大阪府域に立地する超高層建物

SUPER HIGH-RISE BUILDINGS IN OSAKA PREFECTURE

林 康裕 ——— * 1 村瀬詩織 ——— * 2
杉野未奈 ——— * 3

Yasuhiro HAYASHI ——— * 1 Shiori MURASE ——— * 2
Mina SUGINO ——— * 3

キーワード：
超高層建物, データベース, 免震, 固有周期, 高さ

Keywords:
Super high-rise building, Database, Base-isolation, Fundamental natural period, Height

To predict the earthquake damage, we have constructed database of the super high-rise buildings in Osaka prefecture and identified the fundamental period of 32 super high-rise buildings by micro-tremor measurements. More than 20% of the super high-rise buildings are base-isolated, and more than 80% of the base-isolated buildings are condominium. The largest proportion of the building use was office before 2000. However, the construction of condominium has increased since 2001. After the 1995 Hyogo-ken Nambu earthquake the fundamental natural period has been short in Osaka. The fundamental natural period was about 1.1 to 1.3 times to that at the completion.

1. はじめに

筆者らは、南海トラフ沿いの巨大地震による長周期長時間地震動および上町断層帯によるパルス性地震動による建物被害が懸念される大阪市域を対象とし、評定シートが入手された超高層建物を対象に、大振幅地震動に対する被害予測を行ってきた¹⁾ほか。その結果、多くの建物が深刻な被害を経験する可能性があるため、超高層建物の実態を把握し、懸念される被害様相をより正確に把握する必要性を強く認識した。

本論文では、大阪府域全域の超高層建物を可能な限り網羅したデータベースの構築を図るとともに、これまでほとんど報告の無い使用時の微動計測を行って、現状分析を行う。まず、インターネット情報に基づき、大阪府域の超高層建物のデータベースを作成する。この際、建物の高さ、用途、階数、竣工年とともに、免震建物か否かを特定する。次に、作成したデータベースを用いて、建物の高さおよび用途別の建物棟数の変遷を免震・非免震別で明らかにする。また、長周期地震動対策の対象地域(OS1、OS2、OS3)別の建物棟数を示す。最後に、32棟の超高層建物の微動計測を行い、竣工時との比較や竣工年による変化も含めて、1次固有周期の傾向を把握した結果について報告する。

2. データベースの作成方法

まず、超高層建物データのインターネット掲載サイト(例えば2)~6)を参考に、大阪府域における超高層建物のリストアップを行った。緯度・経度はGoogle map上で確認した。ただし、一般の掲載サイトでは、概ね60m以上の高さを有する建物が網羅されているわけではなく、漏れが少なくない。そこで、Google earthの立体写真モデルと箱モデルを用いて、大阪府域全域において建物の高さを

1棟1棟確認しながら追加抽出を行った。抽出された建物を図1に示すが、府域全体で470棟に達する。全470棟中、大阪市内に立地しているのは415棟で、9割弱に達する。しかも、図1よりも明らかなように、大半は大阪市中心部の上町断層周辺に立地していることが分かる。

建物の高さ、用途、階数、竣工年は、原則、インターネット情報に基づいて収集した。しかし、高さが最高高さなのか軒高なのか、多くの場合に確認できなかった。そして、高さ自体が分からない建物も多数存在した。高さが分からない場合には、原則として、Google earthの立体写真モデルより、建物頂部の標高と周辺地盤の標高の差分を最高高さとして推定した。

図1 超高層建物立地位置

*1 京都大学大学院 教授・工博
(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C-2 棟316号室)

*2 京都大学大学院 修士課程

*3 京都大学大学院 助教・博士(工学)

*1 Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

*2 Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ.

*3 Assist. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Eng., Kyoto Univ., Dr. Eng.

免震建物の特定は、一般社団法人 日本免震構造協会の超高層建物一覧とともに、一般財団法人 日本建築総合試験所や一般財団法人 日本建築センターが公表している評価シートを基にデータベース化を試みた。しかし、共同住宅については、大阪府域に建つ超高層建物の建設実態を把握する上で、無視できないほど多くの漏れがあった。しかも、その中には免震建物多く含まれていたため、不動産売買・仲介サイトなどを基に、1棟1棟、免震建物か否かを確認した。

3. 超高層建物の分析

本章では、大阪府超高層建物データベースを用いて現状分析を行う。

分析に先立ち、2章でも述べたように、高さが最高高さなのか軒高なのか、多くの場合に確認できていない。そこで、評価シートより建物の最高高さが判明している230棟を用いて、2章で求めたデータベースの高さと評価シートの最高高さの比を求め、図2に示す。同図より、(高さ)/(最高高さ)は比較的低い建物を除き1となっており、データベースの高さは概ね最高高さと考えてよいことが分かる。次に、同じく評価シートのデータを用いて、最高高さと軒高の差を調べて、図3に示す。同図より、最高高さに関係なく、0~13m程度に(最高高さ)-(軒高)が分布している。(最高高さ)-(軒高)の平均値は6.9m、標準偏差は4.1mであった。なお、オフィスの平均値は6.2m、標準偏差は4.3m、共同住宅の平均値は7.3m、標準偏差は3.2mとなっている。すなわち、オフィスの方が平均値は低いものの、ばらつきは大きいことが分かる。

図2 高さと最高高さの関係

図3 最高高さと軒高の関係

図4 免震・非免震別の高さ別の建物棟数

図5 高さ／階数の変遷

図6 用途別の建物棟数の変遷

図7 共同住宅の免震・非免震別の建物棟数の変遷

図8 共同住宅の高さと総戸数

図9 共同住宅の高さと総戸数／階数

次に、高さ別の建物棟数を免震と非免震で区別して図4に示す。免震建物は、全470棟中101棟と2割を超えるが、高さが200mを超える建物はなく、9割は150m以下である。また、免震・非免震に関係なく、半数以上が高さ100m以下の建物である点にも注意されたい。

最後に、平均階高の経年変化を考察するために、全470棟で(高さ)/(階数)を竣工年別に図5に示す。共同住宅は3~4mで、オフィスも含めてそれ以外は4m以上となっている。竣工年が新しくなるにつれて、(高さ)/(階数)は増加する傾向にあり、共同住宅に比べてオフィスの方が増加傾向は顕著である。なお、(高さ)/(階数)が大きな建物は、鉄塔・劇場などを有していた。

次に、用途について考察する。図6に用途別の建物棟数の変遷を示す。竣工年が1995年以前では、オフィスの建設が最も多かったが、それ以降は伸び悩んでいる。それに対して、共同住宅は1980年代前半から建設されはじめ、2010年頃まで増加傾向にあった。2011年以降はやや減少しているものの、超高層建物に占める共同住宅の建設割合が高いことには変わりはない。また、オフィスと共同住宅の棟数を合計すると392棟になり、全470棟に対し8割以上を占める。

一方、共同住宅の棟数変遷を図7に示す。同図中では、免震と非免震を区別している。免震建物は2001年以降に竣工している。免震建物の8割以上を占める共同住宅を見ると、2006年以降に竣工した免震建物は、非免震建物とほぼ同数以上となっている。

また、超高層建物に損傷が生じた際の影響度を理解するための一つの指標として、共同住宅の総戸数に着目した検討を行う。高さと総戸数の関係を図8に示す。建物が高くなるにつれて総戸数は増加するが、建物によってばらつきがあることが分かる。例えば、高さ150mの建物では、総戸数は300~600戸の範囲に分布している。大阪府内の超高層共同住宅は233棟あるが、総戸数の総和は54000戸に達しようとしている。このうち、大阪市内の超高層共同住宅は約180棟で総戸数の総和は40000戸を超えている。

そこで、(総戸数)/(階数)を図9に示す。(総戸数)/(階数)は2~15戸に多くの建物が分布している。(総戸数)/(階数)が小さな建物

図10 総戸数／階数>19の建物配置
(右端のみ非免震、北は上、寸法は不統一)

をサンプリングして個別に調べると、下記の傾向があった。

- ・ロビーやパーティールーム等の共用施設がある。
- ・平面が小さく1階あたりの面積が小さい。
- ・高層階住戸の面積が広い。

一方、(総戸数)/(階数)が20に近い共同住宅も存在している。(総戸数)/(階数)が19より大きい6棟について、建物平面を模式的に図10に示す。6棟とも高さ80m未満であり、複数の上部構造で構成され、お互いにエクспанションジョイントで連結されていた。注目される点としては、6棟中5棟が免震建物であり、棟間変形やねじれ振動を、免震効果によって抑えていると考えられる。ただし、過大な地震動が入力した場合には、擁壁と衝突し、複雑な挙動を呈すると考えられる。

最後に、超高層建物の立地を図1に示すOS1,2,3の3地域に分けて分析する。国土交通省国土技術政策総合研究所及び国立研究開発法人建築研究所は、高さが60mを超える建築物及び地上4階建て以上の免震建築物(超高層建築物等)の長周期地震動対策として「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策」に関わる技術資料・データ^{7,8)}を作成し、平成28年6月24日付け国住指第1111号で国土交通省住宅局から地方公共団体等の関係団体あてに通知している。その中で、大阪地方では、設計時に構造計算に用いた地震動の大きさを上回る可能性を基に、非常に高い地域(OS1)、高い地域(OS2)、ある地域(OS3)の3地域に分割して検討用の地震動が示されている。各ゾーンの擬似速度応答スペクトルは、告示スペクトルの1倍、1.5倍、2倍を基本として、簡略化して定められている。

全470棟中、地域指定が無い建物は16棟、OS1は非免震の7棟にしか過ぎない。従って、図1に示すように大半はOS2とOS3地域に建っており、両者に立地している建物はOS2で208棟、OS3で239棟と棟数に大差はない。

4. 超高層建物の固有周期

竣工時の1次固有周期については、数多く報告されている^{10,11)}。本

論文では、使用時における1次固有周期の実態把握を目的として、超高層建物の微動計測を行った。対象建物の立地地域は、大阪圏17棟、東京圏13棟、その他地域2棟の合計32棟である。構造種別は、SRC造かRC造をRC造系、S造かCFT造はS造系とすると、S造系は26棟、RC造系は6棟であった。東京圏で計測した建物は全てS造系であり、RC造系は大阪圏に4棟、その他地域に2棟立地している。RC造系のうち、共同住宅は3棟である。計測は、展望スペースや休憩・食事スペースなど、一般に開放されたスペースで行った。計測のほとんどは、高精度・小型の加速度計1台(水平2成分と上下成分)を用いて行った。計測位置は、必ずしも建物の最上階周辺ではなく、中間階でも行っている。38階建ての4階での計測でも、1次固有周期が同定可能な場合もあった。

計測波形には、下記の処理を行って1次固有周期を同定している。本論文では、建物の固有周期が長い方向をx方向、短い方向をy方向として2方向の1次固有周期を算出する。まず、6次のパワースフィルタを用いて、ローパスフィルタとハイパスフィルタをかけ、0.07Hzから5Hzの信号を抽出する。計測波形から40.96秒ずつずらしながら、163.84秒毎に分割した波形を作成し、分割波形毎にバンド幅0.07HzのParzenウィンドウをかける。そして、それぞれのフーリエ変換値を算出した後、平均化処理を行ってフーリエスペクトルを算出した。1次固有周期は、建物高さに対応した周波数帯域のピーク振動数から特定した。41階建ての複合ビル(低層部は13階までで、14階で大きくセットバックしている)の15階で得られた計測結果を図11に示す。このように、ほとんどの場合、フーリエスペクトルのピークは明瞭であった。そのため、特別な工学的判断を加えず、最も長周期側のピーク周期を1次固有周期と同定した。

まず、計測した建物のうち、評価シートに記載されていた固有周期(設計固有周期)と微動計測によって同定された(使用時)固有周期の関係を図12に示す。なお、計測した建物には、超高層免震建物が含まれている。その場合には、基礎固定時の値を設計固有周期として示している。設計固有周期は微動による固有周期

図11 フーリエスペクトル例

図12 設計固有周期と微動固有周期の関係

(a) 竣工時と使用時の比較

(b) 築年数と固有周期の増加割合

図13 微動計測時期による固有周期の変化

図14 高さと微動固有周期の関係

(a) 東京圏

(b) 大阪府

図15 高さと微動固有周期の関係(東京圏と大阪府の比較)

図16 微動固有周期/高さの変遷

よりもやや長めではあるが、一部の例外を除いて両者は概ね対応していることが分かる。次に、竣工時に計測されていた微動固有周期¹⁰⁾と筆者らが微動計測して得られた固有周期の関係を図13(a)に示す。竣工時に比べてほとんどの建物で固有周期が長周期化していることが分かる。竣工後の築年数と竣工時に対する固有周期比の関係を図13(b)に示す。竣工後20年以上が経過した建物で得られた結果が多いが、竣工時に計測された微動固有周期に比べて1~3割程度長周期化している建物が多いことが分かる。中には5割程度長周期化しているRC造系建物もあった。

図14に、高さ H と微動計測から得られた固有周期の関係を、上部構造の構造種別別に示す。ここで、本章での高さ H は、評定シートで軒高が確認できた建物は軒高とし、軒高が確認できなかった6棟の建物は最高高さとしている。従って、軒高に比べるとやや大き目の値となっている。同図では、SRC造かRC造をRC、S造かCFT造をSと表記している。そして、添え字のx,yは、それぞれ、固有周期が長い方向と、短い方向を表している。図14より、RC造系に比べて、S造系の固有周期の方が長めであるが、いずれも、概ね $T=0.015H \sim 0.025H$ の範囲に分布していることが分かる。

次に、立地地域を東京圏と大阪府の地域別に分けて、S造系の高さと微動計測から得られた固有周期の関係を図15に示す。構造物の設計においては、1970年代では最大加速度を用いてレベル設定をされていたが、1986年¹²⁾以降最大速度を指標としたレベル設定が用いられている。レベル2地震動の最大速度は、50cm/sとされていたが、大阪では40cm/sとされることが多かった。しかし、大阪府では兵庫県南部地震の発生に伴い、レベル2地震動の最大速度が50cm/sに変更されている。このような歴史的背景を踏まえて、固有周期の変化について考察する。まず、図15では、東京圏においては、兵庫県南部地震を契機として、固有周期と高さの關係に顕著な変化は見られない。しかし、大阪府においては、1995年以前に竣工した建物には概ね $T=0.025H$ の關係があったのに対して、1995年以降の竣工建物には有意な短周期化の傾向が見られる。最後に、図16に竣工年と(微動固有周期 T)/(高さ H)の關係を示す。竣工年が新しくなると、明らかに固有周期の短周期化が見られる。RC造系は計測事例が少ないが、1995年以降の竣工建物では $T/H=0.015 \sim 0.02$ とS造系に比べて短周期であることが分かる。S造系について見ると、概ね、1986年以前の竣工建物は $T/H=0.02 \sim 0.03$ で、1986年~1995年の竣工建物は $T/H=0.017 \sim 0.025$ 、1995年以降の竣工建物は $T/H=0.015 \sim 0.025$ となっている。このように、竣工年が新しくなるにつれて短周期化の傾向があるものの、前述のように、1995年以前では東京圏の方が大阪に比べて短周期であるのに対して、1995年以降では両地域に顕著な差は見られなくなっている。

5. まとめ

本論文では、大阪府域に立地する超高層建物の地震被害を予測すべく、殆どの超高層建物を網羅したデータベースを構築し、現状分析を行った。また、超高層建物の微動計測を行い、建物使用

時の1次固有周期の実態把握を行った。本計測結果は、既往の超高層建物の振動計測データ^{10,11)}と異なり、減衰定数の同定は行っていないが、1次固有周期の建設年代別の比較や竣工後の経年変化を考察している点に大きな特徴がある。得られた結果を以下に示す。

- 1) データベース化した超高層建物470棟のうち101棟が免震建物であり、全体の2割以上を占める。また、免震建物のうち8割以上は共同住宅であり、2006年以降の共同住宅については、非免震建物より免震建物の方が多くなっている。
- 2) 主用途別の建物棟数の変遷では、竣工年が1995年以前はオフィスが増加傾向にあるが、それ以降は停滞している。一方、1980年代前半からは共同住宅が増加しており、全棟数に占める共同住宅の割合が最も大きい。このうち、大阪市内の共同住宅は約180棟で総戸数の総和は40000戸を超えている。
- 3) 超高層建物のほとんどは、長周期地震動対策の対象地域の内、OS2、OS3に立地している。また、両地域に立地している建物棟数に大差はない。
- 4) 築年数20年程度以上の超高層建物では、竣工時に実施された微動計測結果よりも多くの建物で固有周期が1~3割程度長周期化しており、概ね、設計固有周期に対応していた。大阪府の超高層建物では、兵庫県南部地震を契機として地震荷重が増加し、明瞭な短周期化傾向が見られた。結果として、超高層建物の固有周期は、 $T=0.015H \sim 0.025H$ の範囲に分布している。ただし、 H は建物高さである。

参考文献

- 1) 木村友香，岡沢理映，関口春子，林康裕：大阪市域を対象としたパルス性地震動に対する超高層建物群の被害予測（その1，2），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.197-200，2014.9.
- 2) 超高層ビル・超高層マンションの『BLUE STYLE COM』：大阪府の超高層ビルデータベース，<http://www.blue-style.com/area/osaka/>（参照2017.9.8）.
- 3) ウィキペディア：大阪府の超高層建築物・構築物の一覧，<https://ja.wikipedia.org/wiki/大阪府の超高層建築物・構築物の一覧>（参照2017.9.8）.
- 4) 大阪 at night - 大阪の夜景 - ：大阪府の高層ビル，<http://www.osakanight.com/skyscrapers/>（参照2017.9.8）
- 5) 超高層ビルとパソコンの歴史：大阪市・超高層ビルデータベースランキン一覧，<http://www.eonet.ne.jp/~building-c/osaka/builosaka.htm>（参照2017.9.8）
- 6) OSAKA ビル景：<http://bb-building.net/>（参照2017.9.8）.
- 7) 国土交通省：超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動への対策について，http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/jutakukentiku_house_fr_000080.html（参照2017.9.8）.
- 8) 国土交通省住宅局建築指導課長：平成28年6月24日国住指第1111号 超高層建築物等における南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動対策について（技術的助言），<http://www.mlit.go.jp/common/001136168.pdf>（参照2017.9.8）.
- 9) 地震調査研究推進本部：上町断層帯における重点的な調査観測 平成22~24年度成果報告書，http://www.jishin.go.jp/database/project_report/uemachi_juten-h24/（参照2017.9.8）.
- 10) 実測減衰データベース ダウンロード，<http://news-sv.aij.or.jp/kouzou/s7/d11.htm>（参照2017.9.8）.
- 11) 日本建築学会：建築物の減衰，2000.10.
- 12) 日本建築センター：ビルディングレター，高層建築物の動的解析用地震動について，pp.49-50，1986.6.

[2018年2月6日原稿受理 2018年4月16日採用決定]