

論文 初期欠陥がコンクリートの破壊に及ぼす影響に関する数値解析的研究

吉田 秀典^{*1}・和田 光真^{*2}

要旨： 圧縮下におけるコンクリートの破壊現象は複雑であるが、破壊に対して支配的となる因子は無数存在するわけではない。本研究では、こうした破壊に影響を及ぼす因子の一つである初期欠陥に着目し、それが圧縮下におけるコンクリートの破壊にどのような影響を及ぼすかについて数値解析的に検討した。同時に、供試体寸法や降伏条件などを変化させて解析を行い、初期欠陥と併せて、これらが破壊に及ぼす影響についても検討した。その結果、破壊に対してこれらの因子の影響が大きいことが判明し、実際のコンクリートが非均質であることを考えれば破壊はより複雑になることを示唆した。

キーワード： 破壊，初期欠陥，供試体寸法，降伏関数，有限要素解析

1. はじめに

圧縮下におけるコンクリートの破壊は、一般的に、初期の段階から既に骨材とモルタルとの界面にマイクロクラックなどの初期欠陥（初期ひび割れ）が存在し、場合によっては、こうした欠陥が終局時に連結して脆性的な破壊を引き起こす。その他に、初期欠陥が発生する要因としては、モルタル成分と水が分離する沈み、水和熱による不均一な膨張および乾燥収縮などの硬化過程によるひび割れの発生が挙げられる。また、施工時に混入された木屑や鉄屑などがマイクロクラックを誘発する場合や、荷重や気候などの外的作用によってひび割れが発生する場合もある。現在、数値解析手法の発達により、様々な材料の力学的挙動の再現が可能となり、材料の耐久性などを議論する場合に、数値解析結果は極めて重要となりつつある。しかしながら、一般的に多くの材料は均質ではなく、特にコンクリートは単に非均質であるだけでなく、上述の通り、初期段階から多数の欠陥を含むという特徴を有する。現在の所、こうした初期欠陥に代表される材料非均質性が破壊に及ぼす影響を明確な形で解析に反映している手法はそれほど多くはない。

そこで本研究では、コンクリートの破壊に影響

を及ぼす因子の一つである初期欠陥に着目し、それがコンクリートの破壊にどのような影響を及ぼすかについて数値解析による検討を行う。同時に、供試体寸法や降伏条件などを変化させて解析を行い、上述した初期欠陥と併せて、これらが破壊に及ぼす影響について検討する。

2. 構成モデル

材料の力学挙動の解析においては、その材料の応力 - ひずみ関係を表す構成則のモデル化が極めて重要であり、コンクリートに関しても、これまで多くの研究がなされ、そして多くの構成モデル¹⁾が提案されている。コンクリートは複合材料であり、かつ極めて非均質性の強い材料であることを念頭におくと、予測解析などにおいて高い精度が要求される場合、詳細な箇所に至るまでを細かくモデル化しなくてはならない。しかしながら、不確定要素が無数に存在するコンクリートにおいて、そうしたモデル化は非現実的であり、設計段階などでは、平均的な挙動（マクロ的な挙動）を大略的に捉えることができる構成モデルを準備する方が現実的である。そこで本研究では、「日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」²⁾に準じて構築されたコンクリートに対する構成モデル³⁾（図 - 1

*1 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 博士（工学）（正会員）

*2 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻（正会員）

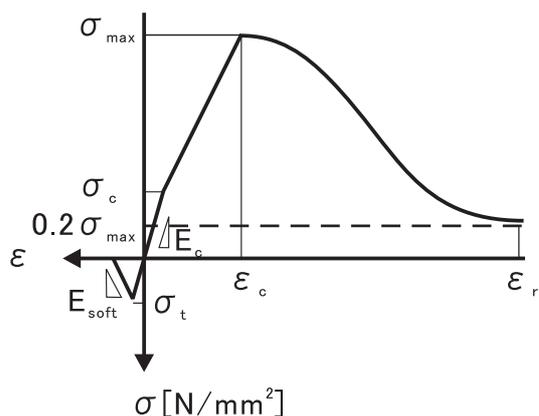


図 - 1 コンクリートの構成モデル

参照) をベースに解析を実施する。

この構成モデルにおいては、ピーク圧縮強度 (σ_{\max}) の $1/3$ の応力度を初期降伏圧縮応力 (σ_c) とし、この応力度に至るまでは弾性的に挙動するものとしている。また、ピーク時におけるコンクリートのひずみ (ε_c) は $0.15\sim 0.30\%$ 程度²⁾ であることから、本研究では 0.2% に設定し、初期降伏後ピークに至るまでは、図に示すような硬化挙動を呈するものとしている。ピーク後の軟化挙動については、ピーク圧縮強度に対して 20% まで低下し、この時のひずみを 0.6% (ε_r) としている。既往の研究³⁾ では、ピークから残留に至るまでを比例軟化させているが、本研究では、ピークおよび残留状態に至る付近で穏やかな応力変化になるように、若干の修正を行った。さらに、降伏条件が破壊形態に与える影響についても検討するため、von Mises 型 (式 (1)) と Drucker-Prager 型 (式 (2)) の 2 種類を採用した。

$$\sqrt{J_2} - \sigma_c = 0 \quad (1)$$

$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k_c = 0 \quad (2)$$

ここで、 I_1 、 J_2 は不変量であり、また α および k_c は次式で定義される。

$$\alpha = \frac{2 \sin \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (3)$$

$$k_c = \frac{\bar{\sigma}}{\sqrt{3}} = \frac{6c \cos \phi}{\sqrt{3}(3 + \sin \phi)} \quad (4)$$

ここで、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角、 $\bar{\sigma}$ は相当応力を表すが、コンクリートにおける c 、 ϕ に関する資料は少ないため、本研究では、 $c = \sigma_c/2$ 、 $\phi = 25$ 度/50 度と仮定して用いた。なお、硬化則は等方硬化とした。

表 - 1 コンクリートの材料特性

ヤング係数	ポアソン比	圧縮強度	引張強度
24,200N/mm ²	0.2	30N/mm ²	2.22N/mm ²

表 - 2 鋼板の材料特性

ヤング係数	ポアソン比
210,000N/mm ²	0.3

一方、引張側は、圧縮側と同じ勾配を有しながら引張強度 (σ_t) まで上昇し、引張強度に達した後は、クラックなどの発生に伴う引張軟化の挙動を再現できるようモデルを設定した。具体的には、最大主応力が引張強度に達すると、最大主応力の方向と直交する方向にのみ一定の勾配を有して軟化するものとしている。軟化勾配については、文献³⁾ を参考に、 $20,000\text{N/mm}^2$ とした。引張強度については、算定式⁴⁾ $\sigma_t = 0.23 \sigma_{\max}^2$ を用いて算出した。なお、この構成則は、要素内に複数のひび割れが含まれることを前提とした平均化構成則であるため、要素分割によってコンクリートが消費する破壊エネルギーは異なり、局所化を前提とした解析の場合、その前提が崩れない程度に十分小さな要素分割を必要とするが、本解析では、局所化は前提としていない。

3. 有限要素解析

3.1 解析概要

本研究では、文献⁵⁾ を参考に、幅 100mm 、高さ 100mm 、 200mm および 400mm の 3 種類の角柱コンクリート供試体を解析対象とし、2次元平面応力下で、文献⁵⁾ における実験と同様に、上端部に変位制御 (等分布) による載荷を行った。端部の境界条件に関しては、供試体の上下端部に鋼板 (幅 100mm 、高さ 20mm 、供試体とは完全固着) を設置した上で、解析領域下端の y 方向の変位を固定し、 x 方向については解析領域下端の中心点の変位を固定した。解の収束を検討した結果、要素の 1 つの大きさを $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ とした。本解析で用いたコンクリートと鋼板の材料特性をそれぞれ表 - 1、2 に示す。

3.2 初期欠陥の有無による影響

まず、均一な材料特性を有する供試体に対して解析を行った。ただし、ここでは von Mises 型

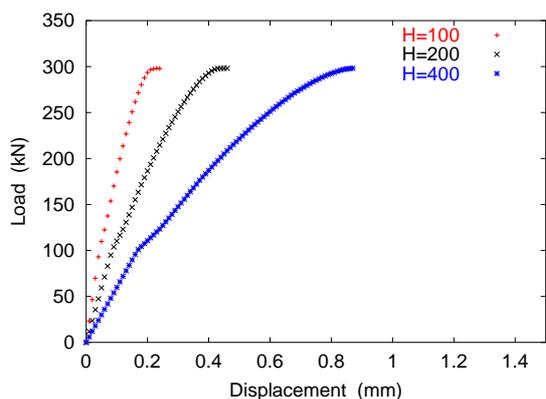


図 - 2 均一要素の荷重 - 変位関係 (von Mises)

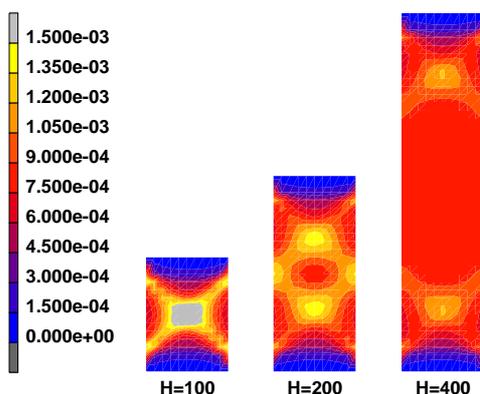


図 - 3 均一要素の塑性ひずみ分布 (von Mises)

の降伏条件を用いた結果のみを示す。なお、本解析は材料全体が解析的に安定を失うと判断した時点で解析を停止させており、局所化後の挙動に追従できるものではないため、マクロ的につり合いが取れる時点までの解析であることに注意されたい。まず、図 - 2 に荷重 - 変位関係を示す。供試体の寸法が異なるため、同じ荷重のレベルでも変位量は異なるが、それ以外、例えば、初期降伏荷重（約 100kN）およびピーク荷重（約 300kN）はどの寸法でも同値で、差は見られない。次に、図 - 3 にピーク時の相当塑性ひずみ分布を示す。供試体の高さが低い場合、相当塑性ひずみは供試体中央に集中する傾向が見られるが、高さが高くなるにつれ、上下に二極化することが分かる。また、供試体の高さが高いと一箇所にひずみが集中する傾向は薄れ、分散的な広がりを呈するが、いずれの分布も中央部を中心とする対称分布を呈し、文献⁵⁾に記載されている破壊形態とは大きく異なる。

そこで本研究では、コンクリートが非均質材

料であることを考慮し、供試体の一部に周辺コンクリートの強度より若干小さい強度を有する領域（本解析では、初期欠陥=Imperfection 要素と呼ぶ）を設けることとした。Imperfection 要素を設ける箇所としては、図 - 3 に示すひずみのバンド部分（二極化している場合は上側のバンド部分）の左下隅に、一要素だけ設けた（具体的な箇所は、H=100mm に関しては図 - 8 の A の位置、H=200mm に関しては図 - 9 の D の位置、そして H=400mm に関しては図 - 10 の G の位置）。また、Imperfection 要素の強度は周辺部要素より 1%のみ低減させることとした。この条件下で行った解析における相当塑性ひずみ分布を、それぞれの供試体寸法ごとに図 - 4 から図 - 6 に示す。なお、図においては、ピーク時のひずみから 10%程度ひずみが小さい時点、ピーク時、ピーク時から 5%程度ひずみが大きい時点の 3 段階の相当塑性ひずみ分布を示している。図より、図 - 3 では中央部対称であった分布とは大きく異なり、1つのバンド（上下に二極化したものでは上側）にひずみの集中が見られる。この集中は Imperfection 要素を近傍に持つバンド側に集中しており、これは、初期欠陥の存在によって破壊形態が大きく異なることを示唆している。次に、それぞれの供試体の荷重 - 変位関係を図 - 7 に示す。供試体の高さが低い H=100mm では、1つのバンドにひずみが集中しており、この場合、解析的につり合いがとれ、マクロ的な軟化挙動まで解析ができています。H=100mm の結果は文献⁵⁾の結果とほぼ合致しており、このことから初期欠陥の存在は破壊形態に大きな影響を及ぼすことが分かる。なお、ひずみが供試体上下に二極化する他の 2 ケースは、図 - 3 と大差が見られず、また、軟化初期の段階で解析的につり合いがとれなくなっている。これらについても最終段階まで解析を行うためには、局所化判定が可能なモデルへの変更が必要であろう。

3.3 初期欠陥の位置による影響

前節では、初期欠陥の有無による影響について検討を行ったが、本節では、その位置が破壊形態にどのような影響を及ぼすかについて検討を行

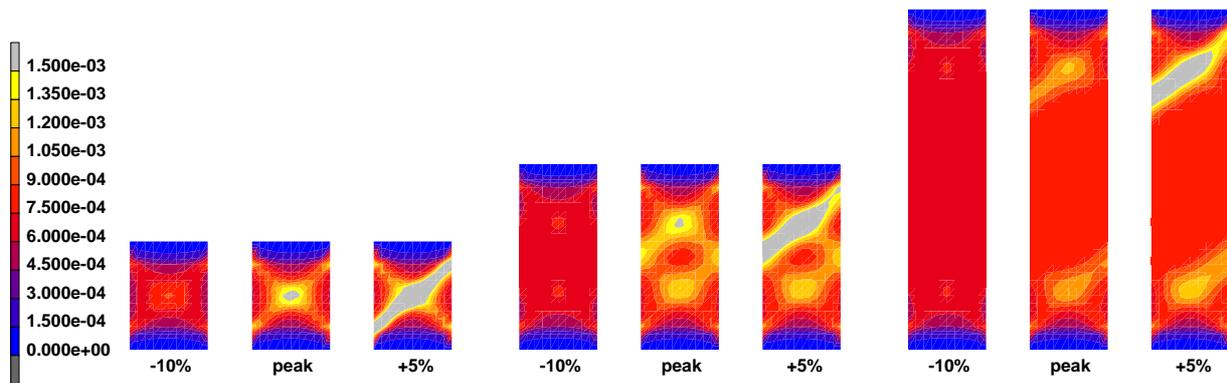


図 - 4 相当塑性ひずみ分布 (H=100, von Mises) 図 - 5 相当塑性ひずみ分布 (H=200, von Mises) 図 - 6 相当塑性ひずみ分布 (H=400, von Mises)

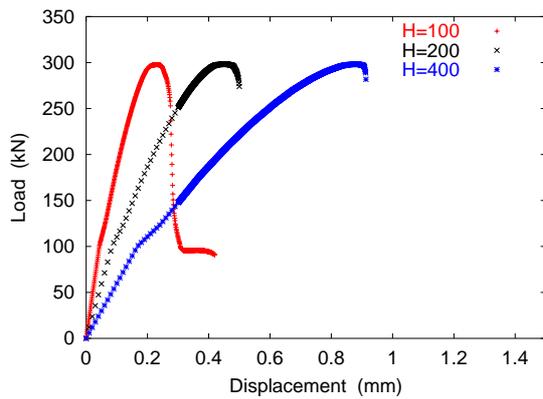


図 - 7 荷重 - 変位関係 (von Mises)

う。本節では、前節の初期欠陥の位置より上方、あるいは上方中央に初期欠陥がある場合を加え、合計3ケースについて比較検討を行う。各ケースの初期欠陥の位置とピーク時から5%程度ひずみが多い時点における相当塑性ひずみ分布を図-8~図-10に示す。いずれのケースにおいても、初期欠陥を前節のケースより上方に置いた場合は、前節とは異なる側のバンド（右斜め下に拡がりをもつバンド）にひずみが集中し、上方中央に置いた場合は、H=100mmでは供試体の中央に、H=200mmでは下に位置するバンドの中央に、そしてH=400mmでは顕著なひずみの集中が見られない結果となった。つまり、均一な供試体における相当塑性ひずみ分布（図-3）ではひずみが集中しているバンドはX字に存在しているが、ある任意のバンド近傍に初期欠陥を配置すると、そのバンドにひずみがより集中し、その他のバンドにはそれほど大きなひずみの集中が見られない。これより、初期欠陥の位置によっては、初期欠陥の有無が破壊形態に

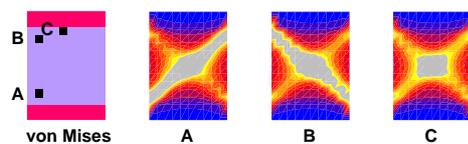


図 - 8 初期欠陥と相当塑性ひずみ分布 (H=100)

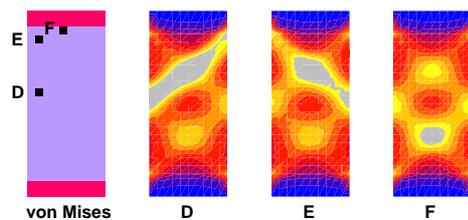


図 - 9 初期欠陥と相当塑性ひずみ分布 (H=200)

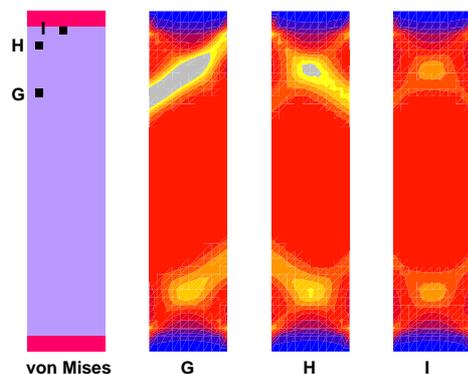


図 - 10 初期欠陥と相当塑性ひずみ分布 (H=400)

大きな影響を及ぼす場合とそうでない場合があることが分かる。また、複合材料であるコンクリートは非均質で、かつ多数の初期欠陥を含むことから、一連の結果は、その破壊形態は非常に複雑になることを示唆している。本解析が参考にした実験⁵⁾においても、コンクリートは非常に複雑な破壊形態を呈しており、解析においてこうした複雑な破壊形態を再現するには、初

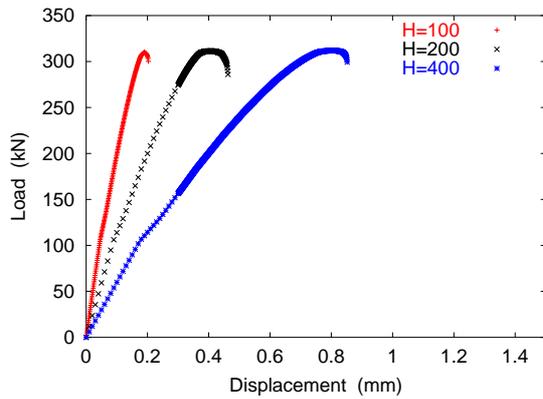


図 - 11 荷重 - 変位関係 ($\phi=25$)

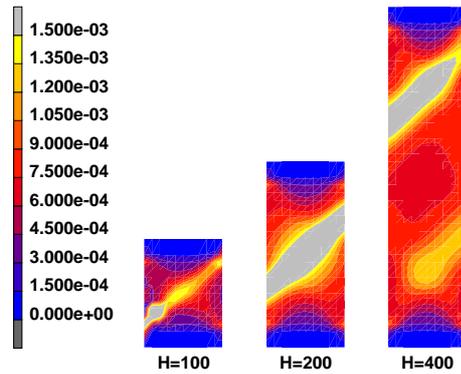


図 - 13 相当塑性ひずみ分布 ($\phi=25$)

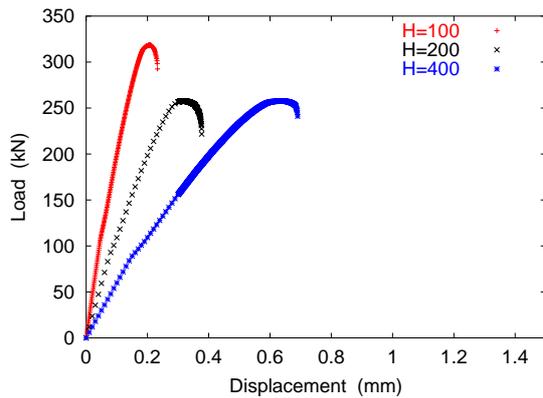


図 - 12 荷重 - 変位関係 ($\phi=50$)

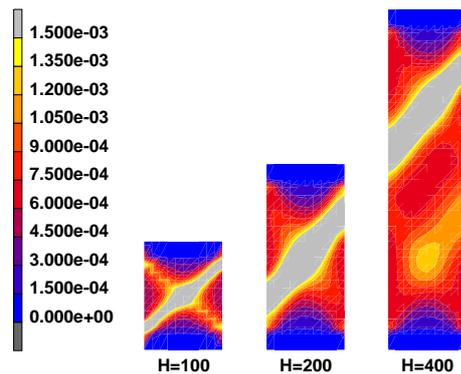


図 - 14 相当塑性ひずみ分布 ($\phi=50$)

期欠陥も含め材料非均質性を適切に評価することが必要となるが、現実的には難しいと考える。

3.4 破壊条件による影響

前節までの考察により、圧縮下におけるコンクリートの破壊挙動は初期欠陥の有無やその幾何学的配置に大きく依存することが判明した。しかしながら、図 - 7 より、供試体の高さが異なっても、巨視的なピーク荷重はほぼ同じであるという結果が得られており、コンクリート工学の教科書⁶⁾に示されている、高さの増大に伴う圧縮強度の低減が見られない。単に初期欠陥を設けただけでは、こうした現象の説明にはならない。そこで本研究では、von Mises 型の降伏条件に加え、Drager-Prager 型の降伏条件を用いて同様の解析を行った。本稿では、式 (4) における c を $\frac{\sigma_c}{2}$ に固定し、 ϕ について 25 度および 50 度の 2 ケースについて行った結果を示す。

まず、 $\phi = 25$ 度および 50 度における荷重 - 変位関係を図 - 11 および図 - 12 にそれぞれプロットする。 $\phi = 25$ 度の場合は、それほど von-

Mises の場合と差がなく、ピーク時のひずみのレベルが若干下がっているものの、供試体の高さ変化にともなうピーク荷重の変化は見られない。しかしながら、 $\phi = 50$ 度の場合は、ピーク荷重が低減しており、上述した一般的な傾向と合致する。これより、内部摩擦角のような強度定数がコンクリートの破壊挙動に影響を及ぼしていることが判明した。

次に、ピーク時から 5% 程度ひずみが多い時点における相当塑性ひずみ分布を、 $\phi = 25$ 度の場合は図 - 13 に、 $\phi = 50$ 度の場合は図 - 14 にそれぞれ図示する。図より、 $\phi = 0$ 度に相当する von Mises に比べて、 ϕ が増すにつれひずみの集中しているバンドが立つようになり、それと同時に、ひずみの集中が顕著になっている。von Mises 型の降伏条件を用いた場合、 $H=200$ mm において二極化していたひずみ分布も、Drager-Prager 型の降伏条件を用いた場合は二極化せずに一極化している。 $H=400$ mm については二極化したままであるが、初期欠陥が近傍にあるバンドにおいてひずみの集中が顕著である。 $H=100$ mm に

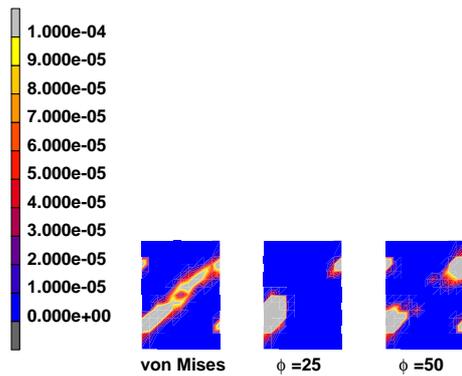


図 - 15 クラックひずみ分布

ついては、降伏条件の違いによる差が若干は見られるものの、他の2ケースと比較すると、その差は大きくない。これより、ひずみの集中とピーク荷重の低減には相関があるものと思われる。

さらに、図 - 15 には、 $H=100\text{mm}$ におけるクラックひずみ（引張破壊にともなうひずみ）を図示する。他の高さにおいても、shear band に沿って若干の引張破壊が見られたが、本稿では、ひずみのレベルが大きかった $H=100\text{mm}$ のケースのみを示す。クラックひずみの分布に着目すると、圧縮破壊、つまり shear band の発達にともなって、ひきずられるように引張クラックが発生する様子が図から伺える。また、図より、 ϕ が大きくなるにつれ、引張破壊を生じる領域は小さくなり、 $\phi = 25$ 度および $\phi = 50$ 度では供試体の左右縁部にのみ存在している。これは、前述の通り、 ϕ が増すにつれて shear band が立つようになり、その結果、引張破壊を生じさせる driving shear force が低減するからである⁷⁾。相当塑性ひずみに比べると、クラックひずみの値は一桁小さいことから、破壊の主たる要因とはなっていないものの、複雑な破壊を呈する背景に、こうした複合的な破壊の存在もあるものと思われる。

4. まとめ

本研究では、圧縮下におけるコンクリートの破壊に影響を及ぼす一因である初期欠陥、供試体寸法、降伏条件に着目し、これらを変化させて解析を行った。その結果、これらがコンクリートの破壊に影響を及ぼしていることを確認し、以下のような知見を得た。

- (1) 初期欠陥の有無によって、破壊形態が大きく異なる。
- (2) 初期欠陥の位置によって、破壊の顕在化や分散化が生じる。
- (3) 材料非均質性が著しくない場合、巨視的挙動に及ぼす非均質性の影響は大きくない。したがって、供試体高さの変化にともなうピーク荷重の変化などを解析的に表現するには、材料非均質性を著しくするか、あるいは解析モデルの再考が必要となる。
- (4) コンクリートのように非均質性が著しい材料においては、その破壊形態は極めて複雑で、実際の構造物の設計などでは、こうしたことを十分に留意すべきである。

今後は、実構造物あるいは材料の非均質の程度が不明であること踏まえ、供試体中の材料特性を確率的にばらつかせた解析などを通して、ばらつきが破壊に及ぼす影響について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 例えば、岡村甫、前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則、技報堂出版、1991.
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 - 許容応力度設計法 - , 1999.
- 3) 吉田秀典ほか：低張力材料の構成モデルを用いたボイドスラブの非線形解析、応用力学論文集, vol.4, pp325-332, 2001.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編, 1996.
- 5) T. Lertsrisakulrat 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.
- 6) 例えば、小林一輔：最新 コンクリート工学 第3版, 森北出版社, pp.70, 1992.
- 7) Horii, H. and Nemat-Nasser, S.: Brittle Failure in Compression: Splitting, Faulting and Brittle-Ductile Transition, *Phil. Trans. Roy. Soc. London*, vol.319, pp.337-374, 1986.