

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601
 研究種目：若手研究(B)
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760517
 研究課題名(和文) 崩壊機構の異なる鉄筋コンクリート造架構の損傷量進展過程に基づく構
 造性能定量化
 研究課題名(英文) Quantification of Structural Performance of R/C Frames due to the
 Failure Mechanism and Damage Propagation
 研究代表者
 高橋 典之 (TAKAHASHI NORIYUKI)
 東京大学・生産技術研究所・助教
 研究者番号：60401270

研究成果の概要(和文)：全体崩壊型で設計された RC 造建築構造物に生じる地震損傷の進展を
 考慮した構造性能の定量的評価手法について検討を行った。初めに、RC 造梁部材を対象とし
 た静的載荷実験を行い、ひび割れ量の進展についてデータを収集するとともに、ひび割れ長さ
 の推定手法を提案し、その妥当性について検討した。次に、従来の損傷量に基づく「部材損傷
 度」と新たに提案した力学特性(エネルギー吸収能力)に基づく「部材損傷度」から RC 造架
 構の被災度をそれぞれ算定し、算定結果の比較と妥当性の検証を行った。

研究成果の概要(英文)：

Post-earthquake damage evaluation method for reinforced concrete (R/C) building structure with the
 weak-beam and strong-column system considering their damage propagation was proposed. Firstly, to
 evaluate visible damage of R/C members such as crack width and length, static loading tests of scaled
 R/C members were carried out. Employing the test results, damage propagation model was proposed and
 verified. Secondly, Post-earthquake damage evaluation methods due to a visible damage and a
 mechanical characteristic (such as an energy dissipation) are discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|-------|-----------|---------|-----------|
| 交付決定額 | 3,300,000 | 990,000 | 4,290,000 |

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：コンクリート構造

1. 研究開始当初の背景

我が国では 1981 年以前の旧基準で設計さ
 れた層崩壊型の建物を中心に地震被害が生
 じたこれまでの経験から、各層の鉛直支持部
 材の耐震性能に着目した被災度判定手法が

整備されてきた。しかし、東海、東南海、南
 海地震などの来たるべき大地震では、現行基
 準で設計されストックされてきた全体崩壊
 型の建物も被災し、地震後に多くの部材が損
 傷し建物の機能が失われることが予想され

る。ところが、新基準で設計された全体崩壊型の建物について、被災建築物の被災度を評価する具体的な基準は定められていない。そこで、現行基準で設計された全体崩壊型の架構に生じる地震損傷の進展を考慮した構造性能の定量的評価手法について検討する必要がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、現行基準で設計された全体崩壊型の架構に生じる地震損傷の進展を考慮した構造性能の定量的評価手法について検討を行うことである。具体的には、鉄筋コンクリート造梁部材を対象に、ひび割れ長さ・ひび割れ幅・コンクリートの剥落量を総合的かつ定量的に示すため基礎データ収集を目的とした静的載荷実験を行い、特にひび割れ発生間隔やひび割れ長さの進展について定量的な情報を得るとともに、ひび割れ量進展過程の推定手法を提案すること、および、現在の構造設計の主流である梁降伏型鉄筋コンクリート造建物を対象として、建物のエネルギー吸収能力に基づき地震による建物の安全限界までの余裕度の減少度合（全架構耐震性能残存率）を算出する手法を提案することを目的としている。

3. 研究の方法

(1) RC 梁部材の静的載荷実験の方法

試験体は梁部材を想定した約 1/2 スケールの縮小試験体で、曲げせん断ひび割れの曲げ部分が卓越する曲げ破壊型試験体 (F-60 試験体および F-90 試験体、せん断余裕度が 1.5 以上) 2 体と曲げせん断ひび割れのせん断部分が卓越する曲げせん断破壊型試験体 (FS-90 試験体、せん断余裕度が 1 程度) の計 3 体である。試験体名に示す数字はせん断補強筋間隔を表す。各試験体とも、部材断面 (215mm×400mm)、危険断面から反曲点位置

までの部材高さ (1018mm)、主筋の配筋は同一である。図-1 に各試験体の部材寸法および配筋詳細を示す。

本試験体では、予期しない初期ひび割れが外力と無関係なひび割れ発生および進展を誘発しないよう、ひび割れ発生位置の制御を目的として、ステンレス板 (厚さ=0.02mm, 埋め込み深さ=10mm) を試験体打設前に材軸方向に 30mm 間隔で挿入し、載荷時引張側幅面全域にスリットを設けている。30mm 間隔は、予想される曲げひび割れ発生間隔の数分の 1 程度で、コンクリートが型枠内を十分に充填しスリットが施工できる最小限の間隔である。

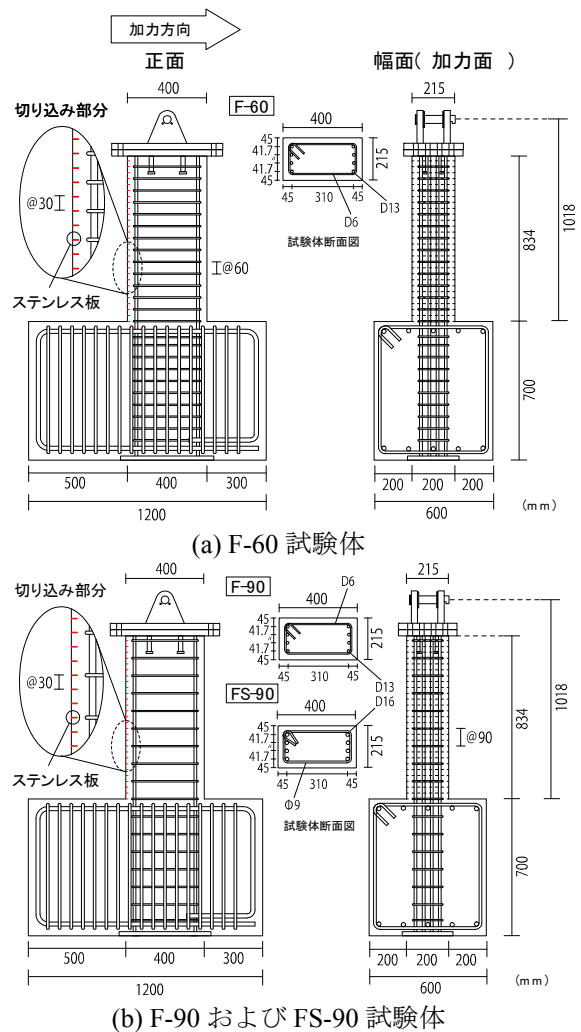


図-1 試験体配筋詳細

水平一方向の片側押し切り载荷とし、軸力をゼロとした。载荷時に変形角（試験体頂部の水平変位を試験体高さ=834mm で除した値）が 1/5000, 1/2000, 1/1000, 1/500, 1/250, 1/150, 1/111, 1/100, 1/75, 1/50, 1/37.5, 1/25[rad.] に到達した段階でひび割れ幅およびひび割れ長さの計測を行った。ただし、上記以外にひび割れが目視により確認できる最初の変形角についてもひび割れ幅およびひび割れ長さの計測を行った。図-2 に本実験の载荷装置図を、図-3 にひび割れ幅計測箇所の概略を示す。

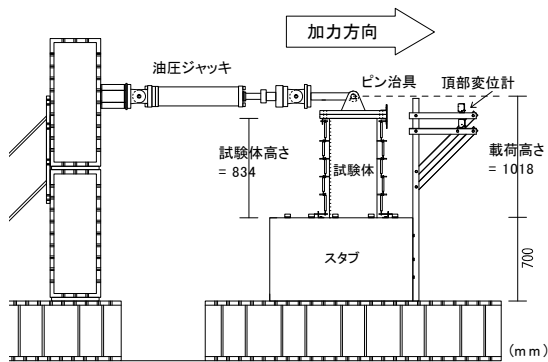


図-2 载荷装置全景

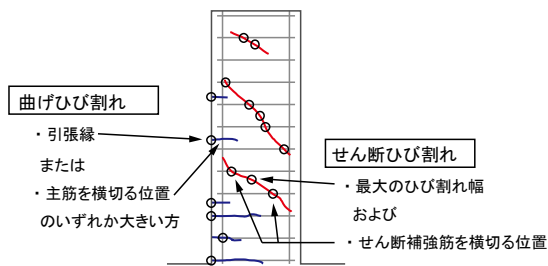


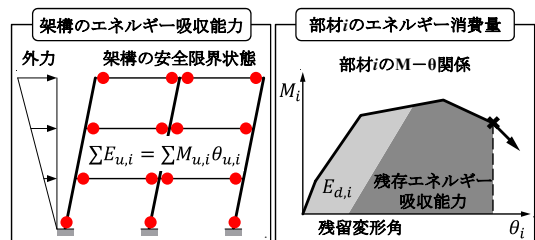
図-3 ひび割れ幅計測箇所

(2) 全体崩壊型 RC 造架構の残存耐震性能評価手法の検討方法

梁降伏型 RC 造架構における全架構残存耐震性能の評価手法の概念を図-4 に示す。単調载荷による架構の安全限界までのエネルギー吸収能力に対して、最大応答変形後の除荷時までの架構のエネルギー消費の後に残存するエネルギー吸収能力の量を比率で表し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} とする。

架構の水平耐力が最大水平耐力の 80% に低下する時を架構の安全限界と定め、架構を安全限界に至らしめる外力の大小で耐震安全性が定量的に表されるものとする。ここで、仮想仕事の原理から地震動による外力仕事が内力仕事である架構のエネルギー吸収量と釣り合うものとする、架構のエネルギー吸収量の大小に基づき耐震安全性が評価される。架構のエネルギー吸収量は架構の規模に応じて絶対量が異なり、単純に比較しても耐震安全性の良否を判断できるものではない。そこで、式(1)のように架構のエネルギー吸収量を基準化し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} とする。ここで、 $\sum E_{d,i}$: 最大応答変形後の除荷時変位までの部材 i のエネルギー消費量の総和、 $\sum E_{u,i}$: 架構の水平耐力が最大耐力の 80% 低下時まで部材 i が吸収したエネルギー量の総和である。

$$SI_{margin} = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n E_{d,i}}{\sum_{i=1}^n E_{u,i}} \right) \times 100 (\%) \quad (1)$$



式(1)により架構全体でエネルギーを集計
全架構耐震性能残存率 SI_{margin} を算出
 SI_{margin} と特徴区間の関係
架構の特徴区間を区分

図-4 全架構残存耐震性能評価概念図

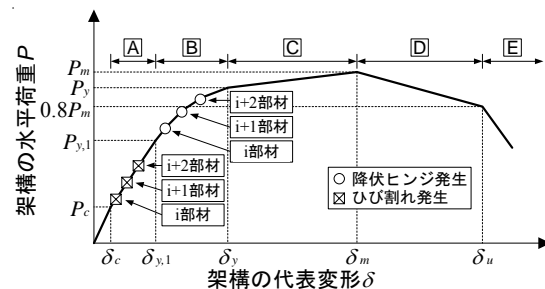


図-5 架構の特徴区間の概念

表-1 骨格曲線に見られる特徴区間の定義

| 特徴区間 | 定義 |
|------|------------------------------------|
| A区間 | ひび割れ点を超えた部材が生じてから降伏点を超えた部材が生じる迄の区間 |
| B区間 | 降伏ヒンジが架構内各所に進展しメカニズム形成に至るまでの区間 |
| C区間 | 架構が保有水平耐力を維持する区間 |
| D区間 | 耐力低下域に入り架構の水平耐力が最大耐力80%低下時に至るまでの区間 |
| E区間 | 水平力支持能力を喪失するまでの区間 |

また、架構の被災度が、見た目の損傷依存ではなく力学特性を反映するように、架構の骨格曲線に見られる特徴区間を被災度の進展を表す特徴区間と定義し（図-5 および表-1）、これを力学的に正しい被災度として以降の検討に用いる。ここで、A～E 区間は軽微～倒壊をそれぞれ想定している。

4. 研究成果

(1) RC 梁部材の静的載荷実験結果およびひび割れ長さ進展評価プログラムの開発

①実験結果

図-6 に各試験体の荷重-変形関係と最終破壊状況を、図-7 にひび割れ長さの推移を、図-8 に最大ひび割れ幅の推移を示す。

F-60 試験体は、3つの試験体のうち最も総ひび割れ長さが短い（図-7）。また、最大ひび割れ幅は、曲げひび割れで生じた最大ひび割れ幅がせん断ひび割れで生じた最大ひび割れ幅の1.5倍程度で推移した（図-8）。F-90 試験体は、F-60 試験体と似たひび割れ長さの推移を示し（図-7）、最大ひび割れ幅は、曲げひび割れが顕著に開く一方、せん断ひび割れ幅はあまり開かなかった（図-8）。FS-90 試験体は、3つの試験体のうち最も総ひび割れ長さが長く（図-7）、最大ひび割れ幅については、ひび割れ長さとは逆に他の2体に比べて小さめに推移した（図-8）。

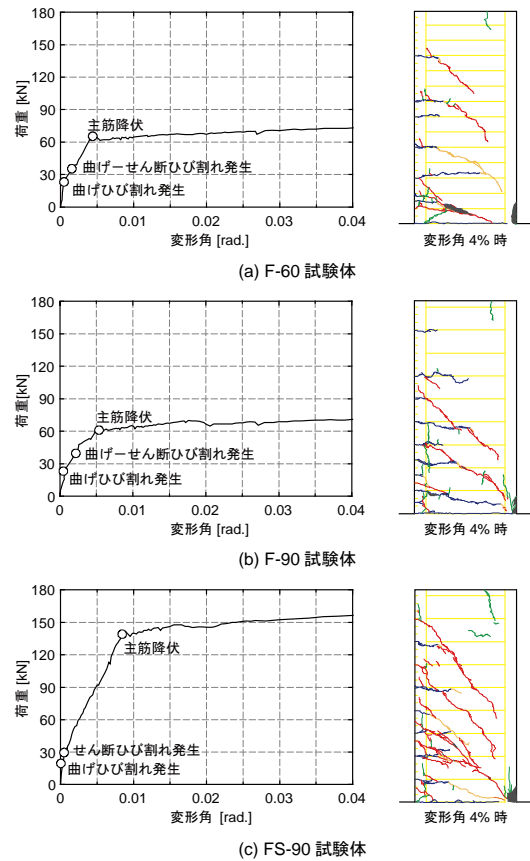


図-6 荷重-変形関係および破壊状況

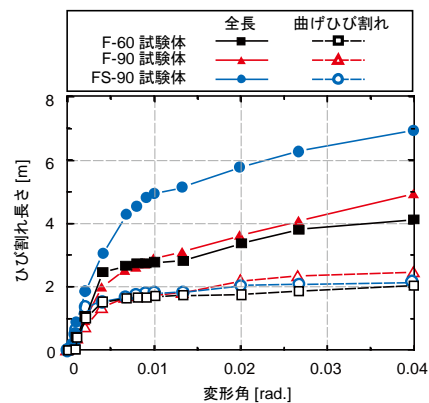


図-7 ひび割れ長さの推移

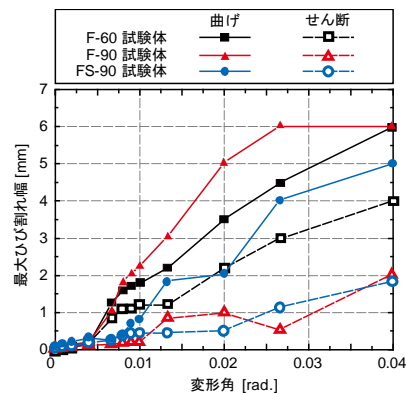


図-8 最大ひび割れ幅の推移

②ひび割れ長さ進展評価プログラムの開発

本研究では、曲げひび割れ長さおよび曲げせん断ひび割れ長さの進展は、曲げ理論に基づく断面解析により推定し、せん断ひび割れ長さの進展は想定したせん断ひび割れ発生直線状のせん断ひび割れ進展角度直交方向の歪度から推定することとした。曲げひび割れ長さおよび曲げせん断ひび割れ長さを曲げ理論に基づく断面解析により可能と判断した根拠は、筆者らが行った曲げせん断ひび割れの開閉角度の検討により、曲げせん断ひび割れの開閉と部材変形の関係が曲げひび割れと同一のメカニズムで（破壊モードがモードIになるものとして）説明できるためである。曲げ、曲げせん断およびせん断ひび割れ以外のひび割れ（例えば、付着割裂ひび割れ等）は対象としていない。

本研究で用いる簡便な断面解析は平面保持、完全付着を仮定しており、主筋の抜け出し変形分を考慮できない。ひび割れ長さの推定においては、与条件として荷重（モーメント）を定め、当該モーメント時の部材変形角は抜け出し変形分を考慮する日本建築学会の靱性指針に基づき算定し、当該モーメント時の部材断面歪度は断面解析に基づき算定することとした。ちなみに、断面解析におけるコンクリート構成則は、圧縮側は修正Kent&Park式を用い、引張側は引張強度までを線形、その後は引張軟化曲線（引張軟化係数=1.0）に従うものとした。また、コンクリートの圧縮強度、引張強度、および鉄筋の降伏強度は、材料試験の値を用いることとし、鉄筋の構成則については降伏後に勾配を持たないバイリニア型とした。

ひび割れ長さの推移および変形角1%時のひび割れ進展状況の推定結果と実験結果の比較を図-9に示す。本推定手法ではひび割れを線分として扱っているため、ひび割れ進展状

況の大まかな傾向は再現できても、ひび割れの複雑さ（フラクタル次元）が増すとひび割れ長さの推定値は実験結果を過小評価する傾向が現れているものと考えられる。

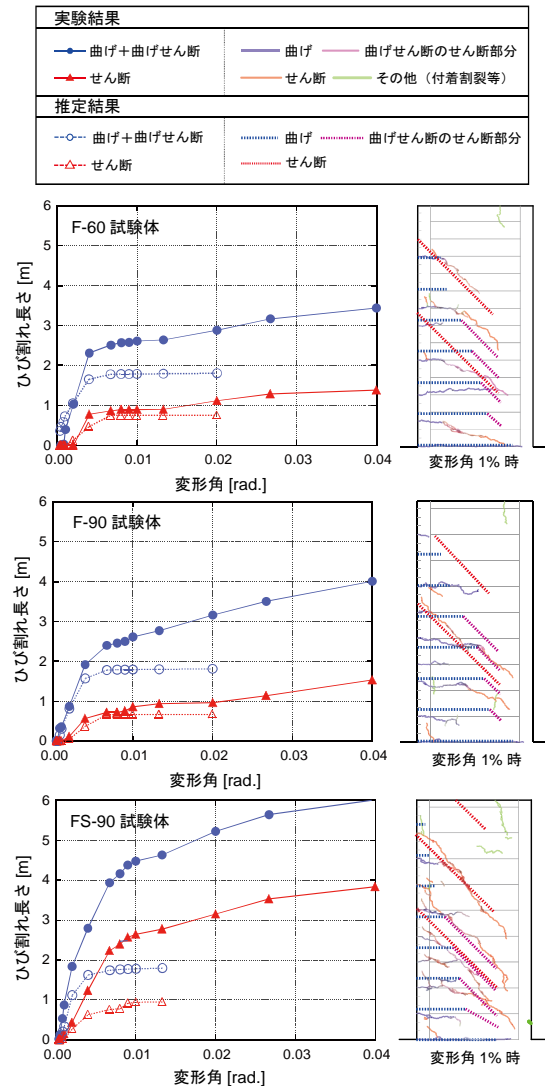


図-9 ひび割れ長さ進展評価結果の検討

(2) 全体崩壊型 RC 造架構の残存耐震性能評価手法の検討結果

既往の実験結果を用いて、従来法（見た目の損傷量）による部材損傷度判定に基づく架構残存耐震性能（耐震性能残存率 R ）判定結果と、提案手法（力学特性）による部材損傷度判定に基づく架構残存耐震性能（全架構耐震性能残存率 SI_{margin} ）の判定結果を比較した（図-10）。梁降伏型 RC 造架構である 1 層 2

スパンの RC 造 1/2 スケール平面試験体：2SH-64 試験体（中央柱のせん断補強筋比 p_w が 0.64%）および、梁降伏型である 1 層 1×1 スパンの RC 造実大立体試験体：1SF 試験体 架構のいずれにおいても、耐震性能残存率 R は全架構耐震性能残存率 SI_{margin} よりも小さな変形角で耐震性能が喪失されるものとして評価されたが、架構の骨格曲線に見られる特徴区間から定まる「力学的に正しい被災度」との対応を見てみると、C 区間（中破）相当での残存耐震性能が、耐震性能残存率 R では 10% 程度しかないと評価されているのに対し、全架構耐震性能残存率 SI_{margin} では 60% 程度残存しているものと評価されており、従来の略算法による耐震性能残存率 R に基づく被災度区分判定は梁降伏型 RC 造架構において被災度を過大評価し、提案手法ではより適切に梁降伏型架構の残存耐震性能を評価できる可能性が示唆された。

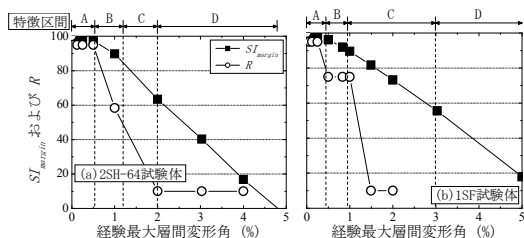


図-10 架構の SI_{margin} と R の比較

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 2 件)

- [1]高橋典之, 中埜良昭: 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ進展過程に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, 2013 年 査読有
- [2]権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: 梁降伏型鉄筋コンクリート造建物のエネルギー吸収能力に基づいた全架構残存耐震性能の評価手法, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, 2013 年 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- [1]権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: 梁の損傷を考慮した RC 造架構の残存耐震性能

- の評価手法 その 1 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の精算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 札幌, 2013 年 8 月 31 日
- [2]高橋典之, 権淳日, 崔琥, 中埜良昭: 梁の損傷を考慮した RC 造架構の残存耐震性能の評価手法 その 2 全架構耐震性能残存率 SI_{margin} の略算法, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 札幌, 2013 年 8 月 31 日
 - [3]高橋典之, 権淳日, 中埜良昭: RC 造建築物の被災度区分における工学量と修復量の関係, 日本地震工学会大会 2012 梗概集, pp.232-233, 東京, 2012 年 11 月 10 日
 - [4]権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: 地震により被災した梁降伏型 RC 造架構の耐震安全性能の評価手法に関する研究, 日本地震工学会大会 2012 梗概集, pp.234-235, 東京, 2012 年 11 月 10 日
 - [5]Takahashi, N., Nakano, Y. and Ito, Y.: A Quantification Model for Crack Propagation of R/C Members under Earthquake Loading, Proc. of the Fifteenth World Conference on Earthquake Engineering, Paper ID 1874, Lisbon, Portugal, Sep. 25, 2012
 - [6]高橋典之, 伊藤洋一, 崔琥, 中埜良昭: 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ評価手法に関する研究 その 1 実験概要および結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.249-250, 名古屋, 2012 年 9 月 14 日
 - [7]伊藤洋一, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: 鉄筋コンクリート梁部材のひび割れ長さ評価手法に関する研究 その 2 ひび割れ長さ推定手法の提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-2, pp.251-252, 名古屋, 2012 年 9 月 14 日
 - [8]権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: RC 造架構の耐震安全性と耐震修復性の相関モデルの提案 その 1 架構の耐震安全性と耐震修復性の定義, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-2, pp.655-656, 名古屋, 2012 年 9 月 14 日
 - [9]李煥九, 権淳日, 高橋典之, 崔琥, 中埜良昭: RC 造架構の耐震安全性と耐震修復性の相関モデルの提案 その 2 相関モデルへの実験結果の適用, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東海), C-2, pp.657-658, 名古屋, 2012 年 9 月 14 日

6. 研究組織

(1)研究代表者

高橋 典之 (TAKAHASHI NORIYUKI)
 東京大学・生産技術研究所・助教
 研究者番号: 60401270