

地震観測記録に基づく多様な建物の立体振動特性に関する研究

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
博士前期課程2年 飛田研究室 国松 行

1. 序論

建物における強震観測は1996年の兵庫県南部地震を契機に増加していき、現在では少なくとも国内で500棟以上の建物において、観測が行われている。これらの観測記録の蓄積や、常時微動計測、強制振動実験などにより、動的相互作用や立体振動、経年変化など、建物の複雑な挙動が明らかになった。また、少子高齢化や人口減少といった社会現象を起因として、建物を長期間使うという価値観が広まり、地震観測のモニタリングとしての役割が重要になってきている。以上のような背景から、本研究では建物の振動特性の変化と立体振動特性について分析を行い、これらの要因が応答に与える影響を考察することを目的とする。

2. 振動特性の分析手法

建物が立体的に振動している際、建物の応答は水平2方向の入力を受けて振動していることとなる。そこで本論では、固有振動数や減衰定数といった建物振動特性を推定する際には、水平2方向の入力を考慮して推定を行う。本論で用いる振動システムのモデルを図1に示す。同定方向を x とし、その直交方向を y として、観測された応答 Z_x を以下のように定義する。

$$Z_x(\omega) = \left(\sum_{s=1}^N \frac{\omega^2 \beta_{sx} u_{psx}}{\omega_s^2 - \omega^2 + 2h_s \omega_s \omega i} + 1 \right) A_x(\omega) + \left(\sum_{s=1}^N \frac{\omega^2 \beta_{sy} u_{psy}}{\omega_s^2 - \omega^2 + 2h_s \omega_s \omega i} \right) A_y(\omega)$$

推定パラメータはシステムの固有円振動数 ω_s 、減衰定数 h_s 、同定方向の刺激係数 $\beta_{sx} u_{psx}$ 、同定方向と直交する方向の刺激係数を $\beta_{sy} u_{psy}$ である。 $\beta_{sy} u_{psy}$ によって直交方向の入力を評価することができる。また、建物によっては直交方向入力の影響が同定方向の固有振動数とは異なる振動数に現れる場合がある。その際には以下のように Z_x を定義し、これを用いて推定を行う。

$$Z_x(\omega) = \left(\sum_{s=1}^N \frac{\omega^2 \beta_{sx} u_{psx}}{\omega_{sx}^2 - \omega^2 + 2h_{sx} \omega_{sx} \omega i} + 1 \right) A_x(\omega) + \left(\sum_{s=1}^N \frac{\omega^2 \beta_{sy} u_{psy}}{\omega_{sy}^2 - \omega^2 + 2h_{sy} \omega_{sy} \omega i} \right) A_y(\omega)$$

推定パラメータとして y 方向入力に対する応答の固有円振動数 ω_{sy} と減衰定数 h_{sy} が加わる。これらの応答のスペクトルと実測のスペクトルの差の2乗が最小となるパラメータを探していく。

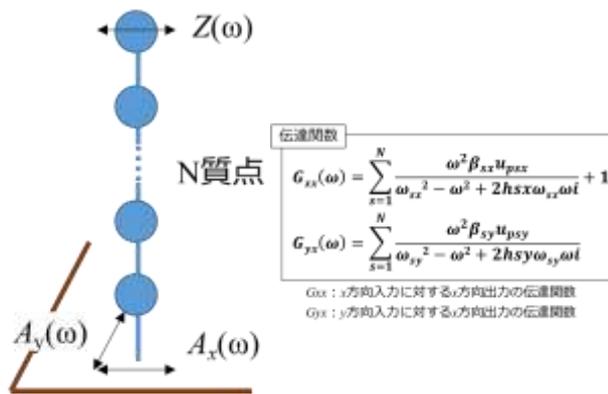


図1 振動システムのイメージと伝達関数

3. 長期観測記録を用いたS造10階建建物の振動特性の分析

3.1 対象建物概要

対象建物は名古屋大学東山キャンパス内に立地するIB電子情報館北館である。基準階平面図、立面図、地震観測点配置図を図2、図3にそれぞれ示す。対象建物は上部構造がS造である。また基礎形式は杭基礎であり、比較的杭径の大きい杭を有している。そのため、上部構造の剛性よりも基礎構造の剛性が大きく動的相互作用が小さい建物と考えられる。また、平面形状は整形な形をしているため、偏心の小さい建物と推定される。

観測点は1階で3点、屋上階で2点の観測を行っている。一階の中央観測点では長辺・短辺・上下方向の3成分、西側観測点では短辺方向、南側観測点では上下方向の観測を行っている。西側観測点では短辺方向のねじれ振動の抽出、南側観測点ではロッキング動の抽出を行うことが可能である。屋上階の中央観測点では長辺・短辺・上下方向の3成分、西側観測点では短辺方向成分の観測を行っており、主要構造の基本的な振動性状とねじれ振動の分析を行うことができる観測体制となっている。

3.2 地震記録の概要

対象建物では竣工直後の2001年から現在まで継続的な観測をおこなっており、2001年~2018年6月までに全182の地震記録が得られている。図4、表1に観測地震の震央分布、計測年と地表震度、1階計測震度の関係を示す。本研究で用いる地震は2012年からのものとし、それ以前の地震については既往の研究の結果を引用しながら分析を行う。2012年以降で観測された地震は最大震度が2、応答加速度で30gal程度の小地震である。

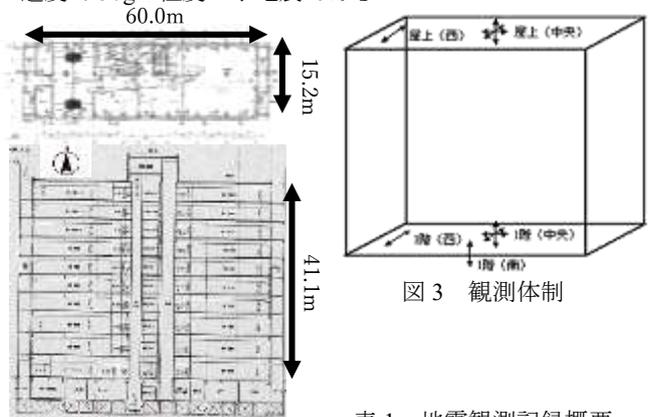


図3 観測体制

図2 平面図・立面図

表1 地震観測記録概要

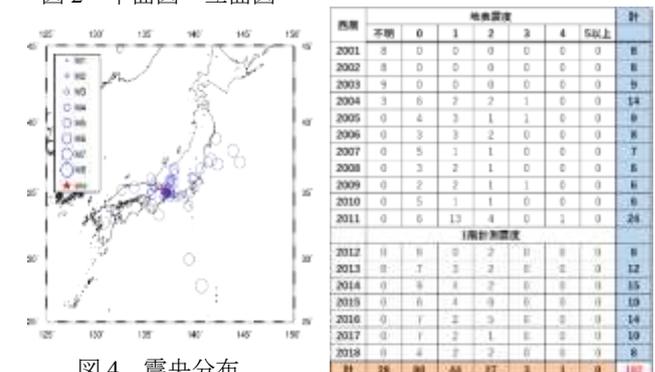


図4 震央分布

3.3 代表的な地震観測記録の分析

性格の異なる3地震について、加速度波形、加速度フーリエスペクトル、伝達関数を図5~7に示す。図5は2012年5月5日の愛知県西部を震源とするM4.3、最大震度3の地震(地震1)、図6は2014年11月22日の長野県北部を震源とするM6.7、最大震度5弱の地震(地震2)、図7は2015年5月30日の小笠原諸島西方沖を震源とするM8.1、最大震度5強の地震(地震3)である。対象建物1階の震度はいずれも2となっている。

加速度波形を見ると、愛知県西部の地震は継続時間が短く短周期が卓越しているが、長野県北部、小笠原諸島西方沖の地震は遠方で規模が大きい地震のため、継続時間が長く、長周期成分が卓越している。建物応答については、最大加速度応答の増幅倍率はそれぞれ1.2倍、7.2倍、6.5倍となる。伝達関数はいずれも固有振動数で明確なピークとなり、水平2方向とねじれのピークが近接している。さらにNS(短辺)のスペクトルでは、特に地震1においてEW(長辺)の固有振動数でもピークが現れており、2方向の連成がみられる。一方地震2では、EWの伝達関数においてNSのピーク付近の振動数でもピークが生じている。さらに建物西側の観測点の伝達関数から、いずれの地震でも1~1.1Hz付近にピークがあり、ねじれ振動のピークと考えられる。

3.4 固有振動数・減衰定数の経年変化

図8に固有振動数の推定結果を観測日との関係で示す。ここでは1自由度モデルのフィッティングにより各方向の固有振動数と減衰定数を検討する。前節で述べたように、水平2方向とねじれが近接しているため、フィッティングを行う周波数範囲を各ピークが重ならない範囲で設定している。また、既往の推定結果も併せてプロットし分析を行う。2001年から現在まで、特に大きな地震はなく、長期の変化に明確な傾向はみられない。しかし、竣工から3年間に着目すると固有振動数が10%程度低下していることが分かる。一般にS造の経年による変化は小さく、剛性の変化に起因するとは考えられない。また、重量変化にして約1750tの増加となり、重量の変化としても非常に大きい。そのため、この3年間の変化に対しては今後も検討の余地がある。一方、減衰定数は竣工から3年間は推定値のばらつきが小さく、それ以降はばらつきが大きいが、全体として明確な傾向は読み取れなかった。

3.5 固有振動数・減衰定数の振幅依存性

図9,10に建物の最大全体変形角と固有振動数、減衰定数の関係を示す。最大全体変形角は、屋上と1階の記録の2階積分の差を高さで除して求めている。地震記録によって積分が安定しない場合は除いている。最大全体変形角が大きくなると固有振動数が下がり、減衰定数が大きくなる傾向が明確に見られる。

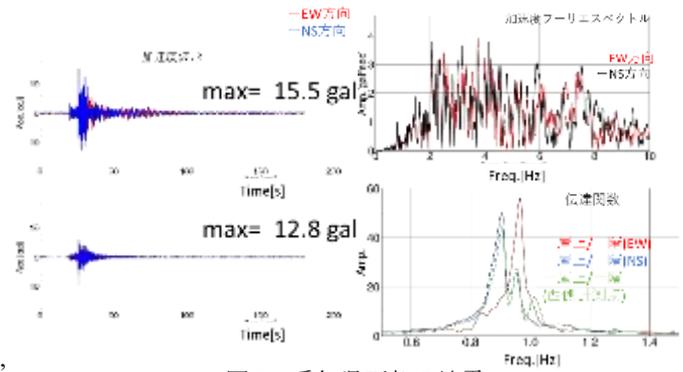


図5 愛知県西部の地震

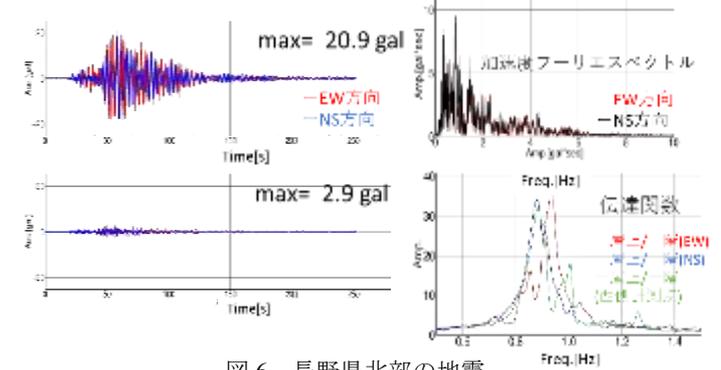


図6 長野県北部の地震

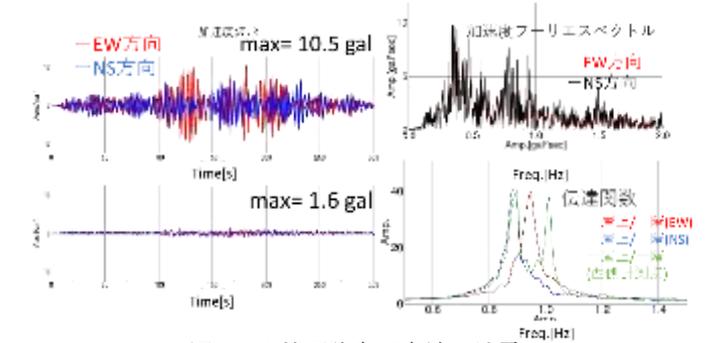


図7 小笠原諸島西方沖の地震

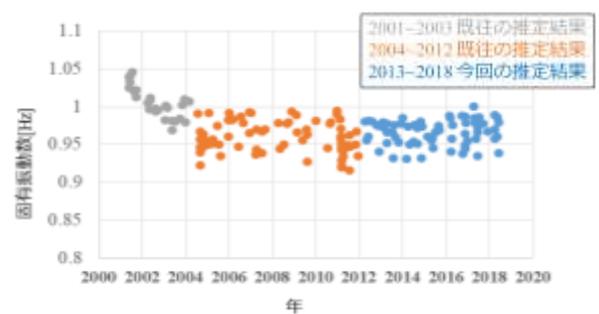


図8 固有振動数の経年変化

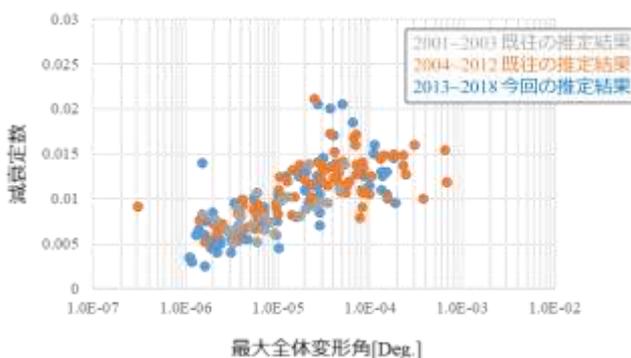


図9 減衰定数の振幅依存性

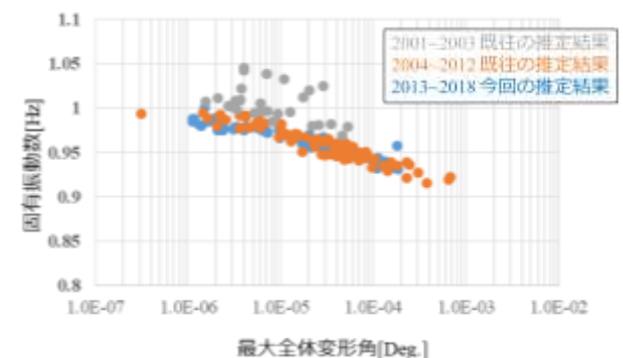


図10 固有振動数の振幅依存性

4. 中低層建物の立体振動特性の評価

4.1 S造10階建建物の立体振動特性

(1) 波形とスペクトルの特徴

対象建物は3で分析を行ったS造10階建建物である。この建物は水平2方向の固有振動数が近接しており、なおかつ減衰定数が比較的小さい。このような建物では水平2方向の振動が連成する場合がある。図11に対象建物で観測された2018年大阪北部の地震の加速度波形を示す。加速度波形は全体としてうなるような波形になっている。

図12にいくつかの地震の屋上1Fの伝達関数の振幅を示す。赤色の逆三角形が短辺方向のピーク、青色の逆三角形が長辺方向のピーク位置を示している。図12(a)では長辺方向の伝達関数において赤色の逆三角形で示した0.95Hz付近のピークに加えて0.86Hz付近にもピークがある。このピークの位置は短辺方向の0.86Hz付近のピーク的位置と一致している。このことから、長辺方向の振動が短辺方向の影響を受けていると考えられる。これと同様の伝達関数の形が図12(b)にも確認できる。一方図12(c)では、短辺方向の伝達関数において青色の逆三角形で示した0.88Hz付近のピークに加えて0.98Hz付近にもピークがある。このピークの位置は長辺方向の0.98Hz付近のピーク的位置と一致している。これと同様の伝達関数の形が図12(d)にも確認することができる。また(a)~(d)の西側観測点の短辺方向の伝達関数においてのみ、1Hz強の位置にピークが現れており、これはねじれモードによるピークであると考えられる。特に(c)では、短辺方向の伝達関数に、1Hz強の位置にピークが現れており、ねじれ振動の影響を受けている可能性がある。

(2) モデルパラメータの推定

大阪北部地震の地震観測記録に対し、1方向入力1応答系、2方向入力1応答系を想定したモデルで伝達関数の推定を行った。後者については2で提案した二つの伝達関数で推定を行った。これらの結果を表2,3に示す。刺激係数xはシステムの同定方向、刺激係数yは同定方向と直交する方向の刺激係数である。表2と3を比較すると、2次モードの減衰定数の推定値が大きく変化している。一方で1次モードの減衰定数の推定値に変化はない。また、刺激係数yは一次よりも二次の方が大きくなっており、直交方向の入力の影響は二次モードの方が受けやすいことが分かる。次に連成モードを考慮した推定結果を表4,5及び図13,14に示す。このモデルにおける誤差は比較的小さく、精度の高いフィッティングができていると考えられる。連成モードの刺激係数は長辺方向で-0.319、短辺方向で0.255と比較的大きく評価されており、ある程度直交方向入力の影響を受けていることが分かる。このことから、対象建物の振動特性の推定や応答予測においては、水平2方向の連成を考慮したモデルを用いることが適当であると考えられる。

2011年~2018年の地震記録から得られた、連成を考慮したモデルにおける刺激係数yと最大全体変形角の関係を図15に示す。刺激係数xは最大全体変形角によらず1~1.5程度の値を示しているが、刺激係数yは最大全体変形角が大きくなるにつれて小さくなっていく傾向がみられる。図16の長辺・短辺方向の固有振動数と最大全体変形角の関係に着目すると、最大全体変形角が大きくなるにつれて、両方向の固有振動数が若干近づく傾向がみられる。この傾向により、連成の程度を示す刺激係数yが最大全体変形角と相関を示す可能性があると考えられる。このような傾向については、さらに多くのデータ・建物での検討が必要である。

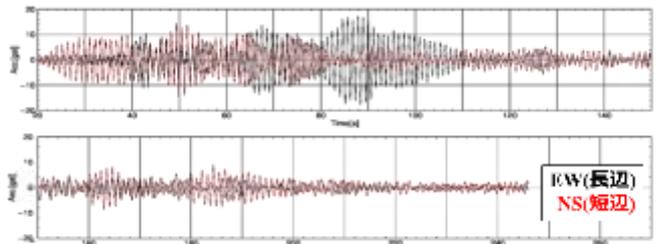


図11 大阪北部の地震の加速度波形

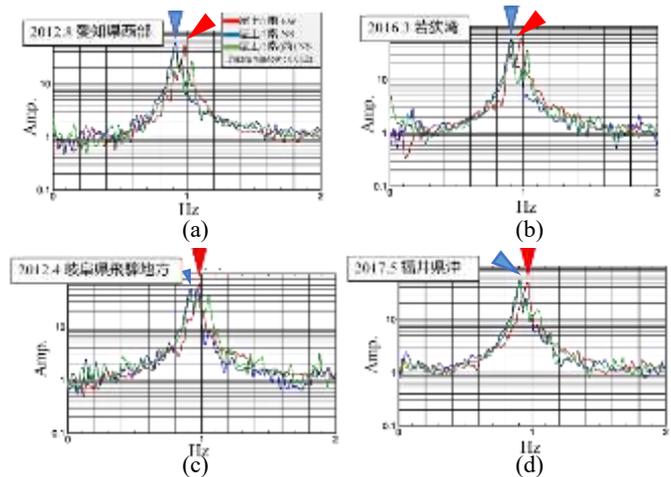


図12 各地震の伝達関数の振幅

表2 1方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード	2次モード
固有振動数	0.937	2.624
減衰定数	0.015	0.018
刺激係数x	1.278	-0.445
刺激係数y	-0.165	0.126
誤差	0.086	

表3 2方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード	2次モード
固有振動数	0.937	2.617
減衰定数	0.015	0.023
刺激係数x	1.271	-0.483
刺激係数y	-0.012	0.126
誤差	0.101	

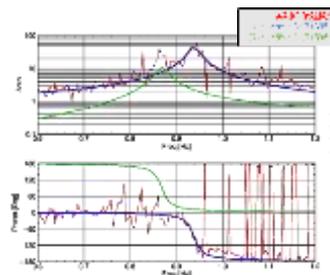


図13 長辺方向の伝達関数

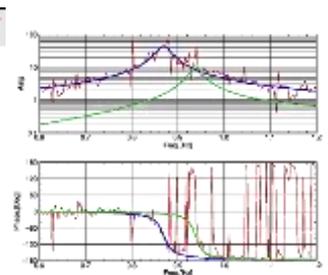


図14 短辺方向の伝達関数

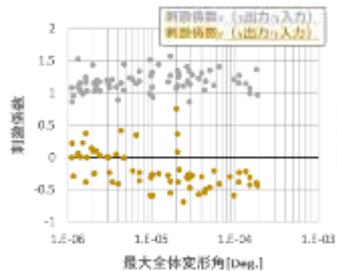


図15 刺激係数の振幅依存性

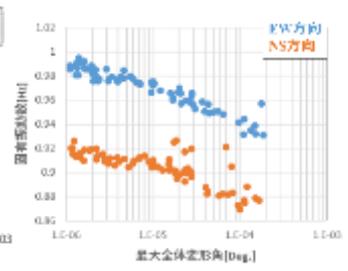


図16 長辺・短辺方向の固有振動数

4.2 SRC造10階建建物の立体振動特性

対象建物の平面図、立面図を観測点配置と共に図17に示す。対象建物の構造形式がSRC造であり、増築によって平面形状がコの字型になったことで東側のウィングの、ねじれ振動の影響が低減されたことが分かっている。²⁾2016年4月1日に発生した三重県南東沖の地震の屋上/1Fの伝達関数を図18に示す。長辺方向、短辺方向の固有振動数がそれぞれ1.7Hz、1.9Hz程度と近接していることが分かる。次に常時微動計測から得られたRD波形を図19に示す。RD波形は減衰自由振動することなく、乱れた波形になっている。これは水平2方向の間でエネルギーのやり取りがあるためと考えられる。この連成挙動の評価と、連成挙動が振動特性の推定に与える影響を調べるため、1入力1応答系による振動特性の推定と、2入力1応答系での推定を比較し検討する。

推定結果を表6,7,図20,21に示す。いずれの推定方法においても一次固有振動数の推定値に大きな差はないが、減衰定数は2方向入力を考慮することで約10%程度大きく推定されている。また、刺激係数 γ は0.083となっており、影響は比較的小さいものの水平2方向の連成が生じていることが分かる。

4.3 PCaPC造7階建建物の立体振動特性

対象建物の建物概要と平面図、立面図、観測点配置図を図22に示す。対象建物はPCaPC造であり、既往の研究³⁾から長辺方向、短辺方向の固有振動数がそれぞれ2.7Hz、2.3Hzと分かっている。また、ねじれ振動の固有振動数が2.5Hz強にあり、長辺方向の並進1次モードと連成することが分かっている。そこで、1入力1応答系の振動特性の推定と、2入力1応答系での推定を比較し、ねじれ成分の評価を試みる。

推定結果を表8,9,図23,24に示す。2入力1応答系の刺激係数 γ から、ねじれ振動の影響を22%程度受けていることが分かる。一方で、固有振動数や減衰定数の推定値に大きな差はなく、振動特性の推定にはほとんど影響を与えないことが分かった。

5. まとめ

地震観測記録を用いて、振動特性の長期変化や振幅依存性の検討を行った。また、立体的な振動特性に着目しねじれ振動や水平2方向のモード間連成の評価と、振動特性の推定に与える影響について考察した。

分析対象としたS造10階建建物では、竣工から3年間で大幅に固有振動数が低下することが確認された。しかし、それ以降で長期的な振動特性の変化は見られなかった。固有振動数、減衰定数については明確に振幅依存性があることが確認された。

中低層建物3棟を対象として立体振動特性の分析を行った。3棟中2棟の建物において、水平2方向の振動が連成するような振動が確認された。また、1棟については並進とねじれが連成するような振動が確認された。いずれの建物も整った平面形状であるにもかかわらず立体的な振動特性を持っていた。これらの立体振動が固有振動数や減衰定数といったモーダルパラメータに与える影響は小さいが、S造10階建建物では連成の影響が比較的大きく、応答予測・設計・振動特性推定におけるモデルは水平2方向連成を考慮したモデルを用いる必要があると考えられる。

参考文献

- 豊部立：地震観測・常時微動計測・加振実験に基づく多様な構造物の振動特性の把握に関する研究,名古屋大学大学院修士論文,2012
- 岡田純一：観測記録に基づくSRC造10階建建物の実振動特性と構造解析による評価に関する研究,名古屋大学大学院修士論文,2001
- 海野元伸：高密度強震観測及び振動実験に基づく建築物と基礎-地盤系の復元力特性評価,名古屋大学大学院修士論文,2011

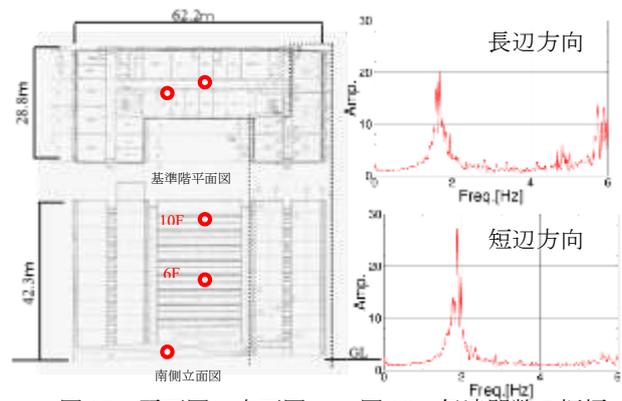


図17 平面図・立面図

図18 伝達関数の振幅

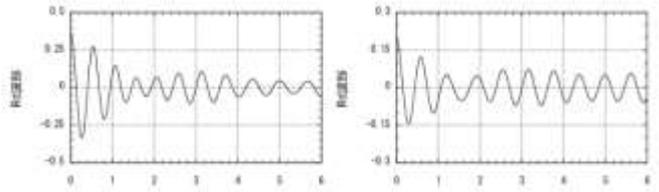


図19 常時微動記録のRD波形²⁾

表6 1方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード
固有振動数	1.858
減衰定数	0.041
刺激係数	1.474
誤差	0.099

表7 2方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード
固有振動数	1.899
減衰定数	0.045
刺激係数x	1.631
刺激係数y	0.083
誤差	0.113

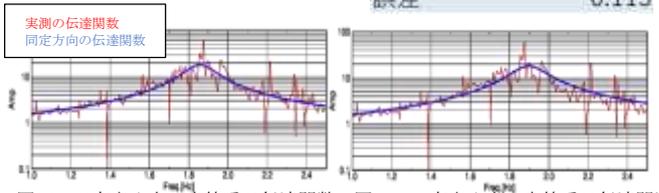
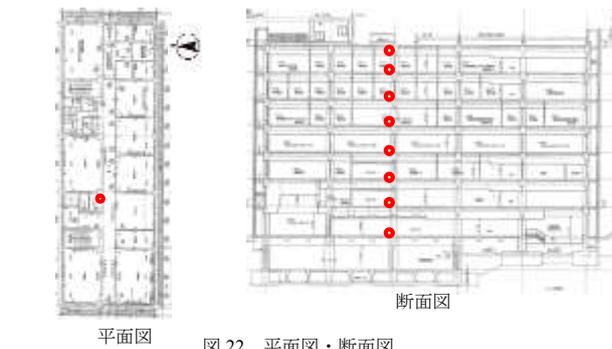


図20 1方向入力1応答系の伝達関数

図21 2方向入力1応答系の伝達関数



平面図

図22 平面図・断面図

表8 1方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード
固有振動数	2.689
減衰定数	0.023
刺激係数	1.196
誤差	0.115

表9 2方向入力1応答系の推定結果

パラメータ	1次モード
固有振動数	2.691
減衰定数	0.023
刺激係数x	1.233
刺激係数y	-0.222
誤差	0.100

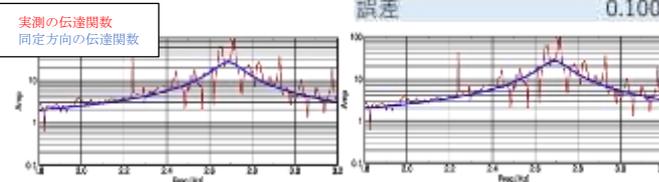


図23 1方向入力1応答系の伝達関数

図24 2方向入力1応答系の伝達関数