

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25289179

研究課題名(和文) 接合部破壊型の柱梁接合部を含む多層鉄筋コンクリート造骨組架構の耐震設計法

研究課題名(英文) Earthquake Resisting Design of Reinforced Concrete Multi-storied Frame Buildings with Beam-column Joints failing in Joint Hinging

研究代表者

塩原 等 (SHIOHARA, HITOSHI)

東京大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：50272365

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、接合部降伏する柱梁接合部を含む多層鉄筋コンクリート造骨組架構の耐震安全性を解明することである。そのために、柱梁接合部を含む部分架構試験体の静的載荷実験を行い、接合部降伏の現象をより詳細に解明した。さらに、接合部降伏を正確にモデル化することのできる柱梁接合部のマクロエレメントを使って、多様な地震外力条件における多層骨組の地震応答解析を行って、架構の耐震性に及ぼす柱梁強度比や接合部横補強筋の影響を明らかにし、現行基準にしたがって梁降伏型に設計されていたとしても接合部降伏する場合があります。その場合には、中間の特定層に変形が集中する層崩壊現象が起こり易くなることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Seismic resistance of multi-story reinforced concrete frame buildings with beam-column joints failing in joint hinging were investigated by statically lateral load tests of scaled model beam-column joint subassemblages. Then non-linear time history earthquake response analysis with macro element developed for beam-column joints exhibiting joint hinging calibrated by the tests, were carried out under various seismic motions. Through the analysis, it is revealed that the column-to-beam strength ratio as well as the amount of transverse reinforcements in the beam-column joints are critical to control the joint hinging and the multi-story building with beam-column joints failing in joint hinging tends to be more vulnerable to story collapse due to concentration of deflection at a particular story at mid-height even if it is designed as beam sway mechanism.

研究分野：建築構造学特に鉄筋コンクリート構造及び耐震設計

キーワード：鉄筋コンクリート 柱梁接合部 耐震性 地震応答解析 幾何学的非線形 静的繰り返し載荷実験 柱梁強度比 接合部降伏

### 1. 研究開始当初の背景

梁曲げ降伏型に設計される鉄筋コンクリート造ラーメンの架構で、柱梁接合部のせん断強度の余裕度によらず、現行の耐震設計基準の諸規定をすべて満足させても、柱梁接合部に損傷が集中し、梁曲げ降伏ヒンジが形成されず、履歴形状が著しいスリップ性状を示すもの(現在では、「接合部降伏」と呼ばれている。)があることが発見された。

接合部降伏の現象は、これまで知られていなかった現象であるため、これまでの建物の耐震設計基準では全く考慮されてこなかった。そのため、柱梁接合部の破壊を考慮した骨組の多層骨組架構の耐震性を、地震応答解析などに基づいて評価し、これらに基づいた柱梁接合部の合理的な耐震規定を検討する必要があった。

### 2. 研究の目的

鉄筋コンクリート柱梁接合部の接合部降伏の現象が起こった場合の、多層鉄筋コンクリート造骨組架構の耐震安全性を解明することである。

具体的には、柱梁接合部の破壊現象を正確にモデル化するための非線形地震応答解析法を開発し、多層骨組の地震応答解析を行って、架構の耐震性に及ぼす接合部降伏の現象の影響を明らかにするとともに、そのモデルの妥当性を既往の実験結果の分析及び新たに実施する部分架構の耐震実験により検証するとともに、多層骨組における接合部降伏の現象に対応した耐震設計の考え方と新しい耐震規定を提案することである。

### 3. 研究の方法

(1) 「柱梁接合部のマクロエレメントと非線形地震応答解析法を開発と多層骨組の地震応答解析」

柱梁接合部の入力せん断強度が接合部せん断強度を下回るようにした場合であっても、柱と梁の強度比が1.0に近い梁曲げ降伏型の骨組では、接合部降伏が起こり、地震応答が増大する、架構の不安定化と特定層への変形集中が起こることが指摘されている。(文献 )。そこで鉄筋コンクリート造無限均等ラーメンから1スパンを取り出した平面もしくは擬似立体骨組について、接合部降伏と梁曲げ降伏の両方を考慮できる解析モデルを用いた解析により、接合部降伏型の履歴性状が地震応答に与える影響を検討した。

具体的には、柱梁強度比と接合部横補強筋量等を変化させることにより、架構の履歴性状を変化させた。解析対象は無限均等ラーメンの1スパンを切り出した鉄筋コンクリート部分架構で柱梁接合部はマクロエレメント(文献 )をベースに、鉄筋、主筋とコンクリートの付着を表す一軸ばねのみから構成した。梁と柱は線材に置換したForce-Based Element を用い、各積分点のモーメント 曲率関係を履歴モデルで表す。柱

では幾何剛性マトリックスにより P-デルタ効果を考慮する。これらの解析プログラムは、Matlab を用いたインハウスのソフトウェアとして開発した。

非線形地震応答解析の解析対象建物は、現行の耐震設計規定を満足するように4・8・12層建物を試設計して作成した。平面架構においては、柱梁強度比、横補強筋量、立体架構においては、偏心の程度についても考慮した。入力地震動は、告示の極めて稀に発生する地震動の加速度応答スペクトルに適合する模擬地震動及び実観測記録などを用いた。

(2) 「スラブ、直交梁を有する柱梁接合部の耐震性能の実験」

接合部降伏の現象は、縮小部分架構試験体の静的水平加力実験や実大骨組の三次元震動台実験により、既に確認されている。しかし、スラブや直交梁がある場合の、部分架構の静的水平加力実験は行われておいたため、スラブや直交梁付気で接合部降伏する場合の強度や復元力特性は確かめられていない。そこで、試験体の付帯スラブ、直交梁の付架構における接合部降伏の現象を再現するため、文献 の実験の梁柱のスパン中央で切り出して1/2.2に縮小した十字形及びト形柱梁接合部部分架構試験体を作成した。これらに震動台実験における応答変位に基づいた変位を強制し、架構内の柱梁接合部の挙動を再現した。試験体は4体とし、スラブの有無、柱主筋量、および十字形とト形の柱梁接合部の形状の違いとした。

(3) 「梁長期せん断力を載荷した柱梁接合部の耐震性能の実験」

既往の柱梁接合部部分架構の耐震実験では、固定荷重や積載荷重などの梁に載荷される長期荷重を載荷することはなく、それらが地震荷重時の柱梁接合部の性能に及ぼす影響はないと仮定されてきた。この妥当性を検討するため、柱と梁の反曲点で切り出した十字形柱梁接合部部分架構に長期荷重に相当する鉛直荷重を載荷しながら正負繰返し載荷実験を行い、その影響を検討した。試験体は平面十字形部分架構4体とし、柱梁接合部の損傷による梁せん断力の柱への伝達機構の変化を検討するため、梁の長期せん断力の有無と柱梁強度比を実験因子とした。ここで、梁の長期せん断力は柱梁接合部のフェースに作用するせん断力とモーメントの大きさが想定する架構内の状態を模すよう、梁上の2点に載荷し、静的漸増振幅載荷を行った。

(4) 「二方向加力を受ける立体柱梁部分架構の柱梁接合部の耐震性能の実験(2013年度)」

鉄筋コンクリート柱梁接合部の接合部降伏の現象を検証するための既往の実験研究は、平面の十字形および外柱梁部分架構試験体によるものが中心であり、柱に対して直交する二方向から梁が貫入する立体柱梁部分

架構試験体を用いた実験研究は少ない。しかし実建物における隅柱では、柱梁接合部の破壊によって軸力を保持できずに部分的に落階を生じるような地震被害が外国では発生している（例えば1993年グアム島地震）。隅柱では地震動による水平力の方向によって軸力が増減するため、柱梁曲げ強度比は低下することがある。上述の地震被害も鑑みると、三方向加力時の隅柱梁接合部の耐震性能を把握することは重要である。

そこで、梁が直交する二方向から1本ずつ貫入する立体隅柱梁部分架構試験体2体を用いて、圧縮軸力のみを変えることによって柱梁曲げ耐力比を1.4および2.3とした場合の三方向加力実験を行い、柱梁接合部の破壊機構を詳細に検証した。なお比較用に平面の隅柱梁部分架構試験体1体にも水平一方向の静的載荷実験を行った。

(5) 「二方向加力を受ける立体柱梁部分架構の柱梁接合部の耐震性能の実験(2014年度)」

架構の柱梁曲げ耐力比は、柱軸力のみならず柱・梁の主筋量を変えることによっても変化する。そこで2014年度には立体隅柱梁部分架構試験体の柱断面を300×300mmとして前年度よりも小さくしたうえで、柱主筋量を8-D16(材種SD295A)あるいは8-D19(材種SD490)とすることによって柱梁曲げ耐力比を1.5および2.6とした場合の三方向加力実験を行った。あわせて柱梁接合部の曲げ破壊に対するスラブの影響を調査するために、柱主筋を8-D16(材種SD295A)とした試験体にスラブ(厚さ70mm)を付加した試験体1体を用意した。スラブ筋はD6を210mm間隔でシングル配筋した。

(6) 「実用的な耐震規定の検討」

従来型の骨組解析プログラムを使う耐震設計においても適用することのできる、柱・梁強度比に関する新しい実用的な耐震規定を提案するために、既往の文献を収集して柱梁接合部の実験データベースを作成し、接合部降伏した柱梁接合部について、終局強度に及ぼす設計因子の分析を行った。設計因子としては、柱梁強度比、梁の引張り主筋比、コンクリート強度、定着長さ、アスペクト比、接合部横補強筋量を取り上げ、その影響を検討した。

#### 4. 研究成果

(1) 「柱梁接合部のマクロエレメントと非線形地震応答解析法を開発と多層骨組の地震応答解析(2013~2015年度)」

鉄筋コンクリート造架構の大変形時における柱梁接合部の損傷による架構の耐力低下を考慮し、多層骨組構造の倒壊限界について地震応答解析より検討した。大変形時は、柱梁接合部中央部の圧縮ストラットが劣化して圧縮域が広がり、応力中心間距離が短くなることで架構の耐力低下が生じた。その

ため、本震で一度柱梁接合部が損傷を受け、架構での耐力低下がある場合、本震より小さい余震であっても損傷が進行し倒壊限界の震度が小さくなることが確かめられた。

接合部降伏および梁曲げ降伏を考慮した鉄筋コンクリート造骨組の解析モデルを用いて、主として柱梁強度比と接合部横補強筋量が架構の履歴特性と地震応答に与える影響を検討した。その結果、安全限界時の告示スペクトルを基準として、入力倍率が50%より小さい範囲では、最大層間変形角は、柱梁強度比や接合部横補強筋量の影響は見られなかった。しかし、入力倍率が50%より大きな場合には、柱梁強度比が1.5程度より小さい場合、または、横補強筋量が不十分である場合、特に中層から上層において、最大層間変形角が最大5倍程度にまで増大するケースが見られ、接合部降伏により地震応答が増大した。またその場合、上層の特定の層で最大層間変形角が大きくなり、中間層崩壊を起こしやすいことが確かめられた。また、柱梁強度比1.2のケースでは、接合部横補強筋量が多くても、接合部内の柱主筋が降伏し、特定の層に最大層間変形角が集中しているケースが見られた。

柱梁接合部降伏型のRC建物は、梁降伏型より偏心の影響を受けやすく、ねじり変形角や層間変形角が増大する可能性が高いことが地震応答解析より確かめられた。

(2) 「スラブ、直交梁を有する柱梁接合部の耐震性能の実験」

実建物と同様にスラブ・直交梁が付帯する場合であっても、柱梁強度比が1.0では、接合部降伏は避けられないが、柱梁強度比を大きくすることで架構の最大耐力は増大し、履歴性状はスリップ型から改善され、柱梁接合部の損傷は抑制された。

スラブの無い場合に比べ、スラブが付帯することによりスラブ筋の効果で架構の最大耐力は増大するが、柱梁強度比が小さくなるため柱梁接合部により損傷が集中し、履歴ループもスリップ性状がより顕著となった。

スラブ付ト形部分架構では、正負で破壊性状が異なり、スラブが圧縮となる側では梁曲げ破壊、スラブが引張となる側では接合部降伏が生じた。

最大耐力時にスラブ筋の降伏が生じていた範囲は十字形部分架構とト形部分架構で異なり、十字形部分架構ではスラブ筋を梁の曲げ強度に算定時に算入する範囲で、ト形部分架構では試験体のスラブのほぼ全幅でスラブ筋のひずみが降伏ひずみに達していた。

また、柱梁強度比を大きくすることでスラブ筋の降伏範囲も広がっていた。

(3) 「梁長期せん断力を載荷した柱梁接合部の耐震性能」

梁の長期せん断力の有無は、接合部降伏する十字形部分架構の破壊性状や履歴特性に及ぼす影響は小さい。ただし、主筋降伏の影響により柱梁接合部の上柱脚部の剛性が低下し、架構の応力や変形分布が変化するので、架構の耐震性能に及ぼす影響は検討が必要である。

柱梁強度比が小さいと、梁の長期せん断力により柱梁接合部の上側の柱の主筋の降伏がより小さい水平荷重で生じ、上柱の変形が大きくなる。柱梁強度比が大きい場合にはこの傾向は見られない。

柱梁強度比が小さい場合、梁上端筋および上柱主筋の降伏が早期に生じ、主筋降伏後の塑性ひずみによって繰り返し載荷時に上柱と梁の入隅部のひび割れが閉じなくなるため柱梁接合部の応力伝達機構に変化が生じる。そのため、最大耐力は小さくなる場合がある。

柱梁強度比が小さいと、梁の長期せん断力がある場合の方が無い場合に比べて層間変形角 1~3%の変形における等価粘性減衰定数は大きくなる。柱梁強度比が大きい場合には、十字形部分架構の等価粘性減衰定数に及ぼす梁の長期せん断力の影響は見られなかった。

(4) 「二方向加力を受ける立体柱梁部分架構の柱梁接合部の耐震性能 (2013 年度)」

平面架構の履歴形状は顕著なスリップ型となったが、立体架構では平面架構ほどのスリップ性状は見られなかった。柱圧縮軸力を 3 倍にした立体架構では紡錘形の履歴形状となった。

定着板によって機械式定着した梁主筋の柱梁接合部内での付着力は、最大耐力前後 (柱軸力比 0.04 では層間変形角 1.5%時、柱軸力比 0.12 では層間変形角 3%時) に失われた。柱梁接合部が最終的に曲げ破壊したときの梁主筋引張り力は端部支圧力によって接合部コアコンクリートに伝達された。

層間変位に対して各部の変形の占める割合は平面架構では、最大耐力時の層間変形角 2%時に梁が 60%、柱梁接合部が 30%および柱が 10%であった。柱軸力比 0.04 の立体架構は平面架構より柱梁接合部の変形割合が大きく、柱圧縮軸力を 3 倍にした立体架構では最大耐力まで梁の変形割合が支配的であった。

層間変形角 1%時の水平二方向の層せん断力が耐力平面上で描く軌跡は、軸力比 0.04 の立体架構では柱梁接合部の曲げ破壊により円弧となり、柱圧縮軸力を 3 倍にした立体架構では柱梁接合部の損傷が軽微だったため矩形となった。柱圧縮軸力を 3 倍にすることによって、水平二方向加力時の柱梁接合部の曲げ耐力 (水平各方向耐力のベクトル和)

は 1.2 倍から 1.4 倍程度まで増大した。柱圧縮軸力を 3 倍にした柱梁接合部は最大耐力後に著しく水平耐力が低下し、軸力保持の限界直前まで脆性的に破壊した。柱主筋量および接合部横補強筋量が国内法規等で要求される下限程度である隅柱梁接合部では、柱圧縮軸力が過大になると軸力を保持できなくなることがあるので配慮が必要である。

水平二方向加力時の隅柱梁接合部の曲げ終局耐力は、楠原・塩原による柱梁接合部曲げ終局耐力の計算値を楕円補間することによって妥当に評価できた。

(5) 「二方向加力を受ける立体柱梁部分架構の柱梁接合部の耐震性能 (2014 年度)」

柱梁曲げ耐力比を 1.5 とした立体隅柱梁部分架構では、層間変形角 1%での加力サイクル中に梁主筋が柱面位置および柱梁接合部内の入り隅位置で降伏し、柱主筋および接合部横補強筋も降伏した。一方、柱主筋量を増やして柱梁曲げ耐力比を 2.6 とした部分架構では、梁主筋 (柱面位置) と接合部横補強筋は層間変形角 1%での加力サイクル中に降伏したが、柱主筋は層間変形角 1.5%の加力サイクルで降伏した。両試験体とも変形の増大とともに柱梁接合部が曲げ破壊した。

柱梁曲げ耐力比を 1.5 とした立体隅柱梁部分架構では、層間変形角 1%の二方向加力時に変位保持方向の耐力が低下し、このときの二方向水平耐力のベクトル和は楠原・塩原による柱梁接合部曲げ終局耐力を楕円補間した曲げ終局曲線上に位置した。

柱梁曲げ耐力比を 2.6 とした立体隅柱梁部分架構では、二方向水平耐力のベクトル和は柱梁曲げ耐力比を 1.5 とした部分架構よりも 5%から 20%大きかった。柱の主筋量を増やして柱梁曲げ耐力比を 1.5 から 2.6 にすることで、柱梁接合部の曲げ終局耐力が増大した。

スラブの有無を変数とした接合部曲げ破壊型の立体隅柱梁部分架構を比較すると、スラブが付くことで層せん断力の直交二方向ベクトル和は最大で 7%上昇した。

両年度の実験結果を比較・検討することによって、柱梁曲げ耐力比を 1.5 から 2.6 程度へ増大させるために柱主筋量を 1.4 倍に増やす、あるいは柱圧縮軸力を 3 倍にすることで、柱梁接合部の曲げ終局耐力は最大で 19%あるいは 35%各々増大した。すなわち、柱梁曲げ耐力比が同等の場合、柱梁接合部の曲げ終局耐力に与える影響は柱主筋量よりも柱圧縮軸力のほうが大きかった。

(6) 「実用的な耐震規定の検討」

接合部降伏破壊する十字形・ト形・L 形の柱梁接合部の終局強度の終局強度の実用的で簡略化された算定方法を提案し、十字形・ト形については、実験結果を算定結果と比較して、柱梁強度比、針補強筋梁、接合部パネルアスペクト比の影響が良く捉えられ

ていることを確かめることができた。

#### <引用文献>

鉄筋コンクリート構造運営委員会, 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準 (案) 同解説, 日本建築学会構造委員会, 2016年4月, pp. 173-174.

T. Nagae, W. M. Ghannoum, J. Kwon, K. Tahara, K. Fukuyama, T. Matsumori, H. Shiohara, T. Kabeyasawa, S. Kono, M. Nishiyama; et al, Design implications of large-scale shake-table test on four-story reinforced concrete building. ACI Structural Journal, 査読あり, Vol. 112, No. 2, 2015, pp. 135-146.

楠原文雄, 金秀禧, 塩原等, 接合部降伏する鉄筋コンクリート造骨組の地震応答解析, 日本建築学会構造系論文集, 第78巻, 第686号, 2013年4月, pp. 847-855.

#### 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7件)

片江 拓, 北山和宏, 3方向加力される鉄筋コンクリート立体隅柱梁接合部の耐震性能に関する実験研究, 日本建築学会構造系論文集, 査読あり, 第80巻, 第713号, 2015年7月, pp. 1133-1143.

周佳琦, 楠原文雄, 塩原等, 長期せん断力下の鉄筋コンクリート造十字形柱梁接合部の耐震実験, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol.37, No.2, 2015年7月, pp. 289-294,

周佳琦, 久世雄太, 楠原文雄, 塩原等, RC造柱梁接合部部分架構の履歴エネルギー吸収量, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol.36, No.2, 2014年7月, pp.211-216.

T. Nagae, W. M. Ghannoum, J. Kwon, K. Tahara, K. Fukuyama, T. Matsumori, H. Shiohara, T. Kabeyasawa, S. Kono, M. Nishiyama; et al, Design implications of large-scale shake-table test on four-story reinforced concrete building. ACI Structural Journal, 査読あり, Vol. 112, No. 2, 2015, pp. 135-146.

金秀禧, 楠原文雄, 塩原等, 地震動を受けるRC造魚骨形多層骨組の余震時の倒壊限界, コンクリート工学年次論文集, 査読あり, Vol. 36, No. 2, 2014年7月, pp. 247-252.

楠原文雄, 塩原等, 柱と梁の曲げ強度の比が小さい鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の耐震性能. 日本建築学会構造系論文集, 査読あり, 第78巻第693号, 2013年11月, pp. 1939-1948.

楠原文雄, 塩原等, 鉄筋コンクリート造ト形柱梁接合部の終局モーメント算定法. 日本建築学会構造系論文集, 査読あり, 第78巻第693号, 2013年11月, pp. 1949-1958.

#### [学会発表](計10件)

Hitoshi Shiohara, Recent Advances in Beam-Column Joint Design and Seismic Collapse Simulation on Reinforced Concrete Frame Buildings, EXTREME 2015 - International Colloquium on Extreme Structural Engineering, December 20-21, Nanjing Tech University, China.

金秀禧, 楠原文雄, 塩原等, 柱梁接合部マクロエレメントによる1軸偏心を有するRC建物の弾塑性地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2015年9月, pp. 173-174.

塩原等, 佐藤 友佳, 楠原文雄, 接合部降伏する鉄筋コンクリート造8層骨組の弾塑性地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2015年9月, pp. 151-154.

北山和宏, 石塚裕彬, 片江 拓, 遠藤俊貴: 2方向水平力を受ける鉄筋コンクリート造立体隅柱梁接合部の耐震性能に関する実験研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2015年9月, pp.183-184.

大西直毅, 堀田淳司, 西村康志郎, 飯場正紀: FEMによる二方向繰返し荷重を受ける鉄筋コンクリート内柱-梁接合部の解析的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2015年9月 pp139-142.

Hitoshi Shiohara, Seismic Design of Headed Bars for Reinforced Concrete Beam-column Joints in Japan, the Second ACI-JCI Joint Seminar, July 13, 2015, Toshi Center Hotel, Tokyo.

塩原等. 鉄筋コンクリート柱梁接合部における接合部降伏の終局強度の実用的算定法. 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2014年9月, pp. 389-390.

千葉卓哉, 塩原等, 楠原文雄, 柱梁強度比が小さい梁降伏型鉄筋コンクリート造スラブ付柱梁接合部の挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2014年9月, pp. 411-412.

佐藤宏一, 片江 拓, 北山和宏, 遠藤俊貴, 3方向加力された鉄筋コンクリート立体隅柱梁接合部の破壊機構に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造IV, 2014年9月, pp. 421-424.

Hitoshi Shiohara, The Next Generation Seismic Design for Reinforced Concrete Beam-column Joints, Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering Frontiers of Earthquake Engineering, Anchorage, Alaska, USA, July 21-25, 2014.

〔図書〕(計1件)

鉄筋コンクリート構造運営委員会 鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)同解説, 日本建築学会構造委員会, 2016年4月, pp. 173-174. (分担執筆, 第19条柱梁接合部本文・解説: 塩原等)

〔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.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/shihoara/my\\_page/e\\_li.html](http://www.rcs.arch.t.u-tokyo.ac.jp/shihoara/my_page/e_li.html)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩原 等 (SHIOHARA Hitoshi)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 50272365

(2) 研究分担者

北山 和宏 (KITAYAMA Kazuhiro)  
首都大学東京・都市環境科学研究科・教授  
研究者番号: 70204922

楠原 文雄 (KUSUHARA Fumio)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 50361522

大西 直毅 (OHNISHI Naoki)  
北海道大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号: 20579784

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

なし