

ひび割れデータを用いたRC部材の損傷度評価に関する実験的研究

滝本 和志 石井 清
(技術研究所) (技術研究所)

Using Crack Data to Evaluate Damage to RC Beams

by Kazushi Takimoto and Kiyoshi Ishi

Abstract

A crack data acquisition system incorporating a CCD camera has been developed. This system permits detailed measurements of diagonal and flexural cracks in reinforced concrete beams. Crack width and crack angle distributions, total crack length, and average crack width and crack area were calculated from the detailed crack data obtained using the system. The relationship between the crack data and the degree of damage in concrete beams was also investigated. It was found that crack density is a suitable damage index for concrete structures.

概 要

CCDカメラを搭載した画像計測処理装置を用いて、鉄筋コンクリートはりのせん断ひび割れおよび曲げひび割れの詳細な計測を行った。得られたひび割れデータからひび割れ幅と角度の分布、ひび割れの総延長、ひび割れ平均幅、ひび割れ面積等を求め、ひび割れデータと鉄筋コンクリートはりの損傷程度の検討を行った。その結果、ひび割れ幅とひび割れ長さを含めた総合的な評価が有効であることが明らかとなった。

§ 1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、施工に起因する初期欠陥や、地震等による損傷、施工後の経時変化にもなって進行する劣化等、様々な原因が考えられる。ひび割れは、構造物の耐荷性能や耐久性能の低下、または低下の予兆を示す危険信号になることから、詳細で定量的なひび割れ情報を得ることができれば、地震後の損傷度の判定や劣化診断において、重要な判断材料として利用することができる。

トンネルコンクリートの剥落事故等を契機として、コンクリート構造物の維持管理の重要性が叫ばれる中、コンピュータやデジタルカメラ等の計測機器の急激な性能の向上にともない、デジタル画像を用いて実構造物のひび割れ調査を実施する例^{1) 2)}が増えてきている。現状では省力化やデータベース化を目指して目視調査の代替としてデジタル画像を利用することが主流となっている。

一方、鉄筋コンクリート(RC)部材の構造実験におけるひび割れ計測は、作用荷重の増加にともなう破壊過程の進展度合いや耐荷力機構を知るうえで重

要な計測と位置づけられているが、計測方法は、載荷ステップごとにひび割れの進展をマーキングし、それをスケッチしたり写真撮影しているのが現状であった。しかし、この分野でも、ひび割れ情報をデジタル値として捉えて、定量的に評価しようとする研究^{3) 4)}が行われるようになってきた。

本研究は、ひび割れデータによるコンクリート構造物の損傷度評価方法の確立という目標に向けて、CCDカメラを搭載した画像計測処理装置を用いてRCはりに発生しているせん断ひび割れおよび曲げひび割れの詳細な計測を行った。ここで得られたひび割れデータより、ひび割れ幅、ひび割れ角度、ひび割れ長さ、ひび割れ面積等を求めて、RCはりの損傷程度との関係について検討した。

§ 2. 実験概要

一般的な構造部材であるはりに着目し、破壊形式として曲げせん断(Sシリーズ)と曲げ(Mシリーズ)の2種類、載荷方法として単調載荷と同一変位2サイクルの一方方向繰り返し載荷の2種類をそれぞれ実

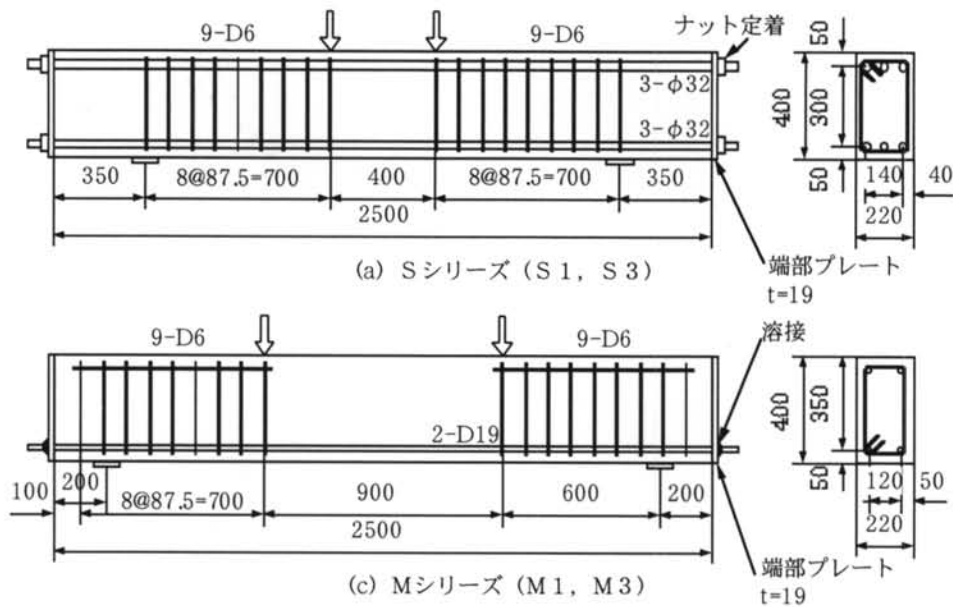


図-1 試験体の形状寸法と配筋

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷方法	試験体寸法						鉄筋					
		底面かぶり	有効高さ	せん断スパン	せん断スパン比	試験体の高さ	試験体の幅	試験体の長さ	主鉄筋	主鉄筋比	せん断補強筋	せん断補強筋比	せん断補強筋間隔
		mm	mm	mm		mm	mm	mm		%		%	mm
S1	単調	34	350	700	2	400	220	2500	φ32*1	3.13	D6	0.33	87.5
S2	単調	34	350	700	2	400	220	2500	φ32*1	3.13	2-D6*2	0.33	175
S3	繰返	34	350	700	2	400	220	2500	φ32*1	3.13	D6	0.33	87.5
M1	単調	40	350	600	1.7	400	220	2500	D19	0.74	D6	0.33	87.5
M2	単調	90	350	600	1.7	450	220	2500	D19	0.74	D6	0.33	87.5
M3	繰返	40	350	600	1.7	400	220	2500	D19	0.74	D6	0.33	87.5

*1: PC鋼棒を使用 *2: 2組束ねて配置

表-2 コンクリート材料試験結果

試験シリーズ	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
Sシリーズ	29.3	2.93	29.4	0.19
Mシリーズ	29.9	2.93	28.5	0.19

表-3 鋼材引張試験結果

鉄筋種類	降伏点 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	伸び (%)
D6	356	476	177	-
D19	367	517	210	23.2
φ32	1056	1139	210	14.4

D6 鉄筋は、標点外で破断したため伸びデータなし

験要因とした。さらに、Sシリーズについては、せん断補強鉄筋の配置間隔を、Mシリーズについては、主鉄筋のかぶり厚さを実験要因に加えた。試験体の一覧を表-1に、形状寸法と配筋を図-1に示す。また、本実験で使用したコンクリートの材料試験結果を表-2に、鋼材の引張試験結果を表-3に示す。

Sシリーズ試験体は荷重制御で、Mシリーズ試験体は主鉄筋降伏時の変位を基準とした変位制御でそれぞれ載荷した。M1試験体およびS3試験体の加力サイクルとひび割れ計測点を図-2に示す。繰り返し載荷は同一変位2サイクルずつの繰返しとし、荷重0(残留変位)時の計測も実施した。表-4に各試験体のひび割れ計測ステップ、計測時の荷重、ひび割れ長さ総延長(3章参照)を示す。Sシリーズにつ

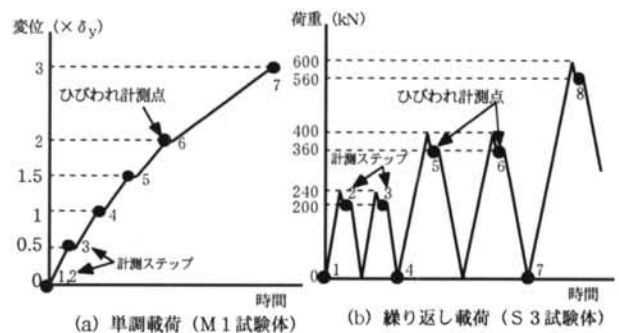
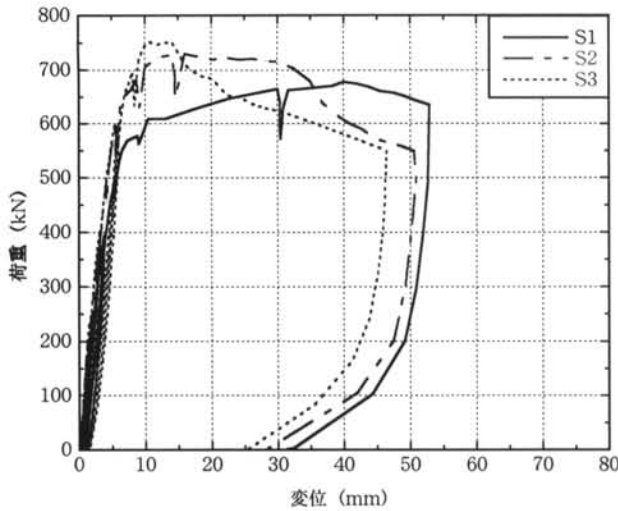
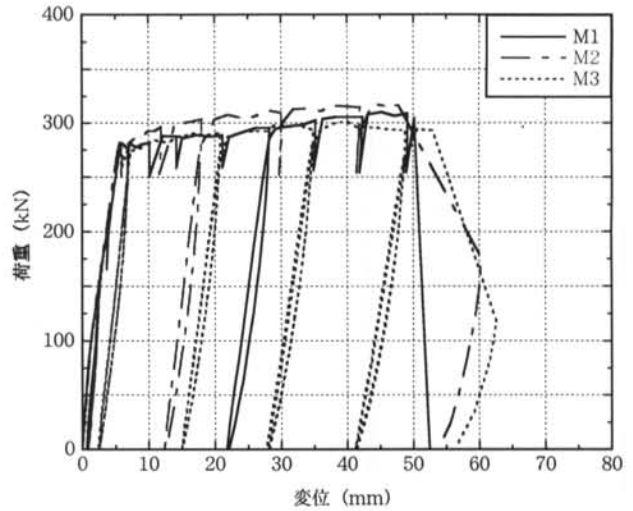


図-2 加力サイクルとひび割れ計測点

いては経験最大荷重を、Mシリーズについては塑性率および経験最大変位をあわせて示す。M1およびM3試験体の降伏変位は7mm、M2試験体の降伏変位は6mmであった。経験最大荷重(変位)は、ひび割れ計測時まで経験した荷重(変位)の最大値である。ひび割れ計測中に新しいひび割れの進展や幅が起



(a) Sシリーズ



(b) Mシリーズ

図-3 荷重-変位関係

表-4 ひび割れ計測ステップ
(a) Sシリーズ

試験体名	S1試験体			S2試験体			S3試験体		
	計測時荷重 (kN)	経験最大荷重 (kN)	ひび割れ長さ総延長 (mm)	計測時荷重 (kN)	経験最大荷重 (kN)	ひび割れ長さ総延長 (mm)	計測時荷重 (kN)	経験最大荷重 (kN)	ひび割れ長さ総延長 (mm)
1	0	0	-	0	0	-	0	0	-
2	160	200	518	200	240	504	200	240	494
3	260	300	887	360	400	1924	200	240	775
4	360	400	1180	460	500	2597	0	240	197
5	0	400	1635	560	600	3736	360	400	2248
6	460	500	1194	660	700	6206	360	400	2416
7	560	600	2226	660	740	8181	0	400	975
8	600	700	4522	0	740	6804	560	600	5002
9	0	700	-	-	-	-	560	600	5511
10	-	-	-	-	-	-	0	600	4010
11	-	-	-	-	-	-	660	700	6489
12	-	-	-	-	-	-	0	700	8174

(b) Mシリーズ

試験体名	M1試験体				M2試験体				M3試験体			
	計測時荷重 (kN)	慣性率 ($\times \phi$)	経験最大変位 (mm)	ひび割れ長さ総延長 (mm)	計測時荷重 (kN)	慣性率 ($\times \phi$)	経験最大変位 (mm)	ひび割れ長さ総延長 (mm)	計測時荷重 (kN)	慣性率 ($\times \phi$)	経験最大変位 (mm)	ひび割れ長さ総延長 (mm)
1	0	0	0	-	0	0	0	-	0	0	0	-
2	120	0	2	598	120	0	2	655	120	0	2	503
3	160	0.5	4	864	250	1	6	1287	250	1	7	1465
4	250	1	7	1561	250	2	12	1896	250	1	7	1536
5	250	1.5	10	1877	250	3	18	2621	0	1	7	478
6	250	2	14	2276	0	3	18	2750	250	3	21	2272
7	250	3	21	2721	250	5	30	4581	250	3	21	2390
8	250	4	28	2745	250	7	42	4779	0	3	21	2495
9	0	4	28	2885	0	9	54	5850	250	5	35	2797
10	250	5	35	3416	-	-	-	-	250	5	35	2525
11	250	6	42	3776	-	-	-	-	0	5	35	2731
12	250	7	49	2819	-	-	-	-	250	7	49	2841
13	0	8.4	59	4461	-	-	-	-	260	7	49	2218
14	-	-	-	-	-	-	-	-	0	7	49	2806
15	-	-	-	-	-	-	-	-	0	8.1	67	4228

☐ : かぶりコンクリート剥落後の計測ステップ
S1試験体のステップ9は、損傷が大きくひび割れ計測中止

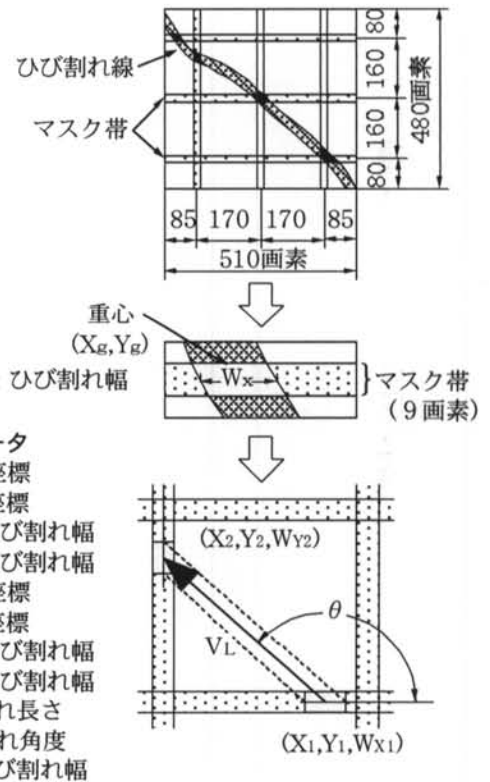


図-4 ひび割れデータ処理のイメージ

こらないよう、載荷荷重を少し下げた状態でひび割れ計測を実施した。

Sシリーズ試験体は、斜めひび割れが進展し、せん断補強鉄筋が破断して破壊に至る斜め引張破壊であったが、1箇所破断した時点で載荷を終了したため、大きな荷重低下は見られない。Mシリーズ試験体は、引張鉄筋が降伏し、圧縮縁のコンクリートが圧壊

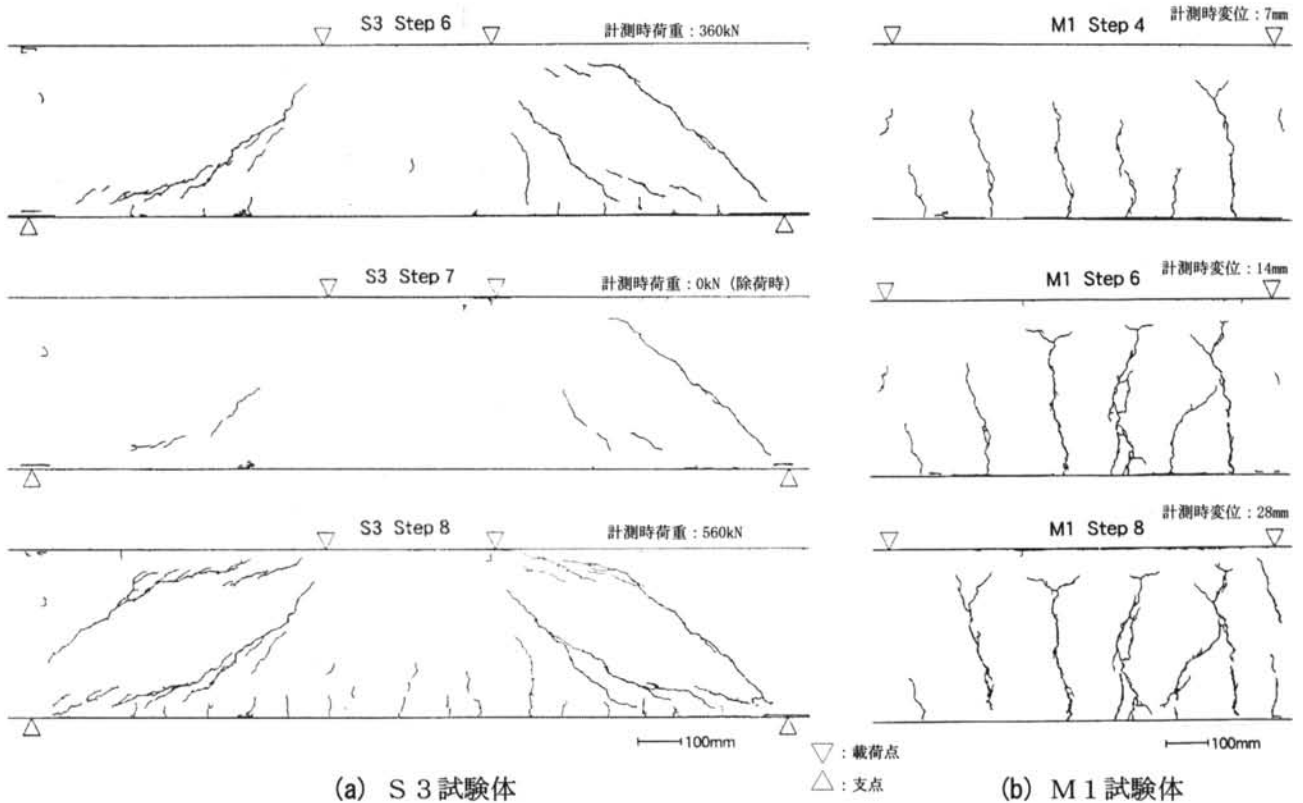


図-5 ひび割れ図

して破壊に至る曲げ引張破壊であった。破壊後に、除荷して残留変位状態でひび割れ計測を実施した。荷重-変位関係を図-3に示す。Mシリーズでは、かぶりが多いM2試験体の荷重が若干高くなっているが、3体ともにほぼ同じ挙動を示している。Sシリーズでは、S1試験体のせん断ひび割れ発生荷重が約200kNと他の試験体(約240kN)に比べて2割ほど低く、最大荷重時の変位が大きくなっている。また、他の2体では観察された純曲げ区間における曲げひび割れの発生が、最終状態においても観察されなかった。このため、S1試験体においては、純曲げ区間における主鉄筋の付着に問題があった可能性が考えられる。今回の実験では、同一変位2サイクルと繰り返し回数が少なかったため、両シリーズともに荷重-変位関係に及ぼす繰り返し荷重の影響は見られなかった。そこで、以後のひび割れデータの整理においては、S3試験体とM1試験体の結果を中心にまとめることとする。

§ 3. ひび割れ計測処理方法

詳細なひび割れデータの計測と定量的な解析を実施するために、CCDカメラを用いた画像計測処理システム^{5) 6)}を開発した。計測装置は、4台のCCD

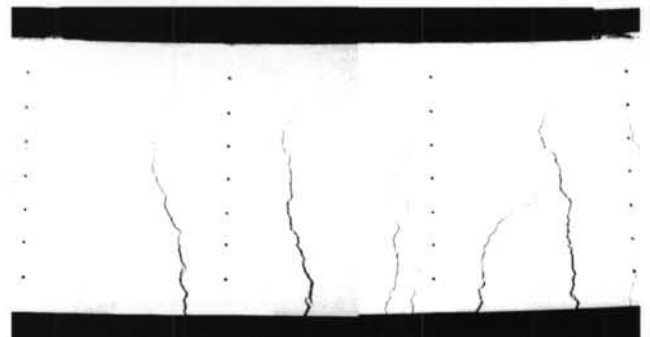


写真-1 ひび割れ状況 (M1-Step 8)

カメラを台車にセットして、自動的に移動し画像計測するシステムとした。読み取り最小値は0.02mm(1画素の辺長)を標準としてカメラを測定面に対してセットし計測を行った。模擬ひび割れ線の計測の結果、ひび割れ幅の計測精度は±0.06mm(3画素)であった。このように非常に詳細なひび割れ計測データをすべて記録するには膨大な記憶容量が必要となるため、以下に示す処理により、データ量の圧縮やノイズ処理等を行った。

まず、ひび割れ計測時に行う1次処理として計測した全画像データのうち、約3mm間隔のマスク帯上にあるひび割れデータのみを2値化処理(白黒分離)し、ひび割れデータとして抽出した。ひび割れデータ圧縮処理(1次処理)のイメージ図を図-4に示す。

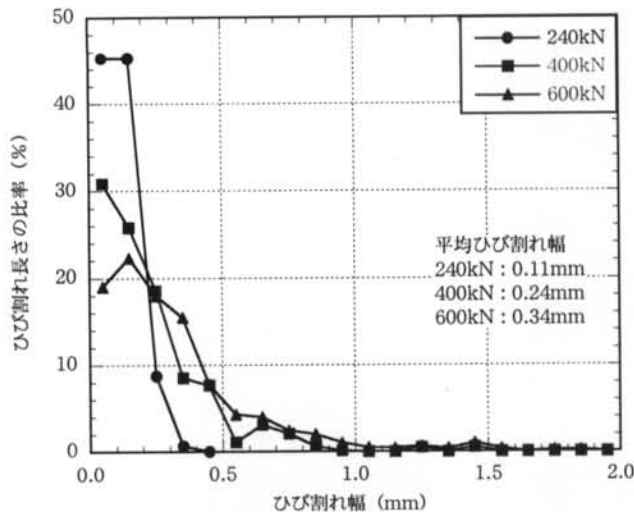


図-6 ひび割れ幅の分布 (S3 試験体)

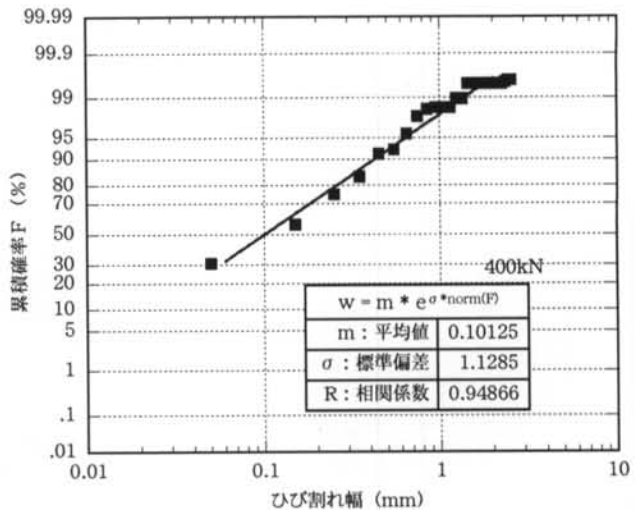


図-7 対数正規確率分布への適合度 (S3 試験体)

マスク帯とは、データ圧縮のために設定した格子状の仮想線である。マスク帯の幅は0.18mm (9画素)とし、マスク帯上の黒色部分の面積と重心を計算し、重心データ群から近接する2点の重心を結ぶ線分を1次処理データとして求めた。ひび割れの分岐・交差の判断は、あらかじめ定義したひび割れ線連結情報に基づいて行った。1次処理によって作成されたひび割れデータは、始点と終点の中心座標とひび割れ幅、2点から求まるひび割れ長さ、ひび割れ角度および平均ひび割れ幅のデータ(図-4参照)から構成される。ここまでの処理は、ひび割れ計測と同時に計測装置上で実施して、圧縮処理したデータを記録した。なお、ひび割れ幅がマスク帯の間隔を超える3mm以上の太いひび割れに関しては、ひび割れ連結のアルゴリズムが異なることから、太幅データとして別ファイルに記録した。

次に2次処理では、細幅データと太幅データそれぞれに対して、データ同士のつながりをチェックして、つながりごとにグループ化した。ここで、他のひび割れデータとつながらない孤立したデータはノイズとして除去した。そして、それぞれ別途処理した細幅と太幅のひび割れデータを計測範囲全体にわたって重ね合わせて、計測ステップごとにひとつのファイルにまとめた。図-5に示すひび割れ図は、この2次処理データを用いて描いたものである。

§ 4. ひび割れの進展状況

図-5にS3試験体およびM1試験体のひび割れ図を示す。荷重の増加にともない試験体に変形して

いるが、試験体寸法に比べて変形量が小さいために、試験体の上縁と下縁は直線で表示した。各ステップのひび割れ図を比較することで、ひび割れの進展状況を把握することができる。また、残留変位時に測定した場合や新しいひび割れが発生した場合には、一度開いたひび割れが閉じて、ひび割れと認識しない場合が見られた。S3試験体のステップ7は残留変位時のひび割れ計測結果であるが、ステップ6で発生しているひび割れが消えているのがわかる。マーキングやスケッチによるひび割れ計測では、新しく計測されたひび割れが追加されるだけであるのに対して、本システムでは計測時点のひび割れ状況を正確に記録することができる。写真-1にM1試験体のステップ8(4δ_y) 載荷時のひび割れ状況を示す。試験体表面の黒丸は、変位計測用に貼り付けたものである。実際に目で見たとひび割れ状況に比べると、ひび割れ図の方が細かいひび割れが強調される傾向にあるが、全体的な特徴を十分に捉えたひび割れ図が得られており、この2次処理データを基にRC部材の損傷程度との関係の検討を行うこととする。

§ 5. ひび割れデータによる損傷度評価

ひび割れデータを用いてRC部材の損傷度を適切に表現できる損傷度指標の構築を目指して、ひび割れ幅と角度の分布状態の把握、ひび割れ数量化表示法によるひび割れ性状の評価、ひび割れの総延長や総面積等のひび割れ諸量と部材の損傷度との関係について検討を行った。

かぶりコンクリートが剥落する状態になると、ひ

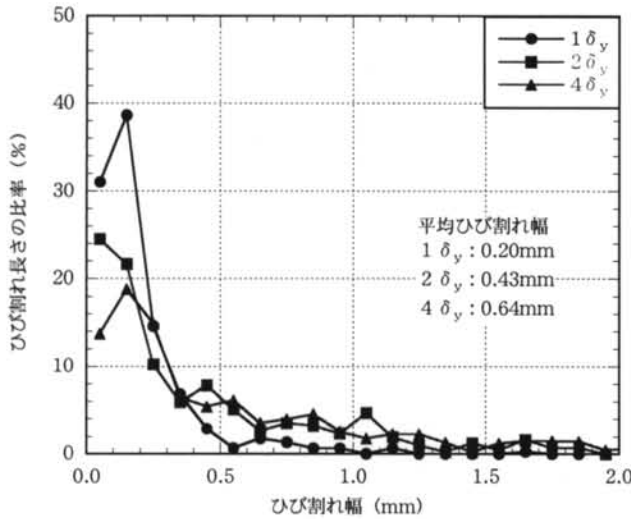


図-8 ひび割れ幅の分布 (M1 試験体)

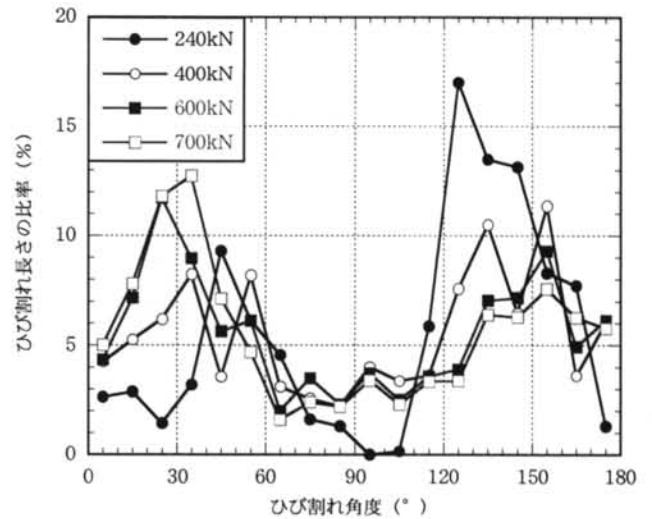


図-10 ひび割れ角度の分布 (S3 試験体)

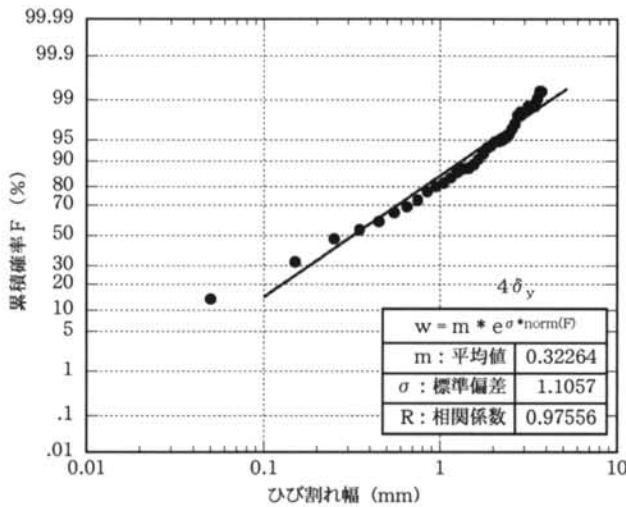


図-9 対数正規確率分布への適合度 (M1 試験体)

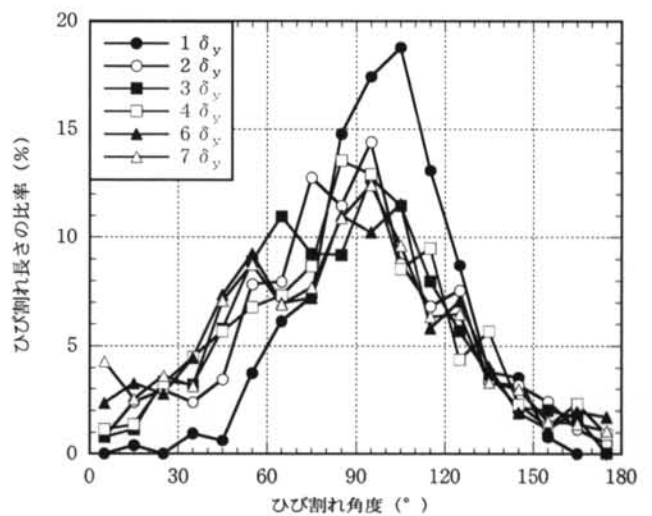


図-11 ひび割れ角度の分布 (M1 試験体)

び割れ幅やひび割れ角度、ひび割れ長さ等のひび割れデータの詳細な計測が困難になり、剥落前のひび割れデータとの連続性を保てなくなることから、ひび割れデータによる損傷度評価においては、かぶりコンクリートの剥落を限界値とする。

なお、残留変位時の計測結果も含めて、Sシリーズでは経験最大荷重を、Mシリーズでは経験最大変位を、それぞれの部材の損傷度を表す代表値として検討を行った。また、Sシリーズは支点間 (1800mm)、Mシリーズは載荷点間 (900mm) の長方形領域内のひび割れデータを評価対象としたが、試験体の変形に応じて対象範囲を20mm程度狭めてデータ処理を行った。

5.1 ひび割れ幅と角度の分布

図-6にS3試験体のひび割れ幅の分布を示す。図中の荷重値は、ひび割れ計測を実施した各ステップにおける経験最大荷重である。横軸のひび割れ幅

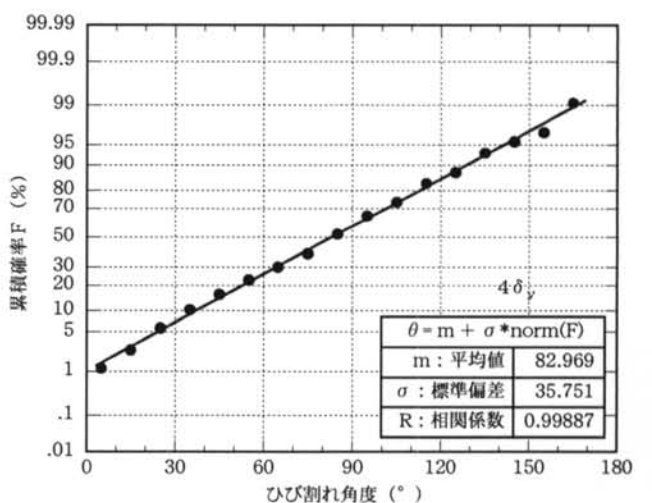
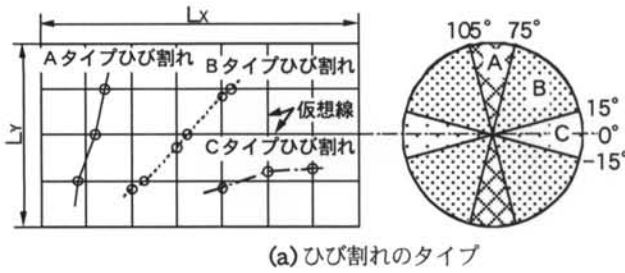


図-12 正規確率分布への適合度 (M1 試験体)

は0.1mm間隔でクラス分けし、縦軸は各計測ステップにおけるひび割れ長さの総延長をそれぞれ100とした場合の比率で示してある。240kN 載荷時には、0.1mm



(a) ひび割れのタイプ

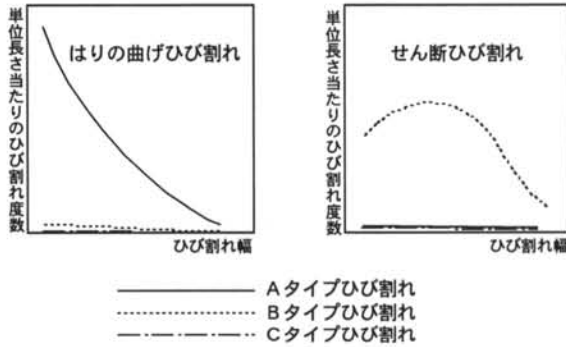
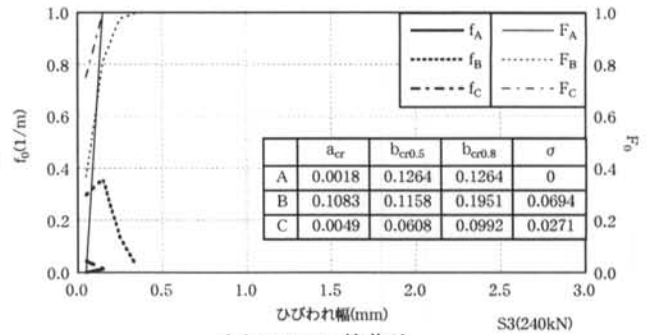


図-13 ひび割れ数量化表示法

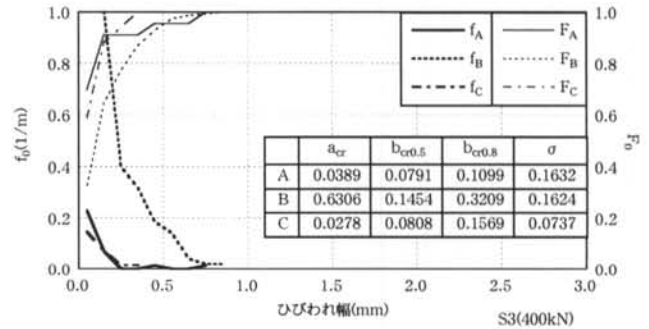
幅のひび割れが50%近くを占めていたのに対して、600kN 載荷時には、20%程度に低下して、0.3mm を越えるひび割れが増加している。図-7は、ひび割れ幅の対数正規確率分布への適合度(400kN 載荷時)を示す。図より、ほぼ対数正規分布に従うものと判断できる。

図-8にM1試験体のひび割れ幅の分布を、図-9に対数正規確率分布への適合度(4 δ_y 載荷時)を示す。S3試験体に比べると0.5mm以上のひび割れ幅の比率は小さく、0.2mm以下のひび割れの占める割合が高くなっている。曲げひび割れ幅の分布も対数正規分布に従うものと判断できる。

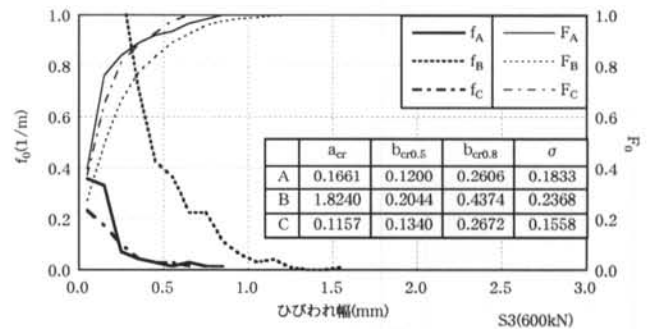
図-10、11はS3試験体およびM1試験体のひび割れ角度の分布を示したものである。水平方向となす角度をひび割れ角度($0^\circ \leq \theta \leq 180^\circ$)とした。横軸のひび割れ角度は 10° 間隔でクラス分けし、縦軸はひび割れ幅分布と同様に各クラスのひび割れ長さの累計の総延長に対する比率とした。Sシリーズの場合、試験体の左スパンには約 30° のせん断ひび割れが、右スパンには約 150° のせん断ひび割れが発生していることから、2つのピークが現れる結果となっている。M1試験体の場合、1 δ_y 載荷時の分布形状が少し異なっているが、 90° 付近にピークを持つ左右対称の分布形状を示している。図-12にM1試験体の4 δ_y 載荷時のひび割れ角度の正規確率分布への適合度を示す。Mシリーズの場合、他の計測データにおいても相関係数は0.99以上と高く、曲げ



(a) 240kN 載荷時



(b) 400kN 載荷時



(c) 600kN 載荷時

図-14 ひび割れ性状曲線 (S3試験体)

ひび割れの角度は正規分布に従うものと判断できる。

5.2 ひび割れ数量化表示法による評価

ここでは、実際の建築構造物の劣化調査の一手法として提案されたひび割れ数量化表示法⁷⁾を用いて、ひび割れ性状の評価を試みる。ひび割れ数量化表示法は、図-13に示すように、ひび割れ測定面の辺長を L_x 、 L_y とし、これをそれぞれ n_x 、 n_y 等分した格子状の仮想線を描き、仮想線を横切る位置でのひび割れ幅と度数を求め、ひび割れの角度によって3つのタイプに分類し、その結果を累積度数曲線(ひび割れ性状曲線)として処理することで、ひび割れの量と形状を数量化する方法である。ひび割れ角度による分類とは、Aタイプ: 水平方向となす角 θ が $\pm 75^\circ \sim 105^\circ$ をなす縦ひび割れ、Bタイプ: 同 θ が $\pm 15^\circ \sim 75^\circ$ をなす斜めひび割れ、Cタイプ: 同 θ が $\pm 0^\circ \sim 15^\circ$ をなす横ひび割れ、の3タイプである。ひび割れ性状

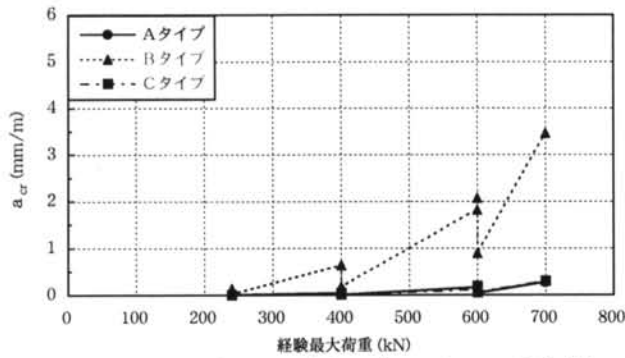


図-15 ひび割れ面積率の変化 (S3試験体)

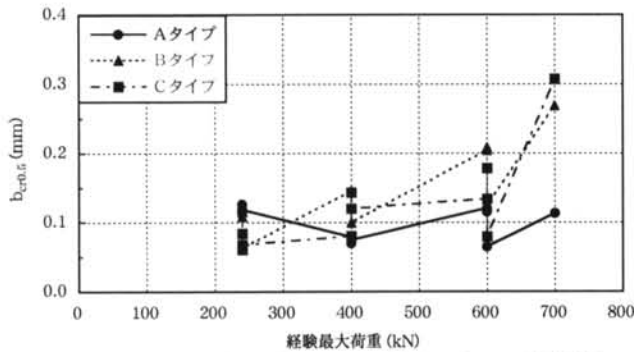
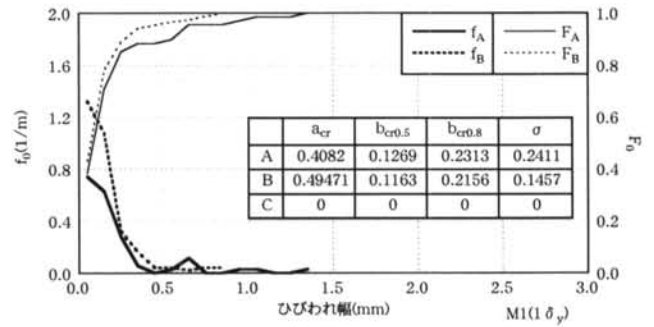


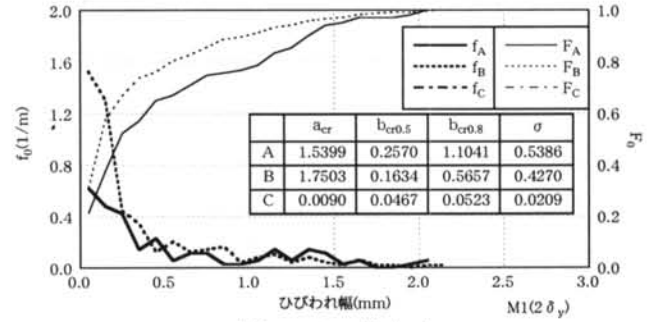
図-16 ひび割れ幅 $b_{cr0.5}$ の変化 (S3試験体)

曲線の横軸は、仮想線を横切る点でのひび割れ幅 b_{cr} であり、タイプごとに仮想線の総長さで除した単位長さ当たりのひび割れ度数 (f_0) 曲線と累積度数 (F_0) 曲線を描いている。A、Cタイプについては、それぞれX、Y方向の仮想線を横切る度数 f_A 、 f_C を求め、仮想線の総長さは $L_x (n_y + 1)$ 、 $L_y (n_x + 1)$ としているが、Bタイプについては、XY両軸に交わる度数をすべて度数 f_B として数え、仮想線の長さは、ひび割れの方向がXY軸に対してすべて 45° であると仮定した時の等価長さ $\{L_x (n_y + 1) + L_y (n_x + 1)\} / \sqrt{2}$ を用いている。さらに、ひび割れ量を数量的に比較するために、ひび割れ面積率 $a_{cr} = \sum b_{cr} \times f / \sum L$ 、ひび割れ累積度数曲線の中央値のひび割れ幅 $b_{cr0.5}$ 、8割値のひび割れ幅 $b_{cr0.8}$ 、標準偏差 σ を図中に併記することとしている。ひび割れ面積率は、仮想線間のひび割れ幅が一定であると仮定した場合に、計測面積に対するひび割れ面積の割合となる。

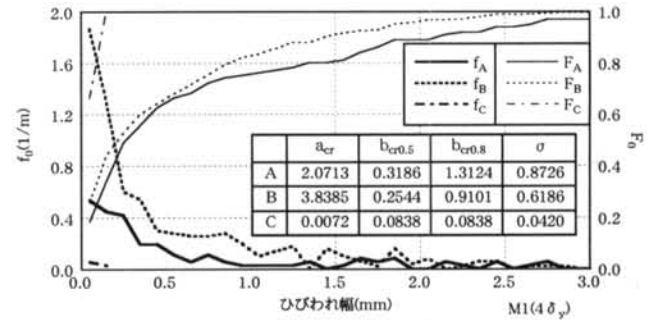
目視調査結果から、どの方向のひび割れが多いか、どのくらいのひび割れ幅が多いかについては、A、B、Cタイプのどの曲線が上にあるか、またどこにピークがあるかにより判別し、全体的なひび割れの多少はひび割れ面積率 a_{cr} により、太いひび割れが多いか、細かいひび割れが多いかについては $b_{cr0.5}$ 、 $b_{cr0.8}$ の値により判別できるとしている。また、曲げひび割れは、引張縁でひび割れ幅が広く中立軸に向かって幅が狭くなるので、Aタイプの縦ひび割れが支配的



(a) $1 \delta_y$ 荷荷時



(b) $2 \delta_y$ 荷荷時



(c) $4 \delta_y$ 荷荷時

図-17 ひび割れ性状曲線 (M1試験体)

で、度数曲線が双曲線状を示すのに対して、せん断ひび割れは、比較的同じ幅を持ち、Bタイプのひび割れが支配的で、度数曲線の中間にピークを生じることが多いとしている。

ここでは、仮想線間隔を10mmとして、2次処理データに対してひび割れ数量化表示法による処理を行った。なお、自動処理するために、ひび割れ角度はひび割れデータの持つ角度をそのまま使用した。

図-14にS3試験体のひび割れ性状曲線を示す。ひび割れ幅は0.1mm間隔でクラス分けした。太線がタイプごとのひび割れ度数曲線を、細線が累積度数曲線を示す。ひび割れ度数曲線およびひび割れ面積率より、Bタイプのひび割れが支配的で、斜めひび割れが卓越するせん断ひび割れの特徴を示していることがわかる。ただし、累積度数曲線においては、タイプごとの相違は見られない。図-15に経験最大荷重

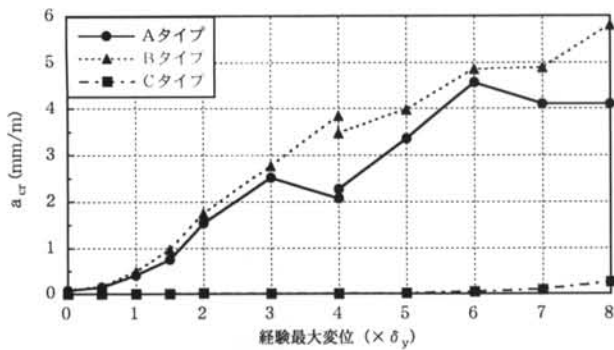


図-18 ひび割れ面積率の変化 (M1 試験体)

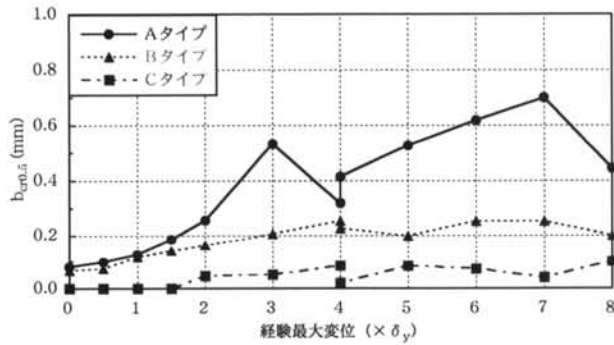
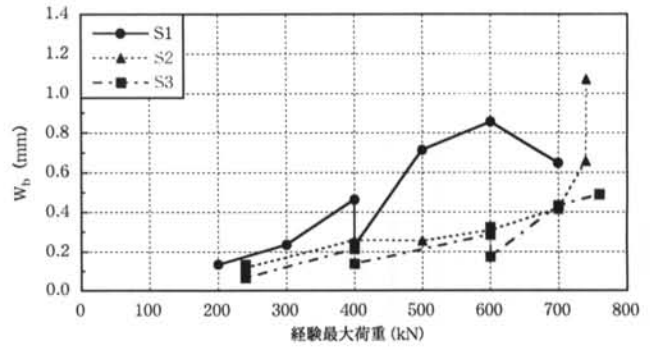
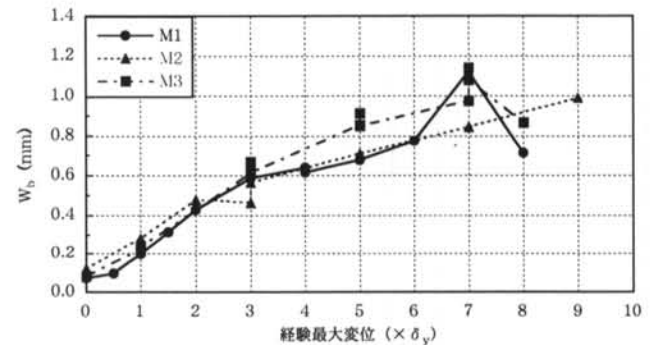


図-19 ひび割れ幅 $b_{cr0.5}$ の変化 (M1 試験体)



(a) Sシリーズ



(b) Mシリーズ

図-20 ひび割れ幅平均値の変化

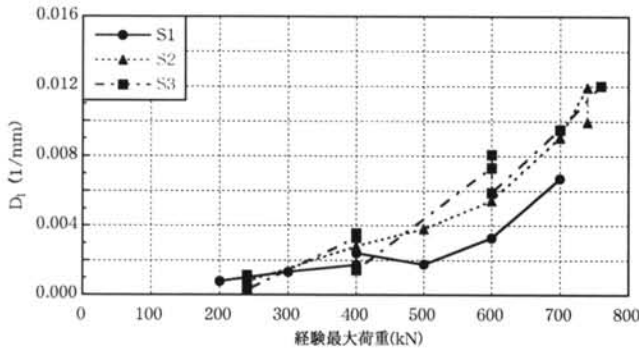
に対するひび割れ面積率 a_{cr} の変化を、図-16 にひび割れ幅 $b_{cr0.5}$ の変化を示す。荷重の増加にともない、Bタイプのひび割れ面積率は急激に増加している。経験最大荷重600kNのところでは大きく低下しているのは、残留変位状態で計測したためである。AタイプおよびCタイプのひび割れ面積率はBタイプの10%程度である。ひび割れ幅は600kNまではほぼ一定で、ほとんど度数がないCタイプの値が最も大きくなっている箇所も見られる。

図-17にM1試験体のひび割れ性状曲線を示す。S3試験体に比べるとAタイプのひび割れ度数は増加しているが、AタイプよりもBタイプのひび割れ度数の方が多くなっており、図-13に示すような曲げひび割れの特徴を示していない。これは、ひび割れ数量化表示法がひび割れ角度の分類を人間の目で判断することを想定しており、仮想線間隔も20cmを基準にしているのに対して、今回は10mm間隔という非常に狭い間隔で測定して、仮想線と交差するひび割れの角度をそのまま使用していることが原因と考えられる。すなわち、1本のひび割れとして見るとほぼ90°のひび割れであっても、3mm程度に細かく区切って見ると、ジグザグに進展しているためである。また、図-13(a)右図に示すようにA、Cタイプの角度領域が、それぞれ全体の1/6であるのに対して、Bタイプの範囲は全体の2/3を占めていることも一因と考えられる。図-11のM1試験体のひ

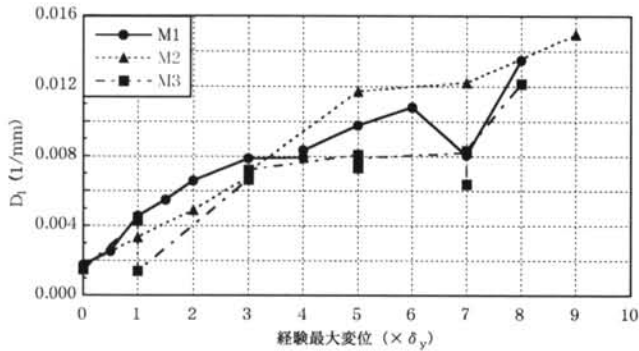
び割れ角度分布より、全ステップについて各タイプの比率を求めると、Aタイプ36%、Bタイプ60%、Cタイプ4%と、Bタイプのひび割れが全体の2/3を占める結果となっている。

図-18、19に経験最大変位に対するひび割れ面積率およびひび割れ幅の変化を示す。Aタイプの場合、ひび割れ面積率、ひび割れ幅ともに一部減少しているところが見られるが、変位の増加にともなってどちらの値も増加している。Bタイプの場合、3δ_y以降ひび割れ幅はほとんど増加していないにもかかわらず、ひび割れ面積率はAタイプよりも大きくなっている。このことより、Aタイプはひび割れ幅の拡幅によりひび割れ面積率が増加しているのに対して、Bタイプはひび割れ度数が増加することでひび割れ面積率が増加していることがわかる。

ひび割れデータに対して数量化表示法を用いて、ひび割れ性状の評価を試みた結果、せん断ひび割れの特徴はよく捉えることができたが、曲げひび割れについては、図-13(b)の左図に示すようなAタイプのひび割れが支配的な特徴とは異なり、AタイプよりもBタイプのひび割れ度数が多いという結果を示した。詳細な計測データをそのまま使うのではなく、全体的な特徴を捉えることができるように加工したり、角度分類の方法を検討する必要がある。

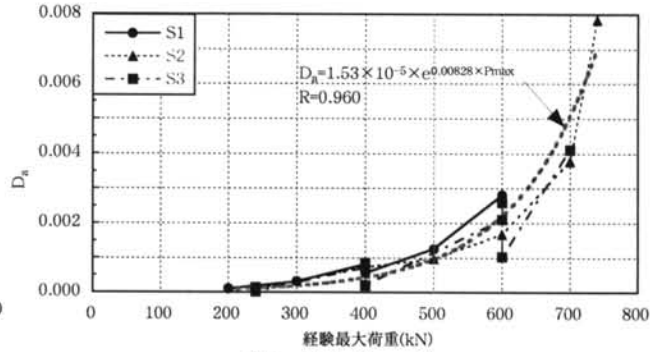


(a) Sシリーズ

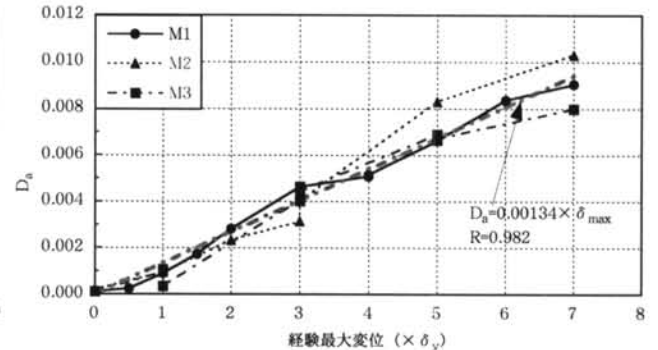


(b) Mシリーズ

図-21 ひび割れ線密度の変化



(a) Sシリーズ



(b) Mシリーズ

図-22 ひび割れ面積密度の変化

表-5 かぶりコンクリート剥落前のひび割れ諸量

試験体名	ひび割れ計測時 変位 (mm)	ひび割れ幅平均値 (mm)	ひび割れ線密度 (l/mm)	ひび割れ面積密度
S 1 試験体	30.5	0.855	0.00329	0.00281
S 2 試験体	36.8	0.657	0.01193	0.00784
S 3 試験体	8.3	0.432	0.00951	0.00411
Sシリーズ 平均	25.2	0.648	0.00824	0.00492
M 1 試験体	49.0	1.122	0.00806	0.00905
M 2 試験体	41.4	0.844	0.01221	0.01031
M 3 試験体	48.5	0.974	0.00822	0.00805
Mシリーズ 平均	46.3	0.980	0.00950	0.00912

5.3 ひび割れ諸量による評価

ひび割れ計測によって得られたひび割れデータより、ステップごとのひび割れ幅、ひび割れ長さおよびひび割れ面積に関する諸量を求め、部材の損傷度との関係について検討を行う。

$$\text{ひび割れ幅平均値 } W_b = A_{cr} / L_d$$

$$\text{ひび割れ線密度 } D_l = L_d / (B \times H)$$

$$\text{ひび割れ面積密度 } D_a = A_{cr} / (B \times H)$$

ここに、B：ひび割れデータ処理領域の水平長さ

H：ひび割れデータ処理領域の鉛直長さ

L_d ：ひび割れ長さの累計

$$\{ = \Sigma (\text{ひび割れ長さ}) \}$$

A_{cr} ：ひび割れ面積

$$\{ = \Sigma (\text{ひび割れ長さ} \times \text{ひび割れ幅}) \}$$

ひび割れデータ処理領域の水平長さBは、Sシリーズの場合1780mm、Mシリーズの場合900mmとした。また、鉛直長さHは、380mm (M2試験体のみ430mm)とした。

図-20～図-22にひび割れ幅平均値、ひび割れ線密度、ひび割れ面積密度の変化をそれぞれ示す。残留変位状態での計測結果も含んでいる。S3試験体およびM3試験体の残留変位状態での計測結果は、各諸量ともに減少しているが、同一荷重(変位)状態で比較すると、繰り返しの影響は見られない。また、帯鉄筋の配筋状態やかぶり厚さの影響も見られない。

全体的な傾向としては、3つの指標ともに荷重や変位の増加にもなって増加している。M1試験体のステップ12(7 δ_y)では、ひび割れ幅の急増とひび割れ線密度の減少が見られる。これは、主要なひび割れのうちの1本のひび割れ幅が大きく開いたため、隣にあった細いひび割れが閉じてしまい、ひび割れと認識されなかったためである。3つの指標の中では、特にひび割れ面積密度のばらつきが小さい。これは、ひび割れ面積密度がひび割れ長さとしび割れ幅の両者の情報を含んでいるためと考えられ、ひび割れデータを用いた損傷度評価においては、ひび割れ幅とひび割れ長さを含めた総合的な評価が有効である。図-22の図中には全データに対するひび割れ面積

密度の回帰式と相関係数を示す。Sシリーズでは荷重の増加にともなう指数関数的に増加し、Mシリーズでは変位の増加にともなう直線的に増加している。

かぶりコンクリート剥落前の最後のひび割れ計測で得られたひび割れ諸量を表-5に示す。計測時の変位もあわせて示す。ひび割れ計測回数が1体につき10回程度で、変位やひずみデータのように連続して計測されたデータではないため、Sシリーズで大きなばらつきが生じている。また、Sシリーズの場合、ひび割れ面積密度にも、ばらつきが生じている。ひび割れ面積密度は試験体間のばらつきが小さい指標であるが、荷重の増加に対してひび割れ面積密度が指数関数的に増加するため、大きなばらつきが生じたものと考えられる。Mシリーズの場合、3体ともにほぼ同一の変位量となっていることから、表-5におけるMシリーズのひび割れ諸量がばらつきの少ない結果になったものと考えられる。

Sシリーズのばらつきのため、単純に3体の平均で表すことはできないが、あえて、3体の平均値で表すと、今回の実験結果の範囲では、ひび割れ幅平均値の限界値としては、せん断ひび割れの場合が0.6mm、曲げひび割れの場合が1.0mm程度、ひび割れ線密度の限界値としては、せん断ひび割れの場合が0.008(1/mm)、曲げひび割れの場合が0.010(1/mm)程度となる。ひび割れ面積密度の限界値は、せん断ひび割れの場合は0.005、曲げひび割れの場合は0.009程度となる。

§6. まとめ

本研究では、デジタル値として計測されたひび割れデータをどのように扱うかに重点をおいて、ひび割れデータによるRC構造物の損傷度評価を試みた。検討結果を以下にまとめる。

- (1) せん断ひび割れおよび曲げひび割れのひび割れ幅分布は、対数正規確率分布に従う確率事象である。
- (2) 曲げひび割れの角度分布は、正規分布に従う確率事象である。
- (3) 数量化表示法により、せん断ひび割れの特徴はよく捉えられた。
- (4) ひび割れデータを用いたRC部材の損傷度評価においては、ひび割れ幅とひび割れ長さを含めた総合的な評価が有効である。

今後は、ひび割れデータと耐久性の関係、ひび割れ面積密度と解析における破壊エネルギーとの関係、残留変位状態での計測結果と地震被災後のひび割れ状態との関係等について、さらに検討を進めて行く予定である。

謝辞

本研究は、清水総合開発の長澤保紀氏の着眼に始まった研究であり、長澤氏には多大なご支援をいただきました。末筆ながら大変感謝申し上げます。

<参考文献>

- 1) 布施光弘, 佐々木一哉, 畑野達郎, 和田克哉, 八崎弘昌: “デジタル画像診断法による損傷履歴の解析事例”, 土木学会第56回年次学術講演会講演概要集, 共通セッション, CS3-004, pp. 168-169, 2001
- 2) 朝倉俊弘, 平井卓: “トンネル覆工の非破壊検査診断システム”, 非破壊検査第51巻3号, pp. 139-143, 2002
- 3) 山田守, 武田篤史, 大内一, 橋本周司: “RC構造物のデジタル画像を用いたひび割れ計測(その3)”, 第4回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集, pp. 19-24, 2003
- 4) 酒井理哉, 松尾豊史, 鬼束俊一, 原田光男: “円筒型RC構造物の局所変形箇所における画像計測”, コンクリート工学年次論文集, Vol. 23, No. 3, pp. 1141-1146, 2001
- 5) 滝本和志, 長澤保紀: “画像計測処理装置を用いたひびわれ計測方法”, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, V-133, pp. 292-293, 1990
- 6) 長澤保紀, 滝本和志: “鉄筋コンクリート平板のひびわれ画像の考察”, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, V-251, pp. 518-519, 1991
- 7) 河村博之, 浜田公也: “ひびわれの数量化表示法とその適応性について”, 日本建築学会論文報告集, 第318号, pp. 1-8, 1982

