

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19760320  
 研究課題名（和文） 損傷を有する RC 部材の修復後の性能評価に関する実験ならびに  
 解析的研究  
 研究課題名（英文） Experimental and Analytical Study on Performance Evaluation  
 of Repaired RC Members with Initial Damages  
 研究代表者  
 伊藤 睦（ITO ATSUSHI）  
 中部大学・工学部・准教授  
 研究者番号：00345927

研究成果の概要：本研究では、損傷を被った構造物の安全性を数値解析的に評価可能な解析ツールの開発を主眼として、RC 部材の初回載荷実験ならびに補修後の載荷実験を行うことで、補修後の部材の挙動を実験的に明らかにすると共に、新たな解析手法の提案・開発を行うことで、実験で確認された挙動の再現が可能となった。さらに、補修・補強後の部材の性能が予測可能な解析ツールの開発を目指して、柱部材の載荷実験を行うと共に、今後の数値解析に必要な構成モデルの開発を行った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	1,300,000	0	1,300,000
2008 年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	240,000	2,340,000

研究分野：工学

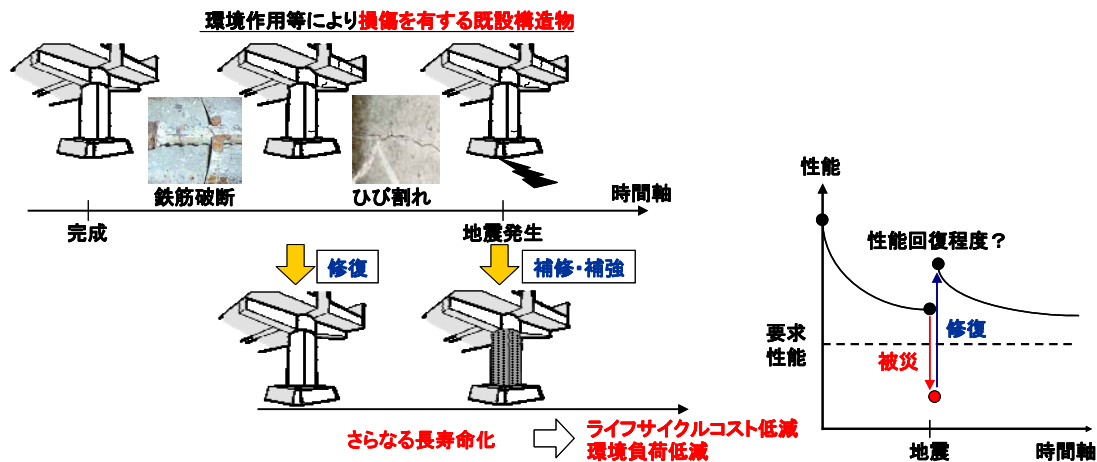
科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：補修後性能、数値解析、損傷、補修、RC 部材

## 1. 研究開始当初の背景

近年の性能評価型の設計体系では、財産の保全を図る復旧性が基本性能に加えられている。このため、想定される地震などの外乱に対し、構造物はどの程度損傷を受け、どの程度の残存性能を有し、また補修・補強により使用可能かが設計時に求められる。加えて、今後は既設社会基盤構造物の維持管理の重要性が益々増大するものと考えられる。以上を鑑みると、今後は損傷を被った構造物であっても適切に修復することで構造物を長寿命化し、構造物のライフサイクルコストの低減と環境負荷低減を図る技術が求められる。一般に既設構造物は図-1 に示すように、経

年による環境作用、例えば乾燥収縮やアルカリ骨材反応等により損傷を被ることにより性能が低下し、ある損傷状態の既設構造物は任意時刻に地震作用を受ける。このため、既設構造物は新設時に想定された性能を必ずしも保有しておらず、上記技術を確立するためには、既設構造物が供用期間中の任意時刻に保有する性能を適切に評価する技術の確立が第一に求められる。これまで、特に損傷を被った既設構造物や修復後の構造物の性能照査は、載荷実験が中心的な役割を担ってきたが、修復事例の増大が確実視される中で、毎回載荷実験を行うことは現実的ではなく、数値解析による性能予測手法の確立が必要



(a) 経年による損傷と適切な修復による構造物の長寿命化 (b) 経年－性能関係模式図

図－1

と考えられる。しかしながら、この種の数値解析技術の確立に向けた研究は、世界的にも僅かであるのが現状である。

## 2. 研究の目的

本研究は、構造物が供用期間中の任意時刻に保有する性能が評価可能な数値解析技術の確立を最終的な目的とし、この枠組みの中で、本申請課題では、外力作用により損傷を被った構造物の修復後の性能評価が可能な数値解析技術の確立を目的とする。具体的には、以下の内容を目的とした。

### (1) 補修部材の挙動評価に関する実験

せん断破壊する RC はり部材の荷重－変位関係データの取得とひび割れ注入補修後の性能ならびに挙動に関するデータの取得を目的とする。

### (2) 数値解析モデルの提案・構築

これまで開発を進めてきた解析モデルを改良することにより、上記実験で得られたひび割れ注入補修後の部材挙動が再現可能な解析モデルの提案・構築を行う。

### (3) ポアソン効果を考慮した直交異方性コンクリートモデルの開発

鋼板巻き立て等の補修・補強では、鋼板による拘束効果が期待できる。そこで、現在構築中の構成モデルに新たな概念を導入することにより、ポアソン効果が考慮可能なコンクリートモデルの開発を行う。

### (4) RC 柱部材の実験データの取得

これまで、主にはり部材を対象として研究を進めてきているので、開発中の解析モデルを RC 柱部材へも適用可能とする第一歩として、繰り返し載荷荷重を受ける鉄筋コンクリート柱部材の挙動、破壊性状に関するデータの取得を行う。

## 3. 研究の方法

### (1) 補修部材の挙動評価に関する実験

せん断破壊するように設計された RC はり部材の載荷実験を行うことで、RC はり部材に地震等の外力作用を模擬した損傷を導入する。このせん断破壊した RC はり部材をひび割れ注入により補修し、再度、載荷実験を行うことで、補修後の耐荷性能や挙動、損傷状況の観察を行うことで、数値解析モデルの構築および開発した解析モデルの検証に必要なデータを得る。なお、実験に使用した RC はり部材の諸元は研究成果に後述する。

### (2) 数値解析モデルの提案・構築

新設構造物の性能評価と例えば地震による被災後の補修構造物の性能評価の違いは、被災後の補修構造物では、地震による損傷が存在するところである。損傷指標をどのように定義するかは別として、材料モデルに立脚した数値解析では、地震による損傷は、材料の塑性化に伴う残留ひずみや地震時に経験した載荷履歴情報、ならびに残留応力等により表現することができる。このため、可能な限り厳密に数値解析で補修構造物の性能評価を行うのであれば、構造物が地震により被る損傷を評価するために、まずは地震時の構造物の挙動を評価（初回載荷解析）する必要がある。初回載荷解析を実施することにより、時間の影響を無視すれば、引き続き想定される余震などの外力を作用させることにより、被災構造物の余震に対する安全性予測も可能となる。この場合、初回載荷解析により評価された損傷を考慮している点で、一般的な新設構造物の性能評価とは異なり、被災構造物の残存性能予測には、自動的に地震による損傷の影響が考慮されることになる。

補修構造物の性能評価においては、初回載荷解析により評価された損傷を初期条件とすることに加えて、ひび割れ注入・断面修復等の補修作業のモデル化や、必要に応じてコンクリート増し打ちや繊維補強シート等の要素

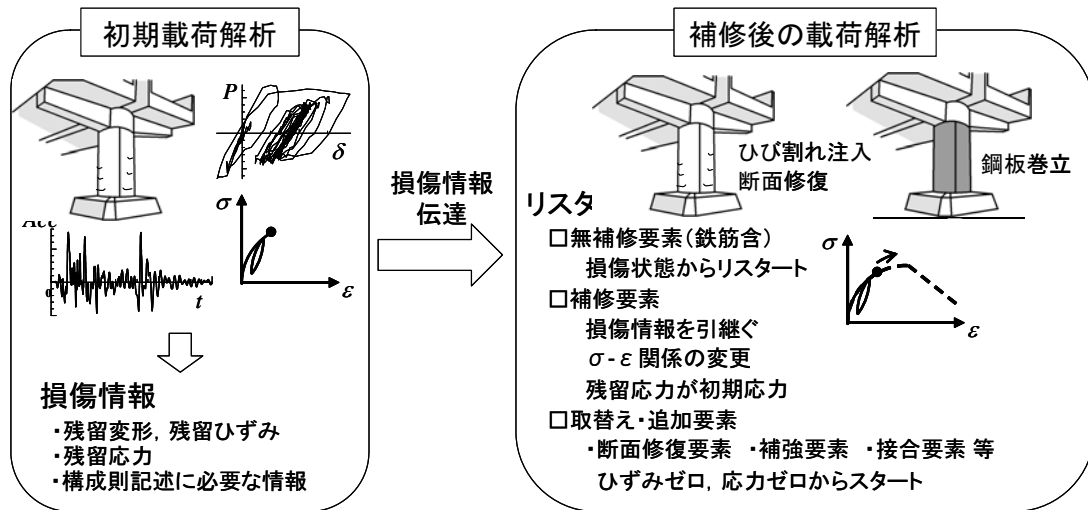


図-2 補修構造物の性能評価解析のイメージ

を追加した後に外力を作用させることとなる。このため、被災構造物の補修作業等の検討を行うのであれば、図-2に示すように初回载荷解析により得られた損傷情報を一度出力し、補修構造物の性能評価では、それら情報を読み込むことによるリスタート解析を実施することが良いと考えられる。本研究では、この手法に基づいて数値解析ツールの開発を行う。

コンクリートの構成モデルは直交異方性モデルであり、ひび割れの取扱は分散ひび割れモデルとしている。補修後载荷解析では、初回载荷解析により評価された損傷情報を初期ひずみ・初期応力とすると共に、ひび割れ注入のモデル化は、残留ひび割れ幅に応じて補修されたコンクリートのマクロな剛性の変化と、コンクリートの引張強度の回復としている。この仮定は、本研究の実験で得られた知見により、補修部材に発生する新たなひび割れはひび割れ注入部以外に生じるに基づくものである。そのため、補修コンクリートの引張軟化特性や、ひび割れ面におけるせん断伝達挙動は、通常のコンクリートに使用されるモデルをそのまま使用している。また、補修後载荷解析において、ひび割れ発生方向（応力計算座標系）は、初回载荷解析時に発生した方向と等しいものと仮定しているが、補修後载荷解析で計算される応力状態によっては、新たな方向のひび割れ発生も許容している。なお、その際に使用するひび割れ発生基準は、通常のコンクリートに仮定したものを使用している。加えて、本解析では、コンクリートの圧縮挙動はそれほど解に影響を及ぼさないことから、補修コンクリートの圧縮特性については、通常のコンクリートに仮定されるモデルを使用している。

### (3) ポアソン効果を考慮した直交異方性コンクリートモデルの開発

過去にはポアソン効果が考慮可能な直交異

方性モデルは提案されているが、実際の数値解析に使用されている例は存在していない。本研究では、直交異方性モデルでポアソン効果を考慮する手法として、次式を構成モデルに導入することを試みる。

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1^\sigma \\ \varepsilon_2^\sigma \\ \varepsilon_3^\sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\nu_{12} & -\nu_{13} \\ -\nu_{21} & 1 & -\nu_{23} \\ -\nu_{31} & -\nu_{32} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1^t \\ \varepsilon_2^t \\ \varepsilon_3^t \end{Bmatrix}$$

ここで、ひずみの下添え字は、3次元空間に固定される任意の3方向を意味し、 $\nu$ はポアソン比である。また、 $\varepsilon^t$ は、要素の変形から算出されるひずみであり、 $\varepsilon^\sigma$ は $\varepsilon^t$ のうちの応力を発生させるひずみである。

本研究では、この概念を導入すると共に、弾塑性モデルにおけるリターンマッピング的な概念ならびに既往の破壊曲面、多軸応力場の一軸応力-ひずみ関係、ポアソン比の変化を導入することで、ポアソン効果が考慮可能な直交異方性モデルの開発を試みた。

### (4) RC柱部材の実験データの取得

この課題は、現在の研究をさらに発展させること等を目的としたものであり、詳細は、雑誌論文①に詳しい。

## 4. 研究成果

### (1) 補修部材の挙動評価に関する実験

はりの諸元を図-3に示すと共に、初期载荷実験ならびに補修後の载荷実験で得られた荷重-変位関係の比較を図-4に示す。図-4より、せん断破壊したRCはりの場合には、ひび割れ注入による補修を行えば、耐力が初回载荷時とほぼ同程度に回復することが示された。複数本の試験体を用いて検討を行っているが、他の実験結果からもほぼ同様な結果が得られている。ひび割れ注入は、

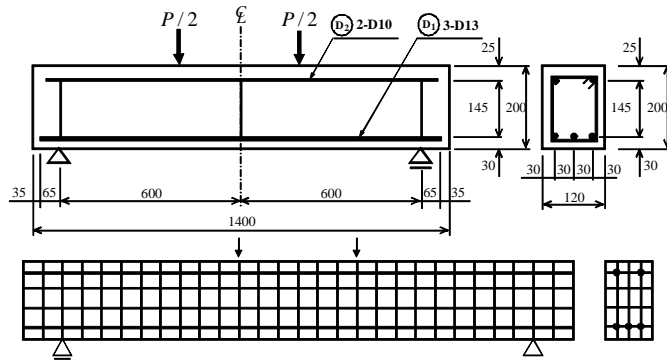


図-3 RC はりの諸元と解析モデル

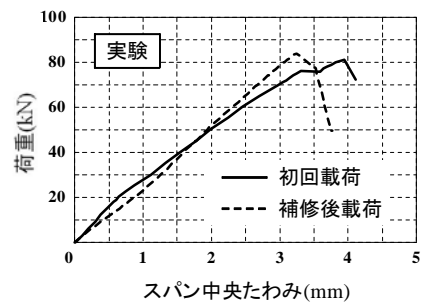


図-4 荷重-変位関係の比較

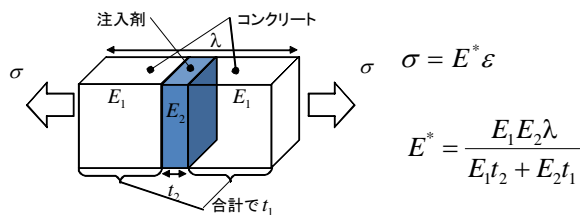


図-5 ひび割れ注入コンクリートの引張剛性モデル

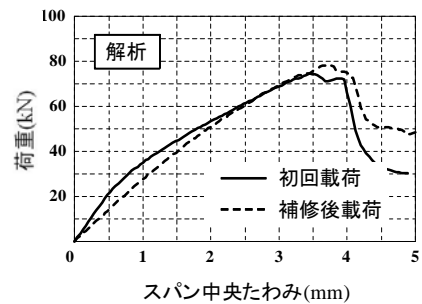


図-6 荷重-変位関係の比較

初回載荷後、荷重を除荷した状況で行っているため、ひび割れが閉じた部位にはひび割れ注入を実施することができない。このため、補修後の初期剛性の回復は、ひび割れ注入補修のみでは困難である。

補修後載荷実験で試験体に発生するひび割れは、初期載荷実験時に発生する位置と異なる位置に発生することが確認された。この結果から、数値解析において、ひび割れ注入部位を含む要素に仮定する引張を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係では、コンクリートに対する破壊力学の考えを鑑みれば、健全時、補修後のコンクリートの強度や破壊エネルギーは同等とみなすことができると考えられる。ただし、補修要素のマクロな弾性剛性は、図-5 に示すように考慮することが妥当であると考えられる。また、本実験結果から確認された挙動より、ひび割れ注入箇所には、脆性的にひび割れが進展していることから、新たなひび割れがひび割れ注入箇所を横断する挙動については、数値解析においてそれほど厳密に考慮する必要がないと考えられる。

この知見は、単調載荷でせん断破壊した RC はりのコンクリートが、ひび割れ注入補修後に再度、初期載荷実験時と同様な応力作用が生じた場合に対するものである。しかしながら、環境作用によるひび割れをひび割れ注入により補修した後に、外力が作用した場合にも、ほぼ同様な取扱いが可能と考えら

る。

#### (2) 数値解析モデルの提案・構築

数値解析では、図-3 に示すように、コンクリート部分を 3 次元の Solid 要素でモデル化し、補強鉄筋は、コンクリート要素の節点を結ぶ Truss 要素でモデル化している。このため、数値解析では、コンクリートと鉄筋は完全付着を仮定することになる。これは、実際には、初回載荷によりコンクリートと鉄筋間の付着抵抗の劣化が考えられるが、本研究のはりの載荷実験では、その影響が顕著ではないと判断されたことによる。付着劣化の影響が顕著となるのは、繰り返し載荷を受ける柱の場合や鉄筋腐食等の環境作用による場合であると考えられる。このため、(5)の繰り返し載荷を受ける RC 柱の載荷実験を通じて、この点の検討を実施している。ただし、繰り返し載荷を受ける RC 柱の場合、柱基部のかぶりコンクリートの圧壊や主鉄筋のはらみ出しによるかぶりコンクリートの剥離も生じることから、この部位に対する補修では、断面修復が実施されるので、補修後の既存コンクリートと鉄筋間の付着を厳密にモデル化する必要性は低いとも考えられる。

図-6 に数値解析で予測された初回載荷解析と補修後の載荷解析の結果の比較を示す。図では、解析は初期剛性を実験のそれと比較して高く予測しているが、定量的には実験で確認された挙動を精度よく予測していることが確認できる。これ以外の場合にも、ほぼ

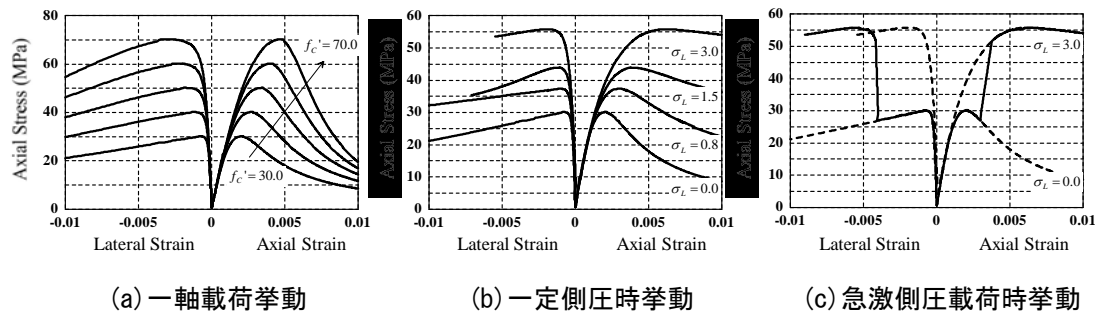


図-7 提案モデルによる応力-ひずみ関係

同様な傾向が得られており、これらの結果から、本研究で開発した解析モデルは、せん断破壊したはりのひび割れ注入補修後の挙動を概ね予測可能であると考えられる。また、この解析技術は、乾燥収縮等でひび割れ損傷が生じた実構造物の補修後の性能評価にも適用している。

(4) ポアソン効果を考慮した直交異方性コンクリートモデルの開発

鋼板や繊維シートが巻かれた部位のコンクリートの強度や強度時のひずみの増加などを考慮することを目的に、実際の構造解析に適用可能なポアソン効果を考慮した直交異方性モデルの開発を進めている。ポアソン効果は、従来の弾塑性モデルで考慮することが可能であるが、統一された構成則で、時間の経過と共にコンクリートの挙動を記述する場合には、弾塑性モデルではほぼ不可能である。加えて、弾塑性モデルを使用した数値解析では、解の収束の問題も度々聞かれるところである。

図-7に本研究で開発を進めている構成モデルにより得られたコンクリートの応力-ひずみ関係を示す。これらの結果は、全てSolid要素-要素を用いた数値解析により得られたものである。図-7(a)は、一軸圧縮強度を30MPa~70MPaに変化させた際の一軸応力-軸方向ひずみ、側方向ひずみ関係である。圧縮強度の変化に伴い、ひずみ軟化挙動が変化する様を本モデルでは表現できていることが確認できる。図-7(b)は、圧縮強度が30MPaのコンクリートに3種類の一定側圧を作用させた際の応力-ひずみ関係である。実験と同様、側圧レベルが変化することで、強度の上昇、側方向ひずみの挙動を本モデルは表現可能である。図-7(c)は、急激に側圧を作用させた場合の応力-ひずみ関係である。この場合、側圧荷重時までの損傷の影響を考慮していないが、このような応力経路の場合であっても本モデルはコンクリートの挙動を表現することが可能である。このように、ほぼ実用段階に使用可能なレベルまで開発を進めることができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ① 亀田好洋, 水野英二, 伊藤睦, 梅原秀哲: 圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 1, No. 3, pp. 145-150, 2008年, 査読有

[学会発表] (計2件)

- ① 堺淳一, 藤永隆, 伊藤睦, 稲熊弘: 補修・補強後の性能評価, 「被災構造物の復旧性能評価研究委員会」シンポジウム (日本大学), 2007年8月1日
- ② 亀田好洋, 水野英二, 伊藤睦, 梅原秀哲: 圧縮下で繰り返し曲げを受ける鉄筋コンクリート柱の変形特性に関する実験的研究, コンクリート工学年次大会2008 (福岡国際会議場), 2008年7月9-11日

[図書] (計1件)

- ① 被災構造物の復旧性能評価研究委員会報告書, 社団法人日本コンクリート工学協会, 2007年8月

[その他]

ホームページ等

<http://www.jci-net.or.jp/jci/study/oldlist/committee/hisai/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 睦 (ITO ATSUSHI)  
中部大学・工学部・准教授  
研究者番号: 00345927

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし