

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H00272

研究課題名（和文）杭基礎を有するRC建物の合理的な杭・基礎梁の終局設計法の開発

研究課題名（英文）Development of a new seismic design method for the pile-structure system of reinforced concrete structures

研究代表者

楠 浩一（Kusunoki, Koichi）

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：00292748

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,300,000円

研究成果の概要（和文）：杭基礎を有する連層耐震壁付き鉄筋コンクリート造建物において、剛強な基礎ばりを必要とする耐震壁脚部での曲げ降伏を保證する設計法に代わり、杭頭と基礎ばりの降伏を許容する合理的な設計方法を提案した。この設計法では、杭基礎と建物の一体解析は必要とせず、連層耐震壁脚部周りのマクロモデルを用いて耐震壁脚部の曲げ耐力を低減することにより簡易的に建物部分の解析だけで耐震設計を行う合理的な方法を提案している。また、杭頭に大きな靱性能が必要となるため、靱性能に乏しい既成杭を対象に杭頭・パイルキャップ接合部の適切な補強方法を静的加力実験により検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは、杭基礎を有する鉄筋コンクリート造建物に対して、杭基礎と連層耐震壁脚部の許容応力度設計は実施するようになったものの、終局強度を確認することは要求されてこなかった。一方、超高層建物では、杭基礎と上部建物の一体解析を実施するなどして、終局強度設計も行われてきたが、一般的に基礎ばりを剛強とし、上部建物で明快な降伏機構を形成するように設計されてきた。一方、一般的な建物を考えると、そういった剛強な梁を要求することは困難であり、そのため終局強度の確認もされてこなかった。本研究の成果は、合理的に基礎ばりの降伏も許容するものであり、杭基礎も考慮した終局強度設計を可能とする。

研究成果の概要（英文）：The conventional seismic design method for the Reinforced Concrete building with continuous shear walls on the pile foundation requires very strong and stiff foundation girders. This research aims to develop a reasonable seismic design method to allow the connecting foundation beam to yield. The proposed method does not require a pile foundation-upper structure analysis. The bending strength of the continuous shear wall is reduced according to a proposed macro model around the bottom of the wall. The top of the pile needs to have enough ductility to achieve the system. Therefore, a series of static loading tests with pile-pile cap connection portions are also conducted to propose an appropriate strengthening method.

研究分野：鉄筋コンクリート構造

キーワード：鉄筋コンクリート構造 杭基礎 連層耐震壁 一体解析 終局強度設計

1. 研究開始当初の背景

建物の設計は、鉛直荷重と水平荷重に対して設計されている。水平荷重としては、建物の供用年限中に数度経験するような地震(中地震)に対しては、修復が必要な損傷が生じないこと、供用年限中に経験するかどうかという地震(大地震)に対しては、建物の終局状態が安全で人命を損なわないことを確認している。杭基礎を有する建物(図1)において、杭基礎は元来、地業であり構造物としては考慮されてこなかった。その為、自然地盤と同じく、鉛直荷重、特に脆性的な挙動となる圧縮側の鉛直支持能力の確認だけが行われてきており、水平荷重に対する検討は一般建物では行われてこなかった。

杭基礎—基礎ばり—上部構造の応力をなるべく正しく算出し、設計するためには、図2のように、杭基礎—地盤—建物の一体解析を行う必要がある。超高層建物では一般的に広く行われる。しかし、杭基礎部のモデル化において分割数を多くとらなければならない、建物全体の自由度が非常に大きくなり計算負荷が大きいなど、非常に煩雑で、一般建物に対して広く実務設計で用いることは非現実的である。

一方、一般建物では、1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震、2011年東北地方太平洋沖地震、2016年熊本地震をはじめ、杭基礎の被害が数多く見受けられ、建物が大きく傾斜し、取り壊されてしまったものが沢山ある。その為、2001年には建設省告示により、杭基礎の中地震に対する設計が盛り込まれた。その後も杭基礎の被害が見受けられるため、今日では杭基礎の終局設計(大地震に対する設計)の必要性が検討されている。

一般建物では図2に示したような一体解析は一般的ではないため、次のような簡略法で設計用応力を求めることとしており、日本建築学会でも同様の指針を作成中である。まず、上部構造の応力は、図3に示すように基礎部でピン支持することにより求める(A)。一方、杭基礎と基礎ばりについては、基礎ばりは弾性と仮定して、図4の様に杭をモデル化し、上部構造および基礎部重量に対する慣性力を杭頭部に載荷し、杭基礎と基礎ばりの応力を別途算出する(B)。また、地盤の変位に拠る応力を考えるため、図5に示すように、地盤の応答解析から求まる杭基礎の変位により生じる応力(C)を算出する。

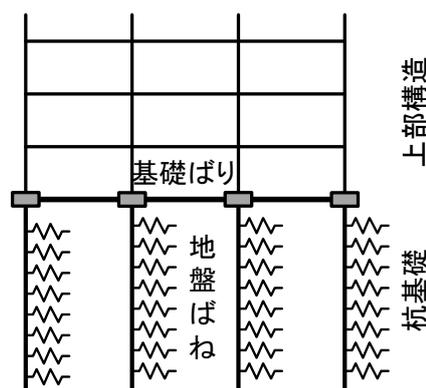


図2 一体解析

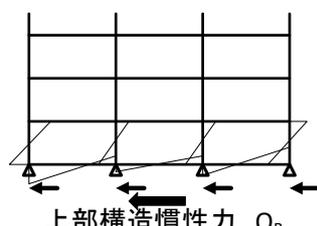


図3 上部構造の解析と応力

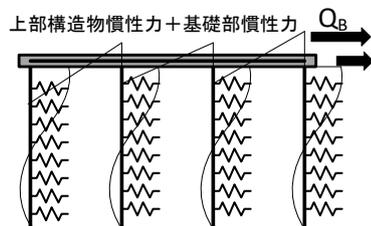


図4 上部構造+基礎部慣性力による杭・基礎ばり応力

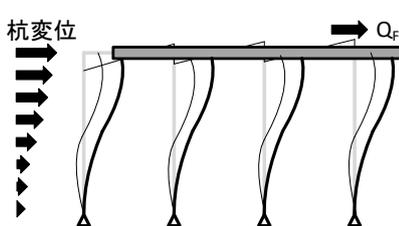


図5 地盤の変位による杭基礎・基礎ばり応力

基礎ばりの応力は、A+BにCを加えることとなる。日本建築学会大会のPD資料(2018)によると、杭頭最大曲げモーメント時の変位Dを用いて $\alpha_1 \times D$ で仮定することができる。ここで、 $\alpha_1$ は建物と地盤の卓越周期 $T_b$ と $T_g$ から求まる係数である。

しかし、本研究で対象とするような、建物として一般的な連層耐震壁が図6のように配置されている建物の場合、耐震壁両端をピン支持しているため、両側にとりつく基礎ばりには、大きな応力が計算上発生しない。耐力壁の曲げモーメントの反力は、支持点での変動軸力として負担することとなる。この部分に軸ばねを配することもあるが、杭、杭周囲の摩擦と地盤の軸剛性を適切に反映することは難しく、また、その設定値によって応力が大きく変動するのでそれはそれで問題である。

この大きな変動軸力により、図6に示すように一部の杭基礎に大きな変動軸力が作用し、杭の設計が収まらない。これは、例えば図3の状態では上部構造に必要な強度が $D_s=0.55$ となったような場合、図6では、杭基礎でこの図6に示すような境界条件を保証しているようなものである。上部構造が仮に $D_s$ 相当で0.65まで強度が上がった場合には、 $Q_u$ を保証するとなるとさらに応力が大きくなる。なお、圧縮側の応力に対しては、架構の安定性の観点から、この圧縮軸力を負担できるようにすることが一般的である。また、基礎ばりの曲げモーメントは、図6に示す上部構造による曲げモーメントと、図7に示す杭基礎の曲げモーメントにより発生する曲げモーメントの合計となるが、先に述べた通りに図6においては耐震壁の脚部がピン支持で拘束された解析であるため、基礎ばりの設計用応力が過小評価されている可能性が高い。

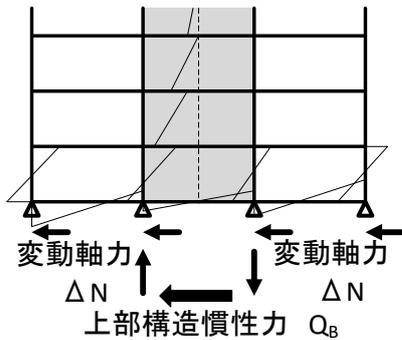


図6 連層耐震壁を有する建物の応力

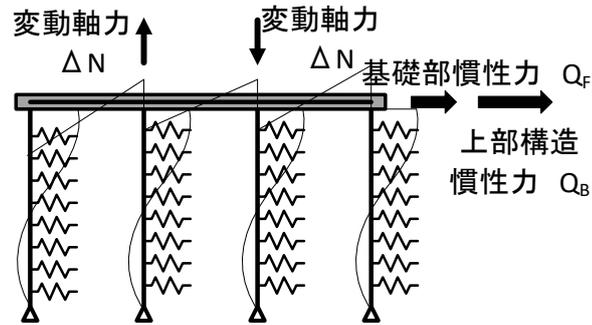


図7 連層耐震壁がある場合に基礎部に作用する上部構造の応力

## 2. 研究の目的

そこで、本研究では図8に示すような新しいメカニズムを部分的に考慮する。引張側、圧縮側にとりつく基礎梁は曲げ降伏させる ( $M_{F1}$ ,  $M_{F2}$ )。引張側の杭の軸力  $N_{p1}$  は、周辺摩擦を考慮して引き抜けるか、内部の鉄筋が降伏する状態の軸力とする。杭の曲げ強度は  $N_{p1}$  と  $N$ - $M$  相関から  $M_{p1}$  と決まる。圧縮側の軸力は、 $N_{p1}$  から  $N_{p2}$  と決まる。

圧縮側の杭頭の曲げモーメントは、必ずしも降伏モーメントに達していなくてもよい。 $N_{p1}$ ,  $M_{p1}$ ,  $N_{p2}$ ,  $M_{p2}$  を壁下には用いて、図4により、基礎部の慣性力によるモーメントを算出する。

この状態から壁の曲げモーメントを

出す場合は、圧縮側の基礎ばりの剛性・強度と圧縮側杭基礎の剛性・強度の関係から、まず  $M_{p2}$  を推定する。更に、次式により、壁脚部のモーメントを算出し、これが図5による解析における  $M_w$  と比較して、大きく異なる（大分と小さい）場合は、基礎ばりの配筋を増やすようにする。

$$M_w = M_{F1} + Q_{F1} \cdot \frac{L}{2} + N_{p1} \cdot \frac{L}{2} + M_{F2} + Q_{F2} \cdot \frac{L}{2} + N_{p2} \cdot \frac{L}{2} - M_{p1} - M_{p2} \quad \text{式(1)}$$

これは、図6からも分かる通り、耐震壁脚部の両側にとりつく基礎ばりには、耐震壁の大きな曲げモーメントによる応力が発生しておらず、剛節架構部分の応力と、基礎の慣性力による応力、および地盤変位による応力のみから決まるためである。

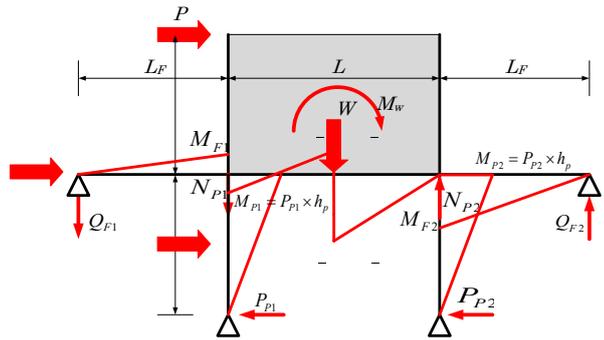
あくまで、耐震壁脚部のモーメントは図5での応力解析結果を用いる場合は、次式を満足するように、杭基礎の配筋を決める必要がある。基礎ばりの降伏を見込めるだけ、図6および図7で示した、基礎ばりを弾性と仮定する原稿設計法に比べて合理的となる。

なお、式における、 $M_{p1}$  および  $M_{p2}$  は、実際には、耐震壁軸まで伸ばした節点曲げモーメントであり、それを求めるためには、基礎ばりの反曲点位置が必要。モーメント大きくとると、杭の応力は相対的に小さくなるため、せん断スパンは梁長とするのが安全側であろう。

## 3. 研究の方法

杭基礎を有する連層耐震壁付建物の、杭基礎と基礎ばりの設計において、連層耐震壁脚部の局所的な応力をマクロモデルにより考慮して、一体解析に抛らずに設計する方法を提案する。それにより、杭基礎と基礎ばりの終局設計法をより合理的にする。具体的な検討項目を以下に示す。

- (1) 杭の遠心載荷試験では、地盤-杭-上部構造物系において、耐震壁が杭応力に及ぼす影響を検討。
- (2) 図8のような部分架構に対して、圧縮側の杭と基礎ばりの応力・剛性をパラメータとして実施する壁脚部固定試験体の静的加力実験から、圧縮側の杭の降伏しない範囲を推定。  
(1)による壁脚曲げ応力算定の妥当性の検討。
- (3) FEM解析により、更に杭と基礎の関係のパラメトリック解析を実施
- (4) 図6と、図8を考慮した図7による応力の重ね合わせによる応力が、妥当であることを振動台実験により確認する必要がある。慣性力の足し合わせなので、振動台実験が必要である。また、慣性力による応力の重ね合わせを対象とするため、大型振動台実験では実験の安全性から地盤の変位は無視し、地盤は剛なRCプール内に造築することができる。本課題では、実験計画の概要を検討する。



#### 4. 研究成果

連層耐震壁脚部における杭基礎の設計において、取りつく基礎ばりを含めた設計方法の合理化のため、連層耐震壁に取り付く基礎ばりの降伏を考慮した時の、連層耐震壁脚部のマクロモデルについて再検討を行い、提案式を作成した。一般的に行われている基礎ばりを剛強として基礎ばり部で上部構造と下部構造を分離する解析手法を用いつつ、提案するマクロモデルを用いて耐震壁脚部の応力状態を簡易的に修正し、設計に用いることを想定している。この方法により、煩雑で実施には高い技術力を要する建物と杭基礎の一体解析を実施する必要がなくなる。また、提案する手法を検証するため、杭基礎を有する8階建ての連層耐震壁付き鉄筋コンクリート造建物の試設計を実施し、その挙動を確認した。今後は基礎ばりの強度をパラメータとした解析が必要であることを確認した。

次に、基礎ばりの降伏が連層耐震壁脚部の杭基礎および基礎ばりの応力に与える影響を考慮するため、杭基礎を有する建物モデルの動的遠心載荷実験を東京工業大学で行った。試験体は1×3スパンの1層試験体で、各柱下に1本の杭を有している。3スパン方向に加振し、その中央スパンに耐力壁を有するものと有しないものの2種類とした。得られた知見を以下に示す。

- 動的遠心実験で、耐震壁が杭応力に及ぼす影響を検討した。耐震壁のある構造における隅杭と中杭の杭頭曲げモーメントの差異は、純ラーメン構造のそれより小さかった。それは、建物慣性力による耐震壁のロックイングが、中杭の杭頭曲げモーメントを緩和する方向に基礎梁を変形させたためと考えられる。
- 地盤一杭一構造物系の遠心振動実験および一体モデル解析を行い、杭の鉛直変位が基礎梁の曲げモーメントに及ぼす影響を検討した。その結果、耐震壁近傍の基礎梁の曲げモーメントは、鉛直変位を考慮すると鉛直変位固定のそれの3倍程度になった。一方で、純ラーメン構造の中杭内側の基礎梁の曲げモーメントは鉛直変位を考慮すると鉛直変位固定のそれの2倍程度になった。
- 耐震壁を有する建物について、一体モデルおよび分離モデルの静的解析を行い、水平地盤反力が杭応力に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。水平地盤反力が大きくなると、耐震壁下の中杭の杭頭曲げモーメントが前方・後方杭より小さくなる傾向は強くなる。これは、水平地盤反力が大きくなると、鉛直力による杭の水平変位が杭頭付近に集中し、鉛直力による中杭の杭頭曲げモーメントが大きくなる、かつ、その向きが水平力による中杭の杭頭曲げモーメントと逆向きになるためである。
- 耐震壁を有する建物について、一体モデルおよび分離モデルの静的解析を行い、杭の鉛直変位が杭応力に及ぼす影響を検討し、以下の知見を得た。鉛直変位を考慮すると、前方・後方杭の曲げモーメントが中杭よりも大きくなり、鉛直変位を固定すると、中杭よりも小さくなる。これは、鉛直変位を考慮すると、耐震壁直下の基礎梁のロックイングによって、鉛直力による中杭の杭頭曲げモーメントが水平力によるそれと逆向きに発生するためである。

パイルキャップが先行破壊する既製杭基礎構造試験体3体の構造実験から、以下の知見を得た。

- 本実験においては、パイルキャップ内の補強筋量が異なっても、ひび割れ性状や最大耐力に大きな差異は見られなかった。また、いずれの試験体も高い靱性を有していた。
- パイルキャップ内補強筋はいずれの試験体においても、パイルキャップ上面に近い位置において一部の補強筋以外降伏しなかった。
- 補強筋のひずみ度から推定したパイルキャップ内の補強筋による引張力は最大耐力時においても、提案される評価式の60%程度に留まっていた。
- パイルキャップせい $B$ と埋込長 $l$ の比が大きい試験体で計算値は耐力を過小評価し、 $q_{max}/Q$ の下限値は、 $B/l = 4$ 以上で概ね $B/l$ に比例して増大する傾向があることから、耐力評価には、支圧力とパイルキャップ径を考慮することが必要である可能性がある。

また、寸法効果を確認した過去実験について、3次元ソリッドモデルを使用したFEM解析を実施した。杭頭部を想定しているが、加力装置の関係で上下反転した設置条件となっている。一般的な地盤と杭の関係から、せん断スパン比は2.5、設計規準強度 $F_c$ は $25 \text{ N/mm}^2$ である。一定軸力下で自由端に水平力を加えている。一般的な条件の鉄筋コンクリート杭に比べ、軸部の断面積を $2/3$ までスリム化した条件を想定しており、長期軸力として軸力比0.16を採用している。杭径350mmと杭径700mmの2種類が実験された。壁脚下における軸力変動など、長期軸力の3倍の高軸力作用下を想定した軸力比0.48の条件についても実験がされた。高強度せん断補強筋と普通強度せん断補強筋の条件を含む計6ケースにおいて、実験と解析を比較・考察した。その結果、杭径350mm、杭径700mmの両者に対して全体応答性状において最大耐力および最大耐力後の強度低下までを良好に表現できることを確認した。ここにおいて杭径による有意な差はみられなかった。長期軸力の3倍の軸力比0.48の場合について、解析において杭径700mmの場合を準備し、杭径による影響を考察した。併せて、回転角分布は杭径による影響は見られなかった。断面の応力分についても、通常設計で問題となる $1/67$ まで、影響は見られなかった。曲げ降伏が先行して、変形性能に期待する鉄筋コンクリート杭について、変形、応力分布に対する影響は軸

力条件が厳しい場合でも、大きな影響を与えるものではないと判断された。

杭基礎構造システムの杭頭埋込部における曲げ挙動に着目し、松田等による杭頭埋込部の曲げ耐力評価法（以下、既往評価式）を踏まえ、既製杭を想定した杭基礎部分架構試験体の杭頭埋込部の曲げ挙動および曲げ耐力評価を目的とし、杭基礎部分架構試験体の静的繰返し載荷実験を実施した。試験体は全5体である。また、既往評価式により杭頭埋込部曲げ耐力の評価を行った。以下に、結論を示す。

- 杭頭埋込長さを杭径の1.5倍とした試験体DR-2の負荷側を除いて、全試験体で杭頭埋込部周辺のコングリートが剥離・剥落し、耐力および剛性の低下が生じた。また、杭部材角 $R_p=3.88\%$ まで大きな耐力低下は生じず安定した挙動を示した。
- 杭頭埋込部の曲げ耐力評価について、既往評価式を用いた場合、高圧縮軸力が作用する試験体で危険側となる結果となった。

鋼管巻き中実杭の変形性能を型スケールに変更した場合に発揮できるか確認することを目的とし、杭基礎部分架構大型試験体1体の静的繰返し載荷実験を実施した。その結果、以下のことを明らかにした。

- 高軸力下において、杭部材は部材角 $R=10\%$ 程度まで安定した挙動となっており、実大規模の試験体においても高い変形性能を示した。
- 損傷は、杭頭位置での隙間部に集中しており、他部材のひび割れ等の発生はほとんど生じなかった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

|                                      |
|--------------------------------------|
| 1. 発表者名<br>田村修次                      |
| 2. 発表標題<br>動的遠心載荷実験における耐震壁が杭応力に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会                  |
| 4. 発表年<br>2021年                      |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名<br>志田 嶺                   |
| 2. 発表標題<br>杭の地震時鉛直変位が基礎梁の応力に及ぼす影響 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会                 |
| 4. 発表年<br>2022年                   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>志田嶺                         |
| 2. 発表標題<br>耐震壁を有する建物の杭応力 - 杭の鉛直変位の影響 - |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会                    |
| 4. 発表年<br>2023年                        |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>志田嶺                                 |
| 2. 発表標題<br>大地震時における耐震壁を有する建物の杭応力 - 水平地盤反力の影響 - |
| 3. 学会等名<br>地盤工学会大会                             |
| 4. 発表年<br>2023年                                |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>小原拓                          |
| 2. 発表標題<br>杭頭埋込部曲げ挙動に着目した杭基礎部分架構の構造性能評価 |
| 3. 学会等名<br>日本コンクリート工学会                  |
| 4. 発表年<br>2022年                         |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>幾竹 正明   |
| 2. 発表標題<br>地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート杭基礎構造システムの耐震性能評価手法および試設計 その1 杭頭埋込部曲げ挙動に着目した基礎部分架構の実験 実験概要と結果 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>大川 真吾   |
| 2. 発表標題<br>地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート杭基礎構造システムの耐震性能評価手法および試設計 その2 杭頭埋込部曲げ挙動に着目した基礎部分架構の実験 実験の考察 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会  |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>渡邊 秀和  |
| 2. 発表標題<br>地震後の継続使用性を確保するためのコンクリート杭基礎構造システムの耐震性能評価手法および試設計 その6 鋼管巻き中実杭を用いた杭基礎部分架構実験 |
| 3. 学会等名<br>日本建築学会大会   |
| 4. 発表年<br>2022年   |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                       | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                   | 備考 |
|-------|---|---|----|
| 研究分担者 | 向井 智久<br><br>(Tomohisa Mukai)<br><br>(30318208) | 国土技術政策総合研究所・建築研究部・室長<br><br><br>(82115) |    |
| 研究分担者 | 田村 修次<br><br>(Syuji Tamura)<br><br>(40313837)   | 東京工業大学・環境・社会理工学院・教授<br><br><br>(12608)  |    |
| 研究分担者 | 日比野 陽<br><br>(Yo Hibino)<br><br>(50456703)      | 名古屋大学・環境学研究科・准教授<br><br><br>(13901)     |    |
| 研究分担者 | 長江 拓也<br><br>(Takuya Nagae)<br><br>(90402932)   | 名古屋大学・減災連携研究センター・准教授<br><br><br>(13901) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|