

長周期地震動と高層建築の対策

工学院大学建築学部教授/総合研究所・都市減災研究センター長 久田嘉章

1. はじめに

長周期地震動と高層建築の対策に関して、本論ではまず高層建築の耐震設計や過去の被害事例を概観し、次に様々なハード・ソフトによる震災対策を紹介する。

2. 長周期地震動と高層建築の耐震設計

2.1 高層建築と柔構造による耐震設計

図1に対象となる鉄骨造（以下、S造）、および、鉄筋コンクリート造（以下、RC造）の階数・軒高と固有周期の関係を示す（文献1）に加筆）。長周期地震動は周期1～2秒以上の地震動であり、一般に十数階以上の高さの高層建築の固有周期に相当する。ちなみに建築基準法による超高層建築は、高さが60mを超える建物を意味する。

表1に長周期地震動と高層建物に関連する主な出来事を示す。古くは関東大震災の直後から「柔剛論争」と呼ばれ、地震には剛構造と柔構造のどちらが有効か、という有名な論争があった。ここで剛構造とは、耐震壁などで建物を頑丈にして地震力に対抗する構造である。一方、柔構造は、日本の伝統木造である五重塔に代表されるように、地震動に対して「風に柳」のように、しなやかに揺れることで作用する地震力を受け流す構造である。関東大震災で

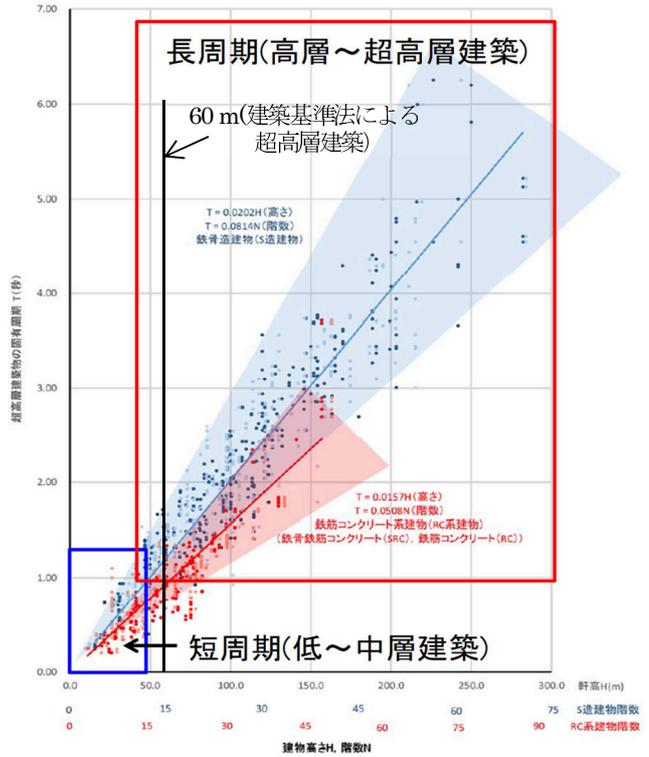


図1 高層建築物の固有周期と建物の高さ・階数の関係¹⁾

表1 長周期地震動と超高層建築に関連する主な出来事²⁾⁻⁴⁾

1920/30年代	<ul style="list-style-type: none"> 1920年 市街地建築物法制定（6大都市の市街地環境の整備、高さ100尺（30.3m）制限の導入など） 1923年 関東大震災（M7.9、浅草凌雲閣十二階など西洋式建築の多くが倒壊したが、浅草寺・旧五重塔など伝統高層木造建築は倒壊せず。東大地震研の今村式・ユース式変位計による長周期地震動を記録） 1924年 市街地建築物法改正（設計震度法の導入、剛構造を基本とする耐震規定） 柔剛論争（土木学会誌・建築雑誌等での真島健三郎・海軍省技師による反剛構造・柔構造の推奨と、東京帝国大・佐野利器・武藤清教授による反論）
1940/50年代	<ul style="list-style-type: none"> 強震計開発と強震記録（1940年インペリアル地震のエルセントロ波など） 1948年 福井地震（M7.1、震度7の導入など）と1950年 建築基準法制定（設計震度法、高さ31m規制の継続）
1960年代	<ul style="list-style-type: none"> 1963年 建築基準法改正（容積率導入、高さ制限の撤廃など） 1964年 新潟地震（M7.5、新潟市・石油タンクのスロッシングによる延焼火災、川岸町での液状化・長周期地震動の強震記録） 1964年 ホテルニューオータニ竣工（S造17階、軒高61m、柔構造理論で初めて設計） 1968年 霞が関ビルディング竣工（S造36階、軒高147m、初の100m越え、超高層建築の標準を確立） 1968年 十勝沖地震（M8.0、八戸港湾での「やや長周期地震動」の強震記録、設計用標準地震動として採用）
1970/80年代	<ul style="list-style-type: none"> 1978年 宮城県沖地震（M7.4）と1981年 建築基準法改正（新耐震設計法の導入など） 1983年 日本海中部地震（M7.7、秋田市・新潟市・苫小牧市などで石油タンクの溢流・火災事故、長周期地震動による新宿超高層建築のエレベータ管制ケーブルの切断事故） 1985年 メキシコ地震（Mw8.0、震源から約350km離れたメキシコ市の中高層マンションの倒壊・崩壊、世界的に長周期地震動が広く認知される）
1990年代	<ul style="list-style-type: none"> 1995年 兵庫県南部地震（M7.3、神戸市内にて指向性パルスを観測、S造接合部の損傷など）
2000年代	<ul style="list-style-type: none"> 2000年 建築基準法施行令改正（限界体力計算法の標準的地震動として告示スペクトルの導入など） 2003年 十勝沖地震（M8.0、苫小牧のナフサタンクの延焼火災）と、2004年 NHKスペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」（長周期地震動が社会的に認知、国土交通省が対策推進を国会で約束） 2007年 新潟県中越地震（M6.8、首都圏の超高層建築のワイヤー破損・閉込め）
2010年代	<ul style="list-style-type: none"> 2011年 東北地方太平洋沖地震（M9.0、全国各地で長周期・長時間地震動を観測。首都圏の多数の超高層建築に非構造部材の被害発生。大阪湾岸地域の咲州庁舎では高層階で約1.4mの揺れ、様々な非構造部材が被害） 2013年 気象庁「長周期地震動階級」制定と「長周期地震動に関する観測情報（試行）」の運用開始 2016年 熊本地震（M7.3、地表地震断層近傍にてフリグステップ/長周期パルスを観測） 2016年 国土交通省「超高層建築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」（3大都市圏などでの対策推進）

剛構造に相当する浅草凌雲閣(十二階)など西洋式建築の多くが倒壊したが、柔構造である浅草寺・旧五重塔など伝統木造の高層建築は倒壊しなかった。一方、剛構造として工学的に耐震設計された丸ノ内の日本興業銀行はほぼ無被害であったことなどから、剛構造を基本とする耐震設計法が震災後の市街地建築物法の改正で導入された。剛構造は現在でも低層建物の標準的な手法として広く用いられている。一方、柔構造は現在では超高層建築や免震建築で用いられているが、当時は一般には広まらなかった。それが具体化するのには強震記録が得られ、コンピュータによる動的解析法が開発される1960年代以降である。

ここで柔構造としての高層建築の耐震設計の基本的な考え方を説明したい。まず図2に、「標準的地震動」の加速度波形と加速度応答スペクトルを、図3には高層建物の揺れ方の特徴を示す。ここで「標準的地震動」とは、継続時間が数十秒程度のS波を主要動とする短周期が卓越する地震動であり、超高層建築の耐震設計の基準となる地震動として必ず使用される。一方、加速度応答スペクトルは、地震動を受けた建物(1質点系にモデル化)の周期と加速度の最大応答値との関係を示したグラフである(加速度に建物質量を乗じると地震荷重に対応)。図より標準的地震動は短周期では応答加速度(地震荷重)は大きい、周期1~2秒以上の長周期では非常に小さくなる特徴がある。次に図3は、超高層建築の地震時の横揺れを「モード分解」した例である。ここでモードとは、建物固有の揺れやすい振幅の高さ方向の分布である。各モードには固有の周期があり、最も周期が長いのが1次モード、次に長いのが2次モード、その次は3次モードと呼ばれる。1次モードは下層から上層まで常に同じ向きで左右に揺れ、高層階ほど振幅が大きくなる特徴がある。それに対して、2次以上の高次モードでは振幅の向き途中で変わり、最大振幅も上層に出るとは限らない。具体例として工学院大学新宿校舎(S造28階建)の場合、1~3次モードの固有周期はそれぞれ、約3、1、0.5秒である。高層建物にとって最も注意すべき揺れ方は、1次モードと入力地震動が共振する場合である。この場合、建物の振幅がどんどん成長し、大きな転倒モーメントによって最悪の場合は倒壊に至る可能性がある。一方、高次モードの場合は、作用する地震力と変形が左右に分散されるため、仮に共振しても振幅が片側に増大して建物が大きく傾くことはない。一方、1次固有周期が1秒程度の比較的短周期の建物の場合でも、構造的な被害が出ると固有周期が長周期化するため、地震荷重は低下する。従って入力地震動が「標準的地震動」である限りは、高層建物の1次モードはあまり増大せず、主に高次モードで振動するために、倒壊する心配はない。これが高層建築における柔構造の概念であるが、入力地震動は短周期が卓越する「標準的地震動」であること前提条件になる。

振動論による動的な耐震設計法は1960年代初期に確立し、建築基準法の高さ制限も1963年に撤廃された。高度成長期の時代背景もあり、柔構造理論に基づく60mを超える超高層建築は、1964年竣工のホテルニューオータニ(S造17階、高さ61m)を契機として、1968年竣工した100mを超える霞が関ビル(S造36階、高さ147m)を代表例として、その後、次々に建設された。さらに1980年代には免震建築も実現化し、現在に至っている。

現行基準では建物が高くなるほど、構造や消防の安全性の基準は厳しくなり、一般建築と比べると「想定内の地震」であれば高い安全性が確保されている。例えば、建物高さが31m以下では中地震(数十年に1度程度の稀な地震)を想定した耐震設計(1次設計)が行われるが、それを超える高層建築では、さらに大地震(数百年に1度程度の極稀な地震)を想定した地震荷重で倒壊しないことも確認する必要がある(2次設計)。さらに60mを超える超高層建築では、適切な地震動を選択して、地震応答解析による安全性の検証(倒壊しないこと)が義務付けられている。その結果は第三者機関によりチェック(評定)を受け、最終的には国土交通省大臣による認定が必要になる。

一方、建築基準法などの国の基準はあくまで全国一律の「最低基準」であり、「公共の福祉に反しない」ことの確認に過ぎないことに注意が必要である。例えば、上記の安全性の確認とは、極稀な大地震に対して建物が倒壊しないことを、「構造部材」を対象に確認しているに過ぎない。従って、建築基準法を満足するだけの建物では、大地震の際は「構造部材」には深刻な被害は生じなくても、次節に述べるように「非構造部材」には被害を生じる可能性が高いことや、想定を超える地震動には構造的な余裕度に乏しい場合があること、などに注意が必要である。

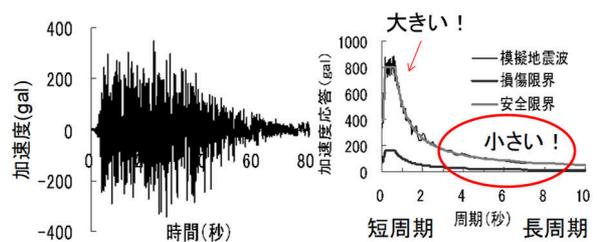


図2 標準的地震動の加速度波形と加速度応答スペクトル

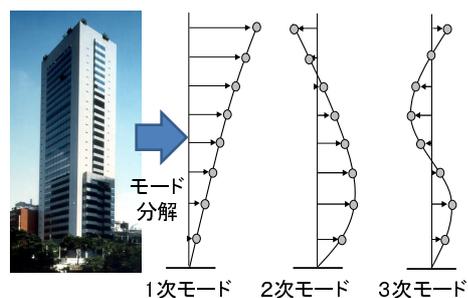


図3 工学院大学新宿校舎(右:28階S造、軒高127m)と1、2、3次モード(固有周期はそれぞれ約3、1、0.5秒)

2.2 長周期地震動と高層建物の被害事例

1960年代後半から、「標準的地震動」とは異なり、長周期が卓越して継続時間が長いという「長周期地震動」が次々に観測され始めた²⁾。まず1968年十勝沖地震の際、八戸港湾において周期約2.5秒が卓越する強震記録（八戸波）が観測された。これを契機に「やや長周期地震動」と呼ばれる強震動や高層建物への影響に関する研究が始まり、八戸波は超高層建築の「標準的地震動」に加えられた。「やや長周期地震動」は現在の長周期地震動とほぼ同じ意味であるが、当時の地震学では長周期地震動とは周期10数秒以上と非常に長い周期を対象としており、工学で対象とする短周期との中の周期帯域の地震動であるために、「やや長周期」という名称が用いられた。その後の研究で、やや長周期地震動は関東平野や大阪盆地に代表される堆積平野・盆地の深さ数百mから数kmになる厚い堆積層内で増幅する表面波が主要成因であることが明らかになっている。

近年では長周期地震動には様々なタイプがあることが明らかになっている⁴⁾。そこで堆積層表面波による非常に長い継続時間を強調する地震動の場合には、「長周期・長時間地震動」と呼ぶ場合がある。一方、活断層帯の地震のごく近傍では継続時間は短いものの長周期で卓越するパルス状の「長周期パルス」が観測される場合がある。例えば、1999年台湾・集集地震や2016年熊本地震の際、地表に出現した大規模な断層ズレのごく近傍で、永久変位を伴うパルス状の長周期地震動が観測されているが、これは「フリングステップ」と呼ばれている⁴⁾。

1980年代になると、長周期地震動により高層建築における様々な被害が報告され始めた。図4に示すように、建物には躯体である「構造部材（柱・はりなど）」だけでなく、内装・外装材、間仕切壁、天井材、照明器具、設備・消防機器、窓ガラス・ドア、家具など様々な「非構造部材」で構成されている。建築基準法による耐震性能の確認は、構造部材が主な対象であるために、図5に示すように地震の際には非構造部材に様々な被害が現れるケースが多い⁵⁾。特に超高層建築では、例えば高さが200mを超える巨大なスケールの場合、1m近い振幅の揺れでも構造部材には深刻な被害は生じないが、人間的なスケールである非構造部材（家具等）は、様々な被害が出る可能性があることは容易に想像できると思う。

高層建築の地震被害の具体例を紹介したい。まず1983年日本海中部地震（M7.7）では、長周期地震動により秋田市や新潟・苫小牧市などで石油タンクに溢流・火災事故が生じたが、東京・新宿の超高層建築でも大きい揺れが観測され、エレベータ管制ケーブルの切断や閉じ込め事故が起こっている。さらに1984年長野県西部地震（M6.8）でも全く同様なエレベータの事故が新宿の超高層建築で発生している。一方、世界的に長周期地震動が有名になっ

たのは1985年メキシコ地震（M8.0）である。震源から約350kmも遠方のメキシコ市で周期2〜4秒の長周期地震動が卓越し、多数の中高層マンションが倒壊し、1万人近い死者を生じた。

わが国で長周期地震動が社会的にも広く知られる契機となったのは、2003年十勝沖地震（M8.0）による苫小牧のナフサタンクの延焼火災である。NHKスペシャル「地震波が巨大構造物を襲う」で放送され（2004年1月18日）、南海トラフ巨大地震が生じた場合、3大都市圏の超高層建物への懸念が報告された。この問題は国会でも議論となり、国として長周期地震動対策を推進することが決定した。ちなみにこの放送を契機に「やや長周期地震動」は、「長周期地震動」と呼ばれるようになった。

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0）では、全国各地で長周期地震動が観測され、高層建築の非構造部材等に様々な被害が発生した。中でも注目されたのは震源から約770km近くも離れた大阪・咲洲庁舎（S造55階、高さ256m）の被害である。地震動と約6〜7秒の建物の1次モードが共振し、1階の振幅は約9cmであったが、屋上階では約140cmまで増幅され、階段壁面のパネル落下、100カ所以上のひび割れ、スプリンクラー破損による漏水、エレベータによる閉じ込めなど多数の被害が発生した。その後の危機対応の面でも、震度3であった1階の防災センターでは高層階の被災状況が全く把握できず、初動対応に支障を生じた。

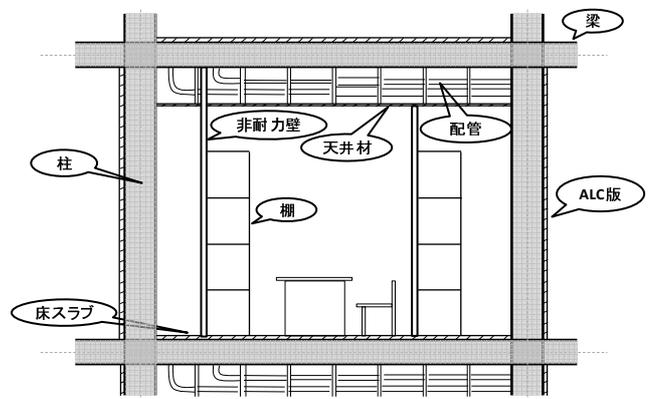


図4 S造建物の構造部材と非構造部材の例

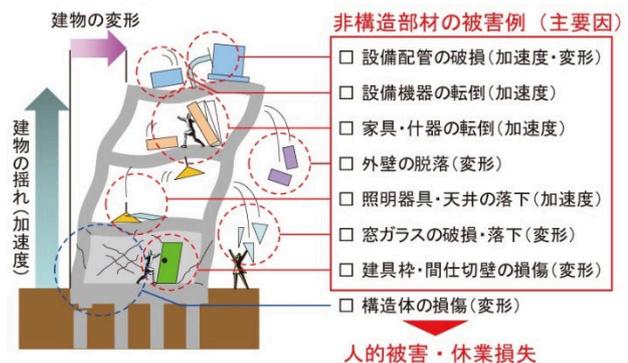


図5 非構造部材の地震被害例⁵⁾

東日本大震災時の東京の超高層建築の揺れと被害例として、図6に工学院大学新宿校舎(図3参照)の-100mの地中から29階(屋上階)までの加速度波形と計測震度、および変位波形を、図7には被害写真を示す⁶⁾。短周期が強調される加速度波形の主要動では、下層から上層になると振幅が約50gal(震度4)から291gal(震度6弱)まで増大している。ただし、22階では154gal(震度5強)と振幅が低下しており、主に2次モードで揺れていることが分かる。一方、長周期が強調される変位波形では、下層から上層に向かって振幅は約11cmから37.3cmまで増大

し、1次モードの揺れが500秒以上の長い継続時間が続いている。加速度が強調される2次モードの揺れは、図7の被害状況にも対応している。すなわち、高層階だけでなく、中層階でも天井板の落下や室内の散乱、コピー機の移動などは確認された。一方、24階では固定していない重い本棚が転倒し、間仕切壁を変形させドアの開閉を困難にした。また長周期地震動により非常用エレベータのメインロープは大きく揺れで着床板に引っ掛かり、その後のエレベータの移動で着床板などが破損した。震災後の部品不足で修復に3か月近い期間を要した。

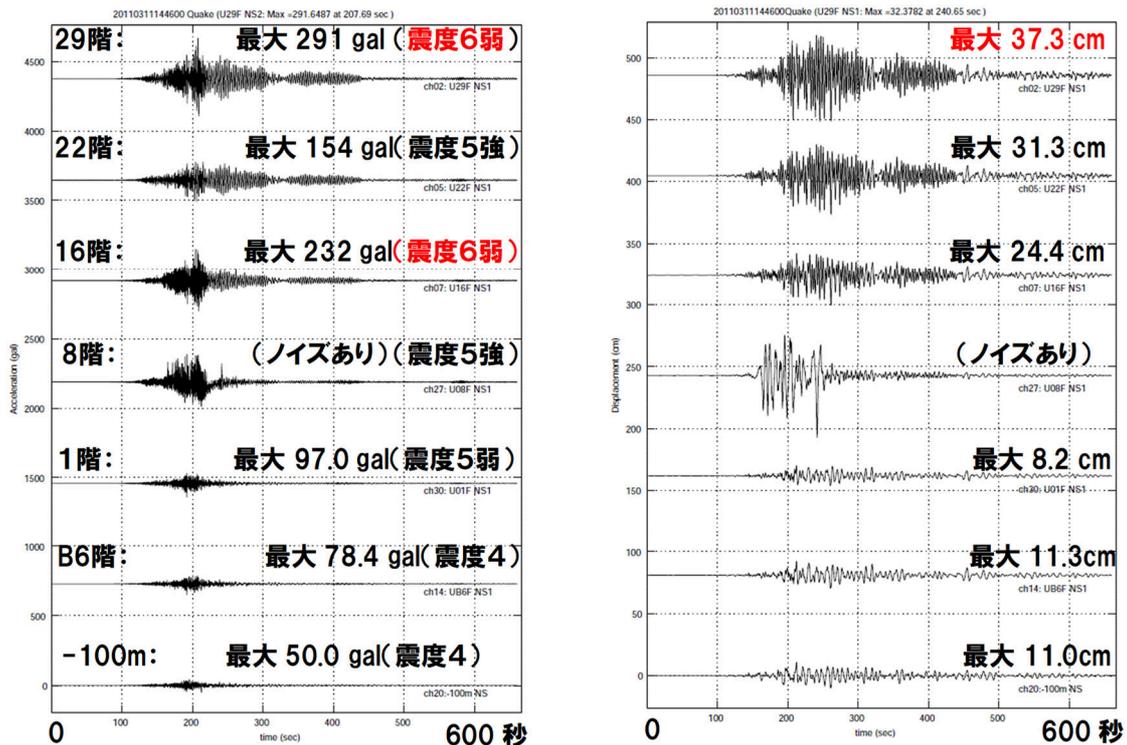


図6 2011年東日本大震災時の工学院大学新宿校舎の加速度波形(左)と変位波形(右)(一部ノイズあり)



図7 2011年東日本大震災時の工学院大学新宿校舎の室内被害の様子⁶⁾

一方、新宿校舎には図8に示すように緊急地震速報と、図6の強震観測システムを活用した被災度判定システムを導入しており、適切な初動が可能であった⁶⁾。まず、緊急地震速報の表示画面には実験的に長周期地震動（表面波）の到達予想時間も表示しており、事前に短周期地震動だけでなく長周期地震動も来ることを理解していた。ただし評価されたマグニチュードは8程度であったため、新宿の揺れの推定値は震度3など過小評価であった。一方、被災度判定システムにより、地震直後に建物には構造部材の被害は無く、下層階の震度は5弱であるが、上層階の震度は6弱であり、室内被害が生じている可能性も即時に確認することができた。その後の館内の被害調査も速やかに行い、深刻な被害が実際に無いことを確認し、図7に示すように約700名の帰宅困難者を受け入れることが可能になった。

高層建築で最も恐ろしい災害は火災である。特に震災時に火災が発生し、初期消火に失敗した場合は、閉じ込めや負傷者が出て速やかに全館避難せざるを得なくなる。東京消防庁は東日本大震災における都内の火災や高層建物の室内被害の状況を調査しており、高層建築では低層階に比べて上層階では家具の転倒・落下・移動が2倍近い被害が生じたこと示している⁷⁾。さらに火災事例の調査では、都内32件の出火のうち、電気ストーブ9件、観賞魚用ヒーター3件、ガステーブル等2件、白熱灯スタンド2件などいずれも転倒や落下等による引火が主な原因であった。いずれのケースも事前に転倒・落下防止対策を行うことで防ぐことは可能であった。



2011/03/11 14:46:00 簡易震度と層間変形

簡易震度	層間変形(最大値)	
	東西方向	南北方向
5強	1/572	1/408
5弱	1/362	1/520
5強	1/451	1/564
5強	1/645	1/514
4		

色	簡易震度	層間変形角	説明
赤	6強以上	1/50以上	被害が出ている可能性があります
黄	5強~6弱	1/200~1/50	軽微な被害が出ている可能性があります
青	0~4	1/200以下	大きな被害は出ていないと思われます

図8 東日本大震災で稼働した緊急地震速報（上）と被災度判定システム（下）⁶⁾

3. 高層建築の震災対策

3.1 ハード・ソフトによるレジリエントな震災対策

近年では海溝型超巨大地震や活断層帯地震など最大級の地震を想定する必要がある、レジリエントな震災対策が求められている。レジリエントとは回復性や復元力、強靱性などと訳されており、失敗や災害などから立ち直る能力を意味する。これまでの震災対策は「前例ある被害」を教訓として、建物の耐震補強などで被害を出さないハード的な「事前対策」を重視する傾向があった。それに対してレジリエントな対策では、「前例ない最大級地震」の際には被害を防ぎきれないことを前提として、仮に被害が出て速やかな対応によって回復を可能にするソフト的な「事後対策」も重視する点に特色がある。

図9にレジリエントな災害対策の概念図を示す⁸⁾。対策を実施しない場合が太い黒線であり、この場合は想定外の大きな被害で対応は困難を極め、復旧に非常に長い時間がかかり、場合によっては回復不能となる。一方、赤い領域はレジリエントな対策を実施した場合で、余裕度を見込んだ事前の災害対策で被害を最小限に抑え、さらに想定を超える被害が出た場合でも対応可能な柔軟な事前の行動・復旧計画で速やかな復旧を可能とする。

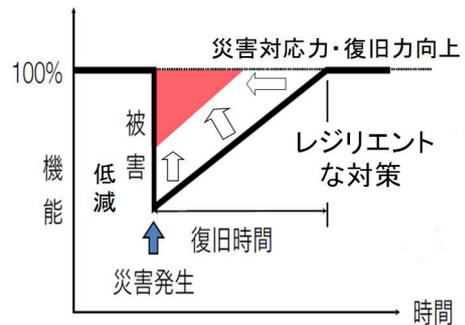


図9 レジリエントな震災対策の概念図⁸⁾

3.2 事前の被害低減策：「余裕度を見込んだ構造」と「非構造部材」の耐震対策

レジリエントな震災対策として、まず高層建築のハード的な被害の低減策を紹介する。最も基本となる構造躯体の耐震対策には「耐震・免震・制振」がある。「耐震」は剛構造にも柔構造にも用いられ、構造部材をバランス良く配置し、地震動で作用する応力と変形を想定内に低減させる方法である。次に「免震」は、建物の基礎などに積層ゴムなどの軟らかい層とダンパーを設置し、地震動による変形をこの層に集中させて、建物本体には地震力をできるだけ作用させないようにする。最後に「制振」は、地震や風による建物の揺れを制御する装置を用いる方法であり、アクティブ制振（振り子などで能動的に揺れを制御）やパッシブ制振（ダンパーなどで受動的に揺れを制御）など様々な種類が存在する。一般に「制振」が「振」の字を用いるのは、対象が地震だけでなく、強風や交通振動な

ど幅広いためである。特に超高層建築に導入された初期の制振装置の大半は風などの微小な振動が対象であり、地震は対象外であることが多いことに注意を要する。長周期地震動で注意すべきは建物の1次モードでの共振であるが、最も効果的な対策の一つは制振ダンパーによって揺れを抑えることである。このため「やや長周期地震動が問題となった1990年代から、長周期地震動を対象とした様々な「制震装置」が超高層建築に採り入れられ、現在の超高層建築（特にS造オフィス建築）では大半に設置されている。ちなみに霞が関ビルなど、ごく初期の超高層建築でも強風が主対象ではあるが、制振装置（スリット壁など）が導入されている。

レジリエントな震災対策として、最も重要な対策の一つは「余裕度を見込んだ構造」である。特に近年、様々な長周期地震動が観測され、さらに社会的にも超高層建築のような重要構造物には、より高い耐震性が求められているため、建築基準法による最低基準を超える余裕度を見込んだ設計が一般的になってきている。図10は主に低層建物が対象であるが、非木造（RC/S造）の建物の耐震性能と全壊率の概念を示す⁹⁾。建築基準法の耐震規定は1971年と1981年に大きく改定されており、現行規定である1981年規定では「稀な地震動（レベル1）」では構造体が無被害であること、「極稀な地震動（レベル2）」では倒壊・崩壊しないことを最低基準としている。一方、近年では海溝型超巨大地震のような「千年地震」による「長周期・長時間地震動」や、数千年から数万年に1度という活断層帯地震による「長周期パルス」などへの対応も求められている。これらの地震動を正確に予測することは困難であるため、最も効果的な対策は地震動の大きさや構造躯体に余裕を見込んで設計を行うことである。図10では、通常の1.5倍の余裕度を見込んだ耐震等級3の建物では、レベル3地震でも大破する可能性は非常に小さくなることを示している。木造住宅の例であるが、2016年熊本地震では震度7を観測した益城町でも耐震等級3の建物は全て軽微・無被害であった。図10には免震建築の余裕度を見込んだ場合と見込まない場合の比較の概念図を示しているが、レベル2地震動を超えた場合、全壊する可能性が両者では非常に大きな差となって現れる。

余裕度を見込んだ構造設計の具体例として、東京都は東京湾岸の都の超高層建築の構造指針を2018年に改定し、従来のレベル1・2に加えて、レベル3地震動（レベル2の1.5倍程度の大きさ）を明記し、耐震安全性を確認することを義務付けている。一方、内閣府は南海トラフ巨大地震による長周期地震動に関する報告書を公開し、それを受けて国土交通省は関東・静岡・中京・大阪地域内の地方公共団体等の関係団体あてに超高層建築等の安全対策の通知を行った¹⁰⁾。そこでは静岡・中京・大阪の湾岸地域では現行のレベル2地震動の約2倍までの長周期地

震動を考慮した設計用地震動を用いることなどが求められている。但し、国交省の通達はレベル3ではなく、レベル2としている。レベル2では設計クライテリア（変形の限界値など）の制約が厳しいため、従来の2倍の大きさの地震動に対応するには、剛性を高めたり、ダンパーを増やすなどの対策が必要となる。このため建設に多大な費用がかかるだけでなく、可能性の高い地震動（レベル1地震動など）では、応答加速度がかえって大きくなるなど耐震性が悪化する場合もある。どの程度の地震動をレベル2や3とするか、その対応策をどうするか等は大きな課題であり、今後は行政だけでなく、より広く専門家と社会との議論を踏まえてコンセンサスを得るプロセスが重要だと思う。

非構造部材に関しては、主要な設備・消防機器等では対応する耐震基準が関連学協会で指針やガイドラインとして定められている。一方、天井や内装材、什器・家具類に対しては明確な法的規定が存在しないが、2011年東日本大震災の際、九段会館などで天井落下により死者が出たことから、特定天井（高さ6m以上、200m²を超える吊り天井など）では国土交通省告示により耐震対策が義務化された。その他、一般の家具類等の耐震対策は建築家・施工会社などと相談し、建主が自分で行う必要がある。

ところで、建築基準法や各種の設計指針などの仕様規定に合わせた設計法は「仕様設計」と呼ばれている。一方、建物に望まれる性能を建主などと相談しながら定め、それに適合するように構造・非構造部材等を設計する方法は「性能設計」と呼ばれる。耐震設計における「性能設計」ではレベル1～3地震動に対する建物の性能を定め、それに適合するように耐震設計が行われる。近年、米国では性能設計を標準化・国際化するために、求める耐震性能を安全性・経済性・復旧性の観点からリスク評価手法を用いて定量的に評価する設計法（FEMAP-58など）を公開している。さらに、この手法を用いたレジリエント性能設計法（resilient based design）が開発され、高い性能の優良建物を認証する制度が民間主導で始まっている。



図10 非木造建物（RC/S造）の建築年別の全壊率とレベル別の耐震設計の概念図⁹⁾

3.3 事後の対応・復旧対策（主にソフト対策）

次に、災害後の対応策を紹介する。近年、前例のない最大級地震を想定した被害想定結果が国や自治体で公表されており、最悪の事態までを想定した対策が必要になっている。一方、最悪事態を前提とした対応策では、中小災害への対応が困難になる、さらには「対策をあきらめてしまう」など、硬直した計画になってしまう。従って、可能性の高い中小災害から、可能性が極めて低い最悪の災害まで、被害レベルに応じた柔軟な対応策が重要になる。

表 2 に、高層建築を対象として3つの被害・対応レベルを設定した事例を紹介する⁹⁾。条件によって変わるが、ここではレベル1では避難不要、レベル2では部分避難（高層から低層階など）、レベル3では全館避難、としている。まずレベル1では建物に大きな被害はなく、火災さえ無ければ避難不要であるが、高層階での室内被害や負傷者が出る可能性がある。エレベータは長時間停止し、防災センター職員は駆けつけられないため、近隣同士の共助により安否確認や救護活動を行う必要がある。次にレベル2では、建物に若干の被害が出るが、全館避難の必要はない。この場合、震災直後には全階で住民や事業者自身による安否確認を行い、初期消火や負傷者・閉じ込め者の救援救護・搬送などが必要になる。また室内被害や余震による揺れなどへの不安から、多数の居住者が低層階に避難する可能性があるため、使用できる共用スペースや備蓄品を事前に準備しておく。最後にレベル3では、建物内外の火災や甚大な建物被害、停電による電源喪失などで全館避難が必要となる。震災直後の応急対応の後、まずは予め指定された建物外の安全な一時集合場所に、次に自治体が指定する避難場所（広場など）に、その後は状況に応じて避難所（学校など）や一時滞在施設に避難する。また多数の負傷者が出たときの対応も重要である。大震災時には災害医療体制となり、近隣の医療救護所で地元医師会によりトリアージが行われ、拠点病院は重傷者以外は受け入れなくなる。日頃から地元の医療従事者や消防署などとも連携し、地元の医療救護体制を確認するとともに、地域連携（共助）により軽傷者は自分たちで救護できる体制づくりが求められている。

表 1 高層建物における被害程度と対応計画の設定例⁹⁾

対応レベル	レベル1 (各階待機)	レベル2 (部分避難)	レベル3 (全館避難)
火災の発生	なし	小火程度	あり
地震の想定例 (再現期間)	中小地震 (数年に1度程度)	大地震 (数十年に1度)	最大級地震 (数百年以上に1度)
建物の被害例	被害なし	被害の可能性あり	被害あり
室内の被害例	軽微な被害	中程度の被害	大被害あり
人的被害例	負傷者の可能性	負傷者あり	重傷者あり
建物の対応例	軽微な修復	修復可能	取壊し
火災対応	火の元確認など	通報、初期消火、安全防護、避難誘導	通報、初期消火、全館避難
震災対応	安否確認、使用継続性確認など	救援救護、建物確認、部分避難	全館避難、負傷者対応(重傷者搬送)
帰宅困難者対応	各階待機(原則)、一時滞在場所の提供	被害階から部分避難(低層階など)、受入困難	避難場所等で待機 1次滞在施設に滞在

3.4 新宿駅周辺地域での自助・共助による震災対応

最後に、新宿駅周辺防災対策協議会による地元事業者等による自助・共助による震災対策の事例を紹介する⁹⁾。新宿駅周辺地域は、世界最大の乗降者数(約350万人/日)の新宿駅を核とし、西口エリアは超高層ビル街、東口エリアは日本最大の商業・歓楽地域で構成される。エリア内では約2万人の住民(夜間人口)に対し、昼間人口は約30万人を超える。東京都の想定では昼間の震災時には駅周辺に約17万人が滞留し、約9万人が帰宅困難者になると考えられている。自治体の地域防災計画の主な対象は住民(夜間人口)であり、膨大な昼間人口を抱える都心部では自助・共助による対策の推進が期待されている。

震災時の駅周辺での大勢の滞留者や帰宅困難者による混乱防止を目的として、新宿駅周辺防災対策協議会は東京都の呼びかけにより新宿区、新宿区医師会、日赤東京支部、事業者、大学等の参加により2007年度に設立され、2008年度には自助・共助・公助の役割を確認する「新宿ルール」を制定した。2009年度からは帰宅困難者対応だけでなく、自助・共助による対策推進を目的としている。主な活動は、セミナー・講習会の開催、年1回の地域防災訓練と検証会等である。さらに2016年には、「むやみに移動しない」、「現地本部を中心に連携する」、「地域で傷病者に対応する」を骨子とする「新宿ルール実践のための行動指針」を策定している。震災時の具体的行動として、4つのフェーズに分け、①発災直後の身の安全の確保と初動対応、②できるだけ建物内に残留するが、被害が出た場合や身の寄せ所のない滞留者等は避難場所(新宿御苑と新宿中央公園)に退避し、③地域内施設の安全情報が確認され次第、一時滞在施設として提供可能な情報を提供し、④周辺や交通状況が明らかになり次第、帰宅可能な市民から適宜帰宅する、を基本方針としている。

図 11、12 に協議会による地域防災訓練の事例を示す。図 11 は超高層建築を想定した自助としての自衛消防訓練である。従来の火災を設定した「避難訓練」と異なり、できるだけ施設内に留まることを前提とした「発災対応型訓練」を実施している。自衛消防隊は各フロア・テナントによる地区隊と、防災センター等に設置される本部隊からなるが、地区隊は誰も助けにこないという前提で、初期消火、傷病者の救護・搬送、閉じ込め者の救援など条件設定のもとで各種訓練を実践し、担当階の安否・安全確認を行った後、本部隊に報告する。一方、本部隊では次々に同時発生する災害の状況を集約し、建物や主要設備、火災の有無等を確認し、状況に応じて応急救護所の設置や西口現地分部との情報共有・地域連携などを行い、館内放送で状況報告、対応の方針などを通達する。

一方、図 12 は同時に実施した共助(地域連携)の訓練の様子である。新宿駅周辺地域では、西口では工学院大学、東口では新宿区役所に現地本部を設置し、地域連携の拠



図 11 2017 年度新宿駅周辺防災対策協議会による超高層建築の震災対応訓練（上：自主防災組織・地区隊、下：同・本部隊）



図 12 2017 年度新宿駅周辺防災対策協議会による西口地域の震災対応訓練（西口現地本部・帰宅困難者・医療救護所の各訓練）

点となる。現地本部に集合した協議会メンバーは、周辺の被害状況や交通機関、拠点病院、避難場所、一時滞在施設の状況などを把握し、地域の主要メンバー間で情報共有を行う。地元自治体（新宿区、東京都）や医師会、日赤、建築士会などとも連携し、多数傷病者や被災建物の安全確認、帰宅困難者による駅周辺の混乱防止などを想定した訓練を行っている。

4. おわりに

長周期地震動を念頭におき、高層建築の耐震設計や過去の被害事例を概観し、様々なハード・ソフトによるレジリエントな震災対策の事例を紹介した。より詳細を知りたい場合は以下の文献を参照されたい。

参考文献：

1) 内閣府 (2015) : 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

- 2) 太田外気晴、座間信作 (2005) : 巨大地震と大規模構造物—長周期地震動による被害と対策、共立出版
- 3) 柴田明德: 時代で見る耐震工学の今と昔、SEINWEB、NTT ファシリティーズ
- 4) 久田嘉章: 耐震の入口と出口の話—強震動と地震防災—、SEINWEB、NTT ファシリティーズ
- 5) 日本建築学会 (2015) : 逃げないですむ建物とまちをつくる—大都市を襲う地震等の自然災害とその対策、技報堂出版
- 6) 久保智弘ほか (2012) : 東日本大震災における首都圏超高層建築における被害調査とアンケート調査、日本地震工学会論文集、第 12 巻、第 5 号(特集号)、pp.1-20
- 7) 東京消防庁 (2011) : 長周期地震動等に対する高層階の室内安全対策専門委員会 報告書
- 8) 林 春男 (2015) : 改めて都市災害プロジェクトが目指すもの、第 15 回 比較防災学ワークショップ・プロシーディング、pp.3-32
- 9) 久田嘉章 (2016) : レジリエンスな社会構築のための被害低減策と対応力向上策の現状と事例報告土木学会論文集 F6 (安全問題)、Vol. 72, No. 2, pp.1-14
- 10) 国土交通省 (2016) : 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