論文　画像解析によるコンクリートの局所的圧縮破壊領域の同定

阪本　陽一[*1]・三木　朋広[*2]・二羽　淳一郎[*3]

要旨：圧縮力を受けて破壊に至るコンクリート部材において，ポストピーク領域では部材軸に沿ったひずみは一様に分布せず，ある領域に局所化する。その領域は，部材長さによっても異なる。本研究では，画像解析により，コンクリート表面の変形挙動からこの圧縮局所化領域を同定した。コンクリート部材に対し圧縮試験を行い，画像解析手法を用いて，部材寸法およびコンクリートの種類（普通，繊維補強，超高強度繊維補強）が圧縮局所化領域に与える影響について検討した。その結果，全ての部材寸法において，圧縮局所化領域は繊維補強コンクリートが最も大きく，超高強度繊維補強コンクリートが最も小さくなることがわかった。

キーワード：圧縮破壊，局所化領域，画像解析，ポストピーク

1. はじめに

コンクリートの圧縮破壊には，大きく分けて2つの特徴がある。一つは引張破壊時に発生するような面的な破壊ではなく，空間的領域において局所的に破壊することであり，もう一つは破壊形態がコンクリート部材の寸法や強度，載荷条件に強く依存することである。

この圧縮破壊が局所化する領域を同定する試みとして，平井[1)]らのアクリル製角棒をコンクリート部材中に埋め込んで局所的なひずみを測定する方法，渡辺[2)]らによって行われた破壊に伴うAE(アコースティック・エミッション)の発生挙動を調べることで圧縮局所化領域を推定する方法などが行われてきた。

一方，近年デジタルカメラを用いて撮影した画像から非接触で変形量を測定する画像解析手法[3)]が着目されている。画像解析法の利点として，カメラで撮影した画像を元に検証を行うため，複雑な実構造物を対象としても測定が容易であること，さらに非接触型の計測手法であるため，対象に対して物理的な影響を与えることなく容易に広域を測定できることなどが挙げられる。

本研究では，コンクリート供試体における圧縮局所化領域を推定する新たな手法を構築することを目的として，画像解析法を用いた検討を試みる。得られた結果と既往の研究成果を比較して，圧縮局所化領域の測定手法としての精度を確認した。さらに，部材寸法や材料種類が圧縮局所化領域に与える影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

使用材料の強度および供試体寸法を**表－１**に示す。使用材料は普通コンクリート（以下NSC），NSCに体積比1.5%のビニロン繊維を混入した繊維補強コンクリート（以下FRC），超高強度繊維補強コンクリート（以下UFC）の3種類とした。供試体数は供試体高さと断面寸法の比H/Dが2，4，6の3種類について，それぞれ3体ずつとした。使用した材料の配合を**表－２**，**表－３**に示す。

表－１　使用材料の強度および供試体寸法

材料	圧縮強度(MPa)	断面寸法(mm×mm)	高さH(mm)	供試体数
NSC	45.0	100×100	200,400,600	3
FRC	46.0	100×100	200,400,600	3
UFC	216	75×75	150,300,450	3

*1 東京工業大学大学院　理工学研究科土木工学専攻　(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助手　博士(工学)　(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)

表－２　コンクリートの示方配合

コンクリートの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m^3)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
NSC	20	50	45	185	370	799	988
FRC	20	50	45	185	370	799	988

表－３　UFC の示方配合

水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤
180	2255	157	28

NSC および FRC には早強セメントを使用し，粗骨材最大寸法 G_{max} は 20 mm とした。なお，混和剤は使用しなかった。24 時間後に脱型し，7 日間の水中養生を行った。打込み方向は縦方向とし，載荷時には打込み面が上面となるようにした。UFC は打込み時にフロー試験（JISR 5201，落下なし）を行い，フローコーン引上げから 180 秒後のフロー値が 270±10mm となるように管理した。打込み後は 48 時間の湿潤養生を行い，脱型後 90℃の蒸気養生を 48 時間行った。打込み方向は横方向とし，載荷時には打込み面が側面となるようにした。これらのそれぞれの供試体には，画像解析を行う際に必要なターゲットを，穴あきトレーシングシートとスプレーペンキを用いてプロットした。

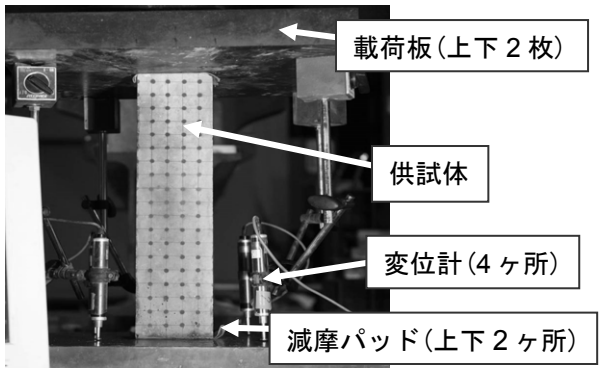
2.2 載荷方法および測定項目

載荷は，荷重がピークに達したら 0 kN まで除荷し，再び載荷する静的繰返し載荷を行った。**図－１**に載荷状況を示す。一軸圧縮状態を再現するため，供試体上下の端面と載荷板の間にテフロンシート（厚さ 0.05mm）にシリコングリースを挟んだ減摩パッドを挿入し，端部拘束を取り除いた。

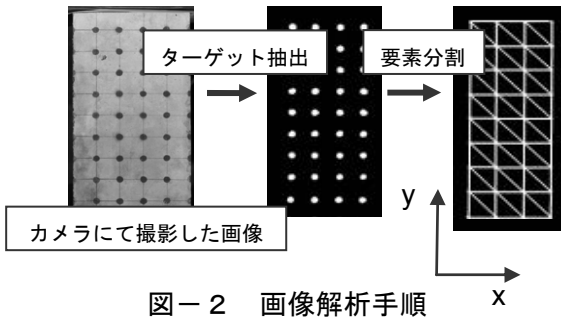
測定項目は，供試体両端を測定区間とした全体変位および荷重とした。全体変位は 4 個の変位計の平均値として求めた。画像解析に用いる写真は，それぞれの荷重がピークとなる点で撮影した。

2.3 画像解析手法

本研究では，格子法[3)]による画像解析を行った。この方法は，連続写真によりコンクリート表面にプロットしたターゲットの変位を測定し，それを用いてコンクリート表面を要素分割した領域内のひずみを求めていく方法である。**図－２**に画像解析の手順を示す。このとき座標軸は図中に示すように設定した。本研究では，ターゲットの直径を 4 mm とし，供試体表面に格子状にプロットした。ターゲット数は，すべての供試体において x 軸方向に 4 点プロットしている。一方，y 軸方向には，H/D = 2 の供試体で 9 点，H/D = 4 の供試体で 19 点，H/D = 6 の供試体で 29 点プロットしている。ターゲットの間隔は NSC，FRC では縦横 20 mm 間隔とし，UFC では 15 mm 間隔とした。この供試体を対象にして，ターゲットをプロットした供試体表面をデジタルカメラで撮影した。この得られた画像からターゲットのみを画像処理して抽出し，その重心の座標を求めた。この作業には，汎用の画像処理ソフトを用いた。その後，得られたターゲットの重心を節点とした三角形要素に分割した。載荷に伴う各節点の変位から，定ひずみ三角形有限要



図－１　載荷状況



図－２　画像解析手順

素により，要素内のひずみを算出した。このようにして得られた各荷重レベルにおけるひずみ分布を用いて，圧縮局所化領域を推定することにした。

3. 実験結果および考察

3.1 実験結果

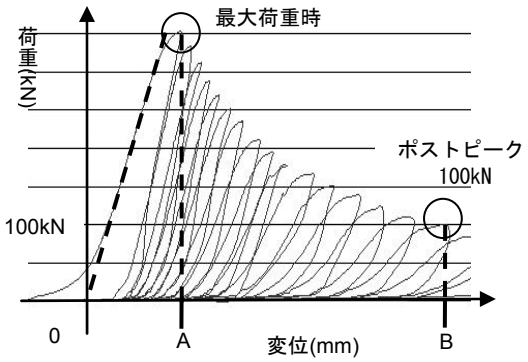
表－４にそれぞれの供試体の最大荷重(P_{max})および，それを部材断面積で除して得られる最大圧縮応力(σ_{max})を示す。実験では，載荷して荷重が低下するポストピーク領域に達すると，供試体表面にひび割れが生じ，さらにターゲットが欠落したため，いくつかの供試体については安定した結果を得ることが出来なかった。そのため，以後の検討では，それぞれの実験ケースにおいて，平均的な挙動として得られた 1 体の供試体を用いて行うこととする。

表－４に示すように，すべての供試体において圧縮強度と比べて最大圧縮応力が小さくなった原因として，供試体の上下端面に挿入した摩擦パッドの影響により，端部の面外方向の拘束が弱まったためと考えられる。このような傾向は既往の研究[2)]においても見られている。

3.2 画像解析結果の有効性についての検証

画像解析によって得られた最小主ひずみ（主圧縮ひずみ）の平均値と，実験で得られた変位から求めた部材軸方向の平均ひずみを比較し，画像解析の結果の有効性について検証を行った。画像解析では，載荷前，最大荷重時，ポストピークで荷重が 100kN に至った時のデジタル画像を用いて，最大荷重時およびポストピークにおける各要素のひずみを算出した。このひずみを全要素で平均化して，画像解析から平均ひずみを求めた。一方，実験では，得られた荷重－変位関係から，最大荷重時およびポストピークにおける軸圧縮ひずみを算出した。**図－３**に，載荷初期の原点補正した荷重－変位関係の一例を示す。この図より，最大荷重時の平均ひずみは A/H, ポストピーク 100 kN 時の平均ひずみは B/H として算出することができる。

表－５に，画像解析と実験によって得られたポストピーク 100 kN 時の平均ひずみを示す。このうち，表中太字で示す 5 ケースでは，画像解析結果と実験結果でほぼ等しい値を示していることがわかる。これより，遠方から撮影された画像を用いてコンクリートひずみを求める画像解析手法により，得られた結果は，妥当な精度を有すると言える。また，解析結果と実験結果に違いが見られた 4 ケースでは，全てのケースで画像解析ひずみの方が大きくなった。この原因として，供試体表面に発生するひび割れが多くなり，その結果プロットされたターゲットと共に表面のコンクリートが剥落して計測結果の精度が著しく低下したものと考えられる。



図－３　原点補正した荷重変位関係

表－４　供試体の最大荷重および圧縮強度

H/D	NSC		FRC		UFC	
	P_{max}	σ_{max}	P_{max}	σ_{max}	P_{max}	σ_{max}
	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)	(kN)	(MPa)
2	360.2	36.0	353.6	35.3	929.8	165.2
4	392.0	39.2	407.5	40.7	825.5	146.7
6	324.0	32.4	372.6	37.2	524.8	93.3

表－５　実験と画像解析によって得られた平均ひずみの比較

H/D	NSC		FRC		UFC	
	実験	解析	実験	解析	実験	解析
2	0.0036	0.0345	**0.0046**	**0.0057**	**0.0095**	**0.0099**
4	**0.0054**	**0.0044**	0.0046	0.0194	0.0058	0.0373
6	**0.0078**	**0.0060**	0.0062	0.0156	**0.0169**	**0.0156**

3.3 圧縮局所化領域の同定

(1) 圧縮局所化領域の同定

図－４は，全てのケースにおける各供試体に生じている主圧縮ひずみの分布を示したものである。縦軸は部材高さであり，横軸にはひずみの値を示している。同図には，最大荷重時およびポストピーク 100 kN 時のひずみ分布を示している。ここで示すひずみは，それぞれの供試体における同一高さに位置する 6 個の三角形要素に生じるひずみを平均した値である。なお，UFC の部材高さは他の2つの材料とは異なっているが，比較のため，位置を相似的に拡大し表示している。この画像解析によって得られたひずみ分布を用いて，圧縮局所化領域を定義することとする。本研究では，ポストピークにおけるひずみが最大荷重時のひずみに比べて増加している領域を圧縮局所化領域として定める。この領域を図中に示す。

図－５は，載荷終了時の供試体の写真，およびそれぞれの要素に発生する主圧縮ひずみのコンター図である。なお，表示するひずみレベルの範囲は 0 から-0.005 までとした。また，同図では，色の濃くなっている要素では圧縮ひずみが卓越していることを示している。図中の点線は，局所化領域とそれ以外の領域の境界線を示す。全てのケースにおいて，写真より確認されるひび割れの発生領域と，境界線との間に差が確認できる。なお，拡大してみると局所化領域には縦方向に微細なひび割れが生じていることがわかる。

ここで，**図－４**中の H/D = 2 および H/D = 4 の普通コンクリート(NSC)，H/D = 2 の繊維補強コンクリート(FRC)に対して，画像解析によって求めた図中の①～③の 3 点のひずみは，圧縮局所化領域内で観測されてはいるが，他の位置のひずみと明らかに傾向の異なるものであった。その理由について以下に述べる。

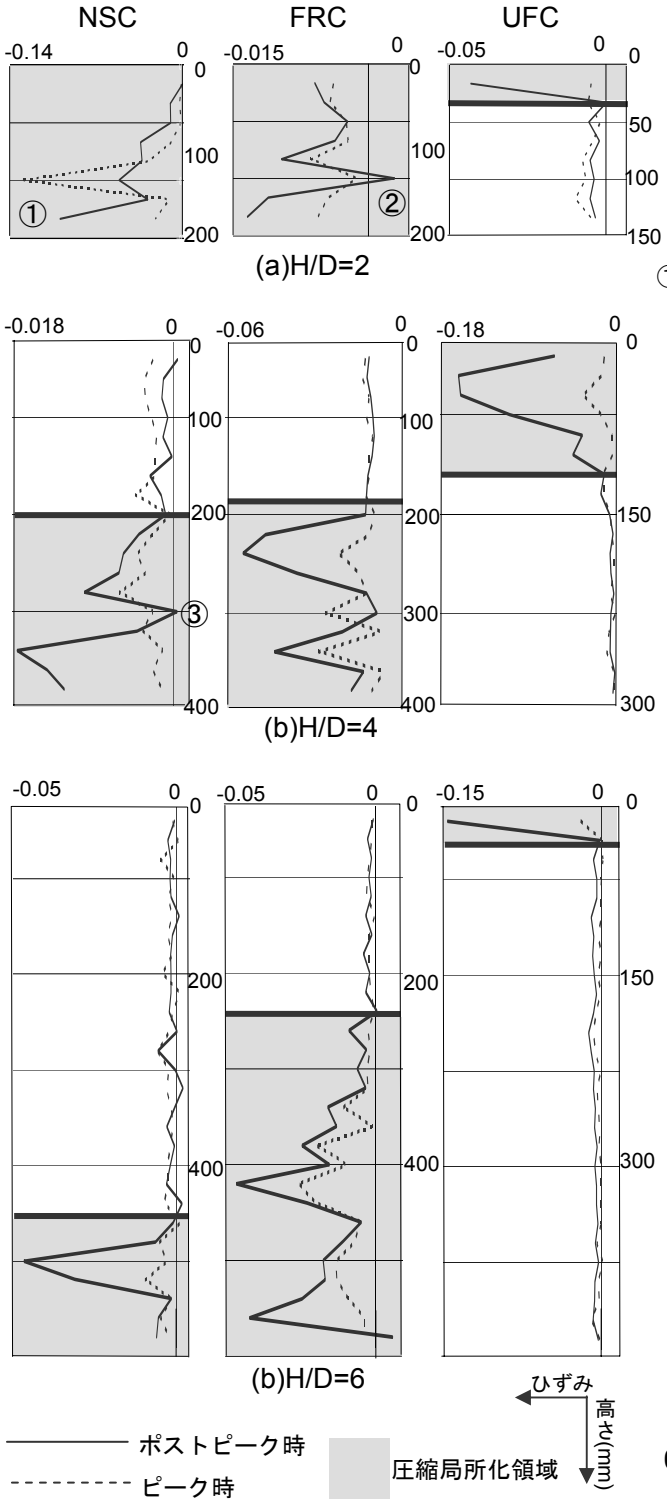
図－４(a)の NSC の結果の中で，①に示すひずみは最大荷重時に測定されたものである。このひずみは，同要素でのポストピークひずみよりも非常に大きな値を示した。この要因として，供試体表面に生じたひび割れによりターゲットの一部が剥落したため，測定精度が低下し，大きな変位が計測されたためと考える。

次に②および③に示すひずみはポストピークひずみであり，両ひずみとも引張の値を示した。同要素に発生したひずみを**図－５**のコンター図内に示す。②および③の両要素に生じるひずみは，同じ高さの要素間で大きなひずみ勾配が見られる。このことから，同じ高さの要素内に圧縮ひずみを生じる要素と引張ひずみを生じる要素が存在し，平均ひずみは引張の値を示したと考えられる。この原因として，繰返し載荷をする中で，コンクリート材料やひび割れ発生の不均一性により，断面内で一様に破壊が生じていないことが考えられる。

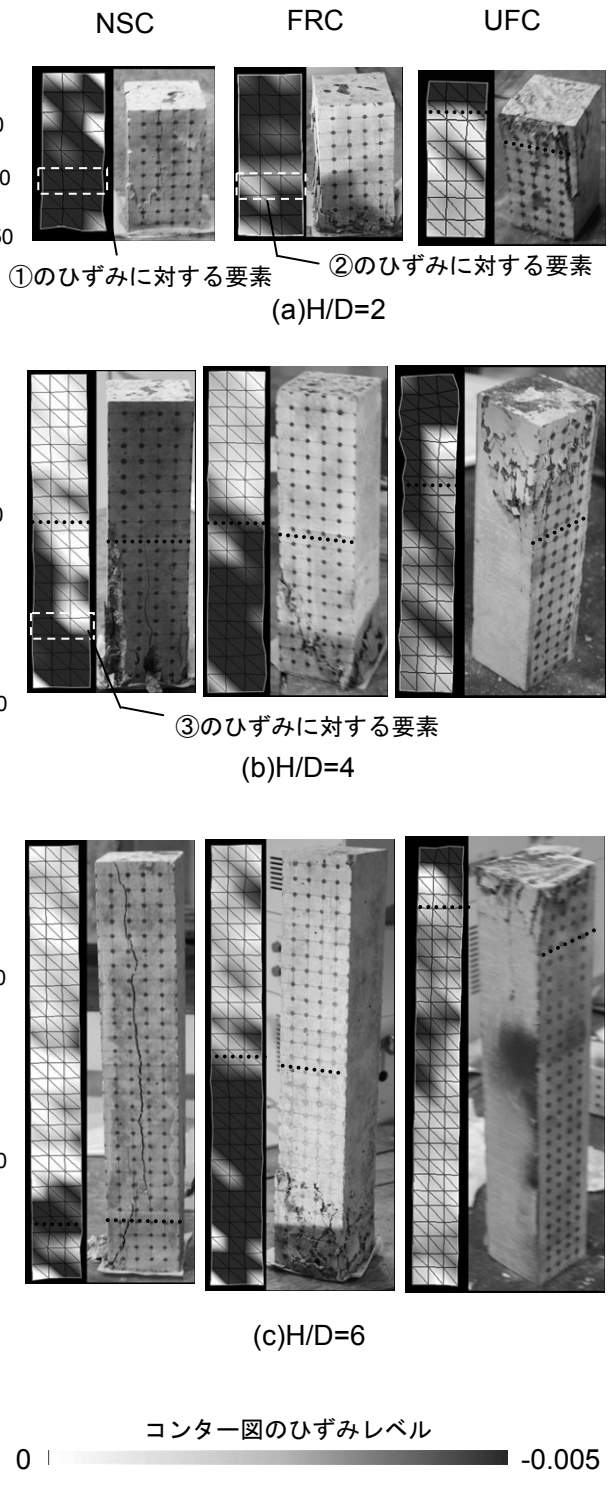
(2) 試験結果

図－４で示したそれぞれの供試体における画像解析の結果から，圧縮局所化領域に含まれる要素の数，圧縮局所化領域長さ Lp，供試体高さ H に対する Lp の割合（Lp/H）を求め，**表－６**に示す。ここで，Lp は，圧縮局所化領域に含まれる要素数にターゲット間の距離を乗じた値に，供試体端部から要素端部までの距離を加えた値とした（**図－６**参照）。本研究では，定ひずみ三角形要素を用いているため，要素内では一様のひずみを示すため，圧縮局所化領域は要素の大きさの整数倍を基準として求めている。**表－６**に基づいて，H/D，および Lp に関して，材料種類および部材寸法による比較を行ったグラフを**図－７**に示す。

まず部材寸法と圧縮局所化領域の関係について検討する。NSC 供試体について，H/D = 2 の場合はほぼ供試体全域で圧縮破壊しており，①の要素を除くと部材全体のひずみが増大している。一方，Lp/H の値は H/D = 4 の場合は約 1/2，H/D = 6 では約 1/4 となった。つまり，H/D が大きくなるほど Lp/H は小さくなることがわかった。このとき，Lp は，3 体の供試体においてほぼ等しい値を得た。この結果は，渡辺[2)]らによる指摘を裏付けるものである。また，H/D が変化しても Lp はほぼ一定という実験結果と一致している。



図－４　画像解析によるひずみ分布



図－５　供試体写真およびひずみコンター図

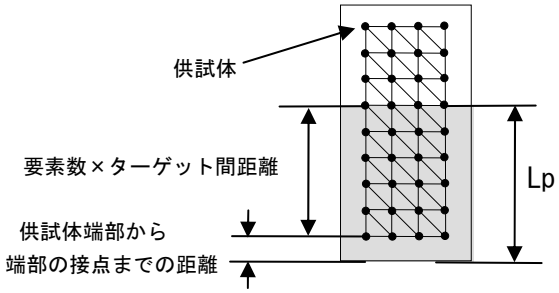
FRC 供試体では，Lp/H の値は，H/D = 2 の場合は 1.0（供試体全体で圧壊），H/D = 4 および 6 の場合は約 1/2 となり, 3 体の供試体において Lp/H の値は全て 1/2 以上となった。このとき，**図－７**を見ると，H/D の増加とともに Lp も単調に増加していることがわかる。

UFC 供試体では，Lp/H の値は，3 種類の H/D を持つ供試体において全て 0.5 以下となった。

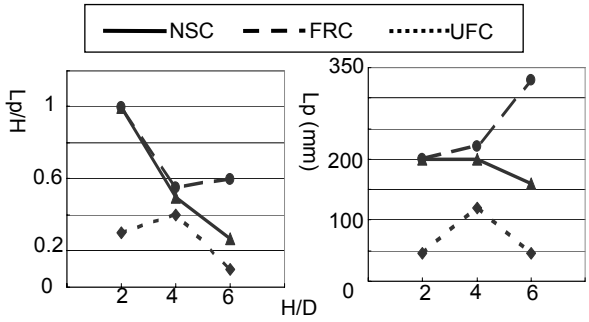
次に使用材料と圧縮局所化領域の関係について検討する。H/D = 2 の供試体について，Lp/H および Lp の値を見ると，NSC および FRC は供試体全体が一様に破壊し，圧縮破壊局所化現象

表－６　圧縮局所化領域の画像解析結果

材料	H/D	全体の要素列数	圧縮局所化領域		
			要素列数	Lp/H	Lp (mm)
NSC	2	8	8	1	200
	4	18	9	0.5	200
	6	28	7	0.27	160
FRC	2	8	8	1	200
	4	18	10	0.55	220
	6	28	18	0.63	380
UFC	2	8	2	0.3	45
	4	18	7	0.4	120
	6	28	2	0.1	45



図－６　圧縮局所化領域 Lp の求め方



図－７　材料および寸法による比較

が見られなかったのに対し，UFC の Lp/H は約 1/3 であり, UFC のみが局所化する結果となった。H/D ＝ 4 の供試体について，Lp/H の値は 3 種類の材料の全てで約 1/2 となり, 材料種類による変化は見られなかった。詳細に見ると Lp は UFC で最も小さくなり, FRC の Lp が最も大きくなっている。H/D ＝ 6 の供試体についても，Lp/H の値は，UFC が最も小さく，FRC が最も大きくなる結果となった。以上の通り，3 種類の材料を用いた場合のコンクリートの圧縮局所化領域長さに与える影響を整理することができた。

本研究では，画像解析手法を用いて各種材料，および寸法の異なるコンクリート部材の圧縮局所化領域の評価を行った。なお，ここでは高さ 150～600mm 程度の小型の供試体を対象に実験を行ってきたが，今後はさらに広域の計測を試みると共に多くの実験データを蓄積して検討を続けていく予定である。

4. まとめ

コンクリート供試体の一軸圧縮載荷を行い，供試体表面にプロットしたターゲットの変位を画像計測法により求め，得られたひずみを元に供試体の寸法，材料別による圧縮局所化領域の同定を試み，両者の関係について考察した。以下に本研究より得られた知見をまとめる。

(1) 画像計測法により, 供試体の圧縮局所化領域長さを同定した。本手法によって得られたひずみの平均値と変位計によって測定された平均ひずみを比較した結果, 妥当な精度で計測可能であることを確認した。

(2) 圧縮局所化領域に与える部材寸法の影響について検討した。H/D が 2 から 6 の範囲では, 普通コンクリートでは圧縮局所化領域長さ Lp はほぼ一定となるのに対し, 繊維コンクリートを用いた場合では H/D が増加するに伴い Lp も増加していく傾向にあることを確認した。

(3) 圧縮局所化領域に与える材料種類の影響について, H/D が 4 と 6 の場合, Lp/H は UFC, NSC，FRC の順に大きくなり，H/D が 2 の場合，NSC 及び FRC は供試体全域において圧壊し, UFC のみ局所化することがわかった。

参考文献

1) 平井　圭ほか：コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp.339-344, 1998.6

2) 渡辺　健ほか：AE 法を用いたコンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.85-90, 2001

3) 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