

令和元年6月6日現在

機関番号：12501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06566

研究課題名(和文) 日本の平野に特有の微地形に起因する建物杭基礎の地震被害メカニズム解明

研究課題名(英文) Mechanism analysis of earthquake damage to pile foundations due to characteristic micro landform of plains in Japan

研究代表者

中井 正一 (Nakai, Shoichi)

千葉大学・大学院工学研究院・名誉教授

研究者番号：90292664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：2011年東北地方太平洋沖地震により多数の杭被害が発生した。このうちの4地点では、細長い谷の中央に位置する複数の同形状建物のうち1棟のみが被害を受けた。敷地の地盤は概ね一様であることから、沖積谷と呼ばれる不整形地盤(谷地形に軟弱地盤が堆積した地盤)構造の影響により、敷地内で地震動や建物応答が変化した可能性が高い。本研究では、不整形地盤の影響による杭被害発生メカニズム解明を目的とし、2011年東北地方太平洋沖地震による杭被害の分析、対象地区の地盤モデル構築、地震観測による検証、数値解析による検証を行い、谷地形においては地震時の建物被害が複雑となり得ることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では地形が細かく変化することから、不整形地盤(平行成層ではない構造を有する地形・地盤)構造が多いと言える。国内外で、古くから不整形地盤の震動特性に関する研究が行われており、解析的な検討や地震観測記録の検証がなされている。しかしながら、不整形地盤に建つ建物群の地震被害分布に着目した検討はこれまでに知られていない。本検討は、典型的な不整形地盤である沖積谷地盤により、建物群のごく一部、しかも中央部に位置する建物だけに地震被害が集中する可能性を明らかにした最初の研究と考えられる。

研究成果の概要(英文)：Due to the 2011 Tohoku Earthquake, a number of buildings have suffered from damage to pile foundations. Among those, a characteristic damage pattern was found in that only one of many similar size buildings in the same site has suffered from pile damage, while other buildings have seemingly survived. Since these sites are situated in the middle of narrow river valleys, the effect of so-called alluvial valley was suggested. In order to clarify this hypothesis, a series of measurements and analyses have been carried out. It was found from the study that due to this irregular ground condition there is a possibility of a building located at the center of a site experiencing larger pile response compared with surrounding buildings when the site is situated in the middle of a narrow river valley. It was also found that this phenomenon is more evident in the case of shaking in the direction parallel to the longitudinal direction of the valley.

研究分野：地震工学

キーワード：地震被害 建物 杭基礎 微地形 不整形地盤 有限要素解析 地震観測 東北地方太平洋沖地震

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

## 1. 研究開始当初の背景

建物基礎の地震被害は、地上からは必ずしも明瞭ではなく、また調査も容易でないことから、地震直後に明らかになることは希である。しかしながら、国土交通省による杭被害調査（2012・2013年度）によれば、東北地方太平洋沖地震時に建物の杭被害が多数発生していたことが明らかとなった。建設年代の古い建物が多いものの、新耐震以降が16件（38%）、杭基礎の耐震設計がなされていた例が6件（15%）あったことは深刻な事態と言えよう。

注目すべきは、同一敷地内に建つ複数の同形状・同規模の建物のうち1棟のみが被害を受けた例が少なからず見られたことである。被害箇所41地点のうちの4地点は、谷底平野（台地に奥深く入り込む細長い低地）のほぼ中央に位置している。このような地形は日本の平野に広く分布している。首都圏東部地域の被害地点を図1に示す。また、図2には図1に示したサイトA付近の地形と建物配置を示す。図1に示す被害箇所6地点のうちの3地点が同じ条件下での杭被害である。このような敷地条件はいわゆる不整形地盤（地表面が水平かつ平行成層地盤という仮定が成立しない地盤）と呼ばれ、地震動分布が複雑に変化することが知られている。微地形によって表層地盤構造が異なることから、地震被害の程度は微地形に深く関係していると考えられるものの、同一微地形内での地震被害の差についてはこれまで詳細な分析がなされていない。

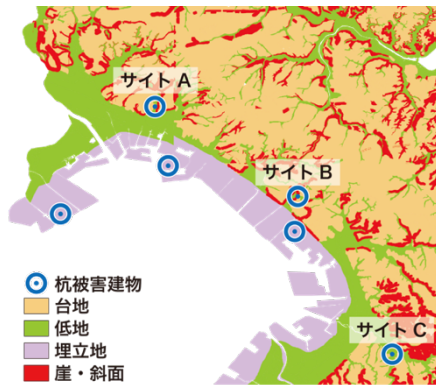


図1 首都圏東部地域での杭被害分布

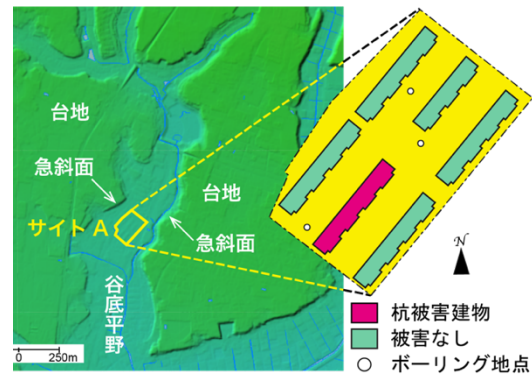


図2 サイトA付近の地形と建物配置

## 2. 研究の目的

特徴的な杭被害を受けた上記の4地点では、敷地内の地盤構造は概ね一様と考えられることから、沖積谷と呼ばれる不整形地盤構造（谷地形に軟弱地盤が堆積した構造）の影響により、敷地内で地震動・建物応答が大きく変化した可能性が高い。本研究では、不整形地盤の影響による独特の杭被害発生メカニズム解明を主たる研究目的とした。

## 3. 研究の方法

不整形地盤構造（谷地形に軟弱地盤が堆積した構造）の影響による杭被害発生のメカニズム解明に資する検討として、図1に示すサイトAを本研究の検討対象に、[A]2011年東北地方太平洋沖地震による杭被害の精査、[B]対象地区の地盤モデル構築、[C]地震観測による検証、[D]シミュレーション解析による検証、[E]谷地形における建物杭基礎の危険度評価、を実施した。

## 4. 研究成果

### 4.1 杭被害調査の精査（検討項目[A]）

国土交通省による杭被害調査によれば、全41地点のうちの4地点で、複数の同規模同形状の建物群のうち1棟のみが杭被害を受けると言う特徴的な被害状況であった。4地点のうちの3地点は、図1に示す首都圏東部地域のサイトA～C、もう1地点は福島県中央部であった。いずれのサイトも、細長い谷地形は微地形分類的には谷底平野にあたり、沖積の軟弱地盤が堆積している

と推測される。また、谷底平野周囲の地形はいわゆる台地であり、比較的良好な洪積地盤であると推測される。谷地形の幅（谷の短手方向の距離）は、200m～400m程度であった。

#### 4.2 地盤調査および地盤モデルの構築（検討項目[B]）

サイトAでは、谷の長手方向3箇所（図2）でボーリングがなされている。結果を図3に示す。図から分かる通り、谷の長手方向の地盤構造は概ね一様で、地表から約20m程度の軟弱な沖積層が堆積しており、その下部に洪積層と思われる硬質な地盤が現れる。

谷の短手方向の地盤構造はを調べるため、図4に示す地点での常時微動観測および公開資料に基づいて地盤構造を推定した。サイトAを通る谷の短手方向断面の推定地盤構造を図5に示す。

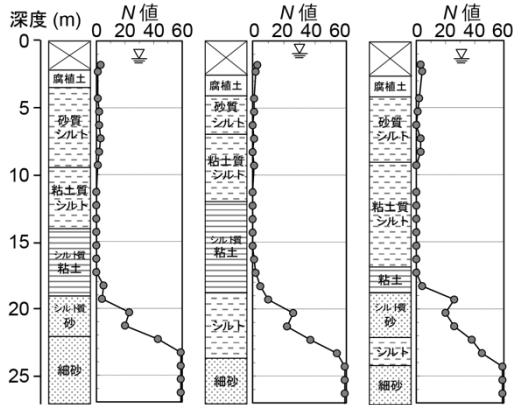


図3 サイトA敷地内のボーリング柱状図



図4 常時微動観測等の実施地点

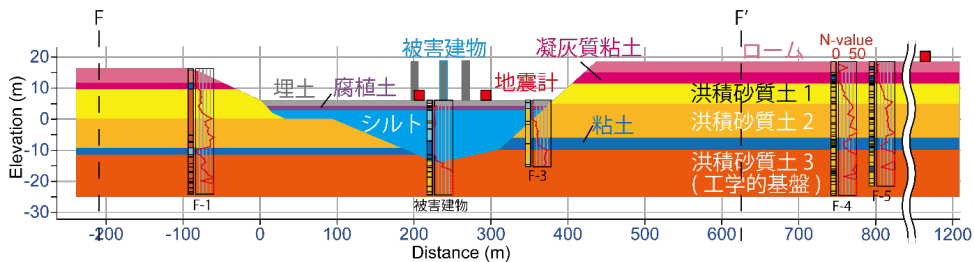


図5 推定地盤断面図

#### 4.3 地震観測（検討項目[C]）

谷地形における周期特性を把握するために、地震観測を行った。図4に地震観測位置を示す。図6に、観測された複数の地震記録を用いて求めた平均スペクトル比（低地のフーリエスペクトル÷台地のスペクトル）を、面内・面外方向（面内は谷の短手方向、面外は谷の長手方向、以下同様）について黒実線で示す。0.7~1s付近に着目すると、面内方向はほぼ1つの鋭いピーク、面外方向は複数のピークが広い周期に見られ、方位依存性が確認できる。低地端部付近では、面内・面外方向ともに低地中央部とは異なる複雑なスペクトル形状をしている。低地部の地下地盤構造は不整形である（水平成層構造ではない）と考えられる。

#### 4.4 地震観測結果の分析（検討項目[C]および[D]）

4.3で作成した地盤断面図を基に2次元有限要素モデルを作成し、面内方向（解析モデルの面内方向＝谷の短手方向）および面外方向（解析モデルの面外方向＝谷の長手方向）の動的解析を行い、基盤から地表への地震動増幅特性（伝達関数）を求めた。それによれば、地震記録の平均スペクトル比にみられた面内方向の「ほぼ1つの鋭いピーク」、面外方向の「幅広い周期に複数のピーク」といったピークの表れ方の特徴を良く再現できている。これらの特徴は1次元解析によ

る結果では再現出来ておらず、成層地盤では説明ができないことを示している。

図7に、解析から求めた低地部における伝達関数比の位置的な変化を示す。面内方向と面外方向を比較すると、面内方向は同じ周期が卓越している範囲が広く、狭い周期帯に鋭いピークを持っているのに対し、面外方向はピーク周期が位置によって複雑に変化しており、ピーク周期帯は面内方向に比べてやや広がっている。谷地形の2次元的な効果によるものと考えられる。

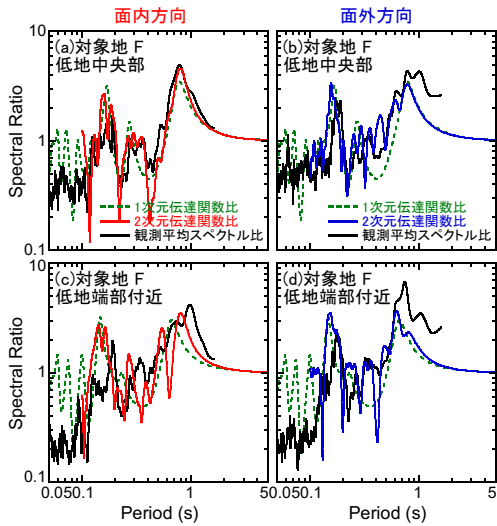


図6 地震記録と各解析結果

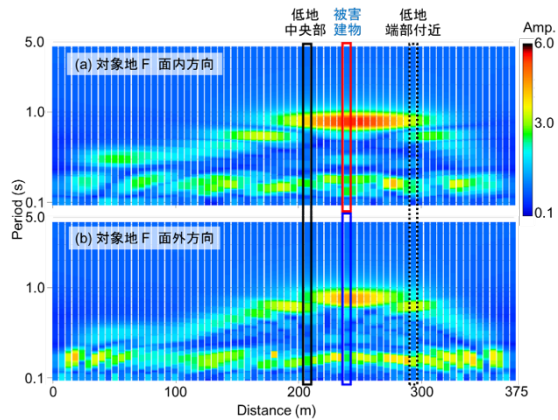


図7 低地部における伝達関数比の位置的变化

#### 4.5 建物－杭－地盤系の3次元解析（検討項目[D]）

ここでは、複数建物の位置の違いによって杭応力に差が現れる現象について検討するため、単純化されたモデルを用いた3次元有限要素法による地震応答解析を行った。

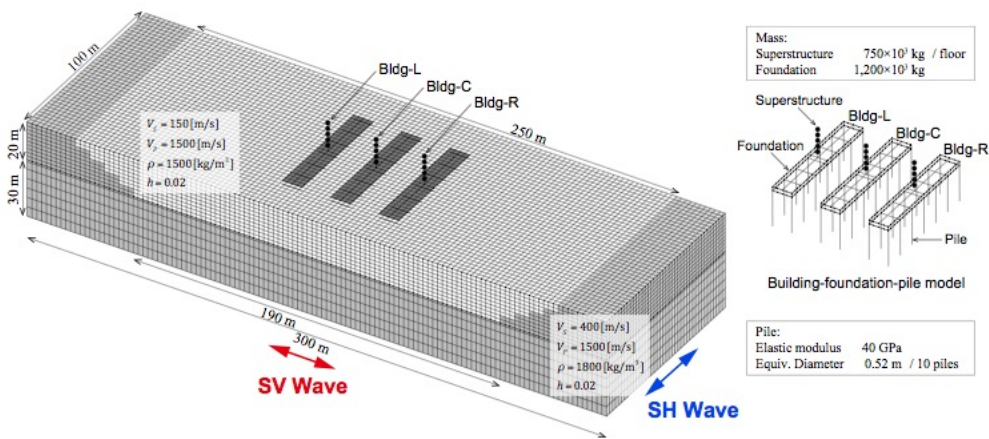


図8 3次元 FEM 解析モデル

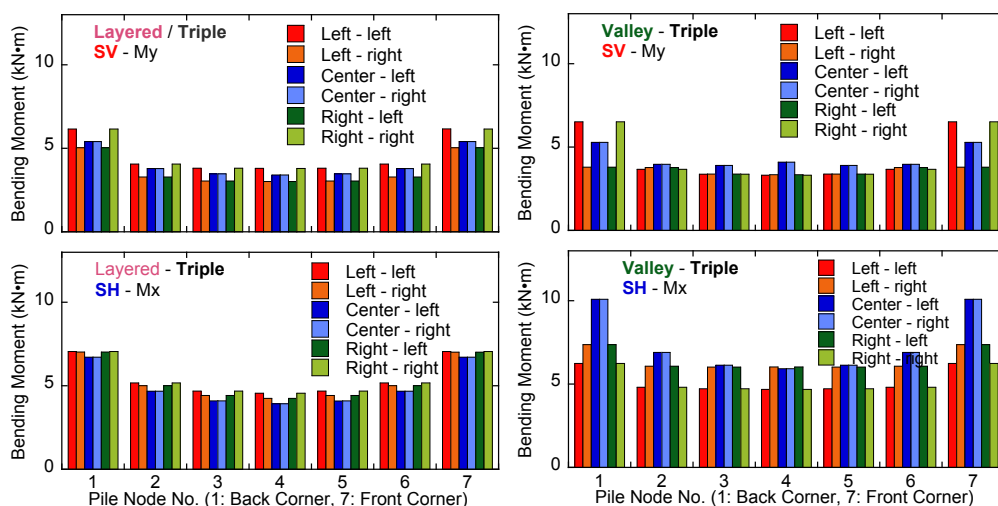
解析モデルを図8に示す。地盤は2次元的な沖積谷地盤（谷地形に軟弱地盤が堆積した構造）としている。なお、地層構造の不整形性のみに着目するため、地表に斜面は設けず軟弱層の両端では基盤が露頭したモデルとなっている。また、沖積谷地盤のほか、成層地盤のケースについても解析を行った。入力地震動としては、サイトの南東約3kmに位置する台地上の観測波から1次元等価線形解析によって求めた基盤露頭波を用いた。解析では、EW方向成分を解析モデルの長手方向（＝建物・谷の短手方向、以下SV）、NS方向成分を解析モデルの短手方向（＝建物・谷の長手方向、以下SH）にそれぞれ独立に入力している。

図9に、線形弾性解析の場合の杭頭最大曲げモーメントを示す。図中、SV、SHは前述の震動方向を、Layeredは平行成層地盤を、Valleyは沖積谷地盤を、Tripleは建物が3棟あることを、Center/Left

は3棟のうちの左端・中央の建物をそれぞれ表す。また、Cornerは隅杭（建物長辺方向の両端）、Centerは中央の杭を表している。図から分かる通り、杭頭の最大曲げモーメントは隅杭が中央部の杭よりも全般的に大きい。以下、図8右図の7対の杭（2列で合計14本）を表している。

- ・ 成層地盤では、3棟のうちの両端に当たる建物の杭頭の曲げモーメントが、中央の建物の杭に比べて大きい。
- ・ 沖積谷地盤では、両側よりも中央の建物の杭頭曲げモーメントがかなり大きくなる。その傾向はSH入力（建物および谷の長手方向震動時）においてより顕著である。

なお、図中の杭番号（Pile node no.）は、図8右図の7対の杭（2列で合計14本）を表している。



(a) 平行成層地盤の場合

(b) 不整形地盤（沖積谷地盤）の場合

図 13 杭頭の曲げモーメント

以上より、杭の被害分布の特異性に地盤の不整形性が影響を及ぼした可能性を確認することができた。なお、等価線形解析でもほぼ同様の結論が得られている。

#### 4.6 検討結果のまとめと今後の課題（検討項目[E]）

得られた結論をまとめると以下のようなものである。

- ・ 国交省による杭被害調査を精査した結果、全41被害地点のうち、すくなくとも4地点では同様の杭被害が見られた。
- ・ 検討対象としたサイトAの場合、谷底平野の地盤構造は、谷の長手方向の変化は小さいものの、短手方向にはかなり変化している。
- ・ 2次元解析によれば、谷の短手方向の震動よりも長手方向の震動の方が大きな増幅率を示す。また、杭被害建物付近の地震動が他地点に比べて大きくなり得ることも分かった。
- ・ 単純化モデルによる3次元解析によれば、平行成層地盤の場合は3棟のうちの両側の建物の杭の曲げモーメントが中央の建物の杭に比べて大きくなるが、沖積谷地盤の場合には、中央の建物の杭の応答が両側の建物に比べて大きくなることが分かった。

不整形地盤はパラメータが多く、今回得られた結果を定量化するにはさらなる検討が必要と考えられる。しかしながら、東北地方太平洋沖地震時に見られた特異な被害性状をある程度説明できたと考える。谷底平野のような微地形は全国に見られることから、類似のケースに当たる場合には詳細な検討を行うことが望まれる。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 3 件)

- 1) Gonzales, C., T. Sekiguchi, S. Nakai: Seismic Response of a Sandy Populated Slope in Lima, Peru, Journal of Structural Engineering (構造工学論文集), Vol. 63B, pp. 317-324, 2017 (査読有り)
- 2) Nakagawa, H., S. Nakai & T. Kashima: Effects of the Three-Dimensional Configuration of the Soil-Structure System on Building Response to Wave Propagation, Procedia Engineering, Vol. 199, pp. 2402-2407, 2017 (査読有り)
- 3) Nakai, S. & H. Nakagawa: Effect of Geological Irregularity on the Damage of Pile Foundations during an Earthquake, Procedia Engineering, Vol. 199, pp. 2408-2413, 2017 (査読有り)

〔学会発表〕 (計 14 件)

- 1) 庄子尚也、山本実、間瀬辰也、関口徹：埋込み深さに着目した地震応答解析モデルの適用性に関する検討、第15回日本地震工学シンポジウム、pp. 594-600、2018年12月、仙台
- 2) Nakai, S. & H. Nakagawa: Effects of Irregularity and Nonlinearity of the Soil on the Damage of Pile Foundations during an Earthquake, Proc. 16th European Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 10727, 10pp., 2018.6, Thessaloniki, Greece
- 3) 岸俊甫、関口徹、中井正一：地震観測と数値解析による沖積谷地形地盤振動特性の評価(その3)千葉県船橋市の例、日本建築学会大会、2018年9月、東北大学
- 4) 柏尚稔、中川博人：杭基礎の地震被害に関する研究動向、日本建築学会大会、構造部門(振動)パネルディスカッション資料、pp. 59-67、2018年9月、東北大学
- 5) 清水翼、関口徹、王寺秀介、鈴木一成：三次元グリッドモデルに基づく中川低地南部の埋没谷における二次元応答解析、地盤工学研究発表会、pp. 125-126、2018年7月、高松
- 6) 中川博人、鹿嶋俊英、中井正一：傾斜基盤および建物が地盤の観測記録に及ぼす影響に関する検討、日本建築学会大会、2017年9月、広島工業大学
- 7) 中井正一、中川博人：不整形地盤における特徴的な杭被害の要因分析、日本建築学会大会、pp. 311-312、2017年9月、広島工業大学
- 8) 清水翼、関口徹、王寺秀介、鈴木一成：三次元グリッドモデルに基づく中川低地南部における地震動増幅特性の評価、地盤工学研究発表会、2017年7月12日、名古屋国際会議場
- 9) 中井正一：地盤中の波動伝播および建物と地盤の動的相互作用-サブストラクチャー法に基づく解析-、日本建築学会、第42回地盤震動シンポジウム(招待講演)、2016年12月2日、建築会館
- 10) 中川博人、柏尚稔、中井正一、小山信：模型振動実験における杭頭絶縁基礎構造物の地震時挙動 その2：3次元FEMによるシミュレーション解析、地盤工学研究発表会、2016年9月15日、岡山大学
- 11) 谷沢智彦、関口徹：益城町の強震観測点における表層地盤増幅特性の推定、日本地震工学会大会、2016年9月、高知工科大学
- 12) Gonzales, C., T. Sekiguchi, and S. Nakai: Topographic Effects on the Seismic Response of a Sandy Populated Slope in Lima, Peru, 日本地震工学会大会、2016年9月、高知工科大学
- 13) 岸俊甫、関口徹、中井正一：地震観測と数値解析による沖積谷地形地盤振動特性の評価(その2)千葉市稲毛区の例、日本建築学会大会、2016年8月、福岡大学
- 14) 中川博人、柏尚稔、中井正一、小山信：杭頭絶縁基礎構造物の地震時挙動評価実験 その2：3次元FEMによるシミュレーション解析、日本建築学会大会、2016年8月、福岡大学

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

(特になし)

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：	研究分担者1 関口 徹	研究分担者2 中川 博人
ローマ字氏名：	SEKIGUCHI, Toru	NAKAGAWA, Hiroto
所属研究機関名：	千葉大学	国立研究開発法人建築研究所
部局名：	大学院工学研究院	構造研究グループ
職名：	准教授	主任研究員
研究者番号：	50451753	80713007

### (2)研究協力者

なし

※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。