

機関番号：32655

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560537

研究課題名 (和文) 地震被害を受けた鉄筋コンクリート構造物の部材損傷－残余耐震性能評価手法の開発

研究課題名 (英文) Development of the residual seismic performance evaluation methodology for the damaged RC structures on the basis of local damages in components

研究代表者

白井 伸明 (SHIRAI NOBUAKI)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：90060144

研究成果の概要 (和文)：地震被害を受けた RC 構造物の残余耐震性能評価を目的として、1.被害調査のための高精度な画像計測手法の開発、2.部材の構造性能を評価するための FEM モデルの整備、3.フレーム解析に基づく構造物全体の損傷評価体系の構築という 3 つの課題に取り組んだ。課題 1 および 2 については研究目的を概ね達成した。また、課題 3 においては、損傷スペクトルという新しい概念を組み込んだ損傷評価手法の開発に着手し、損傷スペクトルの検証を完了した。

研究成果の概要 (英文)：In order to evaluate the residual seismic performance of damaged RC structures, the following three subjects were carried out; 1. development of the image measurement method for damage investigation, 2. renovation of the analytical models for performance evaluation of RC members, 3. development of the damage evaluation methodology for overall structure based on the frame analyses. The purposes of the subject 1 and 2 were accomplished mostly. As for the subject 3, development of the new damage evaluation method referred to as "Damage Spectrum" was started, and verification of the damage spectrum was finished at this moment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	500,000	150,000	650,000
2009年度	2,200,000	660,000	2860,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：鉄筋コンクリート構造、損傷評価、損傷スペクトル、画像計測、残余耐震性能、三次元 FEM 解析、入力地震動、ひび割れ

1. 研究開始当初の背景

近年、RC 構造物の性能評価型設計法に対する関心が非常に高まっているが、地震被害を受けた RC 構造物に対する性能評価、すなわち残余耐震性能評価に対する関心は一部の研究者に限られている。今後予想される大地震に備え、地震被害を受けた RC 構造物の損傷評価手法の確立に向けた取り組みは喫

緊の課題であり、世界的にも多くの研究課題が残されている状況にある。

国内では、地震被害を受けた鉄筋コンクリート (RC) 構造物に対して、被災度区分判定基準が適用される。被災度は、構造躯体の耐震性能残存率から判定され、耐震性能残存率の算出過程において残留ひび割れ幅の値を判断基準に用いるなど、世界的にも先進的な

概念が取り入れられていると言える。しかし、被災度区分判定基準の基本的な考え方は、耐震診断における構造耐震指標 (I_S) に基づいている。つまり、耐震診断は、簡易な耐震性能評価手法であり、計算上の仮定が数多く設けられている。そのため、被災度区分判定基準は高精度な評価には適していないと考えられる。特に、地震動に対する考慮が不足しているため、地震動特性との関連が不明瞭である。

一方、海外では、FEMA306 (1998 年) において、地震被害を受けた建物の損傷評価手法が示されている。地震動の評価から始まり、損傷評価を経て損失評価に至る一連のプロセスは非常に高く評価される。しかし、具体的な被害調査が目視を前提としている点や、被害調査結果を地震損傷評価に反映させる手法が不明瞭である点など、改善すべき点も見受けられる。

2. 研究の目的

本研究は、RC 構造物の耐震性能を迅速かつ高精度に評価する手法の開発を目的とした。地震被害を受けた RC 構造物に研究対象を限定し、実際の損傷状況の調査に基づく部材の損傷程度の評価から、最終的に構造物全体の残余耐震性能を簡易な数値解析によって評価するまでの一連の研究・技術開発を行った。本研究では、特に以下に示す 3 つの研究課題に取り組んだ。

(1) 画像診断に基づく部材損傷の定量化

地震後の被害調査において、部材の損傷情報を光学的に取得し、画像診断を経て、損傷の程度を定量的に数値化する手法の開発を行った。具体的には、光学機器による画像の取得法、具体的な画像診断手法および損傷程度の数値化手法について検討した。

(2) 部材の損傷－構造性能図表の作成

数値化された損傷程度に基づいて、部材の剛性や耐力の低下量を推定する手法の開発を行った。3次元 FEM 解析を活用した詳細な分析を想定し、部材毎の標準的な解析モデルの構築に着手した。また、一般実務に供することを想定し、損傷－構造性能図表の作成にも取り組んだ。

(3) 部材構造性能に基づく構造物全体の残余耐震性能評価

損傷によって低下する部材の構造性能を反映させた数値解析を実施し、構造物全体の残余耐震性能を評価する手法の開発を行った。ここでは、一般的に使用可能な汎用コードを利用し、フレームモデルによる簡易な解析手法を提案した。さらに、地震応答解析を実施して、地震動の特性を考慮した残余耐震

性能の評価手法の開発も試みた。

3. 研究の方法

前章にて示した 3 つの研究課題を達成するために、以下に示す(1)～(7)に示す研究計画をスタートし、それらを統合することによって地震被害を受けた RC 構造物の部材損傷－残余耐震性能評価手法の開発を行った。

(1) 光学機器による画像の取得法の開発

近年、安価で高精度なスキャナやデジタルカメラを入手できる。それらを活用して RC 部材の損傷状態 (ひび割れ等) を高精度に記録する手法について検討した。また、取得した画像に画像処理を施し、画像診断に利用可能な画像を準備するために必要な技術を完成させた。

(2) 具体的な画像診断手法の開発

ひび割れの種類 (曲げ、せん断等) やひび割れ幅、ひび割れ長さなど、ひび割れに関する情報やかぶりコンクリートの剥離など、各部材に生じる特徴的な破壊性状を整理・収集する。さらに、それらに基づいて、画像診断のための判断基準について検討した。

(3) 損傷程度の数値化手法の検討

国内では、損傷度と呼ばれる I～V までの損傷カテゴリに基づいて損傷評価が行われるが、ここでは 0～1 までの連続的な数値で表現される損傷指標の考え方を導入した。この損傷指標を画像診断から得られる損傷情報に基づいて算定する手法について検討した。

(4) 部材毎の標準的な解析モデルの構築

画像診断により得られた梁、柱および柱梁接合部のひび割れ等の損傷情報が有意なものであるか検証するとともに、部材の諸元を変化させて損傷と構造性能の関係を把握するための数値実験を実施するために、三次元 FEM 解析を活用した。ここでは、解析的な検討に用いる信頼できる解析モデル (標準モデル) を部材毎に構築した。

(5) 損傷－構造性能図表の作成

各部材の標準モデルを用いて、部材の諸元を変化させた三次元 FEM 解析を実施し、得られた部材の構造性能と数値化された損傷程度を整理した図表の作成に着手した。

(6) フレームモデルによる解析手法の提案

地震損傷を受けた部材の構造性能を損傷－構造性能図表に基づいて低減し、フレームモデルを用いて静的解析ならびに地震応答解析を実施した。その結果、構造物全体の残余耐震性能を評価可能であるか検証した。

(7) 地震動の特性を考慮した残余耐震性能の評価法の開発

損傷部材の構造性能低減を考慮したフレームモデルを用いて過去に地震被害を受けた建物をモデル化し、様々な地震動を用いた地震応答解析を実施した。これにより、地震動の特性が構造物全体の残余耐震性能に及ぼす影響を検討した。

4. 研究成果

3つの研究課題に対して、本研究を通じて得られた研究成果のうち、特に顕著な成果を抜粋して以下に報告する。

(1) 画像診断に基づく部材損傷の定量化に関する研究成果について

研究課題1においては、柱梁接合部の破壊実験を実施し、光学機器によるひび割れ等の損傷画像の取得方法、画像診断手法およびひび割れやかぶりコンクリートの剥落等の損傷の定量化手法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

① 柱梁接合部のせん断ひび割れ幅に基づく損傷評価

柱梁接合部の損傷評価を行うにあたっては、接合部パネル部のせん断変形に着目する。この時、図-1に示すようなせん断変形モデルを用いて、ひび割れ幅からせん断変形を評価する。このモデルでは、ひび割れ幅は全長に渡って一定値であると仮定している。しかし、今回デジタルカメラを用いて柱梁接合部のパネル部分に生じたせん断ひび割れを記録し、それを詳細に分析したところ、ひび割れ形状が図-2に示すように楕円形に近似できることを確認した。そこで、数本のひび割れをサンプルとして抽出し、最大ひび割れ幅 W_s と平均ひび割れ幅 W_{ave} の関係を求めたところ、次式に示す関係が成立した。

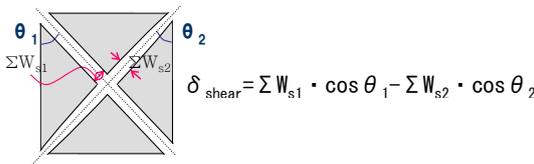
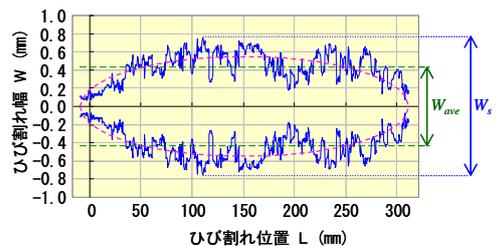


図-1 ひび割れ幅に基づくせん断変形推定モデル



— ひび割れ画像計測値 — 等価面積の楕円 — 楕円の平均高さ

図-2 ひび割れ幅—ひび割れ位置関係

$$W_{ave} = 0.55 \cdot W_s \quad (1)$$

式(1)を用いて評価した W_{ave} を用い、ひび割れ幅に基づくせん断変形モデルから接合部パネル部のせん断変形を評価したところ、実験において直接計測したせん断変形と高い精度で一致することを確認した。これにより、被災後の RC 造建物において、柱梁接合部のパネル部分に生じたせん断ひび割れ幅を計測することにより、接合部パネル部のせん断変形を推定することが可能となる。そして、接合部パネル部に対して適当な復元力特性を設定することにより、エネルギー的な評価に基づく損傷評価が可能となった。

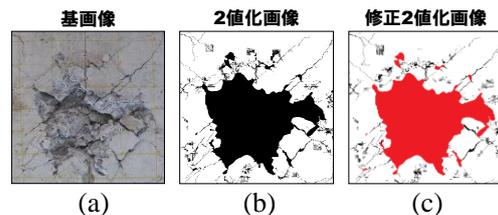
② コンクリート剥落の影響度合いの定量化

偏心を有する柱梁接合部では、柱梁接合部のパネル部分にせん断ひび割れが発生した後、引き続き荷重を漸増させていくと、次第にかぶりコンクリートの剥落が発生する。この場合、ひび割れ幅の計測が困難になるため、前述したようにひび割れ幅から接合部パネル部のせん断変形を評価することは難しい。そこで、接合部パネル部の損傷状況からフラクタル次元 D を評価し、せん断変形と対応づける手法を採用した。フラクタル次元 D は、ボックスカウンティング法に基づき、次式により求めることができる。

$$D = \frac{\log_{10} N(r)}{\log_{10} r} \quad (2)$$

ここで、 r : ボックスの1辺の長さ、 $N(r)$: ひび割れを含むボックスの数である。

通常、フラクタル次元 D を求めるにあたっては、図-3(b)に示すように画像を二値化する必要がある。しかし、この場合は剥落部とひび割れ部が区別されないため、剥落の発生とともに $N(r)$ の数が急増してしまい、フラクタル次元 D を過大に評価する恐れがある。実際に、実験結果との比較を通じて、得られた D 値からせん断変形を推定することが困難であることを確認した。そこで、本研究では、図-3(c)のように二値化画像において剥落部を赤く着色する修正を行い、剥落部とひび割れ部を分けて D 値を算出する手法を提案する。この時、 $N(r)$ の算出においては、剥落部を含むボックスの数に低減係数を乗じることにより、剥落部の影響を低減する。なお、この低減係数は、ひび割れ部と剥落部の損傷面積の分析から、0.1 が適当であった。



(a) (b) (c)

図-3 修正二値化画像の作成

③ 損傷評価における有意なひび割れの特定手法の重要性

柱梁接合部試験体は、柱、梁および接合部パネルから成る十字型架構である。この十字型架構全体の応答に及ぼす有意な損傷について検討するために、個々の部材の損傷について着目し、架構全体の耐力低下に及ぼす影響について分析した。その結果、図-4 に示すように、架構の層間変形が増大するに伴って梁端部断面の応力中心間距離が減少しており、それが架構全体の耐力低下の原因であることが分かった。そして、図-5 に示すようにこの応力中心間距離の変化を梁端の圧壊によりかぶりコンクリートが剥落した領域の梁せい方向の長さで評価できることが分かった。なお、図-3 に示したように、柱梁接合部の破壊モードによっては、接合部パネル部に顕著なひび割れが生じる場合がある。しかし、RC 構造物の表面に現れるひび割れは、必ずしも損傷に対して有意であるとは限らず、損傷評価の際にはそれを特定する手段が必要であると考えられる。

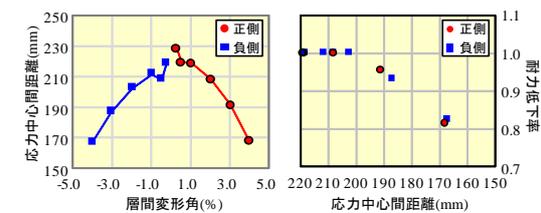


図-4 梁端の応力中心間距離の変化と耐力低下の関係

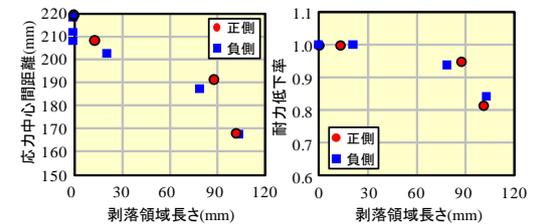


図-5 剥落領域長さと耐力低下率の関係

(2) 部材の損傷-構造性能図表の作成に関する研究成果について

研究課題2では、損傷評価において有意な損傷量を特定するために、RC 造柱におけるひび割れ等の局所損傷が柱の全体応答に及ぼす影響を確認した。また、損傷評価に活用可能な3次元FEMをベースとした標準モデルの構築を行った。その結果、以下の知見を得た。

① RC 造柱の局所損傷と全体応答の関係

曲げ降伏後にせん断破壊するRC造柱試験体(FS試験体)とせん断破壊するRC造柱試験体(S試験体)に着目し、曲げひび割れおよびせん断ひび割れが柱の全体応答に及ぼ

す影響について分析した。ここでは、結果の一例として、S試験体の分析結果を図-6に示す。S試験体においては、せん断ひび割れ幅を計測することにより、耐力低下率、塑性率および剛性低下率といった全体応答を高精度に予測できる可能性が高いことが分かった。同様に、FS試験体においては、曲げひび割れおよびせん断ひび割れともに全体応答との関係性が強いことを確認した。今後は、これらの関係を数多くの試験体について確認し、汎用性のある推定式を作成する必要がある。

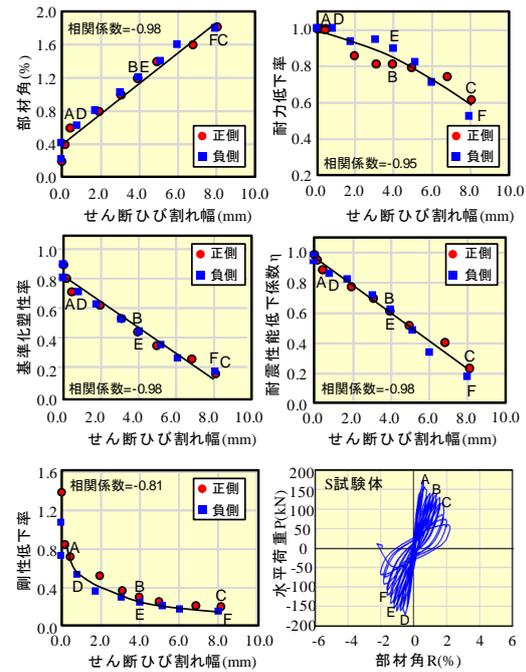


図-6 せん断ひび割れ幅-全体応答関係(S試験体)

② FEM 標準モデルの構築

ここでは、柱梁接合部の標準モデルについて取り上げる。図-7に要素分割図および使用要素を示す。標準モデルでは、計算コストを低減し、汎用性を高めるために、可能な部分においては簡略化を試みている。そのため、主筋の付着すべり挙動は梁主筋に対してのみ考慮し、柱主筋は完全付着を仮定している。

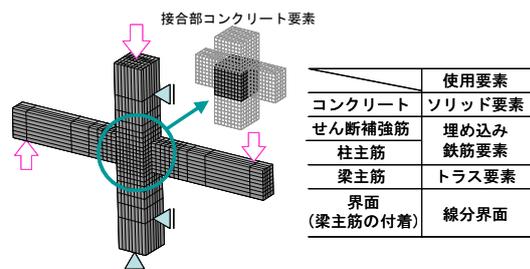


図-7 要素分割図および使用要素

図-8に材料構成則を示す。これらの構成則は、基本的に他の部材においても共通である。コンクリートにおいては、圧縮・引張ともに軟化域において破壊エネルギーを考慮し、要素代表長さによってレギュラリゼーションを行っている。また、付着-すべりモデルには、CEBモデルを採用した。

図-9に解析結果の一例として、無偏心試験体の引張主ひずみ分布を示す。これを試験体の接合部パネル部の破壊状況と比較すると、良好に対応していることが確認できる。また、柱梁接合部全体の応答である層せん断力-層間変形角関係も良好に対応する結果を得ており、損傷評価に活用可能な標準モデルを構築することができた。

また、その他の部材についても標準モデルの構築を進めており、図-10に示すように柱の標準モデルも完成している。

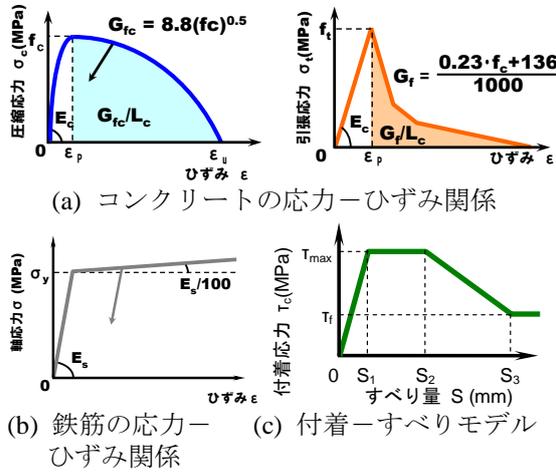


図-8 要素分割図および使用要素

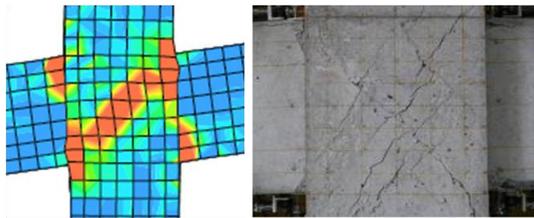


図-9 引張主ひずみ分布（無偏心試験体）

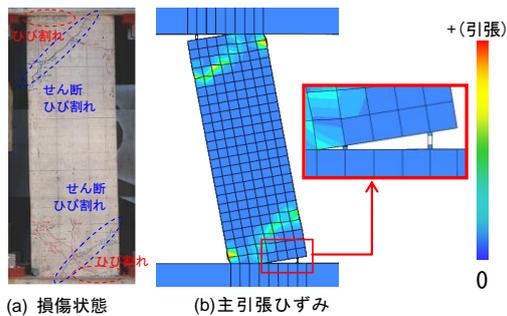


図-10 引張主ひずみ分布（柱標準モデル）

(3) 部材構造性能に基づく構造全体の残余耐震性能評価に関する研究成果について
 研究課題3においては、RC造建物全体をモデル化して解析可能なフレーム解析手法の構築とそれを用いた損傷評価手法について検討した。さらに、地震動の影響によりRC造建物が受ける損傷程度がどのように変化するか把握する手法として、損傷スペクトルを用いた損傷評価手法について検討した。その結果、以下の知見を得た。

① 既存RC造校舎のフレーム解析

既存RC造校舎を用いた破壊実験を対象として、ファイバーモデルによるフレーム解析手法を検証する。図-11に試験体の要素分割図を示す。柱・梁はファイバー要素でモデル化した。雑壁は曲げ耐力に貢献すると考え、梁または柱の断面に雑壁の断面も含めた。壁、スラブについては、トラス材を用いてモデル化し、仮想仕事の原理を用いてせん断抵抗に必要な断面積を算出した。

図-12に静的繰返し解析結果を示す。別途実施した単調解析結果は、良好に実験結果を包絡した。しかし、繰返し解析結果では、実験結果に比べて履歴形状が若干膨らんでいる。この原因の1つとして、主筋の抜け出しを考慮していないなど、コンクリートと主筋間の付着挙動のモデル化が不足していることが挙げられる。今後、本モデルを用いて地震応答解析を実施するためには、主筋の抜け出しを考慮するバネ要素を追加する等の対応が必要である。

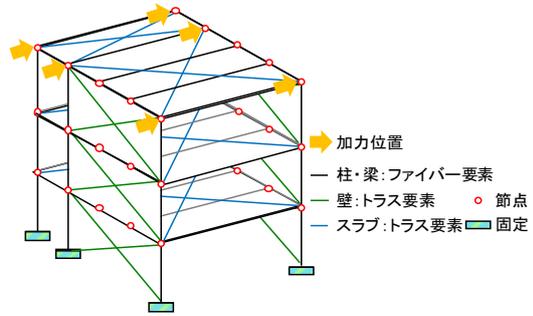


図-11 要素分割図

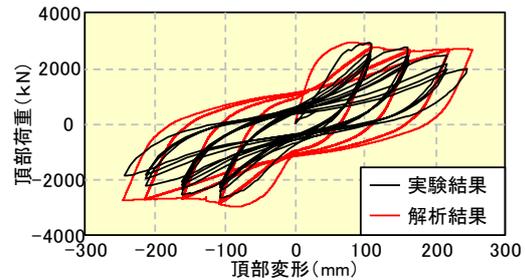


図-12 繰返し解析結果

② 損傷スペクトルを用いた損傷評価

Bertero らによって提案された損傷スペクトルとは、1 質点系にモデル化した建物の周期 T(sec)と損傷指標 DI の関係をグラフ化したものである。この提案手法に基づいて、タイプの異なる 3 つの地震動 (El Centro NS, JMA Kobe NS, Hachinohe NS) に対する損傷スペクトルを作成すると図-13 のようになる。El Centro を基準にして比較すると、JMA Kobe は損傷が生じる周期帯が狭く、また Hachinohe は長周期領域での損傷が顕著であるなど、地震動ごとの特徴を反映した損傷評価が可能であることが分かる。そこで、前述した既存 RC 造校舎を 3 質点でモデル化し、各地震波に対する地震応答解析を実施したところ、第 1 層に生じた最大塑性率と損傷スペクトルを作成する途中段階で作成する塑性率スペクトルから得られる塑性率が同等の値になることを確認した。これにより、損傷スペクトルの妥当性が検証できたため、今後はこの損傷スペクトルを活用した損傷評価手法の体系を構築する。

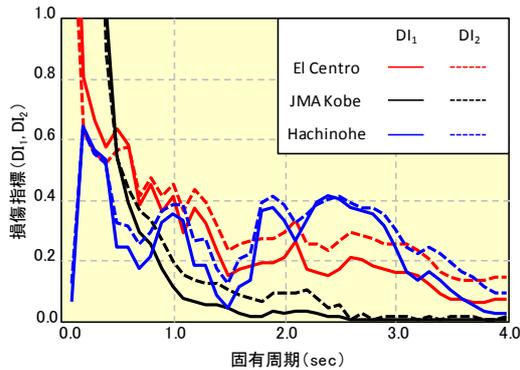


図-13 損傷スペクトル

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 9 件)

- ①西尾淳, 田嶋和樹, 白井伸明: 局所損傷の実測値に基づく RC 建造物の全体損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.33, 2011.7 (掲載決定)
- ②尾崎英介, 西尾淳, 田嶋和樹, 白井伸明: 画像計測に基づく RC 造柱梁接合部の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.32, No.2, pp.301-306, 2010.07
- ③K. Tajima, N. Shirai, E.Ozaki, K.Imai: FE Modeling and Fiber Modeling for RC Column failing in Shear after Flexural Yielding (曲げ降伏後にせん断破壊する RC 造柱の有限要素モデルとファイバーモデル), Computational Modelling of Concrete Structures, Proceedings of Euro-C 2010, 査読有, pp. 737-748, 2010.3

- ④尾崎英介, 今井究, 田嶋和樹, 白井伸明: 曲げ降伏後にせん断破壊する RC 柱の非弾性挙動をシミュレートする改良ファイバーモデルの構築, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.31, No.2, pp. 121-126, 2009.07

- ⑤田嶋和樹, 白井伸明, 石森昭行: 破壊モードが異なる鉄筋コンクリート柱部材の画像計測に基づく損傷評価, コンクリート工学年次論文集, 査読有, Vol.30, No.3, pp. 169-174, 2008.07

- ⑥田嶋和樹, 白井伸明, 石森昭行: 破壊モードが異なる鉄筋コンクリート柱部材の画像計測に基づく損傷評価, 査読有, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp. 169-174, 2008.07

[学会発表] (計 27 件)

- ①安達一喜, 橋本 拓, 田嶋和樹, 白井伸明: 非弾性ねじれ変形を考慮した偏心 RC 建造物の耐震性能評価, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, 茨城県つくば市, 2010.11
- ②國本拓也, 田嶋和樹, 白井伸明: FEM 解析による耐震補強後 RC 骨組の性能評価, 日本建築学会関東支部研究報告会, 東京都港区, 2010.03
- ③北野由樹, 増田久美子, 田嶋和樹, 白井伸明: 耐震診断におけるそで壁付柱と有開口耐震壁の評価方法に関する解析的検討 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演会, 宮城県仙台市, 2009.07

[その他]

<http://rc.arch.cst.nihon-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

白井 伸明 (SHIRAI NOBUAKI)
 日本大学・理工学部・教授
 研究者番号: 9 0 0 6 0 1 4 4

(2)研究分担者

田嶋 和樹 (TAJIMA KAZUKI)
 日本大学・理工学部・助教
 研究者番号: 6 0 3 8 6 0 0 0

(3)連携研究者

サンジェイ パリーク (SANJAY PAREEK)
 日本大学・工学部・准教授
 研究者番号: 2 0 2 8 7 5 9 3