# 論文 曲げ破壊する RC はり部材の復旧性能評価に関する実験的研究

伊藤 睦\*1・水野 英二\*2・小林 孝一\*1

要旨:本研究では、RC 部材の損傷指標の検討と補修後の性能を評価するための基礎的なデータを取得することを目的に、曲げ破壊するRC はりの載荷実験を行った。損傷指標に残留ひび割れ幅を用いた結果、残留ひび割れ幅と最大変位の間には相関性が確認された。ひび割れ注入や圧壊したかぶりコンクリート部の断面修復を施した補修試験体の載荷実験からは、初期載荷時に引張鉄筋に生じる残留ひずみ・応力が補修試験体の耐荷性能に影響を及ぼすこと、補修方法によっては破壊領域が広がることが確認され、補修RC はり部材の性能評価が可能な解析モデルの構築にあたっては、これらの要因を適切に考慮する必要がある。

キーワード: RC はり、損傷指標、残留ひび割れ幅、残留ひずみ・応力、補修後の性能

#### 1. はじめに

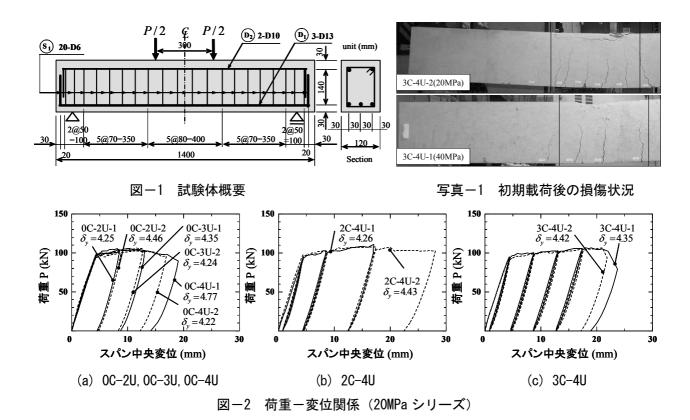
近年の世界的な設計体系は性能照査型の設計体 系に移行されつつあり、コンクリート標準示方書 にもこの概念が取り入れられようとしている。こ の性能照査型設計の基本性能には、使用性、安全 性に加えて、新たに復旧性<sup>1)</sup>が加えられている。 このため,復旧性に対する適切な限界状態の設定, 地震により構造物が被る損傷度を適切に評価する 手法、被災構造物の残存性能の評価手法、および 補修・補強後の構造物の性能評価手法の確立が必 要とされる。特に、損傷度の評価手法と補修・補 強後の構造物の性能評価手法が確立されれば、新 設構造物に限らず, 既設構造物であっても, 適切 に復旧させることで、構造物を長寿命化させるこ とが可能となる。しかしながら現状では、損傷度 を決定する指標ですら定かでなく、被災構造物の 補修・補強後の性能評価に関する研究は、大きな 損傷を受けた部材、構造を補修した場合が多く、 系統的な検討がなされていない。

部材レベルの損傷度の指標としては、被災後の 構造物の観察から取得可能な残留変形や、残留ひ び割れ幅等がその指標として有用と考えられるが、 これらの情報から、地震時に構造物が受けた載荷 履歴を知ることは難しい。この点については、現 在の数値解析技術を使用すれば、おおよそ妥当な精度で評価可能と考えられるが、全ての構造物、部材に対して数値解析を実施することは困難であり、被災後の構造物の観察により取得可能なデータから、その構造物の損傷度の評価が可能な手法の確立が望まれる。これにより、被災構造物の残余性能を適切に評価し、適切な補修・補強を施すことが可能となる。さらには、補修・補強後の部材等の性能の評価が可能な解析技術の構築が望まれる。

そこで本研究では、鉄筋コンクリート(RC)部材の損傷度評価と、被災した部材の補修後の性能が評価可能な解析モデル構築に必要な基礎的なデータを取得することを目的に、曲げ破壊する RC はり部材の載荷実験を行った。損傷度の評価では、載荷履歴を変化させた載荷実験を行うことにより、部材が吸収したエネルギー吸収量や最大応答変位が、残留ひび割れ幅に及ぼす影響について検討を行った。加えて、上記載荷試験後の RC はり部材に対して、エポキシ樹脂によるひび割れ注入や断面修復材を用いた断面修復を行い、補修後の RC はり部材の性能を実験的に評価した。補修後の載荷実験には、補修効果を確認することに加えて、補修後の部材の性能を評価する解析モデルの構築

<sup>\*1</sup> 中部大学 工学部都市建設工学科講師 博士(工学) (正会員)

<sup>\*2</sup> 中部大学 工学部都市建設工学科教授 Ph.D. (正会員)



に必要な基礎的なデータを取得することも目的と している。

#### 2. 損傷指標の検討

本研究では、残留ひび割れ幅を損傷指標として検討を行った。そこで、コンクリートの圧縮強度が残留ひび割れ幅に及ぼす影響を評価するために、2 種類のコンクリート強度 (20MPa シリーズ、40MPa シリーズ)を設定し、繰返し載荷履歴の違いが残留ひび割れ幅に及ぼす影響を評価するためにPush overを含む計7種類の載荷履歴を採用した。

# 2.1 試験体概要

図-1 に試験体概要を示す。引張鉄筋には D13 (降伏強度 403.7MPa)を3本,圧縮鉄筋には D10 (降伏強度 353.1MPa)を2本,スターラップには D6 (降伏強度 290.2MPa)を使用した。断面の決定にあたっては、せん断ひび割れの発生は許容するも、曲げ破壊するように十分なせん断補強がなされており、載荷実験後の補修作業をひび割れ注入と断面修復に留めるために、平面保持を仮定した終局曲げモーメントの算定時には、圧縮鉄筋が降伏しないように設計している。

コンクリート圧縮強度は、目標強度を 20MPa, 40MPa としたが、テストピースの圧縮試験結果からは、表-1 に示す圧縮強度の結果となった。

## 2.2 載荷履歴およびひび割れ幅計測

載荷履歴の違いが残留ひび割れ幅に及ぼす影響を探るために、本実験では表-1 に示すような 6 種類の載荷履歴に対してそれぞれ 2 体の単調、もしくは片側繰り返し載荷実験を行った。載荷履歴は、 $\mathbf{Z}-\mathbf{Z}$  に示す  $\mathbf{Z}$  20MPa シリーズの荷重 $\mathbf{Z}$  ついて、例えば、 $\mathbf{Z}$  0C-2Uは繰返し載荷を行わず、 $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$  で除荷することを意味し、 $\mathbf{Z}$  3C-4Uは $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$  で除荷することを意味し、 $\mathbf{Z}$  3C-4Uは $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$   $\mathbf{Z}$  で除荷することを意味する。なお、数体の試験体については、 $\mathbf{Z}$   $\mathbf{$ 

残留ひび割れ幅の計測は、精度上の問題を回避するために、デジタル画像処理を用いて行った。 ひび割れを含む片側面引張縁の約30mm×25mmの 領域を3056×2296 画素で撮影し、画像処理には、 専用システムを使用することで、約1/100mm 精度

表-1 実験結果

		単位	0C-2U		0C-3U		0C-4U		1C-4U		2C-4U		3C-4U	
			-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2	-1	-2
20MPa シリーズ	コンクリート強度	MPa	27.7	34.1	27.7	34.1	27.7	27.7	27.7	27.7	34.1	34.1	34.1	34.1
	降伏変位 δy	mm	4.25	4.46	4.35	4.24	4.77	4.22	4.69	4.35	4.26	4.43	4.35	4.42
	降伏荷重 P <sub>y</sub>	kN	97.30	94.25	98.49	97.00	97.76	93.57	98.32	96.70	91.26	97.30	94.91	92.47
	エネルギー Ey	kN•mm	211.96	224.90	229.37	223.29	255.10	208.15	240.74	223.29	196.44	234.18	221.48	225.45
40MPa シリーズ	コンクリート強度	MPa	47.0	40.0	47.0	40.0	47.0	47.0	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4	47.4
	降伏変位 δy	mm	4.07	4.22	4.14	4.11	4.10	4.10	4.10	4.01	4.06	4.42	4.11	4.20
	降伏荷重 P <sub>y</sub>	kN	98.57	99.13	98.68	96.33	97.80	98.27	96.22	94.12	93.22	95.88	97.08	98.66
	エネルギー Ey	kN•mm	215.19	223.50	219.12	214.23	214.59	213.82	212.35	203.96	212.18	230.43	214.20	223.54

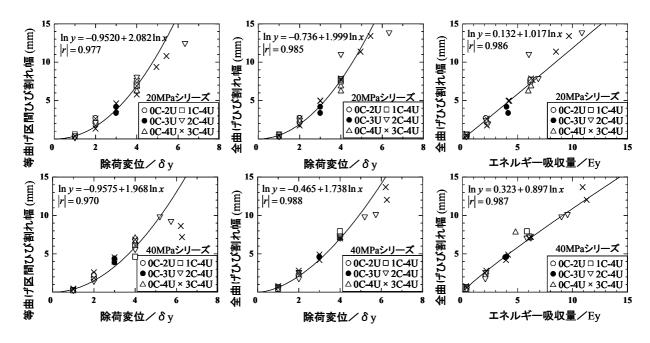


図-3 積算残留ひび割れ幅と除荷変位およびエネルギー吸収量の関係

でひび割れ幅を評価している。微細なひび割れについては、中村らの報告<sup>2)</sup>を参考に、2 値化のしきい値を 120 とした。

## 2.3 実験結果および考察

載荷実験の結果,図-2 に示すような荷重-変位関係が得られた。写真-1 には,初期載荷除荷後の損傷状況を示す。20MPa シリーズの内,コンクリート強度が27.7MPa のものについては, $3\delta_y$ 付近からかぶりコンクリートの圧壊により,耐力の低下を示しているものの,それ以上のコンクリート強度の試験体の場合には, $4\delta_y$ 時にかぶりコンクリートの顕著な圧壊は確認されていない。なお,本試験体は,初期載荷の後に補修を施すことから,圧縮鉄筋のはらみ出しを防ぐために,多少多めの鉄筋を配置している。このため,全ての試験体において,コンクリートの圧壊はかぶり部分に留まっている。載荷実験により得られた実験結

果を**表**-1 に示す。表中のエネルギー $E_v$ は、降伏 変位までに RC はり部材が吸収したひずみエネル ギーである。表-1 と計測した残留ひび割れ幅を もとに、載荷履歴の違いにより部材が吸収したエ ネルギー量が残留ひび割れ幅に及ぼす影響と,最 大応答変位が残留ひび割れ幅に及ぼす影響を評価 するために、エネルギー吸収量と残留ひび割れ幅 の関係,除荷変位と残留ひび割れ幅の関係を図-3 に示す。残留ひび割れ幅は、等曲げ区間に発生し た積算残留ひび割れ幅と全スパン内に発生した積 算残留曲げひび割れ幅に分けて示している。等曲 げ区間に発生したひび割れ幅は、塑性ヒンジ領域 に発生したひび割れをイメージしたものである。 なお、エネルギー吸収量と除荷変位は、それぞれ 各試験体の降伏点までに吸収されたひずみエネル ギー $E_{v}$ , 降伏変位 $\delta_{v}$ で無次元化しており、図に は、べき関数を用いた近似曲線を併せて示してい る。これは、2 次関数を使用した場合、上に凸の 近似曲線が得られたためである。

図-3 より、除荷変位と残留ひび割れ幅の間に は相関性がみられる。図からは、コンクリート強 度の高い方が,等曲げ区間残留ひび割れ幅が小さ いことが分かる。また、等曲げ区間内の残留ひび 割れ幅と全スパン内の残留ひび割れ幅を比較する と,全スパン内の残留ひびわれ幅を考慮した方が, 除荷時変位との相関性が高く, 損傷指標となりう る残留ひび割れ幅は、特に変形が大きい場合には、 局所的に発生したひび割れ幅では不十分であり, 部材内全ての残留ひび割れ幅を損傷指標とした方 が良いと考えられる。また、図-3より、本実験 のような片側の繰返し載荷は、残留ひび割れ幅に あまり影響を及ぼさないが、変形が増加すると残 留ひび割れ幅は加速度的に増加する傾向が見られ る。これは、主鉄筋の降伏による剛性の低下や、 主鉄筋とコンクリート間の付着力の低下が影響を 及ぼしているものと考えられる。

以上の結果からは、本実験のように漸増的に載 荷点の変位が増加するのであれば、残留ひび割れ 幅は損傷指標として使用することが可能と考えら れる。しかしながら、実際の地震時のように一度 大きく変形した後に残留変位が小さくなった場合 に、残留ひび割れ幅のみから地震時の最大応答変 位を推定できるか否かは定かではない。 加えて, 部材に正負交番の繰返し荷重が作用し、複数のひ び割れが導入されること、既設構造物のコンクリ ート状態, 構造物の寸法等が残留ひび割れ幅に及 ぼす影響等を鑑みれば、残留ひび割れ幅を損傷指 標として適切な限界値を設定することは非常に困 難と考えられる。しかしながら、後述する補修後 の載荷実験結果と併せて評価すれば、損傷レベル 23)程度までの範囲であれば、残留ひび割れ幅は損 傷指標と成りうるものと考えられる。また、損傷 レベル 33の評価には、かぶりコンクリートの圧壊 が損傷指標として有用と考えられる。

### 3. 補修後の性能の評価

補修後の部材には、荷重作用を受けていない健

全な部材と比較して、補修作業が施されていることと共に、初期載荷により残留変形が存在し、材料レベルでは、残留ひずみ、残留応力が初期ひずみ・応力として存在している。本研究では、特に残留ひずみ、残留応力が補修後の部材の挙動に及ぼす影響を探ることを目的に、これまで載荷した試験体に補修を施し、再度載荷実験を行うことで、補修後のRC はり部材の耐荷性能、破壊状況等の挙動の観察を行った。これは、補修後の部材の挙動が評価可能な解析モデル構築に必要な基礎的なデータ取得するためでもある。

# 3.1 補修作業

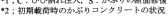
補修作業では、ひび割れ注入を行うと共に、かぶりコンクリートの圧壊が認められる場合には断面修復を行った。ひび割れ注入作業は、初期載荷した試験体を一度載荷装置から取り外し、載荷時とは上下反対に試験体を設置した上で行った。なお、ひび割れ注入作業には、シール材を用いてシール作業を施した後に、エポキシ樹脂を低圧注入した。ひび割れ注入は目視可能な曲げひび割れ全てについて行い、せん断ひび割れについては、写真一1からも分かるように、除荷後の残留ひび割れ幅が非常に僅かなため行っていない。注入用エポキシ樹脂の試験では、圧縮降伏強さ74.2MPa、圧縮弾性率2090MPa、引張せん断接着強さ18.7MPaの結果が得られている。

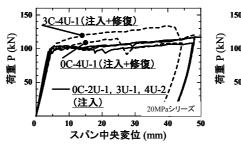
かぶりコンクリートに圧壊が認められる場合には、等曲げ区間内の粉砕したコンクリートがらをハンマー等を使用して取り除いた後、型枠を設置して断面修復を行った。なお、かぶり部分は3cmと薄いことから、修復材にはエポキシ樹脂系接着剤を使用した。断面修復材の試験では、圧縮降伏強さ82.3MPa、圧縮弾性率5720MPa、引張強さ34.1MPa、引張せん断接着強さ15.3MPaが得られており、圧縮強度は既存のコンクリートの圧縮強度を大きく上回る。

補修試験体の載荷実験は、ひび割れ注入、断面 修復した材齢 1 ヶ月程度で初期載荷時と同様に行 い、ひび割れを観察するためにシール材等はディ スクサンダーを用いて除去している。

表-2 補修試験体概要

試験体No.	強度	補修 作業*1	コンクリート 状況*2	初期剛性 回復率 (%)		
0C-2U-1		C	損傷無	77		
0C-3U-1	20	C	損傷無	73		
0C-4U-2		C	軽微圧壊	56		
0C-4U-1		C+S	圧壊	100		
3C-4U-1		C+S	圧壊	58		
0C-2U-1	40	C	損傷無	67		
0C-3U-1		C	損傷無	66		
0C-4U-1		C	損傷無	130		
2C-4U-2		C+S	圧壊	59		





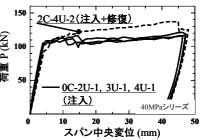
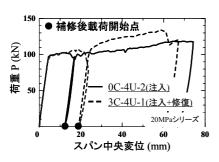
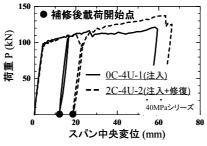


図-4 補修試験体の荷重-変位関係





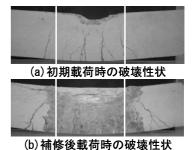


図-5 初期載荷+補修後載荷の荷重-変位関係

写真-2 破壊性状の比較

#### 3.2 補修後の実験結果

補修後の載荷実験は、表-2 に示す試験体について行った。表には、補修内容と初期載荷時の等曲げ区間内の圧縮かぶりコンクリートの状況を併せて示している。

補修することの目的は、過去に損傷を受けても 使用し続けることにある。このため、初期状態と 比較して補修後の部材の性能がどの程度回復され るかが、補修作業内容の決定についても重要とな る。そこで、初期載荷終了時の試験体には残留変 位が認められるが、補修試験体の初期変位として は扱わず、図-4 に補修試験体の荷重-変位関係 を示した。なお, ひび割れ注入作業のみの試験体 の荷重-変位関係には差が認められないことから, 図では区別していない。図-4 に示すように比較 した場合, 初期載荷時の載荷履歴は補修後の挙動 に影響を及ぼしていないが、ひび割れ注入と断面 修復を行った場合に、耐力が増加していることが 確認できる。また、補修試験体と初期載荷時の初 期剛性との比を表-2 に示すが、補修試験体の初 期剛性は、初期載荷時の約70%程度まで回復して いる。岡田4)は、ひび割れ補修後の曲げ剛性は、 補修前の剛性と比較して大きくなることを報告し

ており、国枝ら 5)は、補修試験体の剛性は、初期 載荷時の剛性に比べて低くなり、その傾向は試験 体寸法が大きい場合に顕著であることを報告して いる。本実験で得られた補修試験体の初期剛性は、 ひび割れ注入できない微細なひび割れの存在により、初期載荷時の曲げひび割れ発生後の剛性とほ ぼ等しく、新たなひび割れの発生による剛性の低 下は確認されなかった。なお、新たなひび割れは、 ひび割れ注入部以外に発生した。

図-5 に、初期載荷時と補修後載荷時の荷重-変位関係を合せたものを示す。なお、初期載荷時の荷重-変位関係は、包絡線のみを示している。断面修復が無い場合(初期載荷時含)、等曲げ区間の圧縮かぶりコンクリートは、20MPaシリーズの場合 15mm から 20mm 付近、40MPaシリーズの場合 18mm から 25mm 付近で圧壊が生じ、耐力が一度低下するが、圧縮鉄筋が健全であることから、かぶりコンクリートが受持っていた圧縮力を圧縮鉄筋が受持つことにより、断面内の力の釣合は満足される。しかしながら、断面高さが小さくなる分、荷重の増加はそれほど顕著ではない。その一方で、断面修復を行った場合には、耐力が増加していることが分かる。これは、断面修復材が既存

のコンクリートよりも強度が高いことから, 引張 鉄筋のひずみ硬化による応力の増加にも耐えるこ とができ、また、断面修復しない場合と比較して 断面のモーメントアーム長が長くなることにより, 等曲げ区間内の断面曲げ耐力が増加するためであ る。このため、写真-2(b)に示すように断面修復 を行った試験体では、等曲げ区間外のコンクリー トにも圧壊が生じている。最終的には、この領域 に生じたひび割れや、載荷点まで伸びるせん断ひ び割れから、等曲げ区間内の断面修復部と既存コ ンクリートの境界面にひび割れが進展することで, 断面修復部が剥がれ取れる形で耐力が低下する。 このため、図-4に示すように、補修後の 0C-4U-1 試験体は,断面修復材の厚みが載荷点近傍で薄く, かぶり部分のみの断面修復では不適切なため、早 期に荷重が低下する結果を得た。また、写真-2(a)、 (b) の比較から分かるように、Push over(初期載荷 時)のひび割れは等曲げ区間内に集中しているの に対して、補修後のひび割れ性状では、等曲げ区 間内のひび割れ幅はそれほど大きくならず、等曲 げ区間外のひび割れ幅が大きくなっており, 本実 験の場合、補修試験体の破壊領域は、初期載荷試 験体のそれと比べて広くなることが確認された。

以上のことから、補修試験体の性能には、初期 載荷時に材料に生じた残留ひずみ、残留応力が大 きく影響を及ぼしており、断面修復に使用する材 料は補修試験体の破壊性状に影響を及ぼすことが 確認された。このことから、補修後の部材の性能 を評価する解析モデルの構築においては、これら の要因を適切に考慮、モデル化する必要がある。

### 4. まとめ

本研究では、RC 部材の復旧性能に関する基礎的なデータを取得することを目的に曲げ破壊するRC はり部材の載荷実験および補修試験体の載荷実験を行うことにより、以下の知見を得た。

・本実験で採用した載荷履歴の場合,残留ひび割れ幅と最大応答変位の間には相関関係が確認できる。ただし、局所的な残留ひび割れ幅ではなく、部材に生じた全ての残留ひび割れを考慮し

た方が, 相関性が高く, 残留ひび割れ幅は, コンクリート強度の高い方が小さい。

- ・補修後の試験体では、ひび割れ注入部以外で新たなひび割れが発生する。また、ひび割れ注入できない微細なひび割れの存在により、補修前後でひび割れの発生状況が異なる。
- ・補修後の部材の性能には、初期載荷時の残留ひずみ、残留応力が影響を及ぼす。
- ・既存のコンクリートより高い強度の断面修復材を用いた結果、補修断面の曲げ耐力が向上することにより、コンクリート圧壊領域が等曲げ区間外にまで及ぶことが確認された。なお、不適切な断面修復では、十分な性能回復は望めない。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、(財) 中部電力基礎技術研究所からの研究助成金,平成17年度科学研究費補助金(若手研究B:代表者伊藤 睦),平成17年度科学研究費補助金(基盤研究B:代表者 水野英二) および中部大学総合工学研究所からの研究助成金の援助を得た。補修作業については、ショーボンド建設株式会社の成松氏、新野氏、佐藤氏の協力を得た。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 被災構造物の補修補強後の耐力変形性状研究 委員会報告書,日本コンクリート工学協会, 2005.3
- 2) 中村隆大,田嶋和樹,白井伸明:曲げ破壊する RC 梁部材のひび割れ計測結果に基づく損傷評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.27,No,2,pp.325-330,2005
- 3) 鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物設計基 準·同解説(耐震設計),平成11年10月
- 4) 岡田清:樹脂注入工法によるコンクリート構造物の補修・補強に関する研究,昭和59年度科学研究費補助金(一般研究(B))研究成果報告書,1985
- 5) 国枝 稔, 若槻晃右, 鎌田敏郎・六郷恵哲: 破壊制御設計に基づいたひび割れ注入補修に 関する研究, 土木学会論文集 No.697/V-54, pp.169-177, 2002.2