

論文 画像解析による RC ディープビームの局所的圧縮破壊領域の同定

渡辺 健^{*1}・阪本 陽一^{*2}・二羽 淳一郎^{*3}

要旨：圧縮力が作用して破壊に至るコンクリート構造物では、破壊はある特定の領域に集中して発生する。本研究では、コンクリート中に鋼繊維を混入した RC ディープビームの局所的圧縮破壊現象を同定することを目的とし、格子法による画像解析手法を適用した。そして、鋼繊維混入率の違いが、RC ディープビームのせん断耐力および局所的圧縮破壊領域の寸法に及ぼす影響について検討した。その結果、2 次元的に可視化された局所的圧縮破壊領域の寸法は、鋼繊維混入率の違いにより変化することを確認した。

キーワード：RC ディープビーム, 局所的圧縮破壊領域, 画像解析, 鋼繊維

1. はじめに

圧縮卓越型破壊を示す鉄筋コンクリート (RC) ディープビームでは、圧縮破壊が、ある特定の領域に集中して発生する^{1),2),3)}。この、圧縮破壊の局所化現象を定量的に捉えることを目的とした研究は、これまでも報告されている。そこでは、アクリル製角棒⁴⁾およびアコースティックエミッション法¹⁾を用いた同定手法が提案されている。特に、Lertsrisakulrat ら⁵⁾は、アクリル製角棒を RC ディープビームに形成される圧縮ストラットの軸方向に埋込み、載荷試験を行った。そして、計測した局所ひずみの結果から、せん断補強鉄筋の配置に伴う、RC ディープビームの耐荷機構の変化を報告している。これまでに提案されている手法の特徴として、計測されたひずみを用いた定量的な評価ができる一方、ひずみゲージの設置位置に依存した計測結果になる点で、課題があった。そのため、RC ディープビームの局所的圧縮破壊領域の寸法に関して、統一した見解を得るまでには至っておらず、さらなる研究が必要とされている。

RC はりのせん断耐力を向上させる際に有効な材料として、鋼繊維を混入したコンクリートの使用が挙げられる。これは、発生したひび割れの拡大、進展を、鋼繊維の架橋効果により抑制することで、RC はりのせん断耐力および靱性を向上させるものである。これまでも、引張応力が卓越し、破壊に至る RC はりのせん断耐力に対する鋼繊維による補強効果は、多くの研究者より報告されている。しかし圧縮応力が卓越し、破壊を示す RC ディープビームへの鋼繊維の効果に関して、統一された見解は得られていない。

また、コンクリート表面に発生するひずみを 2 次元的に簡便に捉える手法として画像解析手法が挙げられる⁶⁾。これは、1)構造物に物理的な影響を与えることなく解析が可能であること、2)複雑な構造物に対しても適用が可

能であることが特徴として挙げられる。しかし、画像解析手法を用いた構造物の挙動を解明する実験は、それほど多くは行われていないのが現状である。

本研究では、せん断補強筋のない RC ディープビームに対し、鋼繊維による補強効果を解明するために、特に局所的圧縮破壊現象に着目した研究を実施した。これは、画像解析手法を用いて、RC ディープビーム表面に発生するひずみの分布を 2 次元的に捉えることで、圧縮破壊領域の同定を行うものである。鋼繊維を混入することによる、RC ディープビームのせん断耐力および局所的圧縮破壊領域の寸法に及ぼす影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

表-1 に、使用材料の示方配合を示す。表中の SF は鋼繊維を示し、sp は高性能 AE 減水剤を示している。また、表-2 に、使用鉄筋の諸元を示す。コンクリートの目標

表-1 使用材料の配合

名称	G_{max}	W/C	s/a	単位量(kg/m ³)					
	(mm)	(%)	(%)	W	C	S	G	SF	sp
SF0	20	50	44	175	350	781	984	0	0
SF1	20	50	44	175	350	781	984	79	0.68
SF2	20	50	44	175	350	781	984	160	1.25

表-2 使用鉄筋の諸元

鉄筋名称	寸法/種類	A_s	E_s	f_y
		(mm ²)	(kN/mm ²)	(N/mm ²)
水平方向鉄筋	φ 6/SR235	28.27	200	310
鉛直方向鉄筋	D6/SD295A	31.67	200	331
引張補強材	PC-φ 25	506.7	200	1004

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 Ph.D (正会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

圧縮強度は 30N/mm^2 であり、早強ポルトランドセメントを使用した。供試体寸法の等しい RC ディープビーム供試体を計 3 体作製し、そのうち 2 体の供試体には、コンクリートに鋼繊維を体積比 1% あるいは 2% 混入した鋼繊維補強コンクリートを使用している。供試体名称は、鋼繊維混入率を反映して SF0, SF1, SF2 とした。目標スランプ値は $18\pm 2.5\text{cm}$ とし、混和剤量にて調整した。打設方向は、供試体高さ方向とし、打設後 24 時間で脱型を行い、7 日間の湿潤養生後、載荷試験を実施した。

図-1 に、供試体の概要を示す。供試体は、有効高さ d が 400mm 、せん断スパン a は 400mm 、せん断スパン有効高さ比 $a/d=1$ である。供試体幅は 150mm 、供試体全長さは 1400mm である。引張補強材として、 $\phi 25$ の異形 PC 鋼棒を 2 本配置し、端部をアンカープレートにて固定した。水平方向鉄筋を供試体上部に 2 本、鉛直方向鉄筋を支点外に計 4 組配置した。

図-2 に、供試体表面にプロットしたターゲットを示す。これは、画像解析に使用するものであり、穴あきトレーシングシートとスプレーペンキを用いて、格子状にプロットしている。ターゲットの形状は直径 4mm の円形とし、上下左右の間隔は 20mm とした。なお供試体の表面を、白色に下地処理することで、ターゲットを的確に抽出できるよう工夫している。

2.2 載荷および測定概要

載荷方法は、荷重が最大値に達した（以後、ピークと称す）後、 0kN まで除荷し、再び載荷を行う一方向繰返し圧縮載荷とした。供試体と支点との間には、幅が 100mm である載荷板を設置し、さらに摩擦を低減するため、テフロンシートにシリコングリースを挟み込んだ減摩パッドを挿入した。

載荷試験中、支間中央のたわみを、載荷点直下および両支点における鉛直方向変位の差分として測定した。また、図-3 に、画像解析によるひずみ計測のために必要な、供試体の撮影方法を示す。実験では、2 台の異なる種類の高解像度デジタルカメラを用いて、それぞれのせん断スパンを撮影した。

撮影は、載荷試験開始後、荷重が 400kN に達した以降、 50kN の荷重増加ごとに実施した。また、ピークに達した以降、除荷した際の荷重が 0kN に至った時点、および再載荷時のピークにおいて、撮影している。

また、載荷は、試験機周辺を暗室とし、一定の光を発生する白色 LED ライト発光の下で実施した。これは、供試体表面に生じる光の明暗による画像解析結果への誤差を考慮したものであり、一般の照明下で撮影した画像を使用した画像解析と比較して、より精度の高い結果が得られるものとする。

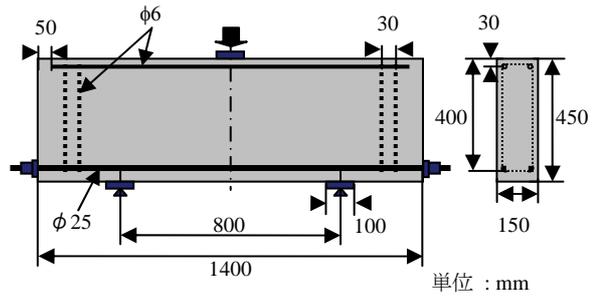


図-1 供試体概要

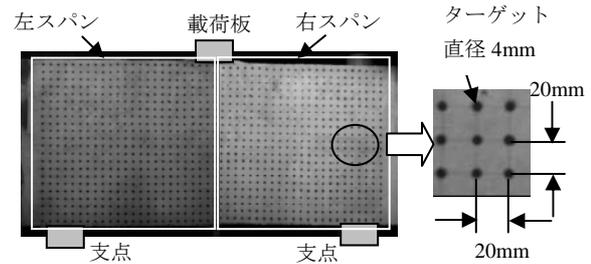


図-2 配置したターゲット概要

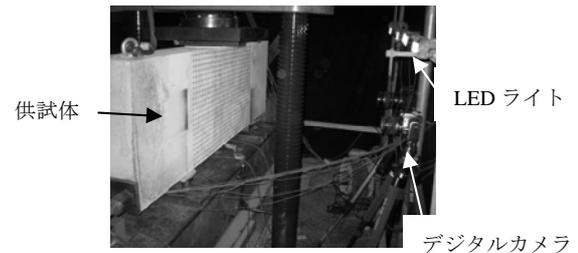


図-3 供試体の撮影方法

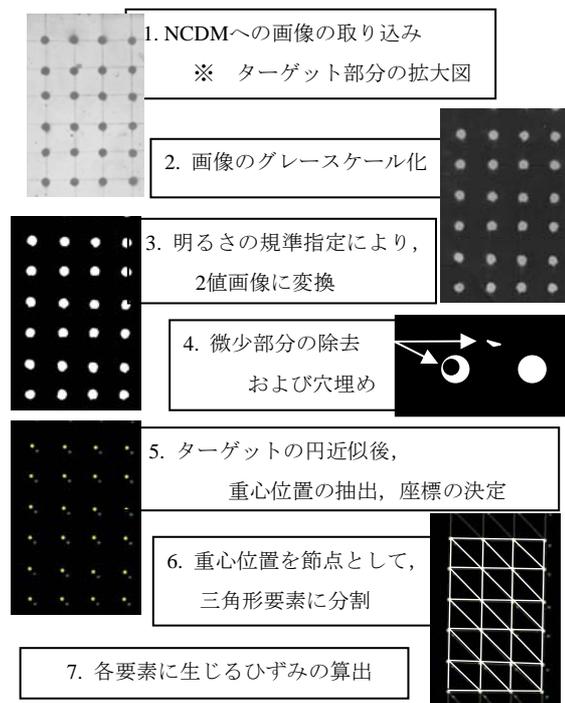


図-4 画像解析手順

2.3 画像解析手法

画像解析手法を用いて、RC ディープビーム供試体表面に生じるひずみを測定した。図-4 に、格子法⁷⁾による画像解析手法の手順を示す。これは、解析対象の表面にプロットしたターゲットの変位量を画像データより算出し、三角形要素分割した領域に発生するひずみに換算する手法である。

初めに、(1)比較する2つの撮影画像を、非接触ひずみ計測ソフトウェア(NCDM)に取り込み、(2)画像をグレースケール化した。続いて、(3)明るさの基準を指定することで2値(白黒)画像に変換した。(4)微小部分の除去、およびターゲットの穴埋めを行うことで、抽出したターゲットの補正を実施し、(5)これを円に近似した後、円の重心位置およびその座標を決定する。その後、(6)ターゲットの重心位置を節点とした定ひずみ三角形要素を用いた有限要素解析により、各要素のひずみを算出した。

3. 実験結果及び考察

3.1 セン断力—変位関係

図-5 に、試験より得られたせん断力—変位関係を示し、曲線の傾きについて比較する。最大せん断力は SF1 が最も大きく、SF0 が最も小さくなった。また、ピーク以降のポストピーク域における軟化曲線の傾きには、大きな変化は見られなかった。しかし、せん断力が約 150kN に達した以降の、せん断力—変位関係のピークまでの傾きは、SF0、SF1、SF2 と、鋼繊維混入量が多くなるにつれて大きくなる傾向が見られた。これは、斜めひび割れ発生後、高い鋼繊維混入量を示す供試体において、ひび割れ面に生じる鋼繊維の架橋効果が高くなり、その結果剛性が向上したためと考えられる。

表-3 に、使用したコンクリートの強度および供試体のせん断耐力を示す。また、既往の研究⁵⁾において得られた、せん断補強鉄筋を配置した RC ディープビームのせん断耐力を併せて示す。これら 6 体の供試体の寸法、軸方向鉄筋および荷重条件は、一致している。また圧縮強度はほぼ等しい値を示している。得られたせん断耐力には、せん断補強鉄筋量の増加および鋼繊維混入による変化が見られた。

鋼繊維補強コンクリートを使用した供試体 (SF1, SF2) のせん断耐力は、SF0 のせん断耐力の 1.5 倍以上となり、鋼繊維による RC ディープビームに対するせん断補強効果が明確に現れた。一方、既往の研究では、せん断補強鉄筋を 0.42 および 0.84% 配置することで、せん断耐力が増加する結果が得られている。すなわち、本研究の成果は、補強材を配置することで、せん断耐力が向上したという点で、既往の研究成果に一致した傾向を示したといえる。表-3 に示すとおり、特に、鋼繊維を混入した RC

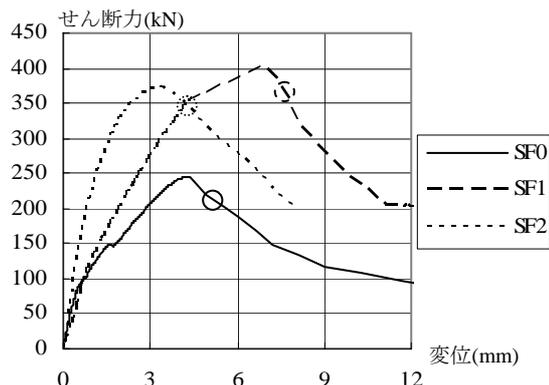


図-5 荷重—変位関係

表-3 セン断耐力および材料強度

供試体 名称	せん断補強 鉄筋比	せん断耐力	圧縮強度
	r_w (%)	(kN)	(N/mm ²)
SF0	0.0	245.5	31.8
SF1	0.0	404.5	32.9
SF2	0.0	374.0	32.0
DB400 ⁵⁾	0.0	285.3	35.5
DB404 ⁵⁾	0.42	355.9	27.5
DB408 ⁵⁾	0.84	414.0	38.4

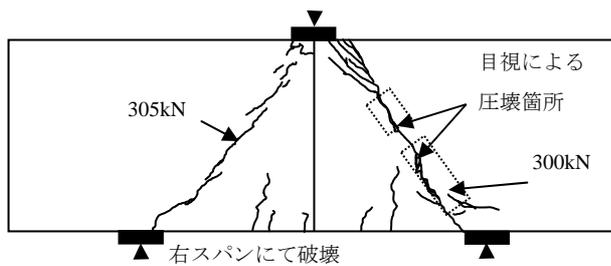
ディープビーム (SF1, SF2) のせん断耐力は、既往の研究において、DB404 および DB408 が示すせん断耐力の間にあることが分かる。このことから、SF1 および SF2 の鋼繊維によるせん断補強効果は、 r_w にしておよそ 0.5 ~ 0.8% 程度の値に相当していたことが推測できる。なお、SF1 および SF2 のせん断耐力に差が見られるが、これは、主にコンクリートの圧縮強度の違いに起因した結果であると考えられる。

3.2 ひび割れ性状

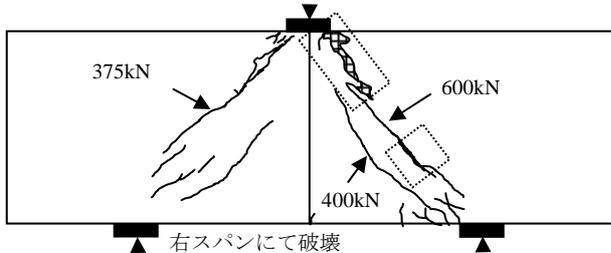
図-6 に、目視により観察された、供試体に発生したひび割れ性状を示す。図には、斜めひび割れが発生した際の荷重を併せて示す。なお、図中の局所的圧縮破壊領域は、画像解析結果に基づき同定した領域であり、4.3 節において議論を行う。

実験の結果、圧縮破壊が、SF0 および SF1 では右側スパンに、SF2 では左側スパンに観察された。SF0 では、供試体下縁において曲げひび割れが多く発生したが、SF1 および SF2 で曲げひび割れは、ほとんど観察されなかった。これは繊維の混入により、曲げひび割れ強度が増加したためと考えられる⁸⁾。

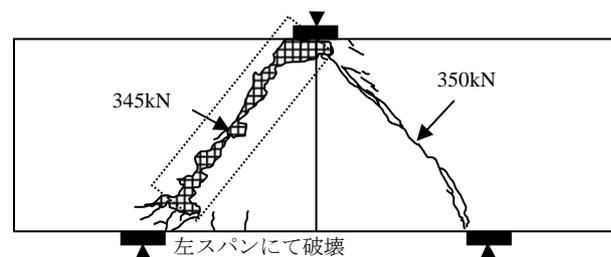
それぞれの供試体におけるひび割れ発生の特徴を示す。SF0 では、荷重板付近に斜めひび割れが多く観察された。目視によるコンクリートの圧縮破壊領域は、図-6(a)に示す矢印の位置にて観察された。SF1 では、荷重



(a) SF0



(b) SF1



(c) SF2

⋯⋯ : 局所的圧縮破壊領域

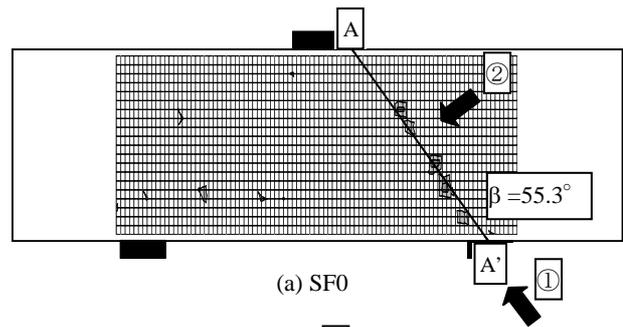
図-6 ひび割れ性状

が約 400kN に達した時点において、斜めひび割れ発生が観察された。しかし、さらに荷重が増加し、約 600kN に達した時点で、初めの斜めひび割れと平行に異なる斜めひび割れが発生した。最終的に、2本の斜めひび割れが観察された後、載荷板付近においてコンクリートの顕著な圧縮破壊が観察された。一方、SF2では、斜めひび割れに沿って、ほぼ全域で圧縮破壊が観察された。

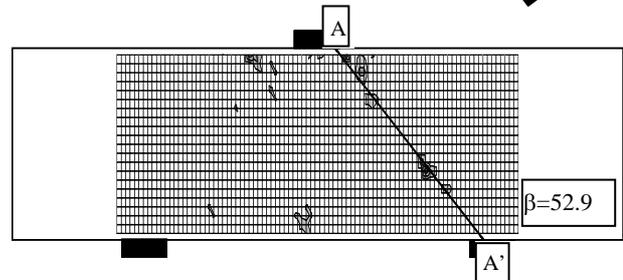
4. 画像解析結果

4.1 主圧縮ひずみの分布

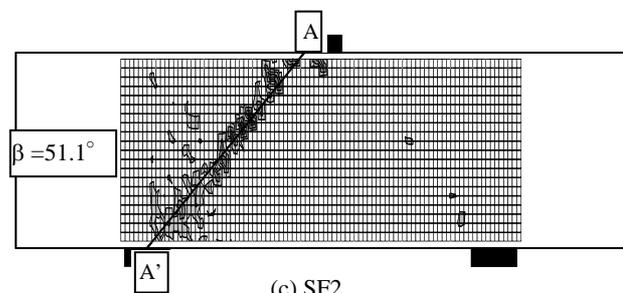
図-7に、供試体表面に発生した主圧縮ひずみを画像解析より算出し、等高線図として示す。ただし、図中では、異なる2台のデジタルカメラに依存した、計測値の絶対値の違いの可能性を考慮して、それぞれ求められたひずみを、計測された主圧縮ひずみの最小値(絶対値としては最大値)で除した値、すなわち正規化した値を示している。また、解析結果は、図-5中の○印にて示す、ポストピーク域においてピーク荷重の9割程度まで荷重が低下した時点で計測されたひずみ分布を示している。なお、さらにそれ以降荷重が進むと、供試体表面に発生



(a) SF0



(b) SF1



(c) SF2

正規化されたひずみの値
 0-0.2 : □ 0.2-0.4 : ■ 0.4-0.6 : ■
 0.6-0.8 : ■ 0.8-1 : ■

図-7 主圧縮ひずみ分布図

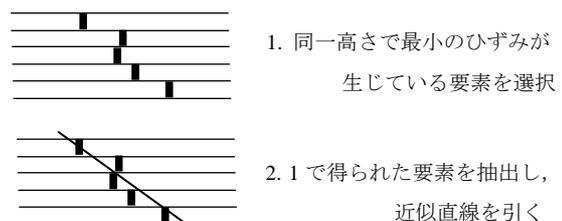


図-8 近似直線の算出方法

したひび割れが顕著になるとともに、ターゲットが剥落したため、解析できなかった。

図-7に示すとおり、いずれの供試体においても、卓越した主圧縮ひずみがある領域に集中して発生したことが確認できる。すなわち、このひずみの集中域が、特に片側スパンにおいてのみ確認できることから、ピーク以降、片側スパンにおいて圧縮破壊が、顕著に進展したことが推測できる。

また、主圧縮ひずみの集中域は、供試体表面にほぼ直線に近似して分布していると仮定できる。そこで、この

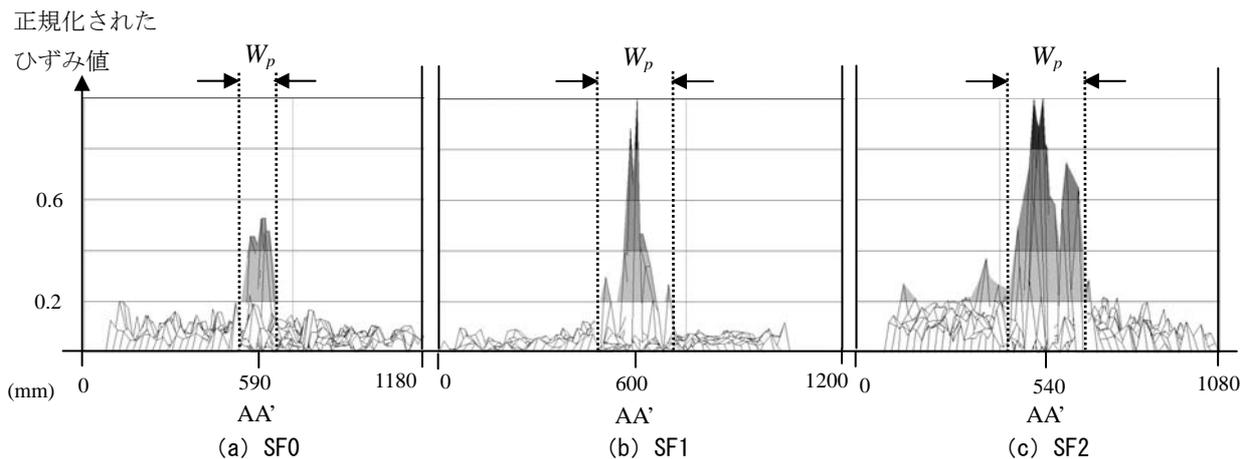


図-9 正規化された主圧縮ひずみ分布 (近似直線軸方向から見た圧縮ひずみ分布図の投影図)

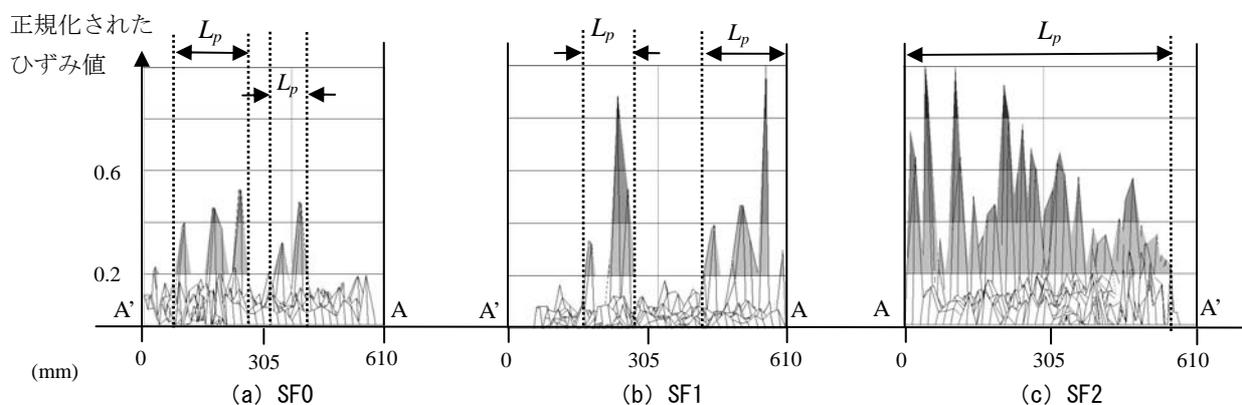


図-10 正規化された主圧縮ひずみ分布 (近似直線軸直角方向から見た圧縮ひずみ分布図の投影図)

集中域の特徴を求めるために、供試体において、主圧縮ひずみが卓越して発生する領域を直線に近似し、その水平軸に対する角度を算出した。図-8に、近似直線の算出方法を示す。すなわち、1つの供試体において、同一高さにある要素に生じている主圧縮ひずみの中で、最小値を示す要素を抽出し、近似直線を定めた。ただし、最小値を示した要素が、明らかに圧縮ストラットの位置と異なると考えられる位置にある場合は、これを近似直線の検討において考慮していない。

図-7中に、近似直線の水平軸に対する角度(β)を示す。 β は、繊維混入率を増加させるほど小さな値を示すことが確認された。

4.2 局所的圧縮破壊領域の同定

長方形に近似した主圧縮ひずみ集中領域の寸法を同定する。

(1) 局所的圧縮破壊領域幅の同定

図-9に、正規化された主圧縮ひずみの分布を示す。ただし、これは、図-7に示す、圧縮破壊が生じた片側スパンの等高図を、A-A線の方向(図-7中の①方向)に投影させて示した図である。すなわち、縦軸の主圧縮ひずみは、計測された主圧縮ひずみの最小値で除すこと

表-4 局所的圧縮破壊領域

	W_p (mm)	L_p (mm)	局所的圧縮破壊 領域面積 (mm^2)
SF0	66	268	1.77×10^4
SF1	108	287	3.10×10^4
SF2	134	554	7.42×10^4

で正規化した値で示している。なお、各供試体で計測された主圧縮ひずみの最小値は、SF0で約0.07、SF1およびSF2で約0.12であった。

図-9に示すとおり、発生した主圧縮ひずみは、繊維混入量に依存して、異なる値を示した。特に、繊維混入量の増加により、発生する主圧縮ひずみの値が増加することが分かった。また、A-A線の位置を中心に、主圧縮ひずみが卓越して発生していることが、特徴として挙げられる。

そこで、図-9において、他の領域と比較して明らかに主圧縮ひずみが卓越して発生している領域として、約0.2以上を示し、かつひずみを集中的に生じている領域を特定し、その幅 W_p を測定した。この W_p は、長方形に近似した主圧縮ひずみ集中域における幅と考えられる。

W_p を表-4に示すとともに、領域を図-9に矢印にて示す。この W_p は、上記に示した定義(0.2以上)に依存して変化するため、検討の余地があるが、3体の実験結果を比較すると、繊維混入量の増加に伴い、 W_p の値は増加する結果となった。

(2) 局所的圧縮破壊領域長さの同定

図-10に、正規化された主圧縮ひずみの分布を示す。ただしこれは、図-7に示した等高図を、A-A線の直角方向(図-7中の②方向)に投影させて示した図であるとともに、A-A線における主圧縮ひずみの分布に一致するものである。

他の領域と比較して、明らかに主圧縮ひずみが卓越して発生している領域として、上述と同基準の領域を取り上げ、図中に L_p の領域として矢印で示した。また、表-4に値を示す。本研究において、 L_p は、繊維混入量の増加に伴い、増加する結果となった。

ところで、既往の研究⁵⁾によれば、表-3において比較した、DB400の L_p の値が270mmであると報告されている。ほぼ同一の供試体諸元を有するSF0の L_p の値は、268mmであることから、画像解析を用いた本研究では、アクリル製角棒を用いて特定される局所的圧縮破壊領域をほぼ再現できたと考える。

(3) 局所的圧縮破壊領域とひび割れ図の比較

図-6のひび割れ図上に、上記によって同定された長方形に近似した局所的圧縮破壊領域を併せて示す。目視によって観察される圧縮破壊領域と、画像解析によって同定された主圧縮ひずみが卓越する領域は、長さおよび幅の点で、ほぼ一致する結果となった。

以上、本研究において実施した画像解析手法が、コンクリートの局所的圧縮破壊領域を、2次的に測定する上で、有効な手法であることを示した。今後さらに検討を重ねることで、圧縮破壊の局所化を精度よく同定する手法を確立していきたい。さらに、多軸応力下におかれた供試体、および構造物レベルの供試体を対象にした、画像解析の拡張も今後の課題である。

5. まとめ

鋼繊維混入率をパラメータとし、寸法一定の3体のせん断補強鉄筋のないRCディープビーム供試体の載荷試験を行い、画像解析を用いて局所的圧縮破壊領域の寸法を求めた。その結果、以下に示す知見が得られた。

(1) 鋼繊維補強コンクリート供試体は、普通コンクリート供試体に比べせん断耐力の増加が見られた。今回のケースでは、鋼繊維補強コンクリートを用いることで、せん断補強筋比 r_w 換算にして約0.5%から0.8%程度の鉄筋に対応するせん断抵抗力を示すことが、既往研究との比較により確認された。

- (2) 鋼繊維混入率の増加に伴い、ひび割れ発生後の荷重-変位関係の傾きが増加する傾向にあった。
- (3) RCディープビームに発生する局所的圧縮破壊領域は、鋼繊維混入率の増加により長さ、幅および面積が増加し、生じるひずみの値も増加することを確認した。また、画像解析を用いた本研究により、アクリル製角棒を用いて特定される局所的圧縮破壊領域を、ほぼ再現できることを確認した。
- (4) 画像解析結果より得られた局所的圧縮破壊領域の寸法は、実際の供試体に生じるひび割れ性状から確認しても、概ね妥当であった。

なお本研究では、財)電力中央研究所が開発した非接触ひずみ計測ソフトウェア(NCDM)を使用した。また、本研究の一部は、平成19年度科学研究費補助金(基盤研究(A)、課題番号19206050)によって実施したものである。

参考文献

- 1) 渡辺 健ほか: AE法を用いたディープビームにおける圧縮破壊領域の推定, コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.2, pp.175-180, 2002
- 2) Lertsrisakulrat, T., et al. : Experimental Study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.309-321, 2001.2
- 3) 幸左賢二ほか: せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的検討, 土木学会論文集 E, Vol.62 No.4, pp.798-814, 2006.11
- 4) Nakamura, H. and Higai, T. : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E Post-Peak Behavior of RC Structures subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.259-272, 1999.
- 5) Lertsrisakulrat, T., et al. : Concepts of Localized Compressive Failure of Concrete in RC Deep Beams, 土木学会論文集, No.697/V-54, pp.215-225, 2002.2
- 6) 酒井理哉ほか: 画像計測を利用した鉄筋コンクリート構造のひずみ測定を試み, 土木学会第56回年次学術講演会, CS3-002, pp.164-165, 2001.10
- 7) 矢川元基ほか: 点認識画像処理を用いた非接触ひずみ解析法, 日本機械学会論文集(A編), 第49巻, 447号, pp.1435-1443, 1983.11
- 8) 小林一輔ほか: 鋼繊維補強コンクリートの曲げ特性に及ぼす鋼繊維の形状寸法ならびに粗骨材最大寸法の影響, 第3回コンクリート工学年次講演会講演論文集, pp.185-188, 1981