

圧縮荷重下におけるコンクリートの破壊領域の形成に関する一考察

A STUDY ON FORMATION OF FRACTURED ZONE OF CONCRETE UNDER COMPRESSION

吉田秀典*・宇田圭一**

Hidenori YOSHIDA and Keichi UDA

*正会員 博士(工学) 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

**香川大学 大学院工学研究科 安全システム建設工学専攻 (〒761-0396 香川県高松市林町 2217-20)

A concrete under compression can show not only quite complex phenomena such localization but qualitative aspects in its failure. As an example of qualitative aspects, the size of fractured zone on a concrete can be empirically expressed as a function of the size of cross-sectional surface of a concrete. In this study, thus, the understanding of the formation of fractured zone on a concrete under compression and the clarification of its mechanism are aimed. The fractured aspects of concrete under compression can be explained by numerical approaches, and the affecters and mechanism of the failure of concrete are considered.

Key Words : compressive failure zone, failure mechanism, affecters of failure, stress-strain relationship

キーワード：圧縮破壊領域，破壊のメカニズム，破壊に対する影響因子，応力-ひずみ関係

1. はじめに

近年，構造解析技術が進歩するにつれ，コンクリートの構造物の破壊現象や非線形挙動の発生メカニズムを把握・解明し，それに基づいて合理的な力学モデルを構築しようという気運が高まってきた¹⁾。これまでの一連の研究の成果より，コンクリートの非線形挙動はその領域内で生じるマイクロクラック（微小のひび割れ）の発生，成長，連結などに起因することが判明し，それをモデル化するためにひび割れ進展にもなる引張軟化特性の定量化などに精力が注がれた²⁾。

しかしながら，コンクリートの破壊に関する力学的研究の成果に関しては，いわゆるモードIと呼ばれる引張破壊に関するものが大半を占めている。その圧縮強度が大きいことから建設材料として多用されているコンクリートではあるが，実際には，その複雑な現象の故に，圧縮側の挙動に関しては一般的な評価が得られていないのが現実である³⁾。特に，コンクリートの圧縮破壊に関しては，微視レベルでの破壊のメカニズムと巨視的な破壊の関係を関連づけて説明されていないのが現状である。

こうした中で，水野らは圧縮下のコンクリートの軟化特性を把握し，ひずみ空間で定義した塑性理論に基づきひずみ軟化型構成則を導いているが^{4),5),6)}，必ずしも実験値を精度よく表現しているわけではなく，ここでも圧縮破壊のメカニズムの複雑さとその把握の難しさを物語っている。また二羽らは，コンクリートの破壊進行領域における多軸応力状態の力学的特性を解明するために，ひずみゲージを貼付したアクリル棒を

コンクリート供試体に埋め込んだ実験⁷⁾や，計測としてAE法を採用した実験⁸⁾などを行い，圧縮下におけるコンクリートの破壊および局所化のメカニズムの解明を試みている。さらに，このような実験を通じて得られた知見を基に，局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係，すなわち構成則のモデル化を行っている⁹⁾。

コンクリートの圧縮破壊に関する二羽らの実験において興味深いことの一つに，圧縮力を受けるコンクリートは，載荷とともに圧縮破壊する破壊領域と除荷する非破壊領域に区別できるという知見が挙げられる。知見によれば，局所的に吸収されるエネルギーが供試体全体で吸収されるエネルギーに対して15%となる領域を破壊領域と定義すると，供試体の高さ H が最大幅 D の2倍以上である場合($H/D > 2$)，この領域の供試体軸方向の長さ L_p は供試体断面積の A_c のみに依存し⁷⁾，さらに，こうした破壊現象の測定方法としてAE法が適用できるとしている⁸⁾。例えば，一般的な実験に用いられる100 mm × 100 mmの角柱供試体あるいは $\phi = 100$ mm円柱供試体の場合，ひずみ局所化領域の長さ L_p は150 mm ~ 170 mm程度となる。ただし， L_p に関しては，粗骨材最大寸法 G_{max} に影響するという見解もある³⁾。しかしながら，このひずみ局所化領域の長さ L_p は実験的事実に基づいて供試体断面積の A_c の関数として表すことができるとは言うものの，そのメカニズムについては必ずしも明らかになっていない。また，圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの構成則に関する研究⁹⁾において，構成則を破壊領域，遷移域そして非破壊領域（除荷域）の

3つに分けて設定することで精度良く実験を再現できるとしているが、領域ごとにコンクリートの構成が異なるとは考え難い。特に、実構造物のシミュレーションなど、実際には破壊領域、遷移領域そして非破壊領域などが不明である構造物の挙動予測解析を行う場合、どのように各々の構成則の適用領域を設定すべきかという課題も存在する。

そこで本研究では、圧縮下におけるコンクリートの挙動について、特にその破壊現象や非線形挙動の発生メカニズムの把握・解明に向けた最前線の研究である二羽らの研究を補完する目的で、ひずみ局所化領域の長さ L_p の出現および構成則の持つ意味に関して数値解析的検討を施すこととした。

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、前出の二羽ら研究⁹⁾の他にも多くの構成モデル¹⁰⁾が提案されている。コンクリートは複合材料であり、かつ極めて不均一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、設計段階では平均的な挙動（マクロ的な挙動）を大体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」¹¹⁾に準じて構築されたコンクリートに対する構成モデル¹²⁾（概念的には図-1のような形。実際はもう少し滑らかな曲線）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0.15~0.30%程度¹¹⁾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。ピークに達した後、ひずみが0.25%になるまでピーク応力 (σ_{max}) を保ち、その後には軟化現象に至る。軟化時の挙動については、ピーク圧縮強度に対して20%の応力になる時点でひずみ (ϵ_r) が0.8%なるようにした。降伏条件が破壊形態に与える影響についても検討した結果¹²⁾、von Mises型の降伏条件より Drucker-Prager型の降伏条件の方が現実的に則していると考え、本研究では後者を採用した。ただし、文献¹²⁾の検討や本稿で対象としている実験事例が単軸載荷であることからこのような判定をしているが、拘束圧が大きくなるような事例に

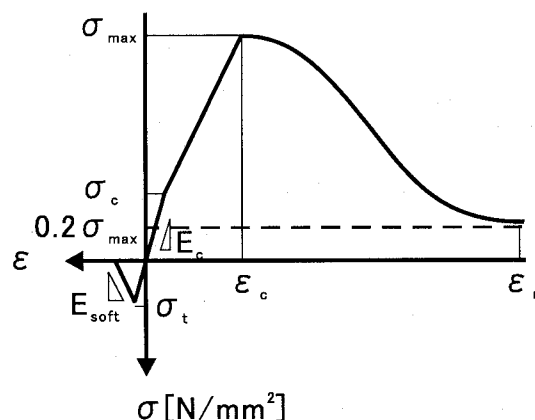


図-1 コンクリートの構成モデル

については、Drucker-Prager型の降伏条件で良いかは議論が必要である。同様に Drucker-Prager型の降伏条件を採用して解析している事例^{13),14)}も参考にして頂きたい。Drucker-Prager型の降伏条件では、その破壊基準として粘着力および内部摩擦角が必要となるが、コンクリートに関する両データは極めて少ないため、一軸状態における相当応力の半分を粘着力とし、本研究では、粘着力を $\sigma_c/2$ 、内部摩擦角を50度と仮定して用いた。なお、硬化則は等方硬化とした。

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ともなう引張軟化の挙動を再現できるようなモデルを設定した。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¹²⁾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¹⁵⁾ $\sigma_t = 0.23 \sigma_{max}^{\frac{2}{3}}$ を用いて算出した。

なお、本解析では、材料全体が連続体としての釣り合いを失うと考えられる時点（巨視的挙動のピーク変位より5%変位が進んだ時点）で解析を停止させている。これは多くの場合、巨視的挙動のピーク変位より5%程度変位が進んだ時点では、供試体から細かい剥落が認められたり、巨視的に材料が二分して剛体的に滑動するような状態になったりするため、いわゆる連続体としての取り扱いが困難であるからである。こうした現象にともなう応力再配分、あるいは応力解放によってひずみ軟化などが促進されると考えられるが、もはや連続体として存在していない以上、連続体解析でこうした現象を再現することが難しく、実際、数値解析的に釣り合いをとることも困難となる。したがって、本解析では、巨視的挙動のピーク変位より5%変位が進んだ時点以降の挙動に追従できるものではないことに注意されたい。また、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

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
24,200 N/mm ²	0.2	30.0 N/mm ²	2.22 N/mm ²

表-2 解析ケース (H= 400 mm)

	欠陥 A	欠陥 B	空隙 A	空隙 B
Case1	○	-	-	-
Case2	-	○	-	-
Case3	○	○	-	-
Case4	-	-	○ (20mm 内側)	-
Case5	-	-	○ (5mm 内側)	-
Case6	-	-	○ (5mm 内側)	○ (5mm 内側)

注) 欠陥 A = 上端部より 50 mm に初期欠陥, 欠陥 B = 上端部より 150 mm に初期欠陥, 空隙 A = 上端部より 50 mm に空隙, 空隙 B = 上端部より 150 mm に空隙

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。そこで本研究では、要素の大きさに依存しない程度まで要素を細かく分割し、解の収束が図られたと判断した時点の有限要素メッシュを用いて解析を行った。ただし、圧縮荷重をコンクリートに作用させる今回の一連の解析においては、結果として殆ど引張破壊は生じていない。

3. 有限要素解析

3.1 解析概要

本研究では、文献⁹⁾を参考に、 $\phi=100$ mm を固定し、高さ $H=100$ mm, 200 mm, 400 mm および 800 mm の 4 種類の円柱コンクリート供試体について、前章で説明した構成モデルを解析コードに組み込んで 3 次元有限要素解析を行うこととした。出来る限り文献における実験に近づけるため、上端部に変位制御（等分布）による載荷を行い、端部の境界条件に関しては、減耗パットが導入されることを想定し、上下両端部中心点の x 方向の変位および下端部全点の y 方向の変位を固定し、他はフリーにした。解の収束を検討した結果、要素の 1 つの大きさはおおよそ 5 mm \times 5 mm \times 5 mm となり、メインとなる高さ 400 mm の解析で総要素数が 24320、総節点数が 26001 となった。

文献⁹⁾によると、粗骨材最大寸法 G_{max} が 20 mm で水セメント比が 60% の場合、標準圧縮強度試験より得られたコンクリートの圧縮強度は 30 N/mm² 前後であることから、本研究でも、解析の対象を粗骨材最大寸法 G_{max} が 20 mm で水セメント比が 60% のケースとし、そのピーク圧縮強度 σ_{max} を 30 N/mm² と設定した。弾性定数に関しては、特に文献中に記載が無かったこと、および今回の解析は実験と変形量を合致させることが目的ではないことから、表-1 に示すように仮定して用いた。

また、文献⁹⁾によると、標準圧縮強度試験における全ての供試体で、ピークに達する前より徐々に局所的に破壊が生じ、最終的に上下方向に割裂ひび割れが卓越した後、終局に至っており、このようにコンクリートが局所的に破壊する原因としては、コンクリートの材料不均一性が考えられるが、この件に関しては今後の課題を要すると綴っている。仮に、今回設定したような境界条件の下、コンクリートを等方均質の材料として解析を行えば、当然のことであるが、変形が局所化することはない。上下両端部において境界条件を変化させれば、局所化を呈することは可能であるが、実験の趣旨にしたがって、つまり減耗パットによって端部拘束などが存在しないとすれば、境界条件を変化させずに変形の局所化を擬似的に表現する必要がある。そこで本研究では、文献でも考察されているように、変形を局所化させる要因の一つと考えられるコンクリートの材料不均一性を考慮することで変形の局所化を表現することとした。

コンクリートにおける材料不均一構造としては、ミクロレベルの毛細管空隙構造や、メゾレベルの巻き込み空気/空隙、骨材、セメント硬化体と骨材の界面、乾燥収縮や自己収縮にともなう発生するひび割れなどが挙げられる。一般的に、巨視的挙動（マクロレベルの挙動）における非線形挙動は、多くの場合、後者のメゾレベルの非均一構造に影響を受ける¹⁾と言われることから、本研究では、メゾレベルの構造=初期欠陥あるいは空隙を解析に導入することとした。初期欠陥については、その箇所における圧縮強度を周辺コンクリートの圧縮強度より 10% 小さくし、また、空隙については、該当箇所から有限要素メッシュを取り除くことで表現した。最大粗骨材寸法を勘案して、初期欠陥および空隙の大きさをそれぞれ 20 mm \times 20 mm \times 20 mm、および 5 mm \times 5 mm \times 20 mm（供試体軸方向に縦長）として領域を確保した。

前述の通り、本解析では、供試体高さ $H=100$ mm, 200 mm, 400 mm および 800 mm の 4 種類の円柱コンクリート供試体 (ϕ はいずれも 100 mm) について解析を行うが、供試体高さを変化させる前に、 $H=400$ mm のケースにおいて、こうしたメゾレベルの構造の存在がコンクリートの破壊に与える影響について吟味した。その結果を踏まえて、供試体高さを変化させる解析においてもメゾレベルの構造を導入し、コンクリートが局所的に破壊することを想定した上で、供試体高さがコンクリートの破壊に与える影響について検討した。

$H=400$ mm の解析では、初期欠陥領域を供試体上部より 50 mm あるいは 150 mm に設置するケースと、50 mm および 150 mm の二箇所を設置するケースの、合計 3 ケースを考えた。この際、いずれの初期欠陥領域も供試体側面より 5 mm 内側の箇所に設置するが、2 箇所に配置する場合は、各々が鉛直軸に対して反対

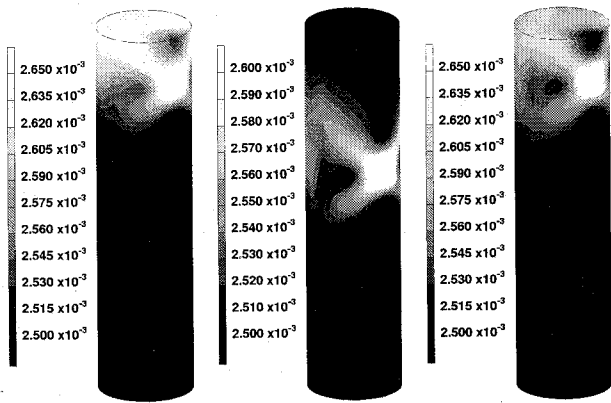


図-2 相当塑性ひずみ (Case1)

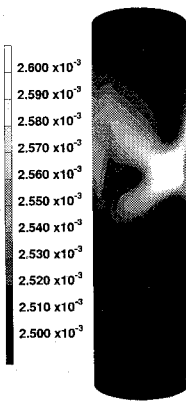


図-3 相当塑性ひずみ (Case2)

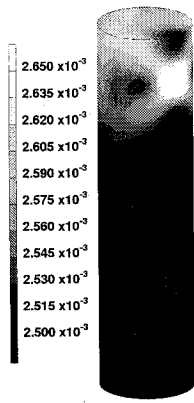


図-4 相当塑性ひずみ (Case3)

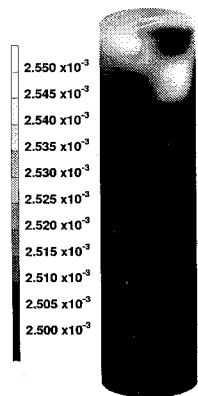


図-5 相当塑性ひずみ (Case4)

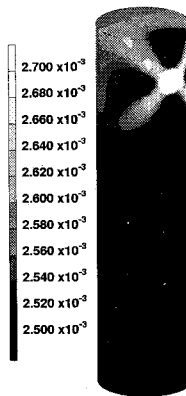


図-6 相当塑性ひずみ (Case5)

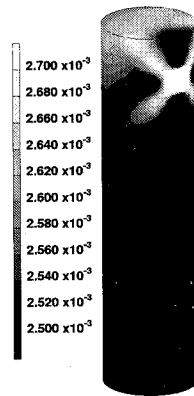


図-7 相当塑性ひずみ (Case6)

側に存在するように配置した。空隙についても、供試体側面より 5 mm 内側で、供試体上部より 50 mm に一箇所と 50 mm および 150 mm の二箇所に設置する 2 ケースを考えたが、供試体上部より 50 mm に一箇所配置するケースについては、供試体側面より 20 mm 内側に設置する解析も実施した。この場合も、2 つの空隙を配置する場合は、各々が鉛直軸に対して反対側に存在するように配置した。こうした初期欠陥あるいは空隙の設置によって、その箇所を中心に変形/破壊が先行的に生じるため、ひずみの局所化的な現象を、擬似的にはあるが表現できる。これらの解析ケースをまとめて表-2 に示す。こうした $H=400$ mm に関する一連の解析を受け、供試体高さ H を 100 mm, 200 mm および 800 mm と変化させる解析では、初期欠陥領域を供試体上部より 50 mm, 供試体側面より 5 mm 内側の箇所に設置するものとした。

3.2 解析結果および考察

(1) 破壊性状

まず、 $H=400$ mm のケースにおいて、メゾレベルの構造の存在がコンクリートの破壊に与える影響につ

いて考察する。図-2 から図-7 には、Case1 から Case6 に関するピーク時の相当塑性ひずみ分布を示す。ここで、図中におけるひずみの閾値については、前章で説明した通り、構成則においてはひずみレベルが 0.2 % でピークとなり、ピークを保持しながら 0.25% 程度で軟化を開始することから、ひずみが顕在化した領域をクローズアップする目的で 0.25% を下限値とした。なお、下限値については全てのケースで統一しているが、上限値については、ひずみ分布をより鮮明にする目的でケースごとに変化させていることに注意されたい。

前述の通り、メゾレベルの構造を考慮しなければ、供試体は一様に降伏し、そして一様にピークを迎えるため、局所的な様相を呈しないが、メゾレベルの構造、つまり材料不均一性を考慮することで、変形は異方的なものとなり、かつ、破壊時にはひずみの局所化が表現できる。本解析でもそれを表現したに過ぎないが、ここで着目したいのが、まず、材料不均一部分の構造によって、ひずみの分布が大きく変わることがないということである。Case1 と Case4 あるいは Case5, Case3 と Case6 は、介在している構造が初期欠陥と空隙であるという差を有するが、その幾何学的位置はほぼ同じ組み合わせである。相当塑性ひずみ分布図より、初期欠陥ないしは空隙の周辺においてひずみの大きな領域が存在し、その領域は初期欠陥ないしは空隙を中心に周辺へ広がっており、また、上方向への広がりに対して、下方向への広がり小さく、上方向へひずみ領域が広がっていく様子が顕著である。そして、若干の差こそあれ、Case1 と Case4 あるいは Case5, Case3 と Case6 の分布は類似していることも伺える。このように、材料不均一部分の物性によって、ピーク時のひずみ分布には若干の差は認められるものの、ここで考えた初期欠陥 (20 mm × 20 mm × 20 mm) と空隙 (5 mm × 5 mm × 20 mm) の大きさの差も勘案に入れれば、最終的な破壊性状が材料不均一部分の物性に強く依存しないことが考えられる。ただし、これはあくまでも細かいモデル化を行わない数値解析上の考察であり、実際の構造物/供試体の全てがこれと合致する訳でない。

次に、材料不均一部分の幾何学的配置に着目し、Case1 と Case2 そして Case4 と Case5 を比較すると、ひずみの顕在化が見られるのが材料不均一部分の周辺であることから、供試体の破壊性状は材料不均一部分の幾何学的配置に依存することが分かる。しかしながら、現実のコンクリートにおいては、こうした材料不均一部分が単独で存在するとは考え難く、複数が存在していると考えられる。例えば、Case3 や Case6 のように材料不均一部分が 2 つ存在する場合を見てみると、Case3 の分布は Case1 と類似していることから、今回の解析でも用いた荷重および境界条件の下では、上側に配置された材料不均一部分が支配的な役割を演じている言える。前述の考察のように、最終的な破壊性状が材料不均一部分

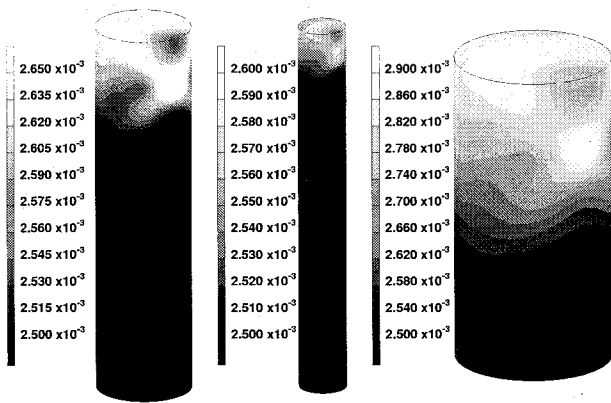


図-8 相当塑性ひずみ(内部摩擦角:0度) 図-9 相当塑性ひずみ(H = 800 mm) 図-10 相当塑性ひずみ(H = 200mm)

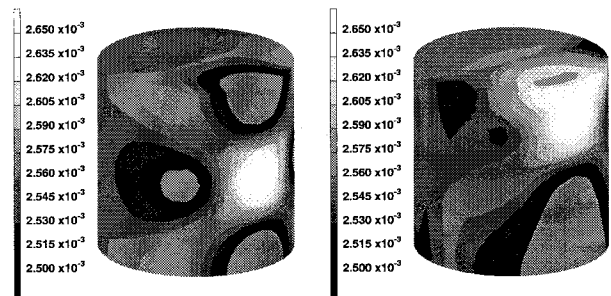


図-11 相当塑性ひずみ(H = 100mm, 初期欠陥:供試体中央) 図-12 相当塑性ひずみ(H = 100mm, 初期欠陥:供試体頂部)

の物性に強く依存しないとすれば、多種多様なメソレベルの構造が存在しても、その構造の物性より幾何学的配置が破壊性状に大きな影響を及ぼすものと考えられる。したがって、コンクリートはかなり不均一な材料ではあるが、今回の解析で用いた荷重および境界条件の下では、両端部に近い材料不均一部が最終的な破壊性状に大きな影響を及ぼす可能性があると考えられる。なお、Case3 や Case6 において相当塑性ひずみが 0.25% を超えるような破壊が顕在化した領域は、上端部からおよそ 150 mm で、破壊領域の長さ L_p と供試体断幅の D で定義された関係式⁷⁾より求まる破壊領域の大きさと合致している。

上述した解析は、材料の強度定数の一つである内部摩擦角をやや高めめの 50 度と設定した結果であるが、内部摩擦角を 0 度とした解析を追加し、その破壊性状についても検討することとした。図-8 に相当塑性ひずみ分布を示す。なお、材料不均一性としては初期欠陥を考え、それを供試体側面より 5 mm 内側、上部より 50 mm に一箇所導入した。図より、初期欠陥の周辺においてひずみの大きな領域が存在し、また、初期欠陥を中心に破壊領域は周辺へ広がっていることが分かる。この傾向は内部摩擦角が 50 度の場合 (Case1) と

同様であるが、上部ないしは下部へ広がる領域の傾きがやや異なっており、内部摩擦角を 0 度とした場合の方が 50 度の場合より緩い勾配になっている。これは、破壊領域の進展が材料の強度定数 (本解析では内部摩擦角) に依存することを示唆しているものと思われる。供試体全体がボロボロになるような終局状態を考えた場合、強度定数は残留時の値になっていることが考えられるので、例えば、コンクリートの残留内部摩擦角を 30 度と仮定すると、上述したような破壊領域の広がりはおおよそ、 $\tan(45^\circ + 30^\circ/2) = \tan 60^\circ = 1.73$ 程度になる。本解析では、 $\phi = 100$ mm の円柱供試体を用いているが、文献⁷⁾で定義されている等積正方形の辺長 ($D^* = \sqrt{A_c}$, A_c は供試体断面積) を計算すると 88.6 mm となり、これより破壊領域は鉛直方向に 150 mm 前後ということになり、これは文献⁷⁾で述べられている実験的事実と合致する。したがって、材料不均一部の周辺から発生した破壊領域は材料不均一部を中心に拡大し、その領域の拡大は材料の強度定数に影響を受けるものと思われる。

さらに、供試体の高さを変化させて、その破壊性状がどのように変化するかを考察した。ひずみの局所化を表現するために導入するメソレベルの構造としては、 $H = 400$ mm の解析における考察より、数値解析上は初期欠陥や空隙といった材料不均一部の物性に強く依存しないと考えられることから、ここでは供試体上部より 50 mm に配置された初期欠陥のケースを考えた。

$H = 800$ mm, 200 mm および 100 mm のケースにおけるピーク時の相当塑性ひずみ分布を図-9 から図-11 にプロットする。なお、図では高さが揃って見えるが、小さい供試体ほど拡大率が大きいだけで、全ての供試体の径は $\phi = 100$ mm である。これらについても、 $H = 400$ mm と同様、ひずみの下限値は 0.25% とした。図より、 $H = 200$ mm および 800 mm の場合は、 $H = 400$ mm と同様、初期欠陥周辺においてひずみの大きな領域が存在し、それは供試体上部へと広がっているという特徴を有し、破壊域はおおよそ 150 mm 前後であることが分かる。一方、 $H = 100$ mm のケースについては、初期欠陥が供試体の中央付近に位置していることから、ひずみの広がりには供試体上部のみならず下部へも広がり、供試体全体が破壊域になっていることが分かる。ただし、 $H = 100$ mm の場合、初期欠陥を供試体上部より 50 mm に配置というのは、供試体の中央に初期欠陥を配置することと等価なので、参考のために、初期欠陥を供試体最頂部に配置したケースを追加した。その相当塑性ひずみ分布を図-12 に示す。初期欠陥を供試体最頂部に配置した場合も、0.25% を超える相当塑性ひずみの分布は供試体の底部まで達しており、この場合もほぼ供試体全体が破壊域になっていることが分かる。これより、 $H = 100$ mm では、材料不均一部の幾何学的分布に関係なく、材料全体が破

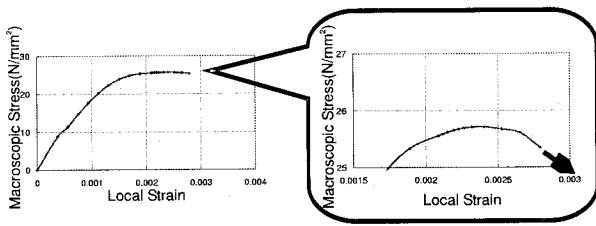


図-13 応力-ひずみ曲線 (Case1, 60mm)

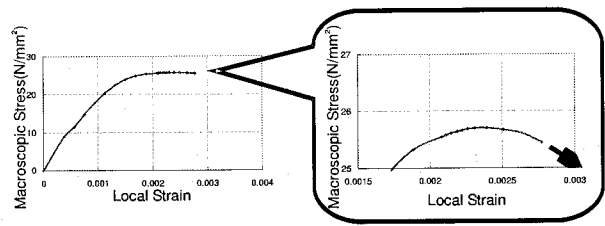


図-17 応力-ひずみ曲線 (Case3, 60mm)

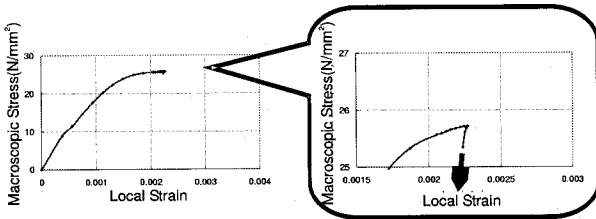


図-14 応力-ひずみ曲線 (Case1, 180mm)

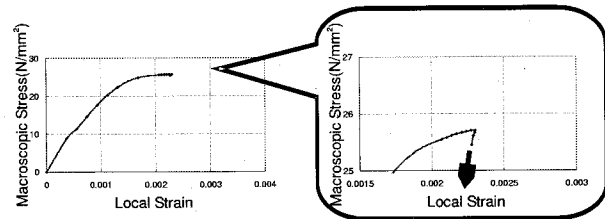


図-18 応力-ひずみ曲線 (Case3, 180mm)

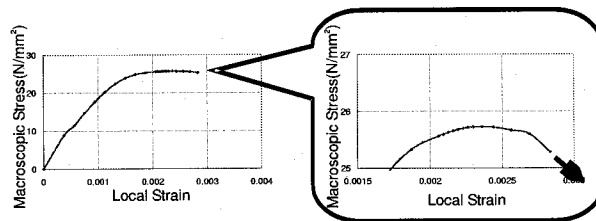


図-15 応力-ひずみ曲線 (Case2, 60mm)

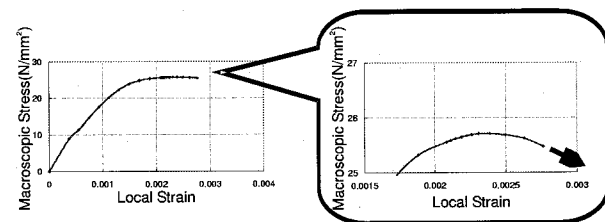


図-19 応力-ひずみ曲線 (Case6, 60mm)

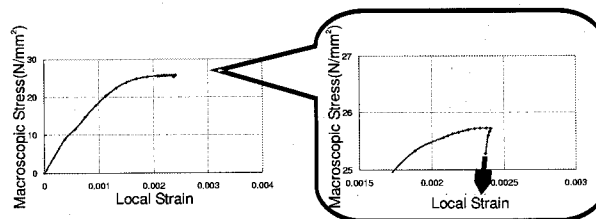


図-16 応力-ひずみ曲線 (Case2, 180mm)

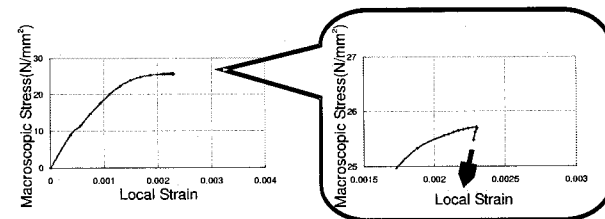


図-20 応力-ひずみ曲線 (Case6, 180mm)

壊領域になるものと思われる。一方、 H/D が 2 より大きくなると、上述した通り、材料不均一部の幾何学的条件によって上端あるいは下端部より破壊領域が拡がり、その長さはおおよそ 150 mm ~ 170 mm の範囲にある。これは文献⁷⁾に示されている実験の現象と合致している。このことから、破壊性状は供試体の寸法にも若干は依存するものの、主たる影響因子は強度定数であって、供試体幅 D が与えられると、その破壊領域の寸法 L_p はおおよそ推定できると考える。

(2) 巨視応力-局所ひずみ関係

二羽らの一連の研究^{7),9)}では、供試体内部のひずみを測定する目的で、ひずみゲージを貼付したアクリルバーを供試体中央に埋め込んでいる。そして、設置され

たアクリルバーより得られたいわゆる局所ひずみと、載荷荷重を供試体面積で除した巨視的な平均応力の関係をまとめ、破壊領域内および非破壊領域の局所ひずみ-巨視応力関係の違いについて言及している。文献^{7),9)}の記述を要約すると、破壊領域内では巨視的なピーク後にひずみ軟化の傾向を示すが、非破壊領域では除荷の傾向を示す。そこで本節では、Case1, Case2, Case3, Case6 および $H=800$ mm の供試体について、供試体の中央部で、上部より 60 mm (破壊領域内) および 180 mm (非破壊領域) の局所ひずみと巨視的な平均応力の関係をそれぞれ図-13 から図-21 に示し、考察を加える。本解析では、前章で述べた通り、材料全体が連続体としての釣り合いを失うと考えられる時点 (巨視的挙動のピーク変位より 5% 変位が進んだ時点) で解

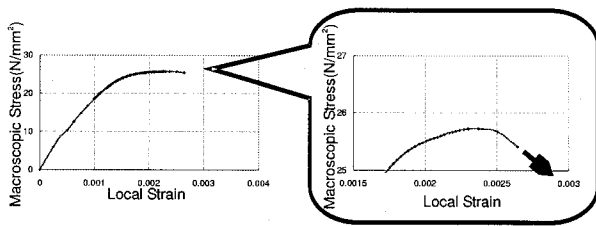


図-21 応力-ひずみ曲線 (H=800mm, 60mm)

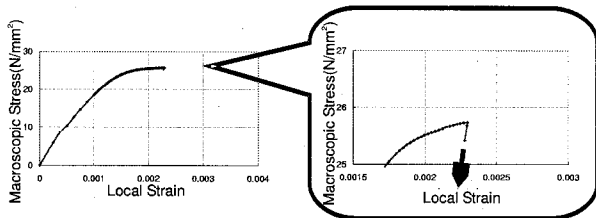


図-22 応力-ひずみ曲線 (H=800mm, 180mm)

析を停止させている。したがって、全体を表示する図ではピーク付近の挙動が不明瞭なため、局所ひずみと巨視応力の関係図の右横にピーク付近の拡大図を併記した。なお、上部より 60 mm および 180 mm 以外の地点についても結果は整理したが、そのほとんどの挙動が上部より 180 mm の地点の挙動と同じであったこと、また、紙面が限られていることから、図の掲載は割愛した。

前節で説明した通り、全てのケースにおいて供試体上半分の領域に不均一部を設定したことから、破壊は上端部付近から発生し、その領域は下方 150 mm ~ 170 mm の範囲に広がる。したがって、この範囲が、いわゆる破壊領域となり、これを超える下方の領域が非破壊領域となる。いずれのケースも、その材料不均一部の幾何学的配置、物性および供試体の高さに関係なく、それぞれの破壊領域内あるいは非破壊領域内の局所ひずみ-巨視応力の関係は類似している。特に、破壊領域内ではピーク後にひずみ軟化の傾向を示すのに対し、非破壊領域ではピーク後に除荷する傾向にあることが分かる。この傾向は、二羽らの一連の研究^{7),9)}で記述されている傾向と共通しており、破壊領域と非破壊領域におけるピーク後の挙動の差と言えよう。また、文献⁹⁾によれば、実験供試体の巨視的なピーク強度はコンクリートの圧縮強度の 95% 程度となっているのに対し、本解析では約 87% となり、実験値よりやや小さい。しかしながら、供試体の巨視的なピーク強度がコンクリートの圧縮強度より低下するものの、それほど大きな低下が見られないという点は実験と合致している。

他のケースと異なり、初期欠陥が上部より 150 mm にある Case2 においては、初期欠陥の周辺からひずみの大きな領域=破壊領域が拡大していることを受けて、

上部より 180 mm の箇所のひずみが他のケースと比較して大きくなっていることが分かる。しかしながら、供試体内部への破壊進行が著しくないことから、挙動としては非破壊領域に近いことが伺える。

初期欠陥の箇所が一箇所の Case1 と二箇所の Case3 では、前節で説明した通り、相当塑性ひずみの分布に差はなく、破壊領域も上部より 150 mm 程度であったことから、それぞれの局所ひずみ-巨視応力関係は類似しており、局所ひずみ-巨視応力関係からも破壊領域は供試体上部より 180 mm より上部にあることが分かる。

不均一部の構造が初期欠陥である Case3 と空隙である Case6 を比較すると、相当塑性ひずみ分布図に差はそれほどなかったが、破壊領域および非破壊領域における局所ひずみ-巨視応力関係についてもほとんど差は認められなかった。このことから、上部に配置された材料不均一部が支配的な役割を演じている言えよう。

最後に、 $H = 400$ mm のケース (Case1) と $H = 800$ mm のケースの比較を行う。破壊領域および非破壊領域のいずれの領域においても、局所ひずみ-巨視応力関係は極めて類似しており、それぞれの領域における挙動が供試体の高さにほとんど依存していないことが伺える。いずれのケースも、0.25% を超える相当塑性ひずみの領域が供試体上部から 150 mm 程度であったこと、そして供試体上部より 60 mm および 180 mm の二箇所において局所ひずみ-巨視応力関係が極めて類似していることから、コンクリートという物性が同じである限り、供試体の高さに関係なく破壊が進行することを示唆しているものと思われる。しかしながら、本解析では全ての解析ケースにおいて、材料不均一部を除いた領域で同じ構成則および強度定数を用いているという前提があり、実際の構造物/供試体の全領域における物性を確認していないことから、こうした考察も類推の域を出ない。また、実験における荷重-変位関係⁹⁾では、ピークまでの挙動はあまり供試体の高さにほとんど依存しない結果が示されているが、ピーク後の挙動は大きく異なる。したがって、ピーク後の挙動に関する検討は別途必要であると思われる。

このように、供試体の破壊が進行するとともに、破壊領域から非破壊領域へ応力は再配分され、やがて破壊領域はピークを超えて軟化現象を呈し、ひずみは増大し、逆に応力は低下する。局所的にこうした領域が拡大するにつれ供試体全体がピークを迎えるが、非破壊領域 (ここでは、ひずみのレベルが 0.25% に達していない領域) では軟化に至らず、巨視的な応力の低下にもなるとひずみのレベルが下がる、いわゆる除荷現象を呈する。つまり、応力やひずみの変化は、あくまでも破壊にともなう物性の変化によって引き起こされるもので、予め破壊領域と非破壊領域で物性が異なっているわけではないと考える。破壊にともなう複雑な

現象や巨視的なピーク後の挙動を詳細に議論するには、より局所的あるいは微視的レベルでの破壊現象を観察し、かつ、その挙動/運動をモデル化して数値解析にフィードバックする必要がある。本研究では、実際に供試体を観察しているわけではないのでそこまで言及することができないが、局所あるいは微視のひび割れなどの挙動を把握して初めて、全てを統一的に表現できる構成モデルが完成するものと思われる。

4. まとめ

本研究では、圧縮下におけるコンクリートの挙動に関して、その破壊現象や非線形挙動の発生メカニズムの把握・解明するために、二羽らの研究を題材として数値解析的な検討を加えた。主として着目した点は、破壊性状と破壊領域の長さ、および供試体の巨視的な応力と内部の局所的なひずみの関係である。

まず、解析から求まる相当塑性ひずみのレベルに関して、その値が0.25%を超える領域を破壊領域とみなすことで、

1. $H/D=1$ の供試体では、供試体全域で破壊が観察されたのに対し、 H/D が2以上の供試体では、破壊が明らかに局所化した。
2. プレピーク時より、ひずみ局所化領域が認められた。
3. 破壊領域の長さ L_p は供試体断面積の等積正方形の辺長 D^* の関数となる。

という一連の実験的事実^{7),8),9)}を再現することができた。また、実験より得られた供試体の巨視的な応力と内部の局所的なひずみの関係についても、実験と類似した傾向を再現することができた。

次に、こうした共通点/類似点を基に、圧縮下におけるコンクリートの破壊現象や非線形挙動の発生メカニズムに関して考察を行った。その結果、

1. 破壊性状が材料不均一部の物性に強く依存せず、その幾何学的特性に依存する。
2. 破壊性状は供試体の寸法にも若干は依存するものの、主たる影響因子は強度定数である。
3. コンクリートの物性に関しては、実験前から破壊領域と非破壊領域で物性が異なっているのではなく、破壊現象の進行にともなって発生するひび割れの発生と成長などによって物性が徐々に変化する。というような知見を得た、また、これらの知見より、破壊領域の長さ L_p は供試体断面積の等積正方形の辺長 D^* の関係を説明することが出来た。

ただし、今回の解析では、粗骨材最大寸法を $G_{\max}=20\text{ mm}$ として材料不均一部のサイズを仮定しているため、粗骨材最大寸法によってどう変化するかは未定であり、ダムコンクリートなど、さらに大きな骨材サイズが導

入される場合は別途議論が必要かもしれない。また、今回採用した平均化構成則を用いた場合、どこまでを議論の対象として扱えるかなどの課題も存在する。こうした課題をより客観的に説明するには、より局所的あるいは微視的レベルでの破壊現象を観察し、かつ、その挙動/運動をモデル化して数値解析にフィードバックすることが必要であると考えられる。

付記：本研究の一部は、文部科学省科学研究補助金（若手研究（B）課題番号14750392、代表者：吉田秀典）、（財）中部電力基礎技術研究所研究助成（代表者：吉田秀典）および（財）生産技術研究奨励会研究助成（代表者：吉田秀典）の助成を得て行なった。

参考文献

- 1) 三橋博三、六郷恵哲：コンクリートの破壊力学—魅力と展望—、コンクリート工学、Vol.37, No.9, pp.4-10, 1999.
- 2) 橋高義典：引張破壊のモデル化と破壊力学パラメータ。コンクリート工学、Vol.37, No.9, pp.25-28, 1999.
- 3) コンクリート構造物のポストピーク挙動の評価と設計への応用、日本コンクリート工学協会、pp.101-111, 2003.
- 4) 水野英二、畑中重光：塑性理論によるコンクリートの圧縮軟化特性のモデル化、コンクリート工学論文集、Vol.2, No.2, pp.85-95, 1991.
- 5) 水野英二、畑中重光：塑性理論によるコンクリートの経路依存型圧縮軟化特性のモデル化、コンクリート工学論文集、Vol.3, No.2, pp.1-13, 1992.
- 6) 柴麻紀、前田欣昌、畑中重光、水野英二：ひずみ軟化を考慮したコンクリート構成モデルの開発、コンクリート工学年次論文集、Vol.18, No.2, pp.401-406, 1996.
- 7) T. Lertsrisakulrat, K. Watanabe, M. Matsuo, J. Niwa : 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.
- 8) 渡辺健、岩波光保、横田弘、二羽淳一郎：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.
- 9) 渡辺健、二羽淳一郎、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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 吉田秀典、和田光真：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、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.2, pp.151-156, 2003.
- 13) 喜多俊介、三木朋広、松尾真紀、二羽淳一郎：形状の異なる打継ぎ面を有する鉄筋コンクリート部材の非線形解析、コンクリート工学年次論文集、Vol.24, No.2, pp.709-714, 2002.
- 14) 村田裕志、川口哲生、兵頭彦次、二羽淳一郎：超高強度鋼繊維補強セメント系複合材料を用いた複合PC部材における数値解析的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25, No.2, pp.1981-1986, 2003.
- 15) 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.

(2003年9月12日受付)