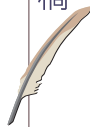


克災(5) 社会の抵抗力を つけて災害を凌ぐ

特
別
寄
稿



はじめに

現代社会は、科学技術の力によって、災害危険度の高い場所にも、大規模かつ安全な構造物を建設する力を手に入れた。たとえ災害外力が大きくても、それに負けない抵抗力をもった社会を築けば、災害を凌ぐことができる。「社会の抵抗力」を向上させる要点は、社会を構成する「ひと」「こと」「もの」の力の育成にある。

まずは、「ひと」の心身に生きる力をつけ、災害に備える意識や、災害に負けない体力と精神力を高める必要がある。逞しい人間の力が、事前の備えや災害時の避難の行動、災害後の対応力・回復力の源泉となる。以前と比べ人間の生きる力が弱くなったと言われる現代、学校に加え、家庭や地域での生きる力を育む「教育」が欠かせない。

「こと」に関わる抵抗力は、「組織力」と「情報力」である。地域や組織の総力を結集する共助の力は、災害時の助け合いに加え、災害後の復旧・復興の要である。かつての日本の農村社会が持っていた共助力を取り戻さなければならない。

また、災害様相を早期に把握し、人的・物的資源を最大限に活用するには、的確な災害情報は何より災害対応上重要となる。インターネットやセンシング技術、携帯端末やSNSなどが普及した今、災害情報の役割は大きい。

そして、「もの」作りは、被害を減じる直接的な抵抗力となる。そもそも、「もの」が壊れなければ、被害は生じない。災害を防ぐ堤防などのインフラ整備や、道路・鉄道などの物流、電気・ガス・水道・通信などのライフライン、事務所・商業施設・工場などの建築物、集合住宅・家屋などの住まいの耐震化が何より必要である。合わせて、誰でもすぐに行える家具固定などの室内の安全対策は早急に推進されるべきである。

「ひと」と「こと」の抵抗力については、災害時の対応力や災害後の回復力に関わることが多いので、災害後のことを考える次稿で議論



名古屋大学
減災連携研究センター教授
福和 伸夫
民間建設会社に勤務の後、名古屋大学に
異動。耐震工学・地震工学に関わる教育・
研究の傍ら、行政の防災施策立案や地域の
減災活動に従事。文部科学大臣表彰科学
技術賞、日本建築学会賞他を受賞。



兵庫県南部地震における建物の倒壊(神戸市中央区)(提供:朝日新聞社)

することとし、本稿では、「もの」である構造物、中でも主に建築物を中心としたハードの抵抗力について考えてみたい。

強固な構造物の大切さ

本来、建築物は自然界から人間の命や生活を守るために作られたものであり、かつてより、強固さが何よりも優先された。このため、4,000年前に作られたハンムラビ法典では、「家を建てたものは、建築が適切に行われなかったことにより家が壊れ、その住人を死なせることがあった場合には死罪に処す」と書かれていた。

また、2,000年前の建築家・ウィトルウィウスは、建築十書で「強無くして用無し、用無くして美無し、美無くして建築ではない」と述べ、何より優先するのは建物の強固さであり、使い勝手や見栄えはその次に考えることであるとされた。

わが国でも1923年関東地震の後、1926年に、耐震工学の創始者・佐野利器が、「然しながら、諸君、建築技術は地震現象の説明学ではない。現象理法が明でも不明でも、之に対抗するのが実技である。建築界は百年、河の清きを待つ余裕を有しない。」(「耐震構造上の諸説」と述べている。このように建築物の第一義は、命や生活・財産を守ることにある。地震現象が科学的に未解明でも、安全な構造物を作ることは可能である。

1933年昭和三陸地震津波の翌年1934年には、物理学者・寺田寅彦が、「文明が進むに従って人間は次第に自然を征服しようとする野心を生じた。そうして、重力に逆らい、風圧水力に抗するようないろいろの造営物を作った。そうしてあつぱれ自然の暴威を封じ込めたつもりになっていると、どうかした拍子に檻を破った猛獣の大群のように、自然があばれ出

して高樓を倒壊せしめ堤防を崩壊させて人命を危うくし財産を滅ぼす。その災禍を起こさせたもとの起こりは天然に反抗する人間の細工であると言っても不当ではないはずである。」(経済往来、「天災と国防」)と述べている。自然に対する畏れを忘却した現代社会への警鐘とも言える。

自然の力に対して謙虚になり、災害外力の特性をよく知った上で、ハード対策を考えることが防災・減災の基本である。そこで、本稿では、地震時の揺れに対して、構造物の抵抗力をつける方策について考えてみる。

地震力と抵抗力

構造物が地震の揺れで壊れないようにするには、構造物の「抵抗力」を、地震時に構造物に作用する外力「地震力」よりも大きくする必要がある。したがって、構造物の耐震設計の基本は、外力を小さくするか、抵抗力を大きくすることにある。

構造物に作用する外力(「地震力」)の大きさは、構造物の揺れ(「応答加速度」)に構造物の

重さ(「質量」)を乗じた力(「慣性力」)である。したがって、構造物が強く揺れたり、構造物が重いと、外力である地震力が大きくなる。

構造物の揺れは、地盤の揺れと構造物の揺れの積であり、揺れやすい地盤や構造物では外力が大きくなる。また、地盤や構造物はそれぞれ特有の揺れ方をするため、両者の揺れやすさが同調すると、「共振現象」により、揺れが大きく増幅される。

一方、構造物は、壁や柱などの耐震要素の強さと粘りによって、外力に抵抗する。建物が高層になれば、支える重さが大きくなるため、地震力が大きくなる。したがって、低層階では上層階に比べ多くの耐震要素が必要となる。

結果として、揺れにくい地盤に、揺れにくく、耐震壁の多い、軽くて低層の構造物を作れば、地震には安全と言うことになる。過去の震災でも、良質な地盤に建つ軽量の鉄骨平屋建て建物や、壁の多い低層集合住宅や学校建物の被害は微少であった。

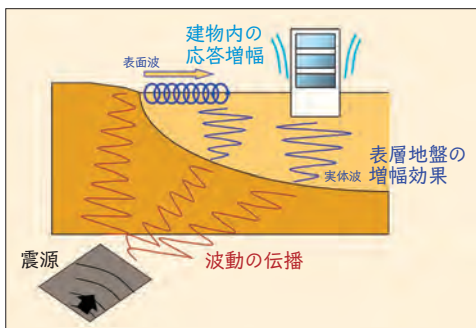
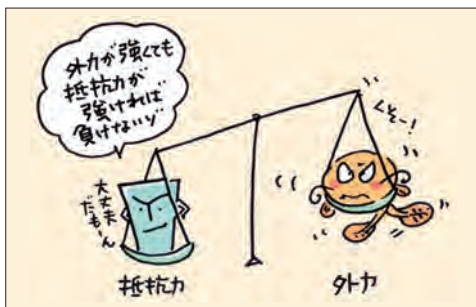
地盤の揺れ:「強さ」「周期」「長さ」

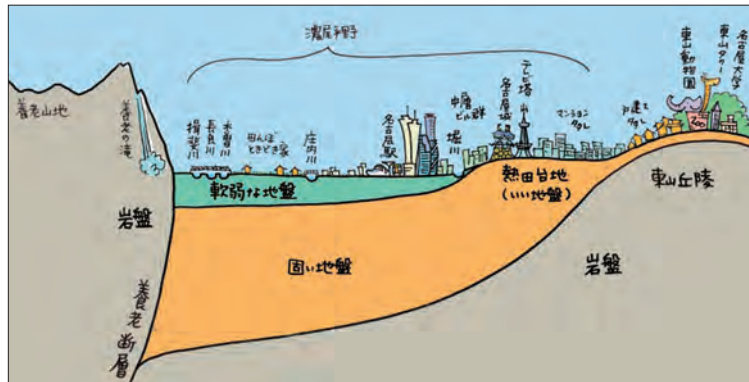
地震時の地盤の揺れの三要素は、揺れの「強さ」、「周期」、「長さ」である。

地盤の揺れの「強さ」は、地震規模が大きく、震源が近距離で、地盤が軟弱なほど大きくなる。したがって、プレート境界に近い太平洋岸や内陸活断層の近くの沖積地盤では、強い揺れに注意が必要となる。

地盤の揺れの「周期」は、震源で放出される地震動の周期、揺れが震源から建設地まで伝播する際に減衰せずに到達しやすい周期、建設地の直下の地盤で増幅されやすい周期などから定まる。震源で放出される地震波の周期は、地震により異なり、強く壊れるアスペリティの大きさや震源の破壊方向と建設地との位置関係によって決まる。一般に、規模の大きな地震ほど長周期の揺れをたくさん放出する。

震源から伝わりやすい周期は、揺れが伝わる経路の地盤構造に依存する。一般に、長周





「社会の抵抗力」を向上させる要点は、社会を構成する「ひと」「モノ」「カ」の力の育成にある。

期の揺れは短周期の揺れに比べて遠くまで伝わりやすい。また、P波やS波などの実体波(地震動の初期微動や主要動に相当)に比べ、地表近くを伝わる表面波は揺れが衰えにくい。表面波は震源が浅いと成長しやすく、それぞれの地盤は表面波を伝えやすい周期を持っている。結果として、震源が浅い場合、特定の周期の長周期の揺れが遠くまで到達しやすくなる。

これに対し、敷地地盤の周期は前2者に比べ変動が少なく地盤特有の周期を持っている。一般に、堆積地盤が厚く軟らかいほど、長周期になる。地盤は多数の地層が積層状に堆積しており、堆積層の厚さは場所によって異なる。山地などでは、岩盤が露頭しているが、平地は岩盤上を厚い堆積層が覆っている。新しく堆積した地層ほど軟らかいので、深い場所の地層ほど堅い。建築物の杭基礎を支える程度の堅さの基盤(工学的基盤と呼ぶ)は、深くても数十～百m程度の場所に存在するが、コンクリートのように堅い岩盤(地震基盤と呼ぶ)はより深い場所に位置し、関東平野・大阪平野・濃尾平野の三大平野では1,000m以上に達する場所もある。地盤の揺れやすい周期は地層ごとに複数存在し、三大平野の場合、工学的基盤以浅の地層で励起される周期は1秒程度以下、地震基盤以浅では数秒の周期となる。前者は一般建物の周期帯に、後者は高層建物の周期帯に対応する。

地盤の揺れの「長さ」については、大きな地

震ほど、震源断層の破壊に時間がかかるため、長い時間揺れが放出される。また、震源から離れた場所では、色々な経路で揺れが伝わるために揺れが長くなる。三大平野のように盆地状に堆積した地盤では、揺れのエネルギーが堆積盆地内にとどまりやすいため、さらに揺れが長くなる。

海溝型地震・内陸活断層地震と長周期地震動

南海トラフ巨大地震や2011年東北地方太平洋沖地震のようなマグニチュード(M) 8～9クラスのプレート境界で発生する海溝型の巨大地震と、兵庫県南部地震を代表とするM7クラスの内陸活断層の地震とでは、地盤の揺れ方に差がある。

前者、特に南海トラフ巨大地震の場合には、長い破壊時間ゆえの揺れの長さと同様に長周期地震動の放出、震源からやや距離があることによる揺れの伸長、さらに、南海トラフの陸側に位置する付加体による長周期地震動の揺れの通り道の存在、三大都市が立地する大規模堆積平野による長周期の揺れの増幅と伸長などにより、長時間長周期の揺れが懸念されている。堆積平野の揺れの周期はあらかじめ予測でき、東京、大阪、名古屋の中心市街地が位置する場所の周期は、それぞれ7～8秒、4～6秒、2～4秒程度である。このため、この周期を避けて構造物を作ることが大切になる。

一方、内陸活断層の場合には、断層直近で

は、活断層のずれに伴う直達波の影響が強く、短時間のパルス的な揺れとなる。残念ながら、パルス周期は活断層のアスペリティの大きさや破壊の仕方によって変動するため、周期を特定しての対策をとることは難しい。ちなみに、兵庫県南部地震の場合には周期1秒程度の揺れが、中越沖地震の場合には周期2秒程度の揺れが強く放出された。大規模堆積平野の場合には、平地と山地との境界や、台地と沖積低地との境界部に活断層が存在するケースが多いので、地形急変部に位置する構造物は断層近傍の強い揺れに加え、地盤の断層変位に対する注意が必要である。

構造物の揺れ:「周期」と「減衰」

構造物の揺れは、地震動と構造物の揺れやすい周期の近接具合で決まる「共振」の有無や、構造物の揺れにくさを表す「減衰」の大小で決まる。

一般に構造物の揺れやすい周期は構造物が長大で、構造物が重く軟らかいほど長周期になる。一般建築物の場合には、概ね、建物階数に0.1秒を乗じた周期で揺れやすい。

一方、通常の構造物の減衰は微小であり、むしろ建物の揺れが地盤を変形させて振動エネルギーを地盤地下に逸散する減衰効果の方が大きい。このため、堅く低い構造物の減衰は大きく、軟らかく変形しやすい高層の構造物では減衰が小さくなる。共振時の構造物の揺れの強さは、減衰の大きさに逆比例して増

幅し、共振が育つのに必要な波の数は減衰が小さいほど長くなる。

この結果、長周期で揺れる高層ビルは、揺れが育つのに長い時間が必要であり、共振時には地盤の揺れに比べ10倍以上の揺れになることもある。また、いったん揺れると揺れが収まりにくく、長時間揺れ続けることになる。このため、長周期で長時間の揺れが苦手である。

長時間長周期地震動が生じやすいのが、南海トラフ地震のような巨大地震時の大規模堆積平野であり、そこに高層ビルが林立していることから、高層ビルの長周期地震動問題が、クローズアップされている。ちなみに、右図の赤色の地域が長周期で揺れやすい地盤であり、大きなドットが高層ビルの位置、小さなドットが免震建物の位置である。長周期で揺れやすい地盤に長周期で揺れやすい建物が建っている現状は明らかに不合理である。

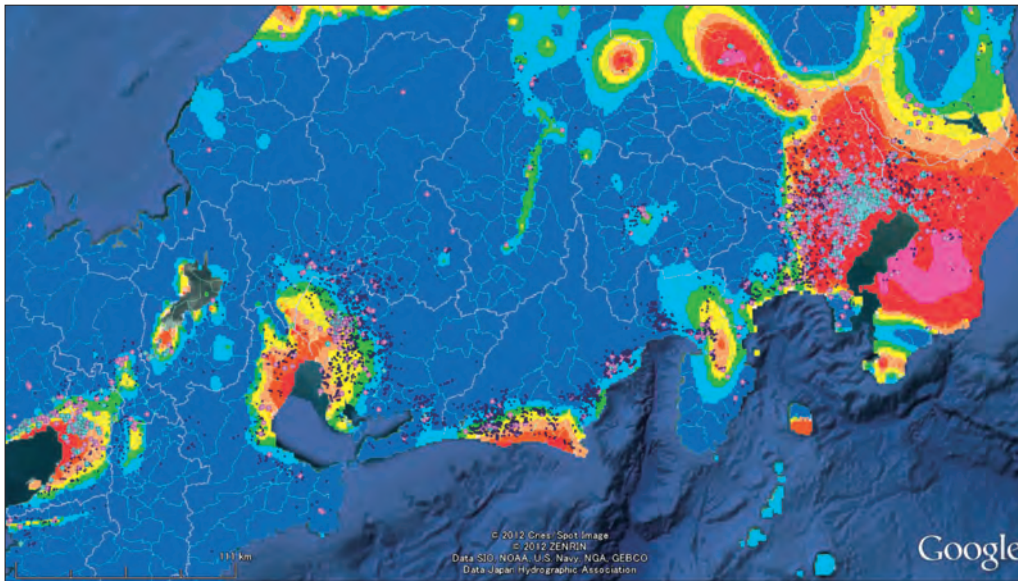
免震と制振

構造物の揺れは周期と減衰に支配されるので、構造物の揺れを減じるには、構造物の周期を地震動の周期から隔離するか、構造物に人工的に減衰を付与すればよい。これを人為的に行ったものが「免震」と「制振」である。

一般に、「免震」は、構造物と地盤との間(場合によっては構造物の中間階)に、軟らかい積層ゴムや減衰材であるダンパーなどの免震装置を挿入する。積層ゴムにより構造物の周期を長周期化して共振を避け、ダンパーにより万一共振しても揺れが過大にならないようにしている。構造物を長周期化して共振を回避する方法なので、長周期で揺れやすい地震動や長周期で揺れる高層ビルでは免震効果は小さい。

一方、「制振」は、変形しやすく減衰の小さい高層建物に向けており、構造物各所に揺れを抑制する減衰材を付加する。制振には、建物の揺れに応じて制御力を生み出すアクティブ型の制振と、粘弾性体やオイルダンパーを設置するパッシブ型の制振がある。





地震の揺れに負けない構造物の基本は、「揺れない、軽い、強度のある、粘り強い構造物」ということになる。

耐震

構造物の耐力は、強さ(強度)と粘り(靱性)の積で決まる。構造物躯体の強靱性によって地震力に抵抗するのが耐震である。強度が大きくて脆い構造物もあれば、強度は小さくても損傷後も粘り強く変形する構造物もある。バリッと割れる堅いビスケットと、軟らかく変形するソーセージを思い浮かべると良い。

強度を代表するのが鉄筋コンクリートの耐震壁であり、粘り強さを代表するのが鉄骨の柱である。ちなみに、柱と梁で構成した構造をラーメン構造と呼ぶ。例えば、下敷きを手にとって、面に直交して押すと簡単に変形するが、面に平行に押ししても下敷きはビクともしない。耐震壁は、平行方向の力に対して大きな抵抗力を持っている。一方、竹ひごはいくら押ししても、大きく変形してなかなか折れない。原子力発電施設は壁式構造の剛構造、超高層ビルはラーメン構造の柔構造の代表と言える。

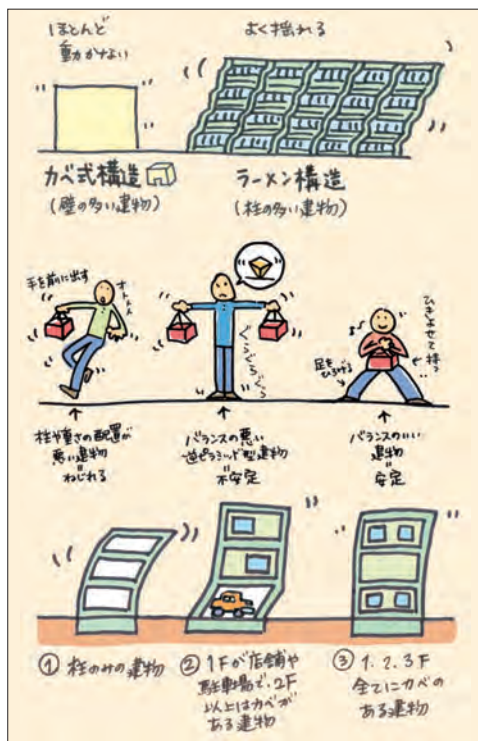
耐震性の良し悪しは、建物のバランスによっても異なる。次図のように、人間は足を広げ踏ん張っていれば安定するが、足を閉じていると不安定である。荷物を持つときに手を広

げたり前に出したりするとバランスが崩れる。これと同じように、建物の高さ方向や平面方向の重さや堅さのバランスが悪いと、地震に対して弱くなる。例えば、1階部分を駐車場や商店にして、1階の壁量が不足したり前面道路側の開口が増えると、耐震性が低下する。

建物を支持する基礎のことも忘れてはいけない。建物の重さをしっかり支え、地震時にも安定している必要がある。地盤が軟らかいほど、また建物が重いほど堅固な基礎を作る必要がある。条件が厳しくなるに従って、独立基礎、布基礎、マット(べた)基礎、杭基礎と使い分けが行われる。特に液状化が心配される場合には、堅固な支持基盤に達する杭基礎が必須である。

構造の使い分け

地震の揺れに負けない構造物の基本は、揺れない構造物、軽い構造物、強度のある構造物、粘り強い構造物ということになる。しかし、建築物は、安全性だけを考慮して作るわけではなく、建築物の用途や居住性、経済性、敷地条件なども勘案して設計が行われる。そのため、様々な形状、構造材料、架構形式、構造が



使い分けられる。

まず、建物の平面的な形や高さ、立面形状は、敷地形状や用途、意匠性など計画的な理由で決められる場合が多い。

構造材料としては、一般に木材、鉄、コンクリートが利用されるが、これらは、建物高さや用途で使い分けられる。木材は戸建て住宅に、鉄骨は工場や商業施設、事務所ビルに、コンクリートは集合住宅や学校建築によく用いられる。木材は、重さに対する強さの比である比強度が鉄骨やコンクリートよりも高い高性能の材料であり、木材資源も豊富なことから、わが国では木材が多用されてきた。しかし、火災や、腐朽、反りの問題もあって、近年では一部を除いて住宅以外には用いられていない。戸建て住宅では、従来は柱・梁・筋交で構成した軸組構造が多用されてきたが、最近では、面材を利用したツーバイフォー(枠組壁構造)も増えてきた。コンクリートは鉄に比べ比強度が低く、性能の悪い材料であるが、逆

に低価格で性能が悪い分、多くの材料を使うため、遮音性や断熱性に優れている。このため、中層以下の集合住宅や学校建築は鉄筋コンクリート造が多い。近年になって、コンクリートの高強度化が図られたため、高層のタワーマンションも増えてきた。

架構形式には、壁式構造、ラーメン構造、トラス構造などがあり、用途によって使い分けられる。ラーメン構造は、壁が少なく空間を自由に使えるため、事務所ビルや商業施設によく用いられ、壁式構造は住宅境や教室境に壁が必要な集合住宅や学校建築に用いられる。トラス構造は、体育館などの大空間構造の屋根に良く利用される。鉄骨造のブレースや木造の筋交も耐震壁と同様の役割を果たし、ラーメン構造に比べ壁式構造の方が強く変形しにくい。最近、ガラスで覆われた純ラーメン構造の建物を散見するが、地震時の変形が大きくなりがちで、乾式壁やガラス、扉などの損傷が生じやすく、災害後の機能維持が困難となる場合がある。

構造形式としては、耐震構造に加え、免震、制振などがある。防災拠点や病院など、地震災害後の拠点となる施設の場合には、揺れが小さい免震構造が採用されることが多い。また、2003年十勝沖地震や東北地方太平洋沖地震で長周期地震動問題が話題になったため、近年では、多くの高層建物で免震や制振が導入されている。

建築耐震基準

一般建築物の耐震設計では建物の揺れを前提にしては設計しておらず、耐震基準で規定された静的な力に対して構造計算が行われている。したがって、地盤と建物の共振などを考えた設計はしていない。建築基準法(1950年制定)の第1条には、「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。」と記されている。すな

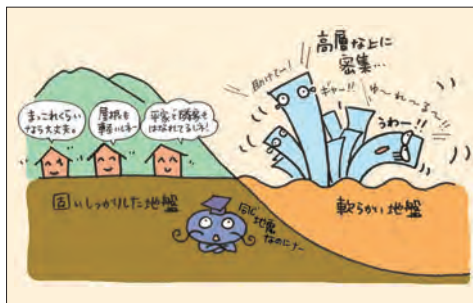
わち、最低限守るべき耐震基準を定めたものであり、決して、震度7の強い揺れまで国民の命を保証しているものではない。

建築基準法施行令では、多少の構造被害は許容しても人命を守ることを検証する極めて稀な地震に対する地震力として、高さ60m以下の一般建築物では、標準せん断力係数1.0以上と定めている。これは、建物の平均応答加速度として980ガルを考えることを意味する。多少の低減係数はあるが、原則、地盤の硬軟や建物規模・高さには依存しない。

墓石のような剛構造の建物であれば、建物内で揺れが増幅しないので、地盤でも980ガル(震度7の下限)相当の揺れを考えたことになる。一方、中高層のラーメン建物のような柔構造の場合には、建物は地盤より強く揺れる。例えば、揺れが4倍に増幅すれば、想定する地盤の揺れは250ガル程度(震度6弱の下限)でしかない。このように設計で想定している地盤の揺れは、建物の堅さによって異なる、一般に、壁の多い建物は耐震的余裕度も高いので、現行耐震基準では、堅い建物ほど耐震性能が高いと考えられる。これは、兵庫県南部地震で、建物階数が高いほど建物被害率が高かったこととも符合する。

地盤の硬軟による揺れの強さの違いも耐震基準上は考慮されていない。一般に、洪積台地上の低層建物と比べ、沖積低地上の中高層建物は強く揺れる。したがって、昔ながらの風情の田舎と中高層ビルが林立する大都市とでは、地震被害の様相が全く異なることが予想される。多くの人たちが気づいていない意外な落とし穴だ。

我が国の耐震基準は、1968年十勝沖地震、1978年宮城県沖地震、1995年兵庫県南部地震などの地震災害を経験する中、1971年、1981年、2000年に改定されてきた。特に、1981年の改定では、新耐震設計法が導入され、終局強度型の設計方法が取り入れられた。また、建物の揺れ方の違い(建物高さによる高さ方向の揺れ方の違い、高さ方向の剛性バランスの影響、



平面的な偏心ねじれの影響、構造方法による粘り強さの影響、地盤による長周期での揺れ方の違いなど)を簡易的に考慮するようになった。兵庫県南部地震でも1981年以前の建築物の被害が大きかったことから、1981年以前の建築物に対しては、耐震改修促進法により耐震改修の促進が図られることになった。

バリューエンジニアリングと建築物の耐震性

価値あるものを経済的に実現する方法として、バリューエンジニアリング(VE)という考え方がある。しかし、VEでは、発注者の価値観によって、作られる構造物の抵抗力は自ずと異なる。万一、発注者が、経済性や便利性、見栄えを重視したとすれば、法基準ギリギリの安全性にして低コスト化することが合理的だと考え、科学技術を使って合法的に躯体を削る可能性がある。駅前の広い土地に、できるだけ延床面積が広く、設備を整え、見栄えのする建築物を、短工期かつ低コストで完成させることを優先すれば、どうなるか考えてみたい。私たち社会の価値観が構造物の安全性を決めていることを忘れてはいけない。マンションなどを購入する場合、一生涯の買い物なので、ぜひ安全性に留意して選んでほしい。

巨大地震による被害を軽減するには、全ての国民が災害を減らす努力をするしかない。その最も大事なことが、耐震化である。しかし、家屋の耐震化は遅々として進まない。災害を我がことと思い、備えないことが恥ずかしいと感じる文化を作っていく必要がある。

災害を我がことと思い、備えないことが恥ずかしいと感じる文化を作っていく必要がある。