

構造設計の視点から震災被害の人為的要因について考える A Consideration on the Prevention of Earthquake Damage due to Human Factors from Structural Design Perspective.

浜田 英明
HAMADA Hideaki

法政大学, 准教授, 博士 (工学) (h.hamada@hosei.ac.jp)
Hosei University, Associate Professor, Dr. Eng

本稿では、構造設計の視点から震災被害における人為的要因の所在について多角的に捉え、その対策提案を行うことを目的としている。その際まず、ヒューマン・ファクターの分野で用いられる m-SHELL モデルを構造設計の現場に応用し、論点を整理するところから始める。整理された論点として、構造関係技術基準と社会の要請の関係、構造設計におけるコンピュータの存在、建築主等の震災防止意識の三つを挙げ、それぞれについて、現状の問題点を述べ、その対策について提案を行っている。

構造設計, 震災被害, 人為的要因, m-SHELL モデル, ヒューマンエラー
Structural design, Earthquake damage, Human factor, m-SHELL model, Human error

1. はじめに

構造設計に従事していると、諸外国に比べて、我が国は人間が住むには過酷すぎる自然環境の国ではなかろうかと思うときが時折ある。古来より、我が国は地震や津波、台風、豪雪、豪雨など、様々な天災に見舞われてきた。その度に、我々の先祖は自然の大いなる力に畏敬の念を抱きながら、寄り添うかたちで少しずつ建築技術を発展させてきた。

自然の力に対抗する術が十分でない場合、「人為的要因による災害被害」という概念は到底存在しないであろう。明治以降、我が国では、地震および耐震構造に関する科学研究が本格的に始まり、得られた知見によって実際に地震に耐える建物と耐えられない建物という大きな違いが出始めた。このとき、「人為的要因による地震被害」という概念が登場したと考えられる。

その最初期の例として挙げられるのが、関東大震災

(1923年)で甚大な被害をこうむった内外ビルディング(図1)ではなかろうか。この建物は、鉄筋コンクリート造の8階建事務所で、完成直前に崩壊し、作業員約300名の命が失われた。アメリカ式の設計により十分に耐震壁が配置されず、定着フックなしの旧型異形鉄筋を使ったことによる「構造の不備なるとそのプランの形状」¹⁾が被害原因とされた。内藤多伸が構造設計を担当し、鉄骨鉄筋コンクリート造7階建、設計震度1/15、鉄筋コンクリート壁を耐震壁として配置した日本興業銀行(1923年竣工、図2)が無被害だったことを考えると、その設計の不備こそが震災被害の人為的要因と捉えられる。

関東大震災の翌年、1924年に市街地建築物法(1920年施行)が改正され、設計震度0.1とする世界初の耐震規定が制定されて以降は、より明確な形で人為的要因の所在が位置付けられることになる。すなわち、根源的な設計ミスとなる「構造基準の未達」である。

写真 第九十八



東京市麹町区丸の内 内外ビルディングの被害(其一)

図1 内外ビルディングの被害¹⁾



図2 日本興業銀行²⁾

このように震災被害における人為的要因の所在は、地震工学や耐震技術の成熟につれ、拡大していくことになる。特に、我が国における地震・耐震工学の進展は日進月歩であり、得られた知見は、建築基準法の構造関係技術基準や日本建築学会の各種指針の形で、順次整備がされてきた。その結果、現在においては、「震災被害は総じて人為的な要因による」と言えるほどになっている。逆に言えば、人為的要因が着目されるということは、それほど技術が成熟している証拠でもある。

本稿では、耐震構造技術が高度に発展、整備された現代において、構造設計の視点から震災被害における人為的要因の所在とその対策について、多角的に考えることを目的とする。

2. 構造設計における震災被害の人為的要因の所在

2.1 ヒューマン・ファクター (m-SHELL モデル)

震災被害の人為的要因についての議論をわかりやすくするため、ヒューマン・ファクターの知見を利用することとする。ヒューマン・ファクターとは、システムの安全性に影響を与えるような人為的要因のこと、さらに広義では、人為的要因によって引き起こされる事故やミスをも可能な限り少なくすることを目的とし、人間の行動特性を中心に据え、機械・設備、環境、組織などのシステムについて考える学問分野のことである³⁾。この学問分野は、航空機や原子力発電所などの安全性を高める方策の研究が起源であったが、現在は、医療、製造、建設など、あらゆる分野で応用されている。

このヒューマン・ファクターの概念をより明確化するため、図3に示す m-SHELL モデル⁴⁾が提唱されている。Sは Software (ソフトウェア)、Hは Hardware (ハードウェア)、Eは Environment (環境)、Lは Liveware (人間)、mは management (管理) を表している。中心の L が当事者を表し、周囲の S、H、E、L との間の接面に隙間が生じ、うまく対応がとれないときにヒューマンエラーが発生するとし、周囲との接面に隙間が生じないように、全体のバランスをとる役割として、衛星のように周囲を周回しながら管理・監督する m の存在の重要性を説いている。

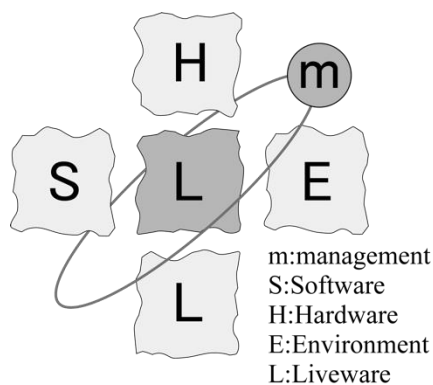


図3 m-SHELL モデル^{注1)}

この m-SHELL モデルを用いて、構造設計者を当事者とした業務上のヒューマンエラーの所在について、以下考察することとする。

2.2 ライブウェア — ソフトウェア (L-S)

構造設計における「ソフトウェア」に相当するものとして、1) 科学、関係法令、2) 各種解析・調査結果、3) 設計図書、施工図、4) 標準仕様、慣習などが挙げられる。

技術者として、数学や物理学、構造力学などの基本を理解すること、関係法令を遵守すること、標準的な仕様を把握することは当然のことであるが、そのためにはしっかりと継続的な自己研鑽が欠かせない。

また、この接点は、抽象的、概念的な内容の図示・数値化や、他者とのコミュニケーション手段としての図面化が主体なので、見やすさ、理解のしやすさ、誤解のしにくさなど、表現方法の配慮が重要となる。

2.3 ライブウェア — ハードウェア (L-H)

「ハードウェア」に相当するものとして、1) 計算機、コンピュータ、2) 解析ソフト、一貫構造計算ソフト^{注2)}、3) CAD、BIM ソフト^{注2)}などが挙げられる。

現在の構造設計はこれらなしでは語れない状況にあることは間違いない。そして、もともと、構造設計におけるヒューマンエラーをなくすために発展してきた側面があったはずである。しかしながら、設計作業の効率化と精緻化の方に比重が偏ったため、これらのシステム自体が複雑化し、正しく利用する術を学習することから始める必要性に迫られている。これはある意味では余計な知識と言っても良く、ヒューマンエラーを起こす新たな要素ともなりうる。この点について、「4. 構造設計におけるコンピュータの存在」にて詳しく議論することとする。

2.4 ライブウェア — 環境 (L-E)

「環境」に相当するものとしては、1) 構造設計・監理料、納期、2) 社会的地位などが挙げられる。

構造設計者は、一般的に設計監理業務の元請けとなることは少なく、社会の前面に出ることもあまりない。そのため、建築物の安全と財産保全、機能維持に関わる重大な職務であるにもかかわらず、社会的な位置付けは低いのが現状である。また、建築基準法の存在により、安全であって当たり前との考えも根底にあり、過酷な構造設計料や設計スケジュール、不当な設計変更への対応を要求されやすい立場にある。これらによって誘発されるヒューマンエラーについて留意は必要だろう。これについて詳細を「5. 建築主等の震災防止意識」において述べる。

2.5 ライブウェア — ライブウェア (L-L)

ヒューマン・ファクターとしての、対「人間」に関する接点として、1) 建築主、発注者、2) 建築設計者、設備設計者、3) 施工者、4) 上司、同僚などが挙げられる。

建築主、発注者との関係については、詳細を別途、「5. 建築主等の震災防止意識」において述べる。

他の設計者や施工者とは、専門技術者同士であるので、

意思の疎通は図りやすい。しかしながら、経験を経るほど「思い込み」による齟齬や不整合が生じ、それがヒューマンエラーにつながる。互いにチェックしあう、ある種の緊張感を持った関係が理想的である。

また、構造設計はその性質上、全体の流れを把握しているのは一人もしくはある限られた人数になりやすい。したがって、個人の「思い込み」によるヒューマンエラーが発生しやすいため、同じ専門家としての上司、同僚などによる俯瞰的、第三者的なチェックは不可欠である。

2.6 管理 (m)

構造設計における「管理」に相当するものとして、1) 確認検査・構造計算適合性判定、2) 資格制度、教育・訓練方法、3) 社会の要請、倫理観などが挙げられる。

確認検査・構造計算適合性判定については、2005年の耐震偽装事件以後、構造設計者の信頼回復の意味も含め、「性善説」から「性悪説」へ舵が切れ、審査が厳格化された。厳格化当初は混乱も見られたが、幾度かの改正により、時が立つにつれ混乱も少なくなった。審査機関や適合性判定の存在によって、構造基準の未達や図面の不整合、不適切な工学的判断などの人為的要因による設計ミスは、ある程度は正される仕組みとなっている。懸念としては、より性能を高める方向の設計変更であっても、確認済み後では手続きの煩雑さから（軽微変更の手続きはあるが）なかなか踏み切りにくいところであろうか。しかしながら、より良い設計変更であったとしても、設計変更はそのタイミングが遅くなればなるほど、不整合や指示ミスなどによる設計、施工ミスが起きる可能性は高くなり、最終的な建築の質の低下を招く恐れがある。したがって、ある程度設計変更に歯止めをかけることは、人為的要因によるミスの発生抑止になっていると考えられる。

構造設計者に求められる知識や能力はきわめて幅広く、常に進歩していく建築技術や社会の変化に敏感でなければならず、継続的な職能開発を自発的に行っていくことが不可欠である。各種学協会が提供するセミナーは多様であり、種々の職能開発の方法がある。また、2007年の改正建築士法によって、3年毎の一級建築士定期講習ならびに構造設計一級建築士としての定期講習が定められており、強制的な職能開発の機会となっている。

社会の要請および倫理観については、重要な点であるため、「3. 構造関係技術基準と社会の要請の関係」ならびに「5. 建築主等の震災防止意識」において詳しく議論することとする。

3. 構造関係技術基準と社会の要請の関係

3.1 現状の問題点

我が国の構造関係技術基準の耐震規定は、大きな地震を受けるたびに改正されてきたが、その根幹部分は関東大震災の翌年1924年に制定されて以降変化はない^{注3)}。そして、極めて稀に生じる大地震を受けた際には、建物

内の人命を守るため、建築物が倒壊・崩壊しないことを定めているが、建物の経済価値の保全と機能性の維持までは、一貫して求めている。

しかしながら、取り巻く社会状況は関東大震災の頃とは大きく様相が異なっている（図4）。社会構造、経済規模、都市構成、人権意識、世界での位置付けなど、どれを取っても格段の差がある。また近年、従来の設計で用いられてきた地震動を超える観測記録が次々と取られる^{注4)}大地震が頻発し、さながら地震活動期に入ったかの様相を呈している。

2016年の熊本地震では、震度7の大地震が3日間のうちに2度起きる他、最大震度6強の地震が2回、6弱の地震が3回頻発している。明らかにこれまでの想定を超えた状況が発生した^{注5)}と考えられるが、現行基準で倒壊・崩壊したものは2%程度であり⁶⁾、人命保護の観点から現行基準を見直す必要はないであろう^{注6)}。

本節で議論したいのは、震度6弱を超えるような大地震が頻発しても、現行基準では90%以上の建物が無被害もしくは軽微な被害であった⁶⁾ことで、建物耐震性能に対する社会の要請は高まりを見せている点である。公的機関や企業にとっては地震災害そのものより、事業中断による経済的被害リスクの低減のほうが切実であろう。震災後も住み続けることを希望する個人も多い。社会の要請と技術基準の齟齬は、そのまま震災被害の人為的要因に直結するため、何かしらは是正する必要があるだろう。

3.2 提案：構造設計の努力を評価する仕組みの構築

建築基準法は最低基準を定めたもので、それより上位の基準を個人や企業、公共団体に要求することはできないとする考え方がある^{注7)}。しかし、建築行為は経済行為であるため、どうしても最低基準の方によりがちになり、得てしてヒューマンエラーを誘発する。

そこで、もっと積極的に、構造設計の努力（目標性能の向上や供用期間の延長、適切な構造計画、自主的なピアレビューなど）に対して評価し、インセンティブを与えるような仕組みの構築を提案する。インセンティブとしては、容積率の緩和や保険制度、税制との連携などが考えられる。

このとき、構造設計の努力を評価するためには、その数値化もしくは指標化を行う必要があると考えられる。その場合、信頼性設計などで用いられる破壊確率や限界状態超過確率などが一つの評価指標となりうる。信頼性設計で代表されるような確率論的設計法は、設計内容を確率的に評価することが可能なため、保険や経済的な指標とも相性が良い。しかし、確率論的設計法によって実際に構造設計を行うことは、その設計の難しさからハードルが高いと思われる。そのため、建築基準法が求める最低基準を満足していることは、従来通り確定論的設計（許容応力度設計+終局強度設計）で良いと考える。あくまでインセンティブを求める評価指標として確率論的指標を用いることが適切であろう。

4. 構造設計におけるコンピュータの存在

4.1 現状の問題点

コンピュータの登場は人類の生活を一変させたが、それは構造設計分野でも同様である。さらに汎用有限要素解析ソフトの登場により計算精度は向上、複雑、不定形、自由な建築形態も設計可能な状況をつくり出している。しかしながら、コンピュータは大量の計算を正確に行ってはくれるが、「正解」を導いてくれるわけではない。設計の妥当性の判断については、相変わらず人間の役割である。複雑で不定形な建築形態が増えていることを勘案すると、人間の設計判断の重要性はより増しているとともに、判断すべき内容は複雑化していると言える。

また、コンピュータによる高精度の計算は必ずしも耐震性能の向上につながるとは言えない。逆に精度の低い計算では見込まれていた余裕が削られるかたちとなり、耐震性能の低下を招く恐れがある。つまり、「ギリギリ」の設計である。

そして、現在の構造関係基準自体はコンピュータの使用を前提とした構成となっており、構造計算に一貫構造計算ソフトを用いることが多い。また、構造図もCADを用いて描くことが普通である。このような現状では、構造設計者本人も審査する側も構造計算書中の数値の流れや構造図の全体バランスをつかむのが難しくなっている。

以上より、構造設計におけるコンピュータは、功罪相半ばする存在といえる。

4.2 提案：コンピュータと人間の効果的役割分担

人間は反復的な作業行為を最も不得意とし、ミスを犯す。コンピュータはその正確性と大量処理能力によって、そのようなヒューマンエラーを失くしてくれる。しかしながら、建築構造物がかつべき適切な骨格を描き出す創造的行為においては、人間に分がある。そして、一般的に構造設計としてイメージされる構造計算は、この創造的行為において、仕上げの筆を加え、その構造物が要求にそった強さや健全さを持っている事を証明することにすぎない。そのような段階に入る前に統合的な判断に基づく基本的な構造概念の構築を行う必要があり、構造計画と呼ばれる。建築構造物の安全確保の源泉は、設計者の独創的な想像力による構造計画にある。コンピュータなどがどんなに進展しても、この基本構造は不変であろう。コンピュータと人間の関係としては、それぞれの特性に合わせた役割分担が重要である。

人間には創造的な部分である構造計画の構想や判断に集中してもらい、人間がエラーを起こしやすい構造計算や作業的行為、各種ケーススタディ、図面間の不整合、干渉チェックなどはコンピュータに処理させるなどの役割分担が考えられる。

確認審査も微細化された規基準についての適合確認より、人間の構造計画の是非について議論するピアレビュー形式の方が構造設計の将来には望ましいと思われる。

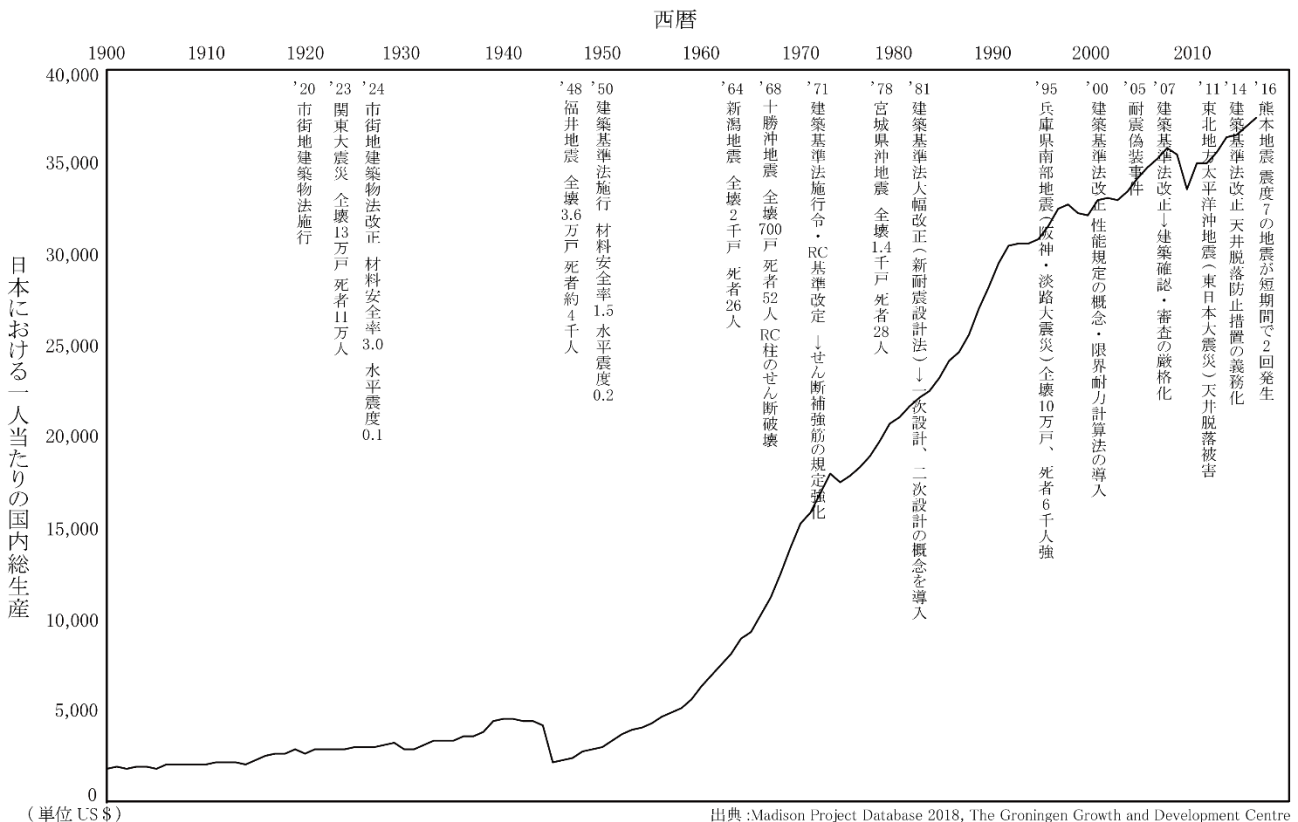


図4 耐震規定の変遷と日本における一人当たりの国内総生産

5. 建築主等の震災防止意識

5. 1 現状の問題点

技術者（設計者や施工管理者）および技能者（職人）は、建物に対して損害賠償責任を負っている上、社会的な信頼を失わないため、はたまた法的な処罰を受けないため、根源的に人為的要因による震災被害を減らす努力を行うはずである。

例えそのような努力をしても、うっかりミスや思い込みなどによってヒューマンエラーは起こりうるが、よりタチが悪いものとして、倫理観の欠如による構造物の不具合や事故が挙げられる。建築も経済行為の一つであるため、採算や効率の追求の影で、倫理観を欠いてしまうと考えられる。

採算や効率が追求される背景には、建築主、発注者との関係も見逃せない。「2. 4 ライブウェア - 環境 (L-E)」でも述べたように、安全・安心であることは当然であって、いつ来るか分からない地震によって顕在化する安全性確保のための費用、しっかりとした内容の構造設計をしてもらうことによる安心を得るための時間や費用について、クライアントによっては軽視する場合もありうる。震災被害が自身に直結する自宅や自社もしくは公的資金による公共施設などの建築主の震災防止意識は高いと考えられる。しかし、分譲集合住宅などの発注者などは当事者意識の欠如と採算性の過度な追求により、設計者や施工者に厳しいコストの制約、より短い設計施工期間の設定などを要求する場合もありうる。結果、構造設計者の立場は軽視され、人為的要因による震災被害を誘発することにつながる。

また、建築主等との関係で重要な点は、要求性能の齟齬をいかになくすかであろう。ここでの齟齬は根本的なヒューマンエラーとなってしまふ。しかしながら、この齟齬を埋めることは容易でない。建築主等と構造設計者では、圧倒的な知識量の差があるためである。一般市民である建築主等にしては、平時はもちろん大地震後であっても建築構造物の設計・施工の良否を確認することは難しく、設計の段階でその理解を深めることはさらに難しいことは言うまでもない。

5. 2 提案：構造設計者による建築主等への震災防止意識の啓蒙

2006年から制定された構造設計一級建築士の制度によって、構造設計者の社会的な位置付けに変化はあったが、その地位については未だ大きな変化はない。構造設計者は、安全と安心について果たす自らの役割を、一般社会（特に建築主や発注者）に対して地道に説明をし続けていくことで、自らの社会的地位を向上させることが、自らのヒューマンエラーをなくすための環境整備という意味で重要であろう。建築構造設計で用いられる専門用語や基準値などを、わかりやすく翻訳して、社会に説明していく役割を積極的に果たすべきである。例えば、一般的な住宅では、強度を1.5倍高めるために必要な費用

は数十万円ほどと言われており、説明の仕方次第では十分に実行できる範囲であろう。このような情報を積極的に建築主等に提案・提示していくべきだろう。

さらに、建築主らの側で震災防止の技術コンサルタントとして、別の構造設計者を任用することはどうだろうか。このようにすれば、建築主側から不適切な環境での設計を構造設計者に強いることなく、建築主側に適切な設計条件を提示することができるだろう。また、自動的に構造設計のピアチェック、ピアレビューが実現されることになり、構造設計におけるヒューマンエラーの抑止が可能となる。

ところで、分譲集合住宅などの発注者に対して、当事者意識の欠如を指摘した。このような発注者に対しては、製造物責任を求めても良いのではないだろうか。現に製造物責任法が立法化される過程では、不動産も製造物に含める案もあったようである^{注8)}。ただし、この場合には、発注者側に専門知識が必要となるため、免許制度の創設や技術コンサルタントの存在がやはり不可欠となるだろう。

いずれにせよ、人為的要因による震災被害の防止には、施主、技術者、技能者の三者鼎立状態が効果的であろう。その際、構造設計者の果たすべき、もしくは果たせる役割は大きいと考える。

6. まとめ

本稿では、構造設計の視点から震災被害における人為的要因の所在について多角的に捉えることを目的とし、ヒューマン・ファクターの分野で用いられるm-SHELLモデルを応用し、論点を整理した上で、構造関係技術基準と社会の要請の関係、構造設計におけるコンピュータの存在、建築主等の震災防止意識について、現状の問題点を述べ、その対策について提案を行った。

本稿により挙げられた問題点や提案は、暴論・極論の部分も多々あると自覚している。しかしながら、このような論考が起点となって、より良い技術や社会に向けた議論が花咲き、やがて実現されることを願っている。

注釈

- 1) Elwyn Edwards が基本モデルとしての SEHLL モデルを提案し、F.H. Hawkins が改良、河野龍太郎（東京電力技術開発研究所）が m（マネジメント）を付け加えた。
- 2) m-SHELL モデルでは、ソフトウェアは情報の内容を指す概念であり、ハードウェアは機器や道具を表す概念である。解析ソフトなどは、コンピュータのプログラムを抽象的にとらえる呼称として「ソフトウェア」と呼ばれるが、構造設計者にとっては道具であるので、ハードウェアに分類した。
- 3) 1924年の市街地建築物法改正によって、材料安全率を3.0として、水平震度は0.1と規定された。その後、

1950年施行の建築基準法では、長期・短期の概念が導入され、材料安全率1.5、水平震度0.2と変更されたが、建物に求める強度に違いはない。その後、1981年より新耐震設計法が始まるが、1次設計におけるベースシア係数は0.2のままであり、根幹部分は関東大震災の翌年1924年に制定されて以降変化はないと言える。

- 4) 高精度の地震計が全国至る所に設置され、観測網が整備されたためとも考えられる。
- 5) 現状の構造計算において、極めて稀に生じる地震動の大きさを、これまでの地震被害が余震を含めた複数回の地震動の作用によっている実態を含めて、一つの地震動もしくは地震力として規定しているとは言え、本震とほぼ同じ震度6弱以上の地震が短い時間で頻発することを想定していたと思えない。
- 6) 現行基準における、この2%程度の地震被害こそ、人為的要因によるものであって、本特別研究委員会でその詳細を研究対象とすべきものであろう。
- 7) 民間に対して過度な耐震基準を要求することは、財産権の侵害と考えられている。
- 8) 製造物責任法から不動産が除外された理由として、不動産は、1)契約責任で対応が可能である、2)第三者に対する被害については、土地工作物責任により対応が可能である、3)EC諸国でも不動産が対象外、4)耐用年数が長く、劣化や維持補修について考慮する必要があることが挙げられる。

参考文献

- 1) 土木学会編、大正12年関東大震災震害調査報告書 第三巻第二編 建築物、1926
- 2) 建築学会編、明治大正建築写真聚覧、1936
- 3) F.H. ホーキンス著、黒田勲監修、石川好美監訳、ヒューマン・ファクター 航空の分野を中心として、成山堂書店、1992
- 4) 東京電力技術開発研究所ヒューマンファクターグループ、実務入門 ヒューマンエラーを防ぐ技術、日本能率協会マネジメントセンター、2006
- 5) 村田厚生、ヒューマン・エラーの科学 失敗とうまく付き合う法、日刊工業新聞社、2008
- 6) 熊本地震における建築物被害の原因分析を行う委員会 報告書、2016.9
- 7) 国土交通省、2015年版 建築物の構造関係技術基準解説書 第4刷(2016年追補収録版)、全国官報販売協同組合、2017
- 8) 平成29年度 国土交通大臣登録構造設計一級建築士講習テキスト、建築技術教育普及センター、2017
- 9) 大橋雄二、日本建築構造基準変遷史、日本建築センター、1993
- 10) 竹山健三郎、高さ100尺制限と震度0.1はどうして決まったか、建築雑誌885、1960
- 11) 柴田明徳、最新耐震構造解析(第3版)、森北出版、2014