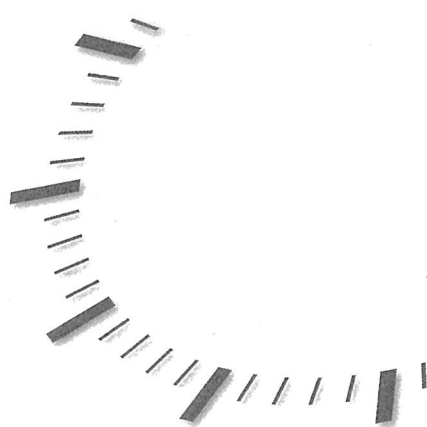


# 長周期地震動



ふくわ のぶお  
福和 伸夫

名古屋大学 教授

## 1. はじめに

長周期地震動が話題になって久しい。しかし、その問題の所在は意外と知られていない。そこで、本論では、①長周期問題が注目されるようになったのは何故か、②長周期地震動はどんな時に生じやすいのか、③長周期地震動が問題となるのはどんな建物か、④長周期地震動に如何に備えるべきか、などについて解説を試みる。最初に、長周期地震動がクローズアップされてきた経緯を理解するために、筆者と長周期地震動との関わりについて振り返ってみる。

## 2. 過去30年の長周期地震動問題

筆者が長周期の揺れを体感したのは、1983年5月26日の日本海中部地震 (M7.7)、2000年10月6日の鳥取県西部地震 (M7.3)、2004年9月5日の東海道沖を震源とする地震 (M7.4)、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震 (M9.0) の4度である。その時々で、長周期地震動の感じ方が変化してきており、過去30年間を振り返ることによって、この問題がどのようにして顕在化してきたかの背景を探ることができる。

### (1) 日本海中部地震 (1983年)

はじめて長周期の揺れを体感した日本海中部地震のとき、私は、大手建設会社の研究室に所属しており、日比谷公園周辺に建つ28階建ての高層ビ

ルの27階に勤務していた。お昼時の地震で、徐々に揺れ始め、ブラインドが大きく揺れ続けた。テレビで青森沖の地震と知り、震源距離が500kmもあるのに東京のビルが大きく揺れることにひどく驚いた。

当時は、新宿副都心の高層ビルが一通り完成し、日比谷周辺にも高層ビルが建ち始めた時期である。この時期、地震の揺れは短周期が卓越するので、地震国日本でも長周期で揺れやすい高層ビルは「柳に風」のように振る舞い安全に設計できる、という考えが主流だった。当時の耐震設計では、エルセントロ地震動 (1940年インペリアルバレイ地震)、タフト地震動 (1952年カーンカウンティ地震)、八戸地震動 (1968年十勝沖地震)、東京101地震動 (1956年千葉県北西部の地震) などの観測地震波が使われていた。これらの地震動は、継続時間が長くなく、長周期の揺れの成分も余り多くない。このため、建築構造設計者の多くは、地震動はガタガタと揺れる短周期の揺れが卓越すると思っており、長周期地震動への懸念は余り感じていなかった。この結果、20世紀に作られた高層建物は、これら4つの観測地震波のスペクトルの谷間である2秒の固有周期をもったものが多いようだ。

恥ずかしながら筆者も、短周期の揺れが重要となる原子力発電施設の耐震研究に従事していたこともあり、長周期の揺れへの関心が低かった。ただし、地盤震動研究者を中心に関東平野の8秒前後の揺れについての指摘がされていたのは知って

いたので、スペクトルの谷間の周期を狙う高層建物の耐震設計のあり様には疑問を感じ、設計者と何度か議論した記憶がある。私は原子力発電施設の免震化の検討をしていたにも関わらず、固有周期の長周期化による免震効果については信じて疑っていなかった。1985年には、メキシコ・ミチョアカン地震が発生し、震源から遠く離れたメキシコシティで高層建物が倒壊したが、私自身は不整形地盤での地震動増幅についての分析をするのに留まっており、長周期地震動については無関心だった。今思うと、恥ずかしさを感じる。

## (2) 兵庫県南部地震 (1995年)

長周期地震動への関心を持つようになったのは、1995年兵庫県南部地震がきっかけである。この時期、建物の減衰性能に関心を持っており、高層建物の減衰の小ささが気になっていた。学会の研究会で、大阪市弁天町にある高層ビルで、地震動の後揺れによる共振で強い揺れが観測されたことを聞き、長周期地震動による共振問題を知った。また、震災の帯の生成にも深部地盤構造が大きく関わっていた。

一方、この時期、免震建物の構造評定に携わるようになり、多くの設計者が長周期の地盤卓越周期を波浪による脈動と解釈し、地盤周期を軽視していることを目の当たりにした。このことの具合の悪さを感じ、その後、濃尾平野で微動を測りまくり、深部地盤と長周期地震動の関係を明確にした。同時期には、堆積平野地下構造調査や強震観測網の整備が各地で行われ、それぞれの平野特有の長周期地震動の存在が徐々に明らかとなった。

## (3) 鳥取県西部地震 (2000年)

2000年に、2度目の長周期の揺れを体験した。それは鳥取県西部地震である。当日、名古屋市中心部にある8階建ての建物の最上階で、終日、日本建築学会主催の「建築物の減衰」の講習会をやっていた。お昼過ぎに建物が長周期で大きく揺れた。南海

トラフの地震かと思いテレビに走ったが、震源は鳥取だった。震源から300kmも離れていた。この地震では、震源から600km離れた東京都内の高層ビルで、多くの人が屋外避難した様子がテレビに映し出された。これが、長周期の揺れに本格的に取り組むきっかけとなった。その後、名古屋市内の地盤や建物に地震計を設置し揺れの観測を始めた。中には、地盤と共振している建物もあり、共振の怖さを実感した。

この時期、2002年から中央防災会議東海地震対策専門調査会や愛知県東海地震・東南海地震等被害予測調査検討委員会に加わり、理学系の研究者から長周期地震動問題が提起された。また、2003年には十勝沖地震で苫小牧の石油タンクのスロッシング火災などが発生した。改めて、長周期地震動対策の必要性を強く感じ、その後、メディア等を介して長周期地震動の問題提起をしつつ、長周期地震動を考慮した設計入力地震動を策定し始めた。名古屋市三の丸地区の官庁建物の免震改修用に三の丸地震動を策定したのもこの時期である。「ぶるる」と称する振動実験教材や、長周期地震動の再現振動台などを開発して長周期地震動対策の重要性を訴え始めた。

## (4) 東海道沖を震源とする地震 (2004年)

2004年に、3度目の長周期の揺れを体感した。深夜に発生した東海道沖を震源とする地震である。昼間ではなかったので高層建物に居たのはホテルの宿泊客かマンション住民だけだった。それでも、地震後、高層建物内にいた人たちの揺れの証言を聞き、対策の必要性を再認識した。

こういった中、文部科学省の首都直下地震防災・減災特別プロジェクト「都市施設の耐震性評価・機能確保に関する研究」<sup>1)</sup>に参画する機会を得た。このプロジェクトで、世界最大の振動台・Eディフェンスで実大高層建物振動実験を実施し、柱梁接合部が破断する現場を目撃した。当時は、長周期地震動問題については楽観論と悲観論があった。

楽観論は各種構造の研究者、悲観論は振動研究者だった。Eディフェンス実験をきっかけに、長周期地震動対策の重要性が共通の認識となった。東北地方太平洋沖地震（東日本大震災）の1週間前には、日本建築学会から、高層建物の長周期地震動問題について、「長周期地震動対策に関する日本建築学会の取り組み」と題した記者発表が行われた<sup>2)</sup>。そして、1週間後、東北地方太平洋沖地震が発生し4度目の揺れを体感することになった

#### (5) 東北地方太平洋沖地震（2011年）

私は、東京・青山にある23階建ての高層ビルの15階で、日本建築センター主催の一日講習会を行っていた。午前には南海トラフ巨大地震による長周期地震動について、午後に長周期地震動に対する高層ビルの問題点などについて説明していた。そのときかすかに揺れ始めた。徐々に揺れが増大する中、インターネットで震源情報などを確認し、宮城県沖地震と勘違いし、「強い揺れにはならなので、共振応答を体感しよう」と解説してしまった。

しかし、実際には、振幅がどんどん大きくなり揺れに翻弄された。周辺の高層ビルの揺れもひどかった。その時の様子は複数の受講者が録画をしていた。中には、スマートフォンの地震計アプリで揺れを記録した人もいる。当日は、高層ビルで帰宅困難者となり、大都市の災害脆弱度を実感することになった。

震災後、取り組んだのが大阪府咲洲庁舎と戸建免震住宅の問題である。前者は、建築研究所が設置した地震計で、片振幅137cmの揺れが記録された<sup>3)</sup>。震源から770km離れた場所での大振幅応答の原因は、地盤の卓越周期と建物の固有周期とが近接したことによる共振であった。筆者も検討委員会のメンバーとして、問題の原因分析と今後の対策を検討することになった<sup>4)</sup>。戸建免震住宅については、震源から離れた小田原市内で大きく揺れた住宅が存在することを知り、その原因を検討した。やはり、ここでも地盤と免震住宅との共振

が疑われた。現在、共振による応答増幅を抑制する技術開発が行われ、対策されつつある。

### 3. 長周期地震動が発生しやすい条件と特徴

正確には長周期・長時間地震動と呼んだ方が誤解は少ないが、ここでは長周期地震動と略称する。長周期地震動は、長い周期の揺れの成分を多く含み、長い時間揺れ続ける地震動を意味しており、規模の大きな地震の時に盆地状の大規模堆積平野で生成されやすい。

規模の大きな地震は、周期の長い地震波を長時間にわたって放出する。長周期の揺れは波長が長く、揺れが衰えにくく、遠くまで伝わる。そして、大都市が立地する大規模な堆積平野は、たらいのような盆地構造をしており、平野固有の長周期の揺れを増幅させ、盆地内に地震波を留め、揺れの継続時間を伸長させる。現在、発生が懸念されている南海トラフ巨大地震は、大都市の高層建物を直撃するため、この長周期地震動の問題がクローズアップされている。

#### (1) 地震の規模

地震は、岩盤の破壊現象である。地震の規模が大きくなると震源域が広がり、地震時のすべり量も大きくなる。マグニチュード(M) 8クラスの地震の場合には、震源域の大きさは100~150km程度、平均的なすべり量は4~5m程度である。マグニチュードが増減すると、震源域の大きさやすべり量も増減する。一般に、マグニチュードが1大きくなると地震エネルギーは32倍になり、震源域の面積は約10倍に、震源域の大きさ(幅・長さ)やすべり量は約3倍になる。断層の破壊は同時に起きるわけではなく、秒速2.5~3kmのスピードで破壊が進む。そしてそれぞれの場所では、秒速1m位の速度でずれ動く。

このため、M 8クラスの地震では、それぞれの

場所で断層がすべるのに5秒程度かかり、断層全体が破壊するのに30～60秒程度かかる。M9クラスだと、これらが3倍程度に、M7クラスだと1/3程度になる。これは、地震の規模が大きいほど揺れの周期が長くなり長い時間揺れが続くことを意味し、東北地方太平洋沖地震と兵庫県南部地震の揺れの継続時間が、それぞれ3分くらいと10秒くらいだったことに符合する。

一般に、規模が大きな地震では、長周期の揺れが大きく増大し、高層建物などに大きな影響を及ぼすが、短周期の揺れは長周期ほど増大しない。このため、中低層建物への影響は相対的に小さい。

## (2) 地震波の伝播

地震波は、震源から四方八方に広がる。S波やP波は震源から球面状に広がるので、地震波の大きさは距離とともに小さくなる。球面状に広がる場合には、球面の面積が距離の二乗に比例するためS波やP波は震源からの距離に逆比例で減衰する。また、長周期の揺れに比べて短周期の揺れは波長が短く減衰しやすいので、結果として、震源から離れた場所では長周期の揺れが目立つ。さらに、震源から離れた場所では、震源から様々な経路を通過して揺れが伝わるため、揺れの継続時間が長くなる。この結果、長周期・長時間地震動が生成される。

このことに加え、西日本では、南海トラフ沿いに存在する厚い堆積物（付加体）が長周期地震動を遠くまで伝える役割をしている。付加体とは、海のプレートが陸のプレートの下に沈み込むときに、海底に溜まったゴミを引っ掻き出すことによって陸のプレートの先端に溜まった軟らかい堆積物である。

## (3) 堆積盆地内での増幅と揺れの伸長

地盤には揺れやすい周期がある。たとえば、プリンと羊羹をお皿の上に並べて、皿を左右に揺すってみると、プリンの方が大きく揺れ、特定の周期で揺ると特に強く揺れる。この周期はプリンが柔らかくかつ厚いほど長くなる。同じ大きさのババロア・

プリン・ヨーグルトの揺れの周期を比較してみたり、プリンを上から順に食べて、プリンの厚さを減らしてみたりすると、周期の変化が分かる。これが、堆積地盤での揺れの増幅と卓越周期を表している。

一方、容器の中にある状態でプリンを揺すってみると、容器の中心位置が大きく揺れ、一旦揺れると長く続く。たらいを揺ると、たらいの中の水が揺れ続けるのと同じである。これは、容器から外に波のエネルギーが逃げていきにくいからである。

これと同じことが、大規模な堆積平野でも生じている。関東平野、濃尾平野、大阪平野などの堆積平野は、周辺を山地に囲まれ、山地から流れ込む河川の堆積物などが厚く堆積している。これは、容器の中のプリンと同じ状態である。各平野は、堆積層の厚さに応じた揺れやすい周期を持っていて、揺れが長い間継続することになる。一般に、関東平野では7～10秒、濃尾平野では3～4秒、大阪平野では4～6秒で揺れやすいと言われている。

以上をまとめると、南海トラフ巨大地震のような大規模な地震では、長周期の揺れが震源から長時間たっぷり放出され、それが、付加体を介して遠くまで伝わり、さらに大都市が立地する堆積平野では長周期の揺れが振幅増大し、しかも長時間続くということになる。兵庫県南部地震のような直下の活断層によるM7クラスのパルス性の揺れとは大きく異なる点である。

## 4. 長周期で揺れやすい建物

地盤と同じように、建物にも揺れやすい周期がある。お祭りのときに屋台で売っている水風船を思い出してほしい。水風船は、ある周期で手を上下するととてもよく揺れる。風船の中の水が重いほど、また、ゴムのひもが長いほど揺れやすい周期は長くなる。そして、何度も手を上下すると、時間と共に揺れの大きさがどんどん大きくなる。これが、共振現象である。

水風船は上下の揺れなので、地震のような水平の

揺れのイメージがしにくいかもしれない。であれば、学生時代に下敷きをうちわ代わりに使ったことを思い出してほしい。ある周期で手を扇ぐと効率よく風を起こすことができた。ゆったりした気分ときは、下敷きを長く持ってゆっくりした周期で揺すり、イライラしているときは、下敷きを短く持って小刻みな周期で揺すったと思う。

これと同じように、建物も高層化すると、建物周期が長くなる。一般に建物の周期は、建物階数に0.1を乗じた程度の周期(秒)だと言われている。30階建ての建物は、周期3秒くらいで揺れやすい、ということである。

もう一つ大事な点は、建物が高層になるほど、揺れが収まりにくいという特徴である。これを、減衰が小さい、と言う。減衰が小さいと、繰り返し揺れ続ける地震動が作用すると、揺れが収まらないうちに次の揺れを受けるために、応答がどんどん増大する。地面の揺れに比べて何十倍にも揺れが大きくなることもある。

前述したように、関東平野では7~10秒、濃尾平野では3~4秒、大阪平野では4~6秒で揺れやすいということは、それぞれの平野に共振しやすい建物の高さがあるということである。大阪府咲洲庁舎の場合には、建物と地盤の揺れやすい周期が何れも6秒強であったために、他の建物と比べ、この建物だけがはるかに強く揺れた。震災後、揺れを抑える方法について検討され、現在、応急措置として、建物の揺れを減少させる制振装置の設置工事が行われている。

一方、建物の周期を積極的に長周期化して揺れを抑えようとするのが免震である。基本的な考え方は、地震の時の揺れの周期よりも建物の周期を長周期化して揺れにくくしようとするもので、短周期の揺れに対しては大変効果的であるが、長周期の揺れは苦手ということになる。究極の免震は宙に浮かぶことであるが、一般の免震構造では、建物の下に、積層ゴムやダンパーなどの免震装置を設置している。積層ゴムは、上下には固く水平には軟らかい

装置で、これによって建物の重さを支えつつ建物周期を長周期化する。また、ダンパーは揺れを早く減衰させるための装置である。

また、最近、制振構造という言葉も良く耳にする。これは高層建物でよく使われるもので、建物を揺れにくくする装置(ダンパーなど)を建物に付加することによって建物の減衰を増やし、揺れを減少させようとするものである。最近の高層建物では制振装置を入れることが一般的になっている。

以上をまとめると、長周期地震動への対策は、地震動の卓越周期から建物の固有周期を隔離し、建物の減衰を十分にとる、ということに尽きる。震源から放出される地震波の周期を特定することは困難だが、建物敷地の地盤の周期を知ることは難しくない。少なくとも建物と地盤の周期を一致させないようにすることが基本である。しかし、初期の高層建物や免震建物では、この種のチェックが十分でなかった。このため、共振の心配のある建物も存在していると思われる。既存の建物について敷地を変えることはできないので、建物の周期を変えるか、制振装置などを付加して減衰を増やすしかない。ただし、制振装置を設置しても揺れは3割程度しか減らない。より抜本的な解決策は周期を変える方策であり、建物の高さを変えて短周期化する(減築)か、建物内に免震装置を設置して周期を人為的に変えることが考えられる。

## 5. 個人でできる長周期地震動対策

高層建物は、交通至便なところに建設され、日ごろは大変便利である。しかし、地震時によく揺れることの覚悟は必要であり、高層建物の利用作法を身に付けておく必要がある。

強く揺れればエレベータは停止し、上下の移動が困難になる。非常用エレベータの設置や、エレベータに閉じ込められた時に救出できる技術者の養成などが望まれる。また、停電すれば、エレベータの停止に加え、ライフラインも途絶し、事業継

続や生活維持が困難となり、高層難民化する。上階で怪我をしても、担架で階段を運ぶことは難しい。上層階の家具・什器の固定は必須であり、食糧・水・携帯トイレのほか、身体が不自由な方々を椅子に座ったまま階段を降ろすことができるイーバックチェアの準備などが必要である。

また、災害対応部署など、事業継続上重要な設備は下階に置くのが基本である。災害対応部署の人間は、長周期の揺れを事前に体感しておくことも災害時対応のためには有用である。過去の地震で、高層階の揺れがトラウマになった人も多いと聞く。できれば、役員室も下階が望ましい。自治体の首長の居室が一般に低層階にあることの理由が納得できる。

災害後には、建物の継続使用の判断が必要となるが、現地調査に必要となる高度技術者の数は不足している。このため、建物を継続使用できるかどうかを判断するための地震計の設置は有用な方策だと思われる。

なお、高層建物の場合、揺れが育つには時間がかかるので、緊急地震速報や長周期地震動に関する情報が役に立つ。緊急地震速報は契約をすれば、地震の震源位置や規模、地震動到達時間、予想される揺れの強さなどの情報を得ることができる。地震の規模が大きければ長周期の揺れが懸念されるので、猶予時間に応じて、種々の対応行動をとることができる。

また、気象庁は、2013年3月から長周期地震動情報の提供を始めた。テレビなどで発表されるプッシュ型の情報ではなく、ホームページを介したプル型の情報であるが、長周期の揺れが強い地震かどうか、周期別の長周期地震動階級によって公表される。高層建物の防災センターは1階や地下階に置かれる場合が多く、高層階の揺れに気づかない場合も多いので、この情報は重要である。また、高層階に居る人にとっては、地表の揺れである震度に比べ、より体感に近い揺れを知ることになるので、ぜひ活用したい。

## 6. おわりに

高層建物は、現代の科学技術の象徴である。しかし、科学技術には限界もある。また、科学技術は社会の安全のためだけに使うのではなく、コスト削減のためにも使ってきた。高層建物の長周期地震動問題はパンドラの箱に例えられるが、巨大地震は必ず発生し、確実に長周期地震動が襲ってくる。

高層建物を作り始めた時期には、地震観測体制が十分でなく、また、巨大地震も発生していなかったため、長周期地震動の地震観測記録は存在しておらず、長周期地震動の発生を予見する研究も殆ど無かった。このため、この問題については、誰にも責任は無い。しかし、長周期地震動の問題に気付き始めた現在、早急な改善が必要である。高層建物は基本的に民間の建物であり、既存不適格建物への法の不遡及の原則もあり、解決が容易ではない課題である。しかし、南海トラフ巨大地震が発生したときに後悔しないために、ぜひ、前向きに対策をしていきたい。

私たちも、高層建物の問題を分かりやすく伝え、認識を共有化し、皆で考え、できることから対策を始めるため、高層建物内で起きることをシナリオ化した「高居家のものがたり」という絵本を作ってみた。近々電子出版する予定であるが、私どもの研究室のホームページでも閲覧できる。ぜひご覧頂きたい<sup>5)</sup>。

### 【参考 URL 等】

- 1) <http://www.bosai.go.jp/hyogo/syuto-pj/index.html>
- 2) <http://www.aij.or.jp/jpn/databox/2011/20110309-1.pdf>
- 3) <http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/saseibi/bousaitai.html>
- 4) <http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/saseibi/senmonkakaigi.html>
- 5) 倉田和己、新井伸夫、福和伸夫：南海トラフにおける巨大地震をテーマとした市民目線の災害シナリオと啓発アプリケーションの開発、日本災害情報学会、pp.248-251、2012.10、  
<http://www.sharaku.nuac.nagoya-u.ac.jp/escape/>