

高密度常時微動計測に基づく軟弱地盤に立地する杭基礎中層 RC 造建物の 振動特性と動的相互作用効果に関する研究

名古屋大学工学部社会環境工学科建築学コース

福和研究室 山下善也

1. 背景と目的

2012年8月29日に発表された内閣府による被害想定では、南海トラフ巨大地震の揺れによる全壊棟数は約627,000棟だが、耐震化率を向上させることで被害を約4割減らすことができるとされており、東海地域における建物の耐震化は喫緊の課題である。濃尾平野西部に位置する某市庁舎(写真1)は、防災・減災対策の基幹である重要施設であるが、耐震性能が不足していると診断され、耐震補強計画が作成されている。耐震補強前の建物振動特性を把握することは、被害予測や耐震補強効果評価の為の解析モデルの作成及び、補強前後における振動性状変化を捉えるために極めて重要である。

対象建物は、軟弱地盤に立地する杭基礎中層RC造建物であり、地盤と建物の動的相互作用効果が大きいこと、不整形な平面・断面形状による複雑な振動性状を持つこと、これらが耐震補強によって変化することが推測される。そこで、本研究はこの市庁舎を対象とし、強震観測や高密度な常時微動計測に基づき、現状の振動特性と相互作用効果の影響を把握することを目的とする。

2. 対象建物と観測体制の概要

市庁舎は1976年4月に竣工された上部5階、棟屋2階の杭基礎RC造建物である。基礎形式は杭先端がGL-47.0mのPC杭による支持杭である。平面形状は長辺方向8スパン(47.2m)×短辺方向3スパン(25.3m)の長方形平面を基本とし、1階、2階には1~2スパン程度の小室が付随する。2階には吹き抜け(長辺1×短辺2スパン)を、5階には20.8m×14.3mの平面で2層吹き抜けの議事堂を有している。階高は1階が4.8mで、その他の階が3.8mである。

強震観測として、建物内の屋上中央と1階南東及び、地盤上の計3点にそれぞれ3成分の地震計を設置した。常時微動計測は、地盤を中心とした微動計測1(2012年11月4日実施)と、建物を中心とした微動計測2(2012年11月18日実施)の2回に分けて高密度同時計測を行った(図1)。

3. 対象建物周辺の地盤構造と地盤震動特性

地盤構造とその震動特性を推定することは、地震時の地盤増幅や動的相互作用効果を考慮する上で重要である。そこで、市庁舎近傍の地盤構造に関する分析を実施した。市庁舎から500m程度離れたK-NET観測点(AIC003)と愛知県震度情報ネットワークシステム観測点(AICP10)の2地点で得られた複数の地震波形のH/Vスペクトルの平均を図2に示す。また、この2地点と市庁舎における常時微動計測によって得られたH/Vスペクトルを図3に示す。さらに、市庁舎におけるL字アレイ探査、同地点におけるN値からの推定、愛知県震度情報ネットワークシステム観測点近傍の市民病院におけるPS検層のそれぞれによるS波速度構造を図4に示す。地震動のH/Vスペクトルの平均と微動時のH/Vスペクトルでは、1.0~1.3Hzにかけて共通したピークが認められる。この振動数はN値から推定した V_s から算定される固有振動数と一致し、浅部地盤に起因する固有振動数と推測される。以上から市庁舎付近の地盤は工学的基盤が深



写真1 市庁舎(北東から)

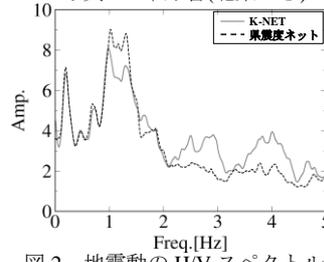


図2 地震動のH/Vスペクトル

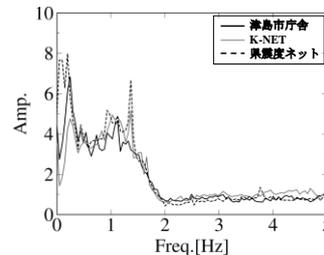


図3 常時微動のH/Vスペクトル

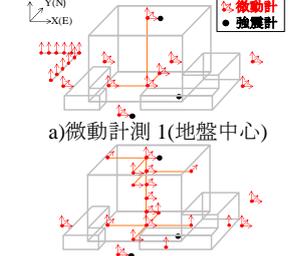


図1 観測体制

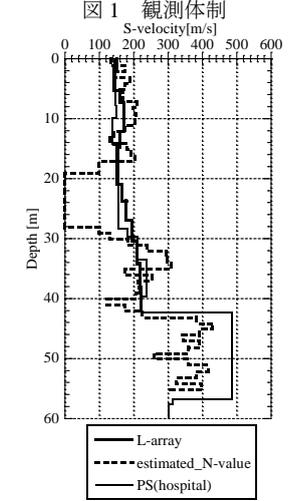


図4 S波速度構造

さ42m程度で、堆積層のS波速度が170m/s程度の軟弱な地盤と推測される。また、スペクトル形状及び、S波速度構造が地点によらず類似しているため、乱れが少なくほぼ水平成層地盤と推定される。

4. 地震時と微動時における建物の基本的な振動特性

地震記録の分析には、2012年12月7日に発生した三陸沖の地震の際に、市庁舎屋上と周辺地盤の地震計で得られた記録を用いる。これをもとに推定した伝達関数とその同定結果を重ねて図5に示す。なおシステム同定は1次固有振動数のみを対象として、2.0~4.0Hzの範囲で行った。常時微動計測記録から推定した地盤建物連成系(RF/GL)、スウェー固定系(RF/1F)、スウェー・ロッキング固定系(RF/(1F+H θ))の伝達関数を図6に示す。ここでHは有効高さを、 θ は図7に示す観測点D、dより算出したロッキング回転角を表す。長辺方向・短辺方向のスウェー固定系と地盤建物連成系の伝達関数に共通した2.0~3.0Hz(図中I区間)は、地盤と基礎が一体となった挙動をしていると考えられる。位相差が負になっているため、振幅のみを対象として同定を行った。表1、表2はそれぞれ地震記録及び微動記録への同定の結果得られた固有振動数、減衰定数を示す。建物固有振動数に対して、地盤-建物連成系の固有振動数の低下が明瞭である。減衰定数は、複雑な立体的挙動や相互作用効果等の影響により過大評価をしている可能性があり、今後の検討を要する。表3に地盤-建物連成系の固有振動数における長辺・短辺方向それぞれのスウェー(S)・ロッキング(R)・弾性変形(E)率を示す。位相差により総和が100%とならないが、S率・

R 率が 30%程度と高く、相互作用効果が大きいことが分かる。長辺方向は短辺方向に比べスウェイが大きく、短辺方向は長辺方向に比べロッキングが大きいといえる。杭基礎建物であるが、ロッキングが大きいことが明らかとなった。

5. 微動時における基礎スラブの面外変形と立体振動特性

建物 1 階の 6 地点に設置した上下成分のセンサから、2 点間の差によりロッキング角を算出し、それらを基に $RF/(1F+H\theta)$ の伝達関数を推定した。その結果を図 7 に示す。振幅倍率が、短辺方向ではセンサ位置による影響は認められないが、長辺方向では 3~5 倍と大きな差が見られ、固有振動数及び減衰の評価が、用いるセンサ設置によって大きく異なる可能性があることが明らかになった。この原因として基礎スラブを剛体と見なせない面外方向の変形が生じている可能性が考えられる。そこで、基礎スラブの面外変形角を算出し(図 8)、ロッキング回転角と比較した。そのフーリエスペクトルを図 9 に示す。基礎スラブの面外変形角は、短辺方向では小さいが長辺方向は 3.0~4.5Hz にかけて励起されていることが分かる。図 4 より表層の平均 S 波速度を 170m/s とし、基礎幅 48m と地表における表面波の波長 λ が一致すると仮定すると $f=3.5\text{Hz}$ と計算され、微動観測記録と対応する。表面波の波長と基礎幅が一致する時に大きな面外変形が生じている可能性がある。

図 7 の伝達関数や図 9 のフーリエスペクトルにおけるピークを含む振動数帯(I~V)における立体的な挙動を、アニメーションツールを用いて確認した(図 10)。ア、イ、ケでは地盤と基礎スラブが一体となったロッキング挙動が、カ、ク、コでは基礎スラブの面外変形が、ウ、エ、オ、キでは上階での振れが確認された。エ、キ、クでは弾性変形を、コでは建物のロッキング挙動を確認した。以上のような複数のモードが同一振動数帯に確認される複雑な挙動をしているために伝達関数のピークが明瞭でないと考えられる。

6. まとめ

今回の高密度観測により地盤・建物双方の挙動を詳細に捉えることで、動的相互作用が大きいこと、基礎スラブに面外変形が生じていることが明らかとなった。また、複雑な立体的挙動を捉える事ができた。今後は、詳細な分析を進めつつ、地震時の挙動を明らかにするための観測体制の構築や、得られた知見を考慮したモデルの作成を通して、市庁舎の耐震性能と補強効果の評価を行う予定である。

表 1 固有振動数(微動時/地震時) (単位:Hz)

	長辺方向	短辺方向
RF/GL	3.3 / 3.1	2.9 / 2.8
RF/IF	4.1 / -	3.5 / -
$RF/(1F+H\theta)$	4.2 / -	3.6 / -

表 2 減衰定数(微動時/地震時) (単位:%)

	長辺方向	短辺方向
RF/GL	21 / 32	11 / 18
RF/IF	12 / -	12 / -
$RF/(1F+H\theta)$	10 / -	17 / -

表 3 スウェイ・ロッキング・弾性変形率 (単位:%)

	長辺方向	短辺方向
スウェイ率	31	25
ロッキング率	26	32
弾性変形率	70	64

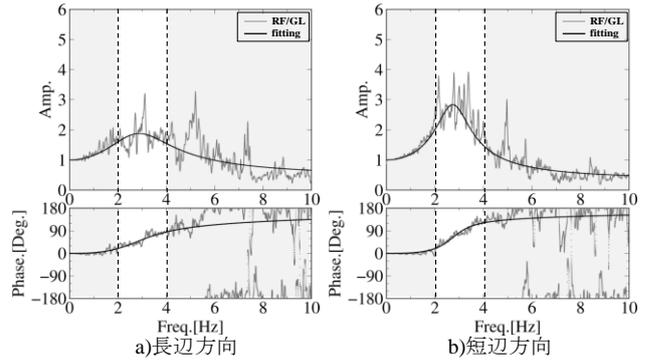


図 5 地震時の伝達関数

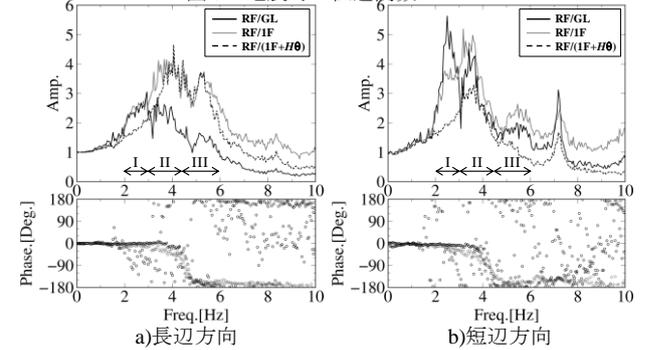


図 6 微動時の伝達関数

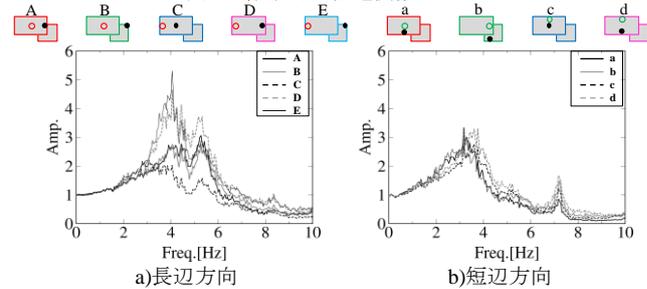


図 7 ロッキング用センサ配置による伝達関数の違い

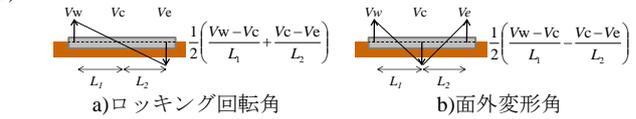


図 8 ロッキング回転角と面外変形角の概念図

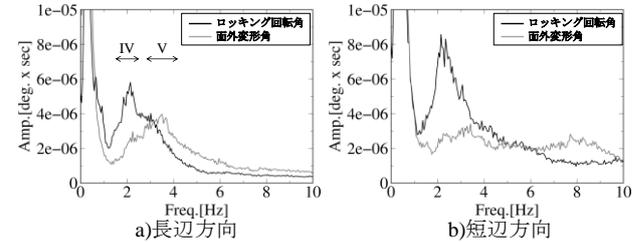


図 9 ロッキング回転角と面外変形角のフーリエスペクトル

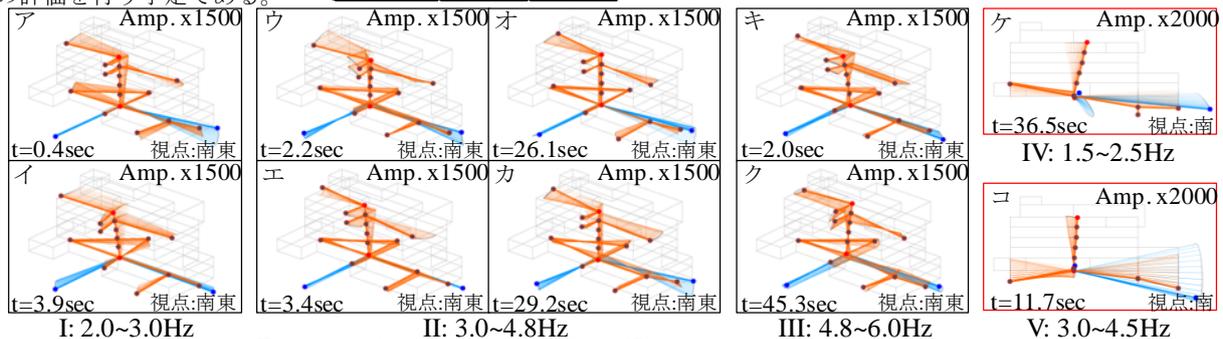


図 10 アニメーションによる挙動の確認 (Amp. x X の X は表示倍率を表す)