

ひずみ評価指標によるせん断圧縮破壊する RC部材の損傷領域と破壊基準の検討

上田 尚史¹・Kongkeo PHAMAVANH²・佐野 理紗²・中村 光³・国枝 稔⁴

¹正会員 元名古屋大学（現関西大学助教 環境都市工学部）（〒564-8680 吹田市山手町3-3-35）

E-mail: n.ueda@kansai-u.ac.jp

²元名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻（〒464-8603 名古屋市千種区不老町）

³正会員 名古屋大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻（同上）

E-mail: hikaru@nagoya-u.jp

⁴正会員 元名古屋大学（岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科）（〒501-1193 岐阜市柳戸1-1）

E-mail: kunieda@gifu-u.ac.jp

本研究では、RC部材の非線形有限要素解析における損傷評価手法の確立を目的として、コンクリートの圧縮破壊が支配的となるせん断圧縮破壊するRC部材の破壊基準としてのひずみ評価指標を検討した。面的なひずみ性状を計測可能なアクリル格子法を用い、損傷領域と損傷度を実験的に評価するとともに、3次元非線形有限要素解析による損傷評価を行った。その結果、平均化ひずみを用いることで要素寸法によらないひずみ分布性状が得られることを示し、ひずみによる損傷領域評価と破壊基準を提案した。また、提案手法を曲げ破壊するRC部材に適用し、その妥当性と適用性を示した。さらに、不静定構造物を対象とした検討の結果、構造全体の耐荷力以前における部材の破壊を評価でき、単一部材のみならず構造物中の部材の損傷評価に対する適用性を示した。

Key Words : *shear compression failure, failure criterion, averaged strain, finite element method*

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）構造物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精度良く評価できるようになってきている。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に信頼できる解析手法として認識されている¹⁾。このような数値解析技術の進歩を鑑み、2002年度改訂の土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編では、非線形解析が照査手法の原則として取り入れられ²⁾、さらに、2007年度制定の土木学会コンクリート標準示方書設計編においても非線形有限要素解析による応答値の算定手法が取り入れられている³⁾。このように、非線形解析は実務レベルにおいても有効に利用されつつあり、今後は、非線形解析を用い、より合理的にコンクリート構造物の設計、照査が行われるようになって考えられる。

非線形解析の有効利用の一例として、不静定構造物の照査への適用が挙げられる。不静定構造物は、一部材が

限界状態に達したとしても、構造全体の破壊には至らない場合がある。例えば、2層ラーメン構造や地中構造物においては、中層はりや隔壁に破壊が生じた後もより大きな荷重に耐えられる。それに対し現在の照査法では、一部材が限界状態に達した時点で構造物の限界状態とみなしており、構造物全体の照査を行なう際には、不合理な結果となる場合が多い。これは、現状の応答解析は線形解析が一般的であり、一部材が限界状態に達した後の構造全体の挙動を適切に評価できないためである。しかし、非線形解析を用いれば、各部材の非線形状態を逐次考慮することができるため、構造物としての限界状態まで評価できるようになり、より合理的な設計が可能になる。ただし、その場合には部材の破壊の評価が問題となる。すなわち、静定構造物の場合は、荷重－変位関係における最大荷重（耐荷力）から破壊を直接評価できるが、不静定構造物の場合は、各々の部材がいつ破壊に至ったかは容易に評価することはできない。

部材が破壊したか否かを評価するためには、現状では検討位置での断面力（応答値）に対し、曲げ耐力やせん断耐力の限界値を示方書で定められた方法を用いて算定

し、照査を行うことになる⁴⁾。このような方法は、各部材の挙動を適切に評価可能な非線形解析の利用法としては極めて不合理であり、限界値の指標が耐力や変形能しかない現状の課題といえる。したがって、応答値とともに耐力や変形能以外の限界値を非線形解析により評価できる手法を確立する必要がある。

非線形解析の限界値指標となり得る力学量としては、ひずみや応力などの局所点での情報が適切であると考えられる。しかし従来より、ひずみはひび割れ図を描くために、応力は力の流れを理解するために使われることが多く、力学量として有効に利用されているとはいえない状況である。ひずみなどの局所情報は損傷とも密接な関係を持つ力学量であり、その有効利用が望まれる。例えば、RC構造物の耐震設計においては、大地震に対しては構造物にはある程度の損傷は許容し、損傷を受けた後に補修・補強して使用し続けるという考え方が一般的になってきている⁵⁾。損傷した構造物に対して補修・補強の要否を判断するためには、構造物がどの程度の損傷を受けているのかを客観的な指標によって適切に評価する必要がある。このような場合は、応力・ひずみなどが有力な指標になると考えられる。

これまでに、ひずみを損傷指標として用いることに対する検討としては、著者らによる平均化ひずみを用いる方法がある^{6,7,8)}。著者らは、曲げ破壊するRC部材に対して、平均化ひずみの概念を用いることにより、要素寸法によらない破壊基準の評価指標としての可能性や、破壊領域の評価が可能であることを示している^{6,7)}。さらに、せん断圧縮破壊に対しても同様な手法が適用できる可能性を示している⁸⁾。また、斉藤ら⁹⁾は、偏差ひずみの第2不変量によりコンクリートの引張損傷を、正規化した累加ひずみエネルギーによりコンクリートの圧縮損傷を評価できるとし、それらに対して著者らが提案した平均化の概念を適用することにより、部材の損傷や破壊を定量的に評価可能となることを示している。

本研究では、せん断圧縮破壊に対する限界値に有限要素解析の結果を直接使用できるようにすることを目的として、ひずみを損傷指標とした破壊基準の検討を実験・解析の両面から試みた。さらに、3次元有限要素解析による損傷評価においては、平均化ひずみを用いて、せん断圧縮破壊の損傷領域評価ならびに破壊基準の提案を試みた。また、破壊を支配する要因がせん断圧縮破壊と同様にコンクリートの圧縮破壊である曲げ破壊に対して、提案する手法の適用性を検討した。さらに、提案したひずみ評価指標による破壊基準を不静定構造物へ適用し、その妥当性ならびに有用性を検討した。なお、本研究では基礎的な検討として、単調載荷時の損傷領域や破壊基準を明らかにすることを目的とし、想定する外力としては一方向の荷重のみを対象とした。

2. ひずみの損傷指標としての利用における問題点と解決策

コンクリートのようなひずみ軟化材料を用いた有限要素解析では、解析結果が要素寸法に依存してしまう問題がある¹⁾。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。しかし、破壊エネルギーを導入した場合においては、要素寸法に依存した応力－ひずみ関係を用いるため、ひずみが要素寸法に依存する問題が生じる。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なり得ないのが現状である。

この問題に対して、諏訪ら¹⁰⁾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非局所化させ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。しかし、積分型非局所構成則を汎用の有限要素解析プログラムに組み入れるには、別途アルゴリズムが必要であることから、一般性に欠けるといった問題点がある。

それに対し著者ら^{6,7)}は、損傷評価に平均化ひずみを用いることで要素寸法の影響を低減させることができることを確認している。図-1に平均化ひずみの概念図を示すが、平均化ひずみは、要素寸法に依存した局所ひずみを要素寸法とは別の寸法（平均化領域）により領域平均することで得られるある種の物理量である。平均化ひずみの算出には特別なアルゴリズムを必要とせず、汎用プログラムの解析結果に対して平均化の概念のみを利用することで平均化ひずみによる損傷評価が可能となる。そこで本研究では、平均化ひずみを損傷評価指標とし、損傷領域ならびに損傷度の検討を行う。

平均化ひずみの算出においては、平均化領域の大きさが問題となってくる。権ら¹¹⁾は積分型非局所構成則を2次元RC部材に適用するにあたり、積分領域はコンクリートの破壊領域と関係があるとし、ひずみ状態に依存した積分領域を提案している。そこでは、図-2に示すように、圧縮ひずみ下では積分領域を大きく、引張ひずみ下では積分領域を小さくした楕円型の積分領域が考えられている。本研究では、非局所構成則で提案されている積分領域と同様の考え方を、3次元有限要素解析における平均化領域の算定方法に適用した。すなわち、平均化領域はひずみ状態の変化に伴い、主軸3方向の直径が変化する楕円体領域であるとした。それぞれの方向の直径は、図-3に示すように、圧縮ひずみ下の平均化長さ ℓ_c^* と引張ひずみ下の平均化長さ ℓ_t^* を範囲とし、着目する点のひずみの大きさにより変化するものとした。ここで、

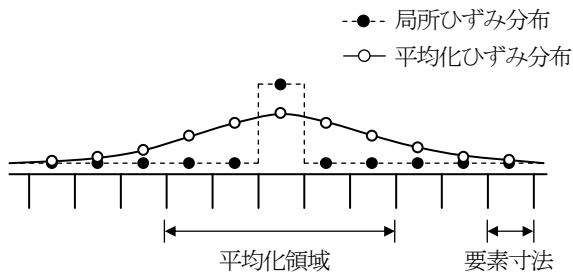


図-1 平均化ひずみの概要

ℓ_c^* , ℓ_t^* は既往の研究と同様に、それぞれ250mm, 50mmとした。平均化ひずみは、平均化領域内に含まれる積分点の主ひずみを用いて平均化するものである。それらの積分点の主ひずみ方向は、着目点の主ひずみ方向とは異なる場合もあるが、前述のように平均化領域を主ひずみの大きさにより楕円形状にすることで、主ひずみ方向が異なることが平均化ひずみの値に大きな影響を及ぼさないことが確認されている¹¹⁾。なお、平均化を行う際には、重み関数を用いることで着目点からの距離により重みづけを行う場合もあるが、本研究では既往の研究と同様に重み関数を一定とした¹¹⁾。

なお、平均化ひずみは、平均化領域の大きさを適切に設定することで、解析から得られたひずみを物理的に意味のある量として扱うことができるようにしたものである。平均化ひずみを用いることで、後述するアクリル格子法等により測定される破壊領域内のコンクリートのひずみと比較することができることとなり、コンクリートの損傷領域や損傷度を評価することが可能となる^{9,7)}。

3. せん断圧縮破壊するRCはりにおけるひずみ挙動の実験的評価

(1) 実験概要

a) 供試体概要

せん断圧縮破壊するRCはりの载荷試験を行い、破壊時におけるコンクリートの損傷領域ならびに損傷度を実験的に明らかにすることを試みた。実験は、2体の寸法の異なる供試体（S-1ならびにS-2）に対して行った。図-4に供試体の概要を、表-1にコンクリートと鉄筋の材料特性を示す。S-1, S-2供試体ともに、せん断スパン比が1.67のはりである。S-1供試体は、せん断スパンが250mm、有効高さが150mmであり、幅150mm×高さ200mmの矩形断面を有している。主鉄筋には、D19が2本配置されており、鉄筋比は2.55%である。一方、S-2供試体は、せん断スパンが500mm、有効高さが300mmであり、幅150mm×高さ250mmの矩形断面を有している。主鉄筋には、D25が2本配置されており、鉄筋比は2.25%である。

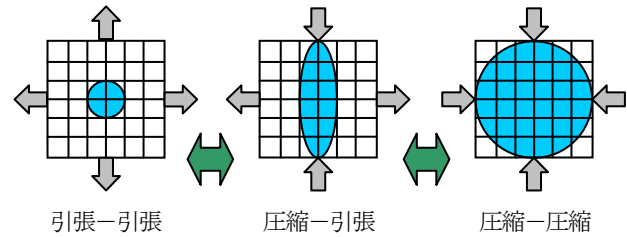


図-2 平均化領域概念図

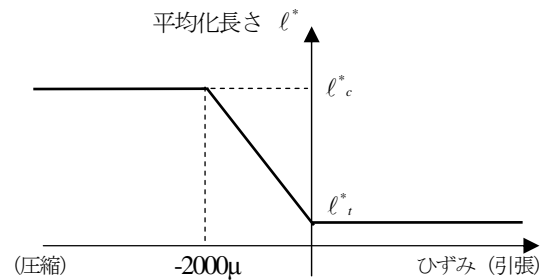


図-3 ひずみの大きさに応じた平均化長さの変化

S-1, S-2供試体ともに、破壊を片側スパン内のみで生じさせるために、片側にD6を40mm間隔で配置した。载荷は一点集中荷重の単純支持条件で行い、载荷板と支点には、S-1供試体では幅50mm、S-2供試体では幅90mmの鋼板を使用した。

b) アクリル格子法

コンクリートのひずみを計測する場合、供試体表面に直接貼付したひずみゲージでは、ひび割れなどの損傷の影響を受け、ポストピーク領域におけるひずみを正確に計測することができない。Nakamura and Higai¹²⁾は、一軸圧縮破壊時のひずみ計測において、アクリルバーを用いた方法により、ポストピーク領域におけるひずみ分布性状の評価を行っている。アクリルバーを用いたひずみ計測は、一軸圧縮試験の他、ディープビームのひずみ計測にも用いられている^{13, 14)}。一方、部材中の力の流れは必ずしも一次的であるとは限らないため、面的なひずみ計測が望まれる。田所ら¹⁵⁾や渡辺ら¹⁶⁾は、幅を有するアクリル板に3軸ゲージを貼付し、供試体に埋め込むことにより、コンクリート内部の面的なひずみの計測を試みている。3軸ゲージにより、コンクリート内部の主ひずみや主ひずみ方向を算定しているものの、計測位置が断面高さ中央部などと限定されており、広範囲に亘る面的なひずみ計測には至っていない。また、松井ら¹⁷⁾や渡辺ら¹⁸⁾などにより、画像計測手法を用いた検討が行われており、供試体全体に亘る面的なひずみ計測が試みられている。しかし、画像計測手法により計測されるひずみはコンクリート表面のひずみであり、コンクリートの剥離、剥落が生じる場合には計測が困難である。破壊領域を含

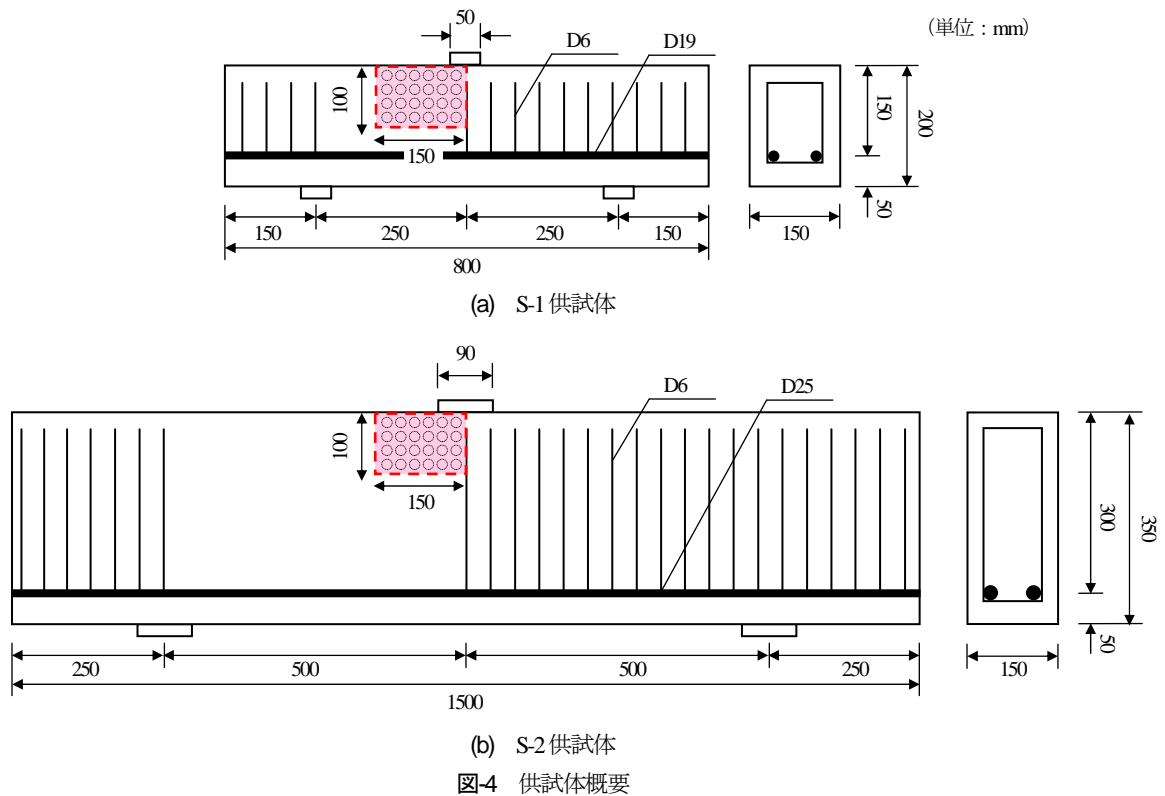


表-1 材料特性

コンクリート		鉄筋			
		D19		D25	
圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
30.0	24.8	404	192	1080	192

面的なひずみ計測を行うためには、コンクリート内部のひずみ計測が望まれる。

そこで、本研究では、加工したアクリル板にひずみゲージを貼付し、コンクリート中に埋め込むことにより、面的なコンクリートひずみの測定を試みた。図-5に加工したアクリル板を示す。本研究で用いたアクリル板は、厚さ5mm、弾性係数3.1GPaであり、図のように格子状に穴を空けることで、板の剛性を減ずるとともにコンクリートとの定着を図った。アクリル板の大きさは、S-1、S-2供試体ともに100mm×150mmとし、コンクリートが圧縮破壊すると予想される領域（図-4における破線の領域）に幅方向中央に配置した。図-6に示すように、検長5mmのひずみゲージをアクリル板に縦横に貼付することで、部材軸方向と鉛直方向のひずみを計測した。ここで、計測されるひずみは、アクリル格子の間隔により異なってくる考えられる。本研究では、コンクリートの破壊領域のひずみ分布を計測することを目的とし、圧縮破壊領域（200～300mm程度¹²⁾）よりも小さな寸法であり、かつある程度の平均的な領域として、骨材寸法以上の長さである25mmを格子間隔として採用した。したが

って、アクリル格子法により得られたひずみは、コンクリートの破壊領域における、コンクリートのひずみとしてみなすことができる。

なお、アクリル板を埋め込んでいない供試体を別途作製し、耐力および部材剛性に及ぼす影響は無いことを確認している。

c) アクリル格子法による主ひずみの評価

アクリル格子法では、ひずみゲージから得られるひずみを用いて、以下の手順により主ひずみを算定した。

- 1) 図-7に示すように、ひずみゲージを貼付した箇所を辺とした格子を考える。ここで便宜上、格子の交点を節点、格子で囲まれる領域を要素と呼ぶ。
- 2) 基準軸を設定する。本研究では、局所的な変形やひび割れの影響が小さい点として、図-7中のx'軸ならびにy'軸を基準軸と仮定した。
- 3) 節点間のひずみは一定であると仮定し、ひずみゲージから得られるひずみに節点間の長さ（本研究では25mm一定）を乗ずることで、節点間の相対変位を算定する。
- 4) それぞれの節点の変位を、基準軸からの相対変位

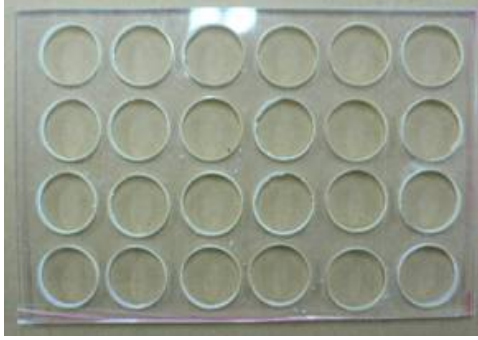


図-5 加工したアクリル板

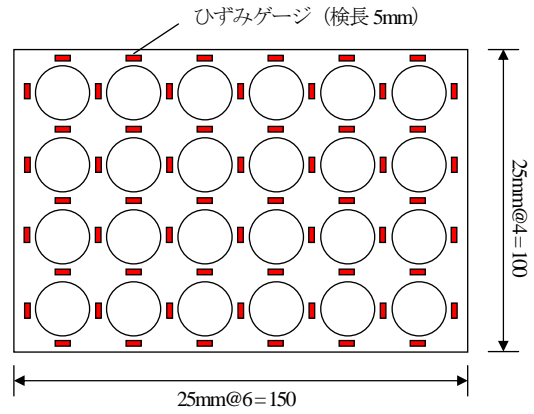


図-6 ひずみゲージ貼付位置

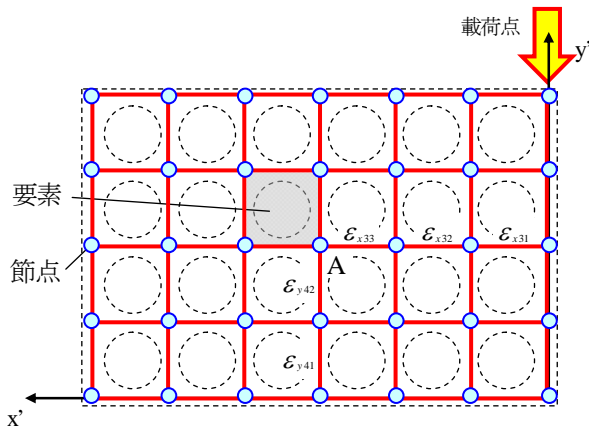


図-7 アクリル格子法の概要

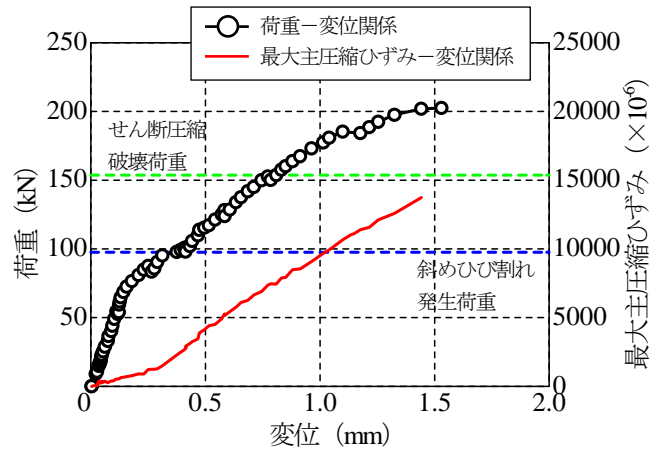


図-8 荷重－変位関係と最大主ひずみの履歴 (S-1 供試体)

の和として評価する。例えば、図-7中のA点の変位(δ_x , δ_y)は、以下のようになる。

$$\delta_x = 25 \cdot (\varepsilon_{x31} + \varepsilon_{x32} + \varepsilon_{x33}) \quad (1a)$$

$$\delta_y = 25 \cdot (\varepsilon_{y41} + \varepsilon_{y42}) \quad (1b)$$

- 5) 有限要素法の四角形要素に対する変位－ひずみマトリクスを用いて、要素の平均的なひずみを算定する。
- 6) 要素毎に、ひずみから主ひずみを算定する。

本手法は、必ずしも平面応力場におけるひずみ計測の厳密な方法ではないが、変位が微小な位置を基準軸とすることで、簡易に面的なひずみを計測することができると考えられる。

(2) 実験結果 (S-1供試体)

a) 荷重－変位関係と損傷進展挙動

図-8に実験より得られたS-1供試体の荷重－変位関係を示す。図には、二羽らのせん断強度式¹⁹⁾ (以下、二羽式) から求めた斜めひび割れ発生荷重とディープビームのせん断耐力算定式²⁰⁾ (以下、ディープビーム式) か

ら求めたせん断圧縮破壊荷重を併記している。実験では、荷重がおよそ90kNで斜めひび割れが生じており、二羽式から求めた荷重と概ね一致していることが分かる。斜めひび割れ発生後は、剛性が低下するものの急激な荷重低下は見られず、その後も荷重を保持し続けた。このことから、アーチ機構が形成されたものと考えられる。その後、荷重がおよそ200kNで載荷点付近のコンクリートが圧縮破壊し、荷重が急激に低下した。ディープビーム式から求めた荷重とは50kN程度差異があるが、典型的なせん断圧縮破壊を呈した。

図-9に図-8中の(a)斜めひび割れ発生後、(b)最大荷重直前、(c)最大荷重時のひび割れ性状を示す。斜めひび割れ発生後は、新たなひび割れは生じず、斜めひび割れのひび割れ幅が増大している様子が分かる。また、載荷点付近の斜めひび割れ上部のコンクリートにおいて、圧縮破壊が生じていることが確認できる。ここで、部材の表面のコンクリートのみが剥離し、奥行き方向においてはコンクリートが残っているような領域を剥離領域とし、載荷点近傍のコンクリートが圧縮破壊することで断面が喪失している領域を圧縮破壊領域と定義する。

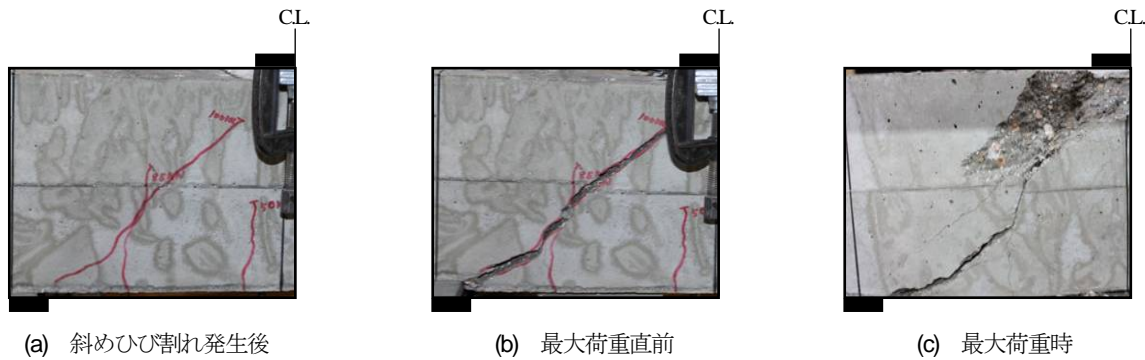


図-9 ひび割れ性状 (S-1 供試体)

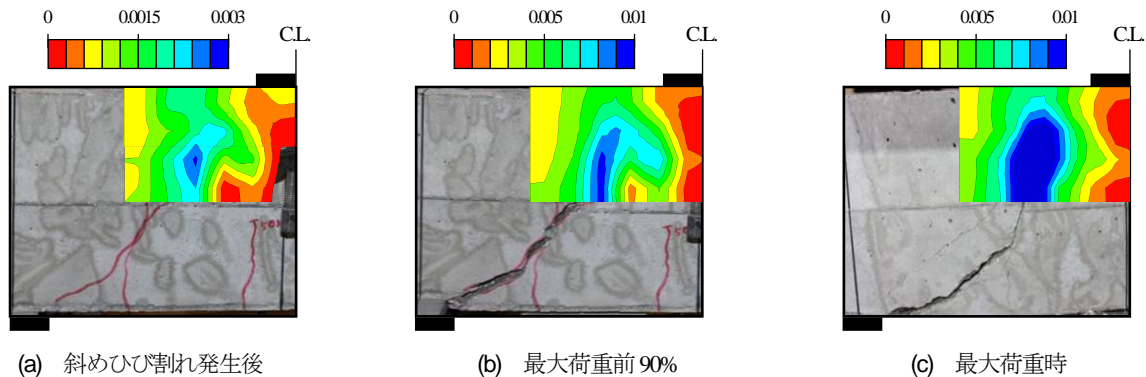


図-10 主引張ひずみ分布 (S-1 供試体) (引張を正)

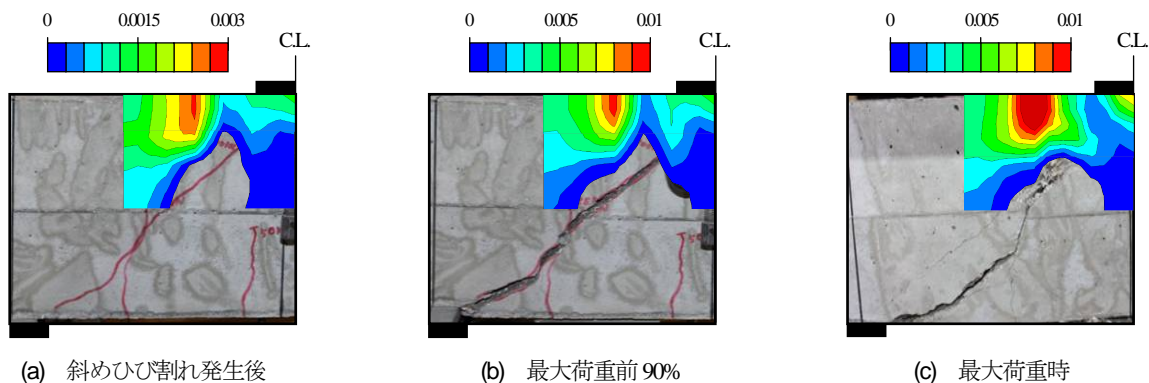


図-11 主圧縮ひずみ分布 (S-1 供試体) (圧縮を正)

b) アクリル格子法による損傷領域評価

図-10, 11にアクリル格子法により得られた主引張ひずみ分布ならびに主圧縮ひずみ分布を示す。主引張ひずみ分布では0～10000 μ の範囲の引張ひずみを、主圧縮ひずみ分布では-10000～0 μ の範囲の圧縮ひずみ（ただし、図中では圧縮を正としている）を表示している。図-10より、若干の位置のずれはあるものの斜めひび割れ位置で引張ひずみが局所化しており、荷重の増加に伴いひずみが増大していく様子が明確に表れていることが分かる。一方、図-11からは、載荷板下ならびに斜めひび割れ上部のコンクリートにおいて圧縮ひずみが生じていることが分かる。このことから、斜めひび割れ発生後にアーチ機構が形成されていると判断することができる。最大荷重時には斜めひび割れ上部において圧縮ひずみが卓越しており、絶対値として10000 μ を超える主圧縮ひずみが生

じた。ひずみが卓越した領域はコンクリートの圧縮破壊領域と概ね対応していることが確認できる。以上のように、アクリル格子法による主ひずみ分布は、ひび割れ発生や損傷領域などの局所的な挙動を概ね妥当に評価可能であることが分かる。

ここで、せん断圧縮破壊のメカニズムは、斜めひび割れ発生後のアーチ機構の崩壊であることから、損傷領域の評価にはコンクリートの圧縮ひずみを使用することが妥当であると考えられる。そこで、主圧縮ひずみ分布とひび割れ性状を比較し、損傷領域について検討する。

図-12にS-1供試体の最大荷重時における主圧縮ひずみ分布をその時点でのひび割れの写真と併せて示す。ひずみの大きさと損傷領域を比較するために、絶対値として2000 μ ならびに3500 μ 以上の領域のみを示す。なお、これらの値は、曲げ耐力算定に用いられるコンクリートの応

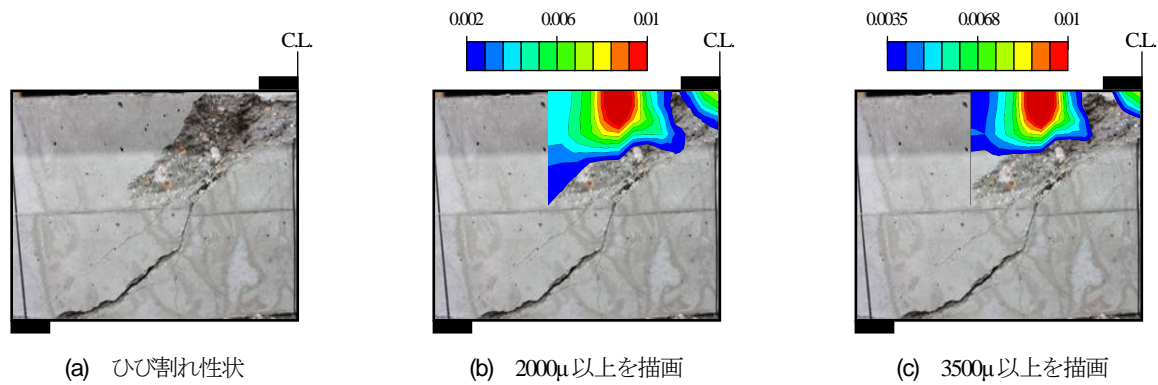


図-12 最大荷重時のひび割れ性状と主圧縮ひずみ分布の比較 (S-1 供試体) (圧縮を正)

カーひずみ関係の圧縮強度時のひずみならびに終局ひずみに対応している。図より、断面高さ方向の損傷状態を比較すると、主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域はコンクリートの剥離領域に概ね対応しており、 3500μ 以上の領域は、コンクリートの圧縮破壊領域と同程度の大きさとなっていることが分かる。なお、アクリル格子法によるひずみ測定領域外においては、どの程度のひずみが生じているのかは必ずしも明らかではないものの、载荷条件等を考慮すると部材軸方向において 2000μ 以上のひずみが生じている領域はそれほど大きくないものと考えられる。

以上のことから、本研究では、コンクリートの剥離領域を損傷領域として評価するものとし、主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域を損傷領域として考えることとする。前述のように 2000μ が圧縮強度時のひずみであることを勘案すれば、主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域をせん断圧縮破壊の損傷領域として評価することには矛盾は無いものと考えられる。

c) 最大主圧縮ひずみの履歴

図-8に、アクリル格子法により得られたS-1供試体内の最大主圧縮ひずみと変位の関係を赤線で示す。なお、最大主圧縮ひずみは载荷点近傍の領域で得られており、荷重増加に伴いその位置は大きく変化することはなかった。また、図において圧縮ひずみを正としている。

最大主圧縮ひずみは、斜めひび割れ発生時におよそ 2000μ に達した後、荷重が増加するにつれてその値は大きくなった。最大主圧縮ひずみの増加の傾向(直線の勾配)は、斜めひび割れ発生に伴い変化し、その後はほぼ一定であった。直線の勾配の変化は、耐荷機構が曲げ機構からアーチ機構へ変化したためであると推察される。その後、最大主圧縮ひずみの大きさが 10000μ を超えた荷重 190kN あたりで一度荷重の低下が生じるものの、その後も若干荷重は増加した。最大荷重時には、最大主圧縮ひずみの大きさは 14000μ 程度まで達した。すなわち、耐力を迎える時点においては少なくとも 10000μ 以上の主圧縮ひずみが生じているといえる。このことは、せん断圧

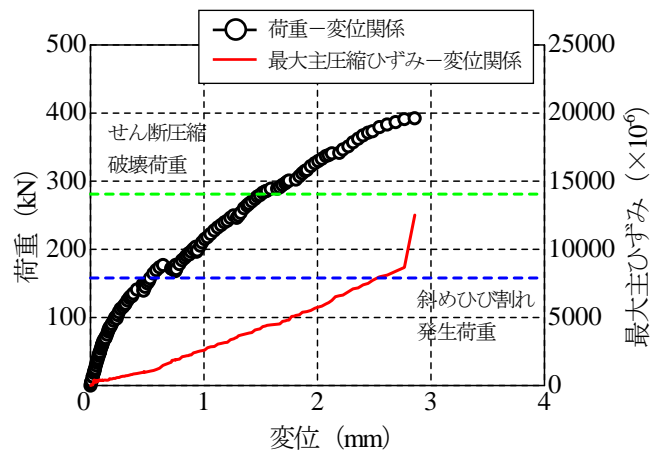


図-13 荷重-変位関係と最大主ひずみの履歴 (S-2 供試体)

縮破壊するRCはりにおいては、最大主圧縮ひずみの大きさが 10000μ を超えることが耐力を評価する一つの指標になり得ることを示唆するものである。

d) 損傷領域に対する供試体寸法の影響

有効高さの大きなS-2供試体の载荷試験を行い、供試体寸法が損傷領域の広がり及ぼす影響について検討した。

図-13に実験より得られたS-2供試体の荷重-変位関係を示す。荷重がおよそ 175kN の時点で斜めひび割れが生じ、 400kN の時点において载荷点近傍のコンクリートの圧縮破壊により急激に荷重が低下した。S-1供試体同様、斜めひび割れ発生後にアーチ機構が形成され、アーチの崩壊により終局を迎えたものと推察される。

図-14(a)に、終局時の供試体のひび割れ性状を示す。なお、支点近傍のコンクリートの剥落は、最大荷重以降に繰返し载荷を行った際に生じた損傷であり、最大荷重時に生じた損傷ではない。図より、供試体の寸法に占めるコンクリートの剥離した領域の大きさは、S-1供試体と比較して相対的に小さくなっていることが分かる。図-14(b)に、アクリル格子法により得られた最大荷重時の主圧縮ひずみ分布を終局時のひび割れ性状と併せて示す。なお、主圧縮ひずみ分布は絶対値として 2000μ 以上の領

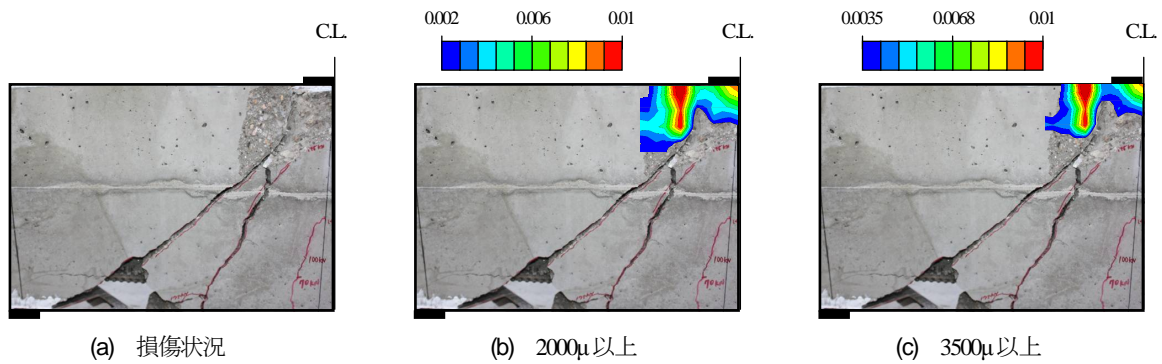
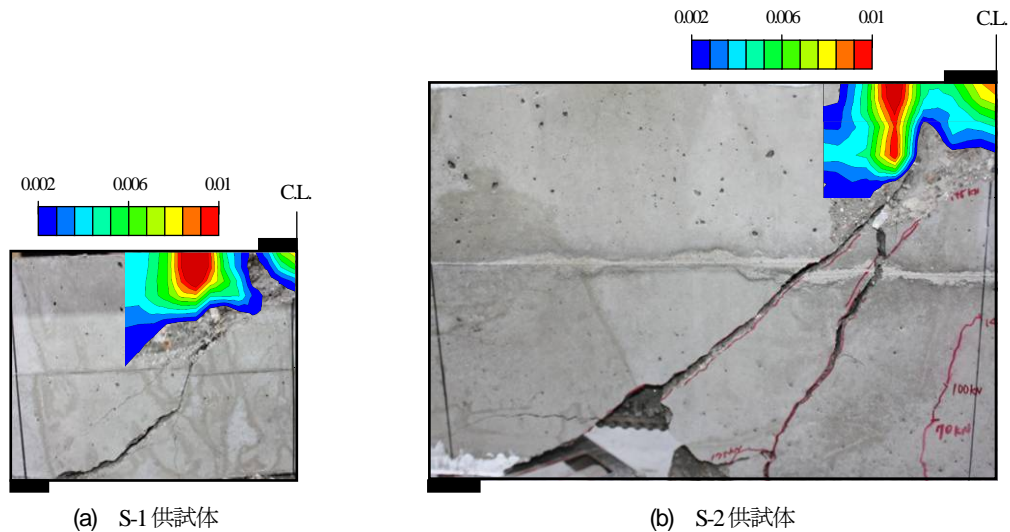


図-14 損傷状況および実験より得られた主圧縮ひずみ分布 (S-2 供試体) (圧縮を正)

図-15 寸法の違いによる損傷領域の比較 (主圧縮ひずみ 2000μ 以上を表示) (圧縮を正)

域のみを示す。図より、主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域は、荷重点近傍のコンクリートの剥離領域と概ね対応していることが分かる。このことから、寸法の大きな供試体においても、 2000μ 以上の領域を損傷領域として考えることは概ね妥当であるといえる。

ここで、供試体寸法の違いによる損傷領域の大きさを比較するため、S-1供試体とS-2供試体の主圧縮ひずみ分布図を図-15に再掲する。図において、両者の寸法倍率は同じとしている。図より、供試体の高さ方向の損傷領域の大きさは、S-2供試体の方が若干大きくなっている。これは、S-2供試体の方が有効高さが大きいため、中立軸位置が低くなることによる影響であると考えられる。すなわち、圧縮力を受ける範囲が断面高さ方向に大きくなったためであると考えられる。一方、供試体の軸方向に対する損傷領域の大きさは、S-1、S-2供試体で同程度となっており、圧縮力が作用する方向に対しては、供試体寸法の影響はないといえる。このことから、せん断圧縮破壊するRCはりの損傷領域の大きさは、圧縮応力が作用する領域の違いによる差異は見られるものの、本研究の限られた範囲内では、供試体寸法によらず概ね同程度であるといえる。

図-13に最大主圧縮ひずみと変位の関係を赤線で示す。S-1の結果と同様に、斜めひび割れが発生時には最大主圧縮ひずみは 2000μ 程度となっており、また斜めひび割れの発生により直線の勾配が変化する結果が得られている。最大荷重時の最大主圧縮ひずみの大きさは、 10000μ を超えるものであった。このことから、せん断圧縮破壊時の最大主圧縮ひずみの大きさは供試体寸法に依らず 10000μ 程度であるといえる。

以上のことから、限られた実験の範囲内ではあるものの、主圧縮ひずみを用いることでせん断圧縮破壊するはりの損傷領域や耐力の評価が可能であることが示された。なお、より寸法の大きな供試体においては、圧縮破壊領域の大きさが異なることも考えられるため、必ずしも本実験の結果と同様になるとは限らない可能性がある。そのような寸法の大きな供試体に対する検討は今後の課題であると考えている。次章においては、解析の面から主圧縮ひずみを用いた評価法の適用性について検討を行う。

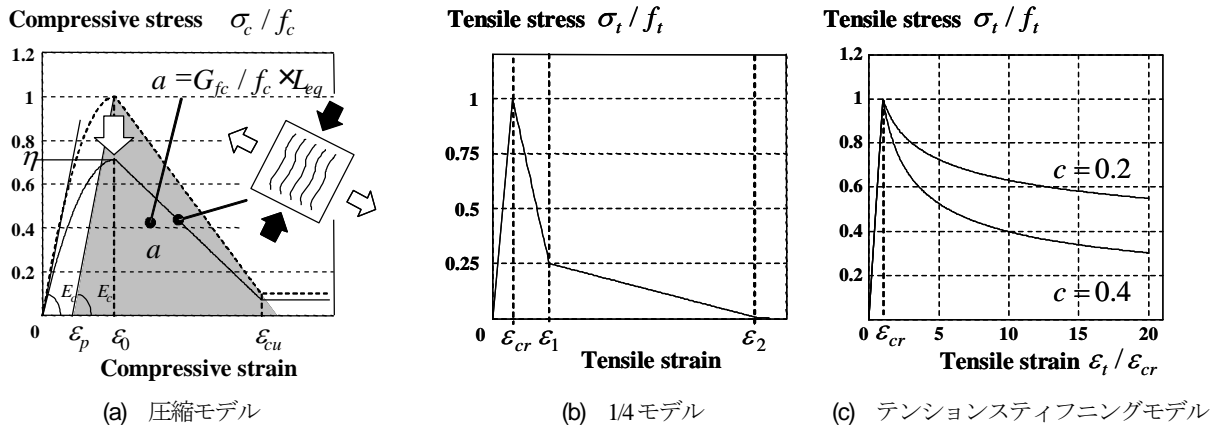


図-16 コンクリートの一軸の応力-ひずみ関係

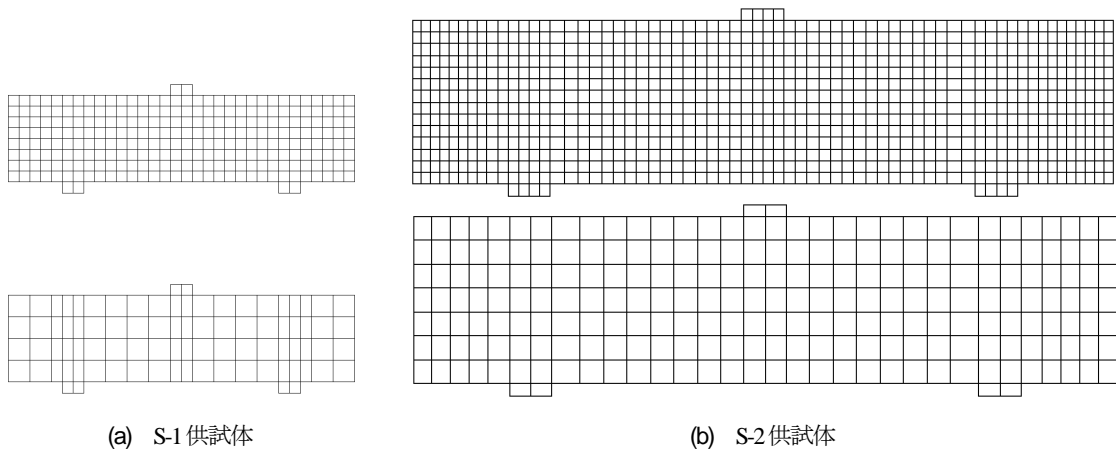


図-17 解析モデル（上：要素寸法 25mm，下：要素寸法 50mm）（それぞれ奥行き方向に 6 分割，3 分割）

4. せん断圧縮破壊するRCはりのひずみ評価指標の解析的検討

(1) 解析概要

本研究では、8節点アイソパラメトリック要素を用いた非線形3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²⁰⁾を用いた。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荷機構と、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、各格子成分に一軸の応力-ひずみ関係を用いることでRC構成則を構築する手法である。

図-16に、本研究で用いた一軸の応力-ひずみ関係を示す。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²²⁾を用い、その後は応力が直線的に減少するものとした。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 and Higaiが提案する圧縮破壊エネルギー¹²⁾を考慮した。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要素には引張破壊エネルギーを考慮した1/4モデルを、RC要素にはテンションスティフニングモデル²³⁾を仮定した。

軸方向鉄筋はトラス要素により離散的にモデル化し、せん断補強筋はRC要素としてモデル化した。ここで、トラス要素はコンクリート要素とは独立した節点により構成され、付着応力-すべり関係を適用したリンク要素を用いることで鉄筋とコンクリートの付着挙動をモデル化した²⁴⁾。本研究では、付着応力-すべり関係には、菅らのモデル²⁵⁾を仮定した。

解析は、実験に用いた供試体（S-1，S-2）を対象とし、要素寸法の影響を検討するために、図-17に示すような25×25×25mm，50×50×50mmの2つの要素寸法（以下、それぞれ要素寸法25mm，50mm）に対して行った。

(2) ひずみ評価指標による部材破壊基準評価の検討

図-18に解析より得られた荷重-変位関係を実験値と併せて示す。図中、黒の破線は実験値を、赤の実線は要素寸法25mm，青の実線は50mmの解析値を示す。図より、S-1供試体に対しては、実験値を精度良く捉えていることが分かる。S-2供試体に対しては、解析値は実験の耐力を若干低く評価する結果となった。どちらの諸元においても荷重-変位関係は要素寸法に依存しておらず、破壊エネルギーを用いた有限要素解析は要素寸法によらない荷重-変位関係を得られることが確認できる。

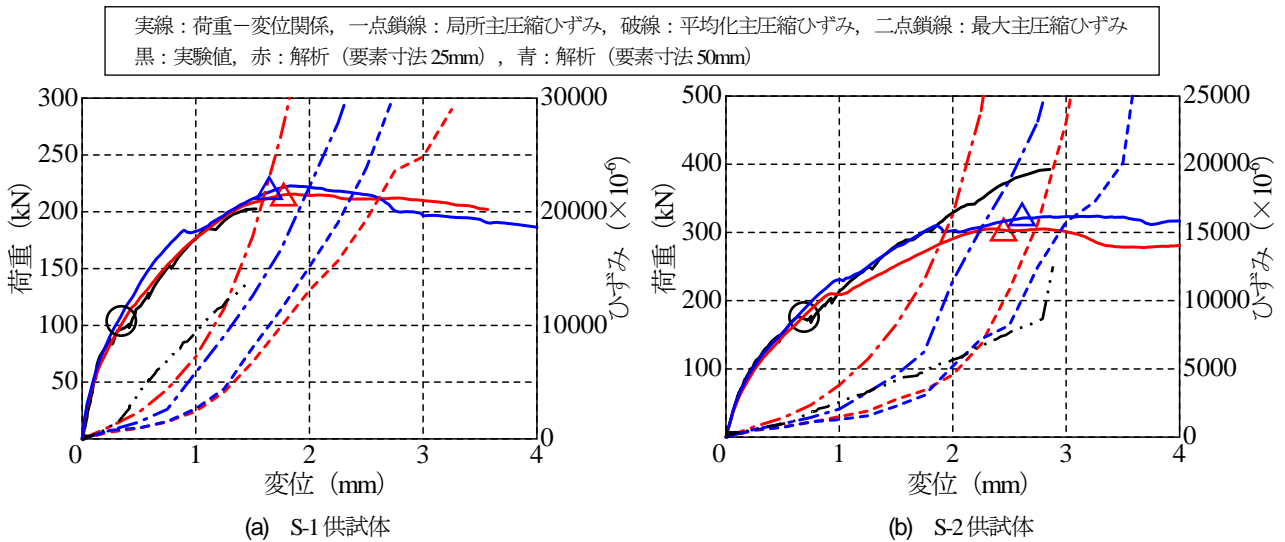


図-18 解析結果における荷重－変位関係と最大主圧縮ひずみ

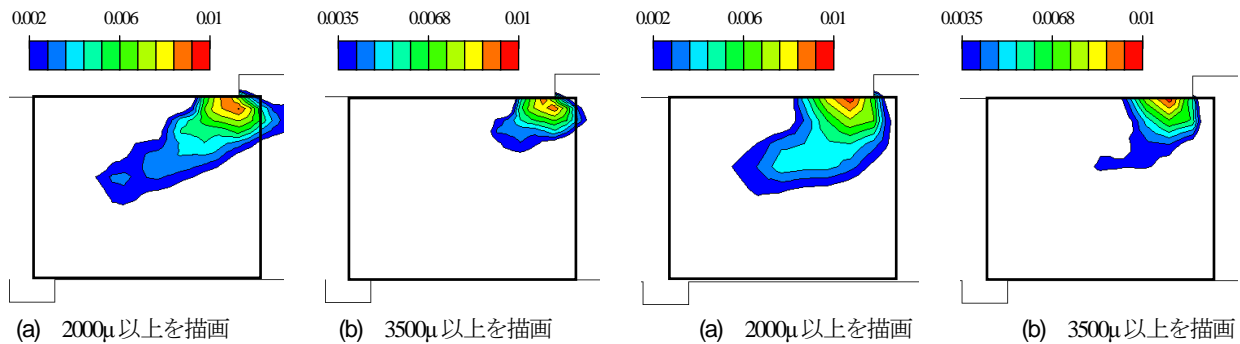


図-19 最大荷重時の平均化主圧縮ひずみ分布（圧縮を正）
（S-1 供試体，要素寸法 25mm）

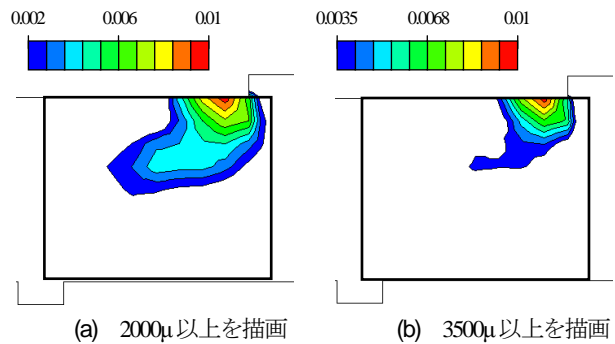


図-20 最大荷重時の平均化主圧縮ひずみ分布（圧縮を正）
（S-1 供試体，要素寸法 50mm）

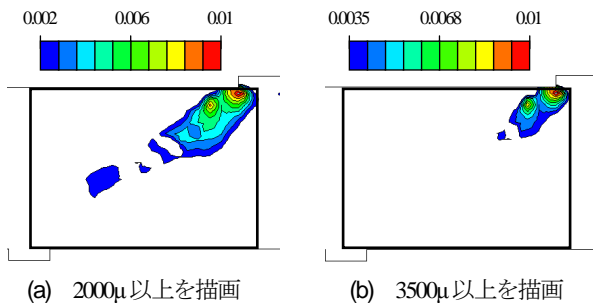


図-21 最大荷重時の平均化主圧縮ひずみ分布（圧縮を正）
（S-2 供試体，要素寸法 25mm）

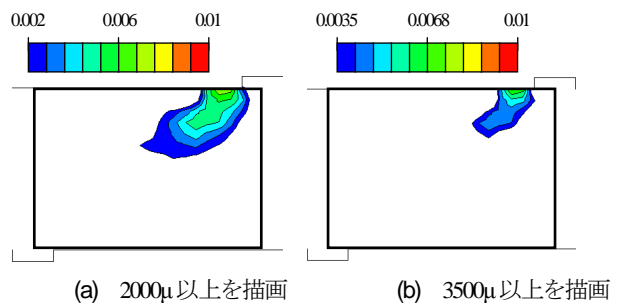


図-22 最大荷重時の平均化主圧縮ひずみ分布（圧縮を正）
（S-2 供試体，要素寸法 50mm）

図-18に、解析より得られた最大主圧縮ひずみと変位の関係を示す。赤色は要素寸法25mm、青色は50mmの場合の結果であり、それぞれ最大の局所主圧縮ひずみを一点鎖線で、最大の平均化主圧縮ひずみを破線で示している。また、図中には実験で計測された最大主圧縮ひずみの値を黒の二点鎖線で示している。なお、局所主圧縮ひずみは各ガウス点において直接得られるひずみの主圧縮ひずみ成分であり、平均化主圧縮ひずみは2章で説明した方法から得られた平均化ひずみの主圧縮ひずみ成分である。図より、どちらの供試体においても、○印で示した斜めひび割れの発生以後、局所主圧縮ひずみは要素寸

法に依存しているのに対して、平均化主圧縮ひずみは要素寸法の影響が低減されていることが分かる。このことから、せん断圧縮破壊するRCはりに対して、平均化主圧縮ひずみは要素寸法によらない損傷指標となり得ると考えられる。

平均化主圧縮ひずみを実験で得られた最大主ひずみと比較すると、S-1供試体に対しては必ずしも精度良く評価できてはいないものの、S-2供試体に対しては概ね評価できていることが分かる。また、実験における最大荷重時の変位に対応する平均化主圧縮ひずみの値は、7500～10000 μ である。図-18中に、解析において平均化主圧

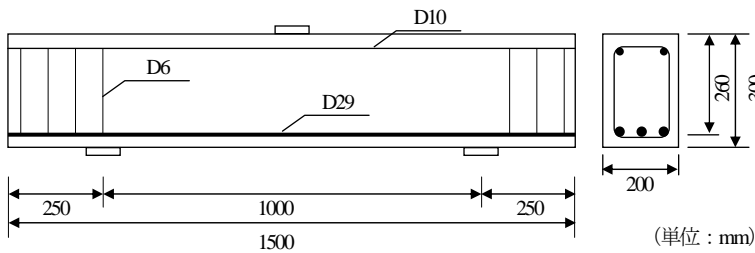
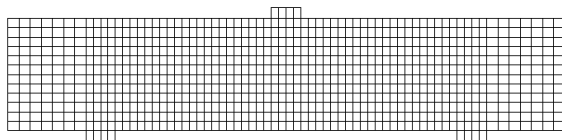
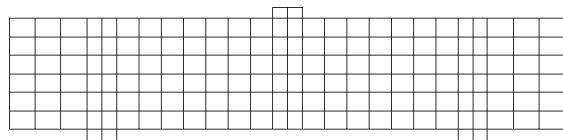
図-23 実験供試体 (山谷らの実験²⁰⁾)

表-2 解析ケース一覧

case	f_c' (N/mm ²)	a/d	P_t (%)	r/d
1	22.7	1.92	3.71	0.30
2	18.0			
3	40.0			
4	22.7	1.54	2.23	0.20
5		2.30		
6		1.92	5.51	
7			3.71	
8				
9				0.38



(a) 要素寸法 25mm (奥行き方向に6分割)



(b) 要素寸法 50mm (奥行き方向に3分割)

図-24 解析モデル

縮ひずみが 10000μ となる時点を示すが、この点は解析より得られる最大荷重に概ね対応していることが分かる。すなわち、解析における平均化主圧縮ひずみが 10000μ の時点はせん断圧縮破壊を評価するひずみ評価指標として規定できるものと考えられる。

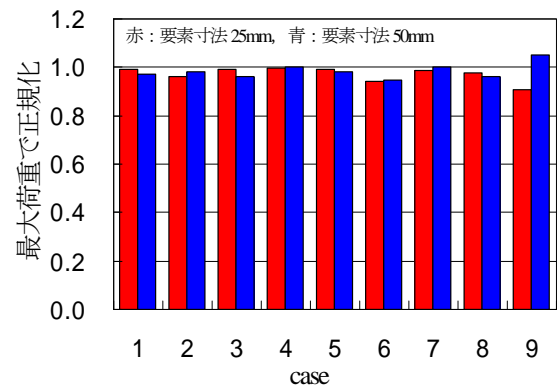
(3) ひずみ評価指標による損傷領域評価の検討

図-19~22に最大荷重時における平均化主圧縮ひずみ分布を示す。なお、図中のコンターは、要素寸法によらず同じ範囲で示している。図より、平均化主圧縮ひずみ分布は、 2000μ ないしは 3500μ 以上となっている領域は要素寸法によらず同程度となっており、また、それらの領域内のひずみの分布性も概ね同様であることが分かる。したがって、平均化主圧縮ひずみを用いることで、せん断圧縮破壊するRCはりの損傷領域を評価できるものと考えられる。また、ひずみ分布は、主圧縮ひずみが 2000μ 、 3500μ を超える領域のみをそれぞれ示している。また、平均化ひずみ分布は、要素寸法25mmのものと50mmのものを示す。図より、解析より得られた平均化主圧縮ひずみ分布の 2000μ 、 3500μ 以上の領域は、それぞれ実験より得られた主圧縮ひずみ分布の 2000μ 、 3500μ 以上の領域と概ね対応しており、実験での損傷領域ならびに圧縮破壊領域を妥当に評価していることが分かる。

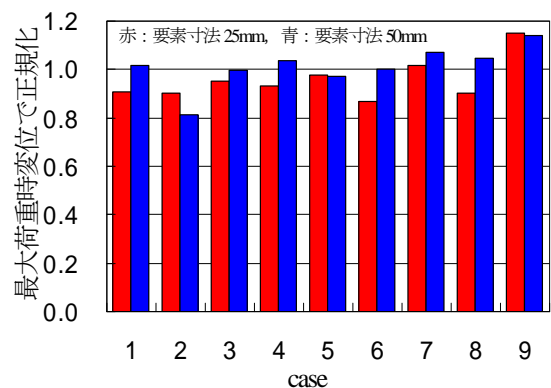
以上のことから、解析においても平均化主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域を損傷領域、 3500μ 以上の領域を圧縮破壊領域と規定することが可能であると考えられる。

(4) ひずみ評価指標の一般性の検討

山谷らにより行われたRCはりのせん断圧縮破壊実験²⁰⁾を対象として、前節で示した破壊基準が一般的に適用可



(a) 最大荷重で正規化



(b) 最大荷重時変位で正規化

図-25 平均化主圧縮ひずみ 10000μ 時の荷重ならびに変位による正規化

能であるかを検討した。図-23に実験供試体の概要を示す。実験は、圧縮強度 22.7N/mm^2 、せん断スパン比1.92、主鉄筋比3.71、支圧板幅有効高さ比0.30のせん断補強筋のないRCはりに対して行われ、最大荷重およそ330kNでせん断圧縮破壊を生じたと報告されている。解析は、実験供試体を基本として、表-2に示すように圧縮強度

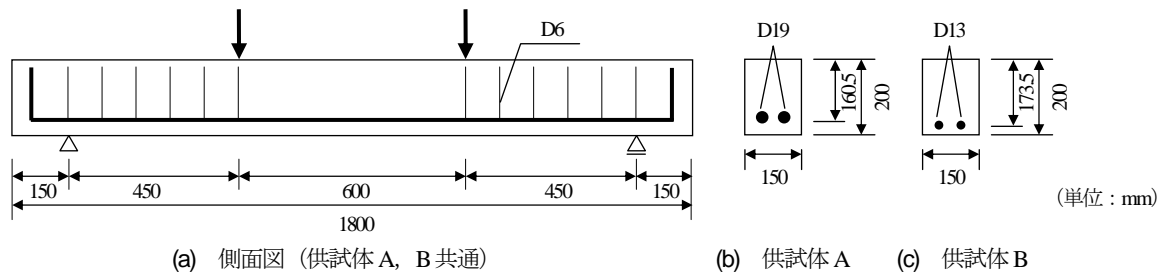


図-26 供試体概要

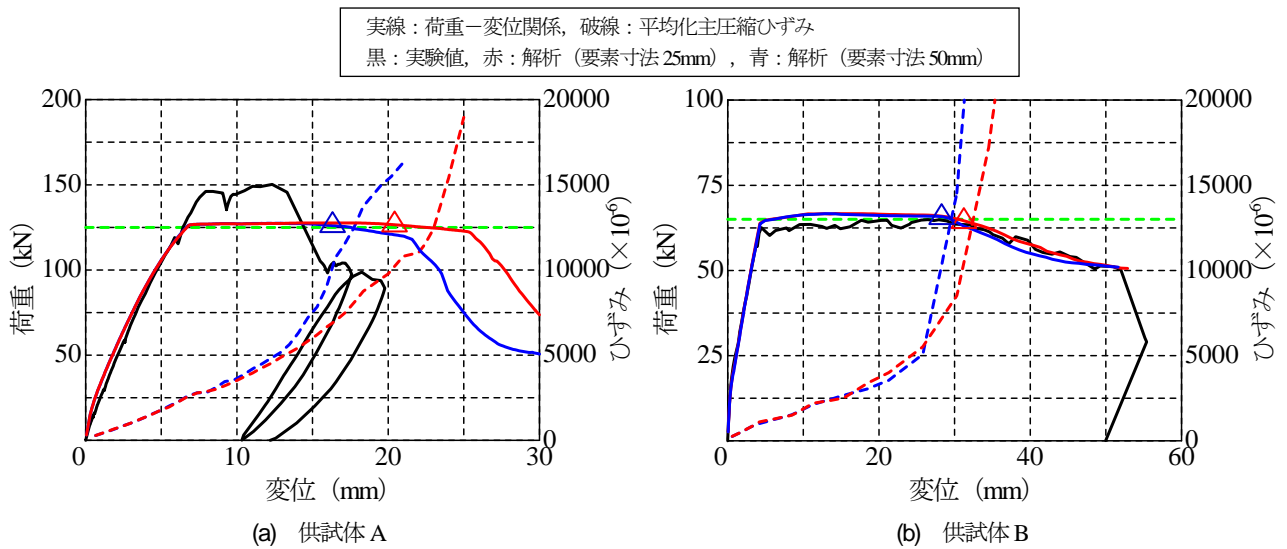


図-27 最大主圧縮ひずみと変位の関係

(f'_c) ，せん断スパン比 (a/d) ，主鉄筋比 (p) ，支圧板幅有効高さ比 (n/d) を変化させた計9ケースに対して，図-24に示すように要素寸法 $20 \times 25 \times 25 \text{ mm}$ ならびに $60 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ の2つの要素分割（以下，それぞれ要素寸法 25mm, 50mm）を用いて行った．なお，表中のcase1が実験供試体に対応する．

解析の結果，いずれのケースにおいてもせん断圧縮破壊を生じた．ここでは，平均化主圧縮ひずみ 10000μ が解析における破壊基準として適切かどうかを確認するため，各解析において平均化圧縮ひずみが 10000μ 時の荷重をそれぞれの解析の最大荷重で正規化した場合と，平均化圧縮ひずみが 10000μ 時の変位をそれぞれの解析の最大荷重時の変位で正規化した場合に対して，それぞれどのような傾向となるかを検討した．図-25(a)に，平均化主圧縮ひずみが 10000μ の時点に対応する荷重を解析結果より得られた最大荷重で正規化したグラフを示す．また，図-25(b)に平均化主圧縮ひずみが 10000μ の時点に対応する変位を，解析結果より得られた最大荷重時点における変位で正規化したグラフを示す．なお，要素寸法 25mm の場合を赤で，50mm の場合を青で示している．

図より，最大荷重による正規化の結果も，最大荷重時の変位による正規化の結果も，多少のばらつきはあるものの，全体的に0.8から1.2の範囲内に収まっていること

表-3 材料諸元

	コンクリート		鉄筋	
	f'_c	E_c	f_y	E_s
供試体 A	24.2	24000	404	192000
供試体 B	23.3	22000	364	204000

単位はいずれも (N/mm^2)

が分かる．とりわけ，最大荷重による正規化の結果は，ほぼ1.0となっており，平均化主圧縮ひずみが 10000μ を破壊基準とすることの妥当性が示されている．以上のことから，本研究で提案したひずみ評価指標は，諸元の異なるRCはりに対しても要素寸法によらない限界値指標となるものといえる．

5. 曲げ破壊するはりへのひずみ評価指標の適用

(1) 解析対象

本章では，破壊の要因がせん断圧縮破壊と同様にコンクリートの圧縮破壊である曲げ破壊に対しても，平均化主圧縮ひずみを用いた損傷領域の評価や破壊基準が適用可能かどうかについて検討を行う．

解析の対象は，鉄筋比の異なる2種類のRCはり供試体

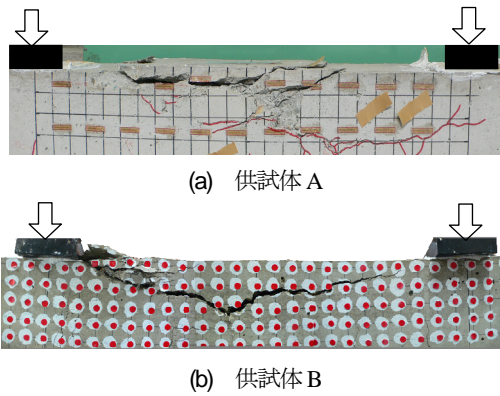
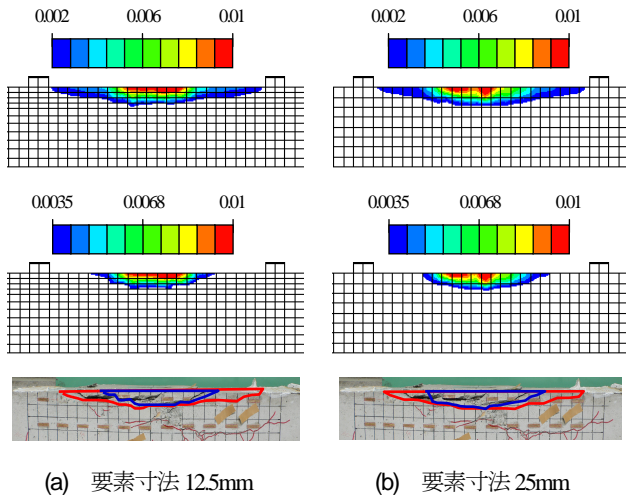


図-28 等曲げ区間圧縮縁の損傷状況



(a) 要素寸法 12.5mm

(b) 要素寸法 25mm

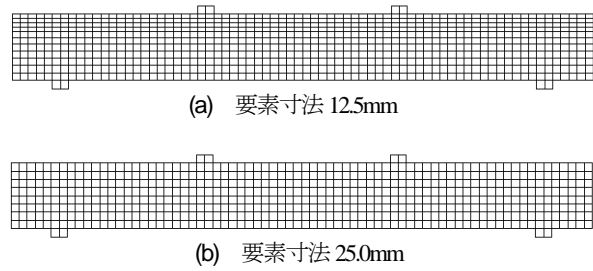
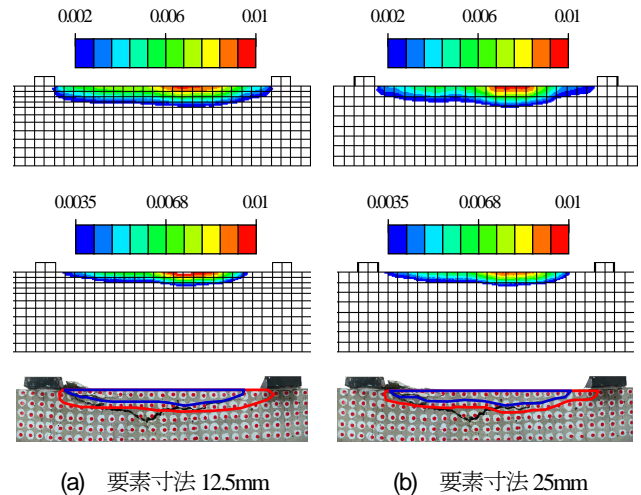
図-30 ひずみ分布による損傷領域評価 (供試体 A)
(圧縮を正, 上から, 2000 μ 以上, 3500 μ 以上,
ひび割れ図との比較)

図-29 解析モデル (どちらも奥行き方向に6分割)



(a) 要素寸法 12.5mm

(b) 要素寸法 25mm

図-31 ひずみ分布による損傷領域評価 (供試体 B)
(圧縮を正, 上から, 2000 μ 以上, 3500 μ 以上,
ひび割れ図との比較)

である。図-26に、実験供試体の概要を示す。供試体Aは軸方向鉄筋がD19(軸方向鉄筋比2.38%)であり、供試体Bは軸方向鉄筋がD13(軸方向鉄筋比0.97%)である。いずれの供試体も200×150mmの矩形断面を有している。実験では、コンクリートの圧縮破壊が部材の耐力低下に及ぼす影響の検討を目的としているため、600mm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。コンクリートおよび軸方向鉄筋の材料特性を表-3に示す。

図-27に、実験で得られた荷重-変位関係を示す。供試体A, Bともに、主鉄筋降伏後に等曲げ区間のコンクリートが圧縮破壊することで、荷重が低下する挙動を呈した。なお、図中に断面計算により算定した曲げ終局時の荷重を黄緑の破線で示すが、実験で得られた最大荷重は供試体Aでは算定値よりも2割ほど大きい結果であり、供試体Bでは算定値と同程度であった。図-28に、それぞれの供試体の実験終了時のひび割れ状況を示す。実験では、等曲げ区間のコンクリートの圧縮破壊により終局に至っており、破壊領域の大きさは、供試体Aでは、長さ300mm、深さ70mm程度であり、供試体Bでは、長さ450mm、深さ70mm程度であ

った。

(2) 解析モデル

図-29に解析モデルを示す。解析は、要素寸法の影響を検討するために、それぞれの供試体において等曲げ区間を25×12.5×25mm, 25×25×25mmの2つの要素分割(以下、それぞれ要素寸法12.5mm, 25mm)に対して行った。鉄筋は軸方向鉄筋はトラス要素により離散的にモデル化し、リンク要素によりコンクリートとの付着作用を考慮した。また、せん断補強筋は分散鉄筋によりモデル化した。

(3) ひずみ評価指標による曲げ破壊の評価

図-27に解析より得られた荷重-変位関係を実験値と併せて示す。図において、赤、青の実線はそれぞれ要素寸法12.5mm, 25mmの解析値を、黒の実線は実験値を示している。図より、供試体Aについては、解析は実験の耐力より低くなっているものの、断面計算の値と同程度となっていることが分かる。また、供試体Bについては、解析は実験で得られた挙動を終局時に至るまで妥当に捉えていることが分かる。いずれの結果においても、要素

寸法によらない結果が得られている。

図-27に解析より得られた最大主圧縮ひずみと変位の関係を示す。赤、青はそれぞれ要素寸法12.5mm, 25mmの解析値を表しており、それぞれの解析における最大の平均化主圧縮ひずみを破線で示している。

図より、鉄筋の降伏以降においても、平均化主圧縮ひずみは要素寸法の影響が低減されていることが分かる。このことから、曲げ破壊するRCはりにおいても平均化主圧縮ひずみは、要素寸法によらない損傷指標になり得ると考えられる。また、解析で平均化主圧縮ひずみが10000 μ となる時点を図-29中に Δ 印で示すが、この点は解析において荷重が低下し始める点に概ね対応していることが分かる。すなわち、この点においてコンクリートの圧縮破壊により部材の破壊が生じたものと判断することができる。このことから、せん断圧縮破壊と同様に、平均化主圧縮ひずみ10000 μ を曲げ破壊を評価するひずみ評価指標として規定できると考えられる。

(4) ひずみ評価指標による曲げ破壊するRCはりの損傷領域評価の検討

図-30, 31に平均化主圧縮ひずみが10000 μ となる時点(図-29中 Δ 印)における平均化主圧縮ひずみ分布を示す。なお、図中には2000 μ 以上、3500 μ 以上の領域のみを表示している。供試体A, Bともに平均化主圧縮ひずみ分布が2000 μ 以上の領域は等曲げ区間に広がっており、3500 μ 以上の領域は、等曲げ区間中央に局所化している。図-30, 31の下段は、実験の圧縮損傷状況と解析より得られた損傷領域を比較した図であり、平均化主圧縮ひずみ2000 μ 以上の領域を赤色で、3500 μ 以上の領域を青色で囲んでいる。

図より、深さ方向の損傷領域には差異はみられるもの

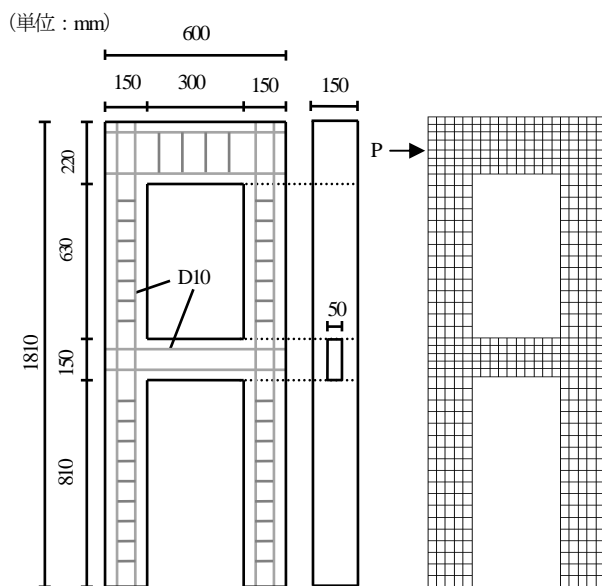


図-32 解析対象および解析モデル

の、軸方向の損傷領域ならびに圧縮領域は実験結果を概ね評価できているといえる。このことから、曲げ破壊するRCはりにおいてもせん断圧縮破壊するはりと同様に、平均化主圧縮ひずみ分布による損傷領域の評価が可能であることが示された。

6. 不静定構造物に対するひずみ評価指標の適用性の検討

(1) RC 2層ラーメン橋脚の解析

前章までの議論から、平均化主圧縮ひずみを用いることで、せん断圧縮破壊ならびに曲げ破壊するRC部材の損傷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構造物への適用性を検討することを目的として、RC 2層ラーメン橋脚を対象とした一方向静的載荷解析を行い、不静定構造物の一部材が、いつどのように破壊に至ったのかを、提案した手法により適切に評価することができるかを検討する。

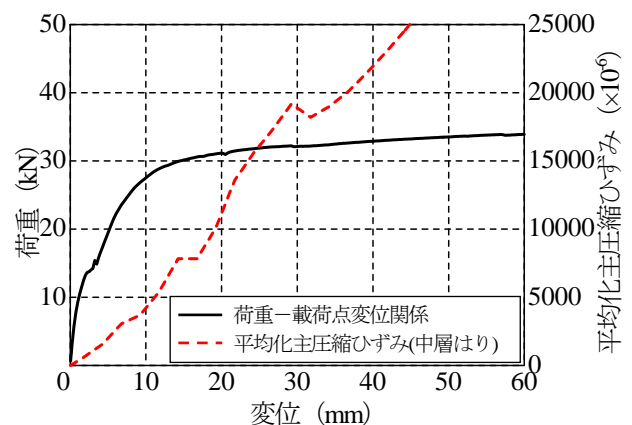


図-33 中層はりの平均化主圧縮ひずみの履歴

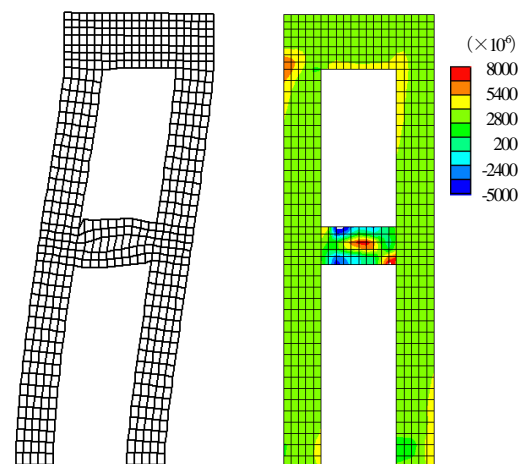


図-34 変位 20mm の時点における変形図および平均化主圧縮ひずみ分布 (圧縮を正)

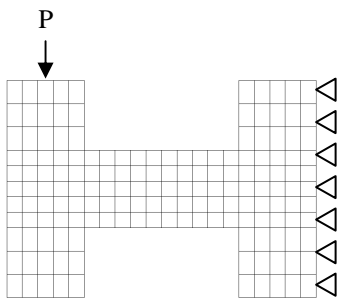


図-35 中層はりの単一部材としてのモデル化

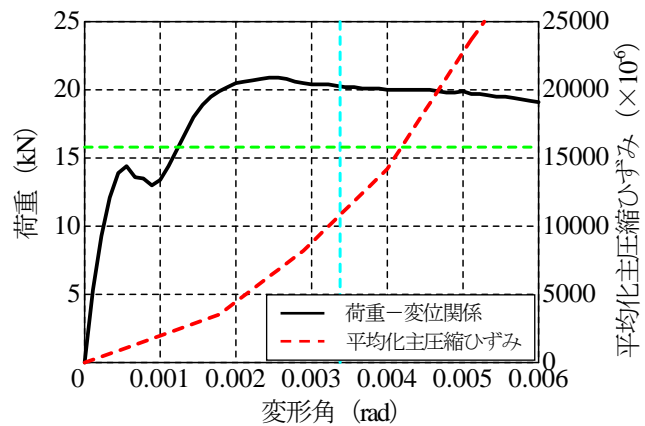
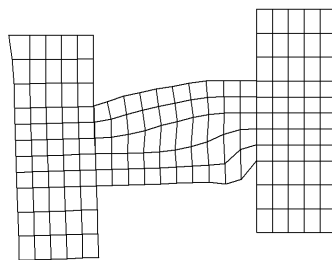
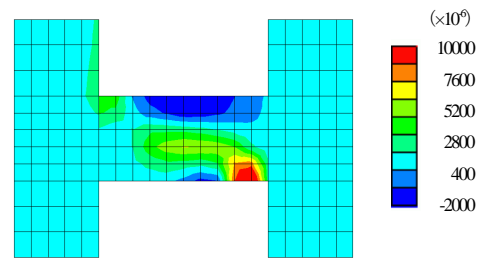


図-36 荷重および平均化主圧縮ひずみと変形角の関係



(a) 変形図



(b) 平均化主圧縮ひずみ分布 (圧縮を正)

図-37 最大荷重時における変形図および平均化主圧縮ひずみ分布

解析の対象は、中層はりがせん断圧縮破壊するように設計した仮定のRC 2層ラーメン橋脚である。図-32に解析対象の概要図および解析モデルを示す。奥行きは柱、上層はりともに150mmとして、中層はりについては、破壊が先行するように50mmとした。軸方向鉄筋比はいずれの部材も1.58%とし、かぶり厚は20mmとした。せん断補強筋は、柱ならびに上層はりに配置し、いずれもせん断補強筋比を1.1%とした。解析に用いたコンクリートの弾性係数、圧縮強度および引張強度は、それぞれ25GPa、30MPa、3MPaとし、鉄筋の弾性係数、降伏強度は、それぞれ200GPa、345MPaとした。

解析モデルにおいては、主鉄筋、せん断補強筋は全てRC要素でモデル化した。荷重は、上層はり断面高さ中央部を水平方向に載荷した。境界条件は、柱下端部を完全固定とした。なお、本章の対象は、必ずしも実際のRC 2層ラーメン橋脚をモデルとしたものではなく、あくまでも本研究の提案手法が不静定構造物に対しても適用可能かどうかを検討するために想定したものであることに注意が必要である。

(2) ひずみ評価指標による部材の破壊の評価

図-33に解析より得られた荷重-載荷点変位関係と中層はり内の最大平均化主圧縮ひずみと変位の関係を併せて示す。図において、荷重を黒の実線で、中層はりの最大平均化主圧縮ひずみを赤の破線で示している。

図より、荷重15kNの時点で剛性は若干低下するが、その後も荷重は上がり続け、荷重30kN付近において剛性が急激に低下し構造物として降伏する結果が得られた。中層はりにおける平均化主圧縮ひずみに着目すると、変位20mmにおいて10000 μ に達していることが分かる。前章までの議論から、この点においてコンクリートの圧縮破壊が生じていることが推察される。図-34に変位20mmの時点での変形図および平均化主圧縮ひずみ分布を示す。変形図から、変位20mmでは中層はりにおいてせん断変形が卓越した変形モードとなっており、平均化主圧縮ひずみ分布から、中層はりの柱との接合部近傍ならびに中央部においてひずみが卓越していることが確認できる。このことから、変位20mmにおいて中層はりせん断圧縮破壊を生じたことが示唆された。

(3) 単一部材を用いた検証解析

前節の検討より、提案した手法を用いることで、中層はりのせん断圧縮破壊が予測された。一方、提案した手法は単一部材に対して得られたものであり、不静定構造物内の部材に対して適用可能かどうかは、支持条件や断面力分布が単一部材とは異なるため、必ずしも明らかではない。そこで、中層はり内の最大主圧縮ひずみが10000 μ の時点でせん断圧縮破壊に至ったかどうかを確認するために、原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・マニュアル⁴⁾に従って、単一部材での解析を行

った。

図-35に示すように、中層はりを切り出し解析モデルとした。荷重条件としては、切り出し部には構造物全体の解析で得られたモーメントと軸力に相当する等価節点力を初期条件として与えるとともに、図-35に示す荷重 P を強制変位により作用させるものとした。なお、構造物全体の解析においては、等価節点力は解析ステップにより変動するため、本研究では平均化主圧縮ひずみが 10000μ となった時の当該部位における等価節点力を作用させることとした。

図-36に解析より得られた荷重-変形角関係と最大平均化主圧縮ひずみと変形角の関係を併せて示す。図において、荷重を黒の実線で、最大平均化主圧縮ひずみを赤の破線で示している。また、構造物全体で解析した場合に、中層はりに作用するせん断力の最大値を黄緑の破線で、その時点での部材の変形角を水色の破線で示す。図より、荷重 15kN 程度で荷重が低下し、その後 20kN を超えたあたりで最大荷重を迎え、その後緩やかに荷重が低下する挙動が得られた。最大荷重時の変形角はおよそ 0.0025 程度であった。平均化主圧縮ひずみに着目すると、荷重低下後直後の変形角 0.003 において 10000μ に達していることが確認できる。単一部材の解析と構造物全体の解析では、荷重条件が一致しないため、せん断力の最大値やその時の変形角は必ずしも一致することはないと考えられる。また、部材に作用するモーメント分布や軸力はせん断挙動に大きく影響を及ぼすことが知られている²⁾が、それらは初期条件として与えているため解析結果に影響していると考えられる。図-36より、単一部材の解析の結果は、最大荷重を若干大きく、最大荷重時の変形角を若干小さくしているものの、曲げモーメント分布や軸力の大きさの違いを考慮すると、構造全体の解析結果と概ね同程度であるといえる。したがって、単一部材による解析は不静定構造物内の中層はりの挙動を適切に評価できていると判断することができる。図-37に最大荷重時における変形図と平均化圧縮ひずみ分布図を示すが、せん断変形が卓越しており図-34と同様に接合部において平均化圧縮ひずみが卓越していることが分かる。このことから、単一部材として切り出したモデルはせん断圧縮破壊したと判断することができる。以上のように、単一部材のせん断圧縮破壊が確認されたことから、前節で示された構造物全体における中層はりの破壊は、せん断圧縮破壊であったといえる。

不静定構造物では一部の部材が破壊に至った後も構造物としては耐荷性能が低下することはないため、一般的には部材の損傷や破壊を適切評価することは困難である。本研究で提案した手法を用いることにより、限られた範囲内の検討ではあるものの、それらを適切に評価できることが示された。今後、本手法の適用性をより広範に検

討することで、RC構造物の損傷領域や損傷度の評価において非常に有用な手法となるものと考えられる。

7. 結論

本研究では、せん断圧縮破壊するRCはりの主ひずみ分布を測定し、実験的に損傷領域の評価を行うとともに、3次元有限要素解析により数値解析的な損傷度および損傷領域の評価・提案を試みた。せん断補強筋を有しないRCはりに対する検討の結果、以下の結論が得られた。

- (1) 格子間隔 25mm の格子状に加工したアクリル板を用いたアクリル格子法により、せん断圧縮破壊するRCはり内部の面的なひずみの計測を行った。その結果、最大主圧縮ひずみが 10000μ を超えることが、せん断圧縮破壊を評価する指標となり得ることを実験的に確認した。また、圧縮ひずみ分布からは、ひずみが 2000μ 以上の領域が圧縮による損傷領域に対応していることを確認した。
- (2) 非線形有限要素解析における損傷指標として、平均化主圧縮ひずみを用いることを提案した。本研究では、平均化主圧縮ひずみは、ひずみ状態により直径が $50\text{mm}\sim 250\text{mm}$ へと変化する楕円体領域を平均化領域として算定された平均化ひずみの主圧縮ひずみ成分とした。
- (3) 提案した手法を用いることで、実験同様にせん断圧縮破壊するRCはりの損傷度ならびに損傷領域を評価できる可能性を示した。すなわち、平均化主圧縮ひずみ 10000μ をせん断圧縮破壊するRCはりの破壊基準として規定できること、ならびにその時のひずみ分布から、平均化主圧縮ひずみが 2000μ 以上の領域を圧縮損傷領域、 3500μ 以上の領域を圧縮破壊領域として規定できることを示した。また、平均化圧縮ひずみを用いた損傷度ならびに損傷領域の評価は、要素寸法に依存しない結果を与えるため、損傷指標として妥当であることを示した。
- (4) 圧縮強度 (f_c)、せん断スパン比 (a/d)、主鉄筋比 (p)、支圧板幅有効高さ比 (r/d) が異なるRCはりを対象とした検討を行った。その結果、いずれの場合においても平均化主圧縮ひずみが 10000μ の時点は最大荷重時に対応していることから、提案した指標はせん断圧縮破壊するRCはりの破壊基準として一般性を有していることを示した。
- (5) 提案した手法を用いて、曲げ破壊するRCはりの損傷度ならびに損傷領域について検討を行った。その結果、せん断圧縮破壊するRCはりと同様に、平均化主圧縮ひずみ 10000μ を破壊基準として規定できること、ならび平均化主圧縮ひずみが 2000μ 、

3500 μ 以上の領域をそれぞれ圧縮損傷領域、圧縮破壊領域として規定できることを示した。

- (6) 仮想のRC 2層ラーメン橋脚を対象として提案した手法の不静定構造物への適用性について検討した。対象としたRC 2層ラーメン橋脚では、中層はりが破壊に至った後も構造物としては耐荷性能が低下することはないため、荷重-変位関係からは部材の破壊を評価することは困難であるが、提案した破壊基準を用いることにより、中層はりのせん断圧縮破壊を適切に評価できることを示した。

なお、本研究では単調増加する荷重に対しての検討のみを行っていることから、地震動により繰返し外力を受ける場合における本手法の適用性については、別途検討する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：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，2003.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書〔耐震性能照査編〕，2002.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007.
- 4) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル，2005.
- 5) 日本コンクリート工学協会：被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書，2007.
- 6) 上田尚史，権庸吉，中村光，高木康宏，国枝稔：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，構造工学論文集，Vol.52A，pp.925-934，2006.
- 7) 河合真樹，上田尚史，中村光，国枝稔：曲げ損傷したRCはりの断面修復後の力学挙動解析に関する基礎的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.7，pp.121-128，2007.
- 8) 佐野理沙，中村光，国枝稔，上田尚史：有限要素解析によるせん断圧縮破壊するRCはりのひずみ破壊基準の検討，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.63，No.5，pp.1085-1086，2008.
- 9) 斉藤成彦，牧剛史，土屋智史，渡邊忠朋：非線形有限要素解析によるRCはり部材の損傷評価，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，Vol.67，No.2，pp.166-180，2011.
- 10) 諏訪俊輔，権庸吉，中村光，田辺忠顕：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.27，No.2，pp.73-78，2004.
- 11) 権庸吉，上田尚史，中村光，国枝稔：積分型非局所構成則の2次元RC部材への適用に関する基礎的研究，応用力学論文集，Vol.8，pp.413-422，2005.
- 12) Nakamura, H. and Higai, T.: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, *Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Load*, ASCE, pp.259-272, 2001.
- 13) Lertsrisakulrat, T., Watanabe, K., Matsuo, M. and Niwa, J.: Experimental study on Parameters in Localization of Concrete Subjected to Compression, *Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements*, JSCE, No.669/V-50, pp.309-321, 2001.
- 14) 幸左賢二，脇山知美，西岡勉，小林寛：せん断スパン比に着目したディープビームの破壊形態に関する実験的検討，土木学会論文集 E，Vol.62，No.4，pp.798-814，2006.
- 15) 田所敏弥，谷村幸裕，服部尚道，北沢宏和：逆対称曲げ荷重を受ける円形RC部材のせん断耐力におよぼす帯鉄筋の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.787-792，2006.
- 16) 渡辺健，田所敏弥，谷村幸裕，黒川浩嗣：逆対称曲げが作用したディープビームの破壊性状に関するせん断スパン比の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.691-696，2007.
- 17) 松井義雄，権庸吉，上田尚史，中村光：せん断圧縮破壊するはりの局所ひずみ分布と積分型非局所構成則の適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.775-780，2006.
- 18) 渡辺健，阪本陽一，二羽淳一郎：画像解析によるRCディープビームの局所的圧縮破壊領域の同定，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.805-810，2008.
- 19) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986.
- 20) 二羽淳一郎：FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，pp.119-126，1983.
- 21) 田辺忠顕編著：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.
- 22) Saenz, L. P. : Discussion of "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete" by Desayi and Krishnan, *ACIJ Proceedings*, Vol.61, No.9, pp.1229-1235, 1964.
- 23) 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.
- 24) 澤部純浩，上田尚史，中村光，国枝稔：せん断補強筋に定着不良が生じたRCはりのせん断破壊挙動解析，土木学会論文集 E，Vol.62，No.2，pp.444-461，2006.
- 25) 菅満宣，中村光，檜貝勇，斉藤成彦：RCはりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.295-300，2001.
- 26) 山谷敦，中村光，檜貝勇：回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.187-199，1999.
- 27) 例えば，山谷敦，檜貝勇，中村光：軸方向圧縮力を受けるRC梁のせん断挙動に関する実験的研究，土木学会論文集，No.697/V-54，pp.143-160，2002.

(2012.12.26 受付)

STUDY ON EVALUATION METHOD OF DAMAGE REGION AND FAILURE
CRITERION OF RC MEMBER FAILED IN SHEAR COMPRESSION BY MEANS
OF STRAIN INDEX

Naoshi UEDA, Kongkeo PHAMAVANH, Risa SANO, Hikaru NAKAMURA
and Minoru KUNIEDA

In this study, damaged areas of RC beams failed in shear compression were experimentally evaluated by means of acrylic lattice method which can measure planar strain distribution. Three-dimensional nonlinear finite element analysis was also conducted in order to verify the damage evaluation method and failure criteria of RC members failed in shear compression. As the result, damage region were evaluated by the averaged strain without mesh dependency and failure criterion for shear compression failure was proposed. It was confirmed that the proposed method was also applicable to RC beams, which has various dimension and specification, failed in both shear and flexural by the analyses. Moreover, it was shown that the proposed criterion was useful to evaluate the damage of a member in statically indeterminate structures.