

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06639

研究課題名（和文）熊本地震において2度の震度7を経験した庁舎建築の被災シミュレーション解析

研究課題名（英文）Damage simulation analyses of a government building that experienced two seismic intensities of 7 in the 2016 Kumamoto earthquake

研究代表者

護 雅史（Mori, Masafumi）

名古屋大学・減災連携研究センター・特任教授

研究者番号：40447842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、建物とその周辺地盤で初めて震度7の地震動が同時観測された2016年熊本地震における庁舎建物の強震時応答を、被災状況等の詳細な情報や調査結果に基づいた被災シミュレーション解析により明らかにするものである。平成28年度、29年度は、建物・周辺地盤関連の資料収集と現地調査（常時微動計測による地盤調査、及び建物振動特性分析、目視による建物被災調査、目視、及びIT試験、ピアホールカメラによる杭被災調査等）を実施し、対象建物の現状把握を行った。29年度～最終年度は、3次元フレームモデルによる被災シミュレーション解析を実施し、当該建物の被災メカニズムについて分析した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

1．入力地震動と建物応答、建物設計条件、及び基礎を含む建物被災状況の多くが把握された条件下で、現状の設計ではあまり積極的に考慮されないものの地震時には必ず作用する地盤と建物の動的相互作用を含む大地震時の建物挙動を明らかにできたこと、2．耐震補強が杭基礎構造の地震応答に与える影響が明らかにされたことが、機能維持を目的とした基礎構造の耐震性評価に大きく貢献することが期待される点、3．従来は動的相互作用を全く考慮しなかった結果に比べて、より真実に近い被害予測が可能となり、軟弱地盤に多数立地する低層杭基礎建物に対する新たな課題の抽出にもつながることから、都市の強靱化に大きく貢献できたこと。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to clarify the response during the 2016 Kumamoto earthquake, where ground motions with seismic intensity 7 were simultaneously observed in the building and its surrounding ground, by analyzing the damage simulation based on detailed information such as the damage situation and survey results. In FY2017 and FY2018, to understand the present status of the target building, materials related to buildings and surrounding soil were collected and field survey (ground survey by microtremor measurement, building vibration characteristics analysis, building damage survey by visual inspection, pile damage survey by visual inspection and IT test by the borehole camera, etc.) were performed. From FY2018 to FY2019, disaster simulation analyses using a 3D frame model were conducted to analyze the damage mechanism of the building and its piles under the 2016 Kumamoto earthquake.

研究分野：耐震工学

キーワード：2016年熊本地震 建物被害 杭基礎被害 被災シミュレーション 常時微動計測 地盤非線形 IT試験 ポアホールカメラ

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。

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2016年熊本地震においては、役場庁舎内に設置された震度計で14日、16日の2度にわたり震度7が記録された。当該地周辺では、古い木造家屋を中心の甚大な被害が発生した。その一方で、RC造4階建ての町営住宅では、外見上大きな構造的被害が認められなかった。また、耐震改修を終了していた当役場庁舎は大破を免れ、上部構造には外観上、際立った損傷は認められなかった。

一般建物に対する動的相互作用については、大地震時には、周辺地盤や建物が非線形特性を示すことから、弾性論の範囲で取り扱いが難しい。被災要因を詳細かつ高い信頼性をもって分析するためには、建物とその周辺地盤の地震観測記録、当該建物の設計資料、敷地地盤条件、さらには基礎を含む建物被災状況の情報が必要となる。しかし、既往の研究成果では、これら全てが揃っていた事例は残念ながら海外を見ても皆無であり、何らかの仮定やモデル化に頼らざるを得なかったのが現状である。本研究で取り扱おうとしている案件は、これらの情報が揃い、これまでにない信頼性が高い分析ができる可能性が非常に高い。また、将来的にも今回の同様の事例を期待することは非常に困難であることが考えられるため、一般建物に対する大地震時の非線形動的相互作用を含む地震時挙動を明らかにし、今後の耐震設計や被害推定に生かすには又とない機会である。

2. 研究の目的

本研究では、2016年熊本地震で被災した益城町役場庁舎（以下、庁舎）を対象に、非線形の動的相互作用効果が地震被害に及ぼす影響について研究することを目的とする。研究の具体的な内容は、まず現地での被害調査による庁舎の被災状況について述べ、また常時微動計測により建物の振動特性の分析を行う。次に庁舎の被災シミュレーションを行い、実現象の再現を試みる。その際に現地での実被害調査の結果や、強震計や常時微動計測の記録等の資料は、解析結果が実現象に即しているか、その妥当性を検証する上で重要な資料となる。最後に構築した解析モデルを用いて、建物強度や非線形性が建物の地震時応答に及ぼす影響について検討し、耐震設計や被害予測を適切に行うために必要となる非線形動的相互作用効果の知見を得ることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 建物・周辺地盤関連の資料収集と現地調査

当該建物(写真1)では、設計図書や耐震診断・耐震補強報告書等が存在することから、これらの収集を行うとともに、解析に必要な情報を整理する。また、建物の被害調査や常時微動計測を実施する。常時微動計測は、周辺地盤、周辺地盤と建物、建物内の3ケースで実施し、地盤、建物の振動特性、及び有効入力動など地盤と建物の動的相互作用についての分析を行うとともに、解析モデルの作成に役立てる。また、解体工事に合わせて、杭基礎等の被害調査を実施する。

(2) 地震応答解析モデルの構築と表層地盤応答評価の準備

(1)で収集・整理した情報をもとに、地盤モデルを構築するとともに、準備段階として、既往の研究成果に基づき、表層地盤応答評価、ならびに杭基礎を含むPenzienモデル(くし団子モデル)によるシミュレーション解析を実施して、被災状況や観測記録と対応関係を確認する。

(3) 被災シミュレーション解析の実施

杭を含む3次元フレームモデルによる被災シミュレーション解析を実施し、各杭の応答評価を実施し、当該建物の被災メカニズムを明らかにする。これらの検討を通じて、既往の杭基礎建物に対する被災シミュレーション解析におけるモデル化の妥当性や課題が抽出される。さらに、構築した解析モデルをベースに、当該建物の耐震補強前のモデルを作成し、地震応答解析を実施することにより、耐震補強が上部構造と下部構造の被害に与える影響について明らかにする。当該建物では、耐震診断が実施されており、耐震補強前の状態も再現できることから、このような検討が可能となる。また、4月14日、16日の地震を連続して入力することにより、2度の震度7が当該建物応答に与えた影響についても分析を加えた。

4. 研究成果

(1) 2016年熊本地震による益城町役場庁舎の被害

① 庁舎の概要と上部構造の被害

建物外観を写真1に、庁舎概要を表1に示す。庁舎は軟弱な火山性地盤上に立地する杭基礎低層RC造建物であり、動的相互作用の影響は大きいものと考えられる。また耐震改修により庁舎の南側構面にはアウトフレーム架構が新設された。地震被害について、上部構造の外観上では、柱や梁に目立った損傷は確認されなかった。

② 庁舎基礎杭の被害

2018年2月より実施された庁舎上部建物の解体作業に合わせて、IT試験とボアホールカメラによる基礎杭の被害調査を行った。被害調査結果は地震応答解析結果の妥当性を検証できる資料となる。図1に被害調査を行った杭の位置を示す。各番号は図1に対応する。調査した6本の杭のうち5本の杭頭で明瞭な損傷が確認された。



写真1 建物外観 (視点：南東)

表1 庁舎の概要

延床面積	3748.75m ²	構造種別	RC造
建築面積	1566.10m ²	構造形式	ラーメン構造
竣工	1980年	基礎種別	杭基礎
耐震改修	2012年		PC杭またはAC杭
階数	地上3階建て		φ400
	塔屋1階建て		L=26.0m L=28.0m
階高	4.455m (1階)		L=30.0m L=32.0m
	3.815m (2階)		武智三角杭
	3.830m (3階)		L=8.5m
軒高	12.40m		鋼管杭 (アウトフレーム)
塔屋高さ	16.55m		φ318.5
			L=27.0m

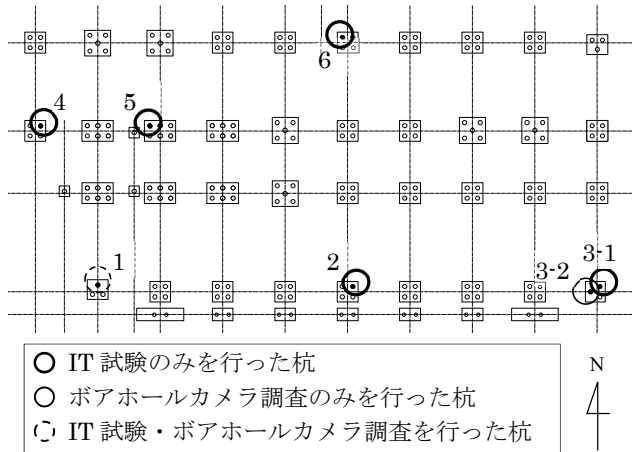


図1 杭伏図と被害調査を行った杭の位置

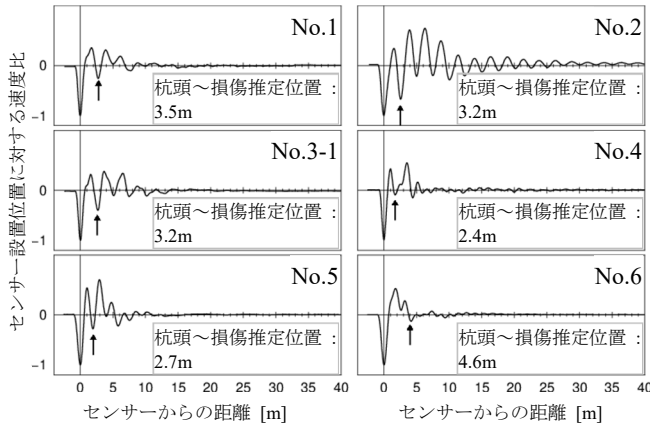


図2 IT試験の結果 ($V_p = 4200\text{m/s}$)

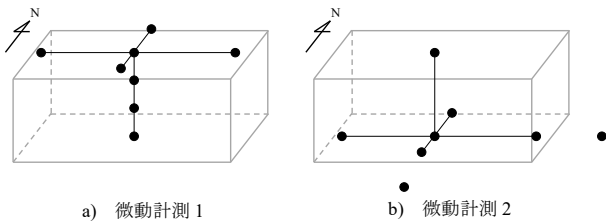


図4 建物概形及び常時微動の計測点配置

9.28m、NS方向で9.33mとなった。振幅比スペクトルに対して固有振動数と減衰定数をパラメータとした、等価な1自由度系の伝達関数を推定したシステム同定を試みた。同定した結果を表2に示す。庁舎が全体的に壁の少ないラーメン構造であるためか、伝達関数ごとで方向による固有振動数の差は小さい。また固有振動数を固有周期 $T=0.02h$ (h : 建物高さ) より概算すると4.03Hzであり、基礎固定系とスウェイ固定系のピーク振動数の間となる。

(3) 益城町役場庁舎の被災状況に関する解析的検討

① 解析手法と解析条件

建物は図6のような3次元モデルとして考える。モデルは柱梁接合部を節点とし、柱と大梁

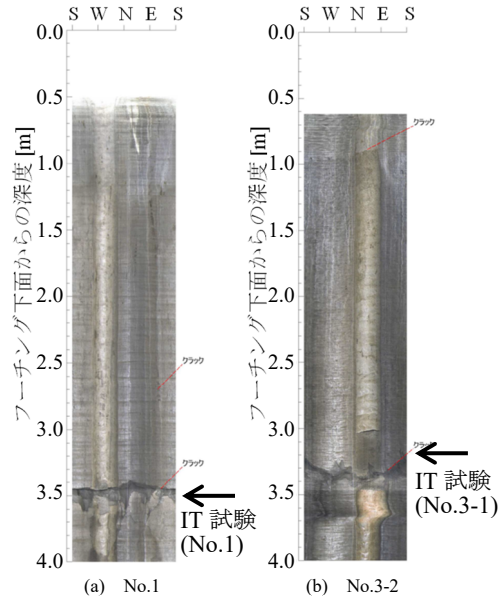


図3 ボアホールカメラの調査結果

続いて図2にIT試験の結果を示す。コンクリート中の縦波伝播速度は4200m/sとした。図中には杭頭から損傷が推定された位置までの距離を表示している。杭長は26.0~32.0mだが、いずれもそれ以浅の2.4m~4.6mの位置から繰り返し反射の様子が見られるため、これらの位置での著しい損傷が推定される。またNo.1とNo.3-2の杭ではボアホールカメラによる調査を実施した。IT試験結果と比較するには杭No.3-1での調査が望ましかったが、杭の内部に土砂が固結して調査が困難であったため、隣接する杭No.3-2で調査を行った。IT試験の結果をボアホールカメラによる調査結果と比較したところ、図3に示すように損傷位置の対応は良く、他の杭を含め、IT試験の結果には信頼性があると考えられる。

(2) 常時微動計測に基づく地盤・建物振動特性の分析

① 計測体制

地盤と建物の振動特性を把握するために、被災後の庁舎に対して計3回の常時微動計測を行った(2016年9月、2017年12月、2018年5月)。振動特性の分析は地震応答解析の結果を検証する上で重要な資料となる。ここでは建物の振動特性を詳細に分析した2回目の計測のうち2つのケースについて述べる。図4に計測体制を示す。

② 庁舎の振動特性分析結果

図5に動的相互作用を考慮した伝達関数を示す。建物の等価高さは図4a)の配置から求まる1モードを用いた結果、EW方向で

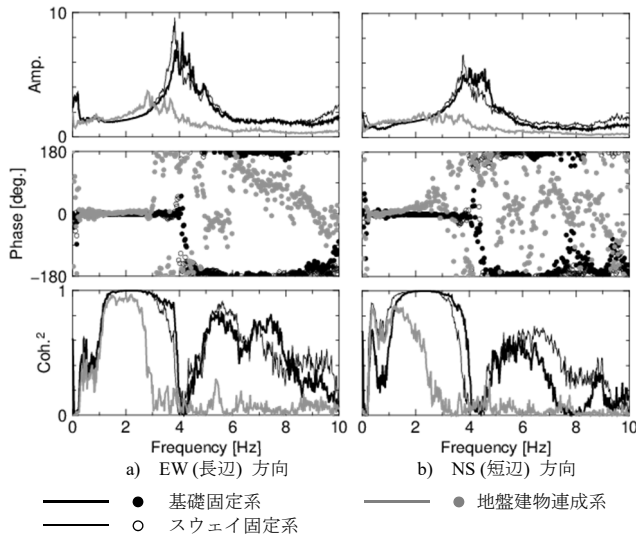


図5 動的相互作用の影響を考慮した建物の伝達関数

表2 システム同定したパラメータの結果

パラメータ	基礎固定系	スウェイ固定系	地盤建物連成系
固有振動数(長辺) [Hz]	4.19	3.91	3.19
減衰定数(長辺) [%]	7.2	6.4	19.3
固有振動数(短辺) [Hz]	4.28	3.93	2.95
減衰定数(短辺) [%]	9.4	9.8	36.8

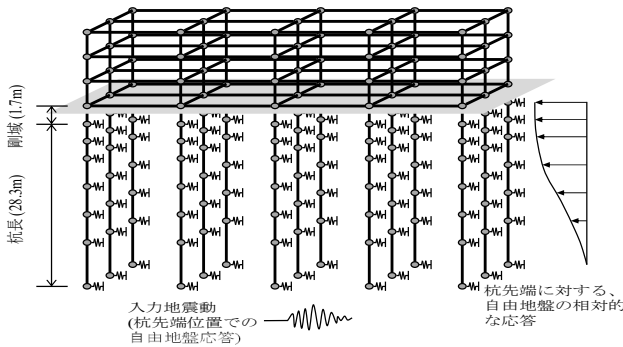


図6 庁舎の3次元立地地震応答解析モデルの概略図

表3 地震応答解析に用いる庁舎地点の地盤物性値

深さ [m]	層厚 [m]	V_s [m/s]	ρ [t/m ³]	γ_r [%]	h_{max} [%]
7	7	120	1.4	0.086	10
15	8	190	1.4	0.076	10
23	8	320	1.8	0.100	21
38	15	410	1.8	0.100	21

GL-38m以深は、KMMH16で計算による地中に対する地表のスペクトル比が観測波のものと対応が良くなるよう設定

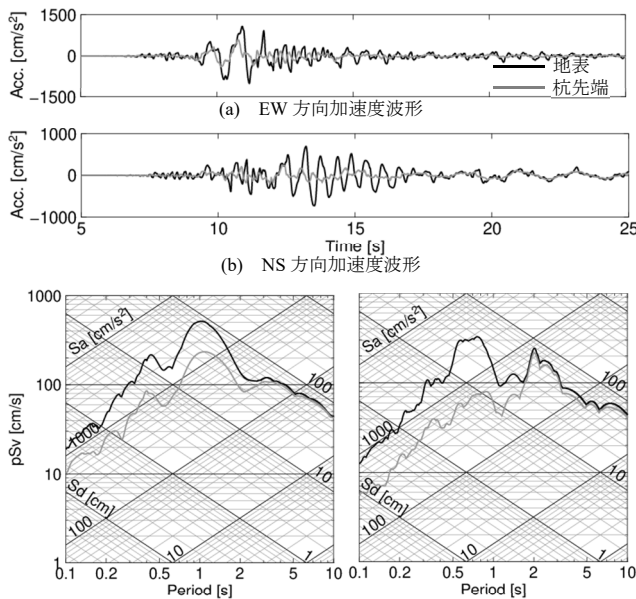


図7 4/16地震における庁舎の入力地震動の解析結果

を材端ばねをもつ非線形梁要素として各節点と結合させている。壁は壁谷澤モデルとし、スラブは線形とした。基礎杭については、各フーチングで1本の杭に集約し、深さ方向に複数の節点に分割して同様の梁要素によってモデル化している。杭の節点には杭周地盤ばねを取り付け、地盤震動に伴う水平力を杭に作用させている。杭の全長は簡易のため30mで統一しているが、GL-1.7mまでのフーチングによる根入れを考慮し、この深さまでは剛体とした。質量について、上部構造は各階ごとの質量を計算し、それに階の床面積に対する各節点の支配面積の割合を乗じた値をその節点に与える質量とした。杭の節点に与える質量については、杭の単位体積質量に集約した杭の断面積をかけ、各節点の支配長さをかけて求めた。各構造部材の履歴則については、柱、梁、壁は第1折れ点をひび割れ耐力、第2折れ点を終局耐力とするノーマルトリリニア型の骨格曲線とした。

終局時の剛性低下率は菅野の式を用いた。杭はファイバーモデルの静的増分解析により骨格曲線を決定した。杭周地盤ばねの履歴則の骨格曲線は極限地盤反力を用いた双曲線モデルとした。

② 入力地震動の推定

庁舎の地盤モデルは既往の研究によるPS検層結果を用い、それ以深の深部地盤はKiK-net 益城(以下、KMMH16)の地中観測点(GL-252m)に対する地表観測点のフーリエスペクトル比について、一次元重複反射理論から計算される比がKMMH16で観測される中小地震による比と最も対応するような物性値を推定した。表3に地盤物性値を示す。地盤の履歴特性には修正R0モデルの骨格曲線を与えた。また入力地震動は、KMMH16の地中波とした。4/16地震での、庁舎地点の地表と杭先端位置での自由地盤応答解析結果を図7に示す。

③ 観測記録・実被害と解析結果の比較

解析では自由地盤の剛性低下率と、先述した杭周地盤ばねと建物構造部材の非線形性を考慮した。まず2つの地震で、宮園震度計で得られた加速度波形と応答スペクトルに対して、解析結果を観測記録と比較して図8に示す。なお、ここでは観測波形と比較的対応が良かったEW方向についてのみ示している。解析結果は観測記録と概ね対応しているが、解析では両地震とも約0.5秒以下の短周期成分が大きく、また4/16地震では約1秒のピーク周期を短周期側に評価している。次に図2に示した各杭の応答結果を、曲げモーメントとせん断力についてそれぞれ図9と図10に示す。結果は4/14地震に対する応答で、図中にはIT試験結果と耐力も併記している。図9よりGL-5~10m付近において解析における曲げモーメントが極大になっているが、これは図3のIT試験

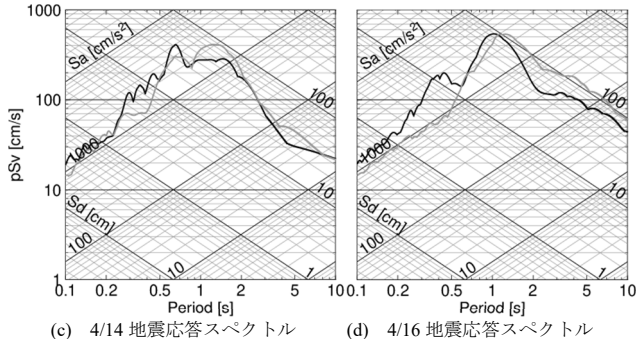
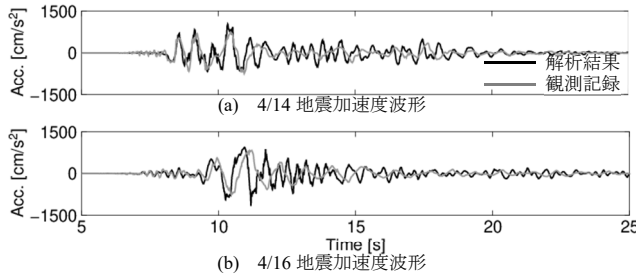


図8 宮園震度計位置の解析結果と観測記録の比較 (EW 方向)

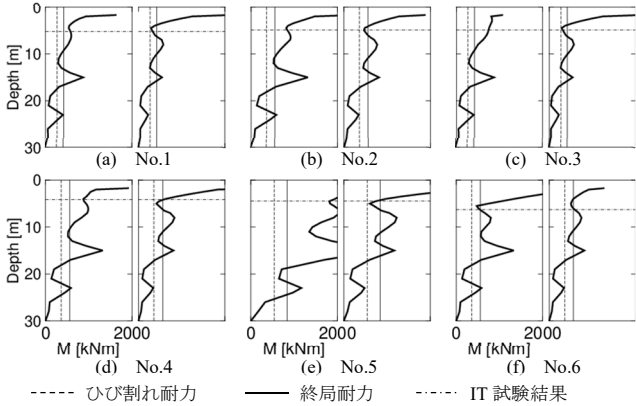


図9 杭のEW方向(左)とNS方向(右)の曲げモーメント分布

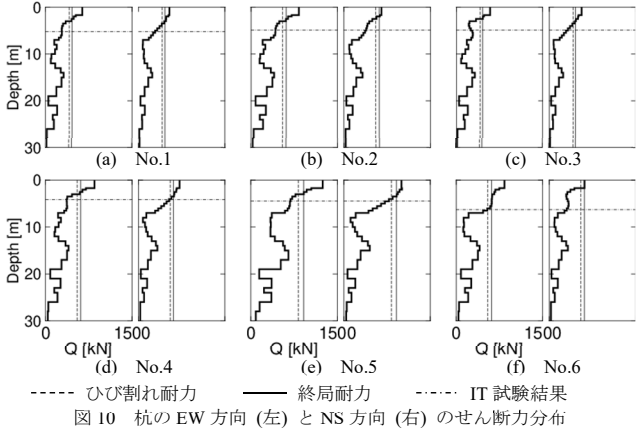


図10 杭のEW方向(左)とNS方向(右)のせん断力分布

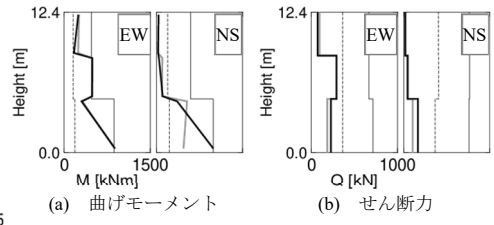


図11 アウトフレームによる柱の応答結果の違い

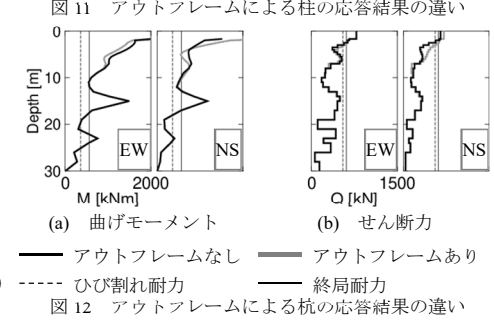


図12 アウトフレームによる杭の応答結果の違い

結果よりも深い位置であることが分かる。また図10より全ての杭頭でせん断終局耐力に達していることがわかる。ただし上部構造の柱について、多くの柱はその応答が曲げ終局耐力まで達しており、先述した上部構造の被害が軽微であったとする調査結果との対応は良くなかったことを記しておく。

④ 建物強度が地震時挙動に及ぼす影響

非線形動的相互作用効果を考慮した条件下で、ここではアウトフレームが庁舎の地震時挙動に及ぼす影響について分析する。柱と杭のうち、アウトフレームを除外したときの解析結果で特徴的であったものについて述べる。4/16地震に対する、図1のNo.2の位置における柱と杭の曲げモーメント、せん断力の応答をそれぞれ図11と図12に示す。図よりアウトフレームによって1階の柱は応答が低減されるが、杭頭は応答が増加していることが分かる。これは耐震補強によって上部建物の損傷が抑制されたことで、杭頭にかかる水平力が大きくなったことが一つの要因として考えられる。このことから、上部建物を補強した代わりに、杭に被害が生じやすくなる可能性があると言える。ただし今回の解析検討内ではあるが、杭頭ではアウトフ

レームがない場合でも終局耐力を超過していることを鑑みれば、杭の被害抑制には、現状よりも高耐力の杭の採用、鋼管巻き等による補強等の対策を施す必要があると考えられる。

⑤ 結論

本研究では2016年熊本地震で被災した庁舎に対して被災シミュレーションを実施し、実被害の再現を試みた。その結果、シミュレーションと実現象の間には乖離があり、解析には課題があることを確認した。また、非線形動的相互作用効果を考慮して、アウトフレームによる柱と杭の応答結果の違いについて分析したが、今後は建物強度や非線形性が実際の地震時応答に与える影響の程度について検討し、適切な耐震性能を把握することが望まれる。

謝辞

解析にあたっては清水建設株式会社所有の3次元非線形地震応答解析システム idac を使用させて頂きました。また、研究の実施に当たっては、宮本裕司・大阪大学教授、並びに永野正行・東京理科大学教授にご助言いただくとともに、当時大学院生の丹裕也氏に協力いただきました。ここに感謝いたします。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 護雅史、丹裕也、宮本裕司、永野正行
2. 発表標題 2016年熊本地震で被災した庁舎建物の建物振動特性と杭基礎被害との関係
3. 学会等名 第15回日本地震工学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹裕也、護雅史、飛田潤、福和伸夫
2. 発表標題 振動計測に基づく2016年熊本地震で被災した低層RC造杭基礎建物及びその周辺地盤の振動特性の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 丹裕也・護雅史・飛田潤・福和伸夫
2. 発表標題 振動計測に基づく2016年熊本地震で被災した低層RC造杭基礎建物及びその周辺地盤の振動特性の分析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----