

非線形有限要素解析による曲げ破壊するRC部材の損傷指標の検討

Study on the Damage Index for flexural failure of RC members by using Nonlinear Finite Element Analysis

上田尚史*, 権庸吉**, 中村光***, 高木康宏****, 国枝稔*****

Naoshi UEDA, Yong-gil KWON, Hikaru NAKAMURA, Yasuhiro TAKAGI and Minoru KUNIEDA

* 正会員 修 (工), 名古屋大学大学院研究員, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

** 学生会員 修 (工), 名古屋大学大学院生, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

*** 正会員 博 (工), 名古屋大学大学院教授, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

**** 正会員 修 (工), 三井住友建設 (株), 土木事業本部 (〒164-0011 東京都中野区中央 1-38-1)

***** 正会員 博 (工), 名古屋大学大学院助教授, 社会基盤工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

Damage index for RC members failed in flexure was investigated by using nonlinear finite element analysis. The local strains obtained at gauss points were averaged over a particular length and it was used to evaluate damage of members. The value of averaged strain shows less mesh sensibility. As the results, it was confirmed that evaluations of damage of RC member were able to use averaged compressive strain on a cover concrete and a core concrete of the member. Moreover it was confirmed that damage process for the statically indeterminate structure was able to evaluate the damage context of the component members of the structure.

Key Words: damage index, nonlinear finite element analysis, averaged strain, flexural failure

キーワード: 損傷指標, 非線形有限要素解析, 平均化ひずみ, 曲げ破壊

1. はじめに

RC 構造の耐震性能照査は, 非線形解析を行うことが原則となっており, 構造物の耐震性能は部材の復旧性ならびに損傷度と結び付けられている¹⁾. したがって, 損傷度を適切に評価するための信頼できる解析手法が望まれているとともに, 損傷度を定量的に評価するための指標が求められている. RC 部材には終局に至るまでいくつかの特徴的な損傷レベルがあるが, 損傷は多くの場合, 塑性ヒンジのように局所化した領域で生じるため, 局所化領域ならびに局所位置での物理量であるひずみ量を妥当に評価する必要がある.

一方, RC 構造を対象とした非線形解析は, 解析理論の発展と解析技術の向上により, 最大荷重はもとより最大荷重以降のポストピーク挙動までも, ある程度の精度で予測できるようになってきている²⁾. 特に有限要素法を用いた非線形解析は, 近年広く行われており, 部材レベルの解析から構造物レベルの解析まで十分信頼できる解析手法として認識されている. しかしながら, 軟化材料であるコンクリートの解析を行う際には, 解析結果が要素寸法に依存してしまう問題がある. 荷重-変位関係の要素寸法依存性

については, 応力-ひずみ関係に破壊エネルギーを導入することで, その影響を低減することが可能である. 一方, ひずみの要素寸法依存性の問題は未だ解決されておらず, 非線形解析から直接得られるひずみ量は信頼できる指標とはなり得ないのが現状である.

この問題に対して著者らは, 局所ひずみを要素寸法とは別に設定した空間積分領域で平均化させるとした積分型非局所構成則を RC 構造解析へと適用することで, 要素寸法によらないひずみ応答が得られることを確認している³⁾. しかしながら, 非局所構成則は, その適用に当たっては未だ確立されたものではなく, また, 数値計算上の煩雑さも伴うために一般的ではない. そこで, 要素寸法の影響を低減した結果を従来の非線形解析から近似的に求めることを目的として, 解析結果を平均化する手法も検討されている. 諏訪らは, RC 柱の繰返し実験を対象としてファイバーモデルを用いた解析を行い, 要素寸法に依存した解析結果をある領域で平均化することで, 要素寸法によらない結果が得られ, また実験結果と同等な局所化性状を捉えられる可能性を示している⁴⁾.

そこで本研究では, 曲げ破壊する RC 部材を対象とした非線形 2 次元有限要素解析を行い, 局所ひずみを平均化し

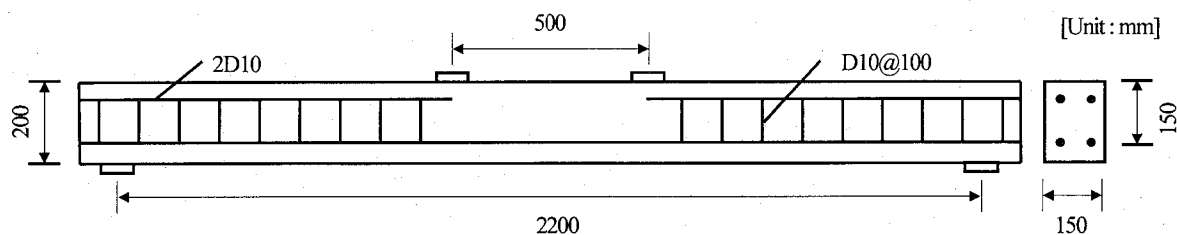


図-1 曲げ破壊するはりの概要図

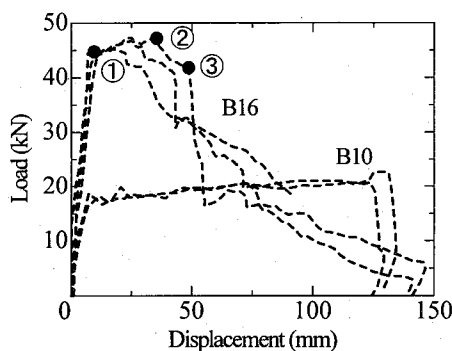


図-2 荷重-変位関係 (実験結果)

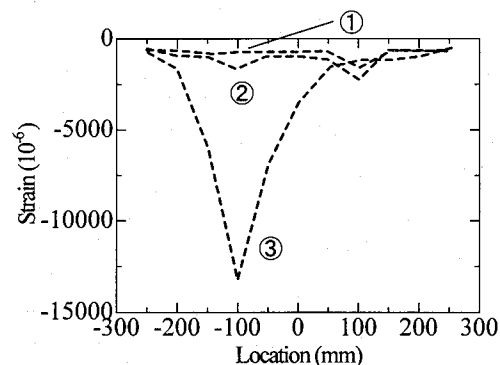


図-3 断面上縁より 30mm の位置における等曲げ区間のコンクリートのひずみ分布 (B16)

て要素寸法依存性を低減するすることで、部材の損傷指標としての検討を行うとともに、損傷度に対する考察を行った。また、不静定次数の高い RC 構造物に対して非線形有限要素解析を適用する場合、部材の損傷度を評価する際には、非線形有限要素解析から直接得られないモーメント-曲率関係等を二次的に算定するといった手法がしばしばとられ、非合理的であるとともに有限要素法の利点を生かしきれていないように思われる。そこで本研究では、構造部材の損傷過程を単一部材と同様に評価出来るかについても検討した。

2. 解析手法

本研究では、4 節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形 2 次元有限要素解析を行った。RC 構成則には、名古屋大学が開発した格子等価連続体モデルを用いた⁹⁾。格子等価連続体モデルは、コンクリートおよび補強筋の耐力機構と、ひび割れ面におけるせん断伝達を等価な格子成分によりモデル化し、RC 構成則を構築する手法である。各格子成分には一軸の応力-ひずみ関係を用いるため、ポストピーク領域においても収斂性がよいという特徴がある。

圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度までは Saenz の式を用い、その後は応力が直線的に減少するものとした。なお、軟化領域には解の要素寸法依存性を低減させることを目的として Nakamura らが提案する圧縮破壊エネルギーを考慮した⁹⁾。これにより、要素寸法が小さいもののほど軟化勾配が緩やかになる。また、ひび割れたコンクリートの応力-ひずみ関係は、プレーンコンクリートに対しては、引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モ

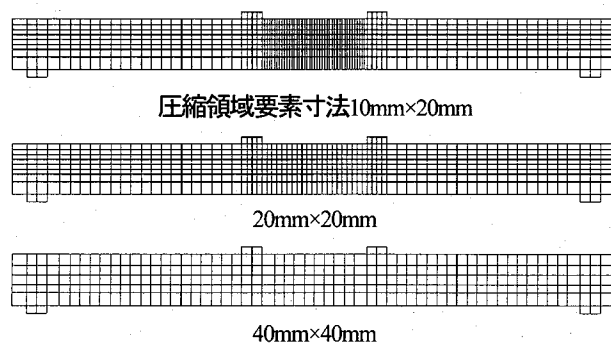


図-4 要素分割図

デルを、鉄筋の付着が期待できる領域には岡村らが提案する Tension Stiffening モデルを仮定した⁷⁾。補強筋の応力-ひずみ関係は、引張領域には Hsu らが提案している平均引張応力-ひずみ関係を用いた⁸⁾。なお、コンクリートと補強筋は完全付着を仮定している。

3. 曲げ破壊するはりの損傷指標の検討

3.1 曲げ破壊するはりの実験概要

解析の対象とした実験供試体の概略図を図-1に示す。実験は山梨大学で行われた曲げ破壊する RC はりの静的載荷実験である⁹⁾。供試体は、載荷スパン 850mm、断面 150mm×200mm であり、せん断スパン比は 5.7 である。この寸法の供試体に対して、引張鉄筋比を 1.765%、0.634% (以後それぞれ、B16、B10 とする) と変化させることで、引張鉄筋比がポストピーク挙動に及ぼす影響について検討されている。実験は、曲げ破壊するはりのポストピーク挙動を観察すること、特にコンクリートの圧壊が部材の耐

表-1 RC はりの材料特性値

供試体	コンクリートの材料特性			主鉄筋の材料特性	
	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	初期剛性 (GPa)	弾性剛性 (GPa)	降伏強度 (MPa)
B16	35.4	3.17	29	176	362
B10	36.9	3.10	30	181	358

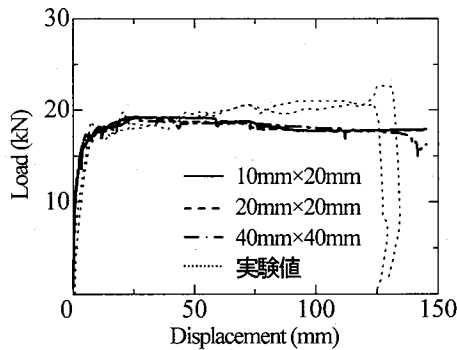


図-5 荷重-変位関係 (B10)

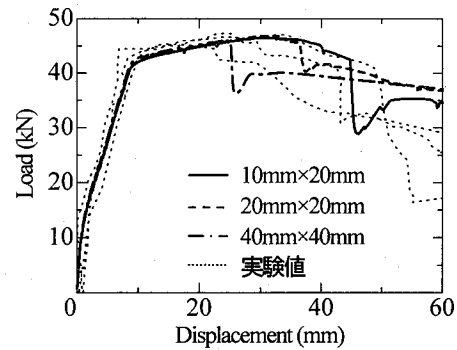


図-6 荷重-変位関係 (B16)

力低下に及ぼす影響の検討を目的としているため、500mmの等曲げ区間にはスターラップおよび圧縮鉄筋は配置されていない。また、圧縮側コンクリートにはアクリル棒を配置し、軸方向のコンクリートのひずみの分布を測定していることが特徴である。

実験より得られた荷重-変位関係を図-2に示す。また、断面上部より30mmの位置における、等曲げ区間のコンクリートのひずみ分布の一例を図-3に示す。図中の番号は図-2の荷重-変位関係上の番号に対応するが、ひずみはある広がりを持って増加していることがわかる。

3.2 解析モデルならび解析結果

解析モデルならびに解析に用いた材料特性を図-4、表-1に示す。軸方向鉄筋はトラス要素で、スターラップはRC要素を用いることでモデル化した。本研究では、要素分割によらず一般的に適用可能な損傷指標の検討を行うことを目的としているため、図-4に示すように等曲げ区間の圧縮領域の要素分割を3通りで行った。(幅×高さ: 10mm×20mm, 20mm×20mm, 40mm×40mm)。また、解析に用いた材料特性は、基本的には実験から得られたものを用い、明らかにされていない場合はコンクリート標準示方書に準じた。なお、同一鉄筋比のはりに対して2体ないし3体の実験が行われているため、各々の平均値を特性値として解析を行った。

図-5, 6に解析により予測された荷重-変位関係をそれぞれ実験結果と併せて示す。いずれの結果においても、鉄筋が降伏するまでの挙動は精度良く捉えていることがわかる。鉄筋降伏後の挙動については、最大荷重まではいずれの解析においても、要素寸法によらず同一の挙動を示す。最大荷重以降においては、鉄筋比の小さなB10供試体では要素寸法によらず緩やかに荷重が低下する挙動を示

す。一方、鉄筋比の大きなB16では、最大荷重後局所的に急激な荷重低下を示し、それ以前は要素寸法の影響は小さい結果となった。局所的な荷重低下の生じた原因については、今後詳細に検討する必要があると考えている。

3.3 圧縮破壊が支配的な領域における損傷指標の検討

曲げが卓越する部材の主鉄筋降伏以降の挙動は、荷重低下に至るまで圧縮コンクリートの挙動の影響を受ける。特に、部材軸方向の変形が部材の挙動に大きな影響を及ぼすことから、圧縮コンクリートの表面ひずみの軸方向成分を用いることで、鉄筋降伏以降のRCはりの損傷度評価の検討を行った。なお、表面ひずみは、形状関数から部材表面の要素辺中点のひずみを直接算出することで評価した。

図-7に圧縮コンクリート上縁の表面ひずみと変位の関係(ひずみの進展)を示す。また図中には、実験における損傷と対応付けを行うため、荷重-変位関係の実験値を点線で示している。図に示した表面ひずみは、解析から直接求められた局所ひずみ(以後、局所ひずみ)であり、各解析STEPにおいて最も局所化が進んでいる要素のひずみを追跡することで、ひずみの進展を表現している。図から明らかなように、引張鉄筋比の違いによらず、要素寸法が小さいほうが等変位においてひずみが大きくなっており、ひずみの要素寸法依存性が生じている。したがって、破壊エネルギーを考慮した解析によって得られたひずみを、直接損傷度と結びつけることは適切ではないことが分かる。

ひずみの要素寸法依存性を低減する方法としては、構成則に非局所手法を導入する方法が挙げられるが、数値解析上の煩雑さを伴うため、本研究ではより簡便な手法として、解析結果を平均化することでひずみの要素寸法依存性を低減させ、一般化された損傷指標としての適用性の検討を行った。平均化は軸方向のある領域(以後、平均化長さ)

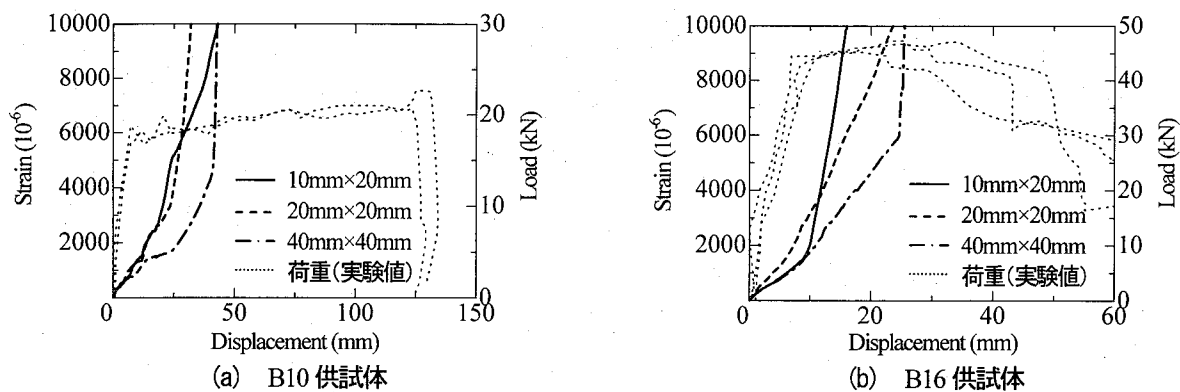


図-7 表面ひずみの進展 (局所ひずみ)

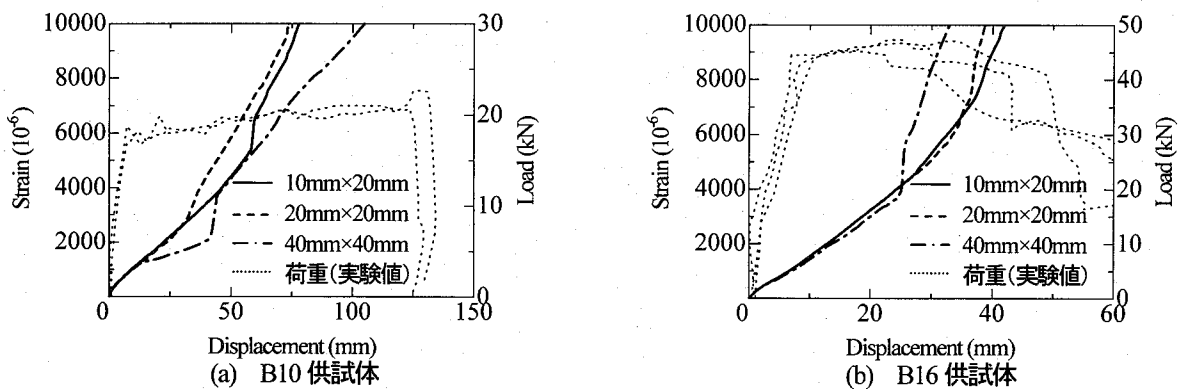


図-8 表面ひずみの進展 (平均化ひずみ)

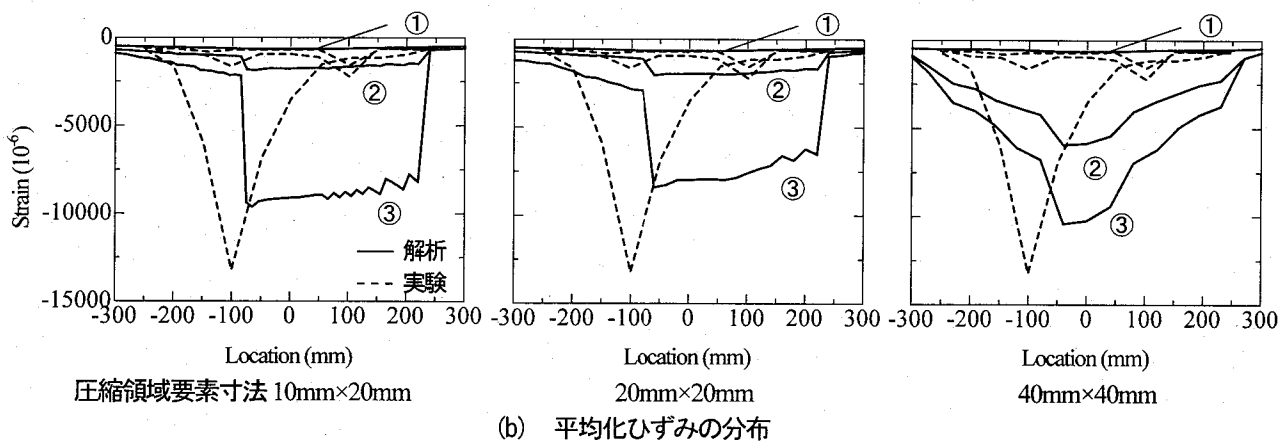
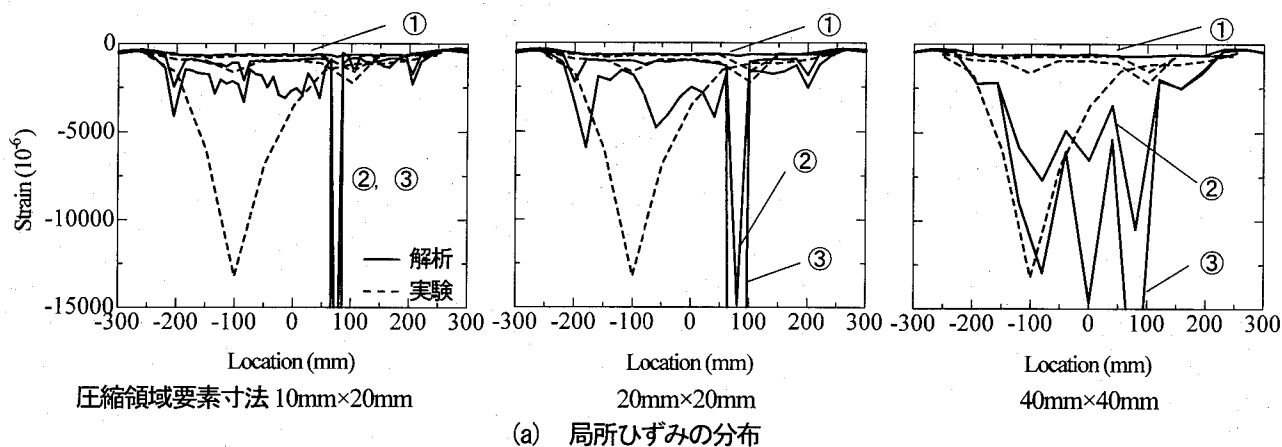


図-9 断面上縁より 30mm におけるひずみ分布の比較 (B16)

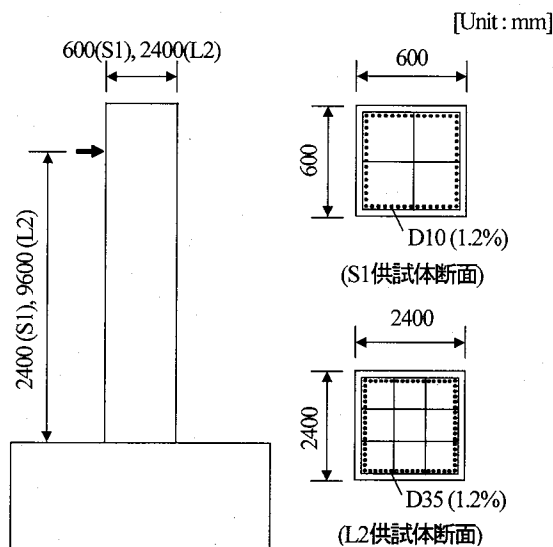


図-10 RC 柱の構造諸元

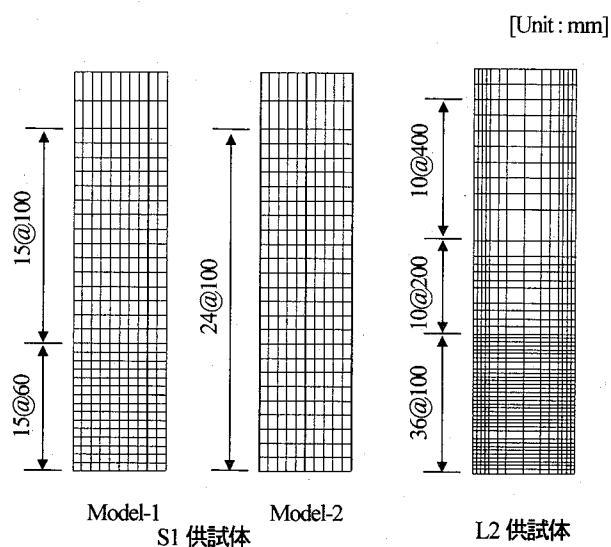


図-11 要素分割図

表-2 RC 柱の材料特性

供試体	コンクリートの材料特性			主鉄筋の材料特性	
	圧縮強度(MPa)	引張強度(MPa)	初期剛性(GPa)	弾性剛性(GPa)	降伏強度(MPa)
S1	39.0	2.65	31	178	395
L2	32.6	2.35	29	177	424

に含まれる要素の表面ひずみから軸方向の変形量を求め、平均化長さで除すことで平均的なひずみを算出した。また、平均化長さは、コンクリートの一軸圧縮実験に対する既往の研究を参考に 300mm とした⁹⁾。

図-8に平均化されたひずみ（以後、平均化ひずみ）の進展の様子を示す。なお図-7と同様に、実験における荷重-変位関係を併せて示す。図中のひずみは、それぞれの位置における平均化ひずみの中で最大の値を持つひずみを表わしている。平均化ひずみの進展は要素寸法によって多少ばらつくものの、局所ひずみの場合と比較して要素寸法による影響が低減されていることがわかる。また、図-9に断面上縁から 30mm の位置における、コンクリートのひずみ分布の解析値と実験値の比較を示す。なお、比較は同変位レベルで行い、図中の数字は図-2の荷重-変位関係上に示した数字に対応している。(a)は局所ひずみの分布を示し、(b)は平均化ひずみの分布を示す。図より、局所ひずみでは要素寸法に依存して局所的にひずみが増大しているのに対し、平均化ひずみは、ある拡がりを持った領域でひずみが増大している。したがって、平均化を行うことで、実験値と同様に拡がりを持ったひずみ分布が再現できる。

ここで、平均化ひずみの進展を追うことで、部材の損傷レベルを照査することができる。図-8より、要素寸法の違いによって多少の差異があるものの、解析における最大荷重時において、平均化ひずみの値がおおよそ -3500μ から -5000μ となっており、RC はりの断面解析における終局

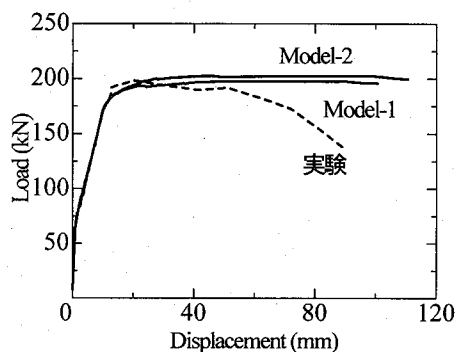


図-12 荷重-変位関係

ひずみと同程度のひずみレベルとなっている。このことから、圧縮鉄筋が配置されていない RC 部材の曲げ耐力に対する指標は、圧縮最外縁で軸方向に平均化したひずみが $-3500\sim-5000\mu$ に対応すると推測される。

4. 曲げ破壊する RC 柱への損傷指標の適用に関する検討

4.1 繰返し载荷を受ける RC 柱の実験概要

本章では、星隈らによって行われた繰返し载荷を受ける RC 柱¹⁰⁾を対象として損傷指標の評価を行う。解析の対象とした RC 柱の構造諸元を図-10 に示す。解析は 600mm×600mm の断面を有する S1 供試体と、2400mm×2400mm の大型断面を有する L2 供試体との 2 体を対象として行った。実験は、断面寸法が RC 橋脚の変形性能に及ぼす影響について検討を行うことを目的として

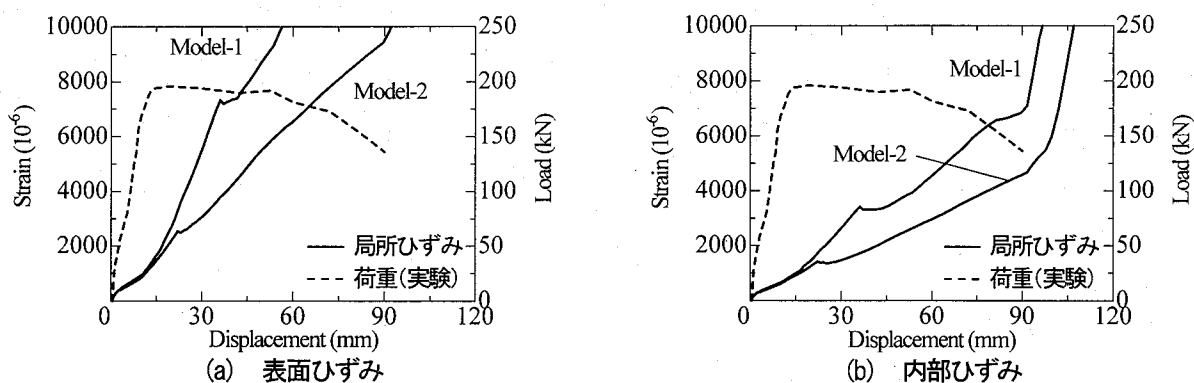


図-13 局所ひずみの進展 (S1 供試体)

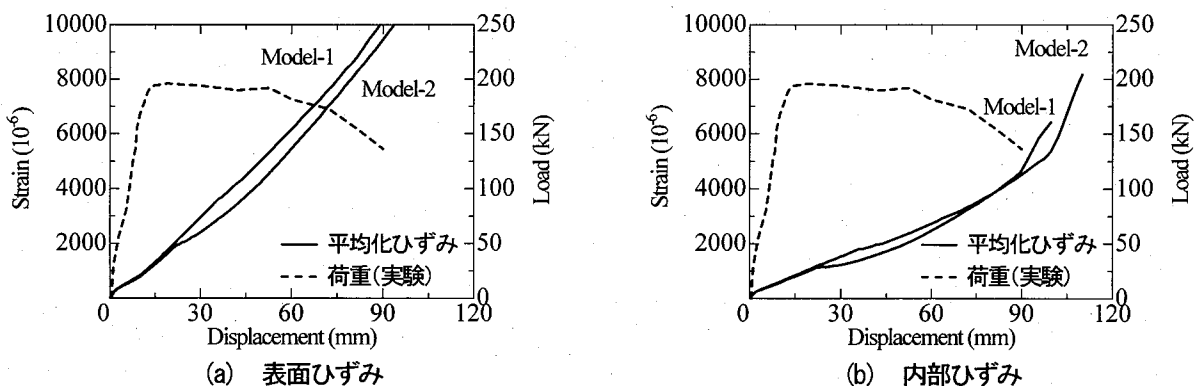


図-14 平均化ひずみの進展 (S1 供試体)

いるため、構造細目ならびに実験条件は両供試体で等しくなるように考慮されている。軸方向鉄筋比は 1.2%，せん断スパン比が 4.0 であり、帯筋が十分に配筋された曲げ破壊を生じる柱である。また、S1、L2 とともに軸力は載荷していない。

実験供試体の損傷の進展として、大型断面を有する L2 供試体においては、 $18\delta_y$ において、柱基部より 7000mm の高さまで広範囲に渡って曲げひび割れが生じ、変位幅が $28\delta_y$ 、 $36\delta_y$ と進むにつれて曲げひび割れが発達することが観察されている。 $48\delta_y$ において、断面の最外縁のかぶりコンクリートが基部より 800mm 程度の範囲で剥落することが観察されている。 $56\delta_y$ において、軸方向鉄筋の座屈とそれに伴う帯筋の破断が生じることで、内部コンクリートの損傷が生じ始めたことが観察されている。なお、コンクリートの剥落と同程度の長さである 800mm の範囲において軸方向鉄筋の座屈が顕著に生じたと報告されている。一方、S1 供試体の損傷の進展に関しても、L2 供試体と同様にかぶりコンクリートの剥落 ($66\delta_y$) の後に軸方向鉄筋の座屈 ($78\delta_y$) が生じ、その後内部コンクリートの損傷の進展 ($86\delta_y$) が観察されている。なお、S1 供試体の損傷領域は、柱基部からおよそ 400mm の範囲で生じたと報告されている。

4.2 解析モデル

S1 ならびに L2 の要素分割図を図-11 に、解析に用いた材料特性を表-2 に示す。S1、L2 供試体ともに、軸方向鉄筋ならびに帯筋は RC 要素を用いることでモデル化した。

なお、S1 については、損傷指標が要素寸法に依存しないことを確認するため、2 パターンの要素分割(基部の要素、幅×高さ: 60mm×60mm, 60mm×100mm) に対して解析を行った。解析の対象とした実験は繰返し載荷実験であるが、急激な荷重低下以前では、実験において繰返し載荷の影響が少ないことが知られているので¹¹⁾、本研究では一方向載荷解析により検討を行った。

4.3 RC 柱の損傷に対する損傷指標の検討

RC 柱が曲げ破壊する場合、圧縮を受けるコンクリートのひずみ応答は圧縮側の軸方向鉄筋の影響を受けることが考えられる。また、内部コンクリートは帯筋の拘束を受けているため、かぶりコンクリートと内部コンクリートでは異なったひずみ応答を示すことが考えられる。したがって、RC 柱の破壊の進展に対する損傷度評価は 3 章の例と異なり、かぶりコンクリートと内部コンクリートの両者に対して行う必要があると考えられる。なお、本研究では、コンクリートの応力-ひずみ関係に対して拘束効果の影響は考慮していない。

まず、S1 供試体を対象として損傷指標の検討を行った。図-12 に解析より予測された荷重-変位関係を示す。図中には、実験から得られた骨格曲線を併せて示しめしている。なお、実験値は柱基部の軸方向鉄筋の伸びだしの影響を差し引いたものである。解析の結果、荷重-変位関係は要素寸法の影響が低減されており、ほぼ同様の挙動を示していることがわかる。また解析では、軸方向鉄筋の座屈は考慮

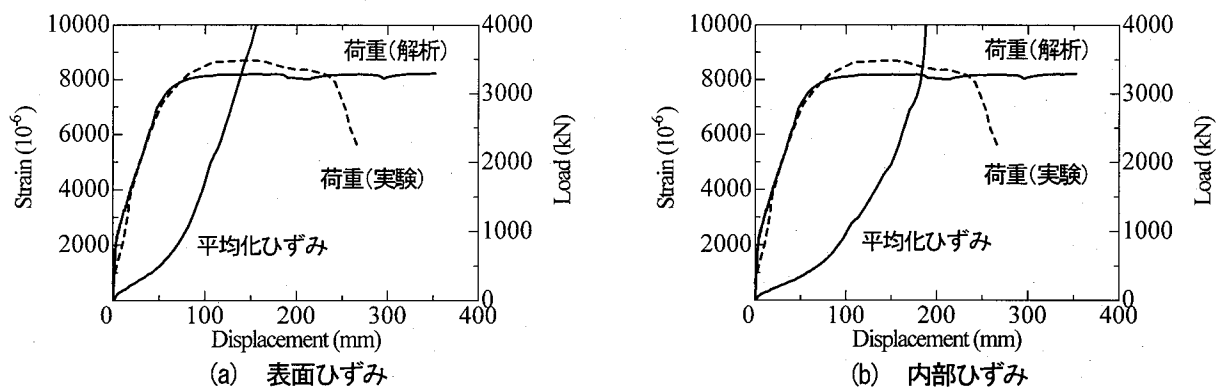


図-15 平均化ひずみの進展 (L2 供試体)

表-3 損傷レベルと対応するひずみ量 (S1, 上段: 表面ひずみ, 下段: 内部ひずみ)

損傷レベル	MODEL-1		MODEL-2	
	300mm	破壊領域長	300mm	破壊領域長
最大荷重時 (変位 25mm 相当)	-2400 μ -1300 μ	-2000 μ -1200 μ	-2000 μ -1100 μ	-1700 μ -1000 μ
かぶり剥落時 (6 δ_y , 変位 50mm 相当)	-5100 μ -2300 μ	-4100 μ -1900 μ	-4300 μ -2000 μ	-3400 μ -1600 μ
荷重低下開始時 (7 δ_y , 変位 60mm 相当)	-6200 μ -2800 μ	-5000 μ -2300 μ	-5500 μ -2500 μ	-4200 μ -2000 μ
急激な荷重低下時 (8 δ_y , 変位 70mm 相当)	-7400 μ -3200 μ	-5900 μ -2700 μ	-6800 μ -3100 μ	-5000 μ -2400 μ

注: 等価塑性ヒンジ長は破壊領域長とほぼ等しいため, 表には示していない。

表-4 損傷レベルと対応するひずみ量 (L2, 上段: 表面ひずみ, 下段: 内部ひずみ)

損傷レベル	300mm	破壊領域長	等価塑性ヒンジ長
最大荷重時 (変位 100mm 相当)	-4500 μ -2500 μ	-2800 μ -1700 μ	-2000 μ -1300 μ
かぶり剥落時 (4 δ_y , 変位 150mm 相当)	-9300 μ -4900 μ	-4800 μ -2800 μ	-3200 μ -2000 μ
荷重低下開始時 (5 δ_y , 変位 190mm 相当)	-18000 μ -11000 μ	-8000 μ -5200 μ	-5000 μ -3300 μ
急激な荷重低下時 (6 δ_y , 変位 230mm 相当)	-24000 μ -15000 μ	-11000 μ -7300 μ	-6600 μ -4500 μ

していないため, 荷重の低下は再現されていない。

図-13, 14 に柱基部の圧縮領域の表面ひずみならびに軸方向鉄筋位置のひずみに関して, 局所ひずみと 3 章と同様に平均化長さを 300mm として算定した平均化ひずみの進展を示す。ここで, 表面ひずみはかぶりコンクリートの挙動を, 軸方向鉄筋位置のひずみは, 内部コンクリートの挙動をそれぞれ表わしていると考え¹²⁾。図において (a) は表面ひずみの進展の様子を, (b) は軸方向鉄筋位置のひずみ (以後, 内部ひずみ) の進展の様子を示している。図-13 より, かぶりコンクリートおよび内部コンクリートの局所ひずみとも要素寸法依存性が顕著に現れていることが分かり, 局所ひずみは損傷度評価指標となり得ないことが分かる。一方, 図-14 より, かぶりコンクリートおよび内

部コンクリートともに平均化ひずみを用いることで, 要素寸法の影響が低減していることがわかる。また, 実験の挙動との比較を行うと, 最大荷重時 (変位レベル 20mm) においては, かぶりコンクリートの平均化ひずみが約-2000 μ , 荷重低下開始時 (7 δ_y , 変位レベル 60mm) においては, かぶりコンクリートの平均化ひずみが約-5000 μ あるいは内部コンクリートの平均化ひずみが約-2500 μ 程度のときに対応していることがわかる。また, 急激な荷重低下が生じるとき (変位レベル 8 δ_y , 70mm) は, 内部コンクリートの平均化ひずみが約-3500 μ 程度に対応している。実挙動を考えた場合, かぶりコンクリートの剥落によって荷重の低下が生じ, 内部コンクリートの損傷によって急激に荷重低下することから, 上述の対応関係は, 現象的に意味のあ

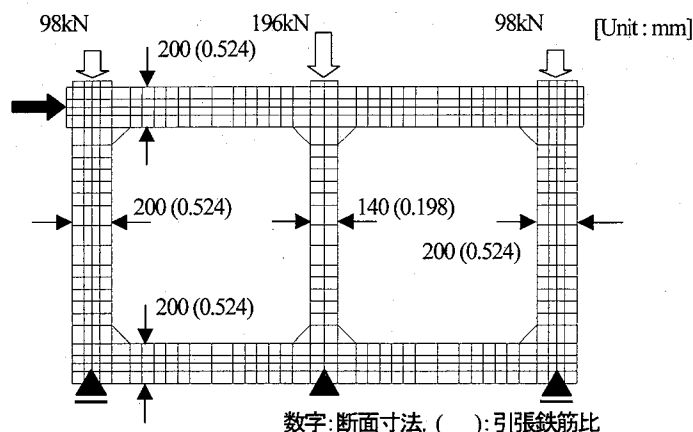


図-16 解析モデル図

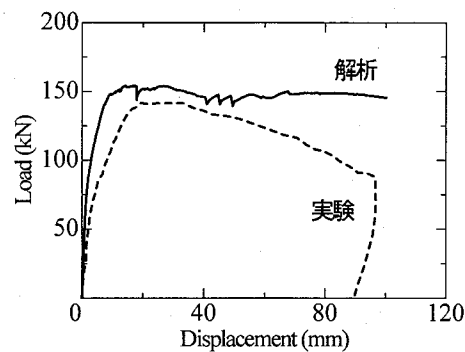


図-17 荷重-変位関係

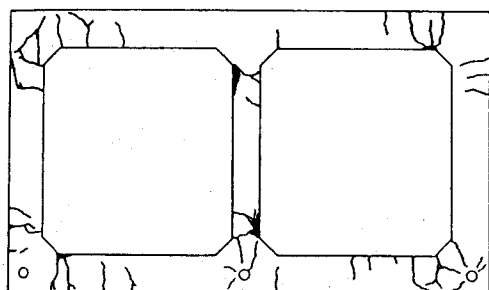


図-18 実験終了時のひび割れ図

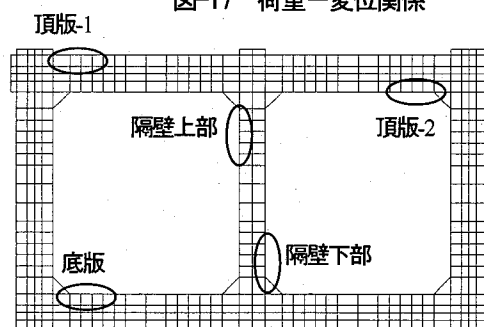


図-19 損傷領域

る指標であるといえる。このことから、平均化ひずみを評価指標とすることで、部材の損傷度を評価することができると考えられる。なお、損傷指標の定量的な評価に関しては後述する。

4.4 供試体寸法が損傷指標に及ぼす影響に関する検討

次に、大型断面を有するL2を対象として、供試体寸法が損傷指標に及ぼす影響について検討を行った。図-15に予測された荷重-変位関係と実験の骨格曲線ならびにかぶりコンクリート、内部コンクリートの平均化ひずみの進展を示す。なお、平均化はこれまでと同様に軸方向ひずみを300mmの区間で行った。

部材の損傷とひずみの関係をみると、例えば最大荷重時(変位レベル100mm)に対応する平均化ひずみは、かぶりで約4500 μ あるいは内部コンクリートひずみで約2500 μ であり、S1供試体と異なる値となった。このことは、平均化長さは元々コンクリートの圧縮破壊領域に対応した長さであり、大型の寸法を持った部材に対して、小型供試体と同じ平均化長さを用いることが必ずしも適切でないことを示していると考えられ、次節において平均化長さの影響について検討する。

4.5 平均化長さが損傷指標に及ぼす影響に関する検討

平均化ひずみを損傷指標として用いる際には平均化長さを適切に設定する必要がある。そこで、平均化長さを変化させた場合に、損傷指標にどのような影響を及ぼすかに

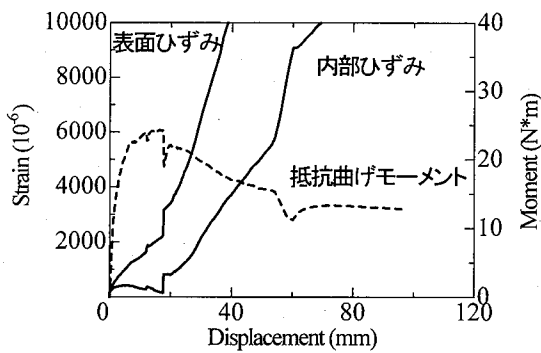
ついて検討した。ここでは平均化の長さを、①実験で観察された長さ、②コンクリート標準示方書耐震性能照査編における等価塑性ヒンジ長の2通りについて平均化ひずみを求め、先の平均化長さ300mmの場合と併せて比較検討を行う。なお、等価塑性ヒンジ長 L_p は次式¹⁾から算定される。

$$L_p = 0.5d + 0.05L_a \quad (1)$$

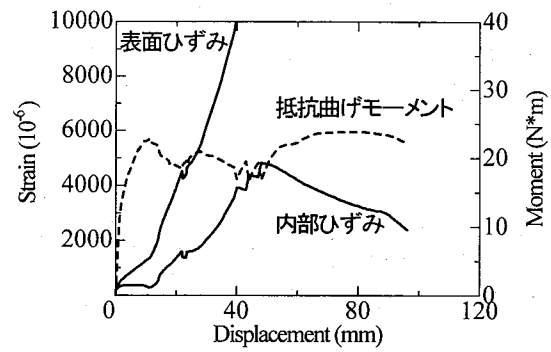
ここに、 d は有効高さ、 L_a はせん断スパンである。

実験で観察された破壊領域の長さは、S1供試体では400mm、L2供試体では800mmとなる。一方、等価塑性ヒンジ長は、S1供試体では405mm、L2供試体では1630mmである。これらの数値を平均化長さとした場合の平均化ひずみの進展から、最大荷重時、荷重低下開始時および急激な荷重低下時におけるそれぞれの平均化ひずみの値を求めた結果を表-3、4に示す。

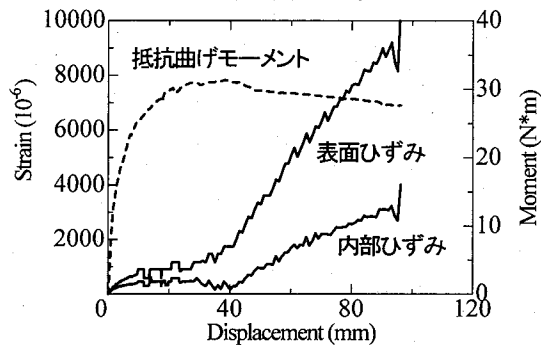
表より明らかなように、平均化長さが長くなると、ある変位レベルにおける平均化ひずみの値が小さくなる。また、L2供試体に関しては、平均化長さによって各損傷レベルにおけるひずみ量が大きく異なっている。すなわち、平均化長さは平均化ひずみに対して大きな影響を持っている。損傷度を評価する際、損傷指標として平均化ひずみを用いることはこれまでの議論から適切であると考えられる。今後信頼できる指標とするためには、平均化長さを適切に設定し、損傷の程度を定量的に表わすためのひずみレベルを決定する必要がある。なお、今回の検討の範囲においては、



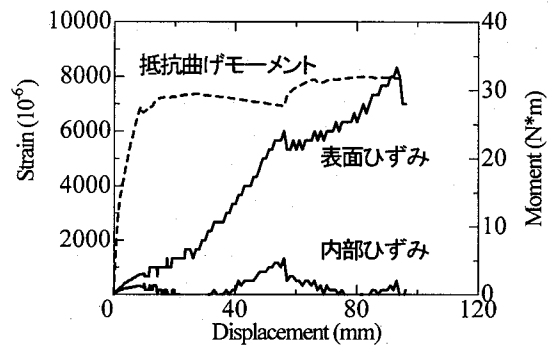
(a) 隔壁上部



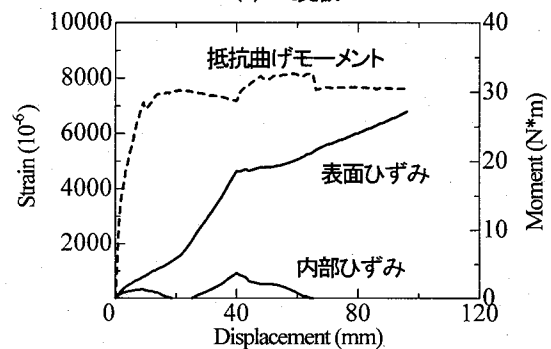
(b) 隔壁下部



(c) 頂版-1



(d) 頂版-2



(e) 底版

平均化長さの影響を考慮しても、かぶりコンクリートのひずみが $2000 \sim 3500 \mu$ に達したときが部材の最大荷重点、かぶりの剥落が始まるとき、かぶりコンクリートのひずみが $3000 \sim 5000 \mu$ あるいは内部コンクリートのひずみが $-2000 \sim 3000 \mu$ 程度、荷重低下が始まるときは内部コンクリートのひずみが $2000 \sim 5000 \mu$ 程度、急激な荷重低下が生じるときは、内部コンクリートのひずみが $3000 \sim 7000 \mu$ 程度、などによって損傷度の評価を行うことができると考えられる。

5. 損傷指標の構造物レベルへの適用性に関する検討

5.1 RC ボックスカルバート構造の実験および解析概要

前章までの議論から、軸方向の平均化ひずみを用いることで曲げが卓越するRC部材の損傷度評価を行うことができる見込みを得た。本章では、一般的なRC構造物への適用性の検討を目的として、不静定構造物であるRCボックスカルバートの一方向静的載荷実験を対象とした解析を行った¹³⁾。

図-16に解析モデルを示す。解析の対象としたボックスカルバートは、十分にせん断補強されており、曲げ破壊するように設計されている。境界条件としては、側壁下部の隅角部は鉛直方向変位のみを固定し、隔壁下部のT型隅各部は鉛直、水平の両変位ともに固定した。載荷は頂版左端を変位制御によって行い、また、鉛直方向の常載荷重として、側壁、隔壁の上端部にそれぞれ98kN、196kNの荷重を作用させた。解析に用いた材料定数は、実験で得られた値を用い、コンクリートのヤング係数、圧縮強度、引張強

度をそれぞれ17.6GPa、25.9MPa、2.06MPaとし、主筋のヤング係数、降伏応力をそれぞれ188GPa、348MPaとした。なお、補強筋は全てRC要素でモデル化した。

解析により予測された荷重-変位関係と実験結果の比較を図-17に示す。解析は、初期剛性および最大荷重を実験結果よりも大きく見積もっているものの、傾向としては実験の挙動を再現していると考えられる。実験では、変位29.3mmにおいて最大荷重に達した後、隔壁上下のコンクリートが剥落することで荷重低下が生じたと報告されている。図-18に試験終了時の供試体のひび割れ状況図を示すが、コンクリートの剥落は隔壁のコンクリートのみで生じており、側壁隅角部等においては、ひび割れが多数生じているもののコンクリートの圧縮破壊は生じていないことがわかる。

図-20 抵抗曲げモーメント-載荷点変位-平均化ひずみ関係

5.2 構造部材に対する損傷指標の適用と損傷度評価

側壁、隔壁および頂底板における圧縮コンクリートの表面ならびに主鉄筋位置の軸方向ひずみを平均化することで、部材の損傷度の評価を行った。なお平均化領域の長さは、部材の断面が小さいことを考慮して300mmとした。平均化ひずみの進展について照査を行った結果、図-19に示す領域において、ひずみの進展が著しいという結果が得られた。この結果は、図-18のひび割れ図とも一致するものである。そこで、解析上損傷が生じていると考えられる部材について、図-20に示す抵抗曲げモーメント-載荷点変位-平均化ひずみ関係を用いて部材の損傷度ならびに構造物の損傷過程について検討した。ここで、抵抗モーメントは、かぶりの局所ひずみが最も増加する断面内の各要素の等価節点力より求めた。なお、損傷が生じている領域の呼び名としては図-19に記載したものをを用いる。

まず、隔壁上下部((a), (b))においては、表面の平均化ひずみが急速に増加することで、部材の最大曲げモーメントに達した。このとき、隔壁上下部のどちらにおいても表面の平均化ひずみは約2000~3000 μ 程度である。その後、表面ならびに内部の平均化ひずみが増加することで、抵抗曲げモーメントが減少し、最大モーメントが80%低下した時点での内部コンクリートの平均化ひずみが約2000~3000 μ であり、この値は4章の結果とほぼ同程度の値を示している。内部コンクリートのひずみが増加していくことは、損傷が蓄積されることを意味し、実験結果とも対応している。

一方、頂底板においては、主として表面の平均化ひずみの増加が著しい。隔壁と同様にかぶりのひずみが3000 μ で、最大モーメントに達している。内部コンクリートのひずみは、ほとんど増加していない性状を示した。このことは、部材としての損傷の進展が少ないことを意味し、実験結果とも対応している。

不静定構造物の場合、部材に生じる曲げモーメントは軸力変動や応力の再配分により必ずしも単一部材と同様な傾向を示さない可能性がある。それに対し、平均化したひずみは、その絶対値が部材の着目する位置での損傷度と直接関係する量と考えられる。したがって、構造部材の損傷度あるいは損傷の過程に対し平均化ひずみを損傷評価指標とすることが、より妥当と考えられる。

6. 結論

本研究では、非線形有限要素法を用いた損傷度評価の確立を目的とし、曲げ破壊するRC部材の損傷指標の検討を行った。また、不静定構造物に対しても、その適用性について検討した。本研究を通して得られた知見を以下に示す。

- (1) 曲げ破壊するRCはりに対して、局所ひずみは要素寸法に依存するため、損傷指標として適用できない。一方、軸方向ひずみのある領域で平均化した平均化ひずみは妥当な損傷指標となりうる。

- (2) RC柱の損傷度評価を行う際には、かぶりコンクリートと内部コンクリートのひずみについて、それぞれ検討を行う必要がある。
- (3) 損傷指標として平均化ひずみを用いる場合には、平均化する領域を適切に設定する必要がある。
- (4) 不静定構造物の損傷度評価においても、平均化ひずみにより、各部材の損傷度評価が可能である。

今後は、損傷のレベルを表わすひずみ値と平均化領域についての検討を行うことで、損傷指標の信頼性を高める必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年度制定コンクリート標準示方書耐震性能照査編，2002。
- 2) コンクリート構造物のポストピーク挙動解析研究委員会：コンクリート構造物のポストピーク挙動評価と設計への応用，日本コンクリート工学協会，2003。
- 3) 諏訪俊輔ら：積分型非局所損傷理論を適用したファイバーモデルによるRC部材解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.73-78，2004。
- 4) 諏訪俊輔ら：繰返し荷重を受けるRC部材への非局所構成則の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.2，pp.109-114，2005。
- 5) 田辺忠顕著：初期応力を考慮したRC構造物の非線形解析法とプログラム，技報堂出版，2004。
- 6) H. NAKAMURA and T. HIGAI：Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001。
- 7) 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。
- 8) A. Belarbi and T. T.C. Hsu：Constitutive Laws of Concrete in Tension and Reinforcing Bars Stiffened by Concrete, ACI Structural Journal, No. 91-S46, pp.465-474, 1994。
- 9) 岡田琢之ら：曲げ破壊するRCはりの変形性状に関する実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.403-408，2003。
- 10) 星隈順一ら：鉄筋コンクリート橋脚の変形性能に及ぼす断面寸法の影響に関する研究，土木学会論文集，No.669/V-50，pp.215-232，2001。
- 11) 滝本和志：エネルギー的考察による鉄筋コンクリート部材の損傷度評価とその適用方法に関する研究，名古屋大学博士論文，2004。
- 12) コンクリート構造物の靱性設計手法に関する研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，2001。
- 13) 本田国保ら：水平荷重によるボックスカルバートの変形性能の実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.1261-1266，1999。

(2005年9月10日受付)