

論文 フィードバック制御を用いたコンクリートの一軸圧縮破壊実験

越川 武晃^{*1}・上田 正生^{*2}・菊地 優^{*3}・和田 俊良^{*4}

要旨: 一軸圧縮力を受けるコンクリートのポストピーク挙動を安定的に測定することを目的に、ひずみ量を制御対象として载荷を行うフィードバック制御を用いた測定・制御システムを構築し、寸法と圧縮強度を変化させたコンクリート円柱試験体に対してこのシステムを用いた一軸圧縮破壊実験を行った。実験結果から、最大圧縮応力、相対応力-ひずみ関係、ひずみ分布の推移と破壊状況、および相対応力-変位関係を示し、载荷時に破壊の局所化領域におけるひずみ量を定速制御することで、単調载荷に近い状態のポストピーク挙動を測定できる可能性を示した。

キーワード: 圧縮破壊, 局所化, フィードバック制御, ひずみ, ポストピーク, コンクリート

1. はじめに

一軸圧縮力を受けるコンクリートは、圧縮強度に達するまでは軸方向にわたって一様圧縮ひずみ状態となるが、圧縮強度以降のポストピーク域に入ると、大別してひずみが集中する破壊の局所化領域とそれ以外の除荷域に分離し、局所化領域において加力エネルギーを消費しながら最終的な破壊に至る変形挙動を示す。一般に、この局所化領域は同一の調査・断面積で作製されたコンクリート試験体であれば、その長さが試験体の長さによらずほぼ一定になることが知られている。したがって、コンクリートの圧縮破壊性状に関する種々の定量的な評価を行ううえでは、ポストピーク挙動時の安定した測定値を獲得し、局所化領域長さとそので消費されるエネルギー（圧縮破壊エネルギー）を求めることが非常に重要な課題となる。

しかしながら、コンクリート試験体の一軸圧縮载荷実験では、この種の通常の载荷実験で用いられている変位速度を一定に保った制御を適用すると、圧縮強度点以降で急激な破壊が生じてしまい安定した測定が不可能となる場合が少なくない。これは試験体の荷重-変位関係において、荷重も変位もともに減少するスナップバック現象が生じることがあり、変位速度一定では制御できなくなることが原因の一つである。このため、コンクリートの圧縮破壊性状に関する既往の実験的研究では、主に一方向繰返し载荷によって加力エネルギーを調節しながらポストピーク域での载荷を行う方法がとられているが、载荷時において単調に増加する変位以外の項目を制御対象としフィードバック制御を用いた载荷を行うことで、このような現象が生じる試験体の载荷実験においても安定した測定を行うことが可能であると考えられる¹⁾。

本論文は、コンクリートの一軸圧縮破壊実験を対象として、破壊の局所化領域における軸方向のひずみ量を制御対象として载荷を行うフィードバック制御を用いた測定・制御システムを提案し、このシステムを用いた実験結果について報告するものである。

2. 実験手法の概要

2.1 コンクリート試験体

図-1に本実験で用いたコンクリート試験体の概要を

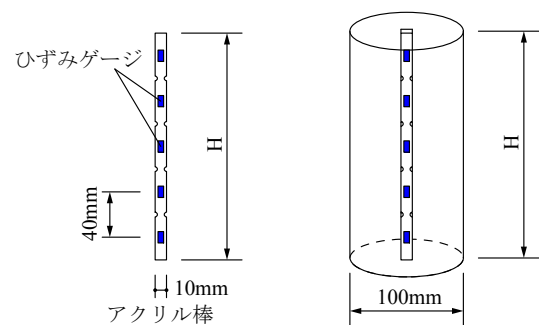


図-1 アクリル棒を設置したコンクリート試験体

表-1 試験体一覧

試験体名称	試験体高さ H (mm)	試験体直径 D (mm)	目標圧縮強度 (MPa)
F36-200	200	100	36
F36-400	400		
F36-600	600		
F54-200	200		54
F54-400	400		
F54-600	600		

*1 北海道大学大学院工学研究科 建築都市空間デザイン専攻 助教 博士(工学) (正会員)

*2 北海道大学大学院工学研究科 建築都市空間デザイン専攻 教授 博士(工学) (正会員)

*3 北海道大学大学院工学研究科 建築都市空間デザイン専攻 准教授 博士(工学)

*4 北海道職業能力開発大学校建築科 講師 博士(工学) (正会員)

表-2 コンクリートの調合

目標圧縮強度 (MPa)	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	混和剤
36	20	42.0	46.6	173	412	803	915	4.491
54	20	34.5	48.4	165	479	816	891	5.269

示す。試験体は、断面の直径が 100mm の円柱形状とし、試験体の内部には断面の中央部分に一边 10mm のアクリル製の角棒を設置した。アクリル棒には、軸圧縮力作用時に生じる試験体各部の局所的なひずみとその軸方向の分布を測定するために、40mm 間隔でひずみゲージ（検長：2mm）を貼付した。また、アクリル棒はコンクリートとの付着を良くし一体性を確保するために、異形に加工したものを用いた。なお、アクリル棒を用いたこの測定法は、既往の研究²⁾で提案されたものであり、他のコンクリート試験体や RC 部材などへの適用例^{3),4),5),6)}も報告されており、局所的なひずみを精度よく測定できることが確認されている。

表-1 に試験体一覧を示す。本研究では、試験体の寸法と使用コンクリートの圧縮強度が実験結果に及ぼす影響を見るために、試験体高さ H を 200mm, 400mm, 600mm の 3 種類、材齢 28 日におけるコンクリートの目標圧縮強度を 36MPa (F36 シリーズ), 54MPa (F54 シリーズ) の 2 種類に設定し、計 6 種類の試験体を作製した。試験体は上面側からコンクリートを縦打ちで打設して作製し、また、試験体の両端面は超硬石膏にてキャッピングを施すことで平滑に仕上げた。表-2 に使用したコンクリートの調合を示す。

2.2 測定・制御システム

本研究では、荷重や変位に代わる載荷時の制御対象として破壊の局所化領域におけるひずみ量に着目し、これをフィードバック信号としてコンクリート試験体の圧縮破壊実験時の載荷を制御する測定・制御システムの構築を行った。図-2 に本システムの概要を示す。このシステムは、アムスラー型万能試験機（容量：1000kN）とデータ集録・信号調節器、およびパーソナルコンピュータ (PC) によって閉回路機構（クローズド・ループ）を構成したもので、1 回のループごとに、(1) ひずみの測定、(2) 制御対象とするひずみゲージのチャンネル (CH) の選択、(3) フィードバック信号の出力、(4) 試験機のストロークの調節、の順に実行されるように設定した。制御方法は選択された CH のひずみを一定の速度で増加させる定速制御とした。ひずみの定速制御は試験機の制御モードを用いて行い、データ集録・信号調節器からの出力信号の大きさと試験機側の設定値を調節することで、ひずみ速度を 200 μ /min に設定した。また 1 ループあたりの測定・制御にかかる時間を 0.1~0.2 秒とした。

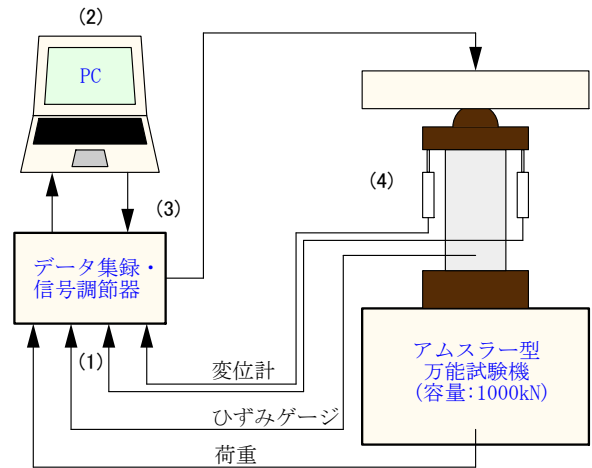


図-2 測定・制御システム

本システムを用いたコンクリートの一軸圧縮破壊実験では、制御対象とするひずみゲージの CH を適切に選択することが重要となる。各試験体に対する載荷は、まず F36 シリーズについて実施し、この結果を踏まえて F54 シリーズについて行った関係から、この 2 つのシリーズでは CH 選択の際の判定基準が若干異なっている。F36 シリーズでは、破壊の局所化領域をひずみの大きさと判断することにし、1 回のループごとその時点で最も大きい値を示したひずみゲージの CH を選択し、そのひずみ量をフィードバック信号として試験機に出力することとした。F54 シリーズでは、一定時間におけるひずみ量の増分を測定し、それを CH 選択の判定基準に加えることとした。具体的には、判定基準の初期設定は F36 シリーズと同様であり、載荷の初期段階ではひずみの最大値を選択するが、ある CH のひずみ量の増分が 2 秒間で 25 μ を超えた時点でその CH に制御対象を切り替えるように設定した。この場合のフィードバック信号は切り替えた時点の出力値に、制御対象 CH の切り替え以降のひずみ量を加えたものとした。この判定基準の変更は F36 シリーズの試験体の載荷時に、縦ひび割れの進展によってその時点で最大値ではない CH のひずみ量が急速に増加し、制御が不安定になるケースが見られたために行なったものである。

2.3 測定項目と載荷状況

載荷時の測定項目は、ひずみ、変位、荷重の 3 種である。ひずみはアクリル製棒に貼付したひずみゲージによって測定した。それぞれの試験体におけるひずみゲ-

ジの点数は、試験体高さHによって異なり、H=200mm, 400mm, 600mmの順にそれぞれ5点、10点、15点である。また、載荷板間の四隅に変位計を設置することによって試験体全体の変位を測定した。載荷時にはより純粋な一軸圧縮状態を実現するために、載荷板と試験体端面の間にテフロンシート (t=0.05mm) とシリコングリースで作製した減摩材を挿入し摩擦拘束の影響の軽減を図った。図-3に載荷時の状況を示す。

なお、各試験体と同一条件で圧縮試験用のテストピース (φ100×200 mm) を作製し、試験体の載荷日近くでコンクリートの圧縮強度 f'_c を測定した。



図-3 載荷状況

3. 実験結果

本研究で提案した測定・制御システムの適応性について検討するために、各試験体の実験結果について、最大圧縮応力、相対応力-ひずみ関係、ひずみ分布の推移と破壊状況、および相対応力-変位関係を示す。

3.1 最大圧縮応力

表-3に各試験体の最大圧縮応力を示す。同一コンクリートを使用した高さが異なる試験体同士の比較からは、明確な相違は見受けられなかった。一方、同表に併記したテストピースによるコンクリートの圧縮強度と試験体の最大圧縮応力を比較してみると、すべての試験体の最大圧縮応力が圧縮強度を下回っていることが分かる。これは既往の研究³⁾でも指摘されているように、載荷板と試験体端面の間に減摩材を挿入したことによって摩擦拘束が軽減された結果であることが主な要因だと考えられるが、既往の研究における結果 (文献3)で報告されている σ_{max}/f'_c の平均値は約0.95)よりもその低下率が上回っていることから、ひずみが進行しやすい最大圧縮応力近傍での加力の調節をひずみ量を制御対象としたフィードバック制御で行なったことが影響して、本実験では荷重の上昇が抑えられた可能性があるものと考えられる。

3.2 相対応力-ひずみ関係

図-4に試験体F36-400を例として、コンクリート試験体の各部における応力-ひずみ関係の実験結果を示す。ここに、相対応力は載荷時の荷重から求めた応力 σ を最大圧縮応力 σ_{max} で除して表示したものであり、ひずみはそれぞれのひずみゲージによる測定値である。すべての試験体についてこのような十分に応力が低下した段階までの結果が得られたわけではないが、局所化領域のひずみ量をフィードバック信号とする本システムは、最大圧縮応力以降も含めた全体の挙動を測定・制御できることが分かる。

各部の相対応力-ひずみ関係は、最大圧縮応力以降においてその相違が明確に現れており、応力の低下とともにひずみが進行する箇所 (CH1, CH2) といった減少

表-3 各試験体の最大圧縮応力

試験体名称	最大圧縮応力 σ_{max} (MPa)	圧縮強度 f'_c (MPa)	σ_{max} / f'_c
F36-200	31.1	34.3	0.91
F36-400	26.8		0.78
F36-600	32.7		0.95
F54-200	58.9	62.6	0.94
F54-400	54.5		0.87
F54-600	54.4		0.87

した後に増加に転じる箇所 (CH3~CH7), および最終状態に至るまでひずみが減少し続ける箇所 (CH8~CH10) とおおまかに3タイプに分かれた。また、ひずみが減少から増加に転じる時の応力は、CH3からCH7にかけて徐々に低下しており、この試験体の損傷が上方から下方に向けて伝播していく様相が読み取れる。この現象は、一方向繰返し載荷によって測定を行った既往の研究成果³⁾とも符合するものである。

図-5に試験体F36-400とF54-400について、載荷時にフィードバック信号として試験機に出力したひずみ量の推移を制御対象として選択されたCHとともに示す。先にも述べたように、試験体F36-400はCH選択の判定基準をひずみの最大値としたものであり、試験体F54-400はひずみの増分を判定基準に加えたものである。いずれの結果においても、フィードバック信号は全体としてはほぼ一定の傾きで増加しており、選択されたCHのひずみ速度をおおよそ200 μ /minで制御できていることが分かる。

試験体F36-400の結果では、制御CHがCH1→CH3→CH4と移り変わっており、先の図-4と対応したものとなっている。なお、この試験体の目視観察による破壊の進行状況は、試験体最上部に発生したひび割れが下方に向かって徐々に進展していくものであった。

また、試験体F54-400における制御CHの移り変わりはCH10→CH1→CH8→CH10→CH9→CH8のように

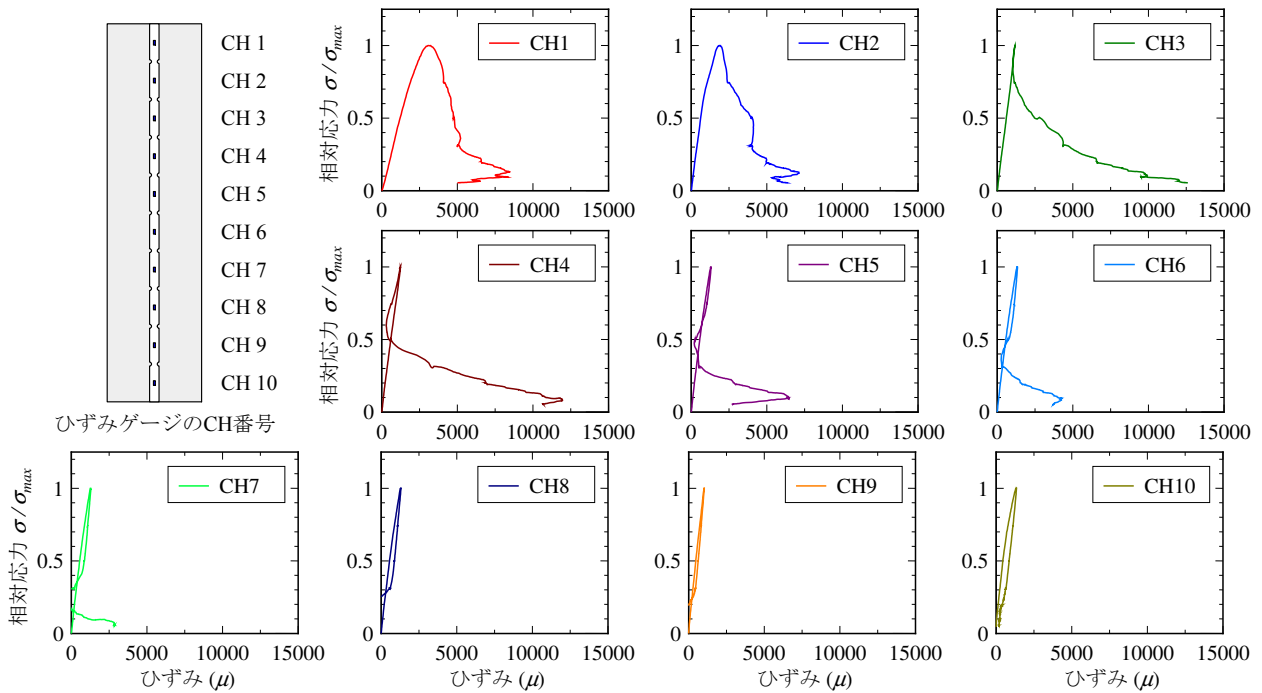
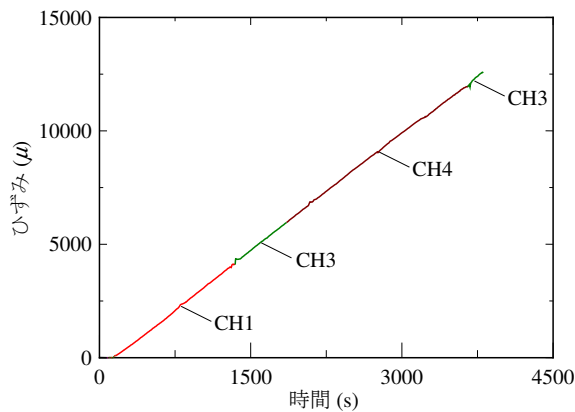
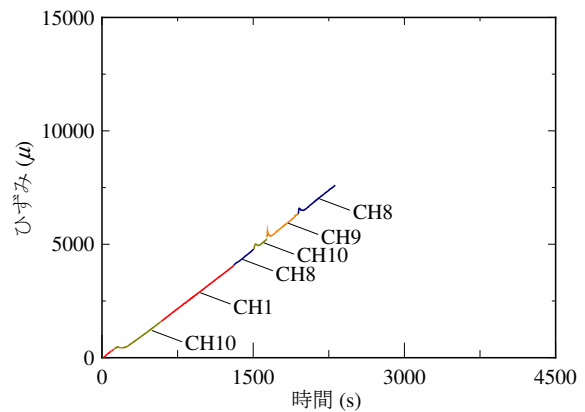


図-4 試験体各部の相対応力-ひずみ関係 (試験体 F36-400)



(a) 試験体 F36-400



(b) 試験体 F54-400

図-5 フィードバック信号としたひずみ量の推移

なっているが、このうち CH1 まではひずみの最大値として選択されたものであり、これ以降の CH は 2 秒間におけるひずみの増分が 25μ を超えたことによって選択されたものである。CH8 が制御対象となった以降のフィードバック信号の動きを詳しく見てみると、CH が切り替わった直後にはひずみが大きく増加し、その後に除荷されて本来のひずみ速度での载荷に戻るような傾向を繰り返していることが確認できる。このような動きは、F54 シリーズで用いた制御 CH の判定方法では、ある CH のひずみ速度が増加し始めてから制御 CH として選択されるまでに、ひずみの増分を測定するための若干のタイムラグがあることに起因するものであるが、以上の結果からひずみの増分を CH 選択の判定基準としたことによって、制御を不安定にさせるひずみ量の急激な増加が抑えられ、このことによって载荷が継続して行なわれていることが分かる。

3.3 ひずみ分布の推移と破壊状況

図-6 に各試験体の最大圧縮応力以降におけるひずみ分布の推移と最終破壊状況を示す。各試験体のひずみ分布は、最大圧縮応力 σ_{max} 時点のものを青丸で示し、それ以降は σ_{max} を基準に応力レベルで 10% 刻みに表示してある。このうち試験体 F54-600 の実験では、他の試験体と比較し得るほど十分に応力が低下するまでの結果は得られていないが、その他の試験体ではいずれも最大圧縮応力あたりからひずみ分布に偏りが見られはじめ、応力が低下するにしたがってその偏りがより明確になっている。また、同一のコンクリートで作製した試験体のひずみ分布を見比べてみると、最大圧縮応力時点のひずみ分布には試験体によって多少のばらつきはあるものの全般的にはひずみの大きさは同程度となっている。最大圧縮応力以降はひずみの偏りに起因した、いわゆる破壊の局所化領域が試験体の高さに関わらず、ほぼ同程度の長

さにわたって形成されていることが分かる。なお、各試験体の目視による破壊状況の推移は、いずれも最初に試験体上部もしくは下部に生じた縦ひび割れが伸展し、最終状態に至るものであった。

3.4 相対応力-変位関係

図-7に各試験体の相対応力-変位関係を示す。ここに変位は4つの変位計から得られた測定値を平均したものと、ひずみゲージを貼付した位置から上下20mmの範囲でひずみが一定であると仮定して、ひずみゲージによる測定値を高さ方向に渡って積分して求めたものを各試

験体について併記した。また、変位計の平均値は載荷初期の原点補正を施し、ひずみの積分値の剛性に対応させて表示してある。これらの結果から、全般的に最大圧縮応力以降では両者の変位に相違が見られるものの、ひずみゲージによる測定値は試験体全体の变形挙動をおおむね捉えていると言える。また、各試験体の最大圧縮応力以降の挙動について見てみると、その軟化勾配は、いずれの測定方法によるものも同一圧縮強度のコンクリートでは試験体の高さが大きい方が、また同一寸法のコンクリートでは圧縮強度の高い方が大きくなっており、試験体

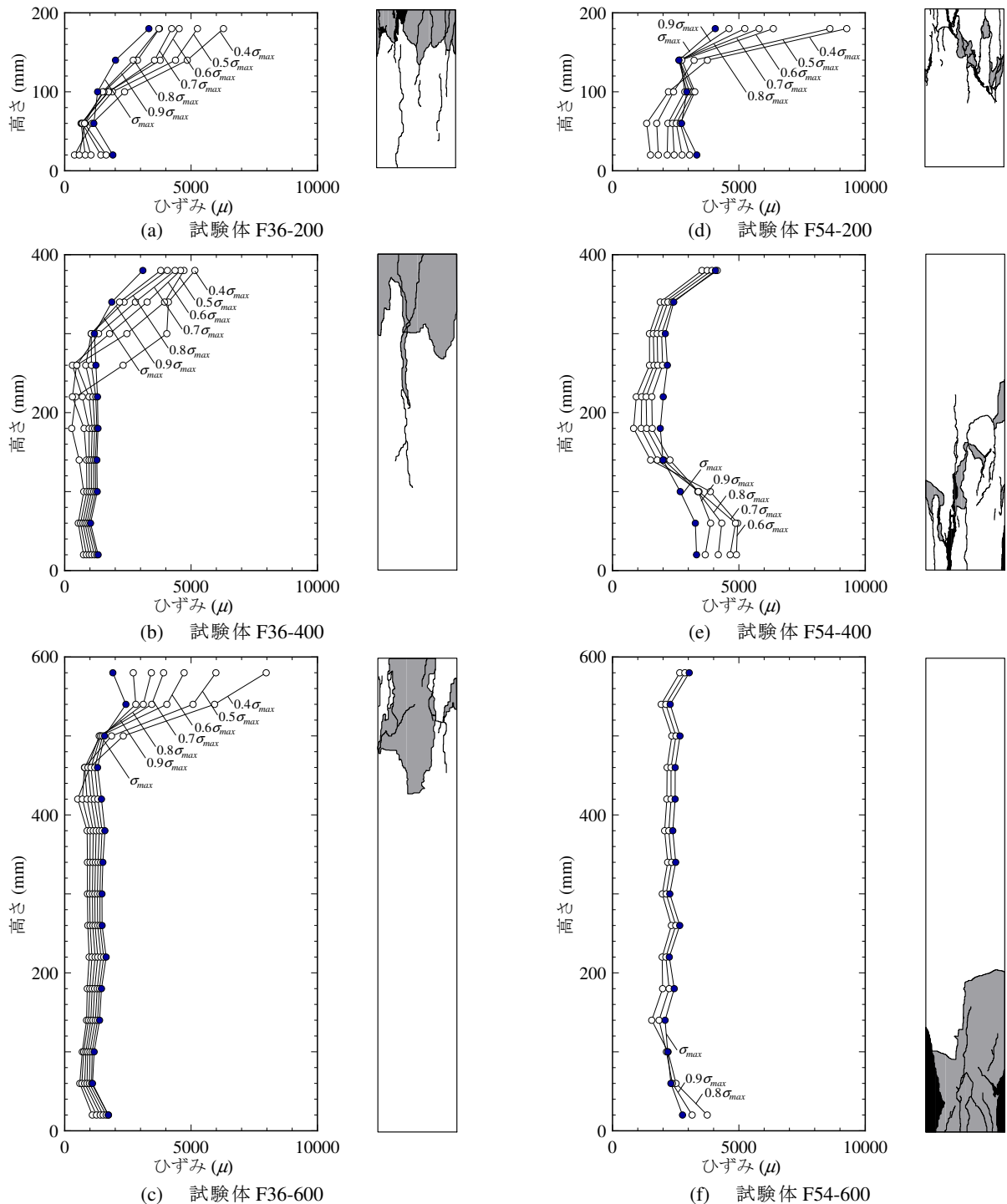


図-6 各試験体のひずみ分布と破壊状況

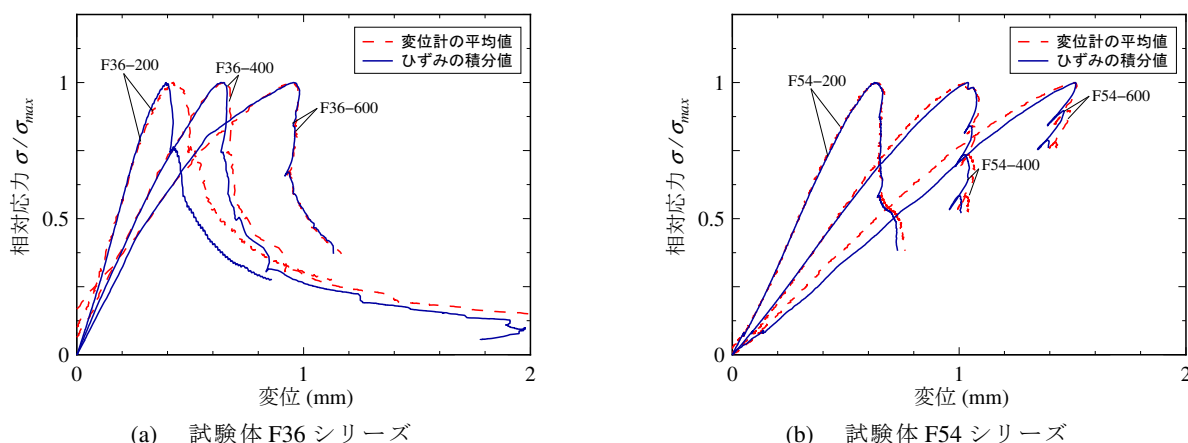


図-7 各試験体の相対応力-変位関係

F36-600, F54-400, F54-600 では最大圧縮応力以降で若干の変位の減少が見られた。本システムはこのような荷重-変位関係においてスナップバック挙動を呈するような場合に対しても機能していることが分かる。

ただし、図からも分かるように、特にF54シリーズにおいて応力レベルが十分に低下していない段階で制御が不安定になり荷重が終了している。この原因の一つとしては、使用コンクリートの圧縮強度が高いこと、および本実験で用いた試験機の剛性が低いこと等の影響によって、荷重の制御を行なうことが難しくなっている点を挙げることができる。ただし今回の実験の結果、制御が不安定になる場合には局所化領域におけるいくつかのCHのひずみ量が急激に増加し、これを抑えきれていなかったことが明らかになったため、試験体内部の各点におけるひずみ量の測定値を基にフィードバック信号を任意に設定できる本システムの特長を生かし、例えば、局所化領域内にあるそれぞれのCHのひずみ量を包括的に制御対象とするようなフィードバック信号を設定することで、制御が不安定になるような状態を回避し、安定した荷重を行なうことができるのではないかと考えている。

4. まとめ

本研究では、コンクリート試験体の一軸圧縮破壊実験を対象として、破壊の局所化領域における軸方向のひずみ量を制御対象として荷重を行うフィードバック制御を用いた測定・制御システムを提案し、このシステムを用いた実験を行った。実験の結果得られた知見を以下に示す。

(1) 荷重時に破壊の局所化領域内におけるひずみ量を適切に選択し定速制御することで、最大圧縮応力以降のコンクリート試験体の挙動を単調荷重に近い状態で測定できる可能性を示した。

(2) 本研究で構築した測定・制御システムは荷重-変位関係においてスナップバック挙動を呈するような場合に対しても機能することを明らかにした。

著者等は今後、より安定した測定・制御を実現し得る

ようフィードバック信号の設定方法などについて更なる検討を加えシステムを発展させるとともに、手動で荷重を行うにはかなりの熟練度を必要とすることが予想される高強度コンクリートを含め、種々の圧縮強度を有するコンクリート試験体を対象にこのシステムを用いた荷重実験を行い、本システムの適応性とコンクリートの圧縮破壊性状についての検討を行う予定である。

謝辞

本研究の一部は、平成18,19年度文部科学省科学研究費補助金(若手研究(B)・課題番号:18760410・研究代表者:越川武晃)によりました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 小柳治, 六郷恵哲, 大野定俊: コンクリート供試体の下降域を含む荷重-変位曲線の自動計測システム, 土木学会論文集, No.354/V-2, pp.119-126, 1985.2
- 2) 平井圭, 中村光, 檜貝勇: 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, 1995
- 3) 渡辺健, 丹羽淳一郎, 横田弘, 岩波光保: 圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp.197-211, 2003.2
- 4) 藤掛一典, 篠崎敬一, 大野友則, 水野淳, 鈴木篤: 急速一軸圧縮荷重を受けるコンクリートのポストピーク挙動に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.627/V-44, pp.37-54, 1999.8
- 5) 秋山充良, 渡邊正俊, 阿部諭史, 崔松涛, 前田直己, 鈴木基行: 一軸圧縮を受ける高強度RC柱の破壊性状および力学的特性に関する研究, 土木学会論文集E, Vol.62, No.3, pp.477-496, 2006.8
- 6) 立松博, 中村光, 檜貝勇: 柱基部におけるコンクリートの圧縮破壊領域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.19, No.2, pp.897-902, 1997