

# 論文 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

和田俊良<sup>1</sup>・佐藤龍司<sup>2</sup>・石川千温<sup>3</sup>・上田正生<sup>4</sup>

要旨：本研究では、コンクリート粗亀裂面の形状を知るために光切断法に基づく測定・分析システムを構築した。最初に、粗面を模擬する波型形状に溝切り加工した鋼製試験片の深さ分析を行い、測定分解能を0.135mm/dot程度に設定すれば1.0mm深さ位まで追跡可能であることを知ることができた。さらに、コンクリート引張試験体亀裂を測定・分析対象としたところ、測定間隔1.0mmを保持すると、傾斜密度分布ならびに深さ密度分布などの形状分析関数による測定値が精度よく得られることが明らかとなった。

キーワード：光切断法、コンクリート粗亀裂、傾斜密度分布、深さ密度分布

## 1. はじめに

コンクリート亀裂表面の形状は錯雑としている。この凹凸の起伏変化が激しい形状を測定し、これをただ再表示したところで、コンクリートの応力-ひずみ関係を解明するための新たな資料は得られない。既往の測定例を見ると、李・前川 [1] はコンクリート亀裂微小面の傾斜密度分布  $\Omega$  を定義し、微小面の傾斜密度が対称凸分布であることを示した。その後、三橋ら [2] はレーザ変位計をx-yプロッターヘッドに装着してコンクリート2重片持ち試験体亀裂を光学的手法で測定し、フラクタル解析値を求めている。これらの研究では、測定システムの精度の明示ならびに測定間隔が分析値に与える影響について論及されておらず、このミリオーダの起伏変化をとまなう粗面の取扱いについて測定・分析両面から論ずべき問題があると思われる。著者らは既報 [3] で、「光切断法による亀裂面の形状測定システム」を構築し、著者らの手法が亀裂面の形状を測定可能であることを確認した。しかしながら、著者らの測定では亀裂画像を1台のCCDカメラで捕捉するために亀裂の陰の座標データが欠ける可能性が残されていた。そこで本論文では、測定システム上のCCDカメラ2台を測定軸に対称に配置して座標測定精度の向上を図り、これまで報告されていない光切断法の粗面への適用精度を、予め溝切り加工した鋼製試験片の測定・分析から明らかにする。また、これまでコンクリート亀裂面形状を記述する測定分析関数として李・前川の傾斜密度分布のみが提示されていたが、著者らはより明細に形状特性を掌握するために深さおよび測定亀裂の総長と基準線との比を表現する簡単な測定分析関数を定義し、測定間隔がこれらの分析値に与える影響について若干の検討・考察を加えることにする。

## 2. 光切断法による粗亀裂面の形状測定手法

物体形状の変化に対して十分に細い直線帯状の光を物体表面に照射し、その反射光を入射光から傾きをもって観察すると、帯状の光の束が形状にそって曲線を描くのが見え、この曲線を幾何解析すると物体形状としての3次元座標を得ることができる。これが光切断法の測定原理であ

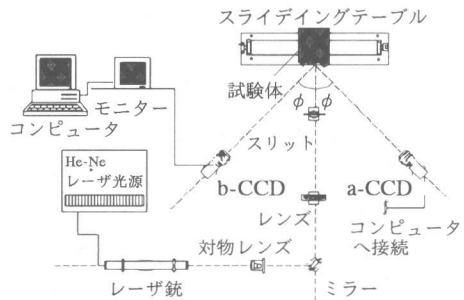


図1 本測定システムの概要

\*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 北海道職業能力開発短期大学校講師 情報技術科、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）

る。本2章ではまず、この光切断法に基づく測定システムの機器構成を述べ、これに続いて光切断法の測定原理を解説した上で著者らの画像処理手続きを示す。

### 2.1 本光学測定システムの概要

本測定システムの機器構成は、図1のようにレーザ、光学機器、スライディングテーブルそしてコンピュータである。まずHe-Ne光源から放出させたレーザ光は対物レンズ、反射鏡そしてレンズを通り、さらにスリットを透過して縦縞矩形干渉波となる。そして、この矩形波がコンクリート亀裂表面上に結像し、この反射光を画像としてaならびにbの2台のCCDカメラで捕捉してビデオ信号にAD変換する。既報では、著者らは1台のCCDカメラのみを使用して反射光をコンピュータに認識させていたが、これではカメラから見た亀裂の山の陰の部分の情報が欠落する可能性がとり残されていた。そこで本論文では、この情報の欠落を消去すべく2台のCCDカメラを測定軸に対称配置し、2つの画像データの相互補完によつて精度を向上させた。

### 2.2 光切断法の測定原理と画像データからの座標値の決定

光切断法による形状測定では、図2のようにx-y平面を参照面としてz軸に沿って平行レーザ光線をコンクリート亀裂表面に照射する（亀裂面は、参照x-y平面にほぼ同一方向になるようにセッティングされている）。亀裂の表面の点が参照面上にあればこの点のz座標値は零であるとし、そしてこのx-y面に平行レーザ光と一致するように格子状の正規化座標を設けておく。ここで亀裂表面の座標位置が参照面から離れると、レーザ光は参照平面上の正規化座標を反射位置とせず、CCDカメラに投像された正規化座標との間にズレ $\Delta$ を生じる。このズレおよびCCDカメラの視線軸とx-y平面のなす角度 $\theta$ から、z座標値を下式から求めることができる。

$$z = \Delta / \sin \theta \quad (1)$$

CCDカメラの測定単位は画素（以下、dotと略記する）であり、実長 $\ell_0$ とCCDカメラ上の $X_0$ dot間に変換係数 $u_d$ が必要となる。

$$u_d = \ell_0^{(mm)} / X_0^{(dot)} \quad (2)$$

これより $\Delta^{(mm)}$ は次式となる。

$$\Delta^{(mm)} = \Delta^{(dot)} \times u_d \quad (3)$$

ここにレーザ光線間隔を $b_{in}$ とすると、試験体亀裂面上のi番目のレーザ光線のy座標値は下式となる。

$$y^{(mm)} = (i-1) \times b_{in}^{(mm)} \quad (4)$$

最後に、x座標値は測定値そのままであるから(5)式となる。

$$x^{(mm)} = x^{(dot)} \times u_d \quad (5)$$

### 2.3 2台のCCDカメラ画像の合成画像処理手続き

本測定では、単一レーザ光線から平行光線を生成するためにスライディングテーブルを用いて試験体を平行移動させる。この作業を必要回数繰り返すと図3のような画像データが採取される。画像0は、試験体測定基準点を捕えたもので、aとbのCCDカメラの2枚の画像から相互のカメラの投像軸の相対誤差 $\Delta l$ を知ることができ、aカメラの全画像のx座標値に $\Delta l$ を加算修正して、x座標値をbカメラと一致させる。また同図に示したように、aとbカメラの画像はx軸方向に関して逆位相の関係にあるので、a-CCDの画像データを反転させ画像データの位相を補正する。補正した画像データを各測定ステップごとに相加平均して合成し、

(1)から(5)式で評価して亀裂面の3次元座標値を決定する。

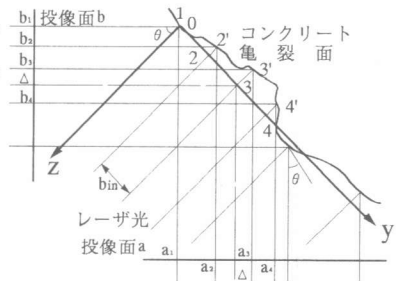


図2 光切断法の測定原理

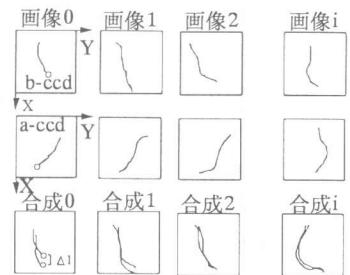


図3 画像処理手続き

### 3. コンクリートの粗亀裂面形状を記述するための測定分析関数の定義

前2章では、光切断法による粗亀裂面形状の測定手法について述べた。本章では、粗亀裂面形状を記述するいくつかの測定分析関数を新たに提示して、本形状分析手続きを展開する。亀裂面形状分析として2次元もしくは3次元処理の2つの手法が考えられるが、ここでは分析過程の簡明な2次元分析のみを行ってその傾向をまず検討する。本論文で取扱う2次元処理とは、亀裂面形状の断面線から測定分析関数の分析値を求めるもので、著者らはこの手法を以後「断面法」と呼ぶ。亀裂面形状を知るために測定座標をそのまま表示しても、その形状特性の傾向を把握することは難しく、亀裂面の座標値データを簡便な関数で数学表示することが必要である。亀裂面の形状関数は、これまで李・前川 [1] が傾斜密度分布  $\Omega$  を定義しただけであった。本論文では、この  $\Omega$  のほかに、亀裂の機械的噛み合に影響を与える亀裂深さ分布  $K$  ならびに平均深さ  $d_m$ 、そして測定亀裂の総長と基準線との比  $\gamma$  を新たに定義する。これらの諸量は、亀裂の応力伝達システムを解明する手掛かりとなるもと著者らは考えている。なお、関数の右下添字を2として断面法による2次元分析結果あることを示すものとする。

#### 3.1 断面法によるコンクリート亀裂微小面の傾斜密度分布 $\Omega_2$

コンクリート微小面の傾斜角度を定義するために、まず測定参照面のx軸もしくはy軸にそって断面を切り取る。切り取った断面線のデータは互いに独立させて取扱い、たとえば図4のようにx軸にそった全断面のサンプリングデータ群からx軸方向の基準線を最小二乗法を用いて導出する。基準線が参照面のx軸となす角度を  $\theta_0$  とし、参照基準面のx軸とコンクリート微小面がなす傾斜角度  $\bar{\theta}$  は、図5の相隣り合うサンプリング点のx-z座標から下式で算出する。

$$\bar{\theta} = \tan^{-1} \left\{ (z_{i+1} - z_i) / (x_{i+1} - x_i) \right\} \quad (6)$$

$\theta_0$  による補正を施して傾斜角度  $\theta_2$  を得る。

$$\theta_2 = \bar{\theta} - \theta_0 \quad (7)$$

これより、傾斜密度分布  $\Omega_2$  を (8) 式のように定義する。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_2(\theta_2) d\theta_2 = 1 \quad (8)$$

ただし、全亀裂表面積  $A_2^*$  は上式を用いて下式を満たす。

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \Omega_2(\theta_2) A_2(\theta_2) d\theta_2 = A_2^* \quad (9)$$

#### 3.2 亀裂微小面の深さ密度分布 $K_2$ と平均深さ $d_m$

図5には傾斜角度だけではなく、亀裂深さ  $p_d$  の概念も示した。ここでは、コンクリート微小面上の隣り合う2点のサンプリング点の midpoint (チェックポイント) と基準線との距離を亀裂深さ  $p_d$  と定めている。また、測定対象を変えると亀裂深さの値が変動するので、亀裂深さを下式で無次元化深さ  $\eta_2$  ( $-1 \leq \eta_2 \leq 1$ ) に変換して記述し、ここに  $d_{mx}$  は亀裂最大高さそして  $d_{mi}$  は亀裂最小深さとする。

$$\eta_2 = 2(p_d - d_{mx}) / (d_{mx} - d_{mi}) + 1 \quad (10)$$

深さ密度分布  $K_2$  は下式と定義する。

$$\int_{-1}^1 K_2(\eta_2) d\eta_2 = 1 \quad (11)$$

ただし、全亀裂表面積  $A_2^*$  は亀裂深さ密度関数を用いて下式を満たす。

$$\int_{-1}^1 K_2(\eta_2) A_2(\eta_2) d\eta_2 = A_2^* \quad (12)$$

亀裂平均深さ  $d_m$  は、基準線からの偏差の平均で表示する。

$$d_m = \int_{d_{mi}}^{d_{mx}} p_d A_2(p_d) dp_d / \int_{d_{mi}}^{d_{mx}} A_2(p_d) dp_d \quad (13)$$

#### 3.3 コンクリートの測定亀裂の総長と基準線との比 $\gamma_2$

コンクリートに亀裂面が形成すると、基準となる面の面積よりも大きな面積を有するようにな

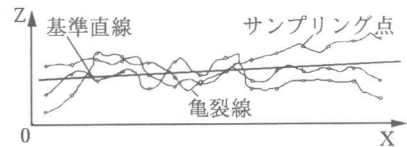


図4 基準線の最小2乗近似

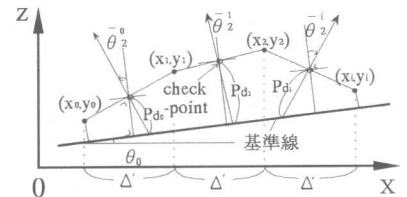


図5 傾斜と深さの定義

る。断面法による亀裂面の形状分析では、3次元亀裂面形状から切り出したn本の亀裂断面線（xならびにy軸方向とも独立させて取扱う）からその測定亀裂長さ $s_i$ の総和を求め、これを測定亀裂の総長と名称し、この値を各断面線に対応する基準線長 $s_{bi}$ の総量で除して比 $\gamma_2$ を(14)式で求める。この $\gamma_2$ は、基準面に対する亀裂表面の面積増加率を示す物性値である。

$$\gamma_2 = \sum s_i / \sum s_{bi} \quad (14)$$

#### 4. 鋼製試験片の測定・分析

光切断法による粗面の測定・分析を行う場合、実長と画素数の比（以下、分解能と称する）が分析値を変動させる可能性が高いことが推察できる。この分析結果への影響を検証するには、形状が明らかな粗面を測定対象として分析値相互を比較する必要があり、著者らは傾斜角度を $\pm 45^\circ$ 深さのみを1.0mm、1.5mmそして3.0mmと変えて波状溝切り加工した3種の鋼製試験片を作製し、その深さ分析を行う。測定設定条件は、分解能を0.094mm/dot、0.135mm/dot、そして0.169mm/dotと3段階に変え、CCDカメラの入射角 $\theta$ は $45^\circ$ 、x軸のサンプリング間隔とy軸の試験片平行移動距離1.0mm、測定光線数11、スリット幅0.5mmである。レーザ光線は、鋼製試験片の溝切削方向に直交（参照面のx軸方向）させて照射し、分析方向もこれと同一としている。すなわち、この測定設置システムでは、鋼製試験片の溝斜面は参照軸系のx-z平面に正確に投影され、このx-z平面に平行な断面より分析を施すことになる。

##### 4.1 鋼製試験片の分析結果の検討

表1に鋼製試験片の深さ分析結果を掲げる。表中の試験体名のSは鋼製試験片を、次の2つの数字は溝の深さを、そして最後の数字が分解能を表わすもので、2を0.094mm/dot、4を0.135mm/dotそして6を0.169mm/dotに対応させて記載している。また、かっちは測定分析値に対する真値の比 $r$ である。溝深さ3.0mmのS30の分析結果を相互比較すると、分解能の変動は平均ならびに最大深さにほとんど影響を与えず、比 $r$ は0.95から1.09と高い精度を示した。次に溝深さを1.5mmとしたS15を見ると、分解能を0.135mm/dot以上に保てば比 $r$ が1.03ならびに1.04となる十分な精度の分析値が得られることを知る。最後に溝深さを1.0mmとしたS10の分析結果について検討を加える。S10では、分解能を一番高く設定したS102の比 $r$ が平均深さで0.87ならびに最大深さで0.86となり、高分解能にもかかわらず分析精度が落ちた結果となった。これは、「サンプリング間隔1.0mmが、周期的に形状を変える波型溝の微細な凹凸を捕捉できなかった」のが原因であり、分解能に対して適切な測定間隔を選択する必要があることを意味している。以上の鋼製試験片の測定・分析結果から、分解能を0.135mm/dot程度に設定すれば深さ1.0mm位の亀裂の形状を捕まえ得ることを知る。

#### 5. 断面法によるコンクリート引張亀裂の測定・分析

前4章での鋼製試験片の分析結果から、本手法が十分な精度で1.0mm程度の粗面凹凸形状を追跡できることを明示した。本5章では、亀裂面形状の基本となるコンクリート引張亀裂を測定対象に取り上げ、著者らの測定分析関数によるコンクリート粗亀裂面の形状分析を行う。

著者らが作製した引張試験体のコンクリートの配合を表2に、材料性状を表3に掲げる。試験体は図6

表1 鋼製試験片の深さ

試験片	平均深さ (mm)	最大深さ (mm)
S102	0.43739 (0.87)	0.85799 (0.86)
S104	0.46223 (0.92)	1.05765 (1.06)
S106	0.53790 (1.08)	1.14520 (1.15)
S152	0.77644 (1.04)	1.56688 (1.04)
S154	0.76924 (1.03)	1.53964 (1.03)
S156	0.83153 (1.11)	1.66555 (1.11)
S302	1.50181 (1.00)	2.86377 (0.95)
S304	1.48589 (0.99)	3.12934 (1.04)
S306	1.63319 (1.09)	3.16491 (1.05)

表2 コンクリートの配合

種類	呼び強度	スランプ	骨材最大寸法	セメント種類	水セメント比	細骨材率
普通	300kgf/cm <sup>2</sup>	18cm	20mm	N	48.0%	47.7%

表3 コンクリートの材料性状

コンクリート	スランプ	圧縮強度	割裂強度
S18-II	21.7cm	369.1kgf/cm <sup>2</sup>	26.9kgf/cm <sup>2</sup>

に示したように、試験体断面120mm×120mm、中央断面20mm振り分けのD22をコンクリート角柱の中心軸に沿って埋設してφ3金網筋で補強し、中央断面位置に亀裂誘発スリットを配したものである。この試験体両端のD22を100tアムスラー試験機に装着して加力し、引張亀裂を形成させた。加力を施した試験体は7体であるが、中央断面の亀裂を目視観察したところ、形状パターンは材軸にほぼ垂直な亀裂面が形成したものと段差が形成したものと2種に区分できた。前者の方が亀裂面に均等に応力が作用したと判断されるので、7つの試験体から材軸に垂直に亀裂面が形成している試験体ひとつを選択して測定・分析を行った。この試験体の亀裂を図7に示す。測定条件は、鋼製試験片の検討結果から分解能を0.125mm/dotとし、測定間隔を0.5mm、1.0mmならびに2.0mmと変動させ、レーザ光の亀裂表面上での散乱を抑えるためにスリット幅を鋼製試験片より小さく0.2mmに変更し、測定面積を一边が最大骨材寸法の3から4倍程度（本測定では約58mm×80mm）となる矩形を目安として領域設定した。このように本論文では、測定間隔がコンクリート引張亀裂の傾斜密度分布、深さ密度分布と平均深さを測り、測定亀裂の総長と基準線との比に与える影響について検討を加えるものである。

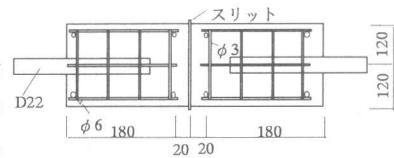


図6 引張試験体詳細

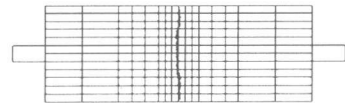


図7 引張試験体の亀裂状況

図7に示す。測定条件は、鋼製試験片の検討結果から分解能を0.125mm/dotとし、測定間隔を0.5mm、1.0mmならびに2.0mmと変動させ、レーザ光の亀裂表面上での散乱を抑えるためにスリット幅を鋼製試験片より小さく0.2mmに変更し、測定面積を一边が最大骨材寸法の3から4倍程度（本測定では約58mm×80mm）となる矩形を目安として領域設定した。このように本論文では、測定間隔がコンクリート引張亀裂の傾斜密度分布、深さ密度分布と平均深さを測り、測定亀裂の総長と基準線との比に与える影響について検討を加えるものである。

### 5.1 引張亀裂の傾斜密度分布 $\Omega_2$ の検討

コンクリート亀裂微小面の断面法による分析からx軸にそった分布とこれに直交するy軸にそった2種の分布が得られるので、本論文ではこの2方向の分析結果についてそれぞれ検討を加える。図8にコンクリート引張亀裂の傾斜密度分布の分析結果を掲げる。x軸方向の分布を見ると、測定間隔にかかわらず分布の概形は対称凸であることがわかる。測定間隔を0.5mm、1.0mmそして2.0mmと大きくしていくと平坦な分布を呈するようになり、特に測定間隔を2.0mmとした場合この傾向は顕著となる。測定間隔0.5mmと1.0mmの分析結果を比較すると、測定間隔の大きい1.0mmの方が急峻なクラスが存在確率をやや小さく評価しているものの、両者に大きな隔たりはないものと思われる。次にy軸にそった傾斜密度を比較しても、x軸にそった分析結果と同様の傾向を読み取ることができる。これらの分析結果から、測定間隔1.0mmとすると亀裂の傾斜角度の分布傾向をよく把握できることがわかる。

### 5.2 引張亀裂の深さ密度分布 $K_2$ と平均深さ $d_m$ の検討

図9に亀裂深さを基準線からの最小深さと最大高さで無次元化した確率密度分布を掲げる。x軸にそった分布では、測定間隔0.5mmと1.0mmの分布に差異は見受けられず、ほぼ一致した分布となった。測定間隔を2.0mmと大きくすると、無次元化深さ零近傍の分布値が変化のないフラットな分布形状を見せ、測定感が若干低下している。一方、y軸にそった無次元化深さ分布でも同様な傾向を示している。先の傾斜密度分布に比べ無次元化深さ分布では、測定間隔の影響は小さいようである。

次に表4の亀裂平均深さ、最小深さならびに最大高さの各分析値を検討する。まず平均深さを比較する

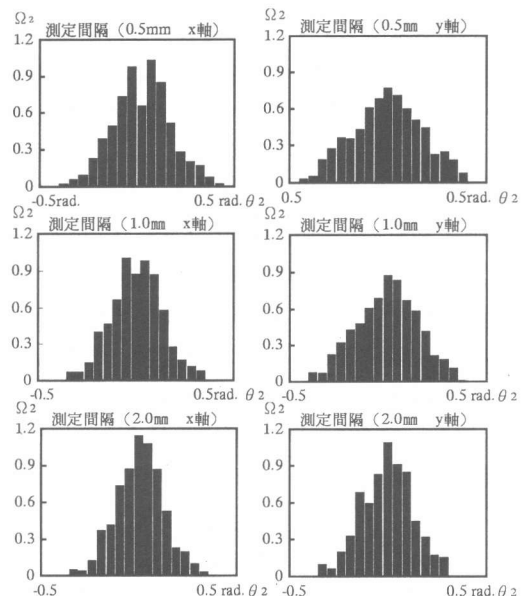


図8 コンクリート引張亀裂の傾斜密度分布

と、x軸方向で1.82mmから1.85mm、y軸方向で1.80mmから1.82mmの値を示し、測定間隔はx軸ならびにy軸方向の平均深さの分析値に殆ど影響を与えていない。また最小深さならびに最大高さでは、測定間隔が大きくなるほど両者の絶対値が小さくなるが、その低下率はわずかであった。一方、亀裂無次元化深さの平均では、x軸方向で0.32、0.33そして0.34、y軸方向で0.30、0.31そして0.32の値とほぼ同値となり、測定間隔の影響は殆どないものと見受けられる。

### 5.3 引張亀裂の測定亀裂の総長比 $\gamma_2$ の検討

表5に断面法による測定亀裂の総長と基準線の長さの比  $\gamma_2$  を示す。これより、x軸方向で1.072から1.096、y軸方向で1.084から1.162の範囲の値をとり、測定間隔は測定亀裂の総長比をわずかに変化させるに過ぎず、またこの比がことのほか小さいことがわかる。

本章では、測定間隔がコンクリート引張亀裂の傾斜密度分布、深さ密度分布と平均深さそして測定亀裂の総長と基準線との比に与える影響について検討を加えたが、著者らが設定した範囲の測定間隔は傾斜密度分布と深さ密度分布の概形を変えるものの、平均深さそして測定亀裂の総長の比の値を大きく変動させず、これらの結果はほぼ同値となった。ただし、測定間隔を1.0mm程度とすれば、傾斜密度分布、深さ密度分布への影響を回避できることも示されている。

## 6. まとめ

著者らはコンクリートの亀裂面形状を測定するために、光切断法に基づく測定・分析システムを構築した。コンクリート亀裂面形状を測定・分析する前に、波型形状を有する鋼製試験片の深さ分析を行って本手法の精度について検証を加えた。これより分解能を0.135mm/dot程度に設定すると、周期波型に形状をかえる溝深さを1.0mm程度まで追跡できることが明らかとなった。さらにこの手法をコンクリート引張亀裂面に適用して、測定間隔を0.5mm、1.0mmそして2.0mmと3段階に変動させて、測定間隔が分析結果に与える影響について検討を加えた。得られた亀裂面の傾斜密度関数、亀裂無次元化深さ分布、亀裂深さの平均値ならびに測定亀裂の総長と基準線の比から、測定間隔を1.0mm程度に保持すれば、ほぼ満足し得る精度の分析値を示すことが明らかとなった。著者らが得たコンクリート亀裂面形状を表現するこれらの諸量は、亀裂応力伝達力学モデルへ反映可能と思われる。現在、断面法だけではなく3次元分析も執り行っており、これらの結果を今後報告する。

### 〔参考文献〕

- [1] 李宝祿、前川宏一：接触密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、Vol.26, No.1、1988.1
- [2] 三橋博三、梅岡俊治：骨材粒径を変えたコンクリート破面解析、日本建築学会構造論文集、第453号・1993年11月
- [3] 和田俊良、佐藤龍司、石川千温、上田正生：光学的手法によるコンクリートの粗亀裂形状測定、日本建築学会学術講演梗概集（東海）、1994年9月

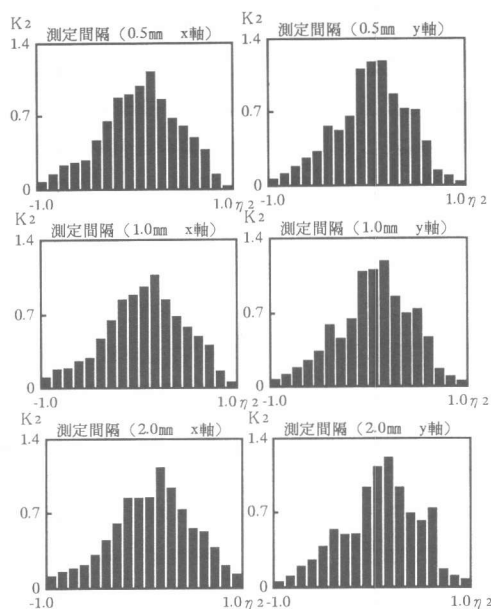


図9 引張亀裂の無次元化深さ密度分布

表4 引張亀裂の深さ

測定間隔(mm)		0.5	1.0	2.0
x 軸 方 向	平均深さ(mm)	1.85	1.84	1.82
	最小深さ(mm)	-6.26	-6.01	-5.90
	最大深さ(mm)	5.55	5.36	5.09
	平均深さ( $\gamma_2$ )	0.32	0.33	0.34
y 軸 方 向	平均深さ(mm)	1.82	1.81	1.80
	最小深さ(mm)	-6.64	-6.44	-6.41
	最大深さ(mm)	5.89	5.68	5.45
	平均深さ( $\gamma_2$ )	0.30	0.31	0.32

表5 亀裂長さ比  $\gamma_2$

測定間隔 (mm)	0.5	1.0	2.0
x軸方向	1.096	1.084	1.072
y軸方向	1.162	1.123	1.084