

■受領No.1370

巨大地震下の建物の杭部材の損傷検知技術の開発

代表研究者

林 和宏 豊橋技術科学大学大学院工学研究科 助教



1. 研究目的

2016年の熊本地震では、熊本県益城町を中心に甚大な建物被害が発生した。当該地域の防災拠点となるべき益城町役場は、新耐震基準に適合するよう上部構造の耐震補強がなされており、主要構造部材に重大な損傷は生じていない。しかし、建物の沈下や傾斜等から下部構造の損傷が疑われ、掘削検査の結果、地中の杭部材に大きな被害が確認され、建物全体の取り壊しが決定された。また、2011年の東北地方太平洋沖地震では、首都圏を中心に広域で地盤の液状化被害が発生した。これらの地域では、液状化による地盤変状などによって地中の杭部材に大きな被害が生じた事例が多数報告されており、上部構造物の被害が軽微であるにもかかわらず、大掛かりな補修・補強工事の実施や建物の取り壊しに至ったケースも散見される。

日本では、建物上部構造の耐震性能向上に向けた研究と、その知見に基づく耐震補修・補強を広域展開する社会活動が長らく続けられており、その成果は近年の巨大地震災害でも実証されている。これに対し、建物下部構造は中小地震を対象とした許容応力度設計に基づく一次設計体系が中核であり続けたため、上部構造と下部構造の耐震性能のバランスが崩れてきている。

さらに、建物下部構造は上部構造と異なり地震被害による損傷が直接目視できないため、被災後の復旧活動混乱期に見過ごされる可能性が指摘さ

れている。過去には、被災後15年以上に亘って使用され続けた公共建物において、撤去解体時に初めて地中杭部材に重大な損傷が発生していたことが明らかになった事例もある。現在では、災害に対する事業継続マネジメントBCMの観点から、建物の地震損傷を即座に同定し、それを建物管理者に伝えるモニタリングシステムの必要性が叫ばれている。損傷部位が直接見えない下部構造では、センシングによる損傷モニタリングの重要度がより高い。

本研究では、大型構造物で用いられている場所打ちの鉄筋コンクリート杭(以後、RC杭)部材を対象とし、①巨大地震時の建物応答性状および杭破壊挙動の解明と、それに基づく②地中杭部材の損傷センシング技術の開発、の2課題達成をめざす。特に、本研究では杭部材の損傷センシングにおいて、建物所有者が敬遠する破壊試験や高額な周辺地盤の掘削作業は行わないことを前提とし、幅広い社会実装を見据えた成果展開をめざす。

2. 研究内容

本研究では、巨大地震発生時の飽和砂地盤-RC杭基礎構造建物系を対象とし、杭部材の損傷進展、地盤特性の変化、それらに伴う建物上部構造の地震応答性状の変動解明に向けて遠心場振動実験を実施した。特に本論では、実験的検討例が少ない大断面の鉄筋コンクリート杭を対象に、飽和砂地

盤液状化時の損傷挙動や杭基礎建物の振動応答を実験的に検討した。本論の実験は、全て京都大学防災研究所の遠心力載荷装置を用い、50G場で実施した。

2.1 実験概要

遠心場振動実験に用いる飽和砂地盤-杭基礎建物連成系実験モデルの概要を図1に示す。上部構造は一つの質量体と板バネで再現し、基礎部は杭長200mm(実大スケールで10m)のRC杭部材4本で支持している。杭頭および杭先端は剛接合とした。基礎部の質量は1.77kg、上部構造物の質量は7.42kgであり、上部構造物の固有周期は0.013sec(実大スケールで0.63sec)である。上部構造の1次固有周期と杭の作用軸力は、10階建てRC造建物を模擬している。地盤は豊浦砂を用い、空中落下法で相対密度を調整した後、水の50倍の粘性をもつメトロゾ溶液を注入し飽和させた。

振動実験の加振は水平1方向とし、入力波は全て臨海波とした。実験では、初めに本震を意図した最大加速度650gal程度の加振を入力し、その後余震を意図した最大加速度350gal程度の加振を複数回入力した。

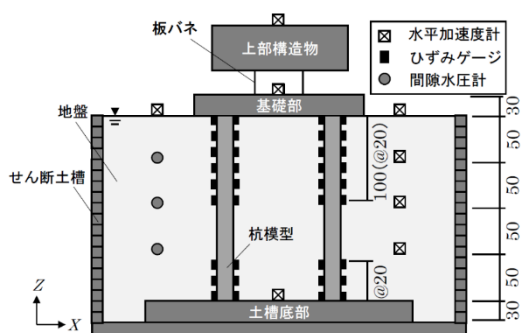


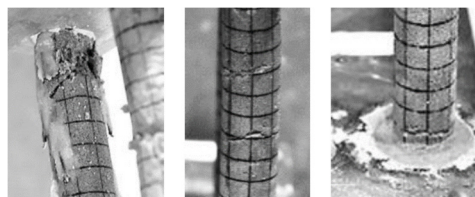
図1 飽和砂地盤-杭基礎建物連成系振動実験モデル

2.2 実験結果

図2に、実験終了後のRC杭部材損傷状況を示す。実験では、杭部材4本すべてで杭頭部に曲げ破壊を呈していた(図2(a))。また、深さ4m付近と杭先端付近にも、多数の曲げひび割れ(図2(b), (c))

が生じている。

図3に、建物の慣性力-基礎部水平変位関係を示す。図中の黒実線は、地中の過剰間隙水圧比0.2未満、黒鎖線が0.2以上0.8未満、灰実線が0.8以上である。慣性力-基礎部水平変位関係における接線勾配は過剰間隙水圧の上昇に伴い、低下してることがわかる。これは、地盤の液状化によって、杭部材に作用していた水平補剛力が低下したことを示している。図2に示すように、RC杭部材は杭頭と杭先端に曲げ破壊に伴う塑性ヒンジが形成されていた。図3では、過剰間隙水圧比が0.8を超え、図中に破線で示した算定耐力(4Qu)を上回った後、急激に接線剛性が低下する挙動がみられた。したがって、実験モデルはこの時点で杭模型に2点ヒンジの破壊モードが形成され、終局状態に至ったと考えられる。



(a)杭頭部 (b)杭中間部 (c)杭先端部

図2 実験終了後のRC杭部材損傷状況

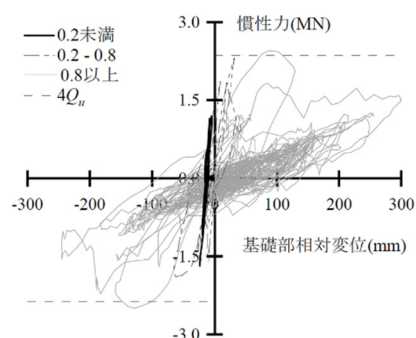


図3 実験モデルの慣性力-変位関係

2.3 RC杭部材の損傷評価

図4は、I. 杭が健全な状態、II. 本震加振によって杭が一部損傷した状態、III. 余震加振によって損傷がさらに進んだ状態、IV. 杭頭が圧壊し建物に大きな残留傾斜が生じた状態、における建物

基礎部の鉛直加速度スペクトルを示す。図中、太実線で示す杭が健全な状態では、スペクトルのピーク周期は0.13秒程度にある。これに対して、太破線で示すII.地盤の液状化により杭が損傷した状態では、ピーク周期が0.15秒前後と健全状態の1.2倍近くに移動している。これは、杭が損傷することで部材の剛性が低下し、系の固有周期が伸びたためと考えられる。最終的に、杭頭が圧壊したIV.(図中の細鎖線)では、ピーク周期が0.17秒程度まで大きくなっている。以上より、地中の杭部材の損傷は、直上の建物基礎部の鉛直方向加速度スペクトルのピーク周期から、ある程度推定可能と考えられる。

今後は、実建物に用いられている杭部材の断面諸量や、公表されている杭部材の変形性能の情報を基に、ピーク周期の変化率と杭の損傷度合を関連付けることで、汎用性を持つ損傷検知技術を確立させる。

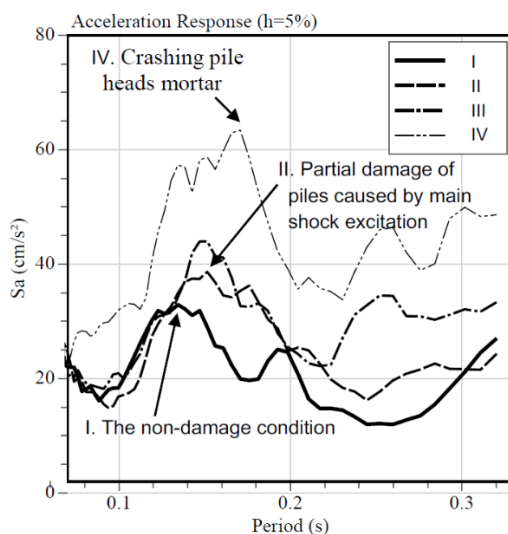


図4 杭部材損傷に伴う鉛直加速度スペクトルの変化

3. 発表(研究成果の発表)

1) 林和宏・宮地祐一・金田将吾・齊藤大樹：遠心実験用鉄筋コンクリート極小模型の部材性能と再現限界，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.41，No.2，2019.07.

2) 林和宏・宮地祐一・木村祥裕・田村修次・齊藤大樹：遠心載荷装置を用いた液状化地盤中の鉄筋コンクリート杭振動座屈実験，日本建築学会構造系論文集，第773号 pp.911-920，2020.07.

3) K. Hayashi, Y. Miyachi, Y. Kimura, S. Tamura, T. Saito : Centrifuge Model Test on the Dynamic Buckling Behavior of RC Slender Pile in Saturated Ground, Proc. the 17th World Conference on Earthquake Engineering, Sendai, Japan, 2020.09.

4) Y. Miyachi, K. Hayashi, S. Takahashi, T. Saito : Experimental study on the fracture behavior of an RC pile group foundation using a centrifuge model, Proc. the 11th International Conference on Structural Dynamic, Athens, Greece, 2020.11.

5) K. Hayashi, S. Takahashi, T. Saito : Dynamic response of the saturated soil – reinforced concrete pile–superstructure interaction under repeated shaking, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, ELSEVIER, Vol. 145, No.106685, 2021.06.