

論文 コンクリート引張亀裂面と割裂亀裂面の2次元形状特性の評価

石川千温*1・和田俊良*2・佐藤龍司*3・上田正生*4

要旨: 本論文では、コンクリートに亀裂を形成させる応力基本モードに「引張」を位置付け、これに準ずると認知されている「割裂」をも検証対象に選定して、実際に引張亀裂と割裂亀裂が形成される簡潔な実験を行った。この2種のモード下での実亀裂面をレーザービーム・光切断法を用いて形状測定し、取得された3次元座標データを、著者らが既報¹⁾で提案している4種の2次元形状関数で分析した。分析結果の検証・考察から、引張ならびに割裂モード下で形成された亀裂面は、傾斜密度、深さ密度、平均深さ、亀裂面積増加率の分析指標に関して、類似した2次元形状特性を有していることが明らかにされた。

キーワード: 引張応力モード, 割裂応力モード, 傾斜密度, 深さ密度, 亀裂面積増加率

1. はじめに

著者らは、既報¹⁾で、レーザービーム光線・光切断法を用いたコンクリート亀裂面の形状測定システムを構築し、測定亀裂面の3次元座標データから断面プロフィールを切り出し、コンクリート亀裂面の傾き、深さそして亀裂面積の増加率などの形状特性を抽出・把握するための4種の2次元分析関数の提案を行った。

これらの一連の測定・分析過程では、光測定上の1) 分解能と2) サンプル間隔が、分析結果を攪乱させることが惹起される。

この問題を解決するには、予め形状が明らかかな粗面と実際のコンクリート亀裂面とを分解能ならびにサンプル間隔を変えた2次元形状特性値の推移を検証するのが唯一の有効な方法であると考えられる。

そこで著者らは、粗面を模した3種の鋼製試験片と1つの引張亀裂面を上述のパラメータを変えて測定・分析し「分解能0.125mm/dot, サンプル間隔1mmに設定すると亀裂面の2次元形状を把握できる」ことを明示した。この検証結果から、コンクリート亀裂面を、広汎に2次元

分析することが可能となった。

亀裂形成の終局場である亀裂面の形状は、新たなコンクリート構成則の構築に反映させることができ、ここに亀裂形成応力場のモードの違いによる亀裂面の形状特性の相違を調べ、分析し把握しておくことが極めて重要である。

本論文では最初に、1) 引張亀裂面を基本測定・分析対象に採用し、さらに2) 割裂亀裂面をも測定・分析し、これらについて若干の検証・考察を加えることとする。

2. コンクリートの亀裂面形成のための実験

2.1 亀裂形成応力モードの選定

引張亀裂の形成プロセスは、その形成応力が等分布でかつ安定していることから、亀裂形成の基本モードとして「引張」が位置付けられる。しかしながら、引張試験は面倒であるがために、実施面から、引張試験に替えて割裂試験が広く行われ、材料強度の点から「割裂」が「引張」に代用されており、この意味から引張亀裂面と割裂亀裂面の形状特性を比較・検討することは肝要であると言える。

*1 札幌学院大学講師

*2 北海道職業能力開発短期大学校講師

*3 北海道職業能力開発短期大学校助教授

*4 北海道大学助教授

商学部 工修 (正会員)

建築科 工修 (正会員)

情報技術科 工博 (非会員)

工学研究科・社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

本論文では、亀裂形成の基本モードに「引張」を据え、これに準ずる「割裂」をも測定・分析の対象に選定し、実際に同一コンクリートを素材とする引張亀裂と割裂亀裂を形成する実験を行って、2種の実亀裂面の形状特性を比較・検証することとする。

2.2 試験体と実験方法の概要

(1) 試験体記号一覧と使用コンクリートの物性

表-1に、引張と割裂の2種の応力モード下における一連の亀裂発生実験を実施するために製作した試験体の一覧を示す。

表-1から知り得るように、亀裂形成実験に用いた試験体は個々の応力モード毎に5体ずつ計10体作製した。試験体記号の最初の2文字は、引張、割裂の順に、それぞれTn-, Sp-で表記して区分し、さらにこれらの記号の後のハイフンに続けて1から5までの通し番号を付してネーミングし、1シリーズとした。尚、この表中には、レーザービーム光線を用いて亀裂面を計測する際に必要となる「測定x軸方向」をも記入している。

これまで、コンクリートの亀裂面の形状を数値測定した既往の実験^{2),3)}などでは、破壊モードが異なる全ての試験体に互って共通の同一コンクリートを素材に定めた測定・分析例はないようである。コンクリートのような、骨材の品質バラツキが激しく、調合計画が頻繁に変更される材料では、コンクリート自身が異なる亀裂面を直接比較することは、なかなか容易ならざるものと思われる。

そこで本研究では、亀裂を形成させる引張と割裂モードの試験体を全て同一材質のコンクリートを使用して打設・製作し、あらゆる測定・分析結果が齟齬なく相互に比較できるようにした。表-2に、使用コンクリートの配合を、また表-3にはスランプ値とコンクリートの4週強度（圧縮強度と割裂強度）を掲げる。

(2) 試験体の形状と載荷方法

図-1と図-2に、それぞれ引張モード、割

表-1 引張と割裂モード亀裂試験体一覧

種類	試験体記号	寸法諸元	加力形式	測定X軸方向	試験体数
引張	Tn-1~Tn-5	130x130x400	直引張	-	5
割裂	Sp-1~Sp-5	φ100x200	JISA1113 上下載荷板	材軸	5

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
普通	30N/mm 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-3 コンクリートの材料性状

名称	スランプ	圧縮強度	割裂強度
S18-II	21.7cm	36.2N/mm ²	2.64N/mm ²

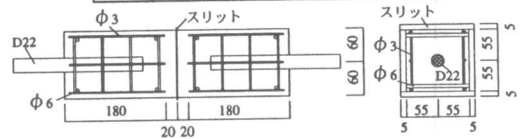


図-1 引張り試験体の概要

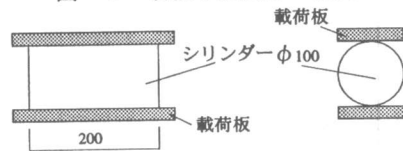


図-2 割裂試験体の概要

裂モード用の試験体形状と載荷方法を図示する。2種の応力モードごとの試験体概要は、以下のようなものである。

a.引張試験：引張試験体の中央位置の4周面に亀裂誘発スリットが形成されている。また、同試験体には、異形鉄筋D22鉄筋を部材中央位置より60mm離れた位置から角柱の中心軸に沿って、それぞれ左右に配置し材端から100mm露出させており、加力は、材端のD22をけん引して行った。

b.割裂試験：割裂モード用の試験体は、割裂強度を得るために極く一般的に使用されているφ100mm、長さ200mmの円柱テストピースを用い、通常の方法にしたがって実験を行った。

3. 亀裂実験と亀裂面形状分析

3.1 亀裂実験による亀裂パターン

ここでは、前節で述べた1)引張と2)割裂応力モード下の亀裂発生実験の結果を概括するが、亀裂面の形状は、従来、目視によって亀裂

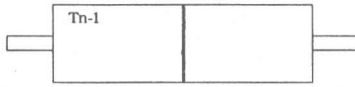


図-3 引張り試験体の亀裂発生状況

発生・伸展経路を評価してきた。この観察レベルにしたがって、本実験で形成された亀裂面の全体形状を調べることにする。

図-3に、引張り試験体の亀裂側面の典型例Tn-1を掲げる。Tn試験体のスパン中央には、亀裂誘発スリットが設けられており、この位置が想定亀裂ゾーンである。すべての試験体の亀裂面は、このゾーンに発生・伸展した。しかしながら、引張り試験体1体(Tn-1)の亀裂面の限られた狭い領域に、骨材界面がそのままの形で露呈したために、局所的に亀裂の凹凸の出入りが特に激しいことが確認された。

一方、割裂応力モード下の実験で得られた亀裂パターンは、通常の割裂試験の結果と何ら変わるところがなく、全シリンダーでその側面の加力線を貫通する形で亀裂面が形成された。このため、亀裂状況図の掲載は省略した。ただ、割裂試験体1体(Sp-2)でも、亀裂面の一部に骨材がそのまま露出して、凹凸の出入りが激しいことが確認されている。

以上の亀裂状況から、本亀裂実験によって得られた全ての試験体の亀裂面を分析対象として有効と判断し、亀裂面形状特性の測定用資料として使用することとした。

3.2 亀裂面形状分析

3.2.1 測定条件

コンクリート亀裂面のように粗面をレーザービーム・光切断法による計測システムを用いて測定する場合、分解能やサンプリング間隔の大きさなどの測定条件が、2次元分析関数から算定される結果の精度に大きく影響することになる。このことは、すでに既報¹⁾で触れたが、分解能ならびにサンプリング間隔を段階的に変動

させた、粗面を模した鋼製試験片と1つの引張亀裂面を対象とするパラメータスタディーから「分解能を0.125mm/dot, サンプリング間隔を1mmとすると、コンクリート亀裂面の2次元形状を把握できる」ことが明示された。

従って本論文では、既報¹⁾の結果を踏まえ、最良と判断される表-4に記載した測定条件を採用して亀裂面形状の計測を行うことにした。

また、全ての試験体の測定サンプリング亀裂面としては、各試験体の亀裂面中央部から切り出された「58mm×60mmの矩形領域」を使用した。

3.2.2 形状分析結果とその考察

引張と割裂応力モードの下で発生させた全ての試験体の亀裂面を、上述の測定条件に従い、本計測システムを用いて亀裂面形状の精密な測定を行った。

ここでは、これらの結果を既に提案した4種の分析関数、即ち、1) 傾斜密度関数 Ω_s 、2) 深さ密度関数 K_s 、3) 平均深さ d_s^{men} 並びに無次元化平均深さ η_s^{men} 、4) 亀裂面積増加率 γ_s を主な指標として分析し、検討・考察を加えることとする。以下では、主要な分析関数を掲げるが、紙幅の制限から、その詳細は既報¹⁾を参照されたい。

(1) 「傾斜密度関数 Ω_s 」に関する分析結果と考察

亀裂微小面の傾斜角 θ_s の密度分布 Ω_s は、(1)式で算定される。

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

図-4(a)~図-4(b) (図中SIはサンプリング間隔である) は、引張ならびに割裂の各応力モードにおける亀裂微小面の傾斜密度関数 Ω_s を傾斜角に関するヒストグラム型の型で示したもので、各図には5体の試験体の分析結果の中から3つの代表例を選択して記載してある。

図-4(a)の「引張応力モード」下の亀裂面の傾斜密度分布を見ると、x軸、y軸とも「上に凸の対称性に富む山形分布」の全体的傾向を示し

表-4 亀裂面の測定条件

入射角	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
$\pi/4$	0.2mm	1.0mm	0.125mm/dot	1.0mm	61

ている。密度値ピークは、傾斜角が零近傍で1.0～1.2程度であり、傾斜角が急峻になるに従い、その値は次第に小さくなり、傾斜角±π/2でついに零に収束している。このような傾向は、図-4(b)の割裂応力モード下の亀裂面の傾斜密度分布でも同様である。ただ、割裂試験体Sp-2

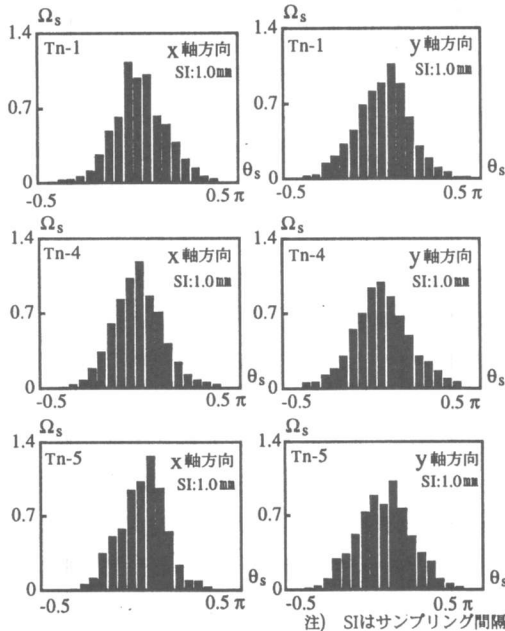


図-4(a) 引張亀裂の傾斜密度分析結果

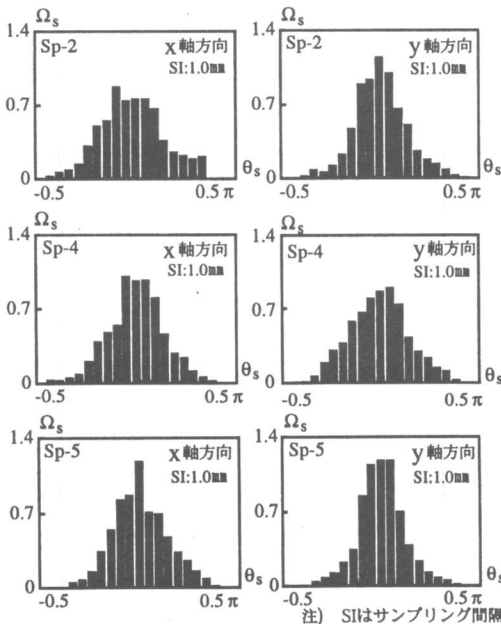


図-4(b) 割裂亀裂の傾斜密度分析結果

を詳細に見ると、x軸に関する分布の方がy軸のそれよりも僅に急峻な値をとっており、割裂応力モードでは、x軸とy軸間にわずかな差異が認められる。しかし、引張と割裂応力モードの傾斜密度分布の傾向は、よく類似している。

(2) 「深さ密度関数 K_s 」と「平均深さ d_s^{men} 」ならびに無次元化平均深さ η_s^{men} に関する分析結果と考察

亀裂微小面の無次元化深さ η_s の密度分布 K_s は、(2)式で分析・評価される。

$$\int_{-1}^1 K_s(\eta_s) d\eta_s = 1 \quad (2)$$

図-5(a)～図-5(b)は、先の図-4の場合と同じ試験体に関する、引張および割裂の各応力モードにおける深さ密度関数と無次元化深さの関係をヒストグラムで図示したものである。また、表-5(a)～表-5(b)には、各応力モードごとに、全試験体の測定x軸とy軸方向の深さ分析結果を一覧として掲げた。これらの表中には、亀裂平均深さ、無次元化平均深さ、亀裂最深値と亀裂最高値のほかにも亀裂深さ(亀裂最高値から亀裂最深値を差し引いた値)をも記載してある。亀裂平均深さと無次元化平均深さは、それぞれ(3)式と(4)式で算定・評価される。

$$d_s^{men} = \int_{d_s^{mxd}}^{d_s^{mxh}} |d_{ps}| A_s(d_{ps}) dd_{ps} / \int_{d_s^{mxd}}^{d_s^{mxh}} A_s(d_{ps}) dd_{ps} \quad (3)$$

$$\eta_s^{men} = \int_{-1}^1 |\eta_s| A_s(\eta_s) d\eta_s / \int_{-1}^1 A_s(\eta_s) d\eta_s \quad (4)$$

ここでは先ず、図-5と表-5の分析結果を関連づけて、亀裂面の深さ形状の性状を評価することにする。

最初に、図-5(a)の引張応力モード下の深さ密度分布を見ると、3つの試験体Tn-1, Tn-4, Tn-5のうちTn-1のみが幾分特異な深さ密度分布を示していることがわかる。しかしながら、他の2体を含めた全5体の引張試験体の中で、特異な分布を示したのはこのTn-1のみであり、他の4つの試験体の亀裂面は、ほぼ同様の分布傾向を示した。

全般的な様相を物語るTn-4とTn-5試験体の

深さ密度分布を見ると、無次元化深さ η_s が零の近傍でピークを持ち、対称性を一部欠きながら、 $\eta_s = \pm 1.0$ に向かって両翼が広がるように遞減してゆく「上に凸の山形分布」を描いていることが分かる。先に指摘しているように、この分布傾向は $Tn-1$ を除く $Tn-2$ と $Tn-3$ を含む 4 体の試験体においても認められている。

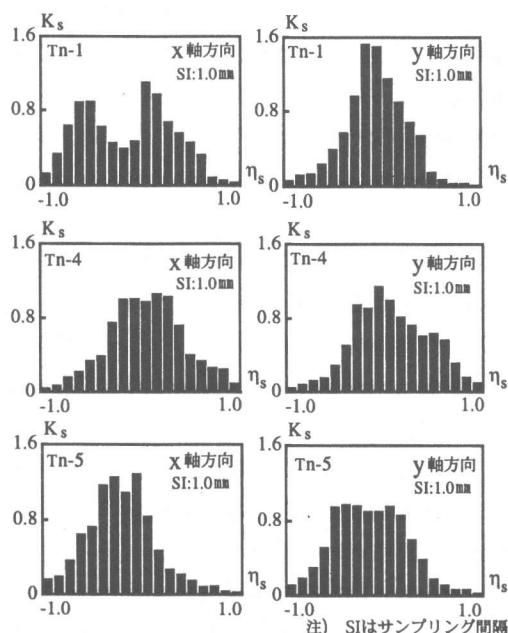


図-5(a) 引張亀裂の深さ密度分析結果

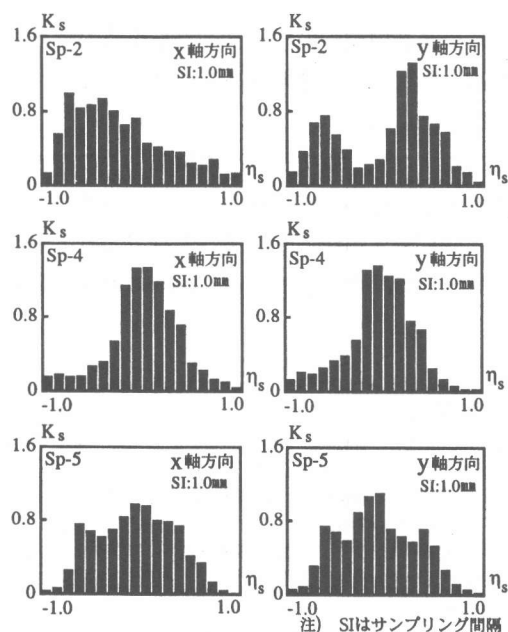


図-5(b) 割裂亀裂の深さ密度分析結果

表-5(a)の引張応力モード下の深さ分析結果から、 $Tn-1$ を除いた4つの試験体では、軸方向の違いによる分析値の乖離は見られず、平均深さ2.3mm、亀裂深さの平均が(亀裂最高値から亀裂最深値を差し引いた値)13.9mm、及び無次元化平均深さ0.31程度ではほぼ一致している。引張モードでは、軸力が試験体スリット位置のコンクリート面に均一に作用するので、亀裂形状は亀裂断面上の方向性に強く依存しないと考えられる。このことから、本粗面形状の平均値が、x軸とy軸方向で、ある程度同傾向であることは、意味あることと思われる。

次に、唯一特異な傾斜密度分布を呈した試験体 $Tn-1$ の結果を詳細に検証する。x軸方向の深さ密度分布では、 $\eta_s = -0.50$ と 0.17 近傍にふたつのピークを有する「逆W型の深さ密度分布」であり、またy軸方向では、 $Tn-4$ や $Tn-5$ 試験体よりも大きなピーク値を持つ山形分布を示し、明らかに軸方向によって全く異なる分布を呈していることが分かる。表-5(a)の深さ分析結果にその影響を見てみると、 $Tn-1$ のx軸方向の平均深さ3.03mm、y軸方向のそれが1.53mmとなり、軸方向の平均深さの値に大きな差異が生じ、試験体 $Tn-1$ のx軸方向でy軸方向よりも亀裂面の凹凸形状が局所で激しいことが分かる。

これらのコンクリート亀裂面形状の相違は、亀裂形成応力が不均一に作用したからではなく「モルタル中の骨材の3次元配置形が、亀裂伸展経路に大きな影響を与えたものである」と考えるのが妥当なように思われる。

これら引張亀裂面の形状特性の全般的傾向は、図-5(b)の割裂亀裂面の深さ密度分布と表-5(b)の割裂亀裂面の深さ分析結果一覧においても認められる。さらには、図-5(b)中の $Sp-2$ のy軸方向の深さ密度分布は、 $Tn-1$ のx軸方向と同じ逆W型を示しており、割裂応力モード下においても亀裂面の局所で凹凸の出入りが激しい場合があることが追認される。

引張と割裂モードの深さ密度分布と深さ分析結果を総覧すると、両モードの深さ形状は類似

表-5(a) 引張亀裂の深さ分析結果一覧

試験体名		Tn-1	Tn-2	Tn-3	Tn-4	Tn-5	平均
x 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	3.03	3.89	1.84	1.51	1.82	2.42
	亀裂最深値 d_s^{mxd} (mm)	-6.85	-12.07	-6.10	-5.45	-5.47	-7.17
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	8.93	10.95	5.36	4.73	8.38	7.67
	亀裂深さ (mm)	15.78	23.02	11.37	10.18	13.85	14.84
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.38	0.35	0.33	0.30	0.32	0.34
y 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	1.53	3.64	1.81	1.97	1.99	2.19
	亀裂最深値 d_s^{mxd} (mm)	-6.16	-5.96	-6.48	-6.83	-5.74	-6.23
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	7.07	8.60	5.69	5.95	7.70	7.00
	亀裂深さ (mm)	13.23	14.56	12.17	12.78	13.45	13.24
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.24	0.28	0.30	0.31	0.32	0.29

表-5(b) 割裂亀裂の深さ分析結果一覧

試験体名		Sp-1	Sp-2	Sp-3	Sp-4	Sp-5	平均
x 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	1.84	2.71	1.99	1.71	1.93	2.04
	亀裂最深値 d_s^{mxd} (mm)	-8.65	-5.49	-5.78	-6.61	-5.84	-6.47
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	6.51	8.98	8.14	6.43	6.35	7.28
	亀裂深さ (mm)	15.16	14.48	13.92	13.05	12.20	13.76
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.27	0.44	0.30	0.26	0.32	0.32
y 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	1.57	4.39	2.14	1.83	1.93	2.37
	亀裂最深値 d_s^{mxd} (mm)	-7.59	-10.40	-7.68	-6.94	-5.67	-7.65
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	7.59	10.59	8.12	7.30	6.57	8.03
	亀裂深さ (mm)	15.14	20.98	15.79	14.24	12.24	15.68
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.21	0.42	0.27	0.26	0.33	0.29

していると思われる。

(3) 「亀裂面積増加率 γ_s 」に関する分析結果と考察

表-6(a)~表-6(b)に、引張モードと割裂モードごとに、全試験体の亀裂面積増加率 γ_s の一覧を掲げる。亀裂面の表面積は、元の面積よりも増加するが、ここでは、亀裂表面積を基準底面積で除すという概念に基づいて、亀裂面積増加率が算定されている。亀裂面積増加率 γ_s は、(5)式のようなである。

$$\gamma_s = \left(\int_{C_{cx}} S_x dx / \int_{C_{bx}} \bar{S}_x dx \right) \left(\int_{C_{cy}} S_y dy / \int_{C_{by}} \bar{S}_y dy \right) \quad (5)$$

同表より、2種の応力モードの各試験体において、同一応力モードの試験体シリーズでは

表-6(a) 引張モード下の亀裂面積増加率一覧

試験体名	Tn-1	Tn-2	Tn-3	Tn-4	Tn-5	平均
亀裂面積増加率 γ_s	1.184	1.190	1.217	1.189	1.164	1.189

表-6(b) 割裂モード下の亀裂面積増加率一覧

試験体名	Sp-1	Sp-2	Sp-3	Sp-4	Sp-5	平均
亀裂面積増加率 γ_s	1.169	1.221	1.143	1.216	1.161	1.182

個々の分析結果相互の差異が小さいだけではなく、モード間の差異は殆どない。これら亀裂表面積の増加率は、おおよそ1.19程度であった。

引張モードの亀裂面積増加率は、割裂モードのそれとよく類似している。

4. むすび

本論文では、コンクリート亀裂形成モードの基本に「引張」を位置付け、これに準ずる「割裂」との2種の応力モード下でのコンクリート亀裂形成実験を行った。そして、得られた亀裂面を2次元形状分析し、若干の検討・考察を試みた。

本論文で得られた結果を要約し列挙すると以下のようになる。

- 1) 亀裂面の傾斜密度分布は、引張モードならびに割裂モードとも、傾斜角零に関して対称な上に凸の分布となる。
- 2) 深さ密度分布は、全般的には、一つの密度ピーク値を有する上に凸なる傾向を示すが、分布にバラツキがある場合がある。
- 3) 亀裂の平均深さ、亀裂深さ及び亀裂面積増加率は、引張モードと割裂モード下では、相互に同傾向を示す。
- 4) 引張と割裂応力モード下の亀裂面の形状特性は、2次元の4種の分析指標において、良く類似している。

ここでは、引張モードと割裂モードのみを分析対象としたが、亀裂形成応力モードには、さらに曲げやせん断モードが残されており、これらを含めた総合的な検証は、後続の論文で報告する。

参考文献

- 1) 和田俊良・佐藤龍司・石川千温・上田正生：レーザービーム光線による亀裂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，日本建築学会構造系論文集，第490号pp.179~pp.188，1996年12月
- 2) 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
- 3) 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，日本建築学会構造系論文集，第453号，1993年11月