

機関番号：10101

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760426

研究課題名(和文) 破壊進行領域の位置標定システムを用いたコンクリートの自動圧縮破壊
実験手法の高度化研究課題名(英文) Development of Automatic Compression Test Method of Concrete Specimen
using Source Location System

研究代表者

越川 武晃 (KOSHIKAWA TAKEAKI)

北海道大学・大学院工学研究院・助教

研究者番号：10399983

研究成果の概要(和文)：コンクリートの圧縮破壊性状の定量評価を目的として、高度化した実験手法を用いてコンクリート試験体の一軸圧縮破壊実験を実施し、圧縮破壊時の試験体の変位、ひずみ、ひずみの軸方向分布、およびAEを同時計測した。得られた実験結果を整理・分析し、コンクリートの圧縮軟化挙動のモデル化を行い、圧縮軟化曲線モデルとひずみ軟化曲線モデルを提案した。提案モデルが実験結果の圧縮軟化挙動をよく再現できることを示した。

研究成果の概要(英文)：To evaluate the fracture properties and localization effects of concrete, uniaxial compression tests of concrete specimens were conducted using feedback control test method. Based on the test results, two numerical models of strain softening behavior of concrete in compression were proposed. The accuracy of the proposed models was illustrated by comparing the behavior of the models with the results of experiments.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：建築構造学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：AE、位置標定、フィードバック制御、圧縮破壊、コンクリート、ポストピーク、
圧縮軟化特性、ひずみ

1. 研究開始当初の背景

一軸圧縮力を受けるコンクリートの挙動は、圧縮強度以前と以後で大きく異なることが知られている。これは、圧縮強度以前ではコンクリートは軸方向にわたって一様な圧縮ひずみ状態となるのに対して、圧縮強度以後のポストピーク域に入るとある特定の範囲においてひずみの増加が見られ、それ以外の部分では除荷に転じるという、いわゆるひずみ(破壊)の局所化現象を呈するという特徴があるためである。

コンクリートの局所化現象に関しては、円柱もしくは角柱形状の試験体を用いたそれまでの研究成果によって、(1)同一の調合・断面積を有するコンクリートであれば、局所化が生じる範囲(局所化領域長さ)は試験体の長さによらずほぼ同程度になること、(2)局所化領域における損傷によって消費されるエネルギー(圧縮破壊エネルギー)は材料固有の物性であること、等が指摘されている。近年では、コンクリートの圧縮破壊に関する局所化領域長さや圧縮破壊エネルギーとい

ったパラメータを、従来行われてきた目視観察やコンクリート全体の変位によって推定する方法から一段階進めて、より直接的に計測しようとする研究が展開されている。これらの研究では、一定間隔でひずみゲージを貼り付けたアクリル製棒をコンクリートの内部に埋め込んだ試験体を用いて手動による一方向繰り返し圧縮荷重実験を行い、最終的な圧縮破壊に至るまでの試験体各部の局所的なひずみとその軸方向の分布の計測を実現している。

著者は上記のようなひずみゲージ付アクリル棒を埋め込んだ試験体を対象として、特に手動制御による荷重が困難な高強度コンクリートのポストピーク挙動の安定した計測・制御を実現することを目的に、フィードバック制御を用いた一軸圧縮破壊実験を行っていた。この実験手法は、局所化領域におけるひずみの挙動に着目したものであり、多点のひずみゲージの中から局所化領域にある一点を選択し、そのひずみ量を一定の速度で単調増加させるように実験時の荷重を制御する、というものである。実験は制御対象とするひずみゲージの選択方法（局所化領域の判定方法）の指標として、それまで（1）ひずみ量の大きさ、と（2）一定時間におけるひずみ量の増分の大きさ、を採用したケースについての検討を行っていたが、いずれのケースにおいてもある程度のポストピーク挙動の計測・制御は実現できたものの、種々の強度や寸法を有する試験体すべてにおいて十分に荷重が低下した段階までの結果が得られたわけではなかった。これは、実験時に徐々に破壊が進行する局所化領域を的確には捉えきれなかったことに一因があるものと考えられ、本実験手法の更なる高度化が課題であった。

2. 研究の目的

以上の課題に対して、本研究では、コンクリート内部の破壊現象を捉えることが可能なアコースティック・エミッション（AE）計測を一軸圧縮破壊実験時に併用して実施し、AE発生位置の標定をリアルタイムで行うことで圧縮破壊の進行領域を特定するとともに、この領域にあるひずみゲージを制御対象とする新たな自動圧縮破壊実験手法を構築する。本研究は、この手法を用いることで、高強度コンクリートのポストピーク挙動のより安定した計測・制御を実現しようとするものである。また本研究では、この実験手法を用いて種々の圧縮強度を有するコンクリート試験体の一軸圧縮破壊実験を実施し、ポストピーク挙動を経て最終的な破壊に至るまでの試験体の変位、ひずみ、ひずみの軸方向分布、および AE を同時計測することによって、

- (1) コンクリートの局所化現象・圧縮破壊性状とコンクリート内部の空間的な損傷過程の関係性を明らかにする
 - (2) 種々の圧縮強度を有するコンクリートの局所化領域長さや圧縮破壊エネルギーの定量化を図る
- ことを主な目的とする。

3. 研究の方法

(1) AE計測による圧縮破壊進行領域のリアルタイム位置標定システムの構築を行う。AE発生位置の標定は、AEが損傷の進展部から発生することを利用し、2個以上のAEセンサを用いて各センサに到達した時間差から発生位置を特定するものである。本研究では、コンクリート内部の空間的な位置標定を行うために、4つのAEセンサをコンクリート試験体の表面に配置してAEの計測を行う。各センサからの信号は、AE用プリアンプとAE用メインアンプを介して増幅後にAE計測装置で集録し、パーソナルコンピュータ（PC）に取り込む。AE発生位置の標定に関するデータ処理はPC上で行う。ここでは、位置標定システムを自動圧縮破壊実験手法に組み込むことを念頭に置き、AEの計測値とひずみや変位の計測値との同期性を考慮して、データ処理用のプログラムを作成する。

(2) リアルタイム位置標定システムを組み込んだ新たな自動圧縮破壊実験手法を構築する。荷重試験機とデータ集録・信号調節器、およびPCによって閉回路機構（クローズドループ）を構成した従来のフィードバック制御を用いた実験手法とPC上で位置標定システムを統合し、位置標定システムとひずみの計測値によって特定された圧縮破壊進行領域の結果に基づいて制御対象とするひずみゲージを選択するように、PC上の計測・制御プログラムに修正を加える。位置標定システムの精度によっては、圧縮破壊の進行領域を大まかにしか把握できない可能性もありえるため、これに対応できるように複数点のひずみゲージをまとめて制御対象とするような方法も検討に加える。

(3) 圧縮強度と寸法を実験変数としてコンクリート試験体を作製し、新たな実験手法を用いた一軸圧縮破壊実験を行う。ここでは、AE計測・位置標定システムのための最適な計測条件の検討と、新たな実験手法による破壊実験の精度検証も併せて実施する。

(4) 以上で得られた実験結果を整理・分析し、コンクリートの局所化現象・圧縮破壊性状とコンクリート内部の空間的な損傷過程の関係性を明らかにした上で、種々の圧縮強度を有するコンクリートの局所化領域長さや圧

縮破壊エネルギーの定量化を図る。

4. 研究成果

(1) AE 計測による圧縮破壊進行領域のリアルタイム位置標定システムの構築を行い、既提案の実験手法に組み込んだ。普通強度のコンクリート試験体に対する予備実験の結果から、位置標定結果とひずみゲージによる圧縮破壊領域の測定結果におおよその対応関係が見られることが確認できたが、AE の位置標定結果は制御に直接反映させるほどの精度を見込めなかったことから AE は計測にとどめ、ここでは圧縮破壊領域にある複数のひずみゲージの計測値に基づいて制御を実行し得るように本実験手法における制御の基本部分に拡張を施して、既提案の実験手法と PC 上で位置標定システムを統合した。

(2) 高強度コンクリートを含めた 4 種類のコンクリート試験体の一軸圧縮破壊実験を行った。試験体には、ひずみゲージ付きの亚克力棒を埋め込んだ円柱形状の試験体を用い (図 1 参照)、試験体高さ H と試験体直径 D の比 (H/D) を主な実験変数とした。新たな実験手法によって、圧縮強度の異なるいずれのコンクリート試験体においても、十分に耐力が低下した段階までの変位、ひずみ、ひずみの軸方向分布、および AE を同時計測でき、コンクリートの圧縮軟化性状に関する有用な実験データを得ることができた。

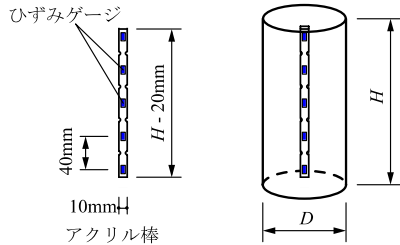


図 1 コンクリート試験体

(3) 種々のコンクリートの圧縮破壊性状を定量的に評価することを目的として、コンクリートの圧縮軟化挙動のモデル化を行った。モデル化に際してはコンクリートの局所化現象を考慮して、実験結果における各試験体の応力-ひずみ関係 ($\sigma-\varepsilon$ 関係)、応力-塑性変形関係 ($\sigma-\delta_p$ 関係)、ポストピークエネルギー-塑性変形関係 ($G-\delta_p$ 関係)、の 3 つの関係の傾向について整理・分析し、圧縮破壊エネルギーをパラメータとする圧縮軟化曲線モデルを構築した (図 2 参照)。ついで、このモデルを実験結果に適用し (図 3 参照)、それぞれの試験体の圧縮破壊エネルギーの推定を行った。さらに、局所化領域長さに関する検討を行い、任意の応力段階における局所化領域長さの推定式を導いた。

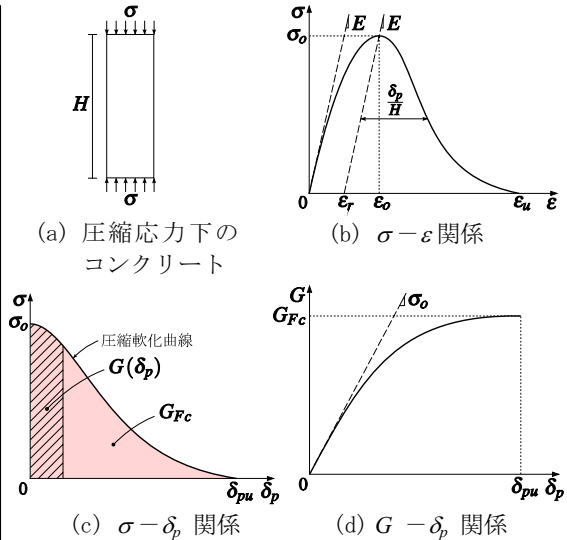


図 2 圧縮軟化曲線のモデル化の概要

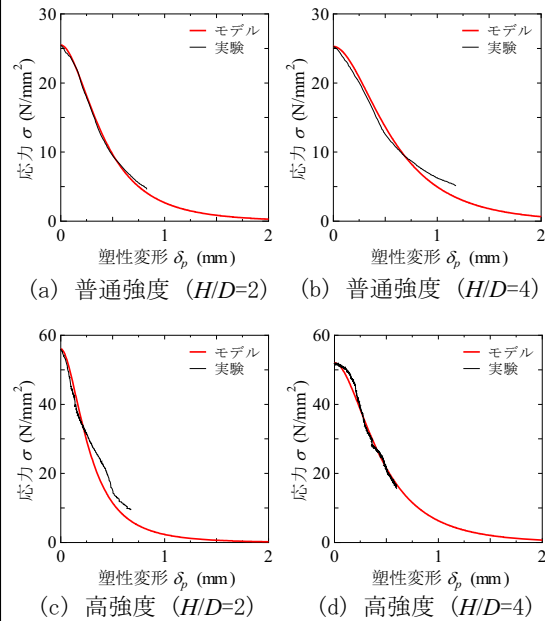


図 3 圧縮軟化曲線の比較

(4) 以上のモデル化の考え方をさらに一段階進めて、局所化領域における応力-ひずみ関係を対象として、ひずみ軟化曲線のモデルを構築した (図 4 参照)。ここでは、有限要素解析の構成則として用いることを想定し、応力-ひずみ関係 ($\sigma-\varepsilon$ 関係) とその曲線下の面積 g の関係に基づいて、圧縮破壊エネルギーと局所化領域長さをパラメータとするモデル化を行った。このモデルでは、パラメータのうち局所化領域長さを調節することによって、解析結果にみられる要素寸法の依存性を軽減することが可能である。また、このモデルが実験結果の圧縮軟化挙動を実際に近い形で再現できることを明らかにした (図 5 参照)。

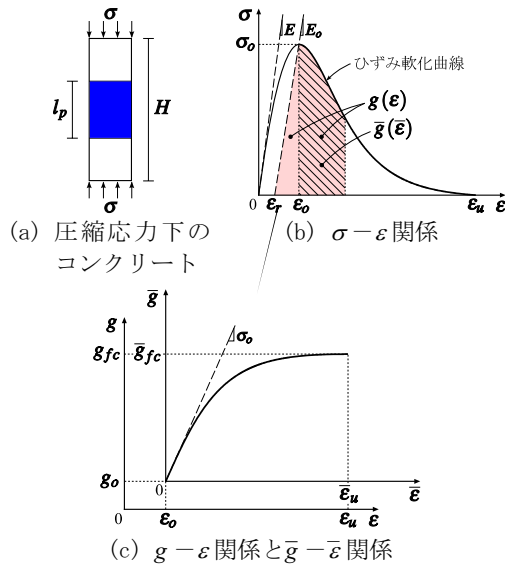


図4 ひずみ軟化曲線のモデル化の概要

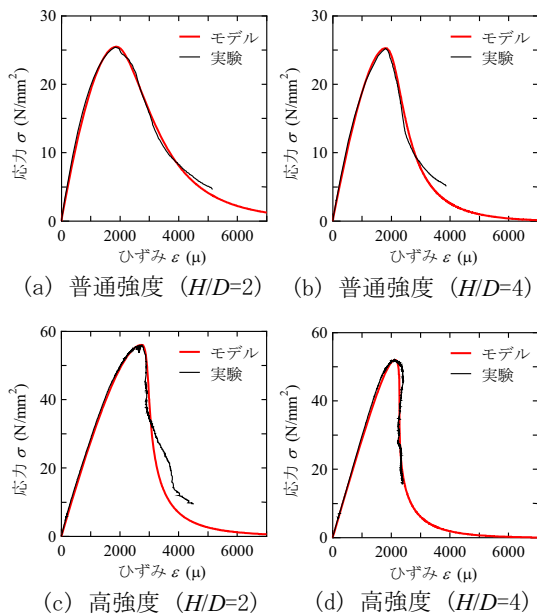


図5 ひずみ軟化曲線の比較

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

- ① 越川武晃, 村松慎也, 長谷川拓哉: 圧縮破壊エネルギーを考慮したコンクリートの圧縮軟化曲線のモデル化, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol. 33, 2011 (掲載決定)
- ② 越川武晃, 長谷川拓哉: コンクリートの圧縮軟化曲線のモデル化に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No. 84, 2011 (掲載決定)

- ③ 村松慎也, 越川武晃, 齊藤隆典, 長谷川拓哉: コンクリートの一軸圧縮軟化性状の定量化に関する検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No. 83, pp. 81-84, 2010
- ④ 高谷真実, 越川武晃, 齊藤隆典: 積分型非局所損傷理論を用いたコンクリートの一軸圧縮挙動解析, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No. 83, pp. 77-80, 2010
- ⑤ 村松慎也, 越川武晃, 齊藤隆典, 上田正生, 菊地優: 一軸圧縮力を受けるコンクリートの破壊性状と軟化特性, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No. 82, pp. 99-102, 2009

[学会発表] (計4件)

- ① 越川武晃, 長谷川拓哉: 圧縮破壊エネルギーを考慮したコンクリートのひずみ軟化曲線のモデル化, 2011年度日本建築学会大会(関東)学術講演会, 2011年8月23日~25日, 早稲田大学(東京都) **確定**
- ② 越川武晃, 村松慎也, 齊藤隆典, 長谷川拓哉: コンクリートの一軸圧縮軟化特性に関する実験的研究(その1)実験概要および実験結果, 2010年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会, 2010年9月9日~11日, 富山大学(富山市)
- ③ 村松慎也, 越川武晃, 齊藤隆典, 長谷川拓哉: コンクリートの一軸圧縮軟化特性に関する実験的研究(その2)圧縮軟化特性値の検討, 2010年度日本建築学会大会(北陸)学術講演会, 2010年9月9日~11日, 富山大学(富山市)
- ④ 越川武晃, 村松慎也, 齊藤隆典, 菊地優: 一軸圧縮力を受けるコンクリートの軟化特性に関する検討, 2009年度日本建築学会大会(東北)学術講演会, 2009年8月26日~29日, 東北学院大学(仙台市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

越川 武晃 (KOSHIKAWA TAKEAKI)
北海道大学・大学院工学研究院・助教
研究者番号: 10399983

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし