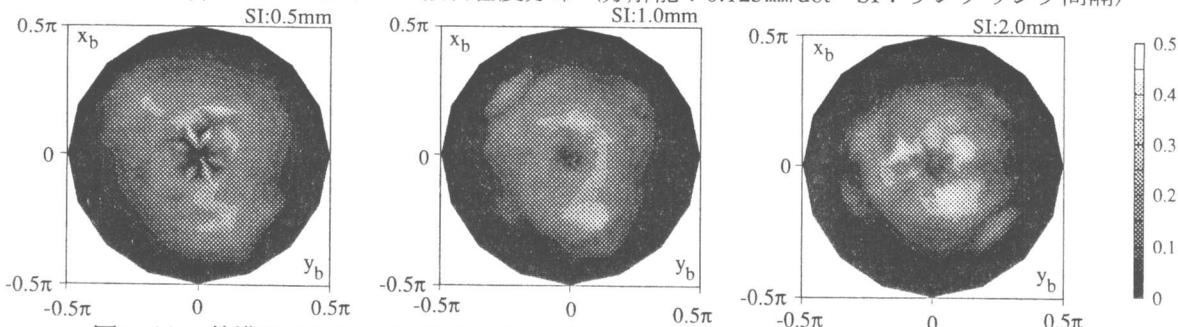


図12(b) 基準平面系での傾斜密度分布 (分解能: 0.125mm/dot SI: サンプリング間隔)

1.0、z軸回りの ϕ_t 方向に関する表示は、傾斜密度分布と同様であり、サンプリング間隔を0.5mm、1.0mmそして2.0mmと変動させた場合の分析結果を密度等高線に濃淡を着けて図14に示す。サンプリング間隔0.5mmと1.0mmの分析結果では、両者の深さ密度分布に乖離はなく、ただ、間隔を1.0mmとした場合、わずかに亀裂深さを小さく評価していることが分かる。さらにサンプリング間隔を2.0mmと大きく採ると、深さ密度分布の形状はやや乱れて、分布図の局所で連続性を失った孤立した島領域が形成され、分析感度の低下が観察される。

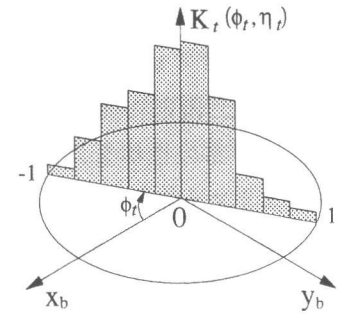


図13 深さ密度分布の3次元表示法

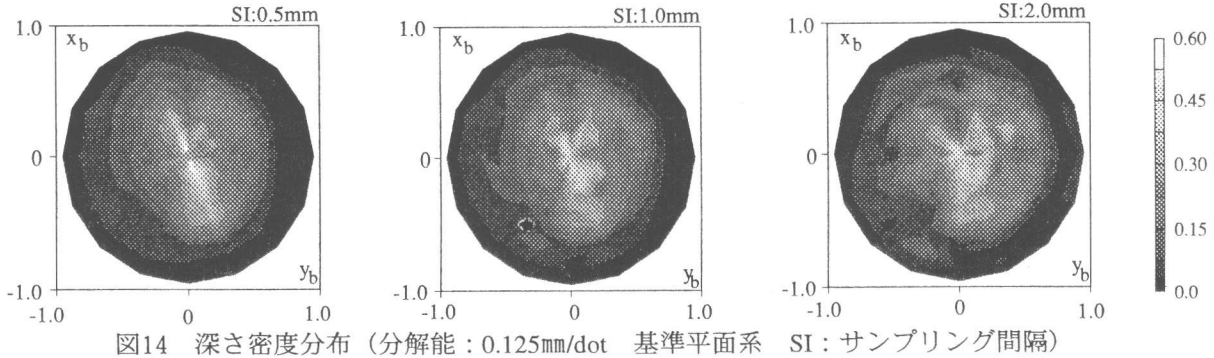


図14 深さ密度分布 (分解能: 0.125mm/dot 基準平面系 SI: サンプリング間隔)

4.3 引張亀裂面の平均深さと亀裂面積増加率の検討

表5に深さ3次元分析結果を、表6に亀裂面積増加率を示す。サンプリング間隔を漸増すると、表5の3次元亀裂深さでは、最小深さ、最大高さならびに平均深さがわずかに減少し、無次元化平均深さがこれに鈍感であるが、同時に、表6の亀裂面積増加率の減少量もわずかであることが読み取れ、サンプリング間隔1mmで分析精度を確保できることが分かる。

本4章では、サンプリング間隔が3次元分析手法での傾斜密度分布、深さ密度分布、平均深さならびに亀裂面積増加率に与える影響を見てきたが、サンプリング間隔を1mm程度に設定すれば精度のよい3次元分析値が得られることが明示された。

5. まとめ

本論文では、コンクリート亀裂面の形状特性3次元分析手法を構築するために、亀裂表面を三角形平面要素でモデル化し、著者らの2次元分析関数を3次元へと拡張した。この三角形平面要素の位置座標を変え得る亀裂面へのレーザ光線入射方向の相違は、傾斜ならびに深さ密度2次元分布を殆ど変えず、これが本測定座標値の精度を保証せしめて、3次元分析の可能性が示された。この3次元手法を引張亀裂面に適用し、サンプリング間隔を変動させた形状元分析から「サンプリング間隔を1mm程度に設定すれば、十分な精度の3次元分析値が得られること」が明らかとなった。現在、著者らはコンクリートの亀裂破断応力を変えた形状測定・分析データを蓄積しており、これによる2次元分析結果と3次元分析結果との比較・検証については、後日、稿を改めて報告する予定である。

〔参考文献〕

- [1] 和田俊良、佐藤龍司、石川千温、上田正生：光切断法によるコンクリート粗亀裂面の形状測定手法の開発、コンクリート工学年次論文報告集 Vol.17, No.2 1995, pp.265~275

表5 引張亀裂の深さ3次元分析

サンプリング間隔(mm)	0.5	1.0	2.0
最大高さ(mm)	1.82	1.81	1.76
最小深さ(mm)	-6.44	-6.33	-6.15
平均深さ(mm)	6.02	5.83	5.50
無次元化平均深さ	0.29	0.30	0.31

表6 3次元亀裂面積増加率 γ_t

サンプリング間隔	0.5 mm	1.0 mm	2.0 mm
分解能0.125 mm/dot	1.26	1.20	1.15