

耐震安全性
非構造部材

地震被害
対話

耐震性能メニュー

ABSTRACT: A basic concept about safety in buildings to natural disaster is described in this paper. The various natural loads of earthquakes, typhoons and snowfalls act on a building. An earthquake is most influence load to safety of building structure. Because we cannot expect the scale of load and we cannot pay for the cost unlimitedly to safety, it's impossible to get complete safety. Absolute safety in a building does not exist, and the safety in a building is relative and successive by the actual situation. The damage level which corresponds to each is regarded as 2 stages of earthquake load by the Building Standard Low of Japan. As other approach, we can arrange a grade of safety for earthquake and estimate a damage risk caused earthquake disasters based on event probability of an earthquake and the degree of damage. Seismic performance menus of building are proposed by several associations and are useful. There are several types of structure systems to resist against earthquake, which are called "rigid structure", "toughness structure" and "energy absorb structure". The safety of building structure depends on acceleration and horizontal displacement of the structure which are ruled by the structural type. Detail design is important for safety securement of the structure. Much damage of non-structural element became clear by recent years' earthquakes. It's necessary to consider safety of non-structural elements and finish materials as well as safety of structural members to secure safety in a building. People need to know adequate information about seismic resistant design to get relief. It is important that a client discuss with a structural engineer and understand safety of the building.

1. 建築と災害

構造設計の目指すことは、建築のデザイン性・機能性を追求するとともに一方で経済性や安全性の配慮も行い、矛盾する条件の中でバランスを考えながら最適な構造をつくりあげていくことである¹⁾。安全性に関しては最も重要な要素であるが、社会から要求される安全性は時代とともに変わり、近年ではその要求が高まってきているともいえる。

建物の安全性に関わりのある荷重・外力を考えてみると、常に建物に作用している固定荷重・積載荷重は重力に起因するものであり比較的把握しやすいものであり、この他に一時的あるいは短期的に発生する自然界から作用する外乱がある。この外乱は建物にある種の影響を与え、建物が損傷したり人間や家財に被害が及んだりすると“災害”となる。

外乱として考えられるものとしては、先ず地震である。安全を考える中で最も大きな影響があるのは地震であるといってもよい。地震によってさまざまな現象が起り、建物が揺すられることによる倒壊、損傷などの被害、津波による建物倒壊や流失の被害、地盤の液状化による被害が生じる。小さな地震は頻繁に発生しているが、巨大な地震になると頻度は極めて小さく、いつどこで生じるかの予測も難しい。台風は頻繁に生じており最近は進路

や規模などが予測されるようになってきているが、風圧力により屋根や外装材の被害が生じ、また大雨に伴う土砂災害により建物を支えている地盤そのものが被害を受けることもある。降雪は毎年冬期に生じる現象であり確率的な荷重として把握されているが、ときおり過去の統計から推測できないような積雪により被害が生じることがある。この他にも竜巻による被害が時折発生しているが予測や対応はほとんどできていない。また火山の噴火によっても被害が生じる可能性がある。

2. 建築の安全とは

自然からの外乱を受けた際に建築にも人間にも何事も起こらないことが究極の安全であるが、それを実現することは極めて難しい。その理由として、先ず、災害はその時期や大きさを完全に予測することができない。台風、豪雨、大雪などは事前にある程度の予測をすることができるが、巨大地震、巨大噴火などについては予測はほとんど不可能である。地震や火山活動などは周期性を持っているとも考えられているが、その周期は極めて長いため、人類が記録に留めてから今日までの時間よりも周期が長いものがあるならば予測の精度は極めて悪く、実質的には予測不能である。また、巨大災害になるほど頻度が小さいため、建物が存在中には大きな外乱は生じない

ことも多い。建築をつくるには機能・安全・コストの要件を考え合わせる必要があり安全性だけを追求してつくることはあり得ず、安全性確保にかけられるコストには限度がある。建築がどの程度の災害に遭遇し、その時にどのような状態となるのかのリスクを許容し、災害の大きさによっては損傷が生じることはやむを得ないとしなければ現実的に建築は成立しない。

どの程度の外乱を考えるのかが悩ましい。建築基準法では、経験に基づいて最低限の安全確保として外乱の大きさや被害の程度を決めごととして定めているが、実際にはそれ以上の外乱が生じることがある。学術的な知見に基づき外乱の大きさを決めることができそうであるが、例えば地震に関してみても、地震観測網の整備や新たな活断層の発見、地震発生モデルの見直しなど知見が増えればそれに応じて考えるべき外乱の大きさが増えることもある。社会的合意による決めごととして、起こりうることを認識した上で地震荷重を決めることがよいと思われるが、社会の状況の変化により決めごととしての地震荷重の大きさが変わることがある。以上のことから安全に関しては以下の認識を持たざるを得ない。

- ① 絶対の安全は無い。可能なことは確率的に把握しうる安全の度合い、相対的に比較できる安全の度合いを推測することである
- ② 安全の度合いは連続的なものであり、境界線を明確に引けるものではない
- ③ 安全を考慮することは災害の頻度に応じて許容される状態を認めることである

3. 建築構造の種類と安全性

以下では地震に対しての安全性に限定して話を進める。建築基準法の第一条には、「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、もって公共の福祉の増進に資することを目的とする」とある。具体的な目標は施行令、

告示まで掘り下げないと分からないが、2段階の地震動レベルに対してそれぞれ損傷防止、倒壊防止を目指す認識されており、きわめて希に生じる地震動に対してはある程度の建物被害が許容できるものとして、最低基準として示されているものである。地震動のレベルは経験的に決められた意味合いが大きいですが、前述したようにさらに大きな地震動が発生することもある。

建物の耐震性能とは、建物に入力された地震力のエネルギーを構造体の各所でエネルギーとして吸収できる性能と考えることができ、静的な挙動で考えた場合には、構造体の強度と靱性によって決定される。靱性とは構造体が生じ得る塑性変形の大きさを示す指標であり、十分に強度を確保した構造を「強度型」、強度は小さいが十分に靱性を確保した構造を「靱性型」と呼ぶ(図1)。強度型の構造は主に低層の建築物で可能な構造形式であり、RC造の耐震壁や鉄骨ブレース構造など強度の大きい耐震要素を用いるものであり、構造物の塑性化による靱性の効果の期待が少ないものである。強度型の建物は地震時の変形が少ないことが長所となるが、一方で応答加速度が大きくなる。

これに対して靱性型は構造体が塑性化することによるエネルギー吸収を期待するものであり、主にRC造、SRC造や鉄骨造のラーメン構造などである。靱性型の構造は構造物の塑性化は避けられないが、どの部位を塑性化させるかを考え、部材の塑性変形能力を発揮するようなディテール設計が必要となる。靱性型は強度型に比較して応答加速度は若干減るが水平変形が大きいこととなる。

実際には強度型と靱性型の中間の構造が存在し、靱性の大きい構造要素が組み合わされている場合はそれぞれの強度の足し合わせとすることができるが、靱性の少ない構造要素がある場合にはその要素の変形性能で限界となるため他の構造の靱性が十分に発揮できないこともある。

最近では修復性を考慮して主体構造の塑性化はなるべく

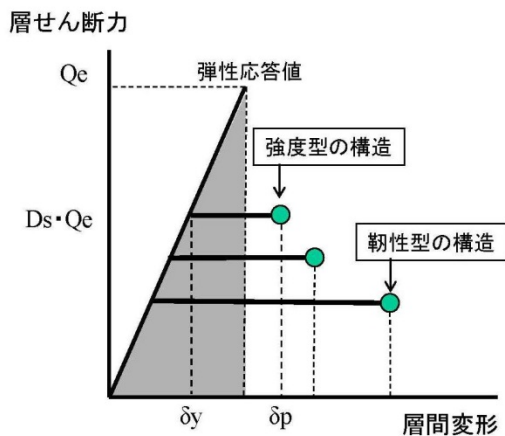


図1 強度型・靱性型の荷重変位関係

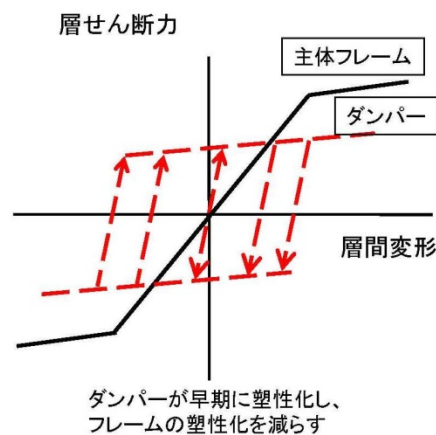


図2 エネルギー吸収型のメカニズム

く避けるべきとの考えかた、いわゆるエネルギー吸収型と呼ばれる構造が増えてきている（図 2）。特定の部位（ダンパーなど）でエネルギー吸収を図り他の部位をほぼ弾性範囲に留める構造であり、ダンパーが分散化されている「制振構造」や、免震層にアイソレータやダンパーを配置し、長周期化とエネルギー吸収により上部構造の塑性化を防ぐ「免震構造」があり、いずれも地震時の挙動は明快である。

主体構造の耐震性能は構造計算によって示されるが、構造種別の違いによって構造計算上での安全は同じであっても実質上の安全性が異なることがある。例えば住宅を例にとってみると、鉄筋コンクリート壁式構造の住宅と鉄骨造ラーメン構造の住宅、つまり典型的な強度型と靱性型の建物を比べると、それぞれ基準法にしたがった耐震設計を行って同等な安全を有するとされたものが本当に同じ耐震性能と言えるのだろうか。ごく希な地震時に倒壊しないというクライテリアを満たすことにおいては同じかもしれないが、地震時の変形、非構造部材の損傷、修復の度合いなどを考えると、違いがあるのではないかと思われる。

また、安全性とは構造計算だけで表現されるものではなく、性能を発揮するためのディテールの設計や施工も不可欠である。JSCA（日本建築構造技術者協会）では東日本大震災の被害の分析を行い、建物の安全性を高めるためには局所的な構造やディテールへの配慮が重要なことを提言した²⁾。以下に要点を示す。

- ① 建物各部の変形を意識した設計をする
 - ・ 本体構造に取り付く付属部（車路スロープなど）は変形差を考慮した設計をする
 - ・ 大規模な RC 造の建物で屋根が S 造の場合には、屋根を支える RC 柱がそれぞれ個別に振動しようとする現象があり、接合部に作用する力を評価する
 - ・ S 造柱の露出柱脚では、ベースプレートがスラブ下に設置されることがあり、アンカーボルトの伸びでベースプレートが浮き上ることによる床スラブの破壊を防ぐ
- ② 振動の増幅の考慮
 - ・ 主体構造の頂部に取り付いている突出物（塔屋や煙突など）は振動が増幅するため、実状にあった地震力を想定する
 - ・ S 造の大きな平面を有する建築で妻面にブレースなどの剛性の高い構面があり、屋根面の剛性が不足する場合には、振動の増幅を考慮して水平ブレースの設計を行う
- ③ 構造ディテールの配慮
 - ・ 鉄骨柱などのベースプレート下部の充填モルタルの不備が被害を招くことに留意する
 - ・ 構造スリット部はタイル貼りなど仕上げ材も追従性のある納まりとする
 - ・ エキスパンションジョイントのローラー支承は適切な

摩擦係数のものを用いる

- ・ 免震構造の免震クリアランス部に設ける可動金物は 3 次元的な挙動を確認する

4. 耐震性能のグレード

前述したように安全の度合いは連続的であることから、耐震性能目標を一律とするのではなく地震の発生頻度と建物の被害状況の組み合わせによって建物の耐震性能を決めていくことが考えられる。この手法は「性能設計」と呼ばれるものであり、専門家が建築主の要求性能や与条件を把握し、助言を行い建築主との協議に基づき安全性能のグレードを決めることでもある。これを具体的に表現したものとして、さまざまな耐震性能メニューが提案されている^{3), 4), 5)}。性能を検証するためには目標値を工学量に置き換えることが必要となる（図 3）。

図 4 は（一社）日本建築構造技術者協会が提案している性能メニューであり、横軸に地震外力の発生頻度と大きさを縦軸に被害程度を示し、基準級、上級、特級などのグレードによってその関係が変わりうることを示している。この図では地震の発生頻度と大きさの関係については東京を例にとって示しているが、本来は地域や地盤によって異なるものである。基準級の下限が建築基準法で規定している最低レベルの性能と位置づけられており、いわゆる“稀な地震”における損傷防止と“きわめて稀な地震”における安全確保となっている。グレードを高めることは同じ大きさの地震に対して被害状況を減らすことである。被害の大きさは“軽微な被害”、“小破”、“中破”といった表現となっているが、この言葉の意味するところを一般に人たちと共通認識を持つことが必要である。性能グレードで想定している被害は想定できる最大限の被害としての位置づけであり、必ず想定した被害が生じるような設計をするわけではない。

性能のグレードを高める別のやり方として、地震外力を割り増して設計する方法があり、住宅の品質確保の促進等に関する法律による性能表示制度で利用されたり、

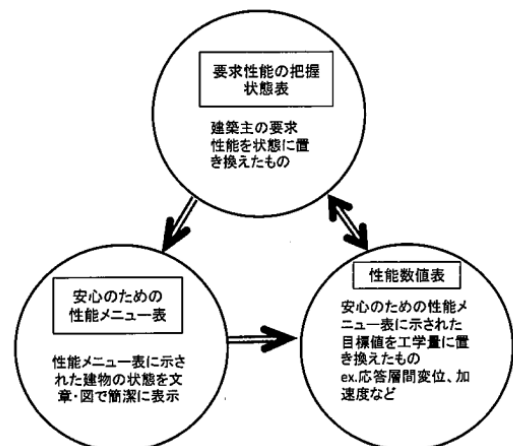


図 3 耐震性能メニューと工学量の関係⁴⁾

重要度係数として考慮されたりしている。直接的に性能をイメージした設計ではないが、相対的なグレードの違いを表現した設計を行うものであり、図の中で等級1、等級2、等級3として表示されている。

性能設計は想定する地震動に対して建物の被害の状況を決めることであるが、さらに進めた手法として、より具体的に想定される地震被害を金額に換算して示すことが行われている。震源や敷地の特性を考慮して起こりうる地震動の大きさ（通常は地表面最大加速度）を確率的に評価し、一方で建物情報から地震動の大きさに対応して損失額を評価し、これらを組み合わせて損失リスクが確率的に評価できることとなる（図5）。図中には2つの建物の算出例を示している。この手法が具体的に採用されているものとして、地震時予想最大損失率すなわち

「地震 PML (Probable Maximum Loss)」がある。通常は50 発生超過確率 10%の地震動として再現期間 475 年相当の地震動が採用され、建物価格に対しての損失金額の割合が示される。

修復コストが把握できるとすると、インシヤルコストとの組み合わせによりトータルコストで評価することができる。図6は建物耐力とトータルコストの関係を示したものであり、耐力を大きくするとインシヤルコストは増えるが一方で修復コストは低下する。この考え方によるとトータルコストが最小となる耐震性能レベルがあることになる。

リスクをコストで評価する手法は判断基準が数値で表されるため歯切れがよいが、予測の精度について認識しておく必要がある。入力側の評価としては、震源を想定

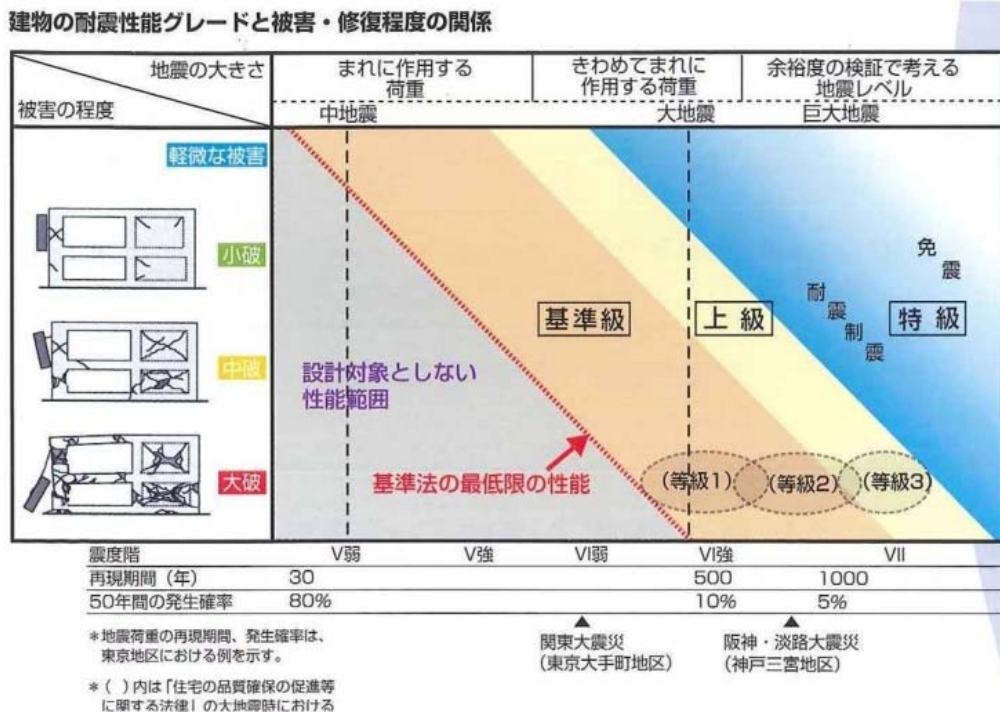


図4 耐震性能メニューの一例³⁾

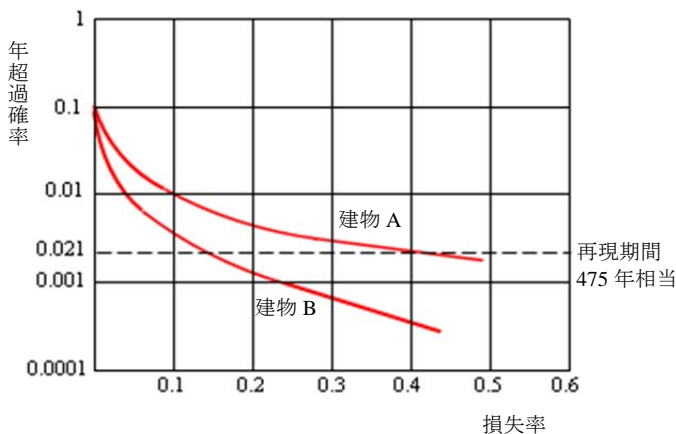


図5 地震 PML の概念図

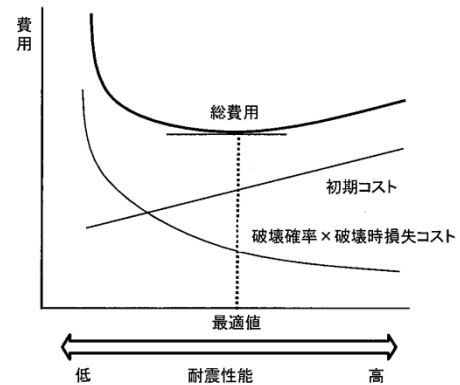


図6 建物耐力と費用の関係⁶⁾

し、地盤の特性を考慮して建物に実際に生じる地震力を想定する方法が用いられるが、震源や伝搬経路はある仮定でつくられパラメータの数字を変えると地震動は大きく変わし、巨大地震の確率的な評価の精度には限界がある。敷地での地震動が予測できたとしても地盤と建物の相互の関係により建物に影響を与える地震動の大きさは異なる。以上の原因によるばらつきがある。

建物側では、地震動に対しての構造物の損傷の予測の精度は構造物の種類によって違いがある。建物の損傷箇所を意図的に制御した免震構造や制振構造、あるいは時刻歴解析を行う超高層建築などでは予測の精度が高いが、一般の耐震構造では応答加速度や応答変形を明確に得られないため構造物の挙動の予測精度は低下する。

いずれにしても建物の挙動を被害額との関係は統計的に決められたものであり、個別の建物を考えた際にはばらつきが生じる。リスクが数値化されて示されてはいるが相対的な評価値ととらえるべきと思う。

5. 建築全体で考える安全性

従来は建築の安全は構造体のみが注目されてきたことが多かったが、近年の地震被害の教訓として主体構造だけではなく非構造部材、さらには仕上げ材、家具まで建物全体としての安全を考えることの必要性が認識されてきた。地震時の人的な被害は二次部材の損傷や家具の転倒などによって引き起こされることも多く、建物側での配慮以外にも家具や什器の転倒防止を行うことにより実質的な安全の確保ができる。

主体構造と非構造部材、仕上げ材の安全性とは関連が深い。強度型の建物は地震時の変形が少ないことが長所

となり、一方で応答加速度が大きくなる。靱性型はその逆に応答加速度は若干減るが水平変形が大きくなる。加速度の大小は家具の転倒などに影響を及ぼし、水平変形の大小は仕上げ材の損傷に影響を及ぼし、主体構造の選択と非構造部材の耐震安全性確保の条件が関連している。

非構造部材の安全性確保に関しては技術的に解決しなければならないことも多いが、誰が何を行うのが従来は明確ではなく、設計や施工の取り組みについても改善が必要である。非構造部材の安全確保は構造設計者の努力だけではなく、意匠設計者、設備設計者、施工関係者など多くの関係者の協力によって達成される。JSCA では非構造部材の安全性確保に際して必要と考えられることとして下記のような提言を行った⁷⁾。

① 構造設計者の役割

- ・PC版やALC版などの非構造部材の支持部材や大規模天井の支持部材、特殊な外装の設計を行う
- ・非構造部材の設計に際しての設計外力や建物構造体の変形の情報、また非構造部材の取付け方法についての助言を意匠設計者・設備設計者や施工者へ行う

② 意匠設計者の役割

- ・一般的な非構造部材の設計と取付け方法の決定は、意匠設計者と施工者が行う

③ 設計図書を作成

- ・施工段階で最終決定されるものについては、耐震性能を確保するための仕様を設計図書に明記する

④ 施工段階で配慮すべきこと

- ・非構造部材の最終決定に際しては、構造的な判断ができる者が施工図や施工の確認を行う



図7 パンフレット表紙

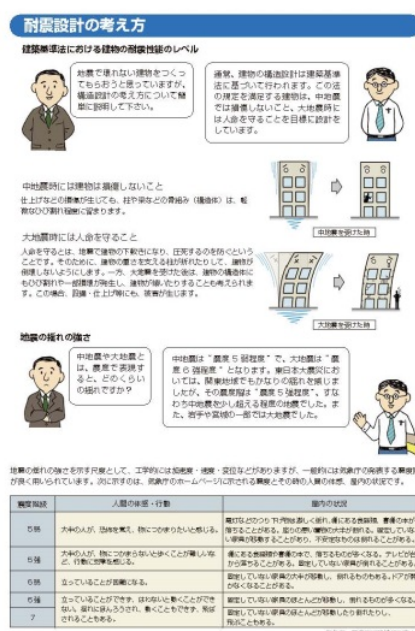


図8 パンフレットの内容の一部



6. 対話が生み出す安全・安心

安全は相対的であり完全な安全を得ることはできないが、リスクを知ることによって安心を得ることが可能であり、それを実現するためにはクライアントと専門家の対話が不可欠である。社会学者の中谷内一也は、「安全。でも安心できない・・・」という本において、「安全が低下した状態は不安を招くが、安全は必ずしも安心をもたらすとは言えない」と書いている⁸⁾。高い安全度を求めていく人たちは、安全の内容がだんだんわかってくると、わずかな確率であっても完璧な安全がないということがわかると、かえって安心ができない。むしろそういう情報に鈍感な人のほうが安心できるということである。しかしながら、安心を得るためには必要な情報を得、その上で専門家を信頼することが必要である。

平成 17 年の耐震強度偽装事件を契機に構造設計者の存在が社会によく知られるようになったが、構造設計者とクライアントが構造の性能や構造設計の内容について語りあう場が十分に生まれたわけではない。平成 23 年の東日本大震災は一般の人たちが建物の安全を考える機会となり、想定される地震とはどのようなものか、その際にどのような被害が生じるのか、またそれが致命的なものなのか、継続して建物を使用できるのかなどといったことについての関心が高まったと言える。建築の安全・安心は、法律に頼るだけではなく、クライアントと設計者の対話により実現していくことが理想である⁹⁾。

JSCA では、耐震設計や構造設計に関する理解を深め、安心できる建物の設計に生かすため、パンフレットを作成して公表した¹⁰⁾。パンフレットの内容は「耐震設計の考え方」、「構造設計者の役割」、「構造設計とは」、「性能グレードについて」、「契約・保険・設計料」の 5 つの項目から成っており、建築主にとって安全で安心な建物を造るための基本的な事項を盛り込んでいる (図 7,8)。

パンフレットはクライアントと設計者の対話のツールとして作成したものであり、このようなツールを利用した対話によってこそ安全・安心が得られる。

7. おわりに

科学技術が発達して人間の生活は豊かになったが自然の猛威を完全に封じ込めることはできていないし、今後も不可能であろう。自然と共存しその上で安心できる環境をつくっていくことが必要である。本論では安全で安心できる建築、構造とは何かについて考えてみたが、ここで主張したかったことは以下のことである。

- ・絶対の安全は無く、安全の度合いは相対的、連続的なものである
- ・安全は機能、コストなどのバランスで決まることもあり、安全にかけられるコストは限定される
- ・安全性は数字によって示されるものもあるが、構造の

種類によって実質的には違いがある

- ・耐震性能にはグレードがあり、性能設計の考え方が必要となる
- ・建物の安全は主体構造から非構造部材・仕上げ材まで全体で考えるべきである
- ・安全、安心はクライアントと専門家との対話によって実現される

参考文献

- 1) 金箱温春：構造計画の原理と実践，建築技術，2010
- 2) 建築構造体の被害状況の分析と耐震安全性確保に関する課題の整理と提言，2012
<http://www.jsca.or.jp/jscabbs2/InfoBbsDispC.php?Group=7&Category=1&Bbs=2&Item=26>
- 3) JSCA メニュー（解説版），日本建築構造技術者協会，2007
- 4) 安心できる建物をつくるために（解説編），日本建築構造技術者協会，2013
- 5) 地震リスク評価とリスクコミュニケーション，日本建築学会，2011
- 6) 神田順，浅野美次他：設計用地震荷重と建設費の相関，structure, No.58, 1996.4
- 7) 非構造部材の安全性確保に向けて JSCA の提言，2014
http://www.jsca.or.jp/vol5/pl_5.php
- 8) 中谷内一也：安全。でも、安心できない・・・，ちくま新書，2008
- 9) 金箱温春：クライアントへの構造性能の説明：建築雑誌，2006.2
- 10) 社会に向けての構造設計パンフレット，2012
<http://www.jsca.or.jp/jscabbs2/InfoBbsDispC.php?Group=7&Category=3&Bbs=1&Item=187>