

長周期地震動と高層マンション

名古屋大学 福和伸夫

1. はじめに

戦後、我が国は、工業化と共に人口が大都市に集中したため、都市圏は軟弱な沖積低地に広がり、ライフラインや高速交通機関に頼りきった高機能・高密度な都市社会を形成してきた。都市空間を効率的に利用するため、都心は集積度を上げ、高層ビルを林立させた。高層ビルは、初期には、鉄骨造で作られ、用途も事務所やホテルなどに限られていたが、最近では住民の都心回帰のため、鉄筋コンクリート造の高層住宅が多く建設されるようになってきた（写真 1、図 1）。



写真 1

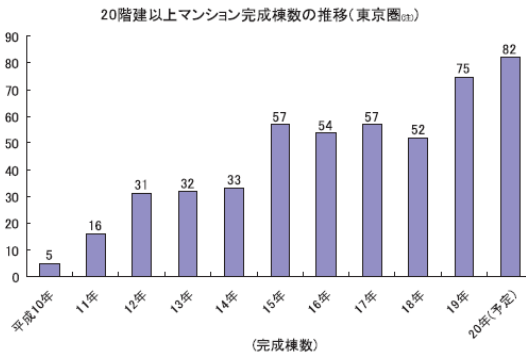


図 1 東京都の高層マンションの完成棟数
(平成 21 年防災白書より)

高機能な都市では、社会を構成する多くの構成要素が相互に依存し、個々の被害が連鎖的に波及して、社会の対応力を超える被害を引き起こす。特に、超高層ビルは、ライフラインが途絶したら継続的な使用が困難となる。このため、室内の安全対策や非常時のための備蓄など、日頃の備えが重要となる。

そもそも、高層ビルが建設され始めた時代には、地震の揺れは短周期の揺れが卓越すると考えられ、

長周期で揺れる高層ビルは地震の揺れを柳に風と受け流すと説明されていた。しかし、近年、地震観測記録の分析や、強震動に関する地震学・地震工学研究の結果、巨大地震では大規模堆積平野で長周期の揺れが大きく励起されることが否定できなくなり、長周期地震動に対する高層ビルの安全性についての検討が重要度を増してきた。

東海・東南海・南海地震のような巨大地震では長周期の揺れがたっぷり放出される。我が国の三大都市はいずれも大規模な堆積平野に立地し、各平野固有の長周期の揺れが増幅されやすい。ちなみに、東京は 7~8 秒、大阪は 4~5 秒、名古屋は 3~4 秒で揺れやすい。周辺が山に囲まれ盆地構造をしているこれらの堆積平野では、平野に入った波が外に逃げにくいいため長い時間揺れが継続する。このような長周期・長継続時間の地震動に苦手なのが高層ビルである。超高層ビルは、周期数秒で揺れやすく、減衰が小さいため揺れが収まりにくい。万一、高層ビルの固有周期に近い周期の地震動が長時間作用すると、ビルが共振し大きな揺れになる。

共振とは、揺れが収まる前に、次の揺れが次々と積み重なって、揺れが時間と共に増幅する現象である。このため、共振するには長い時間地盤が揺れ続ける必要がある。兵庫県南部地震のときの神戸市内での揺れのような短い時間のパルス的な揺れに対してはこのような共振現象は生じない。共振時の揺れを減らすために減衰装置を設置するのが制震構造であり、最近の鉄骨造の高層ビルでは制震構造が一般的になってきた。

一般に、高層ビルの耐震設計では最大速度 50cm/秒 (s) 程度の地震動に対して終局強度設計を行い、各層の変形角を 1/100 以下に収めるようにしている。終局強度設計とは言っても、耐震性能を使い切ることとはせず、ある程度の余裕を持った設計をする場合が多い。建物の揺れやすい固有周期はおおむね階数×0.1 秒なので、階高 5m で 40 階建だとすると、設計上は周期 4 秒程度で往復 4m の揺れを考えることになる。ビルの 40 階で、外の風景を見ながら 4m の距離を往復 4 秒でダッシュしてみると、その時の様子を実感できる。

ちなみに、揺れの速度は、変位に $(2\pi/\text{周期})$ を乗じた値に、加速度はさらに $(2\pi/\text{周期})$ を乗じた

値になる。建物階数を n とすると変位は、 $5n$ cm、速度は $100\pi \approx 300$ cm/s、加速度は $2000\pi^2/n \approx 20000/n$ cm/s² 程度になる。40 階建てでは 200cm、300cm/s、500cm/s²、10 階建てでは 50cm、300cm/s、2000cm/s² となり、高層ビルでは変位が、中低層ビルでは加速度が大きくなる。

昨年 3 月に、初期の鉄骨造 20 階建て高層ビルを想定して、ビルの下層 4 階を再現した実大振動台実験を E-Defense で実施した (写真 2)。既往の設計用入力地震動ではほぼ無損傷だったが、東海・東南海地震を想定した揺れでは柱・梁の溶接部が破断した。



写真 2

超高層ビルは、電気やエレベータを始めとする設備が稼働しなければ機能を喪失する。強い揺れでトラウマになる人もいるかもしれない。そこで、本稿では、高層マンションに住む住民個人々の防災対策を誘発することを目的として、大地震時の高層マンションでの様相をシナリオ的に再現してみる。ただし、下記に示す内容は、いずれも、仮想のものであることを断っておく。

2. 湾岸の超高層マンションに住む 4 人家族

ここでは、下記のような条件を設定している。

- ・ 家族構成：サラリーマン (東京駅前の高層ビルに勤める技術系の部長)・専業主婦・高校生の息子と中学生の娘の 4 人家族
- ・ 住まい：都心のウォーターフロントに位置する 40 階建て高層マンションの 27 階
- ・ 日時：12 月 7 日 (金) 朝 7 時 30 分
- ・ 想定地震：東海地震・東南海地震・南海地震が連動、震源は紀伊半島沖

朝 7 時、夫は朝食中、妻は台所で炊事、高校生の息子は便所、中学生の娘はベッドの中にいた。

20XX 年 12 月 7 日 7 時 30 分 緊急地震速報

緊急地震速報の報知音がテレビから聞こえた。

NHK テレビを見ながら食事をしていた夫は、緊急地震速報のテロップに見入った。しかし、震源は紀伊半島沖、緊急地震速報の警報地域には東京は含まれていなかった。このため、余り大きな地震だとは思わず、特段の退避行動もとらずにテレビを見続けた。妻はそのまま台所にいた。

*M8 を超える巨大地震では推定地震規模が徐々に育つ傾向があるため、緊急地震速報は、当初は M7 程度の地震と過小評価した。震源は潮岬沖のため、震源から離れている東京では震度 3、静岡は震度 4 との予測になってしまった。このため、緊急地震速報に連動したエレベータの非常停止機能は作動しなかった。

20XX 年 12 月 7 日 7 時 32 分 揺れが到達

40 秒ほど経ってガタガタとした上下動を少し感じる。強い揺れではない。2 分ほど経って、徐々に水平に揺れ始めた。最初は少しガタガタと揺れたが、そのうち、徐々にゆったりとした揺れになる。最初はあまり大きな揺れではなかったが、だんだん揺れ幅が大きくなってきて、60 秒後には前後左右に往復 2m 程度の強い揺れとなった。ぐわんぐわんと、楕円を描くように床が動く。時折、窓から空が見えたり地面が見えたりして、床が傾きながら振り飛ばされそうになる。

揺れに加え、物凄い音が鳴り響く。何かが壊れるような音がし (コンクリートのひび割れの音)、物がぶつかる音、家具が倒れる音、ガラスが割れる音など凄まじい音の中で翻弄される。

なかなか揺れは収まらず何度も大きく揺れる。ある時は左右のゆれが大きく、ある時は前後の揺れが大きい。揺れは 10 分以上も続き恐怖を感じる。その後も、揺れがおさまったかと思うと、余震による揺れが何度も続き、気分が悪くなった。いつの間にか揺れ続けているのに慣れてしまって、揺れているのが当たり前のような感覚になる。

*震源域が 700km にも及ぶ巨大地震のため、潮岬沖から開始した破壊は東西に 2 分以上かけて破壊し続けた。関東平野では、長周期の揺れが増幅され、10 分以上揺れが続いた。高層マンションは、時間とともに揺れ幅を大きくした。高層建物は低減衰のため、共振振幅に育つのに時間がかかる。そして、水平 2 方向の周期が近接し減衰が小さいので、うなり現象が生じて、楕円の軌道を描きつつ、前後の揺れが大きくなったり左右の揺れが大きくなったりした。一端揺れ始めた揺れは、なかなか収まらない。上層部では外の風景が上下する。本震の後、M7 クラスの余震が続くため、何度も揺れ続ける。

20XX 年 12 月 7 日 7 時 33 分 室内の様子

室内の家具は移動しながら転倒した。フローリングの上は滑りやすく食卓は前後左右に大きく移動し

た。夫は机の下に潜っていたが余りの移動量で机の下から逃げ出した。その後、机が掃き出し窓にぶつかって、ガラスが粉々になった。転倒した家具は、床の上を滑り壁に何度もぶつかった。

作りつけの食器戸棚からは観音開きの扉が開いて、中の食器が一気に飛びだし、割れた食器が床に散乱した。沸騰したヤカンが落ち、電子レンジや電気ポットも横に飛び、冷蔵庫が倒れた。冷蔵庫の中のものが散乱し、周辺が水浸しになり、ガラスが散乱した。妻は軽いやけどと切り傷を負った。

リビングルームのピアノはものすごい勢いで前後左右に動き、ALC版でできた壁を割り、その後、ものすごい勢いで倒れた。キャスター付きのテレビ台の上に乗った大画面テレビは、テレビ台ごと床を走りまわり、その後テレビだけが飛んだ。デスクトップのパソコンも吹っ飛んだ。

便所にいた息子は両腕で壁を押さえて揺れをこらえた。地震後はドアが開かなくなったが、思いっきり体でドアにぶつかって何とか開けることができた。ドアを開けると、廊下は、浴槽からあふれた水で水浸しになっていた。

子供部屋で寝ていた娘は、ベッドごと前後左右に移動し、壁にぶつかった。石膏ボードの壁に大きな穴ができた。転倒防止をしていたおかげで本棚は倒れなかったが、本棚から本がベッドの上に散乱した。娘はとっさに布団を被って逃れた。

揺れが収まった後、家族の安否を確認した。皆、多少怪我をしているが、大丈夫だった。次に室内を点検した。玄関に行くと、靴箱から靴が飛び出していた。また、玄関のドアがこすれて開きにくくなっていたが、力を入れると何とか開いた。廊下にでると、あちこちにコンクリートの破片が落ちている。エレベータは止まっている。隣の家からも人が飛び出してきた。

室内は、いろいろなものが散乱し、めちゃくちゃになってはいるが、作りつけの家具が多かったおかげで、片付ければ何とか生活できるように感じた。しかし、停電していて、水道もチョロチョロとしか出ない。

20XX年12月7日8時 情報収集

どんな地震だったのかを確認しようとするが、停電でテレビはつかない。夫は、思いだして、携帯のワンセグで情報を聞きはじめた。夫人はリビングボードの中から携帯ラジオを取り出した。テレビ・ラジオから、東海地震・東南海地震・南海地震が連動したらしいことを知る。震源は紀伊半島沖の熊野灘

のようだ。東海地震も連動したらしいが、東海地震の注意情報や警戒宣言は出なかった。どのチャンネルも津波への警戒を訴えている。テレビには尾鷲港の定点カメラのビデオ映像や水没した高知市の映像が繰り返し流れている。テレビでは画面の周辺にL字型のテロップが流れていて、各地の震度や、津波への警戒情報が流れている。恐ろしい揺れを体感したのにもかかわらず、震度速報には静岡・愛知・三重・和歌山・徳島・高知の情報ばかりが出され、関東地区の情報はほとんど流されていない。どうも東京の震度は4程度だったようだ。自分が経験した揺れの感覚との違いに驚く。

**がたがたという短周期の揺れは減衰しやすく、ゆさゆさという長周期の揺れが遠くまで伝わる。また、関東平野は軟らかい堆積地盤が厚く堆積しているので、長周期の揺れを大きく増幅しやすい。このため、東海・東南海・南海地震の東京での揺れは、長周期の揺れが多く含まれることになる。この揺れが苦手なのが、減衰が小さくて長周期で揺れやすい高層建物である。このマンションでは、地面の揺れの10倍くらいに揺れが大きく増幅されたため、室内では地盤の震度4に比べ震度が2大きな震度6の揺れを経験することになった。また、揺れの周期が長いので、揺れ幅(変位)が大きくなることになった。*

高校生の息子はノートパソコンで情報を得ようとしているが、家のインターネットにはつながらないようだ。夫はノートパソコンを出し、モバイルブロードバンドに接続した。これはうまくつながった。だが、どのサイトにも情報が上がってきていない。被害が広域すぎて、情報収集に手が回っていないようだ。気象庁には震度情報が示されていた。神奈川以西の西日本全体が震度6弱以上で揺れたようだ。夫は会社や親せきの様子が心配になりはじめ、あちこちに携帯で電話するが、つながらない。固定電話は光通信のため停電で使えない。不安が募る。公衆電話しかないと考え、電話連絡はあきらめる。

余震の揺れが来るたびに先ほどの揺れを思い出し恐怖感を感じる。以前に聞いたことのある高層難民という言葉の思い出した。停電、断水では、オール電化の我が家では生活ができない。区役所から配布された防災マップや防災パンフレットを探し出し、避難所を調べる。しばらく、避難所で生活することを覚悟する。まずは階下に降りることを決断した。

非常用持出し袋を探す。中を見ると賞味期限切れのものが多い。当面必要なものをバッグに入れる。そして、ブレーカーを下し階下に降りることにした。

**通電後の電気火災を避けるため避難時にはブレーカーを遮断することが必要となる。*

20XX年12月7日9時 階下における

部屋から外に出て家族で1階まで階段で下りる。他の住民も同じように階段で下りている。

途中、上階で、家具の下敷きになって骨折して動けない人が沢山いると聞く。エレベータも止まっていて、消防に電話しても連絡が取れず困っているらしい。たとえ救急車がやってくることもできて、消防隊が上階に行って、負傷者を階下に運搬するは大変だろうと感じる。昔、聞いた話では、大災害時には、骨折程度では、病院に行ってもトリアージで手当てしてもらえない可能性が高い。高層階で怪我をすることの怖さを感じる。

*一般に、消防士は人口千人に一人、救急車は人口3~6万人に1台、医師は人口500人に1人(うち外科医は人口5000人に一人)程度である。このため、大規模災害時には、消防・救急・医療など何れも対応が困難になる。20XX年は現在よりもさらに高齢化が進んでおり、災害時要援護者の避難行動は困難を極めると想定される。

途中、階段をうまく下りられなくて困っているお年寄りを見つけ、子供たちがお年寄りを介助して階下に降りる。このマンションは高齢の住民が多いので、色々心配になる。途中階で、エレベータ閉じ込めの住民が居るらしく、エレベータホールに人が集まっている。管理会社に連絡が取れないとのこと。

*大地震時には、管理会社への連絡が滞る。保守員も被災し、道路も渋滞をすることなどから、早期にエレベータの閉じこめを解決したり、エレベータを稼働することが困難になる。このため、地震計で揺れを感知することでエレベータを自動停止するシステムが普及している。ただし、加速度センサーを使っている場合には、長周期の揺れに対しての検知能力が不十分な場合がある。

だんだん、膝が笑ってきた。こんな調子では、エレベータが動かないと、自宅に戻ることはできないと思う。生活必需品を持ってきて良かったと感じる。

1階に着いたので、管理事務所に立ち寄る。防災センターには多くの住民が集まっている。管理会社の人は何の情報もなく右往左往している。管理会社の人間はあちこちの設備会社に電話をしているが、なかなか通じないようである。あまりに設備の種類が多く、点検をしないと作動させることができないようだ。電気や各種設備が復旧するまでは建物に戻るのには難しいと感じた。

玄関ホールから外を見てみると、周辺的一般建物や道路は普段通りで、不思議な思いになる。

テレビを見ていた人から、西日本の発電所が被災して発電が停止していると聞く。中部電力や四国電力の原子力発電所は、緊急停止装置が働いて停止したそうだ。被災地では、断水とガス停止が広域に広がっている。火災もあちこちで発生していて、消防

力が不足し、消火が滞っているとのこと。あちこちの病院も患者が次々を運ばれ、混乱しているようだ。

一方、首都圏は、鉄道・地下鉄の多くが止まっているようだが、大きな被害は報道されていない。ただし、高層事務所ビルが集中する都心や高層マンションが集中する湾岸地域で、大量の人が階下に出てきているらしい。上階に怪我をして取り残されている人も多く、中央官庁や大企業は強い揺れで機能を喪失しているらしい。広域で住家が甚大な被害を受け、発電所や大規模工場の被害、首都中枢機能の停止などの中、国の経済の破綻に対する不安が広がっている。我が国が危機的な状況に有ることを感じる。

これでは、しばらく自宅での生活は難しいと考え、他の住民と相談して、避難場所に行くことにした。

20XX年12月7日10時 屋外～避難所

マンションから外にでると、外は何事も無いように普段の生活をしている。ただ、皆、口々に、静岡以西での甚大な被害の様子や、これからの日本社会について不安げに語っている。

まずは、大阪に住む夫の実家の安否と、名古屋に住む妻の実家の安否を確認するため、近くのコンビニに公衆電話を探しに行く。案の定、輻輳で、2つの実家とも電話が通じない。仕方ないので、普段練習していた災害用伝言ダイヤル171を使って家族の無事を録音し、実家の安否を問い合わせる。名古屋の実家の方は以前に練習したこともあり、171にすでに無事である旨録音がされていた。一方、大阪の実家はまだ録音がされていなかった。会社には連絡ができなかったので、避難所に向かった。

小学校に行くと、すでに体育館は満員だった。避難していたのは、高層マンションの住民ばかりだった。建物は大丈夫だが、揺れの怖さとライフラインの途絶で避難しているらしい。避難所での家族のスペースを確保したのち、夫は会社にかけた。その後、夫が家族のもとに戻ったのは1週間後だった。しばらく、妻と子供二人だけで避難所で過ごすことになる。

3. おわりに

本稿では、筆者の想像力の範囲の中で、都会の高層マンションにおける地震時の状況を描いてみた。このような形でのシナリオ作りは非科学的かもしれないが、定量的な評価が難しい中、一つの可能性を表現してみた。今後、様々なシナリオを用意しながら、我々の想像力を高め、種々の備えの対策を施していくことが必要だと考えている。