

平成 27 年 6 月 18 日現在

機関番号：33803

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560678

研究課題名(和文) FEMによる超高強度RC部材の鋼繊維補強効果の解明と損傷評価型耐震設計法の提案

研究課題名(英文) Analytical Study on Reinforcing Effects of Steel Fiber for Ultra High Strength RC Members

研究代表者

野口 博 (NOGUCHI, HIROSHI)

静岡理工科大学・その他部局等・教授

研究者番号：20107535

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：超高強度コンクリートに圧縮靱性を付与するための横補強筋量を減らすために鋼繊維を混入した新構法が開発されている。既往の柱部材実験では、1%の鋼繊維混入によりひび割れ分散や必要耐力を確保できる事が報告された。鋼繊維補強には、コンクリートの引張強度、塑性能力の向上によるひび割れ分散効果があるが、実験的解明には限界がある。そこで、鉄筋、鋼繊維、コンクリート、鉄筋の付着の非線形性も考慮するFEM解析モデルを作成し、さらに鋼繊維補強を吸収エネルギーで評価することで、鋼繊維補強の超高強度RC部材・架構の耐力上昇機構を明らかにし、鋼繊維補強超高強度RCの耐震安全性の向上に貢献した。

研究成果の概要(英文)：New construction methods using steel fibers have been developed in order to decrease lateral reinforcement which can add compressive ductility to ultra high strength reinforced concrete. Previous experimental research results on column members indicated that crack dispersion and necessary strength were secured by mixing one percent steel fiber. The steel fiber reinforcement has an effect of crack dispersion which is caused by improvement of tensile strength and plastic capacity of concrete. But there is a limitation of solution for the effect of crack dispersion by the experimental research. In this study, the FEM inelastic analytical models of reinforcement, steel fiber, concrete and bond of reinforcement were developed. The mechanisms of strength increase of ultra high strength reinforced concrete structures were clarified by the consideration of the reinforcement effects of the steel fiber by the concepts of energy absorption.

研究分野：建築構造学、耐震工学、鉄筋コンクリート構造

キーワード：鉄筋コンクリート 超高強度コンクリート 鋼繊維 FEM解析 ひび割れ分散効果 せん断終局強度

1. 研究開始当初の背景

国内・国外の研究動向及び位置づけ：RC建物部材の設計においては、塑性域多方向入力により部材の損傷領域が拡大し、耐力劣化や塑性変形が加速されることは考慮されていない。

RC柱・梁接合部の多方向入力での実験が、米国 (Jirsa, 1997) や日本 (藤井, 2001) で行われ、多方向入力が接合部損傷領域の拡大を促進することが指摘された。立体接合部の挙動の把握には、立体変形や吸収歪エネルギー、材料の損傷度等、詳細情報が得られる解析的研究が必須である。(野口, 2005) 建築物の立体架構では、部材の挙動は周辺部材と連動し、架構中の柱・梁接合部は、床スラブや直交梁の拘束によりねじりの影響を受け、また隣接する柱や梁の主筋の付着劣化の影響を受ける。従って部材単体では、部材間の相互作用を把握できず、立体架構としての実験や解析が必要である。

超高強度コンクリートに圧縮靱性を付与するための横補強筋量を減らすために鋼繊維を混入した新構法が開発されている。既往の柱部材実験 (木村ら, 2009) では、1%の鋼繊維混入によりひび割れ分散や必要耐力を確保できる事が報告された。しかし、鋼繊維補強効果に関しては実験的研究が多いのが現状で、補強機構の解明による鋼繊維補強効果の合理的な説明には至っていない。

2. 研究の目的

超高強度コンクリートに圧縮靱性を付与するための横補強筋量を減らすために鋼繊維を混入した新構法が開発されている。既往の柱部材実験では、1%の鋼繊維混入によりひび割れ分散や必要耐力を確保できる事が報告された。鋼繊維補強には、コンクリートの引張強度、塑性能力の向上によるひび割れ分散効果があるが、実験的解明には限界がある。そこで、鉄筋周辺のコンクリート応力状態を反映するセンサー付きの付着モデルを考案し、さらに鋼繊維補強を吸収エネルギーで評価することで、鋼繊維補強の超高強度RC部材・架構の耐力上昇機構を明らかにし、その効果を陽に取り入れた損傷度評価型耐震設計法を提案し、鋼繊維補強超高強度RCの耐震安全性の向上に寄与することを目的とする。

3. 研究の方法

平成 24 年度

1) FEM 解析モデルの高度化

鋼繊維補強のモデル

応力センサー付き付着モデル

2) 解析結果の視覚化と損傷度評価

3) 立体架構での部材間相互作用

1 方向加力時単体と立体架構部材

2 方向加力時単体と立体架構

平成 25 年度

4) 立体架構での部材間相互作用

多方向加力時単体と立体架構部材

5) 部材の耐力劣化の部材損傷度への影響

平成 26 年度

6) 部材損傷度の建物損傷度への影響

7) 鋼繊維補強効果を陽に取り込んだ損傷度評価型耐震設計法の開発と提案

8) DVD 配布、Web 掲載等での研究成果の公開

4. 研究成果

1. はじめに

超高層鉄筋コンクリート(以下、RC)造建物では設計基準強度  $F_c$  が  $100\text{N/mm}^2$  を超えるコンクリートが実用化されているが、設計クライテリアを満足するためには多大な横補強筋量が必要となり、現実的には配筋が不可能となる場合が考えられる。そこで、横補強筋量の低減、ならびにコンクリートのひび割れ損傷制御を目的として、鋼繊維(SF)を混入した超高強度コンクリートの開発が進められており、実際の設計に採用されている。

高津ら 1), 2) は、SF 混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部の実験結果から、SF 混入量の増加による接合部せん断耐力の上昇を確認し、また、SF 混入によって、接合部の斜め圧縮ストラットの有効断面積、及び見かけの有効圧縮強度が上昇し、耐力が向上した可能性があることを指摘している。

本研究では、高橋ら 3), 坂下ら 4), 入澤ら 5) の研究に加えて、SF 混入量のパラメータを増やした FEM 解析から、柱・梁接合部のひび割れ幅などについて考察し、SF 混入によって柱・梁接合部のせん断耐力が上昇する原因について、さらに詳しく検討した。また、SF 混入による柱・梁接合部の斜め圧縮ストラットの引張りずみや圧縮強度低減の抑制などの影響を定量的に評価することによって、現行の靱性保証型指針 6) の設計式を修正し、SF を混入した超高強度 RC 柱・梁接合部のせん断耐力の評価方法を示した。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

対象とした試験体は、高津らによる実験試験体 1), 2) である。図-1 に実験試験体 ( $F_c150$ ) を示す。

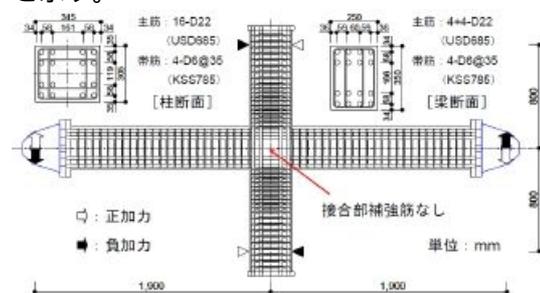


図-1 実験試験体( $F_c150$ )

実験時の加力は、梁両端に設置されたジャッキによる変位制御とし、柱には圧縮軸力比  $0.01(=N/(B D_j \sigma_c))$ 、 $N$ : 圧縮軸力[N]、 $B$ : 柱幅[mm]、 $D_j$ : 柱せい[mm]、 $\sigma_c$ : コンクリート圧縮強度 [ $\text{N/mm}^2$ ]) の一定軸力が導入された。

実験では、Fc150 の試験体で SF 混入率を 0.0, 0.5, 1.0%, Fc120 の試験体で 0.0, 0.5% として変動因子を与えている。解析では、SF0.0% 試験体に対する SF0.5% 試験体の耐力上昇に比べ、SF0.5% 試験体に対する SF1.0% 試験体の耐力上昇が小さいことから、本研究では Fc150, 120 シリーズともに SF 混入率を 0.0, 0.1, 0.3, 0.5, 1.0, 1.5% として変動因子を増やして解析を行った。

## 2.2 解析モデル

### (1) コンクリート

本研究では、余・野口らにより開発され<sup>7)</sup>、洪・野口ら<sup>8)</sup>により改良された 3 次元 FEM 解析プログラムを用いた。コンクリート要素には、アイソパラメトリック 8 節点ソリッド要素を、構成則には、Darwin-Pecknold の等価一軸ひずみに基づく直交異方性非弾性モデルを 3 次元に拡張したモデルを用いた。破壊曲面には、Kupfer らの実験に基づく William-Warnke の 5 パラメータモデルを仮定した。ひび割れモデルには、直交固定ひび割れモデルを、ひび割れ方向のせん断伝達特性には、Al-Mahaidi モデルを用いた。

応力 - ひずみ関係には、圧縮側の上昇域では本研究で使用する高強度コンクリートに対応した Fafitis-Shah モデルを、下降域では横補強筋の拘束効果を考慮した Kent-Park モデルを用いた。引張軟化域では、SF 無混入試験体には白井モデルを用い、SF 混入試験体には森田・角モデル<sup>9)</sup>のパラメータ  $c$  を、竹中工務店技術研究所により行われた SF 混入コンクリートの引張基礎実験をもとに、小林・睦好<sup>10)</sup>による推定法によって設定したモデルを用いた。

### (2) 鉄筋

鉄筋には軸方向剛性のみを考慮した 2 節点線材要素を用い、応力 - ひずみ関係には修正 Menegotto-Pinto モデルを用いた。

### (3) 付着

付着にはボンドリンク要素を用い、付着特性は参考文献<sup>11)</sup>から導いた。

## 2.3 要素分割および境界条件

要素分割は試験体の対称性から Y 方向を 1/2 に切断し、切断面を Y 方向拘束とした。せん断力を与える際の境界条件は実験と同様に梁端加力とし、梁端中央列を変位制御により加力した。層せん断力を求める際の柱の拘束は、柱の回転を考慮し、上側反力点は中央列を X 方向拘束(切断面は XY 方向拘束)、下側反力点は同じく中央列を XZ 方向拘束(切断面は XYZ 方向拘束)とした。

## 3. 解析結果

解析における材料特性は、実験と同一とし、その他の解析では SF 混入の影響を確認するため、材料特性を統一した。

### 3.1 層せん断力 - 層間変位角関係

図-2 に SF 無混入試験体の層せん断力 - 層間変位角関係を示す。Fc150, 120 ともに解析と実験の最大耐力は良好に対応している。

### 3.2 最大耐力上昇率

解析における、SF 無混入試験体に対する SF 混

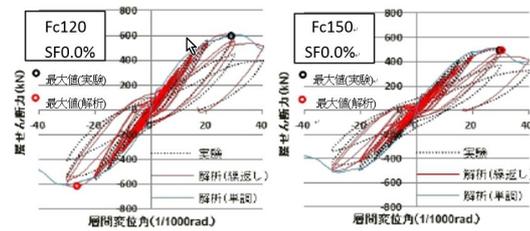


図-2 層せん断力 - 層間変位角関係

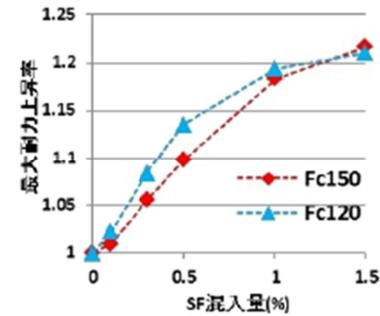


図-3 最大耐力上昇率

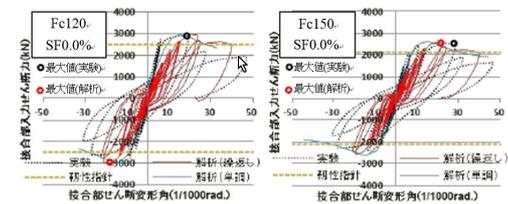


図-4 接合部の入力せん断力 - せん断変形角

入試験体の最大耐力上昇率を図-3 に示す。Fc150, 120 試験体ともに、SF 混入量が 0.3 ~ 1.5% の範囲では、SF 混入量の増加に従って最大耐力上昇率が頭打ちになることがわかる。

### 3.3 接合部入力せん断力 - 接合部せん断変形角関係

図-4 に SF 無混入試験体の接合部入力せん断力 - 接合部せん断変形角関係を示す。接合部せん断変形角は接合部パネルの 4 隅の節点の変位から求め、また、接合部入力せん断力  $V_j$  は以下の式(1)から算出した。

$$V_j = (Q_b + Q_b') \cdot \{(L/j_b) - (L_b/h)\} / 2 \quad (1)$$

ここで、 $Q_b, Q_b'$  は左右の梁のせん断力 [N]、 $L$  は梁の内法スパン長 ( $=L_b - D_j$ ) [mm]、 $L_b$  は梁のスパン長 [mm]、 $j_b$  は梁の応力中心間距離 ( $=7d/8$ ) [mm]、 $d$  は梁有効せい [mm]、 $h$  は階高 [mm] とする。

同図に韌性保証型指針 6) から求めた接合部せん断強度 ( $=0.85$ ) を示す。解析では、Fc150, 120 試験体ともに、接合部せん断強度が計算値を上回った。また、実験と同様に最大耐力に到達する直前と R (層間変位角) = 40/1000rad. のピーク時に接合部せん断

変形角が大きく増加していることから、試験体の破壊モードは接合部せん断破壊型であると考えられる。

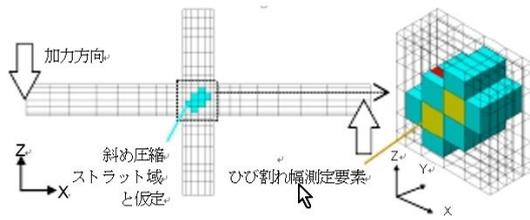


図-5 測定要素 (Fc150)

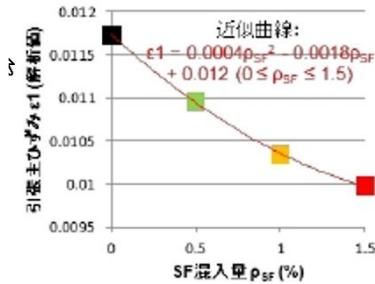


図-6 引張主ひずみ(解析値)と SF 混入量

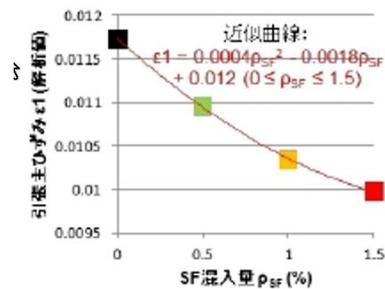


図-7 圧縮強度低減係数(解析値)と引張主ひずみ(近似値)

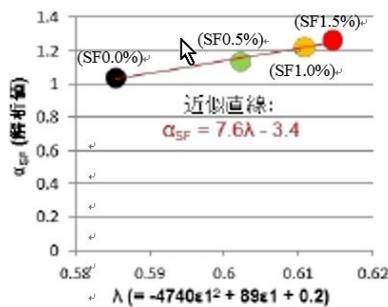
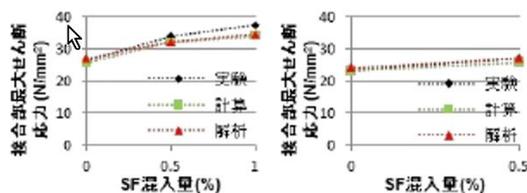


図-8 αSF(解析)と圧縮強度低減係数(近似値)



(a) Fc150 (b) Fc120

図-9 接合部最大せん断応力

### 3.4 コンクリートの引張主ひずみ

図-5に仮定するFc150試験体の接合部の斜め圧縮ストラット域(左図:青色位置)における、コンクリートの引張主ひずみ(1)の  $R=20/1000\text{rad}$ .のピーク時の平均とSF混入量の関係を図-6に示す。SF混入量の増加に従い、ひずみの進展が抑制されている。これは、SFのブリッジ効果によるものと考えられる。

### 3.6 コンクリートの圧縮強度低減係数

圧縮強度低減係数の定義は以下の飯塚・野口モデル<sup>12)</sup>によった。

$$= \exp\{-0.2(\sigma_{ct}/\sigma_{c0})^{0.5} \times K(f_c)\} (\leq 1) \quad (2)$$

$$K(f_c) = -f_c/250 \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_{ct}$  はひび割れ直交方向の引張ひずみ、 $\sigma_{c0}$  は一軸圧縮強度時ひずみとする。なお、Fc150及び120では圧縮強度を過大に低減させる傾向があるため、本研究ではFc60程度の低減として解析を行った。

図-5に仮定するFc150試験体の接合部の斜め圧縮ストラット域(左図:青色位置)における、コンクリートの  $R=20/1000\text{rad}$ .のピーク時の平均と  $\epsilon_1$ の近似値の関係を図-7に示す。 $\epsilon_1$ の減少に従い、 $\alpha_{SF}$ の値が増加している。

### 4. SFを混入したRC柱・梁接合部のせん断耐力

現行の靱性保証型指針設計式を修正することによって、SFを混入した柱・梁接合部のせん断強度を評価する方法について、以下の式(4)を用いて検討する。

$$F_{j,SF} = \alpha_{SF} \times 0.8 \sigma_{B}^{0.7} \quad (4)$$

ここで、 $F_{j,SF}$  はSFを混入した柱・梁接合部のせん断強度の基準値  $[\text{N}/\text{mm}^2]$ とする。図-8に、Fc150試験体における、 $\alpha_{SF}$ (解析値)と  $R=20/1000\text{rad}$ .のピーク時の  $\epsilon_1$ (近似値)の関係を示す。 $\alpha_{SF}$ は、接合部最大せん断応力の解析値を  $0.8 \sigma_{B}^{0.7}$ で除して求めた。

解析結果から、SFを混入した超高強度RC柱・梁接合部では、SFのブリッジ効果によって引張ひずみの進展が抑制され、ひび割れたコンクリートの有効圧縮強度がSF無混入の柱・梁接合部に比べて低下しないため、せん断耐力が向上すると考えることができる。

コンクリートの引張主ひずみ(1)がSF混入量の増加に従って減少し(図-6)、圧縮強度低減係数( )が  $\alpha_{SF}$ の減少に従って増加し(図-7)、 $\sigma_{B}$ が  $\alpha_{SF}$ の増加に従って増加する(図-8)と仮定した場合の回帰式を求めると、

$$\sigma_{B} = -0.0058 \alpha_{SF}^4 + 0.052 \alpha_{SF}^3 - 0.19 \alpha_{SF}^2 + 0.34 \alpha_{SF} + 0.99 \quad (5)$$

となった。ここで、 $\alpha_{SF}$ はSF混入量(%)とする。

図-9 に接合部最大せん断応力と SF 混入量の関係を示す。式(5)を式(4)に代入して求めた計算値は、実験値に対して安全側の値を示した。

## 5. まとめ

SF 混入超高強度鉄筋コンクリートを用いた柱・梁接合部の3次元 FEM 解析を行い、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

(1) SF 混入量の増加に従って接合部のひび割れ幅は減少する。

(2) SF を混入した柱・梁接合部では、SF のブリッジ効果によって引張ひずみの進展が抑制され、ひび割れたコンクリートの有効圧縮強度が SF 無混入の柱・梁接合部ほど低下しないため、せん断耐力が向上する。

(3) 現行の靱性保証型指針設計式を修正することにより、SF を混入した超高強度 RC 柱・梁接合部のせん断耐力を評価した結果、計算値は実験値に対して安全側の値を示した。

## 参考文献

- 1) 高津比呂人, 木村秀樹: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱梁接合部に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 559-564, 2009
- 2) 高津比呂人, 木村秀樹: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱梁接合部に関する実験的研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp. 389-392, 2009
- 3) 高橋誠, 坂下智幸, 柏崎隆志, 野口博: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部に関する解析的研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp. 393-396, 2009
- 4) 坂下智幸, 入澤尚人, 柏崎隆志, 野口博, 木村秀樹, 高津比呂人: 鋼繊維を混入した超高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震性能に関する解析的研究, AIJ 大会学術講演梗概集, pp. 449-452, 2010
- 5) 入澤尚人, 柏崎隆志, 野口博, 高津比呂人: 鋼繊維混入超高強度コンクリートを用いた柱・梁接合部のせん断耐力に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 2, pp. 301-306, 2011
- 6) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999
- 7) 余勇, 柏崎隆志, 野口博: 繰返し載荷時の RC 柱部材の性能評価に関する 3 次元 FEM 解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 157-162, 2005
- 8) 洪杰, 柏崎隆志, 野口博: 3 次元 FEM 解析による RC 造柱・梁接合部のせん断強度に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 301-306, 2009
- 9) 森田司郎, 角徹三: 鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究, セメント技術年報, Vol. 18, pp. 426-430, 1963
- 10) 小林一輔, 睦好宏史: 繊維の分散と配向を考慮した鋼繊維補強コンクリート部材の強度と変形, 土木学会論文報告集, Vol. 299,

pp. 101-112, 1980

11) 辻大二郎ほか:  $F_c 200N/mm^2$  超高性能コンクリートの開発(その 2)自己収縮およびその他の力学特性, AIJ 大会学術講演梗概集, pp. 1089-1090, 2008

12) 飯塚崇文, 野口博: 普通強度から高強度までの材料を用いた鉄筋コンクリート部材の非線形有限要素解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 14, No. 2, pp. 9-14, 1992.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 7 件)

孫宏晨, 柏崎隆志, 和泉信之, 野口博  
2 方向繰返し載荷を受ける RC 立体柱・梁接合部のせん断性能に関する解析的研究, コンクリート工学論文集, 査読有, 25 巻, 2014 年, pp. 65-73

藤橋裕太, 柏崎隆志, 和泉信之, 野口博,  
RC 柱のせん断性能に及ぼす軸力の影響に関する 3 次元 FEM 解析, コンクリート工学論文集, 査読有, 35 巻, 2013 年, pp. 109-114

藤原賢二, 柏崎隆志, 和泉信之, 野口博,  
RC 内柱・梁接合部のせん断強度に及ぼす柱軸力と梁主筋付着の影響に関する 3 次元 FEM 解析, コンクリート工学論文集, 査読有, 35 巻, 2013 年, pp. 229-234

張毅, 柏崎隆志, 和泉信之, 野口博, 梁側面が柱側面を越える偏心 RC 柱・梁接合部の 3 次元 FEM 解析, コンクリート工学論文集, 査読有, 35 巻, 2013 年, pp. 253-258

H. Noguchi, T. Kashiwazaki and H. Takatsu: Analytical Study on Shear Strength of Ultra High Strength Concrete Beam-Column Joints Containing Steel Fiber, Proc. of International Association for Bridge and Structural Engineering Conf., Sharm El-Sheikh, Egypt, 査読有, Vol. 98, 2012, pp. 252-253

H. Noguchi, T. Kashiwazaki, H. Takatsu and H. Kimura: Analytical Study on Shear Resistance of Beam-Column Joints Composed of Ultra High Strength Concrete Containing Steel Fiber, Proc. of 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 査読有, 2012, Paper ID:257, 10pps.

T. Kashiwazaki, C. Jin and H. Noguchi: Analytical Study on Input Shear Forces and Bond Conditions of Beam Main Bars of RC Interior Beam-Column Joints, Proc. of 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 査読有, Paper ID:670, 2012, 10pps.

[学会発表](計 3 件)

野口博, 孫宏晨, 柏崎隆志, 和泉信之, 多数回繰返し加力を受ける RC 柱・梁接合部の 3 次元解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2014 年 9 月, 神戸大学, 兵庫県神戸市  
小原敦史, 柏崎隆志, 和泉信之, 野口博, 高津比呂人, 木村秀樹, 鋼繊維混入超高強度

RC 柱・梁接合部のせん断耐力に関する解析的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、2013 年 9 月、北海道大学、北海道札幌市

小原敦史、高津比呂人、木村秀樹、和泉信之、野口博：鋼繊維混入超高強度鉄筋コンクリート柱・梁接合部の耐震性能に関する FEM 解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2、構造、2012 年 9 月、名古屋大学東山キャンパス、愛知県名古屋市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

野口 博 (NOGUCHI, Hiroshi)

静岡理工大学・学長

研究者番号：20107535

### (2) 研究分担者

和泉 信之 (IZUMI Nobuyuki)

千葉大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80526773

柏崎 隆志 (KASHIWAZAKI, Takashi)

千葉大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：40251178