

論文 亀裂形成応力モードが異なるコンクリート亀裂面の2次元形状特性分析

和田俊良^{*1}・佐藤龍司^{*2}・石川千温^{*3}・上田正生^{*4}

要旨: コンクリートの応力状態(モード)の相違が、「亀裂形状特性を記述する4つの指標」を遷移させる様相を知るために、亀裂実験を行い、その形成亀裂面を測定・2次元形状分析した。前報¹⁾で、すでに引張モードと割裂モードの分析は済ませているので、本論文では、さらに曲げモードとせん断モードを選定し、前報の分析結果と総合して検証を加えた。これより以下の3項目が明らかとなった。1) 傾斜密度と深さ密度は上に凸の分布となる。2) 引張モードと割裂モード下のcrack bandの厚さは、曲げモードとせん断モードのそれよりも薄い。3) 引張モードと割裂モードの亀裂面形状は類似している。

キーワード: 曲げ応力モード、せん断応力モード、傾斜密度、深さ密度、亀裂面積増加率

1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下、RCと略記する)部材の非線形挙動を支配する主因の一つが、コンクリート部に形成される亀裂である。この亀裂の機構を知るアプローチは、目視観察などの巨視的な測定レベルに立脚してきた。

李²⁾らは、デジタイザー検知法によって亀裂面の傾斜密度分布を精密測定した。また三橋³⁾らはスポットレーザで、亀裂面を測定し、そのフラクタル解析を行った。

RC部材の亀裂場は、引張、曲げならびにせん断が複合しており、これらの応力モードと亀裂形成機構の関連が、構造解析において重要である。これを亀裂形状の視点から明らかにするには、同一コンクリートを素材として応力モードを変えた亀裂実験を実施し、形成された亀裂面を測定して、形状特性を抽出する分析を行わなければならない。しかしながら、既往の研究を総覧するに、各種モード下で、その一連の手続き上の諸条件がすべて揃った相互に比較し得る有効なデータは、見当たらないようである。

そこで本研究では、上述の材料・測定・分析

の諸条件を首尾一貫させ、「コンクリート亀裂面の形状特性が、応力モードの違いによって、いかような相違と類似性を見せるのか」を調べるために、応力モードが異なる亀裂実験を行い、亀裂面を「レーザービーム・光切断法」で形状測定し、測定データを「2次元形状分析」することとした。

前報¹⁾では、既に引張モードと割裂モード下の亀裂面を、亀裂微小面の傾き、深さならびに亀裂面積増加率などの項目を挙げて2次元形状特性分析を行い、両モード下の亀裂面が類似した傾向を示すことが明らかにされた。これに統けて本論文では、より実際の亀裂形成応力状態に近い曲げモードとせん断モードを対象として測定・分析し、1) 引張モードと2) 割裂モード下の結果に3) 曲げモードと4) せん断モード下の結果を加えて、4種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総合的に比較して、若干の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

ここでは、コンクリート亀裂面の形状特性を

*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(正会員)

*4 北海道大学助教授

工学研究科・社会基盤工学専攻 工博(正会員)

調べるための亀裂形成実験の概要について記述する。

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、曲げ、せん断の3モードである。引張モードは、曲げモードと関連して評価されることが多いものの、材料強度の面や応力状態の簡潔さから亀裂形成機構の基本モードに位置付られるものと思われる。

前報¹⁾では、引張を亀裂形成基本モードに据え、さらに一般に引張材料試験に替えて取り扱われている割裂モードをも加えて、この2種のモード下での亀裂面を測定・分析対象とした。

本論文では、上記の応力モードに加えて、RC部材の変形状態として主たるモードである、曲げとせん断下での亀裂面を測定・分析するが、先に触れたように、亀裂面形状特性に関する既往の研究としては、李ら²⁾と三橋ら³⁾の論文がある。前者は割裂モードを、また後者は割裂と曲げの2種のモード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るだけではなく、両者間ではデータの分析手法自体が異なっているため、2つの研究結果を直ちに「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。

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に、曲げとせん断の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一覧を掲げる。この表-1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10体作製した。またその記号の最初の2文字を、曲げ、せん断

の順に、それぞれ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、それぞれ1シリーズとした。尚、この表-1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。

表-2に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ならびに図-2に、それぞれ曲げ、せん断の各応力モード用の試験体形状と載荷方法

表-1 曲げならびにせん断亀裂試験体一覧

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
曲げ	Bn-1~Bn-5	150×200×700	JISA1106 3等分点載荷	加力方向	5
せん断	Sh-1~Sh-5	156×262×700	逆対称 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	30N/mm 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	36.2N/mm ²	2.64N/mm ²

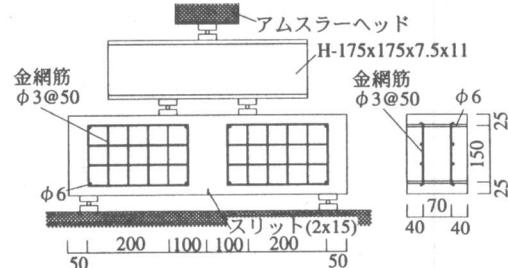


図-1 曲げ試験体の概要

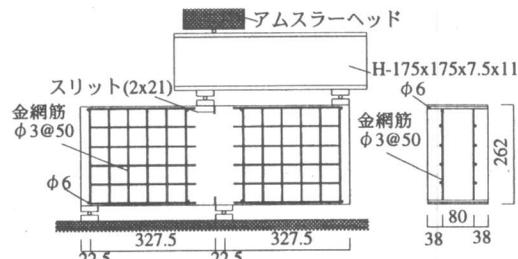


図-2 せん断試験体の概要

を図示するが、以下では、各応力モードごとにその概要を記述する。

a.曲げ試験（図-1）：曲げモード用の試験体は、JISA1106を参考と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、3等分点載荷を行って曲げ亀裂を発生させた。

b.せん断試験（図-2）：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、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、Bazant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点載荷を行った。

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

亀裂面の形状を、目視観察によって亀裂発生・伸展経路を評価して、本実験で形成された亀裂面の全体形状を調べ、各モード下での亀裂面の資料としての有効性の可否を検証する。

図-3と図-4には、それぞれ、曲げとせん断の各応力モード試験体の亀裂側面の典型例のみを対比して掲げた。紙数の制約から他の試験体は省略したが、他の試験体の亀裂状況は、それぞれのモードにおいて、ほぼ同様な亀裂パターンを呈示していた。

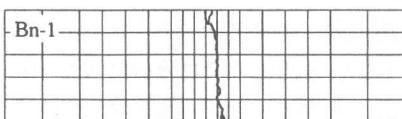


図-3 曲げ試験体の亀裂発生状況

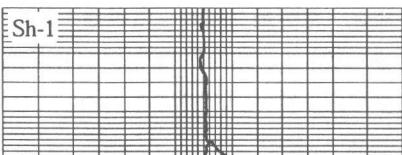


図-4 せん断試験体の亀裂発生状況

曲げとせん断の応力モードの試験体中央部には、亀裂誘発スリットを設け、この位置を想定亀裂ゾーンとしているが、各モードの全ての試験体において、亀裂面の全てはこの想定ゾーンに形成された。これらの結果から、曲げとせん断モード下の亀裂面は、測定・分析資料として十分に有効と判断された。

3.2 亀裂面形状分析

本論文では、まず、曲げモードとせん断モード下で形成された亀裂面の分析結果を各分析項目ごとに図表を用いて論述してゆき、さらに、その各項目の末尾では、前報¹⁾の引張モードと割裂モード下での結果を相互に比較・検証して、応力モードの相違が亀裂面の2次元形状特性に及ぼす影響を総合的に検討する。

3.2.1 測定条件

レーザーピーム・光切断法による亀裂面形状測定は、前報¹⁾で説明済みなので表-4を掲げるに止め、その説明は省く。なお、測定・分析箇所が「亀裂面中央部の58mm×60mmの矩形領域」であることを書き添えておく。

3.2.2 形状分析結果とその考察

本実験で形成された、曲げ亀裂面とせん断亀裂面をレーザーピーム・光切断法で測定し、測定された3次元座標データを、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する。これらの分析関数を以下に示すが、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 の密度分布は、(1)式で算定・評価される。

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

図-5(a)～図-5(b) (図中SIはサンプリング

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

間隔である)に、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を傾斜角に関するヒストグラムの型で示す。各図には、全5体の試験体の分析結果の中から3つの典型的な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。

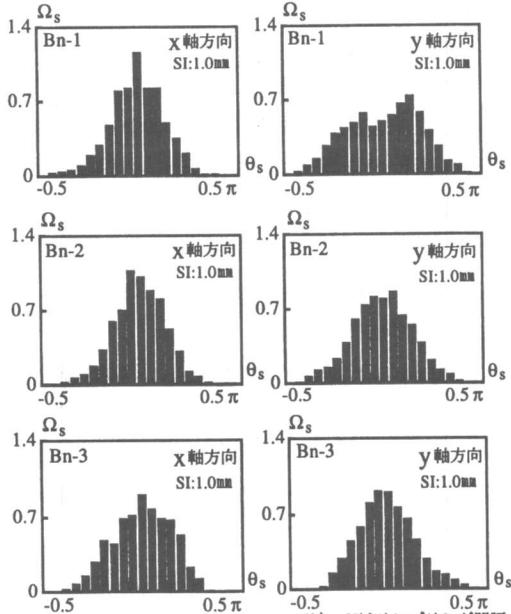


図-5(a) 曲げ亀裂の傾斜密度分析結果

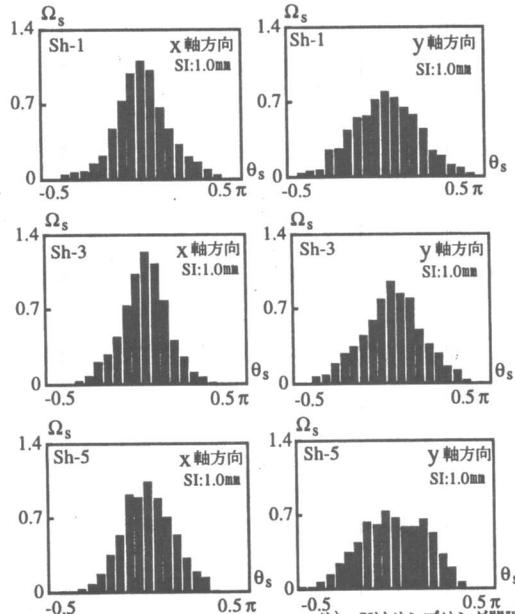


図-5(b) せん断亀裂の傾斜密度分析結果

図-5(a)の曲げ応力モードならびに図-5(b)のせん断応力モード下の亀裂面の傾斜密度分布を見ると、 Ω_s の全体の分布傾向は、x軸ならびにy軸とも「上に凸の山形分布」を呈している。

曲げ試験体Bn-3ならびにせん断試験体Sh-5の亀裂面のx軸とy軸の分布では、密度値に小さな偏差が認められる。これらの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原因は、「曲げならびにせん断応力モードでは、Bazantの指摘するcrack bandが、比較的厚く形成される」ことによると考えられる。しかしながら、このcrack bandの厚さについては、傾斜密度分布の結果のみで結論されず、ほかの分析指標をも合わせて検証する必要があるので、後続の項で再び触れる。

ここで、図-5の曲げモードとせん断モードでの傾斜密度分布と前報¹⁾の引張ならびに割裂モードでの傾斜密度分布の全容を総合すると、「傾斜密度の2次元分布は、応力モードの影響を大きく受けず、対称性に富んだ、上に凸の山形分布である」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

亀裂微小面の無次元化深さ η_s の密度分布は、(2)式で算定される。

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

図-6(a)～図-6(b)に、曲げモードならびにせん断モードにおける深さ密度分布をヒストグラムの形で描画する。あわせて、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示した。表中の項目は、亀裂平均深さ、無次元化平均深さ、亀裂最深値、亀裂最高値ならびに亀裂深さ（亀裂最高値から亀裂最深値を差し引いた値）である。亀裂平均深さは(3)式で、無次元化平均深さは(4)式で求められる。

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

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

まず、曲げモード下での、図-6(a)の亀裂面の深さ密度分布と表-5(a)の深さ分析結果を検討してみる。図-6(a)より、試験体Bn-1は、深さ密度分布に偏差の少ない「上に凸の山形分布」を見せ、一方、試験体Bn-2ならびにBn-3は、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した。また、表-5(a)の曲げ亀裂面の深さ分析結果から、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程度であった。

せん断応力モード下の図-6(b)の亀裂面の深さ密度分布と表-5(b)の深さ分析結果を見る。図-6(b)の深さ密度分布より、試験体Sh-1は山形分布を呈示し、試験体Sh-3ではピークの偏差量が大きく、またSh-5では等分布に近い。せん断モードでは、深さ密度分布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(b)の深さ分析結果にも反映しており、試験体間の差異は比較的大きく、曲げ亀裂と同様な推移となっている。

これまでの限られた検証から、「曲げ応力

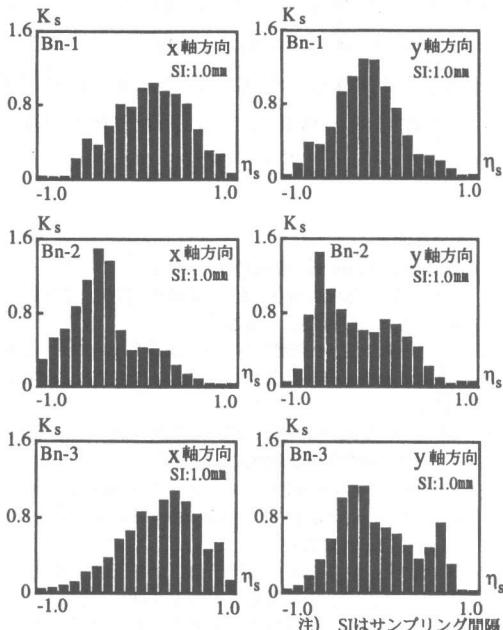


図-6(a) 曲げ亀裂の深さ密度分析結果

モードとせん断応力モード下で形成された亀裂面の2次元形状特性は定性的に類似している」と考えられる。

ここで、曲げモードとせん断モード下での図-6の深さ密度分布と表-5の深さ分析結果一覧と前報¹⁾の引張モードと割裂モードの結果を総合して、応力モードが深さ密度分布ならびに深さ分析結果に及ぼす影響を検証する。

曲げモードとせん断モードの深さ密度分布は、引張モードと割裂モードの場合のような「上に凸となる山形分布」だけではなく、偏差の大きな分布を呈することがあった。また、曲げモードとせん断モード下の平均深さ、亀裂深さそして無次元化平均深さの項目において、前者2項目は引張モードおよ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い。

(3) 「亀裂面積増加率 γ_s 」に関する分析結果と考察

亀裂面の面積は、元の面積よりも増加する。この増加率 γ_s は、(5)式で評価される。

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

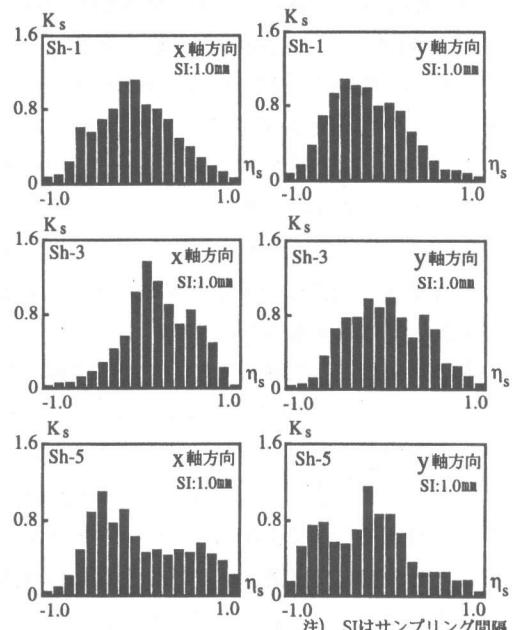


図-6(b) せん断亀裂の深さ密度分析結果

表-5(a) 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^{men} (mm)	2.43	2.01	4.05	2.30	3.38
	亀裂最深値 d_s^{mxm} (mm)	-9.08	-4.94	-16.25	-5.90	-8.05
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	7.01	9.43	9.86	12.96	10.17
	亀裂深さ (mm)	16.09	14.36	26.11	18.86	18.21
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.32	0.42	0.38	0.40	0.37
Y 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	1.49	3.78	3.10	3.27	1.69
	亀裂最深値 d_s^{mxm} (mm)	-4.91	-8.55	-9.05	-7.40	-5.34
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	6.27	13.70	9.55	10.78	4.62
	亀裂深さ (mm)	11.18	22.25	18.60	18.18	9.95
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.29	0.40	0.34	0.38	0.34

表-5(b)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^{men} (mm)	2.14	1.71	1.62	2.10	4.24
	亀裂最深値 d_s^{mxm} (mm)	-6.45	-6.64	-6.86	-10.49	-10.44
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	7.29	7.52	4.82	6.94	10.64
	亀裂深さ (mm)	13.75	14.16	11.68	17.37	21.07
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.32	0.25	0.31	0.32	0.40
Y 軸 方 向	平均深さ d_s^{men} (mm)	2.17	2.08	2.59	2.06	4.08
	亀裂最深値 d_s^{mxm} (mm)	-5.98	-11.70	-8.17	-8.88	-9.54
	亀裂最高値 d_s^{mxh} (mm)	8.53	9.28	8.09	5.91	13.83
	亀裂深さ (mm)	14.51	20.98	16.26	14.78	23.37
	無次元化平均深さ η_s^{men}	0.33	0.24	0.32	0.33	0.38

表-6(a)～表-6(b)に、それぞれ、曲げとせん断応力モードの全試験体に対する亀裂面積増加率 γ_s の一覧を掲げる。

表-6(a)より、曲げモードの各試験体では、 γ_s の値は約1.20～1.28となり値の変動は小さく、その平均値は1.229である。あわせて、せん断モードの表-6(b)を見ると、 γ_s は約1.19～1.24、平均値1.210となり、曲げモードとせん断モード間での差異は小さい。

ここで、曲げモードとせん断モードの γ_s の動向と前報¹⁾の引張モードと割裂モードのそれとを総合して比較することにする。

本研究で設定した4種の応力モードでは、同一応力モードで γ_s 相互の差異は小さく、また引張ー割裂間ならびに曲げーせん断間で、それぞれほぼ同程度の値をとっている。これら γ_s は、引張と割裂モードでおおよそ1.19、曲げとせん断モードで約1.22程度、後者が前者の約2.9%大きな値を示している。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

表-6(a) 曲げモード下の亀裂面積増加率一覧

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

表-6(b)せん断モード下の亀裂面積増加率一覧

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

合、引張や割裂モードのケースよりも、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、前報¹⁾の引張と割裂応力モード下の亀裂面と曲げモードとせん断モード下の亀裂面の2次元形状特性の推移を検証し、応力モードの相違が、亀裂面の形状特性に与える影響を総合的に比較した。得られた結果を要約し列挙すると以下のようになる。

- 1) 傾斜密度分布は、応力モードの影響を受けず、傾斜角零に関して対称な上に凸となる。
- 2) 深さ密度分布は、全般的に、一つの密度ピーク値を有する上に凸なるが、曲げとせん断モードでは分布偏差が大きい場合がある。
- 3) 引張と割裂応力モード下のcrack bandの厚さは、曲げモードとせん断モードよりも薄い。
- 4) 引張と割裂亀裂面の形状特性は類似し、曲げとせん断の亀裂形状は、ほぼ同傾向を示す。

現在、コンクリート亀裂面の2次元形状分析よりも理想的と考えられる3次元形状分析を行っており、その結果は後日報告する。

参考文献

- 1) 石川千温・和田俊良・佐藤龍司・上田正生：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、コンクリート工学年次大会論文集、Vol.20,1998.6
- 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.Pfeiffer : Shear fracture tests of Concrete,Materiaux et Constructions,vol.19-N° 110,pp.111~pp.121
- 5) 和田俊良・佐藤龍司・石川千温・上田正生：レーザ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