

独立行政法人港湾空港技術研究所

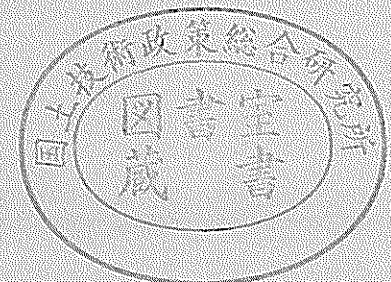
港湾空港技術研究所 報告

REPORT OF
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH
INSTITUTE

VOL.42 NO.3 September 2003

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN

INDEPENDENT ADMINISTRATIVE INSTITUTION,
PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE



港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 巻 第 3 号 (Vol. 42, No. 3), 2003 年 9 月 (September 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法
.....岩波 光保・渡辺 健・横田 弘・二羽 淳一郎 1
(Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods
..... Mitsuyasu IWANAMI, Ken WATANABE, Hiroshi YOKOTA, Junichiro NIWA)
2. 触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究
.....平林 丈嗣・山本 恭・酒井 浩・秋園 純一・内海 真 33
(Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powerd construction machine
..... Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Junnichi AKIZONO, Makoto UTSUMI)
3. 強潮流海域における水中観測システムの研究
(第 1 報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)
..... 酒井 浩・田中 敏成 57
(Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current
(1st Report;The basic System and Results of the Motion Simulation)
..... Hiroshi SAKAI, Toshinari TANAKA)
4. 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築
..... 河合 弘泰・川口 浩二・橋本 典明 85
(Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay
..... Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Noriaki HASHIMOTO)
5. 模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価
..... 安田 誠宏・平石 哲也 111
(Experimental Risk Assessment of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)

港湾空港技術研究所報告 (REPORT OF PARI)

第 42 巻 第 3 号 (Vol. 42, No. 3), 2003 年 9 月 (September 2003)

目 次 (CONTENTS)

1. コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法
.....岩波 光保・渡辺 健・横田 弘・二羽 淳一郎 1
(Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods
..... Mitsuyasu IWANAMI, Ken WATANABE, Hiroshi YOKOTA, Junichiro NIWA)
2. 触像を用いた油圧汎用施工機械の遠隔操作に関する研究
.....平林 丈嗣・山本 恭・酒井 浩・秋園 純一・内海 真 33
(Research on Tele-operation with Haptic Image for hydraulic powerd construction machine
..... Taketsugu HIRABAYASHI, Takashi YAMAMOTO, Hiroshi SAKAI, Junnichi AKIZONO, Makoto UTSUMI)
3. 強潮流海域における水中観測システムの研究
(第 1 報 ; システムの基本構成と基礎運動シミュレーション)
..... 酒井 浩・田中 敏成 57
(Study of the Underwater Observation System in Fast Water Current
(1st Report;The basic System and Results of the Motion Simulation)
..... Hiroshi SAKAI, Toshinari TANAKA)
4. 台風による内湾の波浪・高潮の双方向結合推算モデルの構築
..... 河合 弘泰・川口 浩二・橋本 典明 85
(Development of a Storm Surge Model Coupled with a Wave Model for Typhoon-caused Wave and Current in a Closed Bay
..... Hiroyasu KAWAI, Koji KAWAGUCHI, Noriaki HASHIMOTO)
5. 模型実験による臨海都市部の津波氾濫のリスク評価
..... 安田 誠宏・平石 哲也 111
(Experimental Risk Assessment of Tsunami Inundation in Coastal Urban Area
..... Tomohiro YASUDA, Tetsuya HIRAISHI)

コンクリートの局所的圧縮破壊現象とその評価手法

岩波 光保*・渡辺 健**・横田 弘***・二羽 淳一郎****

要 旨

コンクリートが圧縮力を受けて破壊する場合、ある限られた領域のみに破壊が集中する、すなわち、破壊の局所化が生じることが知られている。これまで、コンクリートの材料特性や形状・寸法が圧縮破壊の局所化に及ぼす影響などが実験的に検討されているものの、そのメカニズムについてはほとんど解明されていない。そこで本研究では、コンクリートの局所的圧縮破壊現象を解明するために、コンクリート試験体の断面形状・寸法や高さ、あるいは圧縮強度を変化させて、一軸圧縮載荷試験を行った。載荷中には、コンクリート内部の局所的なひずみを計測することで、局所破壊領域を同定した。また、コンクリート内部で発生するアコースティック・エミッション(AE)についても計測を行い、AE法による局所破壊領域長さの簡便な推定方法を検討した。さらに、載荷試験が終了したコンクリート試験体のX線CT撮影を行うことで、コンクリート内部のひび割れ発生状況の可視化を試みた。これらの検討結果を踏まえて、局所的圧縮破壊現象を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化を行った。検討にあたっては、コンクリートを載荷とともに破壊が進行する領域と除荷される領域に分割し、それぞれの領域で局所的に吸収されるエネルギーを適切に考慮した。これにより、コンクリートの最大荷重後における力学挙動までも精度良く再現できる構成則を提案した。

キーワード：コンクリート，局所的圧縮破壊現象，構成則，局所破壊領域長さ，アコースティック・エミッション，X線CT法

* 地盤・構造部 主任研究官
** 前 構造強度研究室 客員研究員（東京工業大学大学院博士後期課程）
*** 構造強度研究室長
**** 東京工業大学大学院 教授
〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 独立行政法人 港湾空港技術研究所
電話：046-844-5059 Fax：046-844-0255 E-mail:iwanami@pari.go.jp

Localized Compressive Failure of Concrete and Its Evaluation Methods

Mitsuyasu IWANAMI*

Ken WATANABE**

Hiroshi YOKOTA***

Junichiro NIWA****

Synopsis

Failure of concrete concentrates in the particular zone: the localized compressive failure zone, when uniaxial compressive force applies. It has been investigated how localized compressive failure is influenced by material properties, shapes and dimensions of concrete. However, mechanism of localized compressive failure has not been made clear completely to date. In this study, for comprehending phenomenon of localized compressive failure of concrete, uniaxial compressive loading tests were conducted on concrete specimens with different shapes and dimensions of cross-section, height of specimen, and compressive strength. Local strains in concrete were measured during loading to determine the length of localized failure zone. Acoustic emission signals due to microcracks in concrete were also measured to establish a simple method to estimate the length of localized failure zone. Furthermore, visualization of cracks in concrete was tried to perform by X-ray CT scanning on failed specimens.

Based on these results, a new stress-strain relationship of concrete was formulated in consideration with the localized compressive failure. In the formulation, concrete was separated into failure zone and unloading zone, and the energy absorbed in each zone was appropriately taken into account. Consequently, a new constitutive law of concrete subjected to uniaxial compression was proposed, which enabled to accurately evaluate mechanical behavior of concrete even after the peak load.

Key Words: concrete, localized compressive failure, constitutive law, localized failure zone, acoustic emission, X-ray CT imaging

* Senior Researcher, Geotechnical and Structural Department

** Ex-Visiting Researcher of Structural Mechanics Division

*** Head of Structural Mechanics Division

**** Professor, Tokyo Institute of Technology

3-1-1 Nagase, Yokosuka, Kanagawa 239-0826, Japan

Phone : +81-(0)46-844-5059 Fax : +81-(0)46-844-0255

E-mail: iwanami@pari.go.jp

目 次

要 旨	1
1. まえがき	5
1.1 背景および目的	5
1.2 周辺の研究状況	5
2. コンクリートにおける圧縮破壊の局所化	8
2.1 はじめに	8
2.2 実験概要	8
2.3 実験結果および考察	12
2.4 まとめ	20
3. 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	20
3.1 はじめに	20
3.2 実験概要	21
3.3 荷重試験結果	21
3.4 破壊域における応力-ひずみ関係の定式化	23
3.5 遷移域における応力-ひずみ関係の定式化	27
3.6 除荷域における応力-ひずみ関係の定式化	29
3.7 圧縮強度および破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係の提案	29
3.8 まとめ	30
4. 結 論	30
5. あとがき	31
参考文献	31
記号表	32

1. まえがき

1.1 背景および目的

コンクリートが圧縮力を受けて破壊する場合、ある限られた領域のみに破壊が集中する、すなわち、破壊の局所化が生じることが近年明らかとなってきた¹⁾。一方、引張力またはせん断力を受けるコンクリートにおいても、ひび割れという形で破壊の局所化が生じる。コンクリート中におけるひび割れの発生・進展に関しては、破壊力学を適用することで、解析的な取扱いが可能となっている²⁾。しかしながら、圧縮破壊はある体積をもって生じるため、ひび割れ解析に対して有効な破壊力学をそのまま適用することは難しい。このため、コンクリートの局所的圧縮破壊メカニズムは体系的に明らかにされるまでには至っていない。

しかしながら、これまで、コンクリートの局所的圧縮破壊現象に関する実験がいくつか行われ、有益な知見が蓄積されつつある。例えば、局所破壊領域の寸法は、強度や粗骨材最大寸法といったコンクリートの材料特性、ならびにコンクリートの断面形状・寸法や高さに大きく依存することが、コンクリート内部に埋め込んだアクリル棒に貼付したひずみゲージによる局所ひずみの計測結果から示されている。また、局所的圧縮破壊は、コンクリート全体の力学挙動、特に最大荷重後の挙動に影響を及ぼすことがわかっている。

本研究では、これ以降、載荷試験時における最大荷重をピーク、最大荷重に達するまでの段階をプレピーク、最大荷重到達後の段階をポストピークと呼ぶことにする。

海中にあるコンクリート構造物には、巨大な水圧が常時作用しているため、圧縮材料として用いられるコンクリートには大きな圧縮力が作用する。このような圧縮力を受けるコンクリート部材の設計にあたっては、現在のところ、コンクリートの圧縮破壊は平均的かつ均一的に進展すると仮定して行われており、圧縮破壊の局所化は考慮されていない。今後、コンクリートの局所的圧縮破壊メカニズムが解明されて、これを適切な形で構造解析に取り入れることが可能となれば、同部材の構造設計がさらに合理化される。特に、コンクリートのポストピーク挙動を精度良く解析することが可能となるため、地震力を受ける同部材の吸収エネルギーを考慮した設計が実現される。

そこで本研究では、コンクリートの局所的圧縮破壊のメカニズムを実験的に解明し、局所破壊領域の寸法を定量的に評価する方法を検討した。また、圧縮破壊の局所化を考慮した新しい応力-ひずみ関係を定式化して、設

計への反映方法を検討した。

検討においては、コンクリートの断面形状・寸法や高さ、あるいは圧縮強度を変化させたコンクリート試験体を製作し、その一軸圧縮載荷試験を行った。載荷試験中には、コンクリートの平均ひずみおよび局所ひずみを計測し、局所破壊領域長さを同定した。またあわせて、コンクリート中の微小破壊に起因するアコースティック・エミッション (AE) を計測することで、局所破壊領域長さを簡便に推定するための方法を検討した。さらに、載荷試験が終了したコンクリート試験体のX線CT撮影を行い、コンクリート内部におけるひび割れ発生状況の可視化を試みた。これらの知見を踏まえて、最大荷重後における局所ひずみ挙動やひび割れ発生状況に着目して、コンクリートを破壊域と非破壊域に分割した。さらに、除荷時におけるひび割れ挙動の違いから、非破壊域を除荷域と遷移域に分割した。

続いて、コンクリートの局所的圧縮破壊を構造解析や設計に反映させるために不可欠となる応力-ひずみ関係の定式化を試みた。定式化にあたっては、コンクリートの局所ひずみ挙動により分割された破壊域、遷移域および除荷域ごとに、載荷試験結果を基に、応力-ひずみ関係を設定した。この際、用いるパラメータは、コンクリート試験体の一軸圧縮載荷試験時の最大応力のみとした。各領域ごとに設定した応力-ひずみ関係を、それぞれの寸法比で重み付けして平均化することで、コンクリート全体の応力-ひずみ関係を提案した。提案式による応力-ひずみ関係を載荷試験結果と比較した結果、コンクリートの高さや圧縮強度によらず、両者は非常によく一致した。これにより、コンクリートの最大荷重後までも含めた形で、局所的圧縮破壊を考慮した新しい応力-ひずみ関係を定式化することができた。

1.2 周辺の研究状況

ここでは、本研究を進める上で参考となる既往の研究について簡単に述べることにする。具体的には、破壊力学、コンクリートの局所的圧縮破壊現象、圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係、AE法およびX線CT法を取り上げた。

(1) 破壊力学

破壊力学は、亀裂の力学とも言われ、亀裂を含む構造物の力学挙動、特に亀裂の発生・進展挙動を取り扱うものである^{2),3)}。亀裂が存在すると、その先端には応力集中が生じる。これにより均一場よりも大きな応力が亀裂先端には作用することになり、亀裂が進展する。主に、金属分野で研究が進み、現在では鋼構造物の亀裂進展に伴

う疲労寿命解析なども実用化されている。

これに対して、コンクリートのひび割れを破壊力学を用いて解析しようとした場合、コンクリートが金属材料などと比較してきわめて複雑な複合材料であるため、その適用は容易ではない。最初に、破壊力学がコンクリートに適用されたのは、1960年ごろである。Kaplan⁴⁾が、線形破壊力学パラメータである限界エネルギー解放率を計測したが、ひび割れの進展が均一でないなど、非線形性の強いコンクリートに対しては、破壊力学を適用するのは困難であると考えられた。しかしながら、1970年代になると、Hillerborg⁵⁾らが、仮想ひび割れモデルに基づいて、破壊エネルギーや引張軟化曲線といった概念を確立した。これにより、コンクリート分野における破壊力学は大きく発展し、構造解析、材料評価、ならびに破壊メカニズムの解明などに威力を発揮している。

現在では、これらの破壊力学パラメータに対する標準試験方法に関する検討が精力的に行われているが⁶⁾、これまでの検討はいずれも引張力を受けるコンクリートに対するものである。本研究で対象とした圧縮力を受けるコンクリートに対しては、破壊力学はあまり適用されていない。これは、コンクリートの圧縮破壊は、引張力を受けるコンクリートのひび割れのように、ある特定の位置に破壊が局所化するのではなく、ある体積をもって生じ、かつ複数のひび割れが同時に複雑に進展するため、その適用が困難なためである。

(2) コンクリートの局所的圧縮破壊現象

コンクリートは、セメント、水、細骨材、粗骨材および空隙などから構成されているため、きわめて不均質な材料である。したがって、その破壊過程・メカニズムは非常に複雑である。特に圧縮力を受ける場合、空隙周辺や骨材界面に、応力集中によって微小ひび割れが生じ、これらが進展・連結することで、破壊に至ると考えられている⁷⁾。また、通常の圧縮強度試験は、端面摩擦を含んだ状態で行われるため⁸⁾、理想的な圧縮破壊とはなっていない。このようなことから、コンクリートの圧縮破壊メカニズムについては、いまだ不明確な点が多く残されている。

一方で、近年、コンクリートの圧縮破壊は、平均的かつ均一的に進展するのではなく、ある領域内で局所的に進展するという報告が見られるようになってきた。例えば、コンクリート内部に、ひずみゲージを貼付したアクリル棒を埋設し、これによりコンクリート内部の局所的なひずみ分布を計測した事例がある⁹⁾。これによれば、局所破壊領域長さは、コンクリートの形状・寸法には依存せず、粗骨材最大寸法と圧縮強度に依存し、圧縮破壊の

局所化は、ポストピークで開始されるとされている。また、載荷速度を変化させた実験結果¹⁰⁾によれば、局所破壊領域長さは、載荷速度に依存せず、130~150mmとなるが、圧縮破壊エネルギーは大きく変化するとされている。

断面形状を変化させたコンクリートを用いて、上述の方法と同様の方法で局所破壊領域長さを計測した結果¹⁾についても報告されている。これによれば、コンクリートのひび割れ発生状況の観点から見ると、局所的なエネルギー吸収量が全吸収エネルギーの15%以上を示す領域が局所破壊領域であると結論付けられ、この長さは圧縮強度や断面形状には依存せず、次式のように、コンクリートの断面寸法のみで評価できるとされている。

$$\begin{aligned} L_p / D^* &= 1.36 && ; D^* < 100 \\ &= -3.53 \times 10^{-5} D^{*2} + 1.71 && \\ &&& ; 100 \leq D^* \leq 180 \\ &= 0.57 && ; D^* > 180 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 L_p ：局所破壊領域長さ (mm)、 D^* ：等積正方形の辺長 (mm) である。

また、コンクリート単位体積あたりの圧縮破壊エネルギーに対しては、次式が提案されている。

$$G_{Fc} = 0.86 \times 10^{-1} \times f_c' \quad (2)$$

ここで、 G_{Fc} ：圧縮破壊エネルギー (N/mm²)、 f_c' ：圧縮強度 (N/mm²) である。

以上より、圧縮力を受けるコンクリートの破壊の局所化については、一部検討が始まっているものの、体系的に整理されるまでには至っていない。これまでの知見では、局所破壊領域長さ L_p は、コンクリート断面寸法の0.5~1.5倍程度であること、圧縮破壊エネルギーは圧縮強度に強く依存すること、局所的圧縮破壊現象には、コンクリートの形状・寸法、材料特性、載荷速度あるいは横拘束圧¹¹⁾などが大きく影響することがわかっている。

(3) 圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係

コンクリート構造物の設計や構造解析を精度良く行うためには、コンクリートの構成則を適切に設定する必要がある。特に構造物の地震時解析などの場合には、ポストピークにおける応力下降域に対しても、適切にモデル化しなければならない。圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度、使用骨材の種類、材齢、試験体の形状・寸法、載荷速度、端部拘束、試験機の剛性・球座の有無などの影響を大きく受ける⁹⁾。これまでの多くの検討結果を踏まえて、様々な応力-ひずみ関係が

提案され、設計や解析に用いられている。しかしながら、近年、コンクリートの形状・寸法の違いによって、圧縮破壊の局所化が生じて、応力-ひずみ関係が唯一とならない、いわゆる寸法・形状依存性の存在が指摘されている。すなわち、コンクリートの応力-ひずみ関係には、材料特性と寸法・形状依存性の両方が適切に反映されていなければならない。

これまでに提案された応力-ひずみ関係式の中で、比較的汎用性のあるものに、Popovicsの提案式¹²⁾がある。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \frac{n_a \times \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}}{n_a - 1 + \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right)^{n_a}} \quad (3)$$

ここで、 σ_{max} ：コンクリートの試験体強度 (N/mm²)、 ε_m ：ピーク時ひずみ、 σ ：応力 (N/mm²)、 ε ：ひずみ、 n_a ：実験定数で、以下のとおりである。

$$\begin{aligned} n_a &= 0.0582 \sigma_{max} + 1 && ; \text{コンクリート} \\ &= 0.0214 \sigma_{max} + 1.5 && ; \text{モルタル} \\ &= 12 && ; \text{セメントペースト} \end{aligned} \quad (4)$$

これは、特に低強度のコンクリートの応力-ひずみ関係をかなりの精度で再現できる。しかしながら、高強度コンクリートの脆性的な破壊挙動やポストピーク挙動に対しては、必ずしも十分な精度で近似できるとは言えない。ただし、この式は、直径100mmおよび高さ200mmのコンクリートが一軸圧縮荷重を受けた場合の応力-ひずみ関係を対象としたものであり、コンクリートの形状・寸法の影響は考慮されていない。

一方、圧縮破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係についても、近年検討が始められ、例えば、Series Coupling Modelなどが提案されている¹³⁾。これは、ピークまではコンクリート全体が同様な挙動を示すが、ポストピークではコンクリートが2つの領域に区別され、破壊域では圧縮軟化を示すが、非破壊域では初期剛性と等しい傾きで除荷されるものである。破壊領域長さを50mmとした場合に、実験結果との整合性が良いとされている。

また、ポストピークにおける軟化挙動を破壊力学パラメタである圧縮破壊エネルギーを用いて推定する方法も提案されている^{9),14)}。しかしながら、ポストピークにおける応力下降域を直線で近似しているため、精度が必ずしも高くないのが問題点として挙げられている。

以上より、圧縮力を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係については、これまで多くの研究が行われ、圧縮破壊の局所化を考慮した関係式も提案されるようになった。しかしながら、コンクリートの材料特性と寸法・形状依存性の両方を反映し、かつ十分な精度を有する関係式はまだ確立されていない。

(4) コンクリート内部における破壊挙動の評価方法

コンクリート内部で進行する破壊挙動は、外部から目視で観察することができないため、非破壊的な方法で評価せざるを得ない。ここでは、コンクリートの破壊現象の解明に従来よりしばしば用いられてきたAE法および医療分野での適用が盛んなX線CT法について、その原理と研究の現状について概説する。

a) AE法

アコースティック・エミッション (AE) は、「固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程によって発生する弾性波動現象」と定義されている¹⁵⁾。すなわち、固体材料に外力または変形が作用した場合、それらによる仕事は材料内部にエネルギーとして蓄えられ、それがある限界値に達すると、ひび割れ等の破壊が生じる。このとき、蓄積されたエネルギーの大部分はひび割れ面の形成に消費されるが、一部は光、熱、音などの形態で放出される。AEは、音として放出されるエネルギーのことであり、これを固体材料表面で検出して欠陥評価や材料評価を行おうとするものがAE法である。

AEに関する研究は、1950年代に金属学や岩盤・地震学の分野で開始され、破壊源探査、破壊メカニズムの解明、破壊予知などに応用されてきた。コンクリート材料に対しても、1960年代に検討が始められ、近年では、社会基盤施設の維持管理需要の増大とともに、構造物の欠陥評価や破壊予知への適用が精力的に検討されている。

AEの計測は、固体材料表面に設置したAEセンサによって行われる。しかしながら、固体材料内部の微小破壊に起因するAE信号は微弱であるため、AEセンサによる検出と同時に、プリアンプにて増幅される。増幅されたAE信号には、周波数フィルターがかけられ、有意なAE信号に含まれているノイズが除去される。さらに、メインアンプにて増幅されたAE信号のうち、ある一定レベル(しきい値)以上の振幅を有するAE波のみが、抽出されて記録される。このようにして得られるAE波の波形情報のすべてを記録・保存しておくには、膨大な記録装置と高速処理装置が必要となるだけでなく、あまりメリットがないことも多い。そこで、AE波形の特徴を数値化した波形パラメタに変換して、記録・保存することが実用的

である。代表的な波形パラメタとして、最大振幅値、エネルギー値、継続時間、立上り時間などが、欠陥評価や材料評価、さらには破壊過程・メカニズムの解明に用いられている。

複数のAEセンサを固体材料表面に設置し、あるAE信号が各センサに到達する時間差から、AEの発生位置を標定することができる。地震の震源探査と同様なものである。これにより、固体材料内部における破壊の進展状況を追跡できるだけでなく、破壊過程や破壊メカニズムの解明に向けた貴重な情報を得ることができる。しかしながら、コンクリートにおけるAE発生位置標定の精度はあまり高くない。

b) X線CT法

X線法は、物質中を透過したX線量の多寡から、物質内部の状態や物質の特性を評価しようとするものである¹⁶⁾。X線は、密度が大きい物質ほど吸収されやすい性質があり、X線画像では白く表示される。物質の密度差に起因して、X線画像に濃淡差が生じる。

コンクリート内部のひび割れは外部から目視で確認できないため、その発生・進展状況を直接は把握できない。そこで、X線法を用いて、コンクリート内部のひび割れを可視化しようとする実験が行われている¹⁷⁾。これによると、造影剤などを用いて、適切な撮影条件を設定すれば、コンクリート内部の微小ひび割れについても十分識別可能であるとされている。

X線CT法は、ある断面に多方向からX線を照射し、被写体を透過してきたX線量を計測し、X線の吸収に関する情報などを記録・蓄積し、コンピュータにより再構成することで断層画像を得る手法であり、主に医療分野での適用が盛んである。コンクリート分野では、材料分離の有無の確認のために利用された事例¹⁸⁾があるものの、ほとんど適用されていない。通常X線撮影と異なり、上下の重複による陰のない鮮明な画像が得られ、空間分解能には劣るが、密度分解能には格段に優れるのが特徴である。

2. コンクリートにおける圧縮破壊の局所化

2.1 はじめに

ここでは、断面形状・寸法や高さの異なるコンクリートの一軸圧縮載荷試験を行うことで、局所的圧縮破壊メカニズムを検討し、断面形状・寸法や高さの違いが局所破壊領域の寸法に及ぼす影響を調べた。また、局所化する圧縮破壊領域の寸法を三次元的に評価する方法について検討を行った。

既往の研究⁹⁾では、ひずみゲージを貼付したアクリル棒をコンクリート内部に埋め込むことで、コンクリートの局所的なひずみの発生状況を調べて、圧縮破壊の局所化に関する検討が行われた。しかしながら、この方法によると、載荷試験用コンクリート試験体を製作する段階で、圧縮力が作用する方向にアクリル棒をあらかじめ設置しなければならないこと、コンクリート試験体内部にアクリル棒を設置することで多少なりとも力学挙動に影響する可能性があること、など、計測方法自体に若干の問題点が残されている。

そこで本研究では、より簡便に局所破壊領域長さを推定できる新たな方法として、アコースティック・エミッション (AE) 法を適用することを試みた。その理由として、以下のことが挙げられる。

- ① アクリル棒を埋設する場合と異なり、計測に際しコンクリート自体の力学挙動に全く影響を与えない。
- ② 計測方法が比較的容易であり、任意の形状の構造物に適用が可能である。
- ③ アクリル棒を埋設する場合と異なり、作用する力の方向が不明でも破壊挙動を把握できる。
- ④ ポストピークでも、ある程度コンクリート内部の破壊情報を収集できる。

実験においては、断面形状・寸法や高さの異なるコンクリートの一軸圧縮載荷試験を行い、目視によるひび割れ観察、コンクリート中に埋設したアクリル棒に貼付したひずみゲージによる局所ひずみ計測、ならびにAE計測を行った。これらの結果を総合的に捉えることで、断面形状・寸法や高さの違いがコンクリートの局所破壊領域の寸法に及ぼす影響を調べ、局所的圧縮破壊メカニズムを検討した。また、AE法による局所破壊領域長さ L_p の簡便な推定方法を検討した。

また、医療分野での適用が盛んなX線CT法を載荷試験終了後のコンクリート試験体に適用することで、内部ひび割れの可視化を試みた。可視化されたコンクリート内部のひび割れ発生状況からひび割れ面積やひび割れ長さを画像解析により定量化し、圧縮破壊エネルギーとの関連性を検討した。

2.2 実験概要

ここでは、コンクリートの局所的圧縮破壊現象について検討するために実施した実験の概要を示す。コンクリートの圧縮破壊の局所化に関する既往の研究成果と本研究で得られた実験結果を比較するため、試験体の形状・寸法や載荷条件などは基本的に既往の研究¹⁾と一致させた。

表-1 試験体概要

試験体形状	断面寸法 (mm)	H/D	養生期間 (日)	載荷方法	計測項目	試験体名称
角柱	100×100	4	7	②単調	—	PS10-40.1
					局所ひずみ	PS10-40.ac
	150×150			①繰返し	局所ひずみ	PS15-60
					—	PS15-60.op
				局所ひずみ	PS15-60.ac	
				—	PS15-60.1	
円柱	φ150	4	8	③単調	—	PS15-60.2
				②単調	—	PS15-15.1
					表面ひずみ	C15-60.1
					表面ひずみ	C15-60.2

※ 計測項目において載荷荷重, 圧縮変位量およびAEはすべての試験体で計測した。

表-2 コンクリートの示方配合

粗骨材 最大寸法 G_{max} (mm)	スランブ (cm)	水セメント 比 W/C	空気量 (%)	細骨材率 s/a	単位量 (kg/m ³)					
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G		混和剤 Ad
								5~13mm	13~20mm	
20	8	0.50	2.0	0.45	185	370	799	494	494	—

(1) 試験体

用いた試験体の一覧を表-1に示す。断面寸法が100mmまたは150mmの円柱および角柱コンクリート試験体を10体製作した。既往の研究¹⁾から、破壊の局所化をより明確に再現するため、試験体最大幅Dに対する高さHの比（以降、H/Dと呼ぶ）が4の試験体を9体製作した。そのうちの3体には、既往の研究により提案されている局所破壊領域長さ L_p の推定方法の確認を行うため、ひずみゲージを貼付したアクリル棒をコンクリート内部に埋設した。また、圧縮破壊が局所化しないケースとして、H/D=1の試験体についても、比較のために1体製作した。

使用したコンクリートの配合および使用材料の特性を表-2および表-3に示す。水セメント比W/Cは0.50とし、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。粗骨材最大寸法 G_{max} は20mmとした。コンクリートの型枠への打込みは縦打ちとした。また、表面成型を施した試験体上面の研磨が困難であったために、打設後4時間後に、W/C=0.30のセメントペーストを用いたキャッピング処理¹⁾を施した。打設後、6日間あるいは7日間の水中養生を行った後、載荷試験に供した。

なお、一軸圧縮載荷試験時のコンクリートの圧縮強度 f_c' は34.0N/mm²であった。

(2) 一軸圧縮載荷試験

本研究で実施した一軸圧縮載荷試験の概要を図-1に示す。載荷試験には、2000kN変位制御式圧縮試験機を使用した。上部載荷板の上に球座が配置されている。この試験機に対して、載荷方向と打設方向が同一となるように試験体を設置した。なお、試験体を設置する際には、2枚のテフロンシート（厚さ：0.05mm）の間にシリコングリスを塗布した減摩パッドを試験体端面と載荷板の間に挿入した。

載荷は、20kNまでの予備載荷を行って、テフロンシートとシリコングリスを完全に密着させた後に開始した。載荷方法としては、各試験体ごとに以下の3ケースを採用した。各試験体ごとに採用した載荷方法を表-1に示す。

載荷方法①「一方向繰返し圧縮載荷」：各載荷ループでピークに到達したと同時に0kNまで除荷し、再び載荷を行う方法であり、載荷速度は0.002mm/sで一定とした（図-2(a)）。

載荷方法②「一方向単調圧縮載荷」：載荷速度を0.002mm/sとして単調に荷重を加えるが、ポストピークにおいては、急激な変位の増大と耐力の低下に対して安定的に載荷が継続できるように、載荷速度を0.001mm/sに低減した（図-2(b)）。

載荷方法③「一方向単調圧縮載荷」：載荷速度を常に

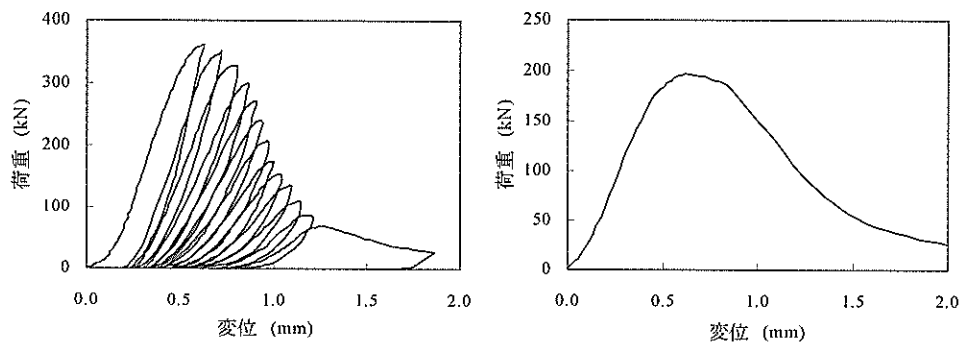
表-3 使用材料の特性

(a) コンクリート

種類	名称	単位容積質量 (kg/m ³)	摘要
セメント	早強ポルトランドセメント	3.16×10 ³	ブレーン値:355m ² /kg
細骨材	川砂	2.59×10 ³	千葉県小櫃産, 粗粒率:2.50
粗骨材	碎石	2.62×10 ³	東京都青梅産, 粗粒率:7.00

(b) アクリル

項目	単位	値
単位容積質量	kg/m ³	1.19×10 ³
引張強度	N/mm ²	76
引張弾性率	N/mm ²	3200
曲げ強度	N/mm ²	120
圧縮強度	N/mm ²	120
熱膨張率	1/°C	7×10 ⁻⁶
熱伝導率	W/m・°C	0.21



(a) 一方向繰返し圧縮載荷

(b) 一方向単調圧縮載荷

図-2 載荷方法

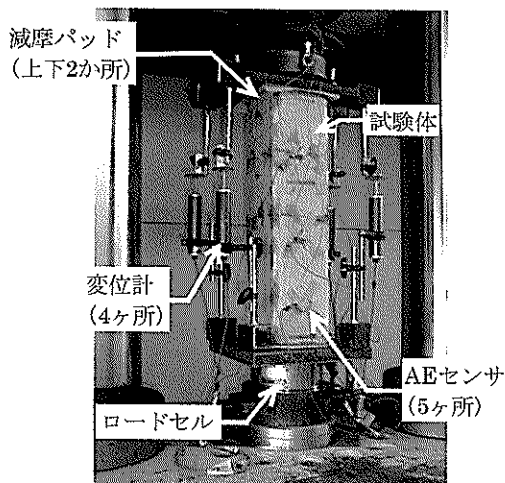


図-1 載荷試験状況

0.001mm/sで一定に保って、単調に荷重を加えた。

載荷方法の相違が破壊挙動に及ぼす影響については、

繰返し載荷を行った場合の方が若干脆性的な挙動を示したものの、両者はほぼ一致した。このことは、繰返し載荷時の荷重-変位関係の包絡線は単調載荷を行った場合の荷重-変位関係と概ね一致するという既往の報告²⁰⁾とも整合した。また、目視によりひび割れ発生状況や破壊状態を観察した結果からも、両者に明確な差は認められなかったため、本研究では、上で述べた①~③の載荷方法の違いが載荷試験の結果に及ぼす影響は無視できるとして、その後の検討を進めた。また、既往の報告¹⁰⁾によれば、上で述べた程度の載荷速度の違いであれば、コンクリートの破壊挙動にほとんど影響しないことが確認されている。なお、いずれの載荷方法を用いた場合でも、載荷荷重がピークの10%まで低下した段階を終局状態として、載荷を終了した。

(3) 計測項目

載荷試験中には、ひび割れ発生状況を目視にて観察し

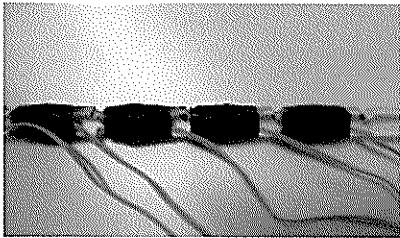
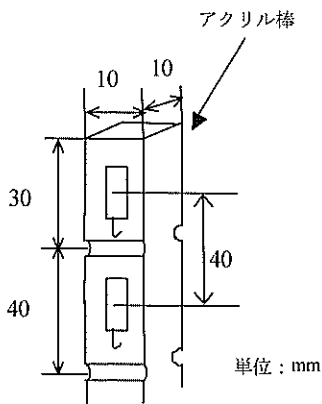


図-3 アクリル棒に貼付したひずみゲージ

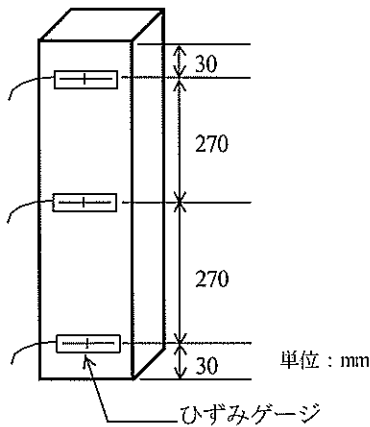


図-4 荷重軸直角方向のひずみ計測

たほか、以下に述べる項目について計測を行った。このうち、荷重荷重、圧縮変位量およびAEについてはすべての試験体で計測を行ったが、局所ひずみ計測、コンクリート表面ひずみ計測、コンクリート内部のひび割れの可視化については、特定の試験体のみで行った。各試験体で計測した項目を表-1に示す。

a) 荷重荷重

下部荷重板と試験体下面の間にロードセルを設置し、試験体に作用する荷重荷重を計測した。

b) 試験体全体の圧縮変位量

試験体全体の圧縮変位量を計測するために、試験体周囲の4ヶ所に変位計（ストローク：25mm）を設置し、上

下荷重板間の変位量を計測した。これらの計測値の平均を試験体全体の圧縮変位量とし、これを試験体長さで除することにより、コンクリートの平均ひずみとした。

c) コンクリート内部の局所ひずみ

圧縮試験を行った試験体のうち2体においては、試験体内部の局所的な変形挙動を把握するため、高さ方向に40mm間隔でアクリル用ひずみゲージ（測定長：3mm）を貼付したアクリル棒（断面：10×10mm）を、コンクリート断面の中央に埋設した。ひずみゲージを貼付したアクリル棒を図-3に示す。

アクリルがコンクリートと完全に一体化するように、アクリル棒には40mm間隔で溝を設けた。また、試験体端面のキャッピングの際に、上面が若干削られることを考慮して、いずれの試験体においても、その上下端の10mmの区間にはアクリル棒が入らないようにした。アクリル棒は、型枠内に針金で固定し、ひずみゲージのリード線は試験体側面中央にまとめて、試験体外部に取り出した。

d) コンクリート表面ひずみ

コンクリート表面にひずみゲージ（測定長：60mm）を、図-4のように貼付することで、荷重方向と直角方向のコンクリート表面ひずみを計測した。

e) コンクリートの圧縮強度

用いたコンクリートの力学特性を把握するために、試験体と同時に製作した円柱供試体（直径：100mm、高さ：200mm）を用いて標準圧縮強度試験を行った。養生方法および材齢は、各試験体と同一とし、供試体端面は機械研磨を行って平滑面とした。圧縮強度には、供試体3体の平均値を用いた。

f) AE

コンクリート試験体の荷重軸方向の局所破壊領域長さを把握するため、図-5に示すように、荷重軸方向に沿って、4個あるいは5個のAEセンサ（共振周波数：150kHz）を50～100mm間隔で配置した。センサのコンクリート表面への設置にあたっては、接触媒質としてシリコングリスを用いて、ガムテープにて固定した。センサの設置状況を図-1に示す。

計測条件については、試験体10体のうち9体では、しきい値を60dBとし、増幅度をプリアンプにて40dB、メインアンプにて20dBの合計60dBとした。ただし、試験体PS15-60.2においては、検出されたAEの発生源位置標定を行うために、1個のAEイベントに対して、より多くのセンサでAE信号を検出できるように、しきい値を45dBに下げた上で、荷重速度を0.001mm/sとして荷重を行った（荷重方法③）。なお、この際、増幅度は他の9体と同一とした。

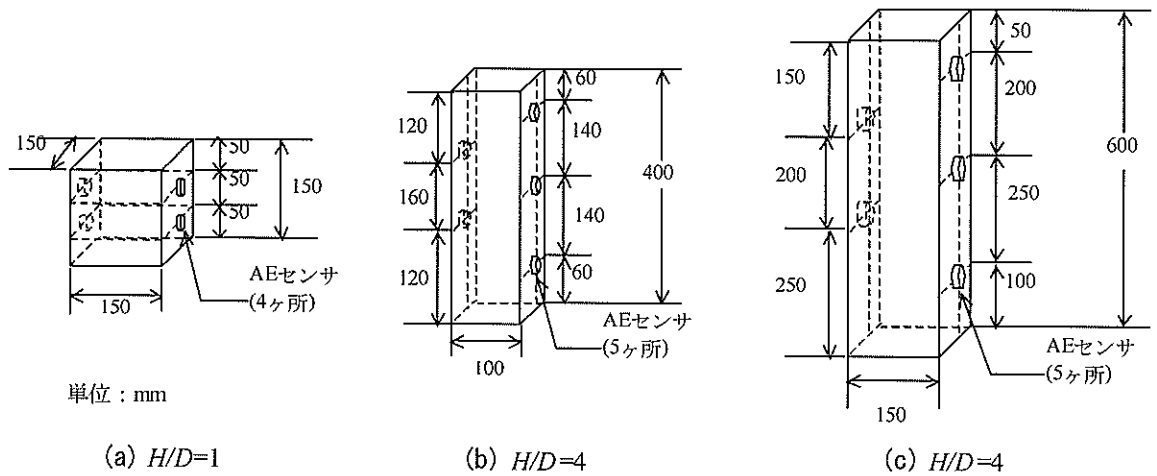


図-5 AE センサ配置

表-4 一軸圧縮荷試験結果

試験体形状	破壊形態	試験体名称	σ_{max} (N/mm ²)	f'_c (N/mm ²)	σ_{max}/f'_c	L_p (mm)	
						式(1)	AE 法
角柱	局所化	PS15-60	29.2	35.3	0.83	137	—
		PS15-60.op	36.1	37.8	0.95	137	—
		PS10-40.1	20.7	34.8	0.59	138	102
		PS10-40.ac	18.6	34.8	0.53	138	102
	割裂	PS15-60.ac	23.4	33.5	0.70	—	—
	局所化	PS15-60.1	19.0	33.5	0.57	137	126
		PS15-60.2	20.0	38.3	0.59	137	180
全壊	PS15-15.1	13.1	31.6	0.41	—	150	
円柱	割裂	C15-60.1	21.0	33.7	0.62	—	—
	局所化	C15-60.2	24.3	33.7	0.72	142	122

荷試験中における計測項目は、AE信号検出時間、AEヒット数、ならびに各種AE波形パラメタ（最大振幅値、継続時間、AEエネルギー、カウント数、立上り時間など）とした。コンクリート中で発生したAEを複数個のセンサで検出した場合、実際の微小破壊のイベント数とAEヒット数は異なったものになってしまう。そこで本研究では、ある微小破壊のイベントから発生したAEが複数個のセンサで検出された場合には、そのAE信号を最も早く検出したセンサのみで評価することとした。これにより、各AEセンサによって、その最も近傍で発生した微小破壊のスケールや量を評価できることとなる。

g) コンクリート内部のひび割れの可視化

荷試験が終了した試験体A20-0.6-3.2（形状・寸法などについては、次章参照）に対して、X線CT法を用いて、荷方向と直角方向の断層撮影を10mm間隔で行って、コンクリート内部のひび割れ発生状況を可視化した。撮影は、管電圧を120kV、印加電流を130mAとして行った。撮影されたX線写真は、シャカステンを用いてX線像の

濃淡を鮮明にした状態で、デジタルカメラを通じてパソコンに取り込んだ。パソコンに取り込まれたX線像は画像解析にかけられ、コンクリート内部におけるひび割れ発生状況を定量的に評価した。本研究では、ひび割れ面積やひび割れ長さを評価指標として用いた。また撮影を行った試験体は、アクリル棒が埋設されたものであり、コンクリート内部の局所ひずみが計測されている。これより、X線CT法により定量化されたひび割れ量と、コンクリート内部で局所的に吸収されたエネルギーの相関関係を調べた。

2.3 結果および考察

(1) 破壊形態

表-4に、各試験体の最終破壊形態を示す。試験体の破壊状況を目視にて観察したところ、H/D=4の9体の試験体のうち、7体は明らかに局所的圧縮破壊が生じたが、残りの2体(PS15-60.ac, C15-60.1)においては、プレピークから割裂ひび割れが卓越した。

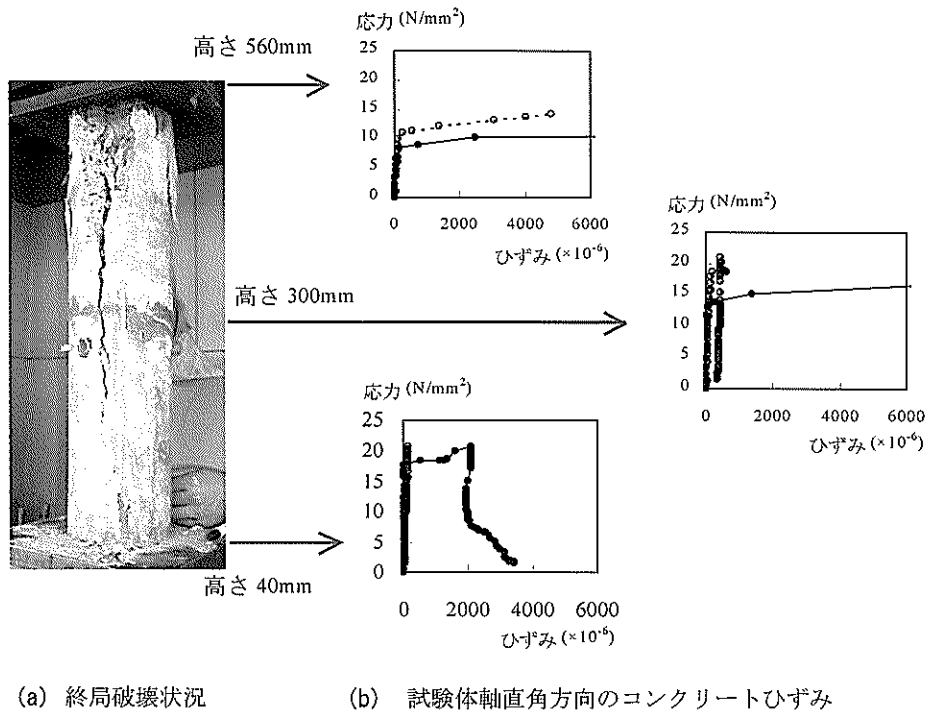


図-6 割裂破壊を生じた試験体 (C15-60.1)

試験体C15-60.1を例に、載荷方向と直角方向にコンクリート表面に貼付したひずみゲージによるひずみ計測結果から、割裂ひび割れが卓越した原因を検討した。なお、本試験体の最大応力 σ_{max} は、 21N/mm^2 であった。図-6に、終局破壊時の状況を示す。載荷開始後、最大応力の約40% (9N/mm^2)の時点で、試験体上部に載荷方向の割裂ひび割れが生じて、底面から570mmに貼付したひずみゲージが切断した。さらに、最大応力の約60% (14N/mm^2)の時点で、このひび割れが試験体中心にまで到達した。この試験体の場合、プレピークから割裂ひび割れが卓越したが、すぐに耐力を失うまでには至らなかった。さらに載荷を継続すると、試験体上部が圧縮破壊が生じて耐力を失った。終局状態では、試験体上部の局所的圧縮破壊の他に、試験体全体を載荷方向に4つに分割するひび割れ(破壊面)が形成された。

このような破壊形態は、本研究で対象とした局所的圧縮破壊とは厳密には異なるものであると考え、以降の考察では取り扱わないことにした。また、これらの試験体においては、早期に割裂ひび割れが形成したために、AE波の伝播が困難になり、AE計測が正確に行えなかった。このように、破壊形態が他の場合と異なった理由については、今後検討が必要であるが、試験体端部の拘束条件やコンクリートの不均一性などが原因として考えられる。

(2) 圧縮破壊の局所化開始時期

既往の研究では、Bazant¹³⁾がピークより破壊域と非破壊域に分割されると仮定したのに対して、畑中ら¹¹⁾はプレピークからひずみが徐々に局所化すると述べた。破壊に要したエネルギーの総量を知る上で圧縮破壊の局所化が開始される時期を正確に把握する必要があるだけでなく、圧縮破壊の局所化メカニズムを解明するためのアプローチとしても、局所化開始時期の把握は重要な課題である。ここでは、目視によるひび割れ観察の他に、アクリル棒に貼付したひずみゲージによる局所ひずみ計測結果およびAE計測結果から、圧縮破壊の局所化開始時期を検討した。

一軸圧縮載荷試験中にコンクリート試験体のひび割れ発生状況を目視観察した結果、多くの試験体でプレピークからひび割れの発生が部分的に認められた。そこで、試験体PS15-60および試験体PS15-60.2を用いて、一軸圧縮載荷試験中における局所ひずみ発生状況およびAE発生状況から、圧縮破壊の局所化開始時期について検討を行った。図-7に、試験体上部が局所的に圧縮破壊した試験体PS15-60において、アクリル棒に貼付したひずみゲージより得られた局所ひずみの計測結果を示す。図中の破壊域および非破壊域は、既往の研究¹¹⁾に基づいて、局所吸収エネルギーとひび割れ発生状況から区別されたものである。これによれば、非破壊域においては、ピークに達

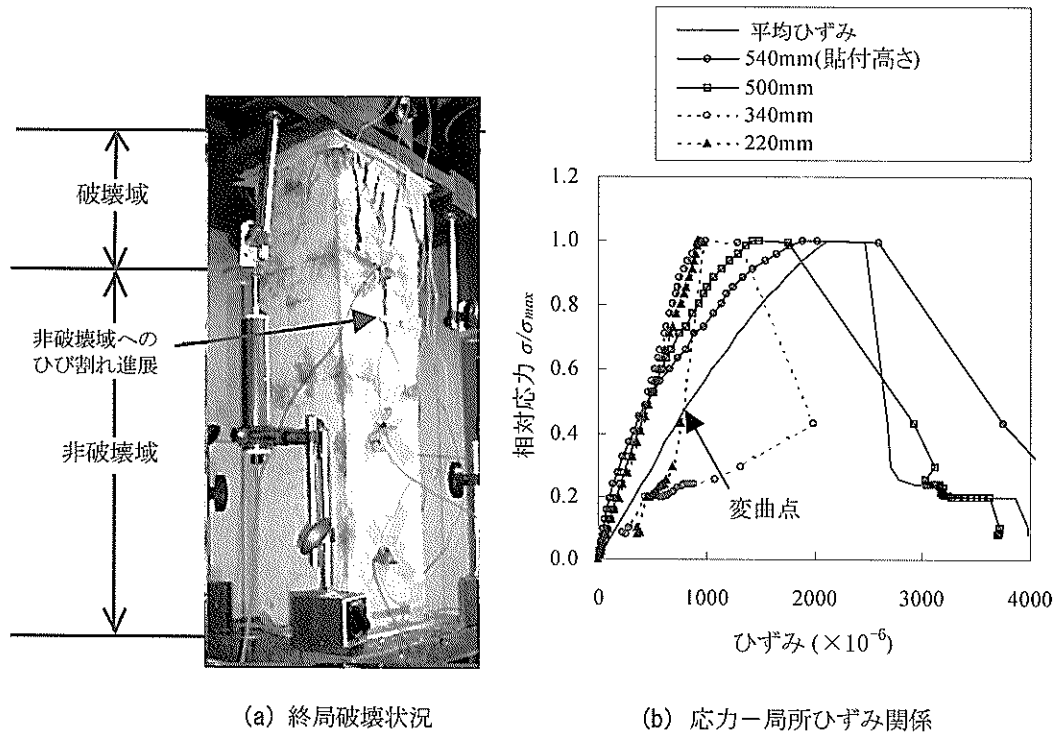


図-7 圧縮破壊の局所化開始時期

するまで剛性がほぼ一定に保たれたのに対して、破壊域では初期剛性は非破壊域と同一であったが、 σ/σ_{max} が約60%に達した時点から、特にひび割れの発生が顕著であった試験体上部の局所ひずみから順に軟化したことがわかる。また、変位計より得られた試験体全体の平均ひずみの挙動と比較しても、軟化が開始された時期はやはり $\sigma/\sigma_{max}=60\%$ 程度であった。

同様のことは、AE計測結果からも確認できた。図-8に、試験体PS15-60.2において検出されたAE信号からAE発生源の位置標定を行った結果、累積AEイベント数と荷重の関係、各センサで検出されたAEイベント数を、試験体の荷重-変位関係と併せて示す。図-8(b)~(f)のAE発生源位置標定結果より、 σ/σ_{max} が0~30%および30~50%の段階では、AEイベント数は少なかったことがわかる。試験体上部に発生源が若干集中しているようにも見えるが、破壊の局所化は明確ではなかった。しかしながら、 σ/σ_{max} が50~80%まで荷重が進むと、AE発生源が徐々に試験体上部に集中し、AEイベント数も急増した。さらに、 σ/σ_{max} が80~90%の段階では、AEは試験体底面から400~600mmの区間に集中して発生した。また、この段階で初めてコンクリート表面にひび割れが目視にて確認された。さらに、局所ひずみの計測結果のところでも述べたように、この時期は、荷重-変位関係が初期剛性より外れて、徐々に軟化が開始された時期と一致した。

以上より、コンクリートに圧縮力が作用すると、プレピークより徐々に圧縮破壊の局所化が開始され、荷重-変位関係が軟化傾向を示すことがわかった。さらに荷重が増加すると、その局所破壊領域における損傷が顕著となり、ピークに達した後、試験体全体としての耐力を失っていく。したがって、プレピークの段階から局所的圧縮破壊の前兆を予見できると考えられる。ただし、局所化の開始時期が、試験体PS15-60でピークの60%、試験体PS15-60.2でピークの80%と若干異なった。この相違の原因については、圧縮破壊の局所化メカニズムの解明も含めて、今後さらなる検討を要する。

(3) ポストピークにおけるひび割れ進展挙動

ピークを超えたコンクリート試験体では、荷重-変位曲線の変曲点(σ/σ_{max} の約50%)付近まで破壊が進行するまでは、ひび割れは主に破壊域のみで観察された。しかしながら、変曲点を超えて、試験体の変形が顕著になると、破壊域より数本のひび割れが非破壊域に進展していく様子が観察された。終局状態では、コンクリート試験体を、角柱の場合で4分割、円柱の場合で4分割あるいは3分割するようなひび割れへと成長した。試験体下部は非破壊域であり変形が拘束されているものの、試験体上部は破壊が進行しているため、横方向への変形の拘束がなくなった結果、ひび割れが上部より下部に裂けるようにして進展したと考えられる。

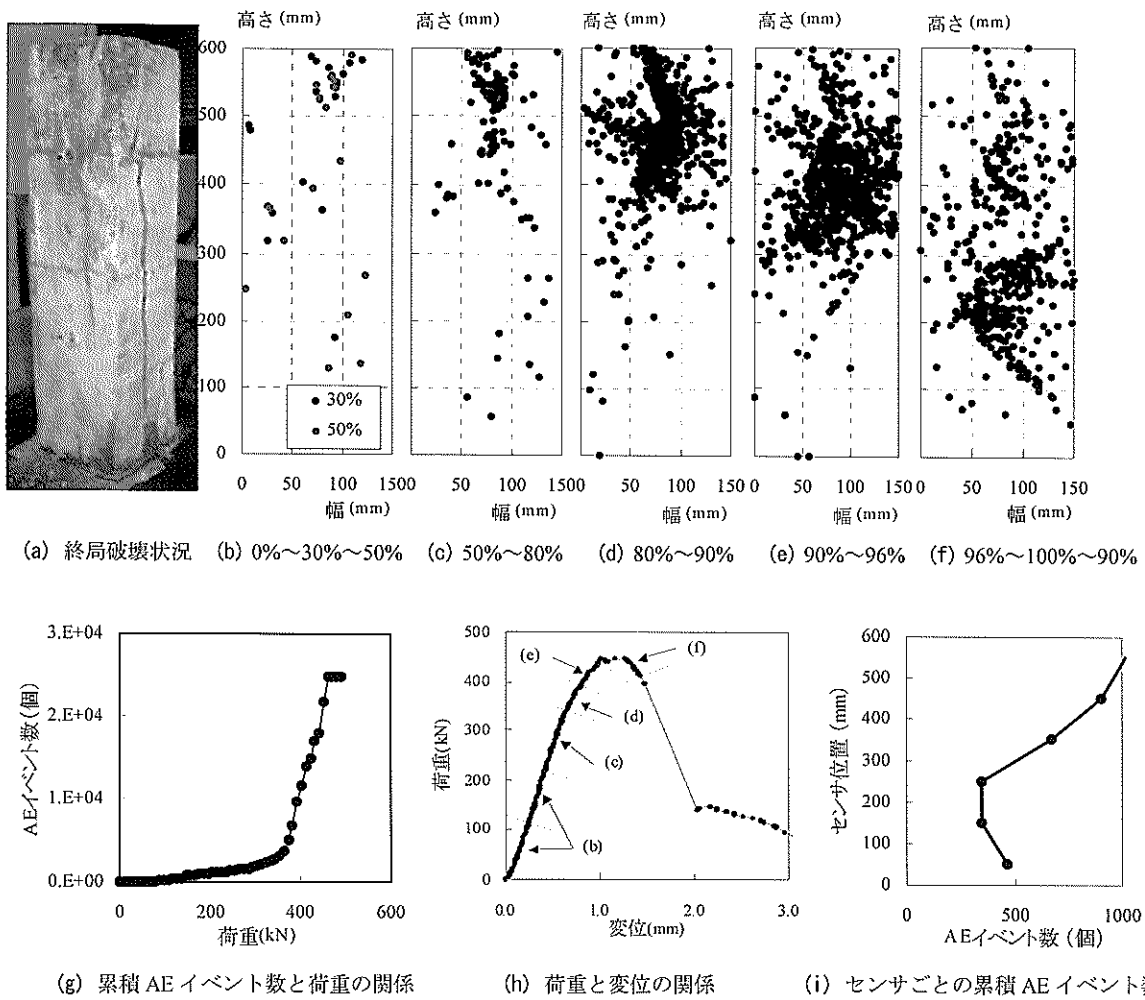


図-8 AE計測結果(試験体 PS15-60.2)

このことは、図-8のAE発生源位置標定結果からも確認できた。 σ/σ_{max} が90~96%の段階(図-8(e))から、96~100~90%の段階(図-8(f))へと載荷が進むにつれて、AE発生源の集中箇所が、試験体上部より下部に徐々に移動した状況が確認できる。つまり、それまでAEが検出されなかった、すなわちひび割れが発生していなかった非破壊域にもAEの発生が認められるようになり、局所破壊領域が徐々に下方に進展する様子が把握できた。なお、ピーク近傍で試験体上部で発生したAEが比較的少ないが、これはAEが発生しなかったのではなく、ひび割れの発生・進展が顕著になったため、AE波がコンクリート中を十分に伝播できなくなったためと考えられる。

以上より、圧縮力を受けるコンクリートにおいて破壊の局所化が生じたときに、ポストピークで除荷される領域は、終局状態まで除荷され続ける領域と、除荷過程の途中でひび割れが破壊域から進展し軟化する領域に大別されることがわかった。本研究では、これ以降、2つの領

域を除荷域および遷移域と呼ぶ。

(4) 一軸圧縮載荷試験におけるAE発生挙動

a) AE波形パラメタによる検討

圧縮破壊の局所化が明確に認められたケースとして、試験体PS10-40.acを例に取って、AE波形パラメタと圧縮破壊の局所化の関連について検討を行った。図-9に、試験体の終局破壊状況と各センサごとにAE波形パラメタを整理した結果を示す。図-9(a)より明らかなように、局所破壊領域は、試験体上部の約100mmの範囲となった。図-9(b)に、アクリル棒に貼付したひずみゲージにより計測された局所吸収エネルギーの分布を示す。既往の報告¹⁾に従って、局所吸収エネルギーが試験体全体で吸収された全エネルギーの15%以上を示す領域を局所破壊領域長さ L_p とすると、本試験体の場合、103mmとなった。この値は、式(1)より求められる $L_p=138$ mmより、若干小さくなった。

続いて、AE波形パラメタのうち、AEイベント、最大

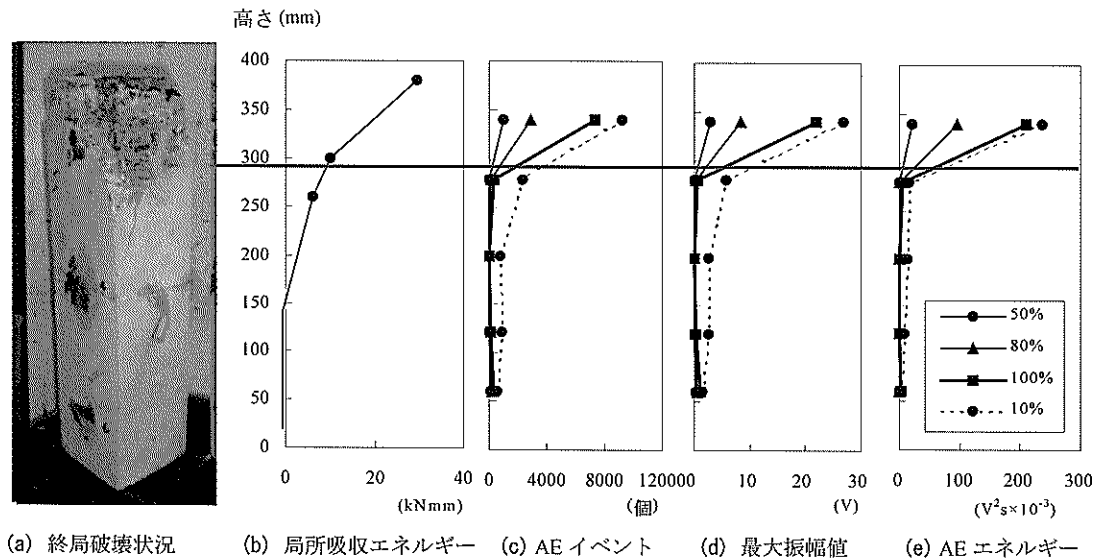


図-9 AE波形パラメタの発生パターン (試験体 PS10-40.ac)

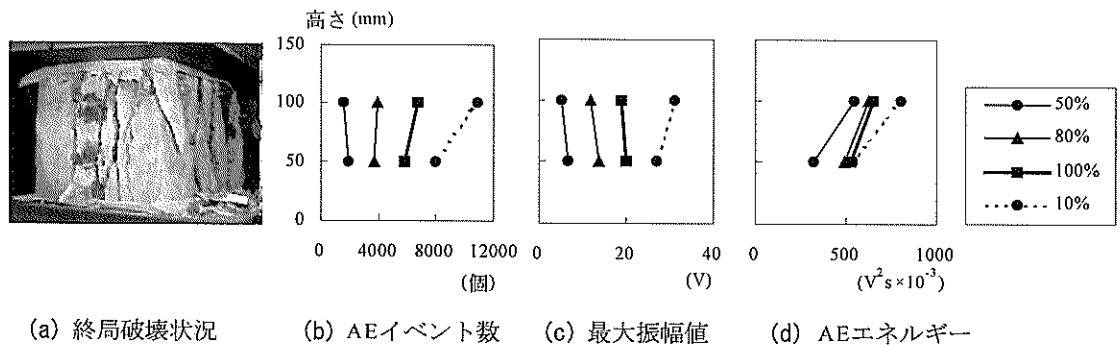


図-10 圧縮破壊の局所化が生じない試験体における AE 計測結果

振幅値, AEエネルギーに着目して, 各センサごとに整理 4 した. 図-9(c)~(e)に, それぞれのAE波形パラメタの 載荷段階ごとの累積値をセンサ貼付高さごとに示す. た だし, AEエネルギーは, (最大振幅値)²×(継続時間) と定義した. 図中の載荷段階を示す「50%」, 「80%」, 「100%」および「10%」は, それぞれ, 「載荷開始から 0.5 σ_{max} まで」, 「載荷開始から0.8 σ_{max} まで」, 「載荷開始 から σ_{max} まで」および「載荷開始から載荷終了まで」の 累積値を示している. これらによれば, 載荷方向に設置 した5ヶ所のセンサのうち, 破壊域に配置されたAEセン サによる各パラメタの累積値は, 載荷が進むにつれて急 激に増加する一方, 非破壊域ではそれほど顕著な増加は 見られなかった. そこで比較のために, 図-10に, 試験体 PS15-15.1 ($H/D=1$) で得られたAE波形パラメタの累積値 を示す. この場合, H/D が小さかったため, 圧縮破壊が 局所化せず, 試験体全体で平均的に破壊が進行したため, センサ位置にかかわらず, 試験体全域でAE波形パラメタ

が単調に増加した.

以上より, 圧縮力を受けるコンクリートのAE発生挙動 に着目することで, 局所破壊領域の推定が可能であるこ とが明らかとなった.

b) AE法による破壊域の区別

これまでの検討の結果, AE発生挙動に着目することで, 圧縮力を受けるコンクリートを局所的に破壊する領域と 除荷される領域に区別できる可能性が示された. 比較的 簡便に計測が可能で, 記録・解析が容易なAE波形パラメ タを用いることが有用であると考えられる.

圧縮破壊の局所化をAE法により検討する場合, AE発 生源における微小破壊の規模と相関を有する最大振幅値 やAEエネルギーを評価パラメタとして用いることが望 ましい. しかしながら, 本実験の結果では, 図-9(d)~(e) に示すように, 2つの波形パラメタ累積値の試験体軸方向 分布に大きな違いは見られなかった. そこで本研究では, 計測・解析の簡便性に優れる最大振幅値に着目した. こ

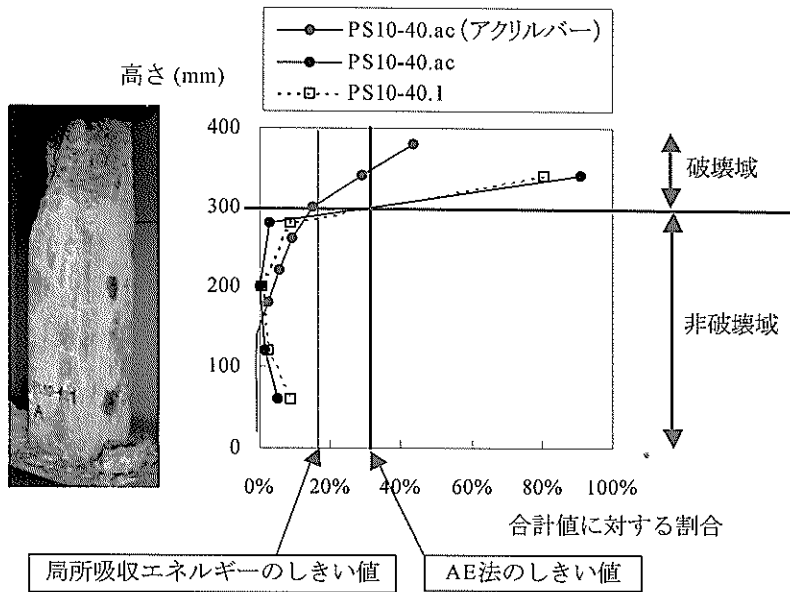


図-11 AE波の最大振幅値に着目した局所破壊領域長さの同定

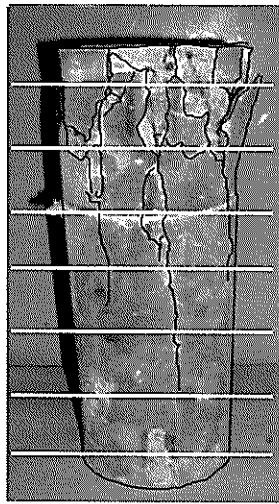
これは、AEエネルギーを用いた場合、最大振幅値と継続時間の2種類のAE波形パラメタを必要とすることから、計測誤差が最大振幅値のみを用いた場合と比較して大きくなると考えたためである。また、ポストピークではひび割れ進展が顕著となり、AE波の伝播が妨げられるため、ピークまでの累積値を用いることにした。2.3(2)でも述べたように、破壊の局所化はプレピークより発生し、ピーク以降は限られたひび割れのみが非破壊域に進展する。つまり、局所破壊領域はピークまでにはほぼ決定されていると考えられる。したがって、ピークまでに検出されたAE波形パラメタに着目して、圧縮破壊の局所化領域を同定することは合理的であるといえる。

図-11に、アクリル棒を用いて得られた試験体軸方向の局所吸収エネルギー分布と、ピークまでに検出されたAE波の累積最大振幅値の試験体軸方向分布を示す。いずれの値も、試験体全体で計測された値の合計値に対する百分率で表示している。また同図には、試験体PS10-40.acと同一の形状・寸法を有する試験体PS10-40.1の結果も参考までに示してある。局所ひずみ分布に基づいて区別された破壊域と非破壊域の境界線をAE波の累積最大振幅値から推定すると、いずれの試験体の場合でも、全センサで検出された合計値に対して約30%となった。そこで、この30%というしきい値を、形状・寸法の異なる他の試験体に適用することで得られた局所破壊領域長さ L_p を、表-4に示す。この値は、式(1)を用いて得られた結果と比較して、若干小さくなったが、目視による観察結果とは大きな差は見られなかった。

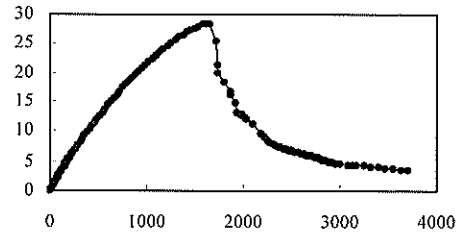
以上より、圧縮力を受けるコンクリートに複数個のAEセンサを貼付し、ピークに達するまでに検出されたAE波の累積最大振幅値に着目することで、破壊域と非破壊域が定量的に区別できる可能性が示された。本実験の範囲内では、全センサで検出された合計値に対して、30%以上を示す領域を破壊域と見なすことができた。ただし、この30%というしきい値は、AEの計測条件、AEセンサの特性、コンクリートの材料特性などにより変化するものと考えられる。今後は、より多くの試験体を対象とした実験を行うことで、しきい値の妥当性や適切な設定方法を検討する必要がある。

(5) X線CT法を用いたひび割れの可視化

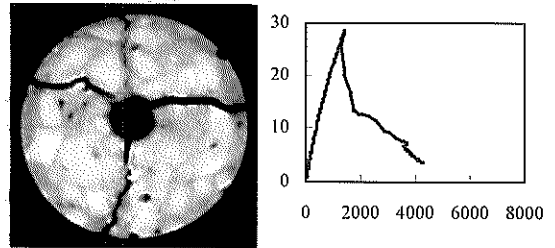
破壊エネルギー G_f は、「引張力を受けるコンクリートにおいて、単位面積のひび割れ形成に必要なエネルギー」と定義される。したがって、形成されたひび割れ総面積と、それまでに蓄積されたひずみエネルギーの間には強い相関があると考えられる。一方、圧縮力を受けるコンクリートの場合、その破壊は三次元的に進行するため、引張力作用時のように破壊面（ひび割れ面）を唯一に近似することはできない。これは、圧縮力を受けるコンクリートにおいて、形成されるひび割れ総面積を実験的に把握すること、ならびに、局所的に吸収されるエネルギーを算定することが困難なためである。これまで、コンクリートの圧縮破壊を、割裂引張ひび割れの集合体であると仮定して、引張力作用時の破壊エネルギー G_f との関連性を指摘した報告¹¹⁾があるものの、圧縮力作用時の破壊エネルギーについて十分な検討は行われていない。



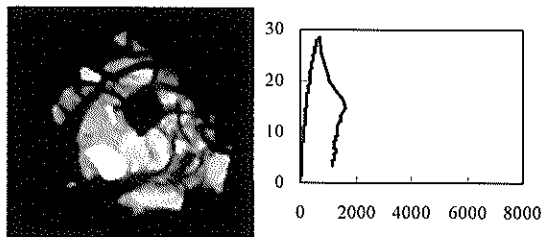
(a) 終局破壊状況



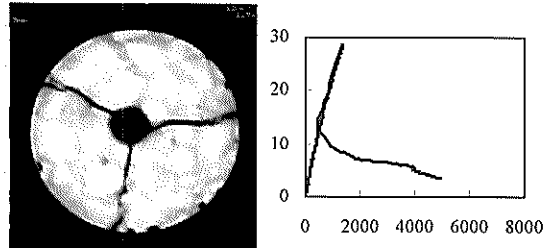
(b) 応力-平均ひずみ関係



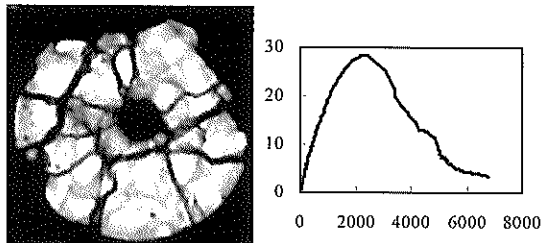
(f) ゲージ貼付高さ：160mm



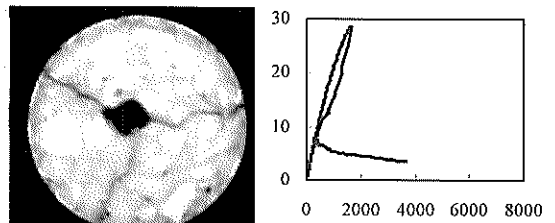
(c) ゲージ貼付高さ：280mm



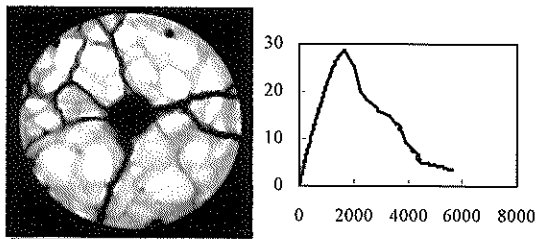
(g) ゲージ貼付高さ：120mm



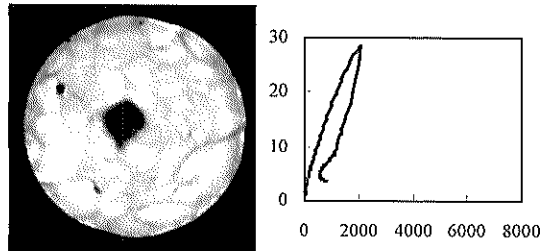
(d) ゲージ貼付高さ：240mm



(h) ゲージ貼付高さ：80mm



(e) ゲージ貼付高さ：200mm



(i) ゲージ貼付高さ：40mm

※ グラフの縦軸は、応力 (N/mm^2)，横軸は、ひずみ ($\times 10^{-6}$) を示す。

図-12 X線CT法によるコンクリート内部のひび割れの可視化

そこで本研究では、ひずみゲージを貼付したアクリル棒をコンクリート中に埋設することで、局所吸収エネルギーを算出し、X線CT法を利用してコンクリート内部の

ひび割れを可視化し、両者の関係を検討した。X線CT法により得られたひび割れの可視化画像から、コンクリート内部のひび割れ発生状況を定量化した。これにより、

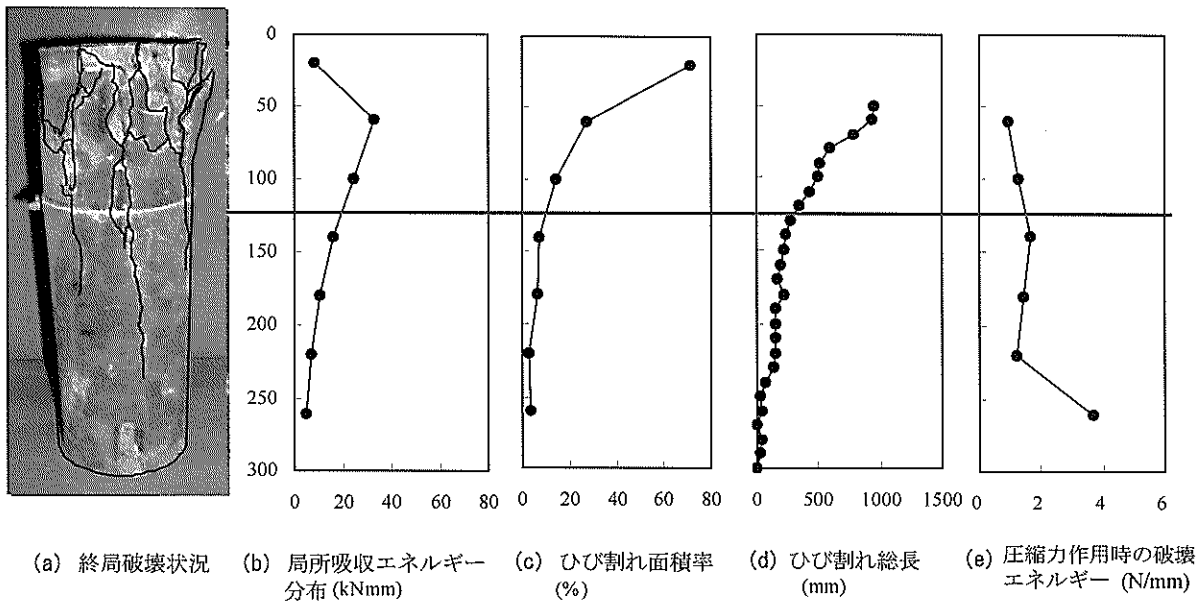


図-13 ひび割れ量と吸収エネルギーの関係

圧縮力を受けるコンクリートにおいて、ひび割れ単位面積あたりに消費されたエネルギーを算定し、圧縮破壊エネルギー G_{Fc} との関連性について検討を行った。

a) コンクリート内部のひび割れの可視化

図-12に、試験体A20-0.6-3.2について、試験体底面より40mm間隔で計測された局所ひずみと、X線CT法により同一高さで得られた断層画像を示す。なお、X線CT法による断層位置には、上下10mm程度の誤差を含む可能性がある。ひび割れの発生状況を目視観察した結果、試験体上部が圧縮破壊し、ピークを迎えた後、いくつかのひび割れが下方の非破壊域へと進展して終局状態に至った。ひび割れは、試験体上端から下方に250mm程度進展したことが、試験体外観の目視観察結果からも把握できた。

X線CT法による断層画像からは、破壊域である試験体上部でひび割れが多く、断面中心より放射状にひび割れが発生したことがわかる。また、試験体上部より下方に向かって試験体をほぼ3分割するような割裂ひび割れが進展した様子も確認できる。同一位置における応力-局所ひずみ関係からも、ピークで一旦除荷されたものの破壊域からのひび割れ進展のために、軟化が開始されたことがわかる。しかしながら、これらのひび割れは試験体下端には達せずに、底面より50mm以下には目立ったひび割れの発生は確認できなかった。よって、この領域における応力-局所ひずみ関係は明らかな除荷挙動を示した。

b) 画像解析によるひび割れ発生状況の定量化

コンクリート内部のひび割れ発生量と吸収エネルギー

の関係を調べるために、X線CT法により得られたひび割れの可視化画像に対して、二値化処理を施し、ひび割れ発生状況の定量化を試みた。まず、可視化画像からひび割れ領域(断層画像のうち黒色部分)を抽出することで、コンクリート断面に占めるひび割れ面積率を算定した。断層画像中央にある黒色部分は、アクリル棒によるものであるため、この部分の面積は評価しなかった。この方法によれば、発生したひび割れの幅の大きさを考慮することができる。

次に、ひび割れを線近似することで、断面内に形成されたひび割れ総長を計測した。この場合、ひび割れを線近似することで実際には凹凸のあるひび割れ面を過小評価してしまうこと、ならびに、破壊の規模と相関のあるひび割れ幅を考慮できないことなどが問題点として挙げられる。しかしながら、得られたひび割れ総長に荷重軸方向の単位長さを掛けることで、形成されたひび割れ面積を評価できる。また、局所吸収エネルギーをひび割れ面積で除すことで、引張力作用時の破壊エネルギー G_F と同様の概念である、圧縮力作用時の破壊エネルギー G_{Fc} が算出される。なお、この時のひび割れ総長には、算出対象断面の上下断面を含めた3断面のひび割れ総長の平均値を用いた。これは、撮影断面位置が10mm程度の誤差を含んでいる可能性があること、局所ひずみに及ぼすコンクリートの影響の範囲が、実際にはゲージ貼付位置のみではなく、上下10mm程度を含めた平均的な挙動を反映すると考えられることなどの理由による。

表-5 試験体概要

形状 (mm)	H/D	G_{max} (mm)	W/C	試験体名称	f'_c (N/mm ²)	σ_{max} (N/mm ²)
$\phi 100 \times 200$	2	20	0.4	T20-0.4.2	47.3	54.1
			0.6	A20-0.6-2	31.1	29.4
$\phi 100 \times 300$	3	20	0.4	A20-0.4-3	46.1	48.1
			0.6	A20-0.6-3	30.0	28.4
$\phi 100 \times 400$	4	13	0.4	A13-0.4-4	47.3	48.4
			0.5	A13-0.5-4	42.0	39.3
			0.6	A13-0.6-4	32.2	29.4
			0.7	A13-0.7-4	26.2	21.9
	20	0.4	A20-0.4-4	48.4	47.5	
		0.5	A20-0.5-4	39.0	28.2	
		0.6	A20-0.6-4	36.7	30.3	
		0.7	A20-0.7-4	28.4	22.5	
$\phi 100 \times 600$	6	20	0.4	T20-0.4-6	46.6	48.4
			0.6	T20-0.6-6	31.2	29.3
$\phi 100 \times 800$	8	20	0.4	T20-0.4-8	46.6	44.7
			0.6	A20-0.6-8	28.5	16.6
				T20-0.6-8	31.2	29.9

c) ひび割れ発生量と吸収エネルギーの関係

図-13に、X線CT法により得られたひび割れ可視化画像より得られたひび割れ面積率およびひび割れ総長の載荷軸方向分布を、応力-局所ひずみ関係から算出した局所吸収エネルギー分布と併せて示す。試験体上部では、破壊状態が激しかったため、多くのコンクリート片が剥落した結果、ひび割れの総長を算出できなかった。また、破壊状態と比較して局所吸収エネルギーが小さかったのは、ひび割れが顕著となり、アクリルとコンクリートの付着が損なわれたためと考えられる。同図によれば、試験体上部を除けば、ひび割れ面積率分布およびひび割れ総長分布は、局所吸収エネルギー分布と同様の傾向を示した。局所吸収エネルギー分布から推定された破壊域は、試験体上端より120mmの範囲であったが、これはひび割れ面積率が10%以上、あるいはひび割れ総長が350mm以上を示す領域と一致した。

d) 圧縮力作用時の破壊エネルギー

図-13に、圧縮力を受けるコンクリートにおいて、単位ひび割れ面形成に消費されたエネルギーの載荷方向分布を示す。これによれば、圧縮力作用時の破壊エネルギーは、試験体下部で極端に大きな値を示したものの、ほぼ1.0~2.0N/mmの値となった。これは、既往の報告¹¹⁾で提案された $G_{fc}=1.0N/mm$ と近い値であった。

2.4 まとめ

ここでは、局所破壊領域の寸法を把握することを目的として、断面形状・寸法や高さの異なるコンクリート試験体の一軸圧縮載荷試験を行った。載荷試験中には、コ

ンクリート中に埋設したアクリル棒に貼付したひずみゲージにより、コンクリート内部の局所ひずみを計測した。また、試験体表面に設置したAEセンサにより載荷中に発生するAEを計測し、AE発生挙動と局所ひずみの発生状況を比較した。その結果、圧縮破壊の局所化はプレピークから開始されていること、ならびに、AE波の累積最大振幅値により局所破壊領域長さを概ね推定できることがわかった。また、コンクリート内部のひび割れをX線CT法により可視化し、ひび割れ発生状況の定量化を試みた。これにより、コンクリート内部のひび割れ発生量と吸収エネルギーの関連を明らかにした。

3. 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

3.1 はじめに

ここでは、圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係を、ポストピークも含めて定式化することを目的とした。検討にあたっては、断面形状・寸法や高さの異なるコンクリート試験体の一軸圧縮載荷試験を行い、ひずみゲージを貼付したアクリル棒をコンクリート中に埋設して、局所ひずみを計測した。得られた応力-局所ひずみ関係から、既往の研究⁹⁾に基づいて、コンクリートを2つあるいは3つの領域に区別し、それぞれの領域に対して、応力-ひずみ関係を実験的に定めた。コンクリートの局所的な領域における応力-ひずみ関係が把握できたことで、各領域の寸法を考慮して足し合わせた、圧縮破壊の局所化の影響を考慮したコンクリート

表-6 コンクリートの示方配合

G_{max} (mm)	W/C	s/a	単用量 (kg/m ³)				
			W	C	S	G	
						5~13 mm	13~20 mm
20	0.40	0.43	182	455	736	493	493
	0.50	0.45	185	370	799	494	494
	0.60	0.47	188	313	853	487	487
	0.70	0.49	191	273	903	475	475
13	0.40	0.47	187	468	787	897	—
	0.50	0.49	190	380	853	897	—
	0.60	0.51	193	322	909	883	—
	0.70	0.53	193	280	959	860	—

の応力-ひずみ関係を、コンクリートの形状・寸法の違いにかかわらず定式化することができた。

3.2 実験概要

コンクリート試験体の材料特性および寸法が、圧縮力作用下の応力-ひずみ関係に及ぼす影響を把握するために、断面形状が直径100mmの円形の場合を対象として、水セメント比W/Cおよび試験体の高さHと幅Dの比H/Dをパラメータとした。

(1) 試験体

実験に使用したコンクリート試験体の一覧を表-5に示す。実験には各ケース2体ずつの試験体を用いた。既往の研究から、明確な局所破壊が生じると考えられたH/D=4の試験体に対して、水セメント比W/Cを0.40, 0.50, 0.60および0.70と変化させた。使用したコンクリートの配合および使用材料の特性を表-6および表-3(a)に示す。粗骨材最大寸法は13mmまたは20mmとした。

一方、コンクリート試験体の寸法が試験体全体の応力-ひずみ関係に及ぼす影響を把握するために、上述のH/D=4のほか、H/Dが2, 3, 6および8の試験体を製作した。これらの試験体に使用したコンクリートのW/Cは、0.40または0.60とし、粗骨材最大寸法は20mmとした。

セメントには早強ポルトランドセメントを用い、試験体型枠への打込みは縦打ちとした。打設後24時間で脱型し、6日あるいは7日間の水中養生を行った後、載荷試験に供した。なお、表面成形を施した試験体上面は、研磨を行うことで平滑な端面とした。

また、各試験体と同一条件下で製作した直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用いて標準圧縮強度試験を行うことで、コンクリートの圧縮強度 f_c' を求めた。圧縮強度は、各ケース3体の平均値とした。

(2) 載荷方法

コンクリート試験体の一軸圧縮載荷試験は、2. と同一の試験機を用いて、同一の条件下で行った。載荷方法には、2. の①を採用した。

(3) 計測項目

載荷試験中には、局所ひずみ、試験体の圧縮変位量および載荷荷重を計測した。試験体製作時に、載荷軸方向にひずみゲージ(測定長:3mm)を40mm間隔で貼付したアクリル棒を試験体中央に垂直に設置した(Aシリーズ)。使用したアクリルの物性を表-3(b)に示す。このひずみゲージにより、コンクリート内部で局所的に発生するひずみを計測した。計測されたひずみは、ゲージを貼付した位置から載荷軸方向に上下20mmの範囲(ゲージ貼付間隔と等しい)で均一であると仮定し、これをコンクリートの局所ひずみとした。

一方、アクリル棒を設置しなかった試験体(Tシリーズ)では、試験体周囲に設置した変位計より得られた試験体の圧縮変位量を、試験体高さHで除すことにより得られる値を、試験体全体の平均ひずみとした。なお、同一試験体に対して、アクリル棒に貼付したひずみゲージにより計測された局所ひずみの試験体軸方向に対する平均値は、変位計の計測値からコンクリート試験体全体の平均ひずみとほぼ等しくなった。これより、アクリルとコンクリートは十分付着していたことが確認できることから、アクリル棒に貼付したひずみゲージより得られる局所ひずみを用いることで、各部位ごとのコンクリートの局所的な変形・破壊挙動を十分表現可能であると判断した。

3.3 載荷試験結果

(1) 試験体強度

標準圧縮強度試験より得られたコンクリートの圧縮強

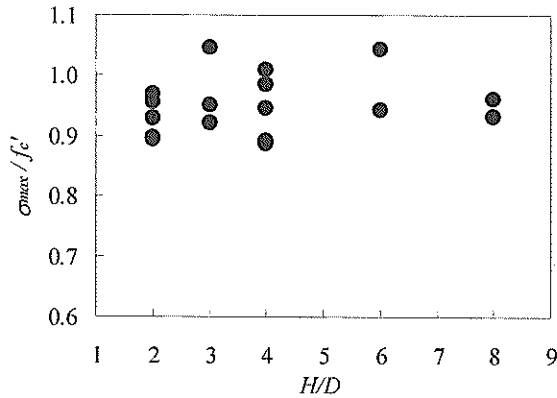


図-14 圧縮強度と試験体強度の関係

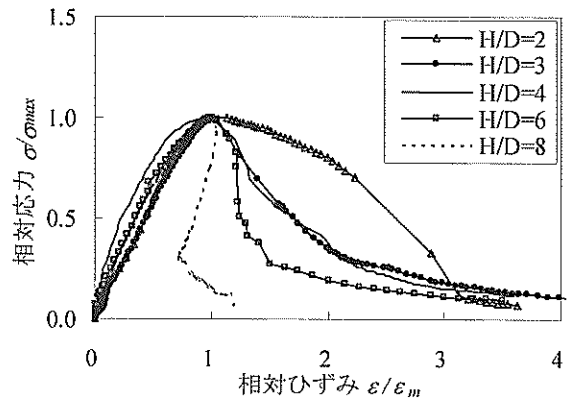


図-16 H/D が異なる場合の応力-ひずみ関係

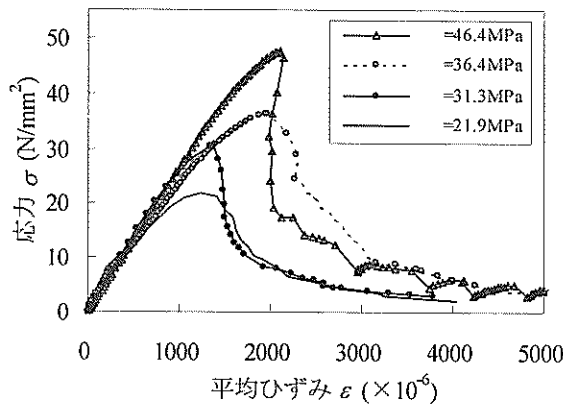


図-15 試験体強度が異なる場合の応力-ひずみ関係

度 f'_c は、表-5に示すように、 $26.2 \sim 48.4 \text{ N/mm}^2$ となった。コンクリートの標準圧縮強度試験時には、試験体端部と載荷板間の摩擦による拘束効果が試験体に作用することで、見かけ上、圧縮強度が増加する。しかしながら、試験体の H/D の増加に伴い、試験体高さ方向の中央付近では、端面摩擦による拘束効果はほとんど無視でき、ほぼ一軸圧縮状態で破壊すると考えられる。そこで、このことを確認するため、 $H/D=2, 4$ および 8 である円柱供試体（直径： 100 mm ）を用いて標準圧縮強度試験を行った。その結果、 $H/D=4$ および 8 の圧縮強度はほぼ同一となり、 $H/D=2$ の場合の約 96% まで低下した。この値は、既往の実験結果²⁰⁾と比較しても、ほぼ同様の値であった。

本研究では、図-14に示すように、各試験体における最大応力 σ_{max} は、標準圧縮強度試験より得られた圧縮強度 f'_c の約 95% であった。この時の変動係数は 5.0% であった。したがって、本研究では、減摩パッドを用いることにより、試験体端部と載荷板間の摩擦による拘束効果が十分に除去され、ほぼ一軸圧縮状態で荷重が実現できたと考えられる。なお、圧縮強度 f'_c 、 H/D および粗骨材最

大寸法の違いによる最大応力の低下割合の違いはほとんど認められなかった。これ以降、各試験体における最大応力 σ_{max} を、標準圧縮強度試験により得られる圧縮強度 f'_c と区別するため、試験体強度と呼ぶことにする。局所的圧縮破壊現象を正確に検討するためには、端面摩擦の影響を受けない理想的な一軸圧縮状態で得られた試験体強度を用いることが望ましい。本実験の範囲内では、コンクリートの圧縮強度 f'_c と試験体強度 σ_{max} の関係は、次式のようにになった。

$$\sigma_{max} = 0.95 \times f'_c \quad (5)$$

(2) 応力-ひずみ関係

載荷試験の結果、既往の研究^{1), 9)}と同様に、コンクリートの試験体強度 σ_{max} または試験体の H/D の相違による応力-ひずみ関係の違いが明確に認められた。図-15に、 $H/D=4$ で、コンクリートの σ_{max} が異なる試験体において得られた応力-ひずみ関係を示す。コンクリートの圧縮強度が増加するとともに、荷重がピークに達した時点におけるひずみは増大し、ポストピークにおける応力下降勾配は大きくなり、破壊挙動が脆性的になった。

図-16に、 $f'_c=30 \text{ N/mm}^2$ で、 H/D が異なる試験体の応力-ひずみ関係を示す。図中の応力とひずみは、それぞれ試験体強度 σ_{max} およびピーク時ひずみ ϵ_m で規準化してある。図-17に、各試験体の破壊形態を示す。 H/D が増加すると、ポストピークにおける応力-ひずみ関係が脆性的になった。特に、 $H/D=8$ ではスナップバック現象が確認された。また、目視による破壊形態の観察結果からも、破壊の局所化が明確に生じたことが分かる。

(3) 応力-ひずみ関係による局所領域領域の同定

図-18 (b)に、試験体A13-0.7-4の内部に埋設したアクリル棒より得られた応力-局所ひずみ関係を、図-18 (c)に、

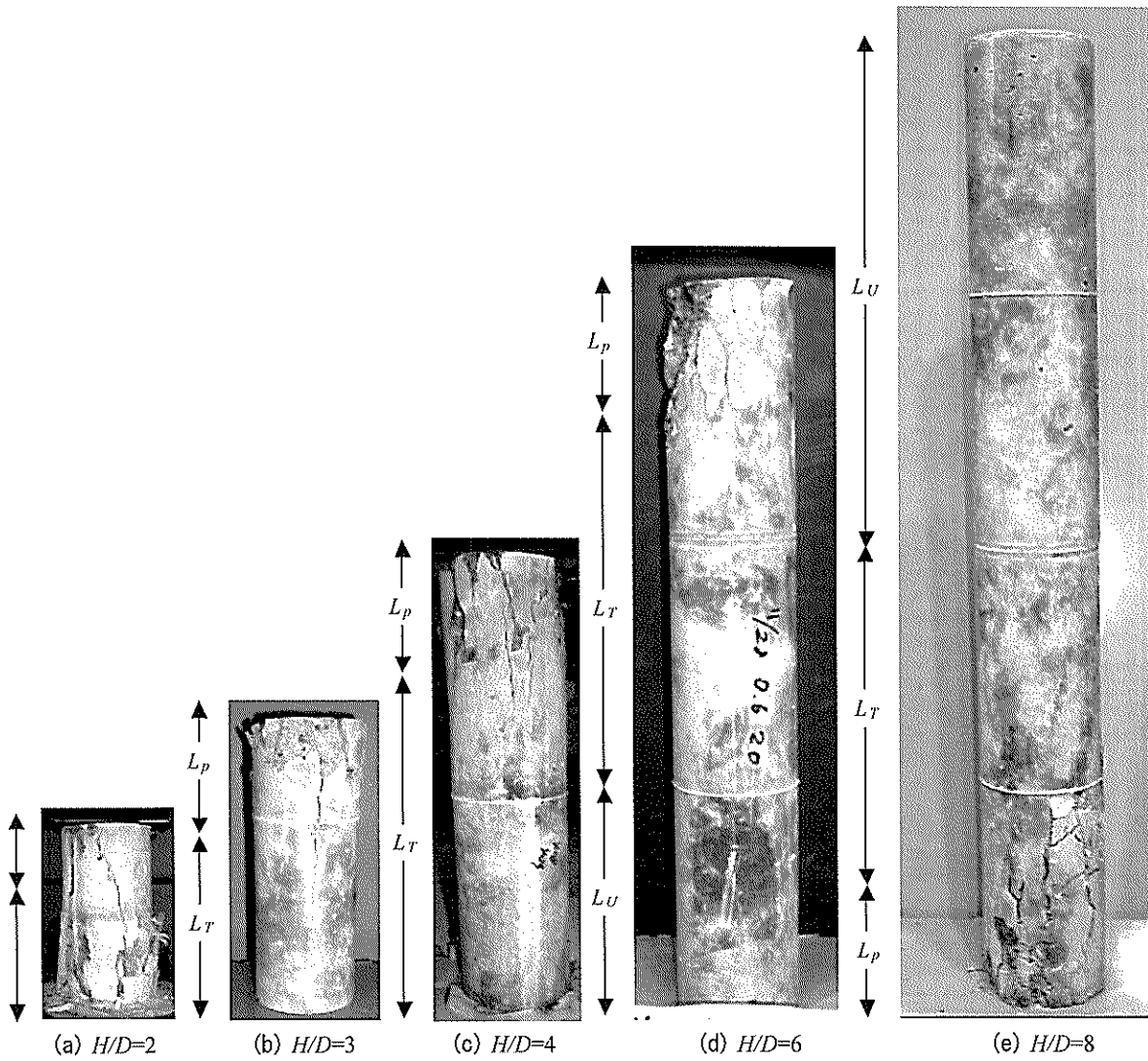


図-17 H/Dが異なるコンクリート試験体の終局破壊状況

応力-局所ひずみ曲線下の面積から算出された局所吸収エネルギーの分布を示す。これによれば、 $H/D=4$ である試験体は、①プレピークより応力-局所ひずみ関係が非線形性を示す破壊域、②プレピークではひずみはほぼ応力に比例して増加するが、ポストピークではひずみが一旦減少した後、数本のひび割れが破壊域から進展してくることにより、ひずみが増加に転ずる領域に区別された。また、目視により破壊状態を観察した結果、 H/D が4以下である試験体においては、破壊域からのひび割れがほぼ試験体全体にわたって進展した。以上より、本研究では、 H/D が4以下である試験体に対して、既往の研究¹⁾を参考に、局所的に吸収されたエネルギーがコンクリート全体で吸収されたエネルギー量に対して15%以上を示す領域を破壊域とし、その他の領域を遷移域とした。

一方、 H/D が6または8の試験体では、載荷終了までひ

び割れがほとんど発生しない領域が存在した(図-17(d)~(e))。また、 $H/D=8$ の試験体内部に設置したアクリル棒で計測された局所ひずみには、破壊域と遷移域のほか、ピーク以降完全に除荷される領域(以下、除荷域と呼ぶ)も存在した。これらの試験体の破壊域および遷移域の寸法は $H/D=4$ の試験体とほぼ等しかったことから、 H/D が4より大きい場合には、破壊域および遷移域の大きさは H/D に依存せず、 $H/D=4$ の場合と同一であるとし、 H/D の増加とともに除荷域の寸法のみが増加するものと考えた。

3.4 破壊域における応力-ひずみ関係の定式化

まず、破壊域における応力-ひずみ関係の定式化を試みた。表-7に、実験より得られた破壊域における応力-ひずみ関係に関するパラメータ値を示す。この値は、試験

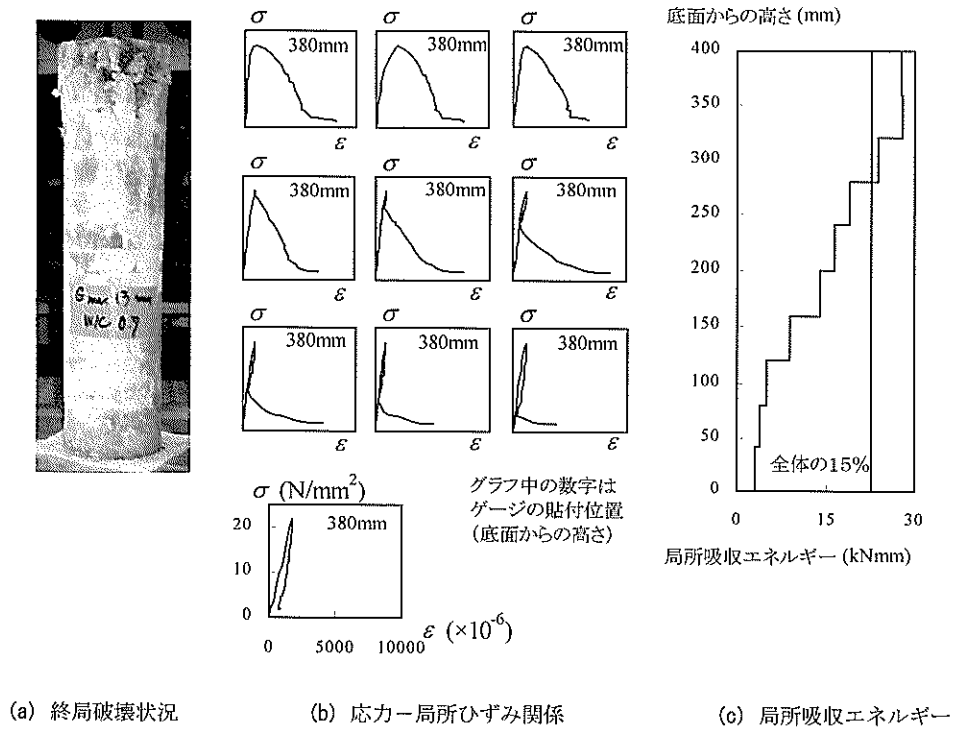


図-18 破壊域と非破壊域における局所ひずみ発生状況

表-7 破壊域と遷移域における応力-ひずみ関係に関するパラメタ

試験体名称	破壊域					遷移域						
	σ_{max} (N/mm ²)	L_p (mm)	ϵ_{F0} ($\times 10^{-6}$)	A_F (kNmm)	G_{Fc} (N/mm ²)	L_T (mm)	ϵ_{T0} ($\times 10^{-6}$)	σ_T / σ_{max}	$\epsilon_T / \epsilon_{T0}$	a	b	
A13-0.4-4	48.7	120	2299	140.9	0.150	280	1577	0.33	0.60	-	-	
A20-0.4-4	47.5	120	2233	177.6	0.189	280	1853	0.34	0.55	-	-	
A13-0.5-4	39.3	120	2601	150.7	0.160	280	1636	0.30	0.82	0.169	-2.58	
A20-0.5-4	28.2	140	1816	131.6	0.117	260	848	0.42	0.64	0.281	-1.88	
A13-0.6-4	29.4	140	2076	99.0	0.090	260	1442	0.43	0.92	0.336	-1.87	
A20-0.6-4	30.3	120	1522	76.6	0.082	280	1388	0.30	0.72	0.205	-1.84	
A13-0.7-4	21.9	140	1328	79.3	0.074	260	1165	0.45	0.79	0.311	-1.27	
A20-0.7-4	22.5	160	1335	99.3	0.079	240	1184	0.46	0.82	0.371	-1.56	

体2体の平均値であるが、一部のケースでは1体のみの結果となっている。

(1) 軟化挙動を考慮した構成則の提案

標準圧縮強度試験で得られるコンクリートの応力-平均ひずみ関係は、これまで多くの研究者によって検討されているが、中でも、Popovics¹²⁾によって提案された関係式(式(3)参照)は、比較的精度良くコンクリートの応力-ひずみ関係を表すことができるとされている。本研究では、このPopovicsの提案式を基本に、破壊域における応力-ひずみ関係を定式化することを試みた。ただし、本関係式はそもそも標準圧縮強度試験における供試体の平均ひずみを対象にしたものであり、適用範囲が明らか

に異なるため、Popovicsが設定した実験定数をそのまま用いることは適切でない。そこで本研究では、局所的圧縮破壊現象を考慮するためのパラメタとして、 n_F および ϵ_{F0} を新たに設定した。本研究で提案する破壊域における応力-ひずみ関係を次式に示す。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \frac{n_F \times (\frac{\epsilon_F}{\epsilon_{F0}})}{n_F - 1 + (\frac{\epsilon_F}{\epsilon_{F0}})^{n_F}} \quad (6)$$

ここで、 σ : 応力 (N/mm²)、 σ_{max} : 試験体強度 (N/mm²)、 ϵ_{F0} : 破壊域におけるピーク時のひずみ、 ϵ_F : 破壊域のひずみ、 n_F : 実験定数である。

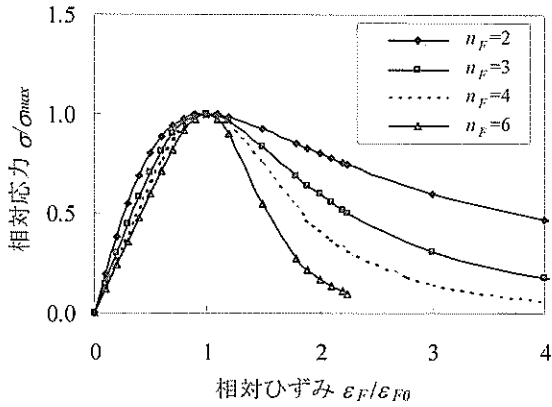


図-19 n_F が軟化挙動に及ぼす影響

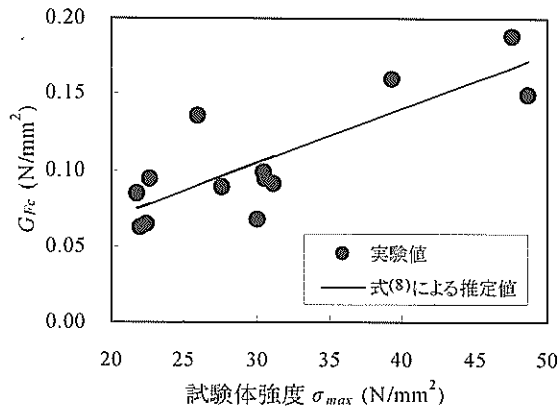


図-21 試験体強度と圧縮破壊エネルギーの関係

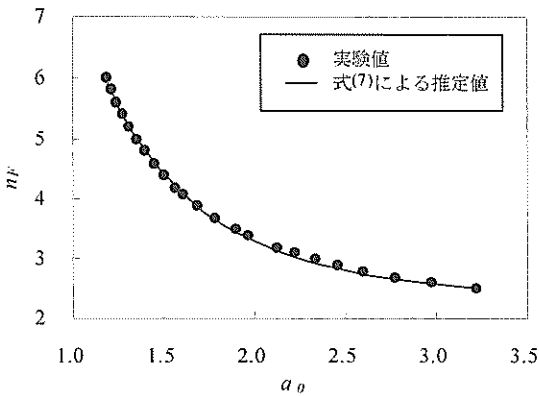


図-20 n_F と a_0 の関係

図-19(a)に、 n_F を変化させた場合に、式(6)を用いて算出された応力-ひずみ関係を示す。なお同図は、試験体強度 σ_{max} およびピーク時ひずみ ε_{F0} を用いて規準化されている。これによれば、 n_F が変化することで、ポストピークにおける軟化挙動が変化することがわかる。そこで、 n_F が破壊域における応力-ひずみ関係に及ぼす影響を把握するため、ポストピークにおいて、相対応力が0.1に達するまでの相対応力-相対ひずみ曲線下の面積を a_0 として、 n_F と a_0 の関係を調べた。その結果を図-20に示す。その結果、 a_0 の増加に伴う n_F の減少が確認され、両者の関係は、式(7)を用いてほぼ近似することができた。

$$n_F = 6.21 \times a_0^{-1.8} + 0.185 \times a_0 + 1.15 \quad (7)$$

a_0 は、図-19に示すように、式(6)を用いて表される曲線下の面積に等しくなる。破壊域に対する荷重-変位曲線下の面積を A_F とすると、 A_F は破壊域で消費されたひずみエネルギーと等しい。ここで、 A_F を破壊域体積(= $A_c \times L_p$, A_c : コンクリート断面積)で除すことにより、破壊域で消費された単位体積あたりのエネルギーが算出される。

これは、圧縮破壊エネルギー G_{Fc} に等しい。なお、この値は破壊域における応力-ひずみ曲線下の面積に等しくなる。

(2) 圧縮破壊エネルギー

コンクリートの破壊力学の分野では、最近では引張力が作用したときの破壊エネルギー G_F の定義と同様の観点から、圧縮時の破壊エネルギーを設定しようという検討がなされているが^{1),9)}、まだ一般的な見解を得るには至っていない。そこで本研究では、新たな圧縮破壊エネルギー G_{Fc} の定式化を試みた。

圧縮破壊エネルギー G_{Fc} の実験値を、アクリル棒を用いて計測した破壊域における応力-ひずみ曲線下の面積、すなわち破壊域で吸収されたエネルギーのみを用いて算出した。したがって、この G_{Fc} は、コンクリート全体で吸収されたエネルギーのすべてが、破壊域のみで消費されると仮定した既往の考え方^{1),9)}とは異なったものである。

本実験より得られた圧縮破壊エネルギー G_{Fc} と試験体強度 σ_{max} の関係を図-21に示す。この結果、 G_{Fc} は σ_{max} に比例して増加する傾向が示され、本研究ではこの関係を式(8)を用いて近似することにした。

$$\begin{aligned} G_{Fc} &= \frac{A_F}{L_p \times A_c} \\ &= 3.6 \times 10^{-3} \times \sigma_{max} - 3.6 \times 10^{-3} \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 σ_{max} : 試験体強度 (N/mm²)、 A_F : 破壊域で消費されたエネルギー (N・mm)、 L_p : 局所破壊領域長さ (mm)、 A_c : コンクリート断面積 (mm²) である。

(3) ピーク時ひずみ

続いて、破壊域におけるピーク時ひずみ ε_{F0} に関して考察および定量化を行った。標準圧縮強度試験時の応力-

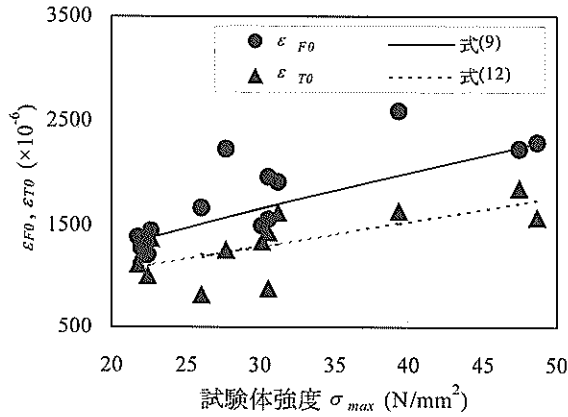


図-22 破壊域と遷移域のピーク時ひずみ

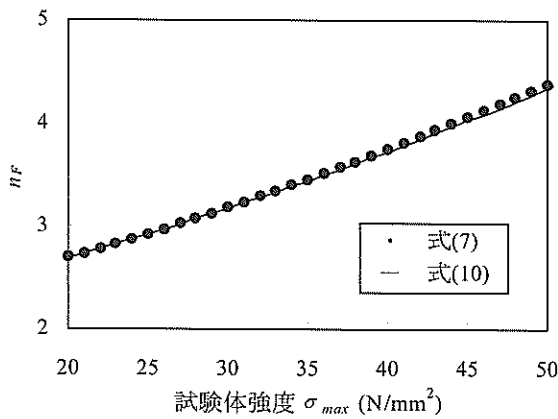


図-23 試験体強度と n_F の関係

ひずみ関係におけるピーク時ひずみについては、これまで多くの検討が行われ、一般にコンクリートの圧縮強度 f_c の0.25~1乗に比例して増加することが知られている²⁰⁾。しかしながら、荷重条件が統一されていないこと、あるいは標準圧縮強度試験用供試体の破壊形態が本研究で対象とした局所的圧縮破壊とは異なることなどから、既往

の提案式を用いても、ピーク時ひずみ ϵ_{F0} を厳密には評価することはできない。よって、適切な推定式を新たに設定する必要がある。

図-22に、実験より得られた ϵ_{F0} と σ_{max} の関係を示す。これによれば、本研究の範囲内では、粗骨材最大寸法の違いが ϵ_{F0} に及ぼす影響はそれほど顕著ではなく、 σ_{max} の2/3乗にほぼ比例して増加する傾向がみられた。これは、コンクリートの圧縮強度が増加することで、モルタル部の力学特性が骨材のそれに近くなり、コンクリート全体がより均一な挙動を示すようになったため、微細ひび割れが生じにくくなったことによると考えられる。よって、試験体強度 σ_{max} と破壊域におけるピーク時ひずみ ϵ_{F0} の関係を、式(9)で近似することにした。

$$\epsilon_{F0} = (1.72 \times 10^2 \times \sigma_{max}^{2/3}) \times 10^{-6} \quad (9)$$

(4) 破壊域における応力-ひずみ関係

以上より、本研究の範囲内では、破壊域における力学的パラメタには粗骨材最大寸法の影響はほとんど見られず、試験体強度 σ_{max} のみに依存することが分かった。したがって、 σ_{max} が既知となれば、式(6)中の実験定数 n_F を算出するための G_{Fc} および ϵ_{F0} が、式(8)および(9)を用いて推定可能となった。

しかし、このままでは用いる式が多く、計算が煩雑であるため、本研究では式(7)~(9)を用いて推定される実験定数 n_F をより簡便に表示することを試みた。図-23に、式(7)~(9)を用いて算出された n_F と試験体強度 σ_{max} の関係をプロットした結果を示す。この図より、 σ_{max} の増加とともに n_F が増加することが確認された。したがって本研究では、式(7)~(9)を用いて算出される n_F を、簡単のために σ_{max} のみの関数として、式(10)で近似することにした。

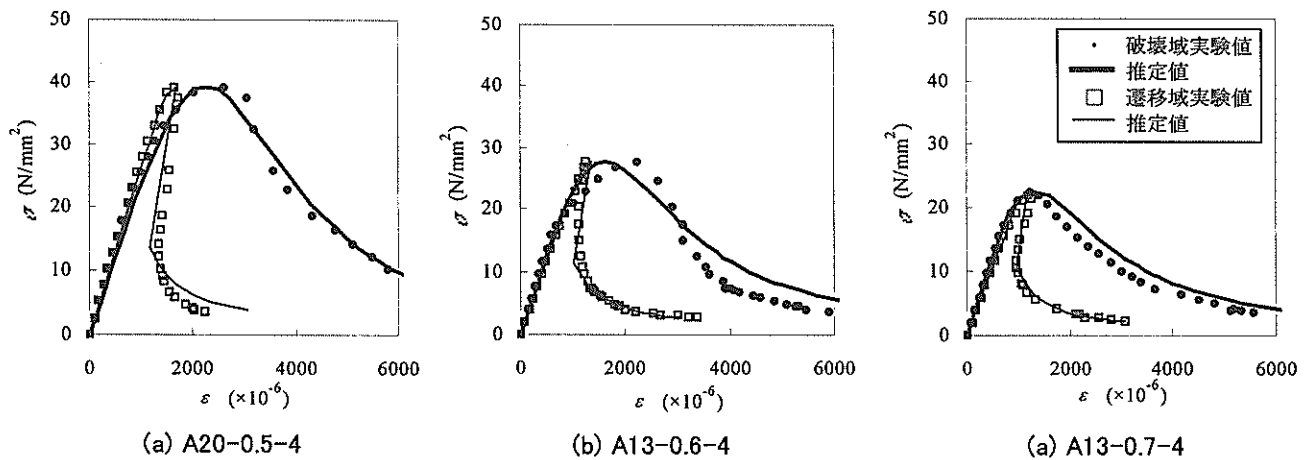


図-24 破壊域および遷移域における応力-ひずみ関係の比較

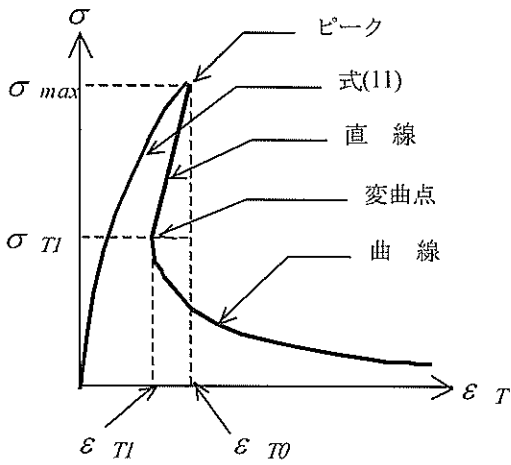


図-25 遷移域における応力-ひずみ関係

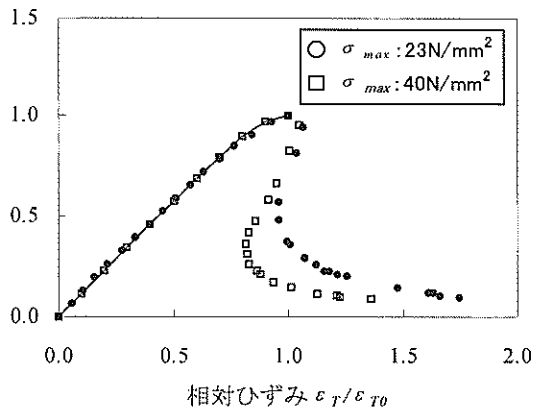


図-26 試験体強度の違いが軟化挙動に及ぼす影響

$$n_F = 3.00 \times 10^{-4} \times \sigma_{max}^2 + 3.47 \times 10^{-2} \times \sigma_{max} + 1.86 \quad (10)$$

したがって、コンクリートの圧縮強度 f_c あるいは試験体強度 σ_{max} さえ既知となれば、式(6)を用いて破壊域における応力-ひずみ関係が表されることが示された。図-24に、式(6)および式(10)を用いて推定された応力-ひずみ関係と、 $H/D=4$ の試験体の破壊域において実際に計測された応力-ひずみ関係の比較を示す。これより、コンクリートの圧縮強度にかかわらず、いずれのケースにおいても、本研究における提案式を用いることで、実験結果を精度良く表せることがわかった。

3.5 遷移域における応力-ひずみ関係の定式化

続いて、遷移域におけるコンクリートの応力-ひずみ関係を定式化することを試みた。図-25に、実験結果に基づく応力-ひずみ曲線のモデル化の考え方を示す。同図に示すように、本研究では、プレピークを直線に近い曲

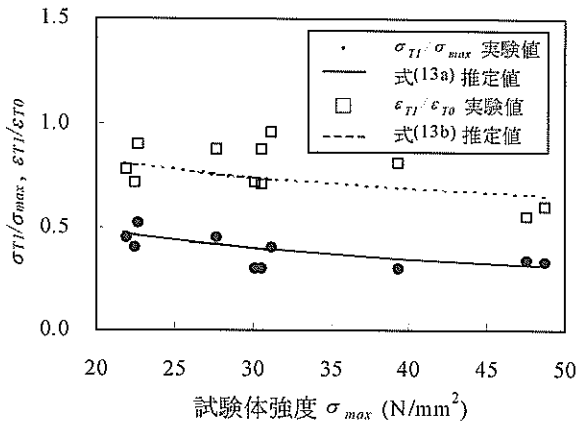


図-27 試験体強度が変曲点位置に及ぼす影響

線で近似し、ピークに達した後は、除荷されてひずみが減少する区間を直線で近似することにした。さらに、その後の変曲点 (σ_{Tl} , ϵ_{Tl}) 以降の軟化挙動は、下に凸な曲線を用いて表現することとした。表-7に、 $H/D=4$ の試験体に対して、載荷試験結果から得られた遷移域におけるパラメタ値を示す。

(1) プレピーク域

図-26に、試験体強度の異なる2つの試験体の遷移域における応力-ひずみ関係の実験結果を示す。ただし、同図は、 σ_{max} およびピーク時ひずみ ϵ_{T0} で無次元化してある。これによれば、いずれの試験体においても、プレピークにおける応力-ひずみ関係は、最大応力付近で非線形性を若干示すものの、ほぼ直線に近く、同様な形状を示した。そこで、Popovicsが提案した式(3)において、実験定数 $n_a=8$ として近似したところ、ピーク付近の非線形性も含めて、試験体強度にかかわらず精度良く近似できることがわかった。したがって、プレピーク域での応力-ひずみ関係を式(11)を用いて表すことにした。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = \frac{8 \times \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_{T0}}\right)}{7 + \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_{T0}}\right)^8} \quad (11)$$

ここで、 ϵ_T : 遷移域のひずみ、 ϵ_{T0} : 遷移域におけるピーク時ひずみである。

(2) ピーク時ひずみ

図-22に、遷移域におけるピーク時ひずみ ϵ_{T0} の実験値を示す。破壊域におけるピーク時ひずみ ϵ_{T0} と同様に、試験体強度 σ_{max} の増加にともない、 ϵ_{T0} も単調に増加したが、破壊域と遷移域ではその値が大きく異なった。これは、破壊の局所化がプレピークから生じており、破壊域でひずみが局所的に増加したためである。ここでは、 ϵ_{T0} の実

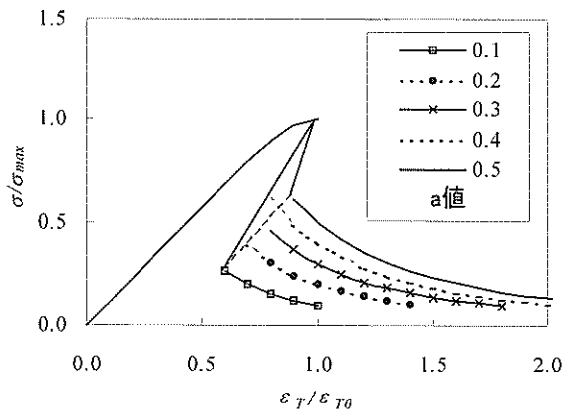


図-28 a 値による軟化曲線の変化

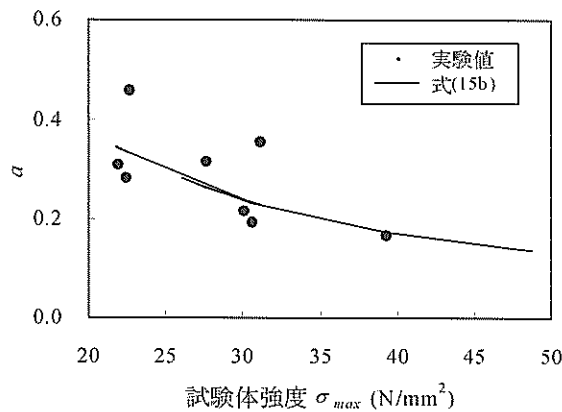


図-29 試験体強度と a 値の関係

験値を、最小二乗法により直線近似した式(12)を用いて表すことにした。

$$\epsilon_{T0} = (2.4 \times 10^1 \times \sigma_{max} + 5.77 \times 10^2) \times 10^{-6} \quad (12)$$

(3) 変曲点位置

次に、ポストピークにある変曲点に関して検討を行った。図-26に示すように、遷移域の応力-ひずみ関係は、ポストピークでは σ_{max} の相違にかかわらず、いずれの試験体もほぼ同様の経路で除荷され、ひずみが増加に転じたことがわかる。さらに、この変曲点における応力 σ_{T1} は、 σ_{max} の増加とともに低下した。これは、コンクリートが高強度になるにつれて、ピークまでに蓄えられるエネルギーが大きくなり、その結果、ピーク以降、破壊域で破壊が脆性的に進行するため、遷移域へのひび割れ進展が遅れたためと考えられる。

載荷試験結果から、遷移域におけるピーク時の応力とひずみ $(\sigma_{max}, \epsilon_{T0})$ で無次元化した変曲点における応力とひずみ $(\sigma_{T1}, \epsilon_{T1})$ を抽出した。その結果を図-27に示す。これより、変曲点における応力 σ_{T1} の低下は、試験体

強度 σ_{max} の0.7乗に反比例する曲線で、比較的精度良く近似できることがわかった。一方、ピーク以降、変曲点までの除荷曲線は、本節(2)でも述べたように、 σ_{max} によらずほぼ同一となったことから、変曲点におけるひずみ ϵ_{T1} は、そのときの応力 σ_{T1} と相関があると考えた。以上の検討結果から、変曲点における応力とひずみ $(\sigma_{T1}, \epsilon_{T1})$ については、式(13)で表すことにした。

$$\sigma_{T1} / \sigma_{max} = 3.2 \times \sigma_{max}^{-0.7} + 0.1 \quad (13a)$$

$$\epsilon_{T1} / \epsilon_{T0} = (\sigma_{T1} / \sigma_{max}) + 0.35 \quad (13b)$$

図-27に、式(13)による推定値をあわせて示す。 ϵ_{T1} の実験値がばらついているものの、 σ_{max} の変化にともなう変曲点における応力とひずみの傾向が概ね捉えられていることがわかる。

(4) 変曲点以降の軟化曲線

続いて、変曲点以降の軟化曲線の形状について検討を行った。H/D=4の試験体に対する載荷試験結果より、変曲点以降の下に凸な応力-ひずみ曲線を式(14)を用いて近似することにした。これは、破壊域の応力-ひずみ関係を近似する際に用いたPopovicsの提案式(式(3))の形状を参考にしたものである。

$$\sigma / \sigma_{max} = a \times (\epsilon_T / \epsilon_{T0})^b \quad (14)$$

ここで、 a, b : 実験定数である。

次に、載荷試験により得られた下に凸な曲線を十分な精度で表示可能な実験定数 a, b を決定した。破壊挙動が脆性的になり計測不能であったW/C=0.4のケースを除くと、実験定数 b を変化させても、曲線形状はわずかに変化するものの、ほぼ同様の曲線が得られた。本実験の範囲内では、 $b=-1.9$ とすることで、載荷試験より得られた下に凸な曲線の形状を概ね表すことができた。

一方、実験定数 a を変化させた場合には、曲線は図-28に示すように変化した。本節(3)で述べたように、変曲点における応力 σ_{T1} と試験体強度 σ_{max} に相関があることを考慮すると、同様に、実験定数 a と試験体強度 σ_{max} にも相関があると考えられる。載荷試験結果を最も良く近似できた実験定数 a を定めて、試験体強度 σ_{max} との相関関係を調べた結果を図-29に示す。これより、実験定数 a を σ_{max} の増加とともに減少する曲線で近似することで定式化し(式(15b))、さらに変曲点を通るような式形を検討した結果、変曲点以降の軟化挙動を近似する式として、式(15)が得られた。

$$\begin{aligned} \sigma / \sigma_{max} &= a \times (\varepsilon_T / \varepsilon_{T0})^b + c \\ &= (1.2 \times 10^1 \times \sigma_{max}^{-1.15}) \\ &\quad \times (\varepsilon_T / \varepsilon_{T0})^{-1.9} + 5.0 \times 10^{-2} \quad (15a) \end{aligned}$$

ここで、 $a = 1.2 \times 10^1 \times \sigma_{max}^{-1.15}$ (15b)

$b = -1.9$ (15c)

$c = 5.0 \times 10^{-2}$ (15d)

(5) 実験結果との比較

図-24に、遷移域における応力-ひずみ関係について、式(11)~(15)による推定結果と載荷試験結果の比較を示す。これより、コンクリートの圧縮強度 f_c にかかわらず、実験結果が精度良く再現できることが示された。

3.6 除荷域における応力-ひずみ関係の定式化

ここでは、除荷域における応力-ひずみ関係について検討を行った。除荷域の存在は、 H/D が4以下の試験体では、ほとんど認められなかったが、 H/D が4より大きい試験体では、試験体全体に占める除荷域の割合が大きくなり、その力学挙動を無視できなくなった。なお、アクリル棒を埋設した $H/D=8$ の試験体の局所ひずみ計測結果からは、除荷域においても、わずかに塑性ひずみが発生していたが、エネルギー吸収量は無視できる程小さかった。そこで本研究では、簡単のため、除荷域における応力-ひずみ関係は直線で近似できると仮定した。プレピークでは除荷域の力学特性は遷移域と同一であると考え、除荷域の剛性は、図-30に示すように、遷移域における応力-ひずみ関係の初期剛性に等しいとした。また、ポストピークでは、同一経路で除荷されるものとした。以上より、除荷域における応力-ひずみ関係として、式(16)が得られた。

$$\frac{\sigma}{\sigma_{max}} = 1.15 \times \left(\frac{\varepsilon_U}{\varepsilon_{T0}} \right) \quad (16)$$

ここで、 ε_U ：除荷域のひずみ、 ε_{T0} ：遷移域におけるピーク時ひずみである。

また、除荷域におけるピーク時ひずみ ε_{U0} は、式(15)を用いれば、式(17)のように表される。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{U0} &= 0.87 \times \varepsilon_{T0} \\ &= (2.1 \times 10^1 \times \sigma_{max} + 5.02 \times 10^2) \times 10^{-6} \quad (17) \end{aligned}$$

本研究で定式化された式(16)の妥当性は、3.7において、

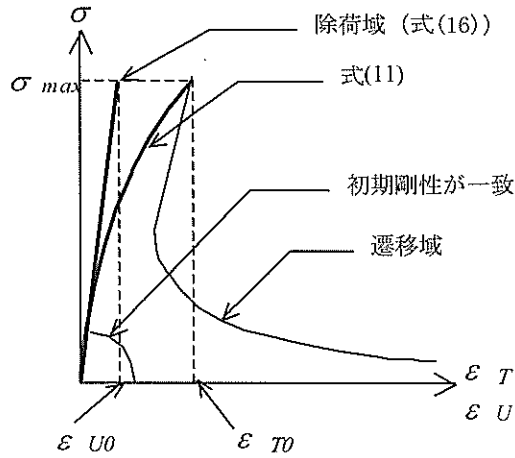


図-30 除荷域における応力-ひずみ関係

除荷域を含む $H/D=6$ または8の試験体全体の応力-ひずみ関係の妥当性の検証とあわせて検討した。

3.7 圧縮強度および破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係の提案

これまでの検討結果より、破壊域、遷移域および除荷域における局所的な応力-ひずみ関係が得られたが、ここでは最後に、コンクリート試験体全体の応力-ひずみ関係の定式化を行った。式(18)に示すように、各領域においてそれぞれ推定されたひずみを、各領域の寸法がコンクリート試験体全体に占める割合を考慮して加算することで、試験体全体の平均的なひずみ ε_{ave} を算定した。

$$\varepsilon_{ave} = \varepsilon_F \times \frac{L_p}{H} + \varepsilon_T \times \frac{L_T}{H} + \varepsilon_U \times \frac{L_U}{H} \quad (18)$$

図-31に、 H/D が2, 3, 4, 6および8である試験体に対して、載荷試験より得られた応力-ひずみ関係と、式(18)を用いて算定された応力-ひずみ関係の比較を示す。なお、算定にあたっては、 σ_{max} のみを実験値として用いた。また、破壊域長さ L_p には、実験結果の平均値である120mmを用いた。

図-31から明らかなように、ピーク時ひずみおよびポストピークを含めた非線形挙動は、式(18)により十分な精度で近似できた。実験結果と式(18)による算定結果に若干の差異が見られるケースもあったが、これは L_p を評価する際の誤差に起因するものと考えられる。また、除荷域が含まれる $H/D=6$ および8の試験体の応力-ひずみ関係においても、実験結果と算定結果に大きな差異が見られなかった。したがって、除荷域における応力-ひずみ関係を式(16)を用いて近似した仮定は、本研究の範囲内

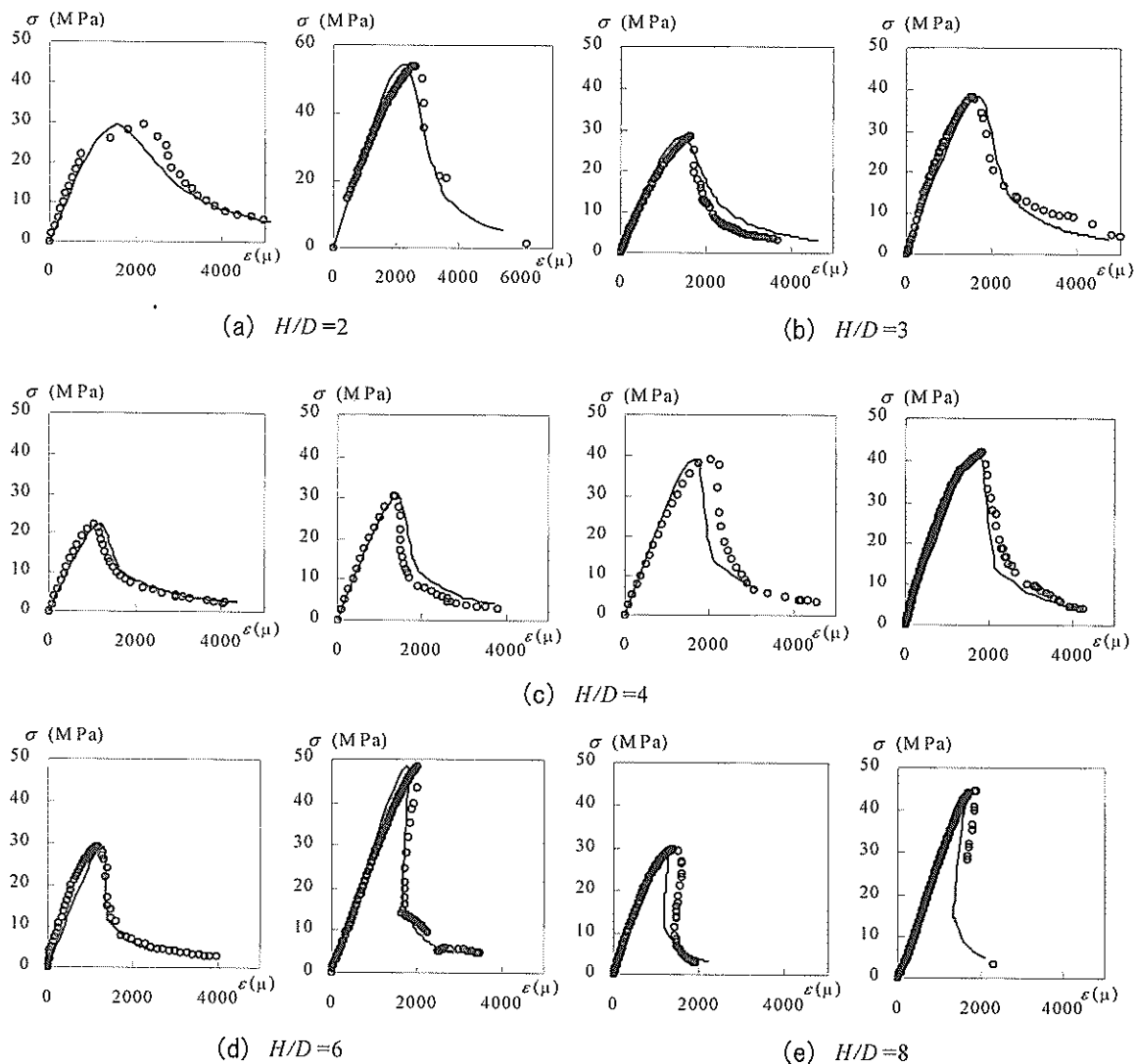


図-31 コンクリート試験体全体に対する応力-ひずみ関係の比較

で妥当であったと判断される。

以上より、本研究で提案した3つの領域における応力-ひずみ関係をそれぞれの寸法を考慮して足し合わせることで、局部的圧縮破壊現象により試験体寸法に依存して変化する圧縮力作用下の応力-ひずみ関係を、ポストピークを含めて、コンクリートの圧縮強度にかかわらず、精度良く算定できることが確認された。

3.8 まとめ

ここでは、コンクリートの局部的圧縮破壊現象を考慮した応力-ひずみ関係の定式化を目的として、試験体寸法や圧縮強度の異なるコンクリートの一軸圧縮荷試験を行った。荷試験により得られた局部的な応力-ひずみ関係を、破壊域、遷移域および除荷域の3つの領域ごとに定式化した。そして、3つの領域における応力-ひずみ

関係をそれぞれの寸法を考慮して足し合わせることで、局部的圧縮破壊現象を考慮したコンクリートの新しい応力-ひずみ関係を提案した。提案した関係式によれば、圧縮破壊の局所化により試験体寸法に依存して変化する応力-ひずみ関係を、ポストピークまでも含めて精度良く算定することができた。

4. 結論

本研究では、圧縮力を受けるコンクリートの局部的圧縮破壊現象を明らかにするため、断面形状・寸法や高さの異なるコンクリート試験体の一軸圧縮荷試験を行った。荷試験時には、コンクリート内部の局所ひずみ、コンクリートの平均ひずみ、ならびにひび割れの発生に起因するAEを計測した。また、荷試験が終了した試験

体に対してX線CT法を適用することで、コンクリート内部のひび割れを可視化することを試みた。これらの実験結果を踏まえて、簡便な局所破壊領域長さの推定方法および圧縮破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係を提案した。本研究で得られた主要な結論を以下に示す。

- (1) コンクリート内部における局所ひずみの発生状況の違いにより区別された破壊域と非破壊域では、AE発生挙動が明らかに異なった。これより、載荷試験中に最大荷重到達時までに検出されたAE波の累積最大振幅値に着目することで、局所破壊領域長さを推定することができた。また、圧縮破壊の局所化は、最大荷重到達前から開始されることがわかった。
- (2) X線CT法により、コンクリート内部のひび割れを可視化することで、ひび割れの発生状況を定量化できた。得られたひび割れ発生量は、コンクリート内部で吸収されたエネルギー量に大きく依存することがわかった。
- (3) コンクリート内部における局所ひずみおよびひび割れ発生状況から、最大荷重以降に軟化挙動を示す破壊域、除荷される除荷域、ならび両者の中間的な挙動を示す遷移域にコンクリート試験体を分割できた。それぞれの領域に対して、載荷試験結果を基に局所的な応力-ひずみ関係を定式化した。得られた応力-局所ひずみ関係を、それぞれの領域の寸法比を考慮して足し合わせることで、圧縮力を受けるコンクリートの平均的な応力-ひずみ関係を提案した。提案式による算定結果を実験結果と比較した結果、両者はよく一致することが示され、提案式の妥当性が確認できた。

5. あとがき

コンクリート構造物の挙動解析において、圧縮破壊の局所化を考慮することが可能となれば、これまでよりも合理的な構造設計が可能となると考えられる。

本研究では、圧縮力を受けるコンクリートの局所的圧縮破壊現象について実験的な検討を行った。その結果、圧縮破壊の局所化に関する有益な知見が得られたが、そのメカニズムを解明するまでには至らなかった。今後、さらに異なる条件下で多くの実験を行うことで、その解明を目指したい。

また、本研究で行った載荷試験結果に基づいて、圧縮

破壊の局所化を考慮した応力-ひずみ関係を提案したが、提案した関係式は、現時点では、あらゆるコンクリートに対して適用可能なものではない。そこで今後は、提案した関係式の適用範囲を拡大するための検討を行っていく必要がある。

(2003年5月12日受付)

参考文献

- 1) Lertsrisakulak, T. Watanabe, K., Matsuo, M. and Niwa, J.: Experimental study on parameters in localization of concrete subjected to compression, 土木学会論文集, No.669/V-50, 2001年, pp.309-321.
- 2) 日本コンクリート工学協会：破壊力学の応用研究委員会報告書, 1993年.
- 3) 岡村弘之：線形破壊力学入門, 培風館, 1976年.
- 4) Kaplan, M. F.: Crack propagation and the fracture of concrete, ACI Journal, Vol.58, No.11, 1961, pp.591-609.
- 5) Hillerborg, A., Modeer, M. and Peterson, P. E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite element, Cement and Concrete Research, Vol.6, No.6, 1976, pp.773-782.
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書, 2001年.
- 7) 内田裕市, 市之瀬敏勝：破壊のメカニズムと破壊力学, コンクリート工学, Vol.37, No.9, 1999年, pp.11-17.
- 8) 野口貴文：コンクリートの圧縮強度試験結果に及ぼす各種試験条件, コンクリート工学, Vol.35, No.9, 1997年, pp.12-18.
- 9) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, JCI-C51E, Vol.2, 1999, pp.259-272.
- 10) 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, 1999年, pp.37-53.
- 11) 畑中重光, 水野英二, 小池狭千朗：圧縮下のコンクリートの破壊性状とそのモデル化について, コンクリート工学年次論文集, Vol.16, No.2, 1994年, pp.147-152.
- 12) Popovics, S.: A numerical approach to the complete stress-strain curve of concrete, Cement and Concrete Research, Vol.5, No.3, 1973, pp.583-599.
- 13) Bazant, Z. P.: Identification of strain-softening constitutive relation from uniaxial tests by series

- coupling model for localization, Cement and Concrete Research, Vol.19, No.6, 1989, pp.973-977.
- 14) 田所敏弥, 佐藤靖彦, 上田多門: 鉄筋コンクリート部材の終局変形に及ぼす圧縮軟化の影響, 構造工学論文集, Vol.47A, 2001年, pp.1309-1314.
 - 15) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論, 森北出版, 1988年.
 - 16) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の診断のための非破壊試験方法研究委員会報告書, 2001年, pp.153-180.
 - 17) 大塚浩司: X線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひび割れ検出に関する研究, 土木学会論文集, No.451/V-17, 1992年, pp.169-178.
 - 18) 天明敏行, 堤知明, 村上祐治, 尾原祐三: X線CT法による超硬練りコンクリートの骨材分布と締固め, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, 2001年, pp.1297-1302.
 - 19) 日本規格協会: JISハンドブック, 1991年.
 - 20) 岡田清, 六車熙 編: 改訂新版コンクリート工学ハンドブック, 第9章コンクリートの力学的性質, 朝倉書店, 1981年, pp.335-555.

記号表

- A_F : 破壊域体積 (mm^3)
 A_c : コンクリート断面積 (mm^2)
 a : 遷移域における軟化曲線のための定数
 a_0 : 相対応力-相対ひずみ曲線下の面積
 b : 遷移域における軟化曲線のための定数
 c : 遷移域における軟化曲線のための定数
 D : 試験体最大幅 (mm)

- D^* : 等積正方形の辺長 (mm)
 f_c' : 圧縮強度 (N/mm^2)
 G_F : 破壊エネルギー (N/mm)
 G_{Fc} : 圧縮破壊エネルギー (N/mm^2)
 G_{max} : 粗骨材最大寸法 (mm)
 H : 試験体高さ (mm)
 L_p : 局所破壊領域長さ (mm)
 L_T : 遷移域長さ (mm)
 L_U : 除荷域長さ (mm)
 n_a : Popovics式における実験定数
 n_F : 破壊域における応力-ひずみ関係式中の実験定数
 W/C : コンクリートの水セメント比
 ε : コンクリートのひずみ
 ε_{ave} : コンクリートの平均ひずみ
 ε_F : 破壊域におけるコンクリートのひずみ
 ε_{F0} : 破壊域におけるコンクリートのピーク時ひずみ
 ε_m : ピーク時ひずみ
 ε_T : 遷移域におけるコンクリートのひずみ
 ε_{T0} : 遷移域におけるコンクリートのピーク時ひずみ
 ε_{T1} : 遷移域における応力-ひずみ曲線の変曲点におけるひずみ
 ε_U : 除荷域におけるコンクリートのひずみ
 ε_{U0} : 除荷域におけるコンクリートのピーク時ひずみ
 ϕ : 円柱コンクリート試験体の直径 (mm)
 σ : コンクリートの応力 (N/mm^2)
 σ_{max} : 試験体強度 (N/mm^2)
 σ_{T1} : 遷移域における応力-ひずみ曲線の変曲点における応力 (N/mm^2)