

実測・解析に基づく庁舎建物の振動特性把握と南海トラフ地震に対する応答評価

名古屋大学大学院 環境学研究科 都市環境学専攻
環境・安全マネジメント講座 博士前期課程 護研究室 天野靖大

1. 研究の背景と目的

南海トラフを震源とするマグニチュード 7~8 クラスの地震は、今後 30 年以内に 70%~80% 発生すると予測されている中、愛知県に実在する、研究対象である庁舎建物(写真 1) が位置する地域は、内閣府によると最大で震度 7 の揺れに見舞われると想定されている¹⁾。

また、この地域には重要港湾に指定されている港、愛知県で最も大きな出力数の火力発電所、我が国の主要産業に関する大規模な工場を有していることから、東海地方にとって重要な地域ともいえる。

加えて、2016 年の熊本地震では、複数の自治体庁舎が被災し、庁舎外への機能の移転が余儀なくされ、迅速な応急対応が行えなかった事、通常業務が一時停止した庁舎があったことも問題となった。この二点を踏まえると、大地震時の庁舎建物の機能維持は大変重要であり、南海トラフ地震時の庁舎建物の詳細な被害予測は喫緊の課題である。そこで本研究では、研究対象である庁舎建物について常時微動計測及び地震観測を行い、現在の建物の振動特性を把握し、解析モデルを作成して動的相互作用を考慮した地震応答解析をし、応答予測を行った。

2. 研究対象建物

建物概要を表 1 に示す。建物の特徴としては、3 階から 7 階にかけて南北 1 スパンになるようにセットバックしていること、多数の吹抜を有していること、建物の東端に 3 層分の塔屋があること、ラーメン構造、杭基礎であること、SRC 造と S 造の混合構造であることが挙げられる。

表 1 対象建物概要

建物概要	
建築面積	4,524.29㎡
延床面積	18,008.59㎡
階数	地上10階(塔屋8~10階) 地下1階
最高高さ	59.9m
建物高さ	32.9m
基礎深さ	GL-10.9
竣工	2000年1月
重要度係数	1.5 (目標値2.0)
地盤種別	第2種地盤



写真 1 対象建物
(南西から)

3. 常時微動計測に基づく地盤・建物振動の分析

3.1 計測体制

本研究では、対象建物及びその周辺地盤の現在の振動特性を把握するために、多点同時常時微動計測を行った。日時は 2017 年 10 月 7 日、計測時間は 1 時間である。図 1 に計測体制を示す。

3.2 振動特性に関する分析結果

地盤-建物連成系、スウェイ固定系、基礎固定系の伝達関数を図 2 に示す。また伝達関数から算出した固有振動数

と減衰定数を表 2、表 3 に示す。各系で固有振動数に差が生じないことから、常時微動レベルの加速度では地盤と建物の動的相互作用効果は小さいことがわかる。

続いて、弾性変形、スウェイ及びロッキングによる影響の大きさを確認するために、弾性変形率・スウェイ率・ロッキング率を算定した。算定は、図 3 に示す SR モデルを考え、波形同士を時刻歴領域で演算した後、フーリエスペクトル比を求めることで各割合を求めた。結果を図 4 に、並進の 1 次固有振動数における各割合を表 4 に示す。これより、スウェイ及びロッキングによる変位は小さく、弾性変形率が支配的であることがわかった。

3.3 ねじれ振動

対象建物の構造的な特徴から、ねじれ振動が誘発されやすいと判断したため、ねじれの詳細な分析を行った。図 5 に示す算出方法で 1 階、3 階、8 階のねじれ回転角の角加速度を求めた。図 6 に各階のねじれ回転角の角加速度フーリエスペクトルを示す。1 階、3 階と比較して 8 階の振幅が著しく大きいことから、建物形状が 3 階から変化することがねじれ振動に大きく影響を与えていると考えられる。また、ねじれの固有振動数は 1.8Hz であると確認できる。

設計	並進	
	東西方向	南北方向
8F/GL	1.45	1.59
8F/1F	1.75	2.11
8F/(1F+Hθ)	2.15	2.18

単位 [%]

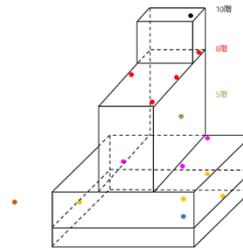


図 1 常時微動観測体制

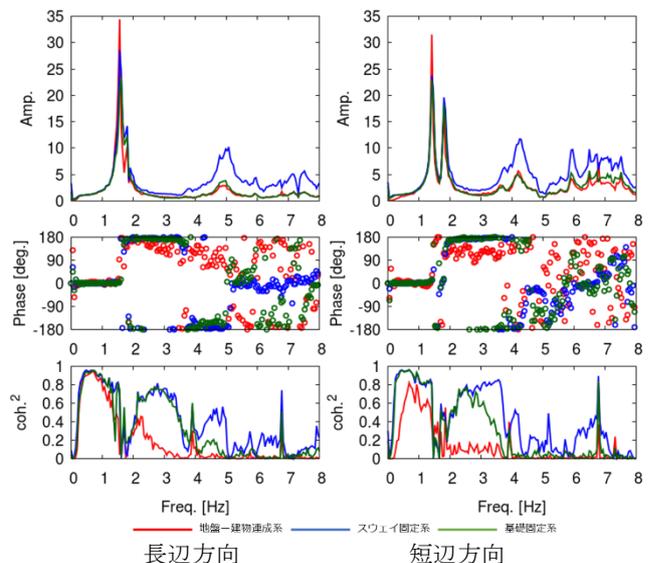


図 2 各系の伝達関数

表 3 固有振動数

設計	並進		ねじれ
	東西方向	南北方向	
設計	1.52	1.52	
8F/GL	1.6	1.4	1.8
8F/1F	1.6	1.4	1.8
8F/(1F+Hθ)	1.6	1.4	1.8

単位 [Hz]

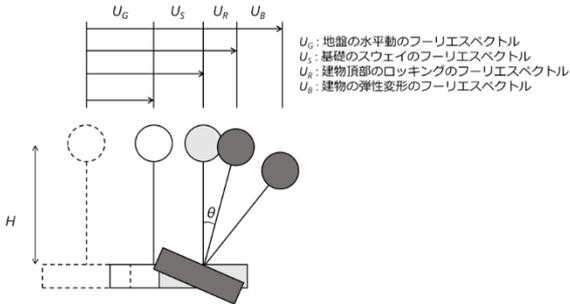


図 3 弾性変形率・スウェイ率・ロッキング率の算定方法の概略図

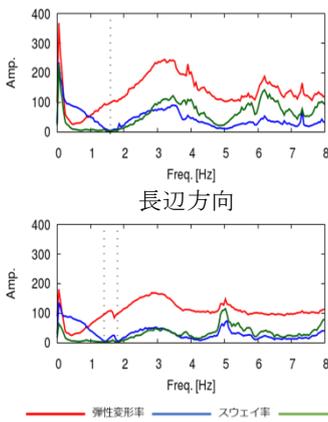


表 4 地盤—建物連成系の固有振動数近傍における各割合

方向	長辺方向 (EW)	短辺方向 (NS)
弾性変形率	96.0	93.0
スウェイ率	3.5	7.6
ロッキング率	1.5	6.3
合計値	101.0	106.9

単位 [%]

図 4 弾性変形率・スウェイ率・ロッキング率

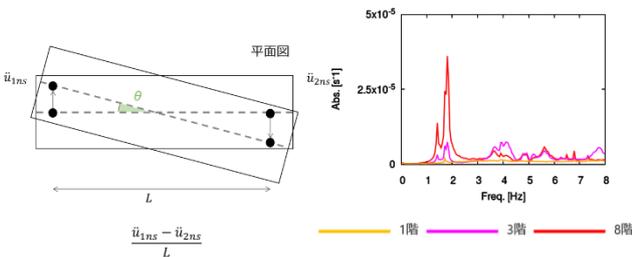


図 5 ねじれ回転角の角加速度の算出方法

図 6 ねじれ回転角の角加速度フーリエスペクトル

4.地震観測記録に基づく地盤・建物振動の分析

4.1 観測体制と分析に用いた地震概要

本研究では、図 7 に示すように建物 2 点、周辺地盤 1 点の合計 3 計測点で地震観測を行っている。

今回分析に用いた地震の研究対象建物と震央との位置関係を図 8 に、地震概要を表 5 示す。

4.1 振動特性に関する分析結果

常時微動計測の分析と同様に、地盤—建物連成系、スウ

エイ固定系の伝達関数の比較から、地盤と建物の動的相互作用効果について分析を行う。図 9 に一例として大阪府北部の地震の記録に基づく各系の伝達関数を示し、各地震の伝達関数から推定した並進の 1 次固有振動数及び減衰定数を表 6、表 7 に示す。並進の 1 次固有振動数が同程度の値を示していることから、動的相互作用効果は小さいと考えられる。

一方で、常時微動の分析結果と比較すると、固有振動数に最大で 1 割弱の差異が認められる。そこで平均層間変形角と常時微動計測から得られた固有振動数に対する地震観測記録から得られた固有振動数の変化率との関係を図 10 に示す。図より、平均層間変形角が大きいくほど、固有振動数が低減することがわかる。これは、2 次部材のずれによる建物剛性の変化が一因であると考えられる。

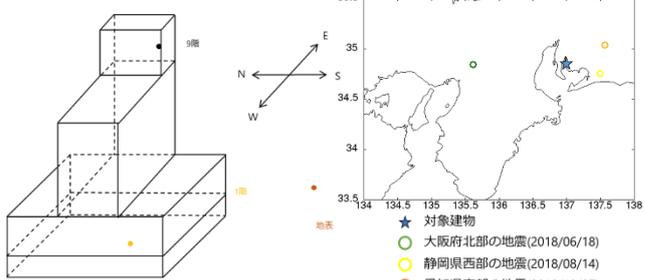


図 7 地震観測体制

図 8 対象建物と震央

表 5 分析に使用した地震概要

発生日	時間	震央地名	北緯度	東経度	深さ km	規模 M	最大震度	対象地域の震度	震央距離 km	震源距離 km
2018.06.18	7:58	大阪府北部	34.843	135.622	13	6.1	6弱	2	127.9	128.6
2018.08.14	20:51	静岡県西部	34.752	137.497	37	3.9	3	1	45.9	59.0
2018.10.07	10:14	愛知県東部	35.037	137.573	42	5.0	4	2	53.0	67.6

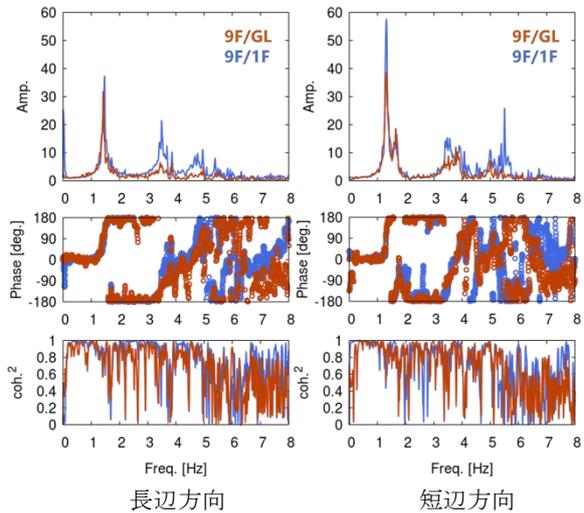


図 9 大阪府北部の地震の地盤—建物連成系の伝達関数とスウェイ固定系の伝達関数

表 6 各地震から推定した固有振動数

	大阪府北部の地震		静岡県西部の地震		愛知県東部の地震	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS
地盤—建物連成系	1.42	1.31	1.52	1.38	1.49	1.35
スウェイ固定系	1.47	1.32	1.55	1.41	1.52	1.38

単位 [Hz]

表7 各地震から推定した減衰定数

	大阪府北部の地震		静岡県西部の地震		愛知県東部の地震	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS
地盤—建物連成系	1.57	1.30	1.78	0.96	3.10	1.51
スウェイ固定系	1.34	0.87	1.26	0.74	1.72	1.42

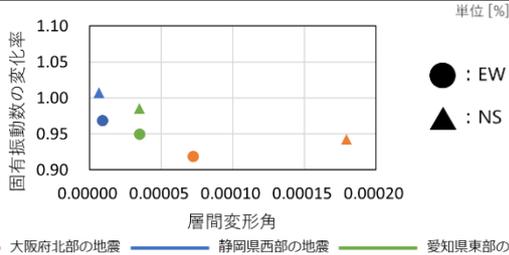


図10 層間変形角と固有振動数の変化率との関係

5. 周波数応答解析による建物応答予測

5.1 解析手法及び解析条件

今回用いた解析プログラムは、薄層法と有限要素法を動的サブストラクチャー法の容積法で統合した手法を用いたプログラムであり、基礎と周辺地盤とを分離してインピーダンスや基礎入力動を算出する。根入れ部分は六面体ソリッド要素、建物部分はせん断変形のみを考慮した梁要素、杭部分はせん断変形、曲げ変形を考慮した梁要素でモデル化する。建物部分の質量は設計図書を参照にし、剛性は常時微動計測記録及び地震観測記録から推定した建物の並進一次の固有周期と質量の関係から算出し、断面積は1㎡とした。1次モードでの加速度算出概要を図11に示す。伝達関数から推定した並進の1次固有振動数の前後0.1Hzでバンドパスフィルタをかけた各階の加速度波形を計算する。それらの波形において8階が最大値をとる時刻での値を各階で読み取る。計測を行っていない階に関しては線形補間によってその時刻での値を算出した。加速度波形を二階積分して求めた変位波形も、前述した方法でその時刻での各階の変位を求めた。各階の加速度に各階の質量を乗じて求めた慣性力と相対変位から各階の剛性を算出した。なお、ケース1は1階、3階、5階、8階、10階の常時微動計測記録、ケース2は1階と8階の常時微動計測記録、ケース3は大阪府北部の地震、ケース4は静岡県西部の地震、ケース5は愛知県東部の地震の地震観測記録を用いた。

5.2 地震観測記録と解析結果との比較

地震記録を用いた解析モデルが実現象を表現でき、モデル化が妥当であるかを検討する為に、地震観測記録の分析結果と解析結果との比較を行う。

図14に各ケースとそれに対応した地震記録から得られた地盤—建物連成系の伝達関数の一例を表8に各ケースから得られた固有振動数を示す。伝達関数から読み取った1次固有振動数はいずれのケースについても実測値とほぼ同じ値を示していることが確認できる。

次に、この伝達関数を用いて地震時の建物応答波形を算出し、地震記録との比較を行った。図15に実測値と解析結果の比較の一例を、各ケースの加速度の最大値を表9に

示す。図より、1次固有振動数の振幅倍率は同程度であるのに対し、応答波形の最大値が大きく異なるケースが確認できる。解析結果の応答波形が著しく小さいのが短辺方向(NS)に多いことから、解析モデルでは建物がねじれ振動をするのを表現できないことが一因であると考えられる。よって、建物上部の振動はねじれ振動による影響が大きいと考えられる。

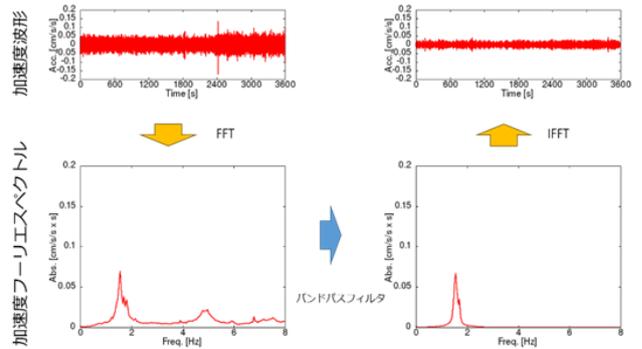
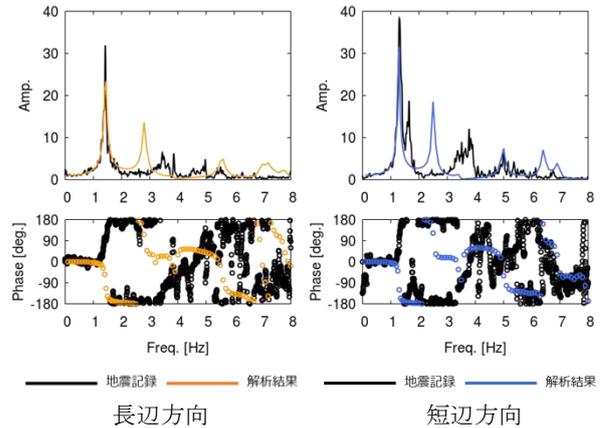


図11 1次モードでの加速度算出概要



大阪府北部の地震とケース3

図12 地表に対する9階の伝達関数の比較

表8 各ケースにおける実測値との固有振動数の比較

	2018/6/18		2018/8/14		2018/10/7	
	EW	NS	EW	NS	EW	NS
実測値	1.47	1.32	1.55	1.41	1.52	1.38
解析結果	1.45	1.30	1.50	1.35	1.45	1.35

単位: [Hz]

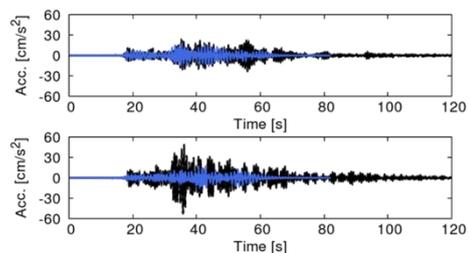


図13 9階の加速度波形の比較 (上段: EW、下段: NS)

6. 非線形時刻歴応答解析による建物応答評価

6.1 解析手法と解析条件

建物は図14に示す3次元フレームモデルを考える。モデルは柱梁接合部を節点とし、柱と大梁は材端ばねを持つ非線形梁要素として各節点を接合する。各節点には支盘面

積に応じた質量を与える。なお非構造部材のモデル化は行っていない。壁は線形にモデル化している。杭については深さ方向に複数の節点に分割して梁要素によってモデル化している。杭の節点には水平2方向に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。杭周地盤ばねの履歴足の骨格曲線は、極限地盤反力を用いた双曲線モデルとした²⁾。柱、梁（鉄骨梁を除く）、杭はノーマルトリリア型の骨格曲線を与えており、第一折れ点をひび割れ耐力、第二折れ点を降伏耐力としている³⁾。鉄骨梁もノーマルトリリア型の骨格曲線を与え、第一折れ点を降伏耐力、第二折れ点を降伏耐力の1.1倍とした。なお、純ラーメン構造であることから曲げ降伏が先行するとしてせん断破壊による非線形性は考慮していない。表層地盤については修正ROモデルでモデル化している。

6.2 入力地震動

入力地震動は、統計的グリーン関数法により作成した短周期成分の地震基盤での地震動を対象建物近傍の地盤モデルを使用して工学的基盤まで重複反射解析によって増幅させたものと内閣府データから対象建物近傍の工学的基盤における長周期成分の地震動を接続周期2.5秒により合成したものをを用いる。

6.3 設計時の保有水平耐力と解析結果との比較

モデルを静的増分解析した時の層間変形角と層せん断力との関係を図14に示す。図より層間変形角が1/200になるときの1階の層せん断力は、長辺方向は設計時の保有水平耐力を大きく下回っているのに対して、短辺方向はほぼ同じ値を示している。また、層せん断力は短辺方向が全体的に長辺方向よりも大きな値であることが確認でき、実測記録の分析によって得られた結果と整合していることがわかる。

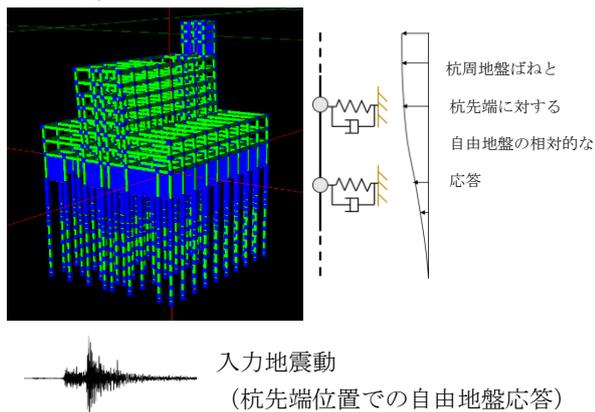


図14 3次元地震応答解析モデルの概略図

6.4 中小規模の地震観測記録と解析結果との比較

2018年6月18日に発生した大阪府北部の地震の記録を用いて弾性範囲内でのモデルの妥当性を検討した。図15に9階の加速度波形と応答スペクトルを示す。解析記録が観測記録よりも大きな値を示していることから、杭及び地盤のモデル化にこの差を生じさせる要因があると考えられる。

6.5 南海トラフ地震に対する応答評価

前述の手法で算出した南海トラフ地震を入力した解析結果の分析を行う。

図18に短辺方向の各階の最大加速度を示す。基礎固定系と地盤—建物連成系を比較すると、地盤—建物連成系の方が比較的小さい値を示している。このことから相互作用で応答加速度を低減させる効果が確認できる。

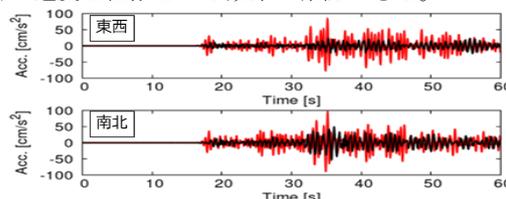


図15 加速度波形の比較

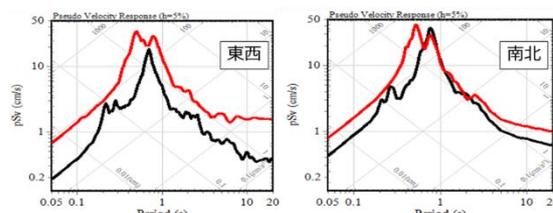


図16 応答スペクトルの比較

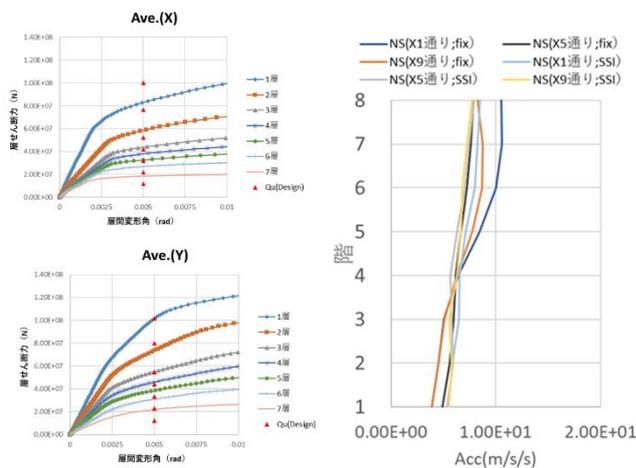


図17 保有水平耐力の比較

図18 各層の最大加速度

6.まとめ

本研究では、愛知県内に実在する自治体庁舎建物を研究対象として、実測記録の分析から現在の振動特性の把握をした。研究対象建物及びその周辺地盤の解析モデルを様々なケースについて作成し、実現象の再現を試みた。最後に南海トラフ地震に対する応答評価を行った。

謝辞

本検討にあたっては、研究対象である自治体の防災課の職員の方々に情報提供いただきとともに、常時微動計測、地震観測にご協力いただきました。ここに記し謝意を表します。解析にあたっては、清水建設株式会社の3次元非線形地震応答解析システムidacを使用させていただきました。

参考文献

- 1) 南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ：防災情報のページ—内閣府。（平成24年8月29日発表）
http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/taisaku/pdf/1_6.pdf（参照2020年1月9日）
- 2) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006
- 3) 日本建築学会：鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説、2015.10