

論文 コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究

平井 圭^{*1}・中村 光^{*2}・檜貝 勇^{*3}

要旨：寸法、形状、最大骨材寸法を変化させた円柱供試体を用い、一軸圧縮荷重を受けるコンクリートの破壊領域長さを実験的に推定することを試みた。実験結果に基づき、各種要因が破壊領域長さに及ぼす影響および破壊領域内での挙動を調べた結果、圧縮破壊領域長さは供試体の形状比(H/D)ならびに最大骨材寸法の影響を受け、破壊領域内の挙動は、最大骨材寸法に依存するという結論を得た。

キーワード：圧縮破壊領域、局所化挙動、軸方向局所ひずみ分布

1. はじめに

コンクリート構造物が破壊に至る場合、破壊は構造物全体には及ばずある特定の領域に集中する傾向を多くの場合に示す。そのため、コンクリート構造物の破壊に至るまでの変形挙動を解明するには、まず第一に、破壊領域ならびに破壊領域内の局所的な挙動を明確にする必要がある。

現在、ひびわれが卓越して破壊に至るような場合に対しては、活発に研究がなされ、破壊力学的手法を応用するなどして、多くの成果が得られている。^[1] それに対し、コンクリートの圧壊が破壊の主要因となるような場合には、その圧縮破壊領域が及ぼす影響は定量的に評価されておらず、また圧縮破壊領域の広がりや破壊領域内の局所的な挙動についても、必ずしも明らかにされてはいない。

そこで本研究では、寸法、形状、骨材寸法を変化させたコンクリート円柱供試体の一軸圧縮試験を行いその軸方向局所ひずみ分布特性より、コンクリートの破壊の局所化挙動と破壊領域長さを実験的に調べ各種要因が破壊領域内での挙動と破壊領域長さに及ぼす影響について考察した。

2. 実験概要

2. 1 供試体概要

表-1に供試体の種類および寸法の概要を示す。供試体は、直径(D)を10cm、15cmに、直径(D)と高さ(H)の比すなわち形状比(H/D)を1~6に、最大骨材寸法(G_{max})を5mm、20mm、40mmに変化させた

表-1 供試体

供試体	最大骨材寸法(mm)	直径(cm)	H/D
S5-2シリーズ	5	10	1, 2, 3, 4, 5, 6
S5-3シリーズ	5	15	1, 2, 3, 4
S20-2シリーズ	20	10	1, 2, 3, 4, 5, 6
S20-3シリーズ	20	15	1, 2, 3, 4
S40-2シリーズ	40	10	1, 2, 3, 4, 5, 6
S40-3シリーズ	40	15	1, 2, 3, 4

*1 山梨大学大学院 工学研究科土木環境工学専攻 (正会員)

*2 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

*3 山梨大学教授 工学部土木環境工学科 工博 (正会員)

円柱である。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用した。また、打ち込みは縦打ちとし、ブリージングによる柱高さ方向の影響をなるべく少なくするために、スランプ値は3cmとした。コンクリートの圧縮強度は載荷試験機の許容加重を越えないようにしたため150(kgf/cm²)～220(kgf/cm²)の範囲であった。

2. 2 測定方法および載荷方法

本実験では、供試体軸方向の局所ひずみと供試体全長の平均ひずみの2種類を測定した。局所ひずみの測定は、図-1に示す様に円柱供試体断面中心に配置した弾性係数E=4.80×10⁴(kgf/cm²)である一辺1cmのアクリル製角棒を異形に加工し、軸方向に3～5cmの間隔で張り付けたひずみゲージにより供試体内部で行った。局所ひずみの測定にアクリル製角棒を用いたのは弾性係数がコンクリートに比べ十分に小さく、コンクリートの変形を拘束しないと考えたためである。平均ひずみの測定は上載荷板の四隅に変位計を取り付けて行った。

載荷試験は、一軸圧縮により近い状態を得るために、供試体上下端面と載荷板との間に減摩材(テフロンシート+シリコングリス)を挿入して行った。また、載荷は最大応力以降の挙動をとらえるために一方向繰り返し載荷とし、供試体の破壊が進んで測定不可能になるまで行った。図-2および図-3に実験より得られたD=10cm、H/D=5、Gmax=20mmの供試体の局所ひずみ分布と、応力-平均ひずみ関係を示す。図-2中の①～⑤の番号は、図-3中の各応力状態に対応する局所ひずみ分布であることを示している。この時、局所ひずみを積分することで得られるひずみの値は、平均ひずみの値とほぼ一致していることを確認しており、本実験方法により、最大応力以降の局所ひずみの挙動を概ね正確にとらえることができると考えられる。ただし、ひずみレベルが非常に高くなる場合には、両者の間に若干の差が生じ始め、アクリル製角棒の付着力が低下する傾向も存在した。

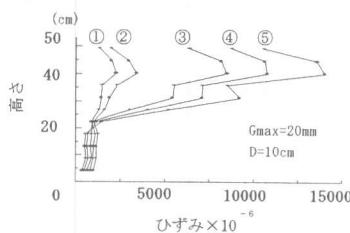


図-2 局所ひずみ分布 (H/D=5)

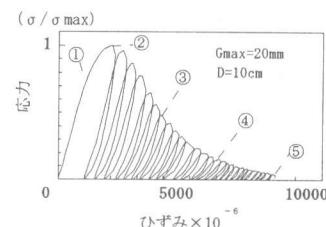


図-3 応力-平均ひずみ曲線 (H/D=5)

3. 実験結果

図-4(a)および(b)にD=10cm、Gmax=5mmで、H/Dが1と5の供試体より得られた局所ひずみ分布の変化をそれぞれ示す。図中の■印は最大応力の80%時のひずみ分布であり、○印は最大応力以後の異なる応力レベルに対応するひずみ分布である。局所ひずみ分布は、最大応力以前では、ほぼ一様

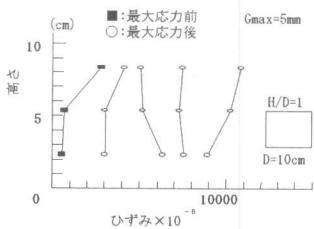
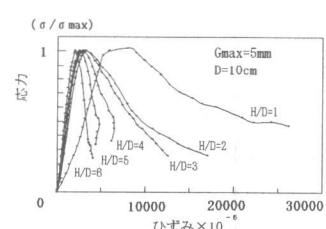


図-4 (a) 局所ひずみ分布 (H/D=1) 図-4 (b) 局所ひずみ分布 (H/D=5) 図-5 応力-平均ひずみ曲線



な分布を示しているのがわかる。このことは、全ての供試体において同様に認められるものであった。一方、最大応力以降においては、図-4(a)に代表されるようなH/Dが比較的小さい供試体では局所ひずみ全体が増加する傾向を示した。これは破壊領域が供試体全体におよんでいることを示すものである。これに対し、図-4(b)に代表されるようなH/Dが大きい供試体ではひずみが急激な増加をみせる領域と増加しない領域に明らかに分かれる挙動がみられた。最大応力以降にひずみが増加する領域では領域全体のひずみレベルは上昇するが、その領域長さは一定の長さに収束している。これは明らかに破壊が供試体全長ではなく、ある特定の領域に集中する傾向を示すものである。また、その破壊が集中する領域の位置は、必ずしも全ての供試体で一致せず、供試体毎に上部、中央部、下部と異なっており、ブリージングによる柱高さ方向の強度分布の影響は少なかったと考えられる。さらに、ひずみが増加しない領域ではひずみの戻り現象が現れ、全領域において応力が除荷されているのがわかる。ひずみの戻り現象は、最大応力以後、応力が最大応力の約80%~90%まで低下した範囲から現れ始めた。このような局所ひずみの分布特性は、いずれのシリーズの供試体においてもH/Dがある程度大きくなればみられ、またH/Dが大きくなればなるほど顕著になる。

図-5にD=10cm、Gmax=5mmに対し、H/Dを変化させた時の応力-平均ひずみ関係を示す。図によれば、H/D=1の供試体を除き、応力上昇域の挙動はいずれの供試体も等しくなる。それに対して最大応力以降の挙動は、顕著に供試体形状の影響を受けていることがわかる。すなわち、H/Dが大きくなればなるほどその軟化勾配が急激になることを示し、局所化領域が発生することで応力-平均ひずみ関係が唯一のものでないことを示している。

4. 破壊領域内における応力-局所ひずみ関係

一軸圧縮下の応力-局所ひずみ関係は、材料特性や拘束条件などの要因が一定であれば、破壊領域内において供試体寸法に拘わらず唯一なものであるという仮定のもとに、破壊領域内の応力-局所ひずみ関係を評価した結果を図-6に示す。図中、破線は実験値から得られるGmax=40mmで、寸法、形状が異なる供試体の局所ひずみ分布特性から、ブリージングの影響がなるべく少なく、最大応力以降において、局所ひずみの増加が大きい点でのひずみを各供試体の真のひずみとして採用することにより得られた関係を示している。また、実線は式(1)に示すPopovics式に実験より得られた各供試体における応力 σ 、 σ_{max} 、局所ひずみ ϵ 、 ϵ_p を代入して、最小二乗法により得られた関係である。実験結果は、最大応力以降ばらつきがみられるが、形状、寸法に対し特定の傾向を持つておらず、そのばらつきは、あくまでも骨材分布などの相違によるものと考えられる。したがって応力-局所ひずみ関係は供試体の形状、寸法に拘わらずほぼ確定されるといえる。また、図-7は異

$$\sigma/\sigma_{max} = (\epsilon/\epsilon_p)m / \{m - 1 + (\epsilon/\epsilon_p)^m\} \quad (1)$$

ここで、m:定数 σ_{max} :最大応力 ϵ_p :最大応力時のひずみ

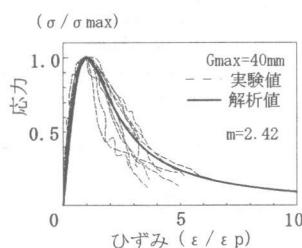


図-6 応力-局所ひずみ曲線

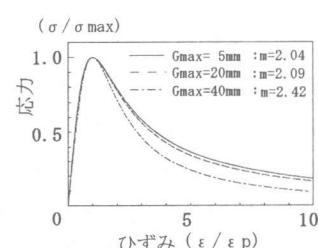


図-7 Popovics式による応力-局所ひずみ曲線

なる最大骨材寸法の応力一局所ひずみ関係をPopovics式により評価した結果である。図-7によると最大骨材寸法が大きくなるほど軟化領域での曲線の勾配は急になり、破壊が脆的になることを示している。したがって、局所化領域内での応力一局所ひずみ関係は、形状、寸法の依存性は少なく、最大骨材寸法に依存するといえる。

5. 圧縮破壊領域長さ

圧縮破壊領域長さは、実験結果から得られる局所ひずみ分布を調べることにより得られるが、この時、破壊領域長さは局所ひずみの測定間隔により変化する可能性がある。そのため、コンクリートの破壊領域長さは、一軸圧縮試験より得られた応力一平均ひずみ関係を用いて解析的に推定することとした。解析方法は、ひずみの局所化を考慮したSeries-couplingモデル[2]を使用した。このモデルの考え方は、図-8のように供試体を破壊領域と非破壊領域の2領域に簡略的にわけて考えるものであり、除荷領域のひずみ、局所化領域の真のひずみと平均ひずみの関係は以下のように表される。

$$\bar{\varepsilon} = f \cdot \varepsilon + (1 - f) \cdot \varepsilon_u \quad (2)$$

ここで、 $\bar{\varepsilon}$:平均ひずみ、 ε :局所化領域の真のひずみ、 ε_u :除荷領域のひずみ

f :局所化領域の供試体全体に対する容積比 (断面一定の時、破壊領域長1p/部材長H)

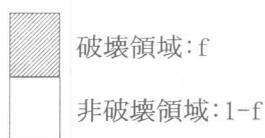


図-8 簡略化モデル

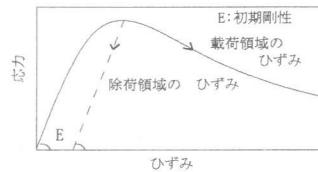


図-9 ひずみの挙動

式(2)を用いれば、破壊領域長さは実験から得られる平均ひずみ、局所化領域のひずみ、除荷領域のひずみを代入することで、容易に計算することができる。ただし、除荷領域のひずみは最大応力以後初期剛性を有する除荷曲線上を戻るものと仮定している。表-2に破壊の局所化が比較的顕著である供試体($G_{max}=20\text{mm}$ 、 $D=10\text{cm}$ 、 $H/D=5$)における解析より得られた最大応力以後の f の値の変化を示す。

解析によって f の値を求めるとき、表-2の例のように応力状態が最大応力の80%程度から収束傾向を示すようになる。このように、 f の値は応力状態によって変化していく。そのため、供試体唯一の f の値の決定は、各応力状態の f の値が収束傾向を示す場合はその平均値を、収束していない場合では局所ひずみ分布において最大応力以後、最初にひずみの戻り現象が現れる応力状態の f の値を用いた。

表-2 各応力状態における f の変化

応力(σ/σ_{max})	f
1.00	0.00
0.97	0.21
0.87	0.29
0.78	0.33
0.65	0.37
0.57	0.39
0.49	0.41
0.42	0.43
0.37	0.44
0.33	0.44
0.28	0.45
0.24	0.45
0.20	0.45
0.17	0.44

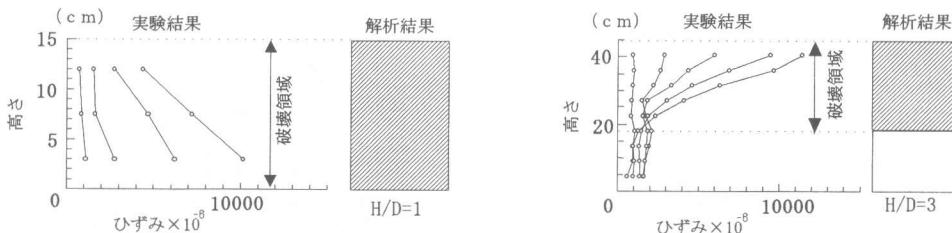


図-10 破壊領域長さの比較

図-10は $G_{max}=40\text{mm}$ 、 $D=15\text{cm}$ の供試体より得られた局所ひずみ分布と上記の定義に従って算定した破壊領域長さを比較したものである。図によれば、実験値におけるひずみの局所化領域長さと解析結果の破壊領域長さは、一致しており破壊領域長さを精度よく評価しているといえる。

図-11は $G_{max}=40\text{mm}$ 、 $D=15\text{cm}$ の供試体より得られる解析結果を簡略化モデルで表したものである。図によれば、破壊領域長さは、 H/D が小さい供試体では供試体全体に及ぶが、 H/D が大きい供試体では全体には及ばず、破壊の局所化が顕著になる傾向を明確に再現している。この結果は、全シリーズの供試体について共通している。

図-12は破壊領域長 l_p と寸法 D の比により、 H/D の変化に対する破壊領域長さの変遷を示したものである。図-12によると $H/D=1\sim 2$ の供試体では破壊領域長さの増加率は大きいが、 $H/D=3\sim 6$ の供試体での破壊領域長さの増加率は小さくなり、破壊領域長さが収束傾向を示すようになる。収束傾向を示した時の破壊領域長さの絶対量としては、直径 D が異なる供試体においても、ほぼ同様の値であった。また最大骨材寸法が大きくなると破壊領域長さは相対的に長くなることがわかる。

以上をまとめれば、一軸圧縮応力下のコンクリートには、明確にある特定の破壊領域が存在するといえる。また、その破壊領域長さは、寸法、形状の大きさよりも、むしろ骨材の最大寸法に大きく依存する結果となった。

6. 圧縮破壊領域内での消費エネルギー

圧縮破壊領域ならびに圧縮破壊領域内の応力-局所ひずみ関係が実験的に明らかになったので次に、これらの値を用いて圧縮破壊領域内での消費エネルギーの概算値を求めた。概算値を求めるにあたり、応力-局所ひずみ関係は、計算を簡単にするために図-13に示すように、軟化領域の勾配を二つの勾配に分けて考える二勾配モデルにより近似した。消費エネルギーは、図-13のハッ

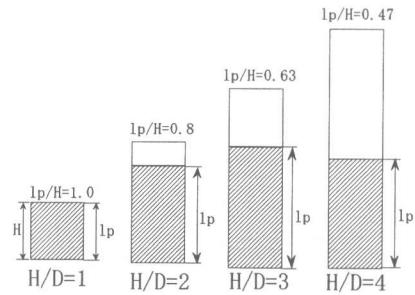


図-11 解析値による破壊領域長

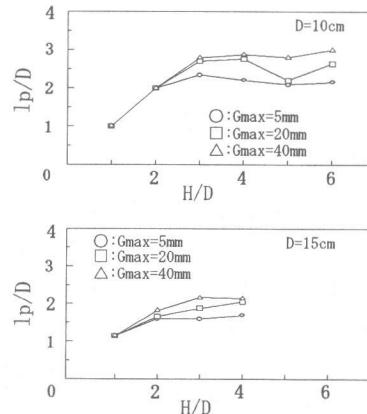


図-12 破壊領域長さの変遷

チ部分の面積に、破壊領域の体積を乗ずることで算定した。

図-14にH/D、最大骨材寸法の変化に対する破壊領域内における消費エネルギーを示す。図によれば消費エネルギーの値は、ばらついており特定の傾向を見いだすには至らなかったが、その絶対量としては、約10.0~20.0(kgf·cm)の範囲に収まると考えられる。

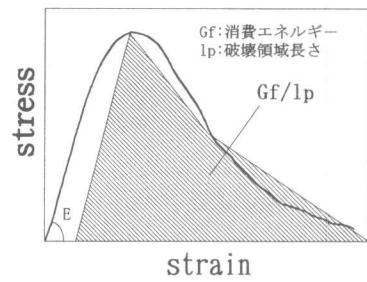


図-13 二勾配モデル

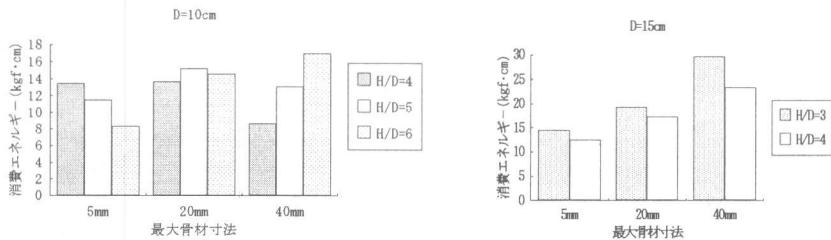


図-14 H/D、最大骨材寸法の変化に対する消費エネルギー

8. 結論

一軸圧縮下におけるコンクリートの破壊領域長さと破壊の局所化挙動について実験的に検討した結果、以下のような結論を得た。

- (1) 一軸圧縮応力下のコンクリートには、明らかに、ある特定長さの破壊領域が存在する。寸法、形状、骨材寸法を変化させた実験によれば、圧縮破壊領域の長さは、寸法、形状よりもむしろ最大骨材寸法に大きく依存する結果となった。
- (2) 一軸圧縮下におけるコンクリートの圧縮破壊領域内では、応力-局所ひずみ関係は唯一のもののが存在し、その関係は最大骨材寸法が大きくなれば脆性的になる。
- (3) 破壊領域内の消費エネルギーの概算値を推定した結果、その値としては、約10~20kgf·cm程度の値であることがわかった。

【謝辞】 本研究は平成6年度文部省科学研究費補助金（奨励研究（A），課題番号06750494）により行いました。ここに記し厚く御礼申し上げます

参考文献

- (1) 破壊力学の応用研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、1993, 10
- (2) Bazant Z. P, Identification of Strain-Softening Constitutive Relation from Uniaxial Test by Series Coupling Model for Localization, Cement and Concrete Research, Vol. 19, No. 6, 1989, pp 973-977