

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 5月17日現在

機関番号：17102
 研究種目：若手研究（B）
 研究期間：2011～2012
 課題番号：23760527
 研究課題名（和文） 2方向加力に対する外ダイアフラム形式柱梁接合部の弾塑性挙動と設計法
 研究課題名（英文） Elasto-Plastic Behavior and Design of Beam-to-Column Connection with Exterior Diaphragms under Bi-axial Loading
 研究代表者
 松尾 真太郎（MATSUO SHINTARO）
 九州大学・人間環境学研究院・助教
 研究者番号：40583159

研究成果の概要（和文）：

完全溶込溶接を要しない外ダイアフラム形式は、耐震性能に高い信頼性を与えることができる点で合理的な接合法である。外ダイアフラム形式柱梁接合部については、これまで1方向加力を前提とした研究が多数行われており、設計手法も確立されつつある。一方で、柱梁接合部の設計に際しては、2方向加力を想定することが必要となる場合も考えられる。本研究は、このような2方向加力時の外ダイアフラム形式柱梁接合部の設計法を検討する目的で、主として系統的な繰返し載荷実験を実施し、柱梁接合部の構造性能について検討したものである。

研究成果の概要（英文）：

Exterior diaphragm type connection, which does not require full penetration weld, is a rational method of connection between beams and columns in terms of high reliability for its seismic performance. All of the previous studies on the connection targeted one direction loading, and the design method has been established. On the other hand, there could be the case that structural designers are required to assume the connections to be input from two directions. In this study, a systematic cyclic loading test was mainly conducted, and structural performances of the beam-to-column connection stiffened by exterior diaphragms were investigated in order to confirm the design method of the connection under bi-axial loading.

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	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：鋼構造, 外ダイアフラム, 柱梁接合部, 2方向加力, 角形鋼管, 繰返し載荷実験

1. 研究開始当初の背景

兵庫県南部地震（1995年）において鋼構造柱梁接合部が被った重大な被害（角形鋼管柱梁接合部の場合、完全溶込溶接部近傍の梁フランジや通しダイアフラムの破断など）の軽減を目的として、これまでに多数の研究が行われてきた。これらの成果を踏まえて、現状の鋼構造柱梁接合部の大部分には通しダイ

アフラム形式が普及している。通しダイアフラム形式を採用する際には、柱に多くの完全溶込溶接部が存在し、かつ溶接部同士が近接する機会が多いため、溶接施工管理上細心の注意が必要となる。そのため、品質の信頼性という点ではなお課題が残されている。

このような課題に対する一つの対応策として、完全溶込溶接が不要な外ダイアフラム

形式が挙げられる。これは、柱外周に鋼板を溶接する形式をとり、柱貫通形式であることから、溶接部近傍における柱と梁の被害を防止するために非常に有効な手段である。このような背景を鑑みて、外ダイアフラム形式柱梁接合部に関する研究が行われ、梁降伏型の接合部設計のための実用的設計法が構築された。ただし、これまでの研究は、接合部に1方向の力が作用した場合を対象としたものに限られる。

実際の建物における柱には2方向に梁が取り付くことが多く、地震時に柱梁接合部に作用する力は2方向からのものとなる。このような2方向の力の組合せにより、接合部剛性・耐力に危険側の影響を及ぼす可能性があるため、それがどの程度であるかを定量的に把握しておくことは設計上極めて重要である。

2. 研究の目的

本研究課題では、上記の研究背景を踏まえて以下のことを検討する。

- (1) 2方向の力を受ける外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動を実験的に調査し、1方向の力に対する挙動との差異、2方向の力の組合せによる挙動の差異、剛性・耐力・終局挙動等に与える影響を明らかにする。
- (2) 2方向の力を受ける場合には、角形鋼管角部付近の溶接部が非常に厳しい応力状態にあると予想されるので、溶接脚長を通常より小さくした試験体により、溶接部の終局挙動ならびに溶接部のサイズが接合部の全体挙動に与える影響について調査する。
- (3) 一連の実験結果に基づいて、また必要に応じて数値解析を援用しながら、2方向の力を受ける外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の設計法を検討する。

3. 研究の方法

2方向の力を受ける外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動を明らかにするとともに、接合部設計法を検討するために、以下に述べる載荷実験および数値解析を実施する。

- (1) 角形鋼管柱に2本の梁が互いに直交して取り付く試験体の載荷実験を、鋼管幅厚比、加力条件、梁せい、溶接脚長、先行降伏部位を実験変数として実施する。
- (2) 数値解析を併せて実施し、加力条件の違いによる外ダイアフラムの応力分布性状を把握する。
- (3) 実験・解析結果にもとづいて、接合部設計法を検討する。

4. 研究成果

(1) 実験概要

試験体形状の一例を図1、載荷装置を図2に示す。直交する梁の各先端を油圧ジャッキにより正負交番漸増振幅繰返し載荷した。層間変形角による制御とし、以下に列挙する実験変数について2期に分けて実験を実施した。

実験シリーズ I

- ・鋼管幅厚比：22と33の2水準
- ・加力条件：1方向加力、2方向加力（対称載荷と逆対称載荷）の3種類

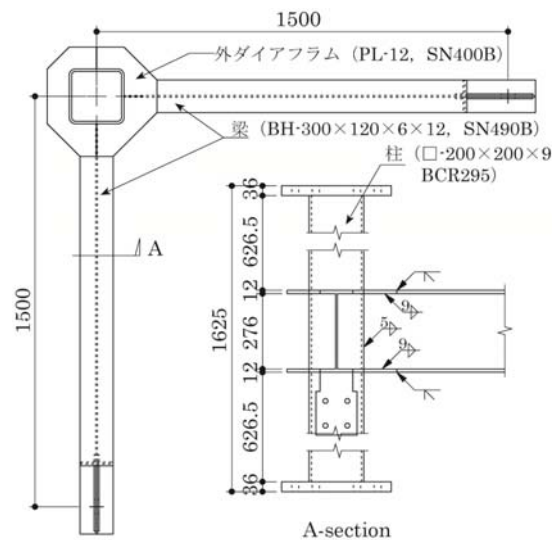
実験シリーズ II

- ・梁せい：200mm、300mm、450mmの3水準
- ・溶接脚長：10mmと5mmの2水準
- ・接合部と梁の耐力比：0.66、1.03、1.29の3水準
（※下線は基準となる変数）

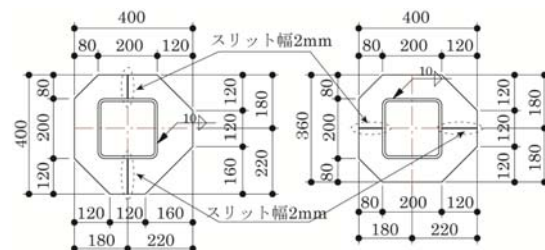
(2) 実験結果

①実験シリーズ I

実験シリーズ I では、代表的な接合詳細を有する外ダイアフラム形式柱梁接合部を対象として、基本変数である鋼管幅厚比と加力条件の影響を明確にすることを主目的とした。



(a) No.1 試験体



(b) 外ダイア(2方向) (c) 外ダイア(1方向)

図1 試験体形状の一例

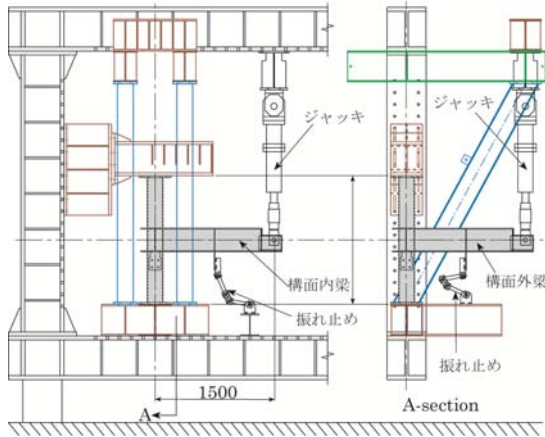


図2 荷装置

代表的な試験体の梁端モーメントと梁回転角の関係を図3に示す。本実験範囲では、鋼管幅厚比および加力条件によらず、接合部の履歴挙動は非常に安定しており、大変形に至るまで顕著な耐力劣化は生じなかった。なお、図3には構面内梁の履歴曲線のみを示しているが、構面外梁についても同等な挙動を呈することを確認している。

加力条件による接合部の復元力特性の差異について検討するために、梁端モーメント-梁回転角関係の骨格曲線を図4に示す。図中の○印は降伏耐力実験値 jM_{Ye} 、△印は全塑性耐力実験値 jM_{Pe} を示している。ここで、 jM_{Ye} は初期剛性の 1/3 接線剛性時の耐力、 jM_{Pe} は初期剛性の 1/6 接線剛性時の耐力である。図より2方向逆対称加力 (No.1,3) による接合部耐力は、1方向加力 (No.2,5) に比べて10数%程度低くなるのがわかる。一方、2方

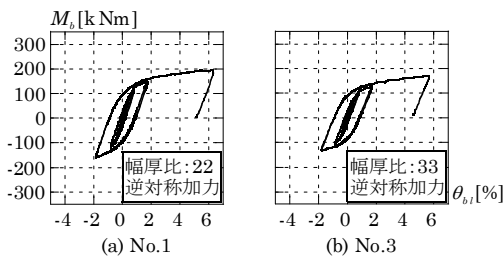


図3 梁端モーメント-梁回転角関係の一例

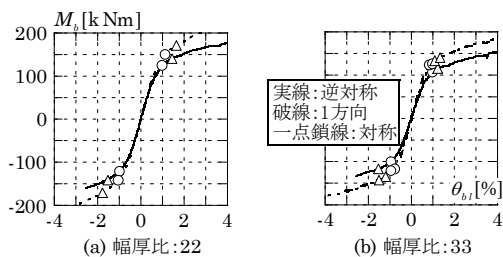


図4 梁端モーメント-梁回転角関係骨格曲線

向対称加力である No.4 は No.5 と同等の耐力を示している。また、加力条件が接合部の剛性に及ぼす影響は非常に小さい。

②実験シリーズ II

実験シリーズ II では、①接合部耐力に及ぼすウェブの寄与度、②外ダイアフラム-鋼管柱溶接部の破断を防止するためのデータ取得、および③保有耐力接合設計のためのデータ取得を主目的とした。

代表的な試験体の梁端モーメントと梁回転角の関係を図5に示す。本実験範囲でも、接合部の履歴挙動は各実験変数によらず非常に安定しており、十分な変形能力を發揮した。各試験体に認められた破壊性状は以下のとおりである。

- 2方向に梁が取り付く鋼管角部の外ダイアフラムに亀裂が発生した。この現象は外ダイアフラムが先行降伏する接合詳細で常に生じた。ただし、この現象による顕著な耐力劣化はなく、いずれも靱性のある挙動を呈することを確認している。
- 上記の亀裂とともに、梁端フランジ溶接部から外ダイアフラム側へ亀裂が進展した。この現象は梁せいの大きな試験体に特に顕著に現れた。
- 外ダイアフラム-角形鋼管柱間の溶接金属に亀裂が発生し、最終的に貫通した。この現象は溶接脚長 5mm の試験体のみで現れた。

各実験変数による接合部の復元力特性の差異について検討するために、梁端モーメント-梁回転角関係の骨格曲線を図6に示す。図中の記号は図4と同一である。各実験変数

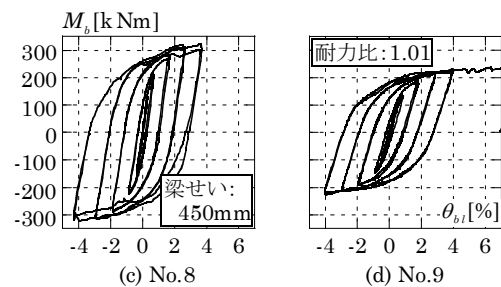
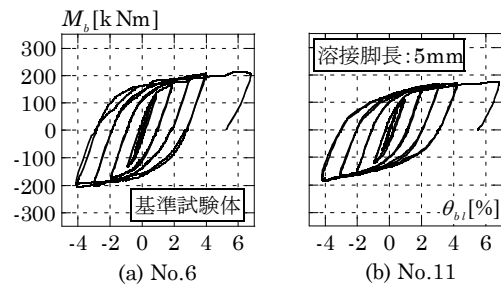


図5 梁端モーメント-梁回転角関係の一例

が骨格曲線に及ぼす影響について以下に列挙する。

- ・梁せいの影響：梁せいが大きいほど梁の剛性が大きいため、接合部の降伏開始時期が早まる。各試験体の耐力と梁せいはほぼ比例関係にあるため、梁せいによらず梁ウェブの曲げ耐力への寄与は小さいものと考えられる。
- ・外ダイアフラム—角形鋼管の溶接脚長の影響：初期剛性に関しては両者に大きな差異はない。しかしながら、変形の増大とともに耐力差が大きくなる。これは、溶接脚長の小さい試験体では早期に溶接部に亀裂が生じるため、その後の剛性・耐力低下が著しくなるためである。したがって、本実験より、既往式による必要溶接脚長を満足していない場合には、2方向加力による大きな耐力低下につながる事が明らかとなった。
- ・接合部と梁の耐力比の影響：梁降伏型となるように設計された2体の試験体は、いずれも基準試験体に比べて剛性・耐力が明瞭に上昇している。また、保有耐力接合条件である $jM_{ue}/\alpha_b M_p$ の値は、いずれも1.0を上回ることを確認した。したがって、既往の設計条件式により保有耐力接合条件は満足すると考えられる。既往の設計条件式は1方向加力の仮定によるものであり、その場合の $jM_{ue}/\alpha_b M_p$ は1.01であった。したがって、梁をより効率的に降伏させる設計が求められる場合には、2方向加力を想定した何らかの耐力低減を考慮することも考えられる。

(3) 耐力低下要因の考察と数値解析

1方向加力に比べて2方向逆対称加力時の接合部耐力が低下する要因について、有限要素法(FEM)解析により基礎的検討を行った。

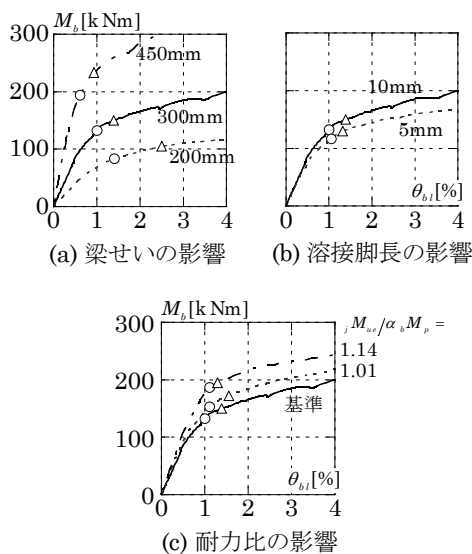


図6 梁端モーメント—梁回転角関係骨格曲線

素法(FEM)解析により基礎的検討を行った。図7に示すようなモデルを用いて、単調載荷時の結果を得た。図8は骨格曲線の一例であり、本解析条件で比較的精度の良い結果が得られ((a)図)、加力条件の影響についても実験結果とほぼ対応していることが確認できた((b)図)。そこで、実験では検討が難しい外ダイアフラムの応力分布状況について詳細な考察を行った結果を図9に示す。図9は柱フェイス位置における外ダイアフラムの垂直応力分布を降伏耐力時に関して示したものであり、これより以下のことがわかる。

- ・加力条件によらず鋼管角部に応力集中する傾向がある。
- ・2方向逆対称加力時の外側の引張応力負担幅は、他と比べて若干狭くなる傾向がある。
- ・2方向逆対称加力時の直交梁側の引張応力は、他と比べて小さく鋼管から離れるにしたがって圧縮応力の領域が広がっている。

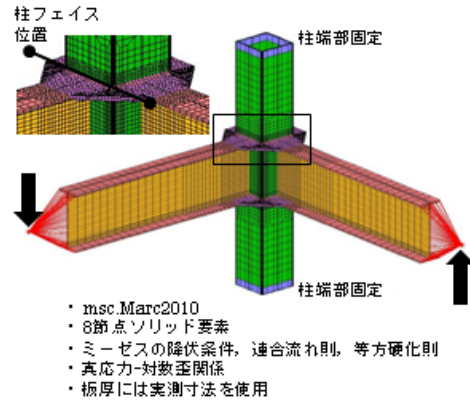


図7 FEM解析モデル(2方向逆対称加力)

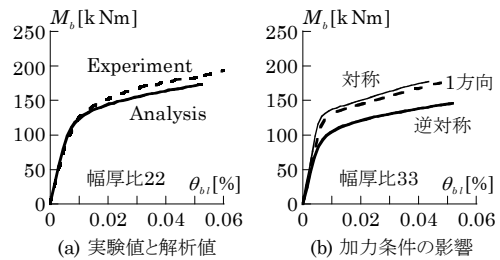


図8 骨格曲線の比較の一例

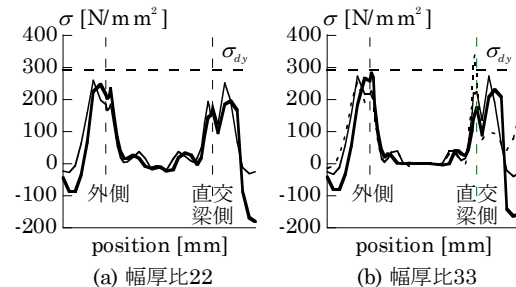


図9 FEM解析結果の一例

(柱フェイス位置での外ダイアフラム垂直応力分布)
(太実線：逆対称、細実線：1方向、破線：対称)

上記の2つ目と3つ目の考察が2方向逆対称加力時における耐力低下の要因の一つであると考えられる。このような現象が起こるメカニズムについては、現段階では明らかとなっていないが、一つの可能性として、直交梁側の外ダイアフラムは一方の梁フランジから引張荷重、もう一方の梁フランジから圧縮荷重を受けるため、鋼管角部およびその周辺の外ダイアフラムの回転拘束が弱まることによって、従来のメカニズムとは若干の差異が生じるものと考えられる。このような考えのもと、発表論文(1)および③では、耐力評価のための新たなメカニズムを提案した(図10)。このメカニズムによる2方向逆対称加力時の接合部耐力は、1方向加力時に比べて数%程度の低下を見込むことができる。また、実験結果との比較より、若干の過大評価(10%前後)を与えることがわかった。

(4) 接合部設計について

前節までで明らかとなったように、2方向逆対称加力下での接合部耐力は、大きい場合で10数%の低下が想定される。ただし、本実験では、隅柱(側柱)を対象とした試験体形

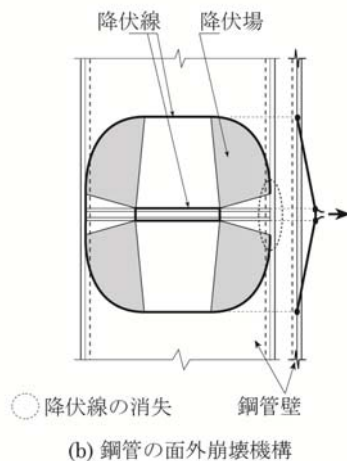
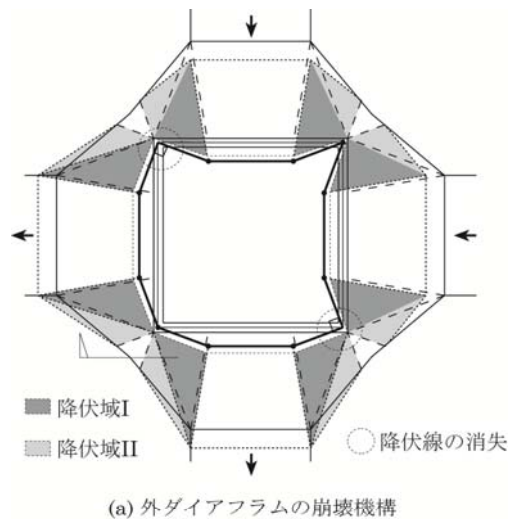


図10 耐力評価のための新しいメカニズム

状としたため、このような耐力低下が最も現れる場合を対象としたことになる。中柱の設計では、図10の右図を見れば明らかなように、一方の鋼管角部は「引張+圧縮」が作用するため耐力の低下が生じるが、もう一方の鋼管角部は「引張+引張」あるいは「圧縮+圧縮」が作用するため耐力は1方向加力の場合と同等以上となる。したがって、2方向加力の影響は軽減される。これは接合部設計にとって非常に重要なことであり、その影響度についての定量的な傾向については未検討であるため、今後の検討課題とする。

一方で、実際の接合部設計においては、長期荷重を考慮する必要があることを考えると、直交する2つの梁から同時に同程度の作用応力が発生することは稀であるとも考えられる。このような可能性を考慮すれば、2方向加力下にある場合においても、特に中柱接合部の設計では、従来の設計法が十分に適用できるものと考えられる。

一方で、側柱や隅柱など、2方向加力の影響が大きく、耐力低下が無視できない場合については、その耐力低下の程度を適切に考慮できる評価法が必要と考えられるが、現状ではその手法を完成させるまでには至っていない。今後は、図10のメカニズムの改良等も含めてさらに検討を進めていく必要がある。

(5) まとめ

本研究では、外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の2方向加力に対する設計法の構築を目的として、接合部詳細・加力条件・設計条件等を考慮した系統的載荷実験を実施した。また接合部周辺の応力分布等の基礎情報を数値解析(FEM)により得た。以下に本研究より得られた成果をまとめる。

- [1] 2方向逆対称加力による接合部耐力は1方向加力に比べて10数%程度低くなる。
- [2] 2方向対称加力による接合部耐力は1方向加力と同等以上である。
- [3] 加力条件に拘らず安定した紡錘形の履歴性状を示す。
- [4] 接合部の曲げ耐力は梁せいに概ね比例する。ただし、パネルアスペクト比が1程度では上下の局部変形が互いに干渉して若干の耐力低下が見られる。
- [5] 従来の設計式により、接合部の保有耐力接合条件はほぼ満足するが、効率的な梁降伏を確保するためには多少の耐力低下を考慮すべきケースも考えられる。
- [6] 従来の設計法による溶接脚長を確保すれば、溶接部の亀裂進展による急激な耐力低下を避けられる。
- [7] 外ダイアフラムの歪性状およびFEM解析により、2方向加力時の耐力低下の要因を把握した。

[8] 側柱や隅柱を除けば、2 方向加力下であっても、従来の設計法で十分対応できる可能性を確認した。

一方で、側柱や隅柱など、2 方向加力の影響が大きく、耐力低下が無視できない場合については、その耐力低下の程度を適切に考慮できる評価法が必要と考えられるが、現状ではその手法を完成させるまでには至っていない。しかしながら、本研究で得た実験結果および数値解析結果は、これらの課題を解決する上で重要な知見であり、今後さらに検討を進め、評価式の構築あるいは耐力低減係数等の提案が期待できる。

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 1 件)

- (1) 小山田拓郎, 松尾真太朗, 尾園正樹, 窪寺弘顕: 外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の 2 方向加力実験, 鋼構造年次論文報告集, 査読有, 第 20 巻, pp.167-174, 2012.11., DOI コードおよび URL なし

[学会発表] (計 3 件)

- ① 小山田拓郎, 池田竜輔, 松尾真太朗, 窪寺弘顕: 2 方向加力を受ける外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の弾塑性挙動, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道), C-1, 構造 III, 査読無, 2013.8., 北海道大学
- ② 小山田拓郎, 尾園正樹, 松尾真太朗, 窪寺弘顕: 外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の 2 方向加力実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), C-1, 構造 III, 査読無, pp.1227-1228, 2012.9., 名古屋大学
- ③ 松尾真太朗: 2 方向加力を受ける外ダイアフラム形式角形鋼管柱梁接合部の降伏耐力に関する考察, 日本建築学会研究報告九州支部, 査読無, 第 51 号・1, 構造系, pp.473-476, 2012.3., 西日本工業大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松尾 真太朗 (MATSUO SHINTARO)

九州大学・大学院人間環境学研究院・助教

研究者番号: 40583159