

2016 年熊本地震で被災した低層 RC 造杭基礎建物の非線形相互作用解析 ー常時微動計測結果に基づく検討ー

正会員 ○丹 裕也*¹ 同 護 雅史*²
同 福和 伸夫*³

2016 年熊本地震 被害状況 常時微動計測
構造的被害 耐震改修 シミュレーション解析

1. はじめに

2016 年熊本地震では、益城町庁舎内の震度計において震度 7 が観測されるとともに、庁舎では被災度調査が実施された。大地震時の建物被害を正確に予測するには地盤と建物の動的相互作用の影響を適切に考慮する必要がある。本論では被災した当該庁舎における常時微動計測、および被災後の建物振動特性に杭頭剛性や基礎と地盤の剥離が及ぼす影響について、解析的検討を行ったので報告する。

2. 庁舎被害の概要

庁舎の外観では、建物 2 階の渡り廊下側壁のせん断破壊や南側のアウトフレームの接続梁にせん断ひび割れが確認された。建物内では家具の滑りや転倒による被害が見られ、また壁のひび割れや仕上げ材の剥離が生じていた。上部建物には、外観上目立った構造的被害は認められなかったが、被災度判定調査結果では中破であった(私信)。

また、建物の基礎及びその周辺地盤では、地盤変状や基礎のひび割れなどが確認された。基礎周辺の地盤では、周辺地盤の沈下に伴う基礎と地盤の剥離も見られた(写真 1)。また、庁舎の被災度判定調査では、基礎の傾斜の他、3 箇所杭の試掘調査の結果、2 箇所杭頭の損傷、1 箇所杭体の被害の可能性があることが報告されている。



写真 1 庁舎南側の基礎の被害

3. 常時微動による振動特性の分析

2016 年 9 月に地盤と建物の振動特性を把握するための常時微動計測を行った。建物は被災後の振動特性を示すと考えられ、今後、被災メカニズム解明に向けた非線形地震応答解析を実施する上で、本計測は重要である。計測体制の模式図を図 1 に示す。地表観測点は、盛土上観測点として建物 1 階とほぼ同じレベルと盛土下観測点として盛土上より約 1.5m 低いレベルに設置した。

計測は 3 ケース行い、それぞれ 30 分間ずつ実施した。以下にケースごとの計測地点を示す。

ケース 1: 建物 1 階、盛土上、盛土下
ケース 2: 建物 1 階、建物 3 階、盛土上

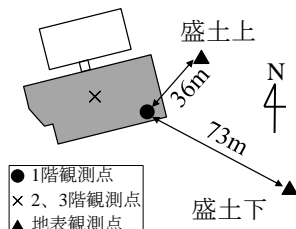


図 1 常時微動の計測体制

ケース 3: 建物 1 階、建物 2 階、建物 3 階

図 2 に H/V スペクトル (ケース 1) を示す。約 2Hz に明瞭なピークが認められ、新井・柏¹⁾による分析結果と調和的である。また、盛土の上と下で結果はほとんど変わらない。

図 3 に地表に対する建物 1 階の EW 方向の伝達関数 (ケース 1) を示す。約 3Hz 以上で振幅比が 1 以下となっている。ただし盛土下と建物 1 階の計測点位置には距離があるためか、コヒーレンスは小さい。なお、NS 方向も同様の結果であった。

図 4 に盛土上及び建物 1 階に対する建物 3 階の伝達関数 (ケース 2) を示す。図より建物の固有振動数は、水平 2 方向ともに基礎固定系 (ロッキング動を含む) では 3.5~4Hz、地盤-杭-建物連成系で 2~2.3Hz であり、杭を含む相互作用効果による固有振動数の変化が見られた。

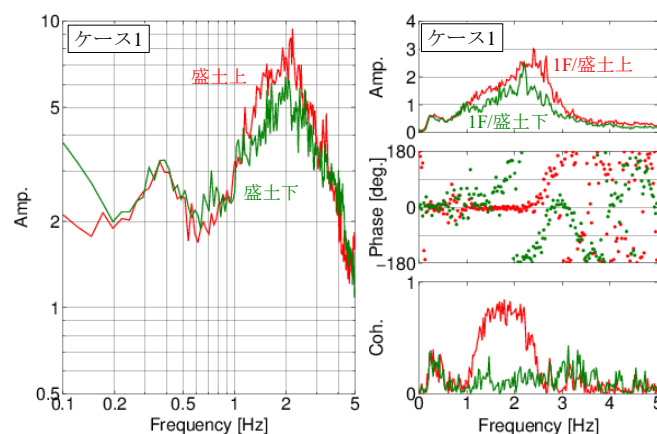


図 2 H/V スペクトル

図 3 伝達関数 (1F/各地表、EW)

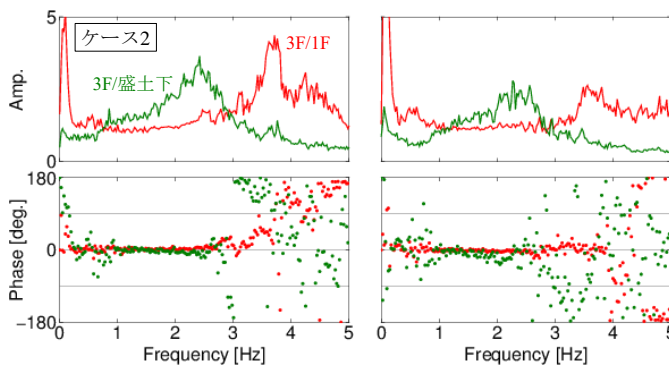


図 4 伝達関数 (3F/盛土上及び 3F/1F)

4. 解析モデルの概要

解析には、サブストラクチャー法に基づいた、薄層要素法と 3 次元有限要素法のハイブリッド法²⁾を用いた。上部建

物は多質点系せん断型モデルとし、各階の重量及び階高は益城町役場より拝借した資料に基づいて設定した。各層の剛性は常時微動計測結果を参考に、現時点ではロッキング動の影響を含む基礎固定系の一次固有周期に対応するように設定した。基礎スラブは図5の杭伏図のように54m×24mの長方形平面とし、根入れ深さは基礎梁せいの1.7mとした。杭はPC杭で、杭長は29.3mとした。また上部建物、基礎の減衰定数は3%とした。地盤は文献1、KiK-net 益城でのPS検層の結果等を参考にし、表1に示すような地盤構造を仮定した。地盤の減衰定数は1%とした。

杭頭剛性の影響評価としては、杭頭0.3m部分の断面積、断面二次モーメントをそれぞれ低下させることで、軸剛性・せん断剛性、曲げ剛性を変化させた。基礎と地盤の剥離の影響評価としては、図6に示すように地盤と基礎が接触の場合と非接触の場合（杭頭0.3m露出）を想定した。

表1 庁舎モデルの解析で仮定した地盤構造（文献1等を参考に設定）

層厚[m]	密度[t/m ³]	P波速度[m/s]	S波速度[m/s]
15	1.6	1500	150
10	1.9	1500	350
13	1.9	1500	440
28	2.1	1316.4	760
32	2.1	1420.3	820
32	2.3	2546.1	1470
10	2.3	1212.4	700
26	2.3	2390.2	1380
32	2.3	1454.9	840
33	2.3	2546.1	1470
1050	2.4	4676.5	2700

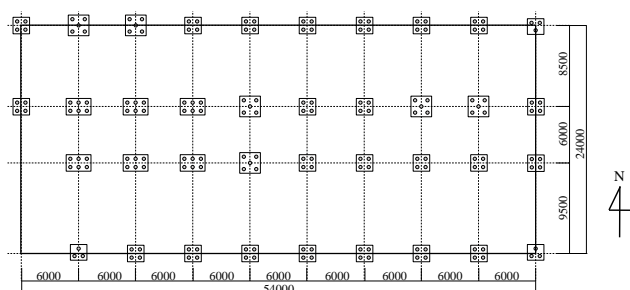


図5 庁舎の杭伏図

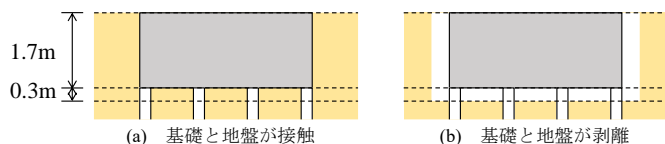


図6 基礎と地盤の接触条件

5. 解析結果

水平2成分とも同様の傾向を示したため、ここではEW方向の解析結果のみを示す。図7に地表に対する3階の伝達関数、図8に地表に対する1階の伝達関数を示す。図には、常時微動計測の結果も併せて示している。また I/I_0 は杭頭の断面二次モーメント、 A/A_0 は断面積の、それぞれ初期値に対する割合（剛性の低下の割合）を表している。

図7、図8より、基礎と地盤が接触の場合（緑線）、杭頭剛性の低下による伝達関数の変化はほとんど見られない。一方、基礎と地盤が非接触の場合（赤線）、断面積の低下に伴い、地盤－杭－建物系振動特性に顕著な変化が認められ、 $A/A_0=0.01$ の場合の固有振動数が常時微動計測結果とおおよそ対応することが分かる。このことから、庁舎の現状についての一つの可能性として、庁舎基礎と基礎近傍地盤が非接触の状態で杭頭がある程度露出しており、これに加えて多数の杭が損傷し、杭剛性が大きく低下している状態が考えられる。ただし、解析では、杭頭の露出長さが0.3mのみであること、せん断剛性と軸剛性は同時に低下させていることに要注意である。なお、地震時における杭頭部の剥離については、宮本³⁾によりその可能性が指摘されている。

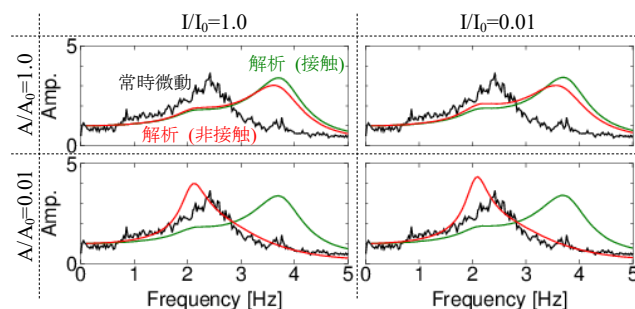


図7 地表に対する3階の伝達関数

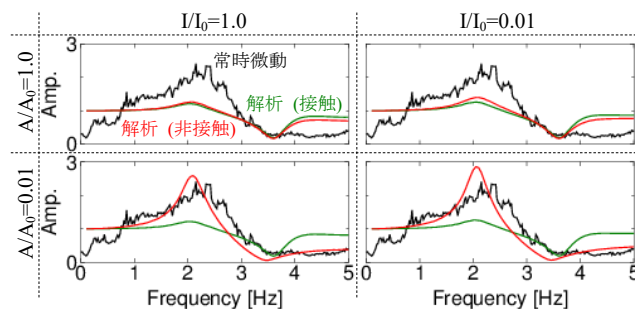


図8 地表に対する1階の伝達関数

6. まとめ

本論では2016年熊本地震で被災した庁舎を対象にして、常時微動計測結果に基づき、建物振動特性の分析を行った。また、解析モデルを作成し、微動計測結果と比較して、当該建物の被災状況の推定を行った。その結果、基礎と地盤が剥離し杭頭が0.3m露出しているケースにおいて、杭頭の軸剛性・せん断剛性を低下させることで、常時微動計測結果を概ね再現することができた。なお、本解析は基礎的な検討に留まっているため、今後より詳細な検討を行う必要がある。

謝辞

本検討にあたっては、益城町役場総務課管財係の職員の方に情報提供頂くとともに、常時微動計測にご協力いただきました。ここに深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 新井洋、柏尚稔：益城町中心部の建物基礎・地盤被害と微動特性、ワークショップ「地盤と建物の動的相互作用の現象解明と耐震設計」、pp.20-28、2017.2
- 2) 文学章：地盤と構造物との動的相互作用における基礎形式・基礎形状・隣接建物の影響に関する解析的研究、名古屋大学博士論文、2006
- 3) 宮本裕司：益城町に建つ建物の非線形相互作用と杭応答、ワークショップ「地盤と建物の動的相互作用の現象解明と耐震設計」、pp.29-40、2017.2

*1 名古屋大学大学院環境学研究科

*2 名古屋大学減災連携研究センター 特任教授 博士（工学）

*3 名古屋大学減災連携研究センター 教授 工博

*1 Grad. Student, Grad. School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

*2 Designated Prof., Disaster Mitigation Research Center., Nagoya Univ., Dr. Eng.

*3 Prof., Disaster Mitigation Research Center., Nagoya Univ., Dr. Eng.