

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360238

研究課題名(和文)新築・既存・被災RC造建物の耐震性能評価法の統合と高精度化

研究課題名(英文)Unification and sophistication of seismic performance evaluation for new, existing and seismically-damaged RC buildings

研究代表者

前田 匡樹(MAEDA, MASAKI)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30262413

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円、(間接経費) 4,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、鉄筋コンクリート(RC)造の脆性破壊部材を含む架構の耐震性能の評価法を開発し、現在は個別の性能評価法が適用されている新築・既存・被災建物に統一的に適用可能な耐震性能評価法を開発することを目的とした。建物の性能として、構造部材の損傷量に基づく修復性と残存耐震性能に基づく終局安全性を対象とし(1)脆性破壊後の部材の耐力低下挙動の解明とモデル化、(2)耐力低下部材を含む架構の挙動解析、(3)部材の損傷量と架構の残存耐震性能の評価、(4)架構の安全限界状態の評価法の提案、及び、(5)架構の修復限界状態の評価法の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：An evaluation method of seismic performance for reinforced concrete frame structure including brittle members was developed. The developed method is applicable to seismic performance evaluation uniformly for new, existing and damaged buildings with higher accuracy. Repairability evaluation based on damage to structural members and structural safety based on residual seismic capacity are focused on in this study. Major items investigated are (1) development of analytical model for deterioration shear capacity of brittle members, (2) analysis on behavior of frames including members with brittle failure mode, (3) evaluation of damage in structural members and residual seismic capacity of frames, (4) proposal on estimation of safety limit state, and (5) proposal on estimation of repairability limit state.

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：RC建築構造物 耐震性能評価 終局限界 修復限界 地震被害 既存建物と新築建物 評価法の統合

1. 研究開始当初の背景

我が国の建築構造物の耐震設計法は、1981年の保有水平耐力法で終局安全性の確保、2001年の限界耐力計算法で性能評価型設計へと発展してきた。その中で鉄筋コンクリート(RC)構造では、せん断破壊など脆性破壊を防止し靱性を確保し終局安全性を確保することに研究の重点が置かれてきた。一方で阪神淡路大震災以降の地震被害では、倒壊は免れたものの補修が困難で改築を余儀なくされた事例も発生したことから、被災程度の定量的評価の重要性が指摘され、RC部材の損傷評価に関する研究も行われるようになった(内田、前田ら: JCI 論文集 27-2, pp.1201-1206, 2005 など)。AIJの「耐震性能評価指針」(2004)には、研究代表者・前田が開発した手法に基づく部材の最大残留ひび割れ幅評価法や架構全体の残存耐震性能評価法が取り入れられているが、これらは地震後の耐震安全性の観点から被災度を評価するもので、修復性能の評価の指標とはなりえておらず、修復性能の評価法の開発は残された課題である。

現在の新築建物の構造設計・性能評価は、電算プログラムを用いた荷重増分解析(Push-over 解析)が主流で、RC部材のせん断破壊など脆性破壊し耐力低下すると、解析が続行できなくなるため、その時点を建物の終局限界状態とするか、全部材を靱性部材となるように設計が行われる(2007年版技術基準解説書)。これは安全側の設計とも言えるが、設計の自由度を奪う結果になっている。既存建物の「耐震診断基準」(建築防災協会、2001)では、脆性破壊部材を含む架構の耐震性能を略算的に評価することができるが、新築建物の設計には適用できない。米国でも、耐震診断基準である ATC- 58(35% Draft)で、同様の試みがなされているが、具体的な評価手法の提案には至っていない。

研究代表者・前田は、RC構造に関して、既存建物の「耐震診断基準」、被災建物の「被災度判定基準」(建築防災協会、2001)、新築建物の耐震設計・性能評価指針類の開発に携わってきており、(それぞれの対象構造物の特徴はあるが)これらに別個の評価手法を用いることは不合理・不経済で、既存・被災・新築建物を網羅する耐震性能評価法が必要と考えてきた。

2. 研究の目的

以上のような背景から、本研究では、鉄筋コンクリート(RC)造の脆性破壊部材を含む架構の耐震性能の評価法を開発し、現在は個別の性能評価法が適用されている新築・既存・被災建物に統一的に適用可能な耐震性能評価法を開発することを目的とした。脆性破壊部材を含む架構の解析手法を確立することで、新築・既存建物の双方を統一的手法による高精度な安全性評価が可能とする。また、RC梁・柱部材の残留ひび割れ幅の評価

モデルやひび割れ長さ評価モデルを拡張し、構造部材の残留ひび割れ長さ・幅の分布、コンクリート圧壊面積など損傷量評価の高度化を図る。さらに層崩壊型架構の残存耐震性能評価法(被災度判定基準)を梁降伏型全体崩壊形や破壊モードが混在する崩壊形の構造物に適用できるように発展させ、部材の損傷から架構全体の耐震性能を評価する方法へと発展させる。

3. 研究の方法

本研究で検討の対象とする性能は、構造部材の損傷量に基づく修復性と残存耐震性能に基づく終局安全性とした。検討では、(1)脆性破壊後の部材の耐力低下挙動の解明とモデル化、(2)耐力低下部材を含む架構の挙動解析、(3)部材の損傷量と架構の残存耐震性能の評価、(4)架構の安全限界状態の評価法の提案、及び、(5)架構の修復限界状態の評価法の提案を行った。

(1) 脆性破壊後の部材の耐力低下挙動の解明とモデル化

まず、過去に行った柱が脆性破壊する1層2スパン架構(耐震診断の高度化研究)の実験結果に対して、芳村ら提案している「破壊曲面縮小」という概念(AIJ 構造系論文集, No.618, pp.191-197, 2007)の適用性を検討するとともに、部材モデルを改良した。

脆性部材を含む架構の静的載荷実験を行い、開発した部材モデル、解析プログラムの検証を行った。

(2) 耐力低下部材を含む架構の挙動解析

耐力低下型の架構の静的解析には、一般的な荷重増分法が適用できないため、変位増分法による骨組解析プログラムを開発した。

(1)で開発した耐力低下・軸縮みを考慮できる部材モデルを骨組解析に適用するためには、部材の損傷や降伏による剛性低下による各ステップの各層の変位増分を振動モード形に基づいて正しく評価する必要がある。そこで、各ステップの剛性マトリクスの固有値解析から1次モード変位ベクトルを算出し変位増分解析を行うプログラムに改良し、解析のためのアルゴリズムを開発し、解析プログラムとしてまとめた。

最終的には、脆性部材を含む架構のパラメトリックスタディにより、性能評価の検討を行った。

(3) 部材の損傷量と架構の残存耐震性能の評価

研究代表者・前田が開発に関わった被災度判定基準(建築防災協会、2002)では、柱部材の損傷指標として、部材のエネルギー吸収能力の低下割合を推定する指標である耐震性能低減係数 η を用いているが、検証に用いた試験体数の制限や、最大ひび割れ幅のみに着目しているなどの問題がある。そこで、過去の実験データベースと本研究の実験結果

を用いて損傷量評価法の検証を行うとともに、損傷量と残存性能 η の関係を分析し、 η と関連付ける損傷量の提案を行った。

また、従来の架構全体の残存耐震性能 R の評価法は、層崩壊型建物を前提としているのに対して、比較的新しい中高層建物で想定される降伏型全体崩壊形や、様々な破壊モードが混在する架構も対象に検討を行った。

(4) 架構の安全限界評価法の提案

(2),(3)で開発した部材モデルや骨組の損傷量・耐震性能残存率モデルを用いて、安全限界状態の評価法を提案する。評価法としては、架構の Push-over 解析と等価 1 質点系の応答に基づく限界耐力計算法を、地震被災建物や耐力低下架構に適用することを検討した。

上記により求まる倒壊限界変形に、安全率を考慮することで、性能評価における安全限界変形を求めた。

(5) 架構の修復限界評価法の提案

被災建物の修復の可否の判断基準の中で重要な要素は、修復に要する費用と時間であり、これらを検査するためには柱・梁部材などの構造躯体の損傷に加えて、非構造部材や設備機器などの損傷評価や復旧費用のモデル化が必要であり、これらの評価法を検討した。また、建物の機能や残存供用期間に基づいて修復の可否を判断するためのフローを検討した。

4. 研究成果

本研究では、RC 造純ラーメン架構を対象として、変形性能や破壊モードの異なる部材から構成される RC 造架構の修復性能および終局安全性能の評価法について検討した。主な研究成果は以下である。

(1) 脆性破壊後の部材の耐力低下挙動の解明とモデル化

架構の安全限界状態を精度よく評価するために、部材、特に軸力を支持する柱部材について、脆性破壊後のせん断及び軸耐力低下挙動を解析するための、耐力低下型復元力特性モデルと軸縮み変形を考慮できる部材モデルを開発した(論文、)。図1のように軸縮みが発生した柱では、コアコンクリートが圧壊して耐力を失い、主筋のみが軸力負担すると仮定し、軸変形と軸耐力の関係をモデル化した。このモデルにより、架構実験の挙動が概ね評価できる(図2)ことを明らかにした。

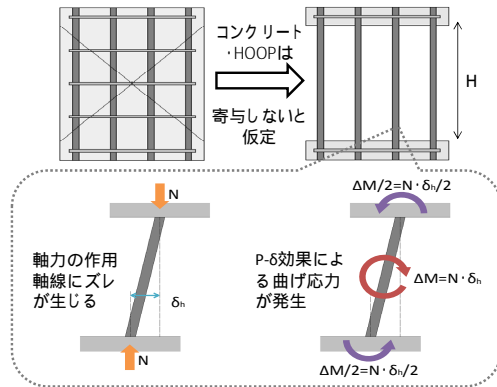


図1 p- δ 効果による付加曲げ応力

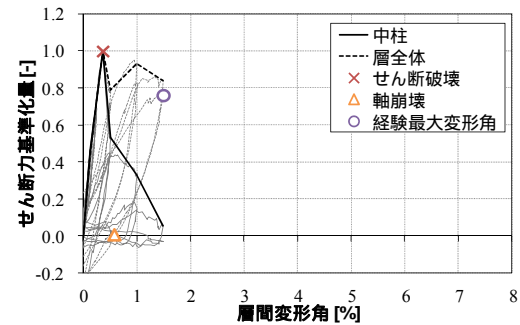


図2 耐力低下モデルと実験結果の比較

(2) 耐力低下部材を含む架構の挙動解析

(1)で開発する部材モデルを組み込んだ骨組の Push-over 解析を行うプログラムを開発した(論文)。部分的に耐力低下が生じる架構では、その層の水平剛性・耐力が低下して、変位分布や地震力分布が変化するため、従来一般的に用いられている A_i 分布に基づく荷重増分解析法が適用できない。そこで、倉本(AIJ論文報告集、587号,pp.69-76,2005)らの Modal Adaptive Pushover Analysis 法など固有値解析に基づく変位増分解析の適用性を開発した解析プログラムを用いて検討した。図3に示すような部分的に耐力低下が生じる部材を含む架構モデルと過去に行った架構実験結果を用いて、脆性部材破壊後に応力が再配分されるメカニズムを明らかにし、架構を構成する一部の部材が脆性破壊して耐力低下した後に、せん断力や軸力が周辺の部材に再配分され、架構全体としての耐震性能を維持する限界の評価法を検討した。

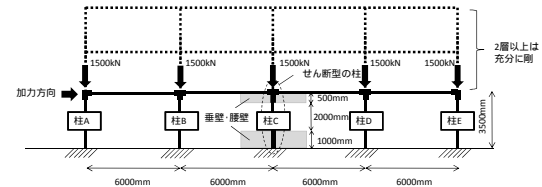


図3 耐力低下部材を含む架構モデル

(3) 部材の損傷量と架構の残存耐震性能の評価

前田らが提案している RC 柱・梁部材の残留ひび割れ幅・長さの評価モデルを拡張し、ひび割れ幅ごとの総ひび割れ長さ、圧壊面積などの損傷量評価モデルを開発した。また、最大残留ひび割れ幅に基づく損傷度から評

備している柱・梁部材の耐震性能低減係数について、既往の実験結果を分析し損傷量や破壊モード・変形性能に基づき定量化した(文献)。

また、異なる破壊モードの部材の耐震性能低減係数を用いて、図5のように種々の崩壊形を有する架構の残存耐震性能Rを評価する方法を提案した(論文 , , ⑩)。

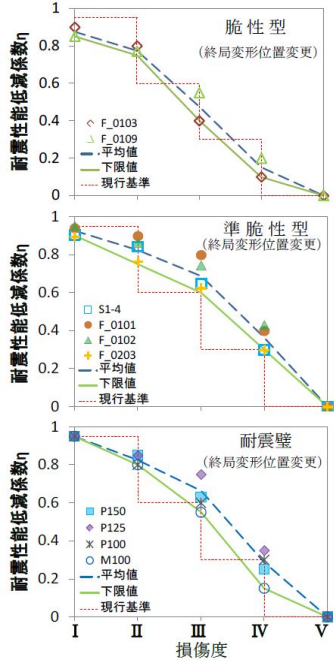


図4 部材の耐震性能低減係数の検証

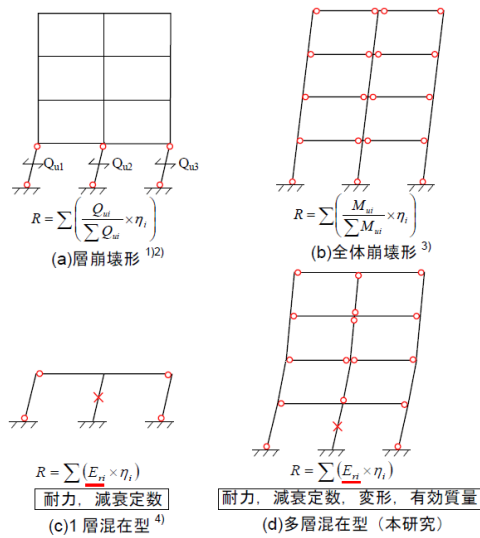


図5 架構の崩壊形と残存耐震性能Rの算定

(4) 架構の安全限界評価法の提案

(2)で開発した耐力低下する部材の復元力モデルを架構のPush-over解析に組み込み、限界耐力計算法に基づいて、倒壊限界変形を求める方法を提案した(文献、)。図6に示すように、想定する地震動に対する応答スペクトルと、建物の等価1質点系の荷重変形関係曲線状の各点における保有耐震性能指標を求め、保有耐震性能指標が最大となる点を倒壊原型変形と定義する。図7に示

すように、応答スペクトルに基づく倒壊限界と動的解析結果を比較し、この定義の妥当性を示した。この倒壊限界変形に適切な安全率を考慮することで、安全限界変形を求めることを提案した。

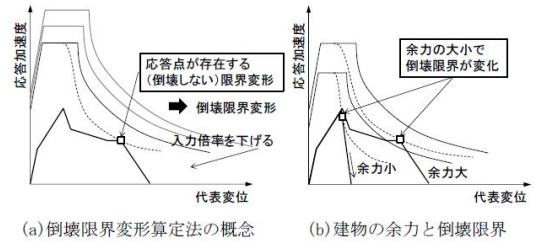


図6 倒壊限界変形の定義

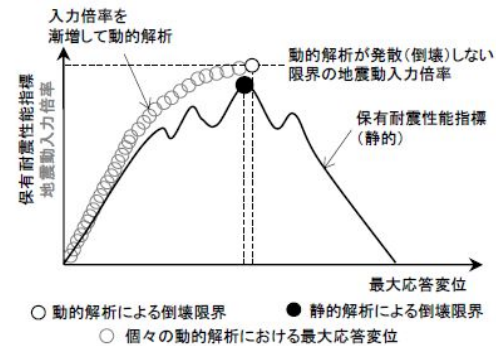


図7 静的解析と動的解析における倒壊限界

(5) 架構の修復限界評価法の提案

(2),(3)で開発した部材の損傷量評価モデルから、ひび割れ幅・長さ、剥落面積などの躯体の損傷量を評価し修復費用・時間を予測するモデルを開発した。さらに、非構造部材の損傷確率に基づいて損傷量を評価し、これらを総合して、建物全体の損傷量指標 I_{dm} を算定する方法(図8)を開発した(文献、)。さらに、図9に示すように、地震被害を受けた建物の残存供用期間とライフサイクルコスト(LCC)の関係に基づいて、修復限界を決定する方法を開発した(文献)。

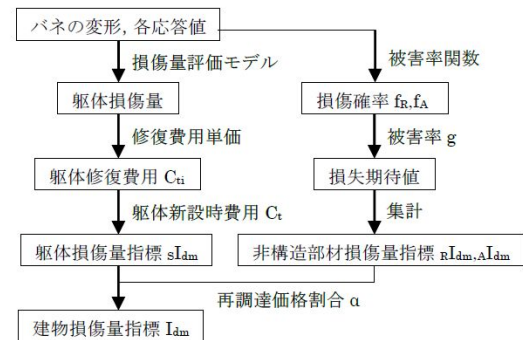


図8 損傷量指標 I_{dm} の算出フロー

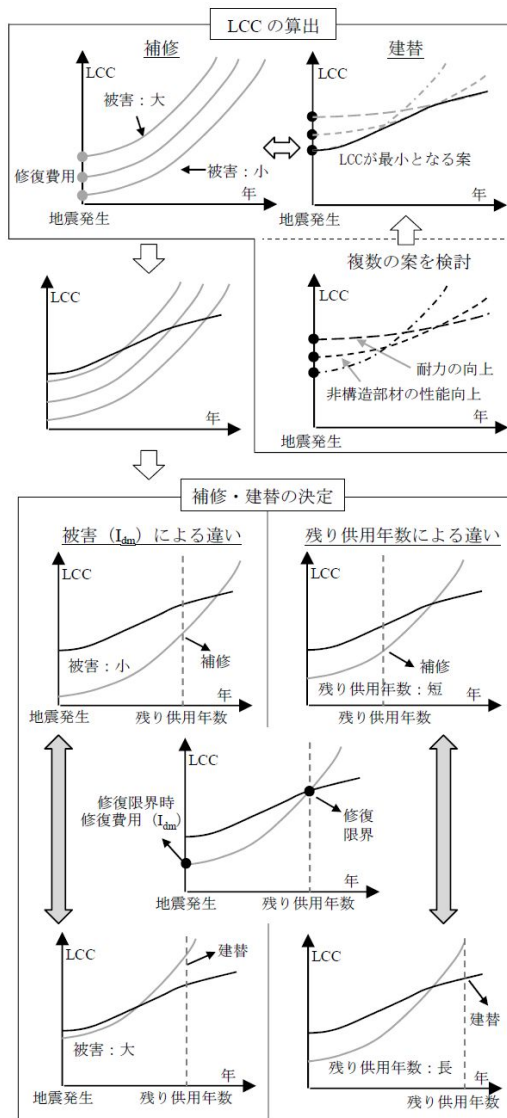


図9 修復限界決定手法のフロー

(6) まとめ

以上のように、本研究では、鉄筋コンクリート造建物を対象に耐震修復性能および安全性能を部材の損傷などに基づいて定量的に精度良く評価できる手法を開発した。この手法により、新築建物の耐震設計における保有水平耐力計算や限界耐力計算が高精度化され、また、脆性部材を含む構造物の設計が可能になるのみならず、既存RC造建築物の耐震診断や震災建築物の被災度判定も同一の性能評価法で行うことができるようになるなど、RC造建物の構造設計・性能評価の精度を向上させ合理化するための技術が提供された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 11 件)

松川和人、前田匡樹、地震応答スペクトルに基づく鉄筋コンクリート造建物の倒壊限界評価法、日本建築学会構造系論文集、査読有、第78巻第693号、2013年、1913-1921
町田隆祐、松川和人、劉秀、前田匡樹、せん断柱の耐力低下を考慮したRC造架構

の安全限界評価手法に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、第35巻第2号、2013年、319-324

伊藤淑紘、高橋香菜子、前田匡樹、せん断破壊する鉄筋コンクリート造柱・壁部材の残存耐震性能の検討、コンクリート工学年次論文集、査読有、第35巻第2号、2013年、859-864

青木貴、前田匡樹、RC造建物の耐震修復性及び修復限界状態の評価を目的とした損傷量評価法の提案、日本建築学会構造系論文集、査読有、第77巻第679号、2012年、1437-1443

三浦耕太、前田匡樹、松川和人、高橋香菜子、部材耐力と減衰を考慮したRC造1層架構の耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法 様々な架構崩壊形式に適用可能なRC造被災建物の残存耐震性能評価法の開発 その1、日本建築学会構造系論文集、査読有、第77巻第678号、2012年、1283-1290
松尾健志、松川和人、三浦耕太、前田匡樹、脆性的なせん断破壊を生じる柱を有する3本柱RC造架構が軸崩壊に至る挙動に関する研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、第34巻第2号、2012年、343-348

青木貴、前田匡樹、RC造建物の損傷量に基づいた耐震修復性及び修復限界状態の評価に関する基礎研究、コンクリート工学年次論文集、査読有、第34巻第2号、2012年、841-846

三浦耕太、前田美里、松川和人、前田匡樹、架構耐震性に及ぼす各部位の影響度に基づいたRC造被災建物の残存耐震性能評価法の多層建物への拡張、コンクリート工学年次論文集、査読有、第34巻第2号、2012年、847-852

松川和人、前田匡樹、三浦耕太、高橋香菜子、曲げ柱とせん断柱が混在する鉄筋コンクリート造架構の崩壊変形角推定に関する研究、構造工学論文集、査読有、Vol.58B、2012年、25-32

三浦耕太、松川和人、前田匡樹、架構耐震性能に及ぼす部材の影響度に基づいた被災建物の残存耐震性能評価法と破壊モード混在型建物への拡張、コンクリート工学年次論文集、査読有、第33巻2号、2011年、901-906

青木貴、前田匡樹、RC造建物の耐震修復性及び修復限界状態の評価を目的とした損傷量指標の提案と建物モデルへの適用例、コンクリート工学年次論文集、査読有、第33巻2号、2011年、913-918

〔学会発表〕(計 11 件)

松川和人、前田匡樹、地震応答スペクトルを用いた鉄筋コンクリート造架構の倒壊限界評価法に関する研究、日本建築学会大会、2013年9月1日、北海道
高橋香菜子、伊藤淑紘、前田匡樹、せん断破壊する鉄筋コンクリート柱・壁部材

の残存耐震性能の再評価 その1 対象試験体概要および損傷度分類、日本建築学会大会、2013年8月31日、北海道
伊藤淑紘、高橋香菜子、前田匡樹、せん断破壊する鉄筋コンクリート柱・壁部材の残存耐震性能の再評価 その2 合計ひび割れ幅及び耐震性能低減係数 η の検討、日本建築学会大会、2013年8月31日、北海道
町田隆祐、松川和人、劉秀、前田匡樹、せん断柱の耐力低下を考慮したRC造架構の倒壊限界評価手法に関する研究、日本建築学会大会、2013年8月30日、北海道
Kazuto Matsukawa、Masaki Maeda、Hamood Al-Washali & Kanako Takahashi、Research For Collapse of R/C Frame Composed of Shear And Flexure Column、15th World Conference on Earthquake Engineering、2012年9月24-28日、ポルトガル・Lisbon Congress Center
松川和人、前田匡樹、耐力低下部材を含む鉄筋コンクリート造架構の崩壊点推定に関する研究 - 特定層に変形が集中する建物に対する検討 -、日本建築学会大会、2012年9月13日、愛知県
三浦耕太、前田美里、前田匡樹、被災RC造建物の残存耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法 その1 耐力・変形・減衰・有効質量を考慮した各部位の影響度評価法の基本概念、日本建築学会大会、2012年9月12日、愛知県
青木貴、劉秀、高橋香菜子、前田匡樹、損傷量に基づいたRC造建物の修復性・修復限界評価手法の構築に関する基礎研究 その1 評価手法の概要と建物モデルへの適用例、日本建築学会大会、2012年9月12日、愛知県
青木貴、前田匡樹、鉄筋コンクリート造建物の修復性能評価を目的とした損傷量指標の提案と建物モデルへの適用例、日本建築学会大会、2011年8月24日、東京
前田匡樹、三浦耕太、松川和人、RC造曲げ降伏型建物の残存耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法 その1 部材のエネルギー吸収量を考慮した影響度評価の基本概念、日本建築学会大会、2011年8月24日、東京
三浦耕太、松川和人、前田匡樹、RC造曲げ降伏型建物の残存耐震性能に及ぼす各部位の影響度評価法 その2 部材剛比によるエネルギー吸収量の推定に基づく評価法、日本建築学会大会、2011年8月24日、東京

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

○取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.archi.tohoku.ac.jp/labs-pages/rehab/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

前田 匡樹 (MAEDA, MASAKI)
東北大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30262413

(2)研究分担者

迫田 丈志 (SAKUTA, JOJI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：70455806