

令和元年5月10日現在

機関番号：14401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2017～2018

課題番号：17H06837

研究課題名(和文)平成28年熊本地震での杭基礎被害解明と内陸直下地震に対する杭基礎の耐震設計高度化

研究課題名(英文)Cause investigation of damage in pile foundation during the 2016 Kumamoto Earthquake and improvement of response analysis method of pile foundation against inland earthquakes

研究代表者

中野 尊治(Nakano, Takaharu)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：00805806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,200,000円

研究成果の概要(和文)：平成28年熊本地震で震度7の揺れを2回経験した益城町庁舎を対象に、地盤-構造物系の非線形相互作用と杭基礎被害の要因を、現地地盤調査、実験、および解析から検討した。本研究では、凝灰質粘性土層の非線形挙動と強震動の連続入力に着目し、前者は粘性土地盤での揺れの増幅と杭周地盤抵抗の非線形性に分けて検討を行った。これらの要因を考慮した杭-上部構造連成系の解析を通じて、庁舎1階で観測された揺れを概ねシミュレーションできること、および非線形相互作用の各種要因が同庁舎の地震応答や杭の損傷に影響を及ぼすことを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平成28年熊本地震は、建物内(益城町庁舎)と近隣の地盤(KiK-net益城地点)で非常に強い揺れが同時に、それも複数回にわたり観測された稀有な事例である。特に建物内で得られた観測記録は、地盤-構造物系の非線形相互作用の影響を受けたものである。本研究は、内陸直下地震下の軟弱な粘性土地盤における非線形相互作用を観測記録と解析に基づいて説明したものであり、同現象の理解とモデル化に関する有用な知見を与えたと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This study aims to investigate factors of soil-structure interaction and pile damage of Mashiki Town Office during the 2016 Kumamoto Earthquake. The town office was subjected to strong motions twice. The investigation was based on in-situ ground survey, experiment, and analyses. For the response analysis of the town office, nonlinearity of volcanic clayey soil (i.e. strong motion amplification and nonlinearity of subgrade reaction) and continuous input motion were considered. As a result, calculated acceleration response of the first floor was in good agreement with observed one. The analytical result also showed that factors of soil-structure interaction influenced seismic response and pile damage of the town office.

研究分野：建築構造

キーワード：2016年熊本地震 杭基礎建物 非線形相互作用 地盤調査 凝灰質粘性土 杭-地盤間の剥離 有限要素法 質点系モデル

## 1. 研究開始当初の背景

杭基礎は、軟弱地盤上に市街地が広がるわが国で広く用いられる種類の基礎構造であり、建物を支持する重要な役割を果たす。しかし、過大な地震力の作用下で杭が破壊し鉛直支持力を失えば、上部構造に有害な沈下や傾斜が生じ、建物の機能が損なわれる恐れがある。杭が破壊した建物は修復に莫大な費用と時間を要し、解体を余儀なくされることも少なくない。杭の地震被害による社会的、経済的損失を抑えるためには、杭の高耐震化が必要となる。

内陸直下地震であった平成 28 年熊本地震では、震央に近い益城町庁舎の 1 階で震度 7 の揺れが 2 回観測された。この揺れは、近隣の KiK-net 益城地点で観測された揺れとは性質が異なり、地盤 - 構造物系の非線形相互作用の影響が指摘されている。また、同庁舎の一部の杭では本研究課題の申請時点で既に損傷が確認され、建物の解体が予定されている。解体工事に際してさらに詳細な杭基礎の被害調査も計画されようとしており、このような機会を利用して同庁舎での杭基礎の損傷要因を明らかにすることは、今後も起こりうる極大地震を見据えた杭基礎の応答解析法の改良に資すると考えられる。

同庁舎の被害要因のひとつに、阿蘇山の噴火により益城町一帯に堆積した凝灰質粘土地盤の非線形特性が考えられる。研究代表者らは過去の研究で、繰り返し外力を受ける粘土地盤中の杭の水平抵抗は、杭周地盤の塑性化だけでなく杭 - 地盤間の剥離の影響も受けて、砂質地盤とは異なる強非線形挙動を呈することを明らかにしている。この流れの中で、研究協力者の宮本は杭 - 地盤間の剥離を考慮して益城町庁舎の被害解析を行い、同現象が建物の実効入力動に影響を及ぼしたことを指摘している。ただし、同解析では剥離現象を模擬するために、剥離の発生が想定される杭頭部の杭周地盤ばねを完全に切り払うという大胆な仮定が用いられており、より精緻なモデル化による検討が望まれる。さらに、本地震の特徴である大振幅入力での繰り返しの影響についても検討が必要である。

実験研究の観点から見ると、粘土地盤に建つ杭基礎構造物を扱った振動実験は砂質地盤に比べて極めて例が少なく、その地震時挙動は十分に解明されているとは言い難い。その背景には実験室における粘土地盤の再現の難しさがあり、粘土地盤モデルの作製方法の開発が望まれる。

## 2. 研究の目的

本研究では、平成 28 年熊本地震を受けた益城町庁舎を対象に、地盤 - 構造物系の非線形相互作用と杭基礎被害の要因を検討する。主な着眼点は、

- 1) 同庁舎敷地に堆積する凝灰質粘土地盤の非線形特性
- 2) 震度 7 の揺れを複数回にわたり経験した影響

の 2 点である。前者はさらに、

- 1-1) 当該地盤における揺れの増幅特性
- 1-2) 杭 - 地盤間の剥離現象

に分枝する。これらの各種要因を現地地盤調査、実験、解析を通じて検討し、杭基礎の応答評価法の高精度化に資する知見を蓄積することを目指す。

## 3. 研究の方法

益城町庁舎における地盤 - 構造物系の非線形相互作用と杭基礎被害の各種要因について、現地地盤調査、実験、解析を通じて以下の方法で検討する。

- 1) 同庁舎敷地でボーリング調査を行い、凝灰質粘土地盤が持つ力学的特性を把握する。
- 2) KiK-net 益城地点と益城町庁舎敷地の地盤の地震応答解析を行い、凝灰質粘土層での揺れの増幅特性を検討する。前者の解析では観測記録との比較を行い、解析結果の妥当性を検討する。また、後者の解析には 1) で調べた地盤の特性を取り入れる。
- 3) 三次元有限要素解析と杭の原位置水平載荷実験の結果をもとに、粘土地盤中の杭における杭周地盤の水平抵抗性状を履歴特性も含めて検討する。
- 4) 益城町庁舎の杭 - 上部構造系を一体としてモデル化し、地震応答解析を通じて建物の揺れと杭の損傷について検討する。この時、杭 - 地盤間の力のやり取りは 3) を踏まえて杭周地盤ばねに置換する。また、杭には外力として、2) で求めた地盤の変位波形を杭周地盤ばねを介して入力する。さらに、大振幅入力での繰り返しの影響も検討する。
- 5) 上記の解析的検討の成果を振動台実験で実証することを目的として、実験室における粘土地盤の作製方法を開発する。

## 4. 研究成果

益城町庁舎における地盤 - 構造物系の非線形相互作用と杭基礎被害の要因の解明を目的として、以下の研究成果を得た。

- 1) 現地で行ったボーリング調査をもとに、庁舎敷地の表層に凝灰質の軟弱な粘性土が堆積していることを確認した。また、現地で採取した試料の室内土質試験を通じて、凝灰質粘性土の非線形特性を把握した。

- 2) KiK-net 益城地点における地盤の揺れの増幅は、解析モデルに非線形化の影響等を考慮することで概ねシミュレーションすることができた。庁舎敷地の地盤の応答解析では、KiK-net 益城地点に比べ地盤のひずみ応答が大きくなる結果が得られた。
- 3) 粘土地盤中の杭では、杭 - 地盤間に剥離が生じ、杭周地盤の水平抵抗にスリップ型の履歴性状が現れることを確認した。特に隣接杭の影響を受ける群杭では、スリップの性状は一段と複雑になる。
- 4) 益城町庁舎の応答解析では、杭 - 地盤間の剥離の影響を杭周地盤ばねの履歴特性に取り入れることで、1 階で観測された揺れを概ねシミュレーションすることができた。このことから、剥離現象が同庁舎の地震応答に影響を及ぼしたと考えられる。杭の損傷は、比較的小さい 1 回目の大振幅入力の時点で既に発生し、さらに 2 回目の大振幅入力に加わったことで一層進展したと考えられる。
- 5) 実験室での粘土地盤の作製方法として、密閉容器と圧縮空気をを用いて地盤を圧密する方法を開発した。本手法を用いて作製した粘土地盤に振幅を変えた地震動を入力したところ、揺れの増幅特性に顕著な振幅依存性が確認された。

## 5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

- 1) 中野尊治, 宮本裕司, 川辺秀憲: 2016 年熊本地震で連続した大振幅地震動が入力した益城町庁舎の非線形相互作用, 日本建築学会構造系論文集, Vol.83, No.748, pp.781-791, 2018.6 .

〔学会発表〕(計 6 件)

- 1) 中野尊治, 宮本裕司, 永野正行, 護雅史: 2016 年熊本地震での益城町庁舎における地盤応答と非線形相互作用, 第 15 回日本地震工学シンポジウム, pp.1834-1843, 2018.12 .
- 2) Nakano, T. and Miyamoto, Y. : Dynamic Nonlinear Horizontal Resistance of Pile Group Considering Soil Types and Pile-Soil Contact Conditions, Sustainability Issues for the Deep Foundations, pp.14-25, GeoMEast 2018, Cairo, Egypt, 2018.11.
- 3) Yixin Liao, 中野尊治, 宮本裕司: 2016 年熊本地震における益城町庁舎の非線形相互作用と地震応答 その 1 地盤調査結果と敷地地盤の応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.481-482, 2018.9 .
- 4) 中野尊治, 宮本裕司, Yixin Liao: 2016 年熊本地震における益城町庁舎の非線形相互作用と地震応答 その 2 杭 - 上部構造連成系の応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 II, pp.483-484, 2018.9 .
- 5) 中野尊治, 宮本裕司: 2016 年熊本地震における益城町庁舎の非線形相互作用と地震応答, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 構造系(58), pp.29-32, 2018.6 .
- 6) 中野尊治, 宮本裕司, 川辺秀憲: 2016 年熊本地震における益城町庁舎 1 階の応答シミュレーション, 日本地震工学会・大会-2017 梗概集, P2-17(ポスターセッション), 2017.11 .

〔図書〕(計 0 件)

該当なし

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

該当なし

取得状況(計 0 件)

該当なし

〔その他〕

ホームページ等

該当なし

## 6 . 研究組織

(1)研究分担者

該当なし

(2)研究協力者

研究協力者氏名：宮本裕司

ローマ字氏名：Yuji MIYAMOTO

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。