種々の応力モード下におけるコンクリート亀裂面の2次元形状分析

—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2)—

2-DIMENSIONAL SHAPE ANALYSES OF THE CONCRETE CRACK
SURFACES INTRODUCED BY VARIOUS KINDS OF STRESS

A basic study on shape properties of the concrete crack surface Part 2

和田 俊良*, 佐藤 龍司**, 石川 千温***, 上田 正生****

Toshinaga WADA, Ryuji SATO, Chiharu ISHIKAWA
and Masaiki UEDA

Four series of experiments are performed using each five concrete specimens, in which cracks are introduced by tension, splitting, bending moment and shear force. These crack surfaces are measured to take its 3-dimensional images by laser beam setup. And then these images are analyzed with the 2-dimensional crack shape method. Appropriately the results show that 1) Crack by tension and crack by splitting have a similar tendency toward incline and depth of the surface, 2) Crack by bending moment and crack by shear force have a deeper crack band than that by tension or splitting.

Keywords: 2-dimensional shape analysis, concrete crack surface, incline density function, depth density function, increased ratio of crack surface area

2次元形状分析、コンクリート亀裂面、傾斜密度関数、深さ密度関数、亀裂面積増加率

1. はじめに

著者らは、前報(その1)¹⁾において、レーザービーム光線を用いた光切断法によるコンクリート亀裂面の形状測定システムを構築し、次いでコンクリート亀裂面の形状特性を抽出・把握するための4種の2次元分析関数の提案を行った。そしてまた、これらの分析関数を用いて亀裂面形状を精度良く評価するための測定条件等を明らかにした。即ち、前報で得た研究成果によって初めて、本計測システムと2次元分析関数を用いてコンクリート亀裂面の形状を、本格的に評価するための準備が整ったことになる。

前報の序論において既に触れたように、「コンクリートに亀裂が形成される過程は、無秩序なものではなく、ある物理的、ないしは力学的規則性に従って遷移すると考えることができ、従って、最終的な結果である亀裂面の形状は、その一連の連続した亀裂形成挙動を投影している」と解釈するのは、至極く自然なことのように思われる。著者らが、亀裂面の形状特性を、コンクリートの構成則に反映させることを究極の目的にしているのは、上記の考えに依拠しているからである。このような観点に立つと、亀裂を生ずる原因となった応力場のモード(以下、応力モードと略記)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になる。

既に述べたように、コンクリート亀裂面の形状を実験的に調べた既往の研究としては、著者らの知る限りでは、僅かにデジタイザー検知法による李・前川²⁾とスポットレーザー光線法による三橋ら³⁾の研究があるのみであり、応力モードの違いによるコンクリート亀裂面の形状特性を、相互に比較して論じ得るような有効なデータは、殆ど見当たらないのが現状である。

本論文の目的は、「コンクリート亀裂面の形状特性が、それを生じせしめた応力場の違いによって、いかなる相違を見せるのか、あるいはどのような類似性を見出すことができるのか」を調べることである。

本論文は、4種の応力モード、即ち、1) 引張り、2) 割裂、3) 曲げ、4) せん断のモードを対象にして、各応力モードごとに、全て同一のコンクリートを使用した亀裂発生のための試験体を数体ずつ作製し実験を行い、「レーザービームを用いた光切断法による計測システムと亀裂面形状分析手法」を用いて、それぞれの応力モード下におけるコンクリート亀裂面の形状特性を詳査・比較し、考察を加えたものである。

2. コンクリートの亀裂面形成のための実験

ここでは、コンクリート亀裂面の形状特性を調べるための亀裂形

* 北海道職業能力開発短期大学校建築科 講師・工修
** 北海道職業能力開発短期大学校情報技術科 助教授・工博
*** 札幌学院大学商学部 講師・工修
**** 北海道大学工学研究科社会基盤工学専攻 助教授・工博

Lecturer., Hokkaido Polytechnic College, M. Eng.
Assoc. Prof., Hokkaido Polytechnic College, Dr. Eng.
Lecturer., Faculty of Commerce, Sapporo Gakuin Univ., M. Eng.
Assoc. Prof., Division of Structural and Geotechnical Eng., Hokkaido Univ., Dr. Eng.

成実験の概要について記述することにする。

2.1 亀裂形成応力モードの選定

コンクリートに亀裂を生じさせる基本的な応力モードとして、一般に広く認識されているのは、引張り、曲げ、せん断の3モードである。実際のコンクリート構造における曲げとせん断の応力モードの重要性は、改めて強調するまでもないが、引張りモードについては、従来、曲げ亀裂に関連付けて論じられることが多く、純引張りに近い応力モードで部材に亀裂が発生する場合は殆どあり得ないと考えられてきた。しかし、先の阪神・淡路大震災で生じたある建物の角型鋼管柱の全断面を貫通する引張り破断現象は、直下型地震の際には、柱部材に直引張りに近い応力モードが生じ得ることを示し、引張り応力モードの重要性を我々に再認識させることとなった。

先述したように、本論文では上記の3応力モードの他に、割裂モードを加えた4種の応力モードを選定して「亀裂形成実験」を行うことにする。ここに、割裂モードをもその検討の対象に追加したのは、直引張り試験より遥かに実験の容易な割裂強度が、引張り強度を表わすものとして既に広く使用されていることと、このモードで形成された亀裂面の形状特性が、引張りモードのそれにどの程度近似するのかを調べるためである。

また、既に幾度か触れたが、コンクリートの亀裂面形状特性に関する既往の研究としては、李・前川²⁾と三橋ら³⁾の論文がある。前者は割裂応力モード下の亀裂面の傾斜角のみを、また後者は割裂と曲げの2種のモード下における亀裂面のフラクタル値を取り扱っているが、これら個々の試験体に使用された素材としてのコンクリートの材質はそれぞれ異なっており、また、両者間ではデータの分析手法自体が互いに異なっているため、これらの結果を直ちに「応力モードの違い」として相互に比較することはできないのが現状である。

以上のような研究の現状を踏まえ、本論文では、4種の応力モード全てについて同一材質のコンクリートを使用して試験体を作製し、実験を行うこととした。

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は、上記の4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を一覧したものである。この表から知り得るように、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20体作製した。また、各試験体はその記号名から応力モードが容易に判別できるように、その記号の最初の2文字を、引張り、割裂、曲げ、せん断の順に、それぞれTn-、Sp-、Bn-、Sh-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」をも記入してある。

前述したように、これらの試験体は全て同一材質のコンクリートを使用して打設・製作したものである。表-2は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）を掲げた。

(2) 試験体の形状と載荷方法

図-1、2、3、4は、それぞれ引張り、割裂、曲げ、せん断の

表-1 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
曲げ	Bn-1~Bn-5	150x200x700	JISA1106 3等分点載荷	加力方向	5
せん断	Sh-1~Sh-5	156x262x700	逆対象2点載荷	加力方向	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	300kgf/cm ²	18cm	20mm
骨材種類	セメント	水セメント比	細骨材率
砕石	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	369.1kgf/cm ²	26.9kgf/cm ²

各応力モード用の試験体形状と載荷方法を図示したものである。以下では、各応力モードごとにその概要を記述する。

a.引張り試験（図-1）：引張り試験体は、前報¹⁾の基礎実験で使用したものと同一形状である。図から知り得るように、この試験体には、D22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露出させている。また、試験体中央の4周面に幅2mm深さ5mmの「剥離剤を塗布した鋼板」を埋め込んで亀裂誘発用のスリットを形成してある。なお、引張り亀裂は試験体両端に露出させたD22筋をけん引することによって発生させた。

b.割裂試験（図-2）：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。

c.曲げ試験（図-3）：曲げモード用の試験体は、JISA1106を参考にして製作したもので、試験体中央下端に亀裂誘発用のスリットを入れてある。また、この試験体には、アムスラーによる3等分点載荷を行って曲げ亀裂を発生させた。

d.せん断試験（図-4）：Bazantらは既報⁴⁾において、「ある特定の寸法比をもつ直方体形状の試験体に、逆対象2点載荷を行うと、

図-1 引張り試験体の概要

図-2 割裂試験体の概要

図-3 曲げ試験体の概要

図-4 せん断試験体の概要

試験体中央部に明確なせん断亀裂が生じる」ことを報告している。このせん断モード試験体は、Bazant⁴⁾らの推奨する試験体寸法比にしたがって形状寸度を決定したもので、試験体の上下端には、幅2mm深さ21mmの亀裂誘発用スリットをいれている。試験体への加力は、アムスラーによる逆対象2点载荷で行った。

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4種の応力モード下の亀裂発生実験の結果を概括する。

割裂応力モード下の実験で得られる亀裂パターンは、通常の割裂試験の場合と何ら変わるところがないので、図-5、6、7には、本実験における引張り、曲げ、せん断の各応力モード試験体の亀裂側面の典型例を、対比して掲げた。紙数の制約からその他の試験体の亀裂図については割愛せざるを得なかったが、他の試験体の場合も、それぞれの応力モード毎にほぼ同様な亀裂パターンで破壊していた。これらの各応力モード下の亀裂面の凹凸の出入りの程度は、全体傾向として、引張りと割裂モードでは比較的少なく、曲げとせん断モードでは凹凸の幅がいくぶん大きくなる傾向が認められた。さらに、これらの亀裂面を詳細に観察すると、引張りモード用試験体1体(Tn-1)と割裂モード用試験体1体(Sp-2)の亀裂面の一部に、骨材界面がそのままの形で露呈したがために、局所的に亀裂の凹凸の出入りが、特に激しい領域が形成されたことが目視された。しかしながら、すべての応力モードの試験体の亀裂が、部材中央の想定亀裂面近傍で発生しており、スリットを入れた想定亀裂ゾーンから大きく外れることはなかった。

以上の結果から、本亀裂実験によって得られた4種の応力モード全ての試験体の亀裂面を有効と判断し、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。

図-5 引張り試験体の亀裂発生状況

図-6 曲げ試験体の亀裂発生状況

図-7 せん断試験体の亀裂発生状況

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

3.2 亀裂面形状分析

3.2.1 測定条件

既に明らかにしたように、レーザービーム・光切断法による著者らの計測システムを用いて亀裂面形状を測定する場合、その測定条件が結果の精度に大きく影響することになる。従って本論文では、前報²⁾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

4種の応力モードの下で発生させた全ての試験体の亀裂面サンプリング資料を、上で述べた測定条件に従い、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、これらの結果を前報で提案した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。

(1) 「傾斜密度関数 Ω_s 」に関する分析結果と考察

図-8(a)~図-8(d) (図中SIはサンプリング間隔である) は、引張り、割裂、曲げならびにせん断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の形で示したもので、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。以下では、各応力モードごとに、これらの傾斜密度分布について検討を行ってみる。

図-8(a)の「引張り応力モード」下の亀裂面の傾斜密度分布を見ると、x軸、y軸とも「上に凸の山形分布」の同様な傾向を示しており、傾斜角が零近傍での密度値は1.0~1.2程度となっている。しかし、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 $\pm\pi/2$ でついに零に収束している。これらの傾斜密度分布は、傾斜角零に関して略きれいな対称性を見せており、その分布に大きな偏

図-8(a) 引張り亀裂の傾斜密度分析結果

図-8(b) 割裂亀裂の傾斜密度分析結果

図-8(c) 曲げ亀裂の傾斜密度分析結果

図-8(d) せん断亀裂の傾斜密度分析結果

りは認められない。このような傾向は、図-8(b)の割裂応力モード下の亀裂面の傾斜密度分布にも見ることができ、割裂試験体Sp-2を詳細に眺めてみると、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軸間の間の亀裂の傾斜密度分布にわずかな差異が認められる。しかし、引張り

と割裂応力モード下における全体的な傾斜密度分布は、極めてよく類似していると言うことができる。

次に、図-8(c)の曲げ応力モード下の亀裂面の傾斜密度分布を見ると、この場合の傾斜密度分布は、引張り亀裂の分布と基本的に同様な形態を見せているが、Bn-3のx軸とy軸の分析結果には、密度値に小さな偏差が認められる。このような傾向は、図-8(d)のせん断試験体Sh-5の亀裂面の傾斜密度分布にも現れている。曲げとせん断応力モード下の亀裂面における傾斜密度分布の小さな乱れの存在は、「これら応力モードでは、Bazantの指摘するcrack bandが、比較的厚く形成される」ことに因るものとして解釈することができるように思われる。しかしながら、これらの事柄は傾斜密度分布の結果のみで論ずべきものではなく、ほかの分析指標と合せて検証する必要があるので、後続の項で再び触れることにする。いずれにせよ、細部の僅かな違いを除外すると、図-8(a)～図-8(d)の亀裂面の傾斜密度分布の全容から、その総合所見として、「亀裂面の傾斜密度の2次元分布形状は、応力モードにそれ程大きく影響されない、対称性のよく保たれた、上に凸の山形分布を呈する」と言うことができる。

(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

図-9(a)～図-9(d)は、先の図-8の場合と同じ試験体に関する、引張り、割裂、曲げ及びせん断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(d)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、亀裂平均深さと無次元化平均深さのほかに亀裂最深値と亀裂最高値をも記載してある。

ここではまず、図-9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してみることにする。

図-9(a)からも明らかなように、引張り応力モード下のこれら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が、これら以外の他の2体を含めた全5体の引張り試験体のうちで、特異なのは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であった。このうちのTn-4とTn-5試験体の深さ密度分布を対比してみると、その値は、無次元化深

図-9(a) 引張り亀裂の深さ密度分析結果

図-9(b) 割裂亀裂の深さ密度分析結果

図-9(c) 曲げ亀裂の深さ密度分析結果

図-9(d) せん断亀裂の深さ密度分析結果

さ η_s が零の近傍でピークを持ち、不完全な非対称性を示しながら、 $\eta_s = \pm 1.0$ に向かって両翼が広がるように通減してゆく「上に凸の山形分布」を描いている。前述したように、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た。このよ

表-5(a) 引張り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 $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	3.03	3.89	1.84	1.51	1.82	2.42
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-6.85	-12.07	-6.10	-5.45	-5.47	-7.17
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	8.93	10.95	5.36	4.73	8.38	7.67
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.38	0.35	0.33	0.30	0.32	0.34
y軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	1.53	3.64	1.81	1.97	1.99	2.19
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-6.16	-5.96	-6.48	-6.83	-5.74	-6.23
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	7.07	8.60	5.69	5.95	7.70	7.00
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	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 $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	1.84	2.71	1.99	1.71	1.93	2.04
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-8.65	-5.49	-5.78	-6.61	-5.84	-6.47
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	6.51	8.98	8.14	6.43	6.35	7.28
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.27	0.44	0.30	0.26	0.32	0.32
y軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	1.57	4.39	2.14	1.83	1.93	2.37
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-7.59	-10.40	-7.68	-6.94	-5.67	-7.65
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	7.59	10.59	8.12	7.30	6.57	8.03
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.21	0.42	0.27	0.26	0.33	0.29

表-5(c) 曲げ亀裂の深さ分析結果一覧

試験体名		Bn-1	Bn-2	Bn-3	Bn-4	Bn-5	平均
x軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	2.43	2.01	4.05	2.30	3.38	2.83
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-9.08	-4.94	-16.25	-5.90	-8.05	-8.84
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	7.01	9.43	9.86	12.96	10.17	9.88
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.32	0.42	0.38	0.40	0.37	0.38
y軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	1.49	3.78	3.10	3.27	1.69	2.67
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-4.91	-8.55	-9.05	-7.40	-5.34	-7.05
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	6.27	13.70	9.55	10.78	4.62	8.98
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.29	0.40	0.34	0.38	0.34	0.35

表-5(d) せん断亀裂の深さ分析結果一覧

試験体名		Sh-1	Sh-2	Sh-3	Sh-4	Sh-5	平均
x軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	2.14	1.71	1.62	2.10	4.24	2.36
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-6.45	-6.64	-6.86	-10.49	-10.44	-8.16
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	7.29	7.52	4.82	6.94	10.64	7.44
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.32	0.25	0.31	0.32	0.40	0.32
y軸方向	平均深さ $d_{s\text{men}}(\text{mm})$	2.17	2.08	2.59	2.06	4.08	2.60
	亀裂最深値 $d_{s\text{maxd}}(\text{mm})$	-5.98	-11.70	-8.17	-8.88	-9.54	-8.85
	亀裂最高値 $d_{s\text{maxh}}(\text{mm})$	8.53	9.28	8.09	5.91	13.83	9.13
	無次元化平均深さ $\eta_{s\text{men}}$	0.33	0.24	0.32	0.33	0.38	0.32

うな傾向は、表-5(a)の引張り応力モード下の深さ分析結果にも現われており、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、ほとんどが平均深さ2.3mm、亀裂深さ（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程度ではば一致している。

ここで、唯一分布系の特異な試験体Tn-1の結果を詳細に見てみると、x軸方向の深さ密度分布は、 $\eta_s = -0.50$ 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ている。このTn-1試験体の特異な逆W型の分布は、実験実施時における何らかのミスによって生じた排除データとして処理されるべきものではなく、前項3.1の目視による亀裂パターンにおいても認められた亀裂の局所での凹凸の出入りの激しさに起因する「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」と解釈するのが妥当なように思われる。このTn-1の亀裂の局所での凹凸の出入りの激しさは、表-5(a)の深さ分析結果にも影響を与え、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ている。

これら引張り亀裂面の形状特性の傾向は、図-9(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、図-9(b)中のSp-2のy軸方向の深さ密度分布はTn-1の例と同様な逆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。

以上の検討結果から、「引張りと割裂応力モード下の亀裂面形状の2次元特性は、相互に高い類似性を有している」ことを知り得る。

さて次に、曲げ応力モード下における、図-9(c)の亀裂面の深さ密度分布と表-5(c)の亀裂深さ分析結果に注目して検討を行ってみる。まず図-9(c)を見てみると、曲げ亀裂面では、Bn-1試験体のように、引張りや割裂モードの亀裂面の場合と同様に偏差の少ない、上に凸の山形の深さ密度分布を見せることもあるが、他方では、Bn-2ならびにBn-3のように、密度値のピークが $\eta_s=0$ からはずれ、偏りの大きな深さ密度分布を呈することがあることが分かる。また、表-5(c)の曲げ亀裂面の深さ分析結果を見ると、全試験体の平均値で、平均深さ2.8mm、亀裂深さ17.4mmそして無次元化平均深さ0.36程度となっており、前者2項目は引張り及び割裂モードの例よりやや大きな値を取り、最後の無次元化平均深さはほぼ等しくなっている。

最後に、せん断応力モード下の図-9(d)の亀裂面の深さ密度分布と表-5(d)の亀裂面の深さ分析結果について見てみると、図-9(d)中のSh-1試験体では、深さ密度分布の偏差は小さく、引張りや割裂応力モードに見られた特徴的な山形分布を呈しているものの、Sh-3の例ではピークの偏差量が更に大きく、またSh-5では密度値が等分分布状態に近くなっており、引張りや割裂よりも分布形にバラエティーが認められる。この深さ密度分布の相違の影響は、表-5(d)の亀裂面の深さ分析結果にも反映しており、無次元化平均深さを除いた他項目の分析値は、引張りや割裂応力モードよりも若干大きく、曲げ亀裂と同様な推移傾向を呈している。

以上、本実験の極く限られた試験体数から得られた結果ではあるが、少なくとも「定性的な傾向として、せん断と曲げの亀裂面形状の2次元特性は相互に可成り似通っている」と言うことができそうである。

(3) 「亀裂面積増加倍率 γ_s 」に関する分析結果と考察

表-6(a)～表-6(d)に、応力モードごとに、全試験体に対する亀裂面積増加倍率 γ_s の一覧を掲げる。同表より、4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個々の分析

表-6(a) 引張りモード下の亀裂面積増加倍率一覧

試験体名	Tn-1	Tn-2	Tn-3	Tn-4	Tn-5	平均
亀裂面積増加倍率 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倍率一覧

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

表-6(c) 曲げモード下の亀裂面積増加倍率一覧

試験体名	Bn-1	Bn-2	Bn-3	Bn-4	Bn-5	平均
亀裂面積増加倍率 γ_s	1.281	1.198	1.215	1.252	1.197	1.229

表-6(d) せん断モード下の亀裂面積増加倍率一覧

試験体名	Sh-1	Sh-2	Sh-3	Sh-4	Sh-5	平均
亀裂面積増加倍率 γ_s	1.243	1.196	1.188	1.188	1.234	1.210

結果相互の差異は小さく、また同時に引張り一割裂間ならびに曲げ一せん断間で、それぞれほぼ同程度の値をとっている。これら亀裂表面積の増加倍率は、引張りと割裂モードでおおよそ1.19、曲げとせん断モードで1.22程度となっており、後者が前者の約2.9%大きな値を示している。しかし、両者とも、その値は2割増し前後程度であり、実験時の亀裂面の目視観察の印象と比較すると小さ目の値となった。このことから、曲げやせん断応力モード下において亀裂が形成される場合、引張りや割裂モードの場合よりも、亀裂の凹凸が幾分激しくなり、結果として、亀裂面の分担面積が大きくなることを知り得る。

4. むすび

本論文では、引張り、割裂、曲げ、せん断の4つの応力モード下におけるコンクリートの亀裂発生実験を行い、さらにこれらを、前報¹⁾において開発・提案したレーザービーム光線による光切断法を用いた亀裂面形状測定法と、亀裂面形状分析のための4種の指標を尺度として「コンクリート亀裂面の2次元分析」を実施し、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ようになる。

- 1) 傾斜密度分布は、亀裂形成応力モードの違いには大きな影響は受けず、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、応力モードによって分布の偏りに相違が生じ、引張りと曲げの分布偏差量はかなり小さく、曲げとせん断では大きい場合がある。
- 3) 亀裂の平均深さ、亀裂深さ及び亀裂面積増加倍率は、引張りと割裂応力モード下では、曲げとせん断応力モードの場合よりも小さくなる傾向がある。すなわち、引張りと割裂応力モード下の亀裂発生領域は薄い板状に近く、曲げとせん断モードではそれよりも厚い領域に形成される。
- 4) 引張りと割裂応力モード下の亀裂面の形状特性は良く類似しており、引張り亀裂面の形状特性は、実験がより容易な割裂試験の結果を用いて類推することができる。

以上、本論で得られた結論は、あくまでもコンクリートの亀裂面形状特性を「2次元分析」の視野で捉えたものである。言うまでもなく亀裂面形状をより詳細に正確に把握するためには、亀裂面を3次元で立体的に分析する方が理想的なはずである。コンクリート亀裂面形状の3次元分析手法については、2次元分析手法との比較を含めて、現在研究を発展・継続中であり、その結果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：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) 李宝禄、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
- 4) Z.P.Bazant and P.A.Pfifer: Shear fracture tests of Concrete, Matériaux et Constructions, vol.19-N° 110, pp.111～pp.121

(1997年5月26日原稿受理、1997年9月19日採用決定)