

●特集1 都市の地震対策

大震災を前にした建築物の耐震安全性の諸課題

福和伸夫 [ふくわのぶお]

名古屋大学減災連携研究センター長



国土強靱化や地方創生が叫ばれる中、建築物の耐震化はどのように進んでいるのか。関東大震災以来の歩みを振り返りながらその課題を探る。

はじめに

日本のどこに行っても、主要な駅前には高層ビルが林立している。31 mの高さ制限があった50年前には考えられない風景である。かつては、壁が多く窓が小さなどっしりしたビルが多かったが、最近では、細い柱とガラスで覆われた建物が目立つ。コスト至上主義のバリューエンジニアリングが好まれており、科学技術が安全余裕度の削減に使われている懸念もある。こういったまちの変化や社会の価値観の変化は、建築耐震の立場からは、どう考えればよいのだろうか。

昨年末には、内閣府から南海トラフ地震に対する長周期地震動の予測結果が公表され

た。2011年東北地方太平洋沖地震でも問題となった長周期長時間地震動に対する高層ビルの安全性検証は喫緊の課題である。また、2016年熊本地震では、1995年兵庫県南部地震と同様、旧耐震基準で設計された古い家屋やビルが多数壊れた。南海トラフ地震や首都直下地震による甚大な被害が懸念される中、耐震化を抜本的に進めなければ、我が国は国難とも言える事態を迎える。

東北地方太平洋沖地震では、海辺の沿岸低地での津波被害や、海や旧河道・池沼を埋め立てた地盤での液状化被害が顕著だった。災害危険度の高い沖積低地や埋立地に拡大した大都市は、土地利用のあり方を大きく見直す必要もある。



熊本県益城町、2016年5月1日（筆者撮影）

本稿では、災害に対する耐力を増す国土強靱化や、東京一極集中を是正する地方創生が叫ばれる中、建築耐震の立場から、過去からの経緯を振り返りながら、現状の課題をまとめてみたい。

我が国の耐震基準の変遷

(1) 日本国憲法と最低基準としての耐震基準

我が国の耐震基準は、1923年関東地震の翌年に、市街地建築物法（以下、物法）に耐震規定を追加したことに遡る。その後、1950年に建築基準法（以下、基準法）が制定された。この法律は、日本国憲法の趣旨に沿い、最低基準としての耐震基準を規定している。

憲法第25条には「すべて国民は、健康で文化的な最低限度の生活を営む権利を有する。」と、第29条には「財産権は、これを侵してはならない。」「財産権の内容は、公共の福祉に適合するやうに、法律でこれを定める。」と記されている。これらは、最低限の生存権保証と公共の福祉の範囲でのみ財産権の制約を許容していると解釈できる。

憲法の精神に則った基準法は、第1条で「この法律は、建築物の敷地、構造、設備及び用途に関する最低の基準を定めて、国民の生命、健康及び財産の保護を図り、もつて公共の福祉の増進に資することを目的とする。」と述べている。即ち、あくまでも最低基準であり、地震に対する絶対の安全は保証していない。さらに、不遡及の原理に基づいているため、過去の建物には遡及されない。このため、法律改正があると現行法を満

足しない既存不適格建築物が発生する。

(2) 市街地建築物法

市街地建築物法は1920年に施行された。当初は建物の自重や積載荷重などの鉛直力に対しての検証のみを規定していたが、関東地震での甚大な建物被害を受けて、翌1924年に耐震規定が追加された。その基本的考え方は、1916年に佐野利器博士が学位論文「家屋耐震構造論」で提案した水平震度に基づいている。水平震度とは、地震時に建物に作用する水平力と、建物の自重との比であり、水平加速度と重力加速度の比に相当する。

物法では、水平震度0.1による耐震設計を義務付けた。当時は、耐震設計用の材料強度の安全率が3だったことから、300ガル程度の建物の揺れを考えたことに相当する。ちなみに、関東地震での東京の揺れは300～400ガル程度であったと言われている。当時のビルは、壁が多く剛体的だったため、地盤と建物の揺れは同等と考えられる。このため、物法は、関東地震時の東京の揺れに対して安全性を確認していたと解釈できる。言い換えれ

ば、より大きな揺れだった横浜や小田原の揺れは考えていなかったことになる。ただし、当時の構造計算では、壁を無視し、柱のみで行っていたので、壁の多い実際の建物の実力は遥かに高かったと推察される。

なお、物法の対象区域は、当初は東京市、横浜市、名古屋市、京都市、大阪市、神戸市の6大都市のみであり、他の地域では全く自由に建物を建てることができていた。

(3) 建築基準法と新耐震基準

終戦後、物法が廃止され、1950年に建築基準法が制定された。このときに、耐震設計用の材料強度の安全率を1.5と半減させたことから、水平震度が0.1から0.2へと倍になった。

その後、1968年十勝沖地震で鉄筋コンクリート建物の柱がせん断破壊したことから、せん断補強のため柱の帯筋間隔を小さくするよう仕様規定が改定された。

さらに、1978年宮城沖地震などの被害を受けて、1981年に建築基準法施行令が改正され、新耐震設計法が導入された。中小地震動と大地震動の2段階での設計を行うことになり、強さ（強度）と粘り（靱性）の積で建物を耐震設計する終局強度型の設計法が採用された。

(4) 兵庫県南部地震と耐震改修促進法

兵庫県南部地震では、旧耐震基準による建物の被害は甚大だったが、新耐震設計法による建物被害が微少だったことから、新耐震設計法の妥当性が検証されたと考えられた。このため、既存不適格建物の耐震化を進めるために、耐震改修促進法が制定された。また、1階が駐車場などのピロティ建築の被害が大

きかったことから、ピロティなどの耐震強化が図られた。

ただし、新耐震基準による建物の被害分析をすると、多数を占める低層建物の被害は微少だったが、10階建程度の中層建物の被害率は決して低いものではなかった。後述するように壁の多い低層建物と、壁の少ない中層建物とで、耐震の実力に差があることに原因があると思われる。

(5) 建築基準法の改訂と耐震基準の性能規定化

WTO（世界貿易機関）が1995年に発効させたTBT協定（貿易の技術的障害に関する協定）を受けて、2000年に建築基準法が改訂され、耐震基準の性能規定化が図られた。TBT協定は、工業製品等の国内の規格及び規格への適合性評価手続き（規格・基準認証制度）が貿易障害にならないよう、国際規格を基礎とした国内規格策定の原則を定めたものである。その第2条第8項には、「加盟国は、適当な場合には、デザイン又は記述的に示された特性よりも性能に着目した製品の要件に基づく強制規格を定める。」と記されており、建築基準に関しても国際標準への整合を図る必要があった。改訂の背景には、基準の国際適合に加え、社会への耐震性の説明力向上や、新技術の活用、コスト削減などもあったと思われる。新しい基準法では、従来から使われていた許容応力度等計算法に加えて、限界耐力計算法や時刻歴応答解析などの検証法が性能規定型の設計法として新たに導入された。

2000年には、木造住宅の柱・梁・土台などの接合部に関する継手・仕口の仕様も強化された。また、2005年に耐震強度構造計算



皇居前の高層ビル（筆者撮影）

書偽装事件が発生し、建築確認や中間検査などのあり方も見直された。このように、耐震基準は、地震被害や社会問題の発生と共に、変遷しつつ現在に至っている。このため、基準の改正のたびに、建築物の耐震性能も変化してきたと言える。

高層ビル・免震ビルとその変遷

(1) 百尺規制撤廃による高層ビルの出現とその後

高層建物の定義は明確ではないが、基準法施行令第36条等において、高さが60mを超える建築物に対して、建築構造や防火構造などについて特別な制限をしていることから、60m以上の建築物を高層建築物と称するが多い。

我が国では、1920年に制定された物法以来、100尺以下に建築物高さを制限する百尺規制が長らく守られてきた。このため、大都市の中心街では、31mの高さにスカイラインが揃った整然とした町並みが形成されていた。その後、1963年に、建物高さに代わっ

て容積率により建物規模を規定する容積地区制度が導入され、1968年に超高層ビル・霞が関ビルが竣工した。さらに、1970年の基準法改正により、高さ制限が撤廃され、容積率規制が全面的に導入され、全国で31mを超える建物が建設されるようになった。

高層ビルの建設当初は、新宿など台地上の一部地域に建設が限定されており、高層ビルは「柳に風」と柔軟に振る舞うと考えられていた。当時は、地震観測が始まって間もなく、大きな地震もなかったことから、地震の揺れは短周期の揺れが卓越すると考えられていた。このため、長周期で揺れやすい高層ビルは揺れにくいので安全である、との考え方が主流だった。ただし、1964年新潟地震でのタンク火災や、1985年メキシコ・ミチョアカン地震での高層ビルの倒壊などの事例もあり、「やや長周期」地震動の問題は1980年代から議論されていた。

その後、1980年代になって、ウォーターフロント開発や旧国鉄跡地の再開発により、沿岸部の軟弱地盤に高層ビルが建設された。また、高強度コンクリートの開発により、1990

年代以降、多くのタワーマンションが建設された。さらに、全国各地で主要駅周辺の再開発が行われ、多数の高層ビルが建設された。とくに、東京駅前の丸の内地区は高層ビルが軒を連ね、風景が一変した。

(2) 兵庫県南部地震と強震動研究

こういった中で兵庫県南部地震が発生した。芦屋浜にあった鉄骨高層マンションのメガ柱が脆性破断したものの、高層ビルの大きな被害は報告されなかった。周期1秒前後の揺れが卓越したパルス的な地震動だったので、高層ビルへの影響が小さかったためと判断される。ただし、神戸市役所の高層棟の永久変形の問題や、大阪市に位置する高層ビルでの共振応答の問題などは話題になった。一方で、当時、普及し始めた免震構造が、大きな応答低減効果を示したことから、震災後、免震建物が急増することになった。また、免震に加えて、高層ビルの減衰性能の改善を目指した制振技術の研究開発も積極的に行われた。最近では免震タワーマンションも増えている。

兵庫県南部地震では、活断層近傍で複数の強震動が観測された。その記録の分析から、断層破壊に伴うパルスの地震動の生成や、地盤の不整形構造に伴う地震波の増幅的干渉などが明らかとなり、強震動研究が飛躍的に進展した。また、1995年に地震防災対策特別措置法が制定され、政府・地震調査研究推進本部（地震本部）が設置された。

地震本部では、活断層調査と地震発生 of 長期評価、大規模堆積平野の地下構造調査、強震観測網の整備、強震動予測のためのレシピ作成などを精力的に進め、これらの成果に基づいて2005年に全国を概観した地震動予測

地図を公表した。

(3) 長周期地震動の社会問題化

長周期地震動の問題が社会的にクローズアップされたのは、2000年以降である。2000年鳥取県西部地震で、東京や大阪の高層ビルが大きく揺れ、長周期地震動の問題が話題となった。また、2001年以降に始まった中央防災会議による東海地震や東南海・南海地震の被害予測調査の中で、長周期地震動に対する検討の必要性が指摘された。そんな中、2003年十勝沖地震が発生し、苫小牧にあった石油タンクでスロッシング火災が発生した。これを契機に、長周期地震動に関するNHKスペシャルの番組が作られた。その後、2004年に東海道沖で地震が発生し、広域で高層建物が大きく揺れた。また、同年発生した新潟県中越地震では、東京都内の高層ビルでエレベータのワイヤーが損傷するなどした。こういったことを経験する中で、2000年以降は、高層ビルの多くに制振装置が設置されるようになった。

強震動予測研究の進展や、長周期地震動問題の顕在化を受けて、高層建物用の設計用入力地震動の見直しが検討され、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について」に関する意見募集が行われた。その意見募集が締め切られた翌々週に、東北地方太平洋沖地震が発生した。

(4) 東北地方太平洋沖地震と長周期地震動対策

東北地方太平洋沖地震では、東京や大阪を中心に、多くの高層ビルが強く揺れた。とくに、大阪市の埋立地に位置する高さ256m

の高層ビルでは、片振幅 1.37 m もの大きな揺れが観測された。

東北地方太平洋沖地震を受けて、中央防災会議を中心に、南海トラフ地震や首都直下地震に対する被害予測調査が精力的に実施された。さらに、高層ビルの長周期地震動対策を促すため、昨年 12 月 17 日に、南海トラフ地震を対象にした長周期地震動の予測結果が内閣府から公表された (http://www.bousai.go.jp/jishin/nankai/nankaitrough_report.html)。これを受けて、翌日、国土交通省から、「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」に関する意見募集が行われた。

なお、2015 年ネパールの地震や 2016 年熊本地震において、震源近傍で長周期の大振幅パルスの揺れが観測されている。今後、長周期パルス対応も新たな課題になるとと思われる。

(5) 緊急地震速報と長周期地震動階級

兵庫県南部地震後、災害対応の遅延を克服するため、リアルタイム地震情報の必要性が認識され、防災科学技術研究所や気象庁を中心に地震早期警報システムの技術開発が行われた。緊急地震速報として知られるこのシステムは、気象庁が 2004 年に一部試験運用を開始し、2007 年から本運用を開始している。緊急地震速報では、震源近傍の地震観測記録に基づいて震源位置や地震規模を即時推定し、離れた場所の揺れを予測して、地震波到達前に情報提供を行う。場所による P 波・S 波の到達時間差を利用しているため、直下の活断層が動いた場合には震源近傍では情報間に合わない。

また、長周期地震動の懸念を受けて、気象

庁は長周期地震動階級を新たに定め、2013 年より「長周期地震動に関する観測情報（試行）」の運用を開始した。長周期地震動は波長が長く減衰しにくいため、震源から遠くまで到達する。このため、巨大地震では、小さな震度でも、高層ビルが強く揺れる。そこで、長周期地震動に特化した情報提供を始めた。将来的には、緊急地震速報と組み合わせることで、高層ビルの長周期地震動対策に活かすことが期待される。

長周期長時間地震動とその対策

(1) 長周期地震動と共振

高層ビルや免震ビル、石油タンク内の油などは長周期でよく揺れる。地震動の周期が構造物の揺れやすい周期と近接し、揺れが長時間続くと、共振増幅して揺れが大きくなる。とくに、巨大地震では、広い震源域が破壊し長周期の揺れが長時間放出される。長周期の揺れは波長が長いので遠くまで伝わるため、広範囲で強い長周期の揺れに襲われる。さらに、盆地状構造の大規模堆積平野では、平野固有の長周期の揺れが増幅され、平野内に振動エネルギーが留まり揺れが長く続く。各平野はその堆積層の厚さに応じて、揺れやすい周期（卓越周期）を持っており、関東平野は 6~8 秒、大阪平野は 4~6 秒、濃尾平野は 3~4 秒程度である。建物も、揺れやすい周期を持っている。建物の 1 次固有周期は、概ね建物階数に 0.1 秒を乗じた周期であり、高層化するほど長周期になる。結果として、地盤と共振しやすい建物高さは、平野によって異なる。

高層ビルの耐震設計では、建設サイトでの想定地震動に対して、地震応答解析により建

物の揺れを計算し、地震荷重を算出して、建物各部が大きく損傷しないことを確認する。こういった揺れに対して、どんな考え方で安全性を確認しているかが問題になる。

(2) 高層ビルを設計する地震動

我が国最初の高層建物・霞が関ビルが着工した1965年は、プレートテクトニクス理論が提唱された時期に重なり、地震の発生メカニズムも十分に理解されていなかった時代である。このため、設計では実際に観測された地震動を用いて、開発された電子計算機を利用して、簡単な地震応答解析によって検討していた。よく使われた地震動は、1940年インペリアルバレイ地震のエルセントロ地震動、1952年カーンカウンティ地震のタフト地震動、1968年十勝沖地震の八戸地震動である。当時は観測当初だったこともあり、長周期の揺れはノイズと考えられていたようで、地震動は短周期で揺れると多くの人が思っていた。3つの地震波で揺れの少ない周期が2秒だったこともあり、初期の高層ビルは2秒前後の周期のものが多い。

そもそも、強い地震動（強震動）を観測するようになったのは1930年代からである。1932年に、東京帝国大学・地震研究所の所長だった末広恭二が、強震動を観測できる強震計の必要性をアメリカで講演したことがきっかけになって、アメリカで強震計が設置された。最初に観測されたのは、1933年ロングビーチ地震の地震動である。

その後、地震学や地震工学の進展によって、地震発生や地震動生成のメカニズムが解明され、現在では、ある程度の精度で揺れを予測することができるようになった。とくに、兵庫県南部地震以降の強震動研究の進展

は著しく、地震は断層の破壊によって生じること、断層の大きさや破壊の仕方によって放出される地震波の強さや周期、継続時間などが決まること、震源域から揺れが減少しながら地震波が四方に伝播すること、軟らかい堆積盆地では揺れが干渉・増幅すること、などが明らかになった。現在ではこれらを考慮した強震動予測が行われている。

(3) 高層ビルの室内の揺れ

高層ビルの耐震設計では、想定する地震動に対して、構造的な損壊や、内外装材・設備の損傷を防ぐために、各階の変形の傾き（層間変形角）を1/100程度以内に収めるようにしている。逆に言えば、200mの高さの建物であれば、最上階では往復4m程度の揺れが生じるとも言える。200mの高さの建物の周期は4~5秒なので、揺れの速度は秒速3m程度になる。内閣府から公表された南海トラフ地震の長周期地震動予測では、大阪の周期6秒の建物の揺れ幅が6m程度と示されたが、これも同程度の速度に相当する。

高層ビルのように縦に細長い建物では、下層階は「せん断変形」が卓越するが、上層階は「曲げ変形」が加わる。水平の揺れは2方向に楕円軌道を描くが、上層階では、これに、曲げ変形による床の傾斜や上下動も加わる。窓際にいると、窓の外の風景が上下して見える。東日本大震災の際に大阪の高層ビルの最上階に居た人がインタビューで、「大きな揺れを感じるより 少しずつ 気がつけば本当に動かされているような感覚」「このまま折れて自分が真下に落ちて行くんじゃないか 恐怖を覚えたんですよね ジェットコースターで落ちる瞬間のイメージです」と話していたことが思い出される。

(4) 高層ビルの長周期地震動問題

高層ビルや免震ビルは、大企業の本社や公的施設、病院、大規模集合住宅に使われており、重要度が高いものである。しかし、我が国の耐震基準は最低基準であるため、高層ビルといえども、耐震性の上乗せは義務づけられてはいない。現在、全国に2,000を超える高層ビルがある。それぞれのビルには1,000人規模の利用者がいるので、長周期の揺れの影響を受ける国民は数百万人にも及ぶ。これは、県の人口にも匹敵する。従って、既存の高層ビルの共振の可能性を診断し、設計想定を超える揺れになるかどうかを判断し、必要に応じて改修を促す必要がある。とくに、分譲マンションなどの区分所有建物では居住者の合意形成が難しい。公的な支援や、住宅を販売・設計・建設した事業者の各種支援が望まれる。

(5) 長周期地震動に対する高層ビルのハード対策

高層ビルが強く揺れる理由は、減衰が小さいことにある。減衰が小さいと、時間をかけて大きく共振増幅し、揺れが収まるのにも時間がかかる。このため、長周期で長時間続く地震動が苦手である。すなわち、巨大地震時に、大規模堆積平野で大きな問題になる。そこに数多くの高層ビルが存在している。高層ビルの揺れを低減する方策は、地震動の卓越周期と建物の固有周期を隔離することと、減衰性能を向上させることにある。

震源から放出される地震波の周期を予測するのは困難だが、建物直下の地盤の卓越周期は調べられる。本来、地盤の卓越周期を避けた建物高さにすれば良いのだが、建築計画は一般に難しい。そこで役に立つのが「免

震」である。ただし、高層ビルは元々長周期なので、低層の建物に比べると免震効果は小さい。もう一つの方法は、建物に減衰を付加する「制振」である。建物内に振動エネルギーを吸収する部材を設置することで、揺れを速やかに抑制する。

地震後にビルを継続利用できるかどうかの判断は、建築構造技術者の不足故に時間を要する。建物に地震計を設置しておけば、継続利用できるかどうかを速やかに判断できるので有用である。

(6) 長周期地震動に対する高層ビルのソフト対策

高層ビルの上層階では、強い揺れで家具が転倒・移動するので、家具固定などの室内安全対策が必須である。揺れに翻弄されないようには手すりがあると良い。また、緊急地震速報や長周期地震動階級は役に立つ。高層ビルは、エレベータや電気・水道など各種設備に依存している。停電時はこれらが使えなくなるので、非常用の発電設備の設置が望まれるが、浸水予想地域では、上層階に設置すべきである。

また、エレベータ停止時には救急隊が高層階に向かうのは困難なので、非常用階段避難車の準備が望まれる。事業所では、事業継続のために、重要な機能の低層階への移設や、バックアップ施設の確保等が必要である。

大地震では、揺れが10分以上続き、余震も続発するため、長時間揺れ続ける。非常階段は火災避難を前提にしているため、幅が狭く地震後の全館避難は危険である。また、高層ビルが林立する場所では、ビル内の人間が全員地上に出ると、地上は満員電車のようになる。ビルからガラスなどが降ってくる危険

もあるので、ビル内に留まることが基本になる。

さらに、高層マンションの住民は、地元住民との関係が希薄な場合が多い。ライフライン途絶時に避難所にマンション住民が大量に押し寄せるとトラブルの原因となる。マンション内の上下階での助け合いや、食料・水・災害用トイレの備蓄を心がけておきたい。

既存建物の耐震性と耐震改修

(1) 色々な方法で検証される耐震安全性

建築物の耐震性の検証法は建築基準法施行令に規定されている。現在は、許容応力度等計算、限界耐力計算、エネルギー法、時刻歴応答解析の4種類が定められている。60 m以下の建物の設計で通常使われているのは、1981年新耐震設計法で導入された許容応力度等計算である。限界耐力計算は2000年に、エネルギー法は2005年に規定された計算法だが、今は余り使われていない。一方、高さ60 mを超える超高層建築物では、時刻歴応答解析が必須となっている。

構造計算結果については、建築確認により都道府県や指定確認検査機関などが審査する。大規模な建物については、指定構造計算適合性判定機関による判定も必要になる。一方で、小規模な建物（建築基準法第6条4号に規定される4号建築物）は、確認申請の労力軽減のため、審査が簡略化できる。すなわち、木造住宅などでは、建築士と建築主の責任において安全性を確認すれば、構造計算は不要になっている。

(2) 許容応力度等計算と地震荷重

最もよく用いられる許容応力度等計算は、

中小地震動に対する許容応力度計算と大地震動に対する保有水平耐力計算から構成されており、建物規模に応じて計算ルートが区分されている。中小規模の建物では、十分な耐力があることや、変形が過大にならないこと、構造的にバランスが悪くないことを確認すれば良い。これに対し、高さ31 mを超えるような大規模建物では、保有水平耐力計算により大地震動に対し終局時の安全性の確認を必要とする。

地震荷重は、各層で負担する水平力を層せん断力により定義している。 i 層の層せん断力 Q_i は、層せん断力係数 C_i とその層より上の総重量 ΣW_j の積で与えられ、 i 層の柱や壁はこの力に耐えるよう設計する。層せん断力 Q_i は上層の慣性力（水平加速度×質量＝水平震度×重量）の総和なので、層せん断力係数 C_i は、上層の応答の平均水平震度と解釈できる。

層せん断力係数 C_i は、標準せん断力係数 C_0 ×地震地域係数 Z ×振動特性係数 R_i ×層せん断力係数の高さ方向分布係数 A_i の積で与えられる。標準せん断力係数 C_0 は、標準的な建物の平均応答水平震度を示しており、中地震動と大地震動でそれぞれ0.2、1.0と定義し、中小地震動時には構造物は無損傷、大地震動時には構造損傷はあっても空間を確保し人命を守ることを原則にしている。

地震地域係数 Z は、地域による地震危険度の低減係数であり、東京・大阪・名古屋は1.0、熊本地震の被災地・熊本市は0.9、宇土市は0.8である。また、振動特性係数 R_i は、地震動の周期特性を表したもので、建物周期や地盤の硬軟による低減係数である。標準的な地盤（第2種地盤）の場合は建物周期が0.6秒以下では1.0、1.2秒では0.8であり、軟

弱地盤では長周期での低減率が小さい。層せん断力係数の高さ方向分布係数 A_i は、建物周期による建物の応答増幅特性の差を表し、最下層では1.0になる。建物が長周期になると上層での A_i が大きくなる。建物周期は、建物高さで規定され、鉄骨造は高さ(m)×0.03秒、鉄筋コンクリート造は高さ(m)×0.02秒である。高さ20mの鉄筋コンクリート造は0.4秒、高さ40mの鉄骨造は1.2秒となる。

A_i が最下層で1.0という意味は、建物の平均応答は建物周期によらず同じで、短周期の建物に比べ長周期の建物では、上層が大きく下層が小さなモード形となることを意味する。すなわち、中小地震動に対しては、平屋であれば、1階の揺れは200ガルだが、5階建鉄筋コンクリート造建物では1階は100ガル程度、5階は400ガル程度、10階建鉄骨造建物では、1階は50ガル程度、10階は400ガル程度になる。

このように、設計で考えている地盤の揺れは、建物の構造や高さによって50ガル~200ガルと大きな幅がある。震度5弱の下限が概ね60ガル、震度5強の上限が200ガル程度なので、中地震動では震度5程度を考えている。大地震動はその5倍になるので、250ガル弱~1,000ガル程度になる。300ガルは震度6弱の下限、1,000ガルは震度7の下限程度に相当する。本来、地震動の強さは、大地震の起きやすさ、震源からの距離、地盤の硬軟に依存し、建設地によって異なるものであるが、最低基準としての耐震基準は、これらを反映したものにはなっていない。

(3) 強度型と靱性型

新耐震設計法の考え方は、供用期間中に複

数回経験する揺れに対しては財産的価値を守るが、供用期間中に1度程度ある強い揺れに対しては人命を守れば良い、ことを原則にしている。後者は、プレート境界地震のように百年程度で繰り返し発生する地震による地震動であり、千年を超えて繰り返す活断層地震は対象にしていない。従って、活断層が動いた場合でも機能維持が必要な重要度の高い建物では、この地震係数を用いることは好ましくはない。

また、地震荷重を建物応答で規定しているので、応答増幅しやすい軟らかい建物では地震動を小さく評価していることになる。さらに、軟弱な地盤は揺れやすい。本来は標準せん断力係数を割り増すべきであるが、現状は、振動特性係数で波長の長い長周期の揺れを割り増している。これは地震時現象とは矛盾している。

すなわち、壁が多い強度型の建物は応答増幅が小さいので、ラーメン構造のような靱性型の建物に比べ強い地震動を想定している。堅い強度型の建物は、短周期で揺れ、振動エネルギーを地盤に逃がす地下逸散減衰効果も大きい。本来、強度型の建物は建物周期が短い、建物高さで一律周期を決めている現状は、強度型の建物では上層で大きめの地震荷重を考慮していることになる。さらに、低層の強度型の建物では、大地震動に対しても無損傷の設計を基本にしている。

すなわち、強度型の建物は、靱性型の建物に比べ耐震的实力は遥かに高いと判断される。これに対し、靱性型の建物では、大地震動では大きな変形を許容し地震荷重を低減している。この結果、構造躯体にもクラックなどが生じ、非構造壁や内外装材などが損壊する。過去の地震でも、壁の多い低層の建物

は、震度7でも殆ど被害が生じていない。

現状は、強度型と靱性型のどちらを選ぶかは、使いやすさやデザインとの兼ね合いで決められている。しかし、熊本地震のように、強い揺れを複数回受けても継続使用可能にするには、強度型の建物が好ましい。とくに、災害時にも重要な役割を果たす庁舎建物などでは、強度型の低層壁式構造が推奨される。

ただし、建物は構造躯体だけでできているわけではなく、非構造部材が沢山あるので、実際の建物の耐震的实力は、設計耐力よりは大きい場合が多い。また、地震動の卓越周期と異なる周期の建物は揺れが小さく被害を受けにくい。このため、震度7になっても壊れない建物は多くある。

おわりに

今世紀になって、世界で様々な事件が発生し、将来への不安が増している。我が国も、南海トラフ地震や首都直下地震の切迫性に加え、多大な債務、少子高齢化、気候温暖化など、多くの課題を抱えている。可能な限り、見たくないものも正視して、課題を解決していきたい。未来の子供たちのために、できる

限り被害を軽減したい。そのために、部分最適化を脱し全体最適化を目指し、“Think Globally, Act Locally.”の気持ちを持ち続けたい。評論家的に格好良いことを言う前に、地道に率先市民として防災対策を実践したい。何より必要なのは、耐震化、家具固定、水や食料の備蓄などの自助努力である。

筆者は最近、大切なのは、3×JAPAnだと考えている。3×「J」=自由な発想+地道さ+地元重視、3×「A」=頭+汗+愛、3×「P」=Player+Plan+Product、3×「An」=Antenna+Analysis+Answerである。自由な発想で地道に活動し地元を大事にするという姿勢、頭を使って戦略を練り汗をかいて実践し愛を持って語りかけ行動を促す活動、活動を支える人材（ひと）・作戦（こと）・成果物（もの）作り、的確に情報を入手し現状を分析し解決方策を生み出すこと、などである。中でも、地元に対する愛をベースに、具体的な解決策として成果物を作り出すことが、大切である。各地で、時代を超えた価値観を共有し、地域社会の多様性を尊重し、地域のルネサンスを夢見て、減災のためのシンクタンクとアゴラを作り、足元から3×JAPAnの活動を推進していきたい。