



長周期地震動と地震工学

福和伸夫¹⁾

1) 正会員 名古屋大学減災連携研究センター、センター長・教授 工博
e-mail: fukuwa@nagoya-u.jp

要 約

地震工学分野における長周期地震動の問題について解説を試みる。過去の地震などによって得られた課題や教訓、それに対する課題克服の取り組みの経緯などについて、兵庫県南部地震、東北地方太平洋沖地震、熊本地震、国の動きなどを軸に振り返ると共に、南海トラフ地震対策などの切迫する巨大地震に備えて今後取り組むべき課題について考える。

キーワード： 長周期地震動、高層建築、免震・制振、緊急地震速報

1. はじめに

構造物の長大化による固有周期の長周期化、巨大地震発生確率の高まり、大規模堆積平野への人口集中による長周期地震動に晒される構造物の増加などによって、長周期地震動に対する課題が顕在化してきた。そこで、建築構造、地震防災の立場で、長周期地震動と筆者との関りについて、過去を振り返ってみる。合わせて、将来の発生が懸念される南海トラフ地震や内陸地殻内地震などへの対策について考えてみる。

2. 兵庫県南部地震以前の長周期地震動への認識

長周期地震動の問題は、建築物の100尺制限の撤廃によって高層ビルが実現されるまでは、余り注目されることはなかった。過去の関東地震や南海トラフ地震では長周期の揺れがあったことが伝えられているが、長周期地震動で被害を受けるような長大な構造物が無かったことから着目されなかったようだ。

例えば寺田寅彦¹⁾は、1923年関東地震の揺れの様子を、「椅子に腰かけている両足の蹠を下から木槌で急速に乱打するよう感じた。多分その前に来たはずの弱い初期微動を気が付かずに直ちに主要動を感じたのだろうという気がして、それにしても妙に短週期の振動だと思っているうちにいよいよ本当の主要動が急激に襲って来た。同時に、これは自分の全く経験のない異常の大地震であると知った。その瞬間に子供の時から何度となく母上に聞かされていた土佐の安政地震の話がありあり思い出され、丁度船に乗ったように、ゆたりゆたり揺れるという形容が適切である事を感じた。仰向いて会場の建築の揺れ工合を注意して見ると四、五秒ほどと思われる長い週期でみしみしと音を立てながら緩やかに揺れていた。それを見たときこれならこの建物は大丈夫だということが直感されたので恐ろしいという感じはすぐになくなってしまった。」と記している。

寺田は、見事に長周期の揺れを描写し、母から聞いた安政南海地震の揺れと同様であるとも記している。1944年東南海地震でも、三重県四日市の埋立地に建設された東洋一と言われた高さ185mの煙突が途中で折れ、長周期の揺れによる構造物被害が疑われる。

戦後、長周期地震動が注目されたのは、1964年新潟地震での昭和石油新潟製油所の石油タンクの火災である。新潟平野特有の長周期地震動によるスロッシングが原因だと推察される。

筆者が長周期地震動を初めて体験したのは、1983年日本海中部地震の揺れを東京・内幸町に建つ28階建事務所ビルの27階で経験したことに遡る。ブラインドが左右に大きく揺れていた。秋田県沖の地震と知り、高層ビルの揺れやすさに驚いたことを思い出す。

筆者は、10年間、建設会社に勤務したが、短周期の揺れが問題となる剛構造の原子力発電施設の耐震研究に携わっていたため、長周期地震動との関りは少なかった。エルセントロ、タフト、八戸などの観測地震動の応答スペクトルを見て、スペクトルの谷間の周期の建物が多きことには疑問を持ったが、業務の対象外だったこともあり、大きな関心を持つことは無かった。大学に異動後も、短周期で重要となる構造物と地盤との動的相互作用を中心に中低層建物の振動挙動を調べていたので、長周期地震動と関わることはなかった。ただし、建築物の減衰について検討していた時に、長周期で揺れる高層ビルの減衰の小ささに問題を感じていた。

建築学会が毎年開催する地盤震動シンポジウムでは、1976年に「強震動におけるやや長周期成分について 耐震解析用地震動の再検討」、1990年に「やや長周期地震動 現時点で予測はどこまで可能か」が取り上げられている。当時を振り返ると、私自身の無関心さに、反省すべき点も多い。

3. 兵庫県南部地震後の動き

兵庫県南部地震では、所謂キラーパルスの成因为議論され、震源の破壊過程や堆積盆地の構造に伴う波動の干渉効果の重要性が認識され、地震後、強震動研究が急進展した。

建築物被害としては、既存不適格木造住宅の倒壊や10階前後の建物の層崩壊が着目され、高層建物の問題は、芦屋浜の高層住宅のメガ柱の脆性破壊や、神戸市役所高層棟の残留変位の存在などに留まった。このため、長周期地震動問題についての議論は余り深まらなかった。

ただし、大阪市・弁天町に建設された50階建事務所ビルで観測された記録には、図1に示すように、大阪平野特有の卓越周期の揺れによって共振応答した様子が窺える²⁾。休日翌日の早朝の地震で、建物内で揺れを経験した人が殆どいなかったため、社会的にも問題にはならなかったようだ。

地震後に、地震防災対策特別措置法が制定され、法律に基づいて地震調査研究推進本部（地震本部）が設置された。その後、地震本部を中心に、強震観測網の整備、活断層調査、堆積平野地下構造調査などが精力的に進められた。また、震源断層を特定した地震の強震動予測法がレシピとしてまとめられた。これらに基づき、地震発生の長期評価や地震動予測地図が毎年公表されている。いずれも、地震本部のホームページ (<https://www.jishin.go.jp/>) や防災科学技術研究所の地震ハザードステーションJ-SHIS (<http://www.j-shis.bosai.go.jp/map/>) で閲覧することができる。

兵庫県南部地震では、普及し始めた免震建物で図3のような地震観測記録が得られ³⁾、免震効果が実証された。このため、地震後、免震建物が全国で急増した。元来、免震構造は地盤の周期から建物の周期を隔離することに目的があるため、長周期地震動に配慮した設計用地震動の策定が重要となる。このため、平滑なスペクトル特性を有するBCJ波⁴⁾に工学的基盤以浅の地盤増幅特性を乗じて地震動を策定する

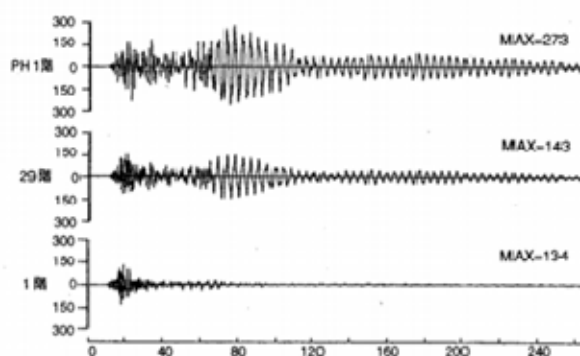


図1 兵庫県南部地震での高層ビルの観測波形²⁾

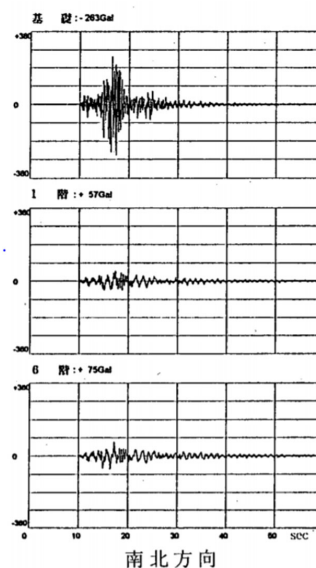


図2 兵庫県南部地震での免震建物の観測波形³⁾

方法が多用されるようになった。また、常時微動のH/Vスペクトルで長周期領域の卓越周期をチェックすることも一般的になった。重要な建築物では、震源断層の破壊過程や深い地盤構造を考慮した地震動策定も行われるようになった。

さらに、建築基準法の性能規定化に伴い、2000年に、平成12年建設省告示第1461号によって解放工学的基盤における加速度応答スペクトル（告示スペクトル）が定義された、時刻歴応答計算による耐震設計では、告示スペクトルと表層地盤増幅を用いた検討が行われるようになった。

4. 中央防災会議での検討と十勝沖地震などの被害地震

2001年に中央省庁が再編され、中央防災会議が内閣府に移管された後、検討課題ごとに専門調査会が設置され、東海地震や東南海地震・南海地震などの被害想定が行われた。この中で、長周期地震動に対する懸念も示された。

2003年にまとめられた東海地震対策大綱には、「東海地震の特徴を踏まえた調査研究として、津波による建物被害の研究や長周期地震動の高層ビル等への影響についての研究等、今後の東海地震対策をより一層的確に講じるための研究を進める。特に、地震発生直後の即時的情報（ナウキャスト地震情報）の実用化については、関連する機関の連携のもと、積極的に推進する。」と記されている。また、東南海・南海地震対策大綱では、「長周期地震動対策の推進」という項を立て、「東南海・南海地震は、震源域が非常に大きな海溝型地震であり、その地震動は一般的な地震によるそれと比較して長周期成分を多く含んだものとなっている。また、地震動の継続時間も長い。このため、国・地方公共団体・関係事業者等は、連携してこのような長周期地震動の構造物に及ぼす影響について調査研究を進め、新たな対策の必要性を検討する。」と記されている。

同時期には、現実の地震でも長周期地震動の問題が顕在化した。2003年十勝沖地震では、苫小牧にあった石油タンクが、長周期地震動によるスロッシングで火災を起こした。この地震後、長周期地震動に着目した特集番組なども作られ、社会が注目するようになった。翌年2004年には、9月に東海道沖地震が発生し、三大都市圏の湾岸地域を中心に長周期が卓越した揺れが観測された。ただし、地震発生が深夜だったため、揺れを体感した人は少なかった。これに対し、10月に起きた新潟県中越地震は土曜日の夕刻に発生し、東京都内の著名な高層ビルのエレベーターなどで問題が発生したことから、社会的関心が高まった。このような背景の中、建築分野では、高層ビルの減衰性能の向上を意図した制振の技術開発と普及が一気に進んだ。

こういった中、内閣府からの依頼で、建築学会と土木学会が連携して「東海地震等巨大災害への対応特別調査委員会」を設置し、2004年度から3か年、長周期地震動問題などが検討された。さらに、建築学会では、2007年度から「構造委員会高機能社会耐震工学WG」を、2009年度から「長周期建物地震対応WG」、2011年度から「長周期建物地震対応小委員会」を設置して検討が続けられ、**複合災害シンポジウムと題したシンポジウム**が毎年開催された。検討結果の記者発表も、東北地方太平洋沖地震のちょうど1週間前に建築会館で行われていた。

研究面でも、2007年度から5か年、文部科学省の「首都直下地震防災・減災特別プロジェクト」も行われ、その中でE-ディフェンスにおいて高層ビルの長周期地震動実験も実施された。地震本部でも、「長周期地震動予測地図」2009年試作版を公表していた。

また、2008年に、日本建築防災協会に「長周期地震動の設定に関する検討委員会」が設置され、長周期の設計用入力地震動のあり方が議論された。この検討結果を受けて、2010年12月に国土交通省から「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」が発表され、意見募集が行われた。東北地方太平洋沖地震が発生したのは、意見募集終了の翌月である。

まさに、長周期地震動の検討が本格化していた時に、東北地方太平洋沖地震が発生した。

5. 東北地方太平洋沖地震と長周期長時間地震動

2011年東北地方太平洋沖地震では、震源から離れた東京や大阪の高層ビルが大きく揺れた。中でも、震源から700km程度離れた場所にあった高さ256mの大阪府咲洲庁舎では、図3のように、地盤との共振により片振幅1.37mもの揺れが記録された⁵⁾。地震の1か月前に建築研究所が設置した地震計がその揺れを記録した。東京都内の高層ビルも強く揺れ、家具の転倒や天井の落下、エレベーターの閉じ込めなど、

様々な問題が発生した。筆者も、都内青山にある高層ビルの15階で講演中に揺れに遭遇し、長く続く揺れによって応答増幅する怖さを実感した。この地震では、高層ビルに加え、小田原平野など、震源から離れた場所にあった免震住宅も強い揺れに見舞われた⁶⁾。この地震を受け、長周期長時間地震動に対する制振改修の重要性が認識され、技術開発も精力的に行われ、咲洲庁舎を始め多くのビルで改修工事が行われた。

地震後、中央防災会議は、「東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会」を設置し、地震の教訓と今後の課題をまとめた。長周期地震動に関しても、被害想定に関連して、「長周期

地震動による超高層ビル等の長大構造物の被害など、地震の揺れの周期と被害との関係を調査分析する必要がある。とりわけ、東海地震など将来発生が予想される地震の長周期地震動が、今回の地震の揺れの2倍以上と推定されていることに留意する必要がある。」と記された。

また、今後の対策としては、「今回の東北地方太平洋沖地震では、長周期地震動は地震の規模を考えると比較的小さかったが、超高層ビルにおいて天井の落下、内装材、防火戸、エレベータなどの被害が発生していることから、必要な補強対策を実施することが必要である。なお、今後の長周期地震動の検討にあたっては、地震による揺れの強さに加えて、地震毎の周期特性や継続時間の影響などについても留意することが必要である。」と記された。

さらに、南海トラフ地震などの大規模地震に備えて、「今回の東日本大震災では、地震規模を考えるとそれほど大きくなかったものの、広範囲に渡って多数の建物被害があった。また、超高層ビル等を揺する長周期地震動は地震の規模を考えると比較的小さかったが、それでも震源から遠く離れた地域においても長周期地震動による超高層ビルの被害も報告されているように、近い将来発生が懸念される南海トラフの海溝型巨大地震では、地震動の周期特性等や伝搬の仕方によっては長周期地震動が強く発生する可能性があり、超高層ビル等に甚大な被害が発生することが懸念される。」と指摘している。

6. 南海トラフ地震と長周期長時間地震動対策

中央防災会議では、東北地方太平洋沖地震の教訓を踏まえて、南海トラフ地震対策を本格化させた。まず、「南海トラフの巨大地震モデル検討会」を設置して、想定すべき地震を検討した上で地震動や津波を予測し、2012年3月に「南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について（第一次報告）」を公表した。さらに、「南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ」を設置し、被害想定を行うと共に、2013年5月に「南海トラフ巨大地震対策について（最終報告）」をまとめた。ここには、具体的に実施すべき事前防災対策として、長周期地震動に関して、

- 関東平野、濃尾平野、大阪平野等の軟弱な堆積層で覆われている地域では、地盤の固有周期に応じて地震波の長周期成分が増幅され、継続時間が長くなることが確認されている。また、地震波の伝播の仕方によってもこのような長周期地震動が増幅されることがある。
- 関東地方・東海地方・近畿地方の都市部や中国地方・四国地方の瀬戸内海沿岸には、高層建築物や石油コンビナート施設、長大橋等の多数の長周期構造物が存在する。このような構造物は、固有周期が長く、長周期地震動により共振し、被害を受けるおそれがある。
- このため、国、関係機関は、長周期地震動及びそれが高層建築物や長大構造物に及ぼす影響についての専門的な検討を引き続き進める必要がある。
- 臨海部に集積する石油コンビナート地帯では、周辺への被害影響を低減するため、国、地方公共団体、関係事業者は、長周期地震動等による石油コンビナート施設の被害の防止や低減のための対策を推進

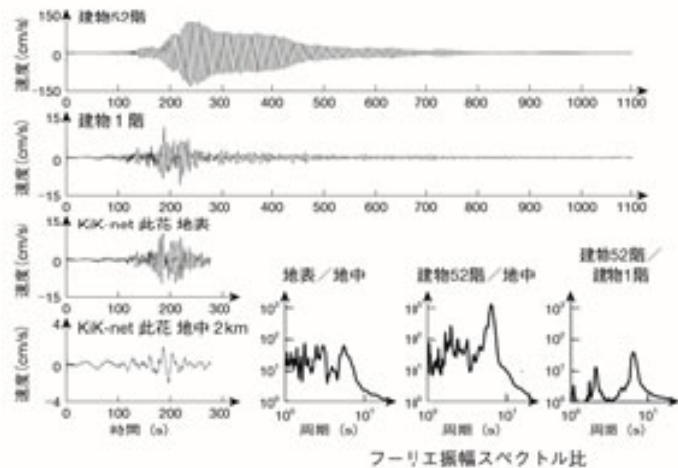


図3 大阪府咲洲庁舎と周辺地盤の観測波形

する必要がある。

と記されている。そして、今後検討すべき課題としては、

- 東北地方太平洋沖地震では、震源から遠く離れた首都圏や近畿圏等において、長周期地震動により高層ビルや超高層ビルが大きく揺れて被害が発生した。長周期地震動に関しては、これまでも種々の推計手法が提案されているが、東北地方太平洋沖地震の発生に至るまで、観測データが少なく、その推計手法が確立されている状況とは言えない。
- 今後、大都市圏では、数多くの高層ビルや超高層ビルが建設されるものと考えられるが、発生頻度の極めて低い最大クラスの地震を想定した場合、長周期地震動をどのように推計し、それを建築物の設計手法にどのように反映すべきか、また、高層階での揺れによる家具等の挙動が人に与える被害を想定した上で、具体的にどのように対応すべきかといった課題について、引き続き、基礎研究を進める必要がある。
- 長周期地震動によってどのような被害が発生するか、わかりやすく国民に解説するとともに、長周期地震動を観測した場合、その観測結果をいち早く発表できるようにする必要がある。また、長周期地震動の予報に向けた研究開発を進めることが必要である。

と指摘した。

これを受けて、「南海トラフの巨大地震モデル検討会」において、長周期地震動の検討が引き続き行われ、2015年12月17日に「南海トラフ沿いの巨大地震による長周期地震動に関する報告」がまとめられた。さらに、関東地震である相模トラフの地震についても、2016年から「相模トラフ沿いの巨大地震等による長周期地震動検討会」において検討が進められている。

国土交通省は、内閣府の発表の翌日2015年12月18日に、「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案について」を公表し、意見募集を行った。これは、2010年12月に出された「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案」の改訂版とも言えるものである。地域ごとに長周期地震動が卓越する周期帯域で告示スペクトルを増幅させたものであり、場所によっては、これまでの倍程度の揺れを考慮することになった(図4)。その後、2016年6月に「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」が示され、「2017年4月1日以降に申請する性能評価に基づき超高層建築物等を新築する際の大臣認定の運用を強化する」との方針が示された。

また、気象庁は、2011年に「長周期地震動に関する情報のあり方検討会」、2012年以降は「長周期地震動に関する情報検討会」において、長周期地震動に関する情報提供のあり方を検討し、2013年11月から試行的に「長周期地震動に関する観測情報(試行)」が発表されるようになった。本年3月から本運用が始まっている。

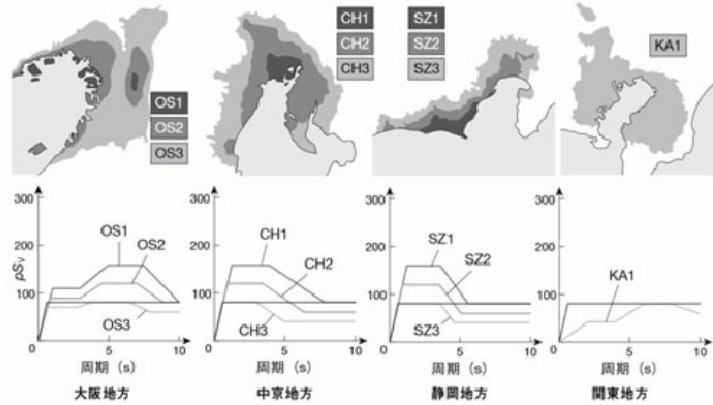


図4 南海トラフ地震を想定した超高層建築物等の長周期地震対策の対象区域と擬似速度応答スペクトル

7. 近年の被害地震と長周期地震動

2016年熊本地震では、西原村などで大きな残留変位を伴う長周期パルスが観測された。フリングステップと言われる断層ずれに伴う大変位である。こういった揺れは、長周期構造物にとっては足元をすくわれるような揺れであり、建築的対応が難しい。特に免震建物では、免震層の変形が過大となり擁壁と衝突する可能性があるため、問題となる。高層建物の場合には、建物高さ全体でこの変位を吸収できるので、西原村役場の変位応答であれば、過大な層間変形角にはならないと思われる。ただし、1891年濃尾地震で現れた8mにも及ぶあぜ道の変位や、1999年台湾集集地震での石岡ダムでの10mを超える断層変位を考えると、活断層直近の高層建物では、今後検討が必要であろう。

また、2018年大阪府北部の地震におけるエレベーターの問題も気掛かりである。マグニチュード6.1、最大震度6弱の地震で、6万3千台ものエレベーターが緊急停止し、346台のエレベーターで閉じ込めがあった。閉じ込めがあったエレベーターの多くは、地震時管制機能付きのエレベーターだった。直下の地震だったため、P-S時間が短く、P波検知後、最寄り階に着床する前に強い揺れに見舞われたことが原因である⁷⁾。16万台を超えるエレベーターがある東京都にとって、首都直下地震での閉じ込めの問題は深刻である。中央防災会議の作業部会による被害想定結果では、最悪、緊急停止が30,100台、閉じ込めが17,400人と予測されている。緊急停止のトリガーレベルの見直しなどが、今後必要になると思われる。

8. 南海トラフ地震臨時情報と今後の長周期地震動対策

一昨年、中央防災会議の作業部会で、南海トラフ地震については、確度の高い地震の発生予測は困難との見解が示され、2017年11月より、南海トラフ沿いで異常な現象が観測された場合には、南海トラフ地震に関連する情報（臨時）が発表されることになった。本年5月31日には、名称が南海トラフ地震臨時情報に改められた。南海トラフ沿いの震源域の片側で地震が起きる「半割れ」の場合には、南海トラフ地震臨時情報（巨大地震警戒）が発表される。この場合、自治体は、津波からの避難の猶予時間が足りない地域を事前避難対象地域として予め指定し、1週間の避難を求める。一方で、いつ発生するか分からない地震に対して、できる限り社会機能を維持することも求められている。

長周期地震動に関わる課題としては、高層ビルのエレベーターや、石油タンクのスロッシングなどの問題が考えられる。高層ビルが林立する東京の場合、高層ビルの利用ができなくなると首都機能を失うことになる。高層ビルでは、途中階を飛ばす高速エレベーターが使われている。震源から離れた東京では、短周期は減衰しやすく、P波検知による地震時管制機能には限界もある。気象庁で開発が進められている長周期地震動を勘案した緊急地震速報の早期導入が望まれる。また、石油タンクのスロッシングの問題については、臨時情報発表時には、液位のコントロールなどが必要になると思われる。

8. おわりに

長周期地震動の対策技術の開発が必要な中、近年、高減衰積層ゴムやオイルダンパーなどでデータ不正の問題が発生した。また、古い強震記録では、長周期成分はノイズと考えられていたようであり、初期の高層ビルの設計では、長周期地震動に対する配慮は必ずしも十分ではなかったと思われる。高層ビルのように地下逸散減衰が期待できない長周期低減衰構造物は、一旦共振すると、繰り返す地震動により応答が大きく育つ。三大平野のような堆積盆地では、長周期地震動の卓越周期が震源の方位によって変動することも指摘されている。南海トラフ地震のような巨大地震を前に、幅を持った周期帯に対して共振を回避し、減衰を付与することを旨としたい。また、活断層直近の免震建物では、大変位を伴うパルス的な揺れに対し、免震装置の十分な変形能力や免震クリアランスの設定が必要である。これらのためにも、長周期地震動に対する予測精度の向上と構造物の対策が望まれる。

参考文献

- 1) 寺田寅彦：震災日記より、1935年（青空文庫、https://www.aozora.gr.jp/cards/000042/files/4671_13525.html）
- 2) 前林和彦、横田治彦、柴慶治、辻栄一、浮田高志、稲田泰夫：1995年兵庫県南部地震における超高層建物の応答、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B-2、1997年、pp. 713-714.
- 3) 長田勝幸、川田公裕：免震建物の兵庫県南部地震による効果：郵政省 WESTビル、日本建築学会学術講演梗概集、Vol.B-2、1995年、pp. 631-632.
- 4) 建設省建築研究所、日本建築センター：設計用入力地震動研究委員会平成3年度成果報告書 設計用入力地震動作成手法技術指針（案）本文解説編、1992年。
- 5) 大阪府総務部：咲洲庁舎の安全性等についての検証結果、2011年。
- 6) 高橋武宏、福和伸夫：2011年東北地方太平洋沖地震における戸建免震住宅の免震層変形と足柄平野の地盤震動特性との関係、日本建築学会構造系論文集、第78巻、第694号、2013年、pp.2123-2132.
- 7) 国土交通省住宅局建築指導課：大阪府北部を震源とする地震によるエレベーターの被害状況の分析と対策の実施状況について、2019年