# 論文 鉄筋コンクリート柱の残留曲げひび割れ幅の評価

王 建男\*1・岸本 一蔵\*2・大野 義照\*3

要旨:曲げ変形が卓越する鉄筋コンクリート部材の地震時に発生する曲げひび割れ,および残 留ひび割れ幅の評価法の確立を目的として,鉄筋コンクリート柱試験体に対する曲げせん断載 荷実験を行った。高性能デジタルカメラによるヒンジ部に発生するひび割れ幅の計測結果と, ひび割れ幅に直接関係する主筋ひずみの詳細な測定結果に基づき,ひび割れ発生位置の推定, ピーク時および残留変形時のひび割れ幅推定の可能性について検討を行った。 キーワード: RC 柱,ひび割れ発生位置,曲げひび割れ,残留ひび割れ,デジタルカメラ

#### 1. 研究背景および目的

建築物の耐震設計法では,被災後の使用性や経 済的視点からの補修の是非について,その判断を, 被害程度の分類をより細かく規定することにより 容易にしようとする試みが行われてきている。よ り詳細に被害程度を分類するためには,部材レベ ルにおける損傷度を明らかにする必要があり,コ ンクリート部材では「ひび割れ幅」を指標として 用いることが有力である。曲げ変形が卓越するコ ンクリート部材では,ひび割れ幅は部材変形と密 接な関係を持つことは明らかであるが,その推定 法は確立されていない。筆者等は,既往の文献 1 において,図-1に示すフローによりピーク時(部 材変形が最大となる時点)のひび割れ幅算定を行 うことを提案し,柱試験体の加力実験結果から以 下の結論を得た。

1)ピーク時における部材回転角に占める,ひび 割れによって発生する回転角の割合はおよそ 60 ~85%であり、高軸力の試験体ではその割合は小 さくなる。

2) 1 つの試験体に発生するひび割れのうち,部 材変形に大きく関与するひび割れは,2 ないし3 本である。また,低軸力のひび割れではスタブ部 ー柱部境界位置のひび割れの比率が大きく,軸力 が高い場合にはその比率は小さくなる。

上記の結果は、図-1の(1)と(2)につい ての情報を与えているものの、(3)の流れであ る「各ひび割れが発生する回転角の大きさ」か ら「各ひび割れ幅大きさ」を求めるためには、 図-2に示すhの値、すなわちひび割れ発生箇所 の材軸方向位置を予測し、同図に示す幾何学的 な関係を利用する必要があるが、ひび割れ位置 の予測法は未だ未解決である。そこで本論文で は、柱試験体の加力実験を行い、主筋のひずみ を詳細に観測することにより、ひび割れ発生位 置を予測する手法を探ると共に、主筋ひずみの



*1	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻			(正会員)	
*2	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻	准教授	博士(工学)	(正会員)	
*3	大阪大学大学院	工学研究科地球総合工学専攻	教授	工博	(正会員)	

部材軸方向の分布から残留ひび割れ幅を求める 手法について検討を試みたものである。

### 2. 実験概要

対象とした試験体は,1辺30cmの正方形断面を 有する部材長120cm(シアスパン比2.0)の3体の 柱部材である(図-3,表-1)。各試験体は全て同一 のものであり,載荷時の作用軸力のみが異なる。 また,いずれの試験体もせん断耐力<sup>2)</sup>が曲げ耐力 <sup>3)</sup>よりも大きくなるように設計されており曲げ変 形が卓越する部材である。

使用した鉄筋およびコンクリートの材料強度 を表-2 に示す。載荷時の軸力比は表-1 に示すとお りであり,載荷は建研式加力方式により行った(図 -4)。載荷履歴は,部材角 R=1/800, 1/400, 1/200,

1/100, 1/66, 1/50, 1/40, 1/30 のそれぞれ 1 回ず つの正負交番とした。部材変形はスタブに設置し

たひずみ変換式ダイヤルゲー ジにより,主筋および横補強筋 のひずみは,図-3 に示す位置 に箔ひずみゲージを貼付する ことにより行った。また,ヒン ジ部の挙動を追跡するために, 加力方向と垂直方向の部材面 上に固定設置したデジタルカ メラ(4,500×3,000 ピクセル) による撮影を行った(図-5,写 真-1)。撮影範囲は図-5 に示す とおりであり,撮影時の解像度 は ヒ ン ジ 部 撮 影 で 約 0.075mm/dot (水平方向撮影長さ 340mm÷ 4500dots)である。使用レンズの歪曲収差による 画像中央部と端部の誤差はおよそ 5%であるが, 結果に対する補正は行っていない。なお,以下の 検討でのひび割れ幅は,画像から直接ひび割れ部 分のピクセル数を読みとり,これに先の1dot辺り の長さを積することにより算出している。

#### 3. 荷重 - 変形関係

図-6 に各試験体の部材変形角(R)1/50 以下での 荷重-変形角関係を示す。いずれの試験体も曲げ 変形が卓越するエネルギー吸収に優れた履歴とな っている。また,載荷を行った最大変形時(部材 変形角 1/30 時)においてもせん断補強筋は降伏し ていない(計測最大値は No.2 で 1200 µ)。よって 本試験体では部材変形の主要因は曲げひび割れに よるものであり,曲げひび割れ幅と部材変形角と





の関係を検討することに問題はないと考える。

## 4. ひび割れ発生位置

本節では,軸力の大きさがひび割れ発生位置, およびひび割れ発生時点におよぼす影響について 考察する。

図-7は,載荷時に部材変形角がはじめて1/100, 1/66に達したときの各試験体のひび割れ図である。 同図によれば、スタブ部と柱部の境界位置には、 いずれの試験体においてもひび割れが発生してお り、更に軸力比が最も高い No.3 では1本,軸力が 作用しない No.1, 軸力の小さい No.2 では 2 本の ひび割れが発生している。図-8には、試験体両端 の4カ所(正負交番載荷の柱の両端)に発生した ひび割れ位置をまとめて示す。少数の例外はある が次のような特徴がみられる。1) 軸力が作用しな い No.1, 軸力の小さい No.2 では, 2 本目(境界位 置ひび割れを1本目として、これに最も近いひび 割れを2本目とする)のひび割れはスタブから 80mmの付近,3本目は200mm付近に発生して いる。2) これに対し軸力比が最も高い No.3 試験 体では、2本目のひび割れの位置は前述の2体に 比べ大きな値(150mm付近)となっている。

上記の原因を主筋のひずみ分布から検討する。 図-9 は図-7 で示した各ひび割れの発生時,および その前後の主筋のひずみ分布である。また各ひび 割れ発生時をグラフ化したものを図-10 に示す。 これらの図より次のようなことが分かる。

1) No.1 について(軸力比=0)

図-9より、載荷直後のステップ(同時点でのひ ずみ分布はA[K2])から柱側、スタブ側共に引張ひ ずみが現れており、その値は部材変形にほぼ比例 して大きくなっている。スタブ部のコンクリート は材軸方向にひずまないと仮定すると、スタブ部 内主筋のひずみは、ほぼ全てがスタブからの主筋 の抜け出しとして現れるはずであり、そのためス タブ部と柱部の境界位置では極めて早い段階での ひび割れ発生が予測される。図-10によれば、No.1 の境界位置でのひび割れ発生時は、部材変形量が 25~50×10<sup>-6</sup>mm(部材角=1/2400~1/2000)時と、







載荷の最初(A[K2])~第2ステップ(A[K3])の間で あり、同時点での主筋ひずみは図-9より、およそ 100 µ~250 µ (0.001~0.0025%) 程度である。コ ンクリートのひび割れ発生ひずみは(本試験体の 強度程度のものでは)250~300 µ 程度であるから, スタブ部と柱部の境界位置では(曲げモーメント によって発生する)引張力に加えて"スタブから の抜け出しがひび割れ発生を誘因している"と思 われる。また、2本目のひび割れは部材変形量が 50~75mm×10<sup>-6</sup> (R=1/1200~1/800) の時点で発生 しているが、同時点での主筋ひずみはスタブ位置 から200mmの範囲において既に250 µを超えてお り,主筋-コンクリート間の付着が良好な程,2 本目のひび割れはスタブに近い位置に発生すると 考えられ、実際には約80mmの位置付近に発生し ている。なお、主筋のひずみ分布(図-9)が、部 材に作用するモーメント分布(部材中央のモーメ ント反曲点からスタブ位置まで直線的に増加する 分布)と異なる原因については現在検討中である。 2) No.3 について(軸力比=0.3)

No.3 試験体では、部材変形が小さい時点では主 筋のほとんどの部分が圧縮状態にある(図-9中の C[K1], C[K2])。材軸方向のひずみ分布は試験体 に作用するモーメント分布と同じく、部材反曲点 からスタブ位置までほぼ直線的に増加している。 スタブ部-柱部の境界位置,および2本目のひび 割れは、部材変形量が100×10<sup>-6</sup>mm(R=1/600)付 近で発生しているが、同時点での主筋ひずみ分布 をみると、スタブ近傍では約300μ、そこから柱 中央に向けて直線的に低下し、スタブから250mm の位置でほぼ0となっている。従って, No.1 試験 体のように,主筋のひずみ分布がスタブ位置~ 200mm までほぼ同じ値で分布するとものと比較 すると,スタブからの距離が同じ位置でのコンク リートに作用する引張ひずみは小さく、その結果 2本目のひび割れは、No.1の場合に比べよりスタ ブから遠い位置に発生することが予測される。実 験結果(図-8参照)ではおよそ 150mm の位置に 発生しており, No.1 の 80mm より大きく, 上記の 予測と一致する。

## 3) No.2 (軸力比=0.15)



かであり、またスタブ内の主筋も早期に引張ひず みを受けるようになることから、2本目のひび割 れ発生位置は No.3 よりもよりスタブ側に近いこ とが予測される。実験結果(図-8)では約 90mm の位置に発生しており、この予測と一致する。

### 5. 主筋ひずみとひび割れ幅

## 5.1 ピーク時,残留変形時のひび割れ幅実験値

図-11 に各試験体のピーク時および残留変形時 のひび割れ幅を示す。同図より以下のことが分か る。 いずれの試験体においても基本的には、ピーク
 時ひび割れ幅、残留ひび割れ幅ともに、部材回転
 角とほぼ線形関係を有している。

2) No.3 のひび割れ幅は、より軸力の低い No.1,2 に比べてピーク時、残留変形時ともに小さい。
3) 軸力の作用しない No.1、軸力比=0.15 の No.2 では、スタブ部ー柱部の境界位置に発生するひび 割れが最も大きい。これは、スタブ内の主筋が、 軸力の高い場合に比べて早期に引張ひずみを受け、これがスタブからの抜け出し、スタブ部ー柱部の 境界位置でのひび割れとなって現れるためである。
4) 軸力比が最も高い No.3 では、境界位置のひび 割れと2本目のひび割れの差は小さく、部材変形 が 1/66を超える領域では2本目のひび割れ幅が境 界位置でのひび割れより大きくなっている。この 傾向は筆者等の既往の文献1の結果と一致する。

# 5.2 主筋ひずみからのひび割れ幅算定

コンクリートの引張力による伸び量は、鉄筋の 伸びに比べて無視できるほど小さい。従って、弾 性領域でひび割れ幅の総和は、主筋ひずみの累積 値と一致すると考えられる(主筋はスタブ底面付 近で 10cm 以上の定着長をもつ L 字型で定着され ていることから付着切れによる抜け出しは発生し ない)。そこで、図-12 に示すように、主筋のひず みを試験体材軸方向に積分することにより、各ひ び割れ幅を算定することにした。算定のルールは 以下の通りである。

1) スタブ内の主筋ひずみは,全てスタブ部と柱部 の境界位置のひび割れ拡大に寄与するとし,その 分布形状を三角形に近似する(図-12参照)。その 場合,近似した三角形と主筋ひずみ分布により得 られる面積が等しくなるように設定する。

2) スタブ部ー柱部の境界位置のひび割れと 2 本 目のひび割れの間の主筋ひずみを一定とみなし, その値を実験の主筋ひずみ分布により得られる面 積と同じになるように設定する。この部分のひび 割れ幅への寄与率は,スタブ部ー柱部の境界位置 のひび割れへ8割,2本目のひび割れへ2割とす る。なお,この割合はデータ整理を行い経験的に 設定した値であり,今後の検討課題である。



図−12 主筋ひずみからひび割れ幅を計算する方法

3) 2 本目のひび割れから反曲点(スタブから 600mmの位置)までのひずみ分布を三角形に近似 する。この場合,1),2)のケースと同様,実験の主 筋ひずみ分布により得られる面積と等しくなるよ うに設定する。三角形に近似したひずみ分布にお いて,3 本目のひび割れより反曲点側にある部分 は全て3本目のひび割れ,それ以外は2本目のひ び割れ幅に寄与すると仮定する。

4)残留変形時のひび割れ幅は、ピーク時の主筋ひ ずみから、残留変形時(作用水平荷重=0)のひず みを引くことによりひび割れ幅の縮小量を求め、 これをピーク時ひび割れ(算定値)から引くこと により求める。残留変形時の主筋ひずみ分布につ いても前述の1)~3)での近似方法による。ただし、 鉄筋ひずみが圧縮の場合はこれを0とする。

# 5.3 主筋ひずみ分布より求めたひび割れ幅と実験 値との比較

1)の手法により求めた各部材角ピーク時および残 留変形時のひび割れ幅と、実験データから得られ たひび割れ幅を比較したものが図-13 である。図 -13 よりいずれの試験体においても、変形角が 1/200 以下の主筋がほぼ弾性内の変形領域(No.1 R=1/200 を除く)では、ピーク時ひび割れ、残留 ひび割れともに計算値と実験値は比較的よく一致 していることがわかる。これに対し R=1/100 以上 の変形領域では、ピーク時ひび割れ、残留ひび割 れともに実験値が計算値を大きく上回るケースが



多い。これは、No.3 の R=1/100 時の実際のひずみ を例とする図-14 に示すように、ひび割れ進展が 局部的な主筋の塑性ひずみ増大により発生してい るためである。また残留変形時にも、同図に示す ようにこれらのひずみは残留し、ひび割れ幅とし て残ると考えられる。そこで、図-13 の R=1/100,1/66 の場合において、"ピーク時の実験値 と計算値の差"、即ち前述の"局部的な主筋の塑性 ひずみ増大に伴い発生するひび割れ幅"を"計算 値の残留ひび割れ幅"に加えた場合のグラフを図 -15 に示す。計算される残留ひび割れ幅は実験値



 作用軸力が異なる場合のひび割れ発生位置,ひ び割れ幅の進展程度の違いは、スタブ部のひずみ の状態に関連しており、これを適切に考慮するこ とにより、ひび割れ発生位置および、ピーク時の ひび割れ幅の算定が可能になると思われる。

2) 変形の小さい領域では主筋のひずみの累積値 とひび割れ幅はよく一致する。変形が大きい領域 では、主筋の局所的なひずみ増大がひび割れを進 展させるため、それを考慮した上で求めた残留ひ び割れ幅は実験値とよく一致する。

#### [謝辞]

本研究はその一部を平成18年度 (財) 鴻池奨 学財団研究助成(課題名:地震時に発生するコン クリート部材の残留ひび割れ幅の推定,申請者: 岸本一蔵)を受けて行いました。ここに感謝の意 を表します。また本学4年生(現(株)竹中工務 店)片桐卓也氏に協力を得ました。ここに謝意を 表します。

#### [参考文献]

- 王 建男・岸本 一蔵・任 旭・大野 義照:曲げせん断加力を受ける鉄筋コンクリート柱のヒンジ領域に発生するひび割れ幅,コンクリート工学年次 論文報告集 28巻,2号,pp.163-168、2006.7
- 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保 証型耐震設計指針(案)・同解説,1997.7
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・ 同解説,1999.1