

日本の耐震設計の最前線

—地震から人々の時間（暮らしと経済活動）を守る耐震設計法—

東京理科大学 創域理工学部 建築学科 教授 きぬがさ ひでゆき
衣笠 秀行

■ 1. はじめに

我が国日本は、世界トップレベルの建築物の耐震設計法を持っています。これは、度重なる地震被害を教訓に耐震設計法を進化させてきた結果です。しかしながら、世界に誇る耐震設計をしても、現在の日本を守るには十分でないことが分かってきました。地震から「人命」は守られても、人々の「時間」を守ることが難しく、また、このことが人々の生活や日本の経済活動に重大な影響を及ぼすことが最近の地震被害から明らかになってきたためです。

近年の地震で何が問題となっているのか、また、現在の耐震設計法に求められている進化の方向性について述べ、耐震設計法研究の最先端について解説したいと思います。

■ 2. 世界有数の地震大国かつ経済大国

日本は、世界で有数の地震国です。最近では、熊本地震 2016 年、能登半島地震 2024 年など、地震のニュースを聞く機会が多く、日本は地震の多い国だという実感を持っている方も多いのではないかと思います。

実際、日本の都市の災害リスクは世界の他の都市と比べて非常に高く評価されています。ミュンヘン再保険会社が公表した「世界大都市の自然災害リスク指数」を【図 1】に示します¹⁾。ロンドンやパリが 30

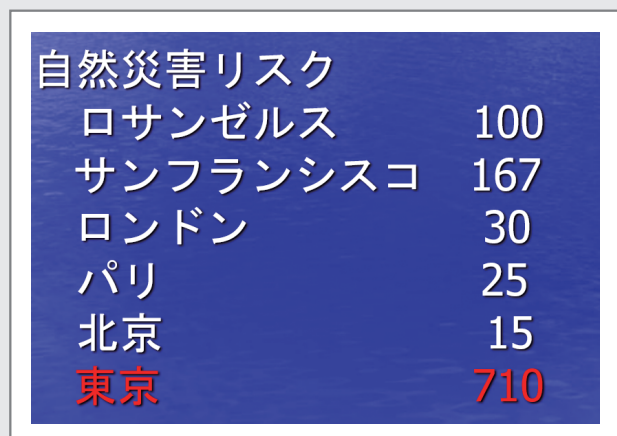
程度、そして、ロサンゼルスやサンフランシスコが 100 前後と大きな値になっていますが、東京はなんと 710 と、世界主要都市の中で、リスクが突出して高くなっています。

現在の日本において備えるべき大地震として、「首都直下地震」「南海地震」「東海地震」があります【図 2】。首都東京に対する地震のリスクの高さについては以前から指摘されてきており、今後 30 年間に予想される地震の発生確率は 70%とされています。また南海地震・東海地震の発生確率はそれぞれ、70～80% および、87%です²⁾。つい先日、「南海トラフ地震巨大地震注意」が出され、緊張が日本中に広がったのも記憶に新しいところです。

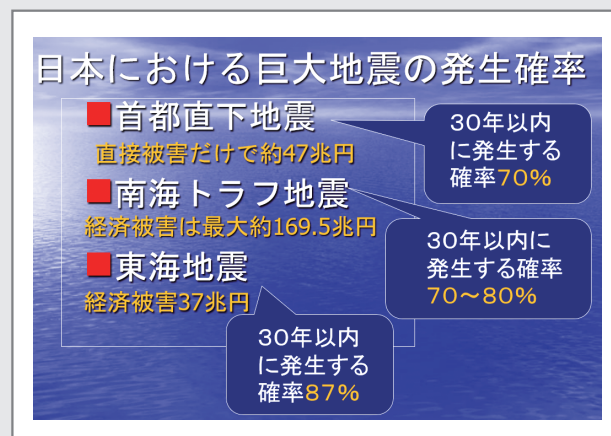
災害リスクが非常に高い地域に、経済的に重要な都市が存在している「危険な国？」というのが、日本ということになります。

このような過酷な環境の中、日本人は建築物に求められる性能を追求し、現在の大都市に見られるような高層建築物を実現するまでに至っています。【図 3】は建築物に求められる性能を示しています。建築物には当然のことですが、耐震性以外にも多くの性能が求められます。縦穴式住居から始まって、高床式そして高層建築物へと、この要求性能に応えるために形を変え規模を大きくしてきました【図 4】。

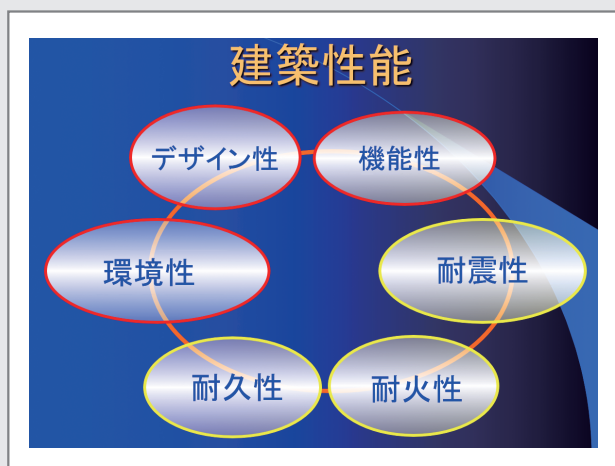
この性能追求において厄介な問題が存在します。それは性能間のトレードオフです。例えば、機能性を追



【図 1】世界大都市の自然災害リスク指数¹⁾



【図 2】今後 30 年以内に発生する地震と経済損失²⁾



【図3】 建築物に求められる多様な性能

求すると耐震性の低下が起こる。逆に、耐震性を上げようすると機能性の低下が起こる、というような関係です。建築学とは、このような性能間のトレードオフ関係を考慮しつつ、総合的に性能を高いレベルに上げるために必要な設計法や技術を追求する学問領域とすることができます。

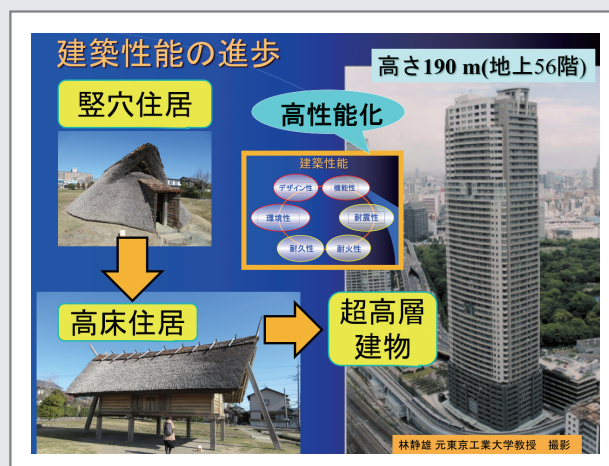
実はこのトレードオフに似た関係が、経済の発展と耐震性との間にも存在するようです。次章では、「経済発展が日本の耐震性を低下させること」、そして、地震で「時間が失われると大きな経済損失と人命損失を引き起こすこと」を述べたいと思います。

■ 3. 大地震によって何が失われるのか？

大地震では、「人命」そして「物（財産）」が失われます。失われるものはそれだけではなく、日常としての「時間」が失われ、このことが深刻な事態を引き起こすことが明らかになってきました。1995年の兵庫県南部地震の甚大な被害を契機に、建物の継続使用性に注目が集まるようになり、人命保全や財産保全に加えて、地震後における「経済活動」や「日常生活」の保全を設計目標の一つとして考慮すべきとの考えが広がっています。このことは上で述べた、「地震によって時間が失われる」ことによる被害に起因しています。

地震によって実際に時間が消えるわけではありませんが、日常としての時間が失われ（以下ではこのことを「時間が失われる」と表現します）、このことが重大な事態を引き起こします。

予定していた活動の「機会」が失われると損失が発生します。経済の世界では、ある事態が発生した場合（例えば地震が発生するなどして経済活動が出来なくなるなどの場合）、その事態が発生しなければ得られたであろう利益が損失として扱われ、これを「機会損失」と呼



【図4】 建築物は性能追求によって進化してきた

びます。「機会損失」とは、経済活動停止によって引き起こされる損失とすることができます。

マグロは鰓（えら）を動かす筋肉がなく、泳ぎを止めてしまうと酸素を取り込めなくなり、最悪の場合は窒息死してしまいます。経済も、活動を止めると大きな損失（機会損失）を生じる、マグロと同じく活動を止めることができない非常に厄介なものと言えます。2020年から始まったコロナ禍による経済活動の停止とその影響の大きさを見ても、このことの重大性が理解できると思います。

経済活動を大きくすると人々は豊かに幸せになります。しかし一方で、地震時における経済活動の停滞・停止による「機会損失」は大きくなります。経済活動が大きくなると、同じ耐震性、同じ大きさの地震でも損失が大きくなる、すなわち、損失発生防止に対する耐震性は低下することになります。

一方、2016年に発生した熊本地震では「関連死」の問題がクローズアップされました。関連死とは、地震による家屋倒壊や津波等による直接的な被害（直接死）ではなく、避難生活での疲労や環境の悪化などにより病気にかかったり、持病が悪化したりするなどして死に至ることです。関連死は建物や社会が機能停止、あるいは機能停滞したことによって日常生活が奪われる（「時間」が失われる）ことによって引き起こされると考えることができます。

熊本地震における直接死が50名であったのに対して、関連死は200名に達し、日常としての時間が失われることの重大性が明らかとなりました。経済活動としての時間（機会）が失われることによって損失が発生し経済は危機に瀕し、また、日常としての時間（日常生活）が失われることによって人々の生命が危険にさらされると言うことができます。このようなこと

を背景に近年、国の内外において、「人々の時間を守る」という観点での建物の耐震性能評価法（これ以降、「機能回復性の評価法」と呼びます）に関する研究が活発に行われるようになっていきます。

■ 4. 地震時の損害を測る指標としての「時間」

耐震設計は、地震時に生じる建物の損害を許容内に抑えることを目的として行われます。その際、何を許容内に抑えるのか、すなわち、設計目標を何にするのか、また、その設計目標をどのように数値化するかで、耐震設計の姿は大きく変わってきます。この数値化されたものを評価指標と呼びます。

上で述べたように「時間」が失われることが社会に大きな人的・経済的な損害を与えることが分かってきました。損害を測る指標として一般に「お金」が使用されますが、これに代わって「時間」を使用することができるのか、また、耐震設計において「時間」を損害低減の目標値（設計目標）として使用することの利点について考えてみたいと思います。

さて、この世は「お金」、この世で一番大切なものは「お金」… などと言ったりしませんか。でも、実はお金よりも、時間はもっと我々にとって大切なものではないでしょうか。

経済損失を測る指標（設計目標）の候補として、「お金」（これ以降「通貨」と呼ぶ）と「時間」が考えられます。言うまでもなく、地震時の損失を、通貨を用いて評価する方法は有効な方法です。なぜなら、経済は通貨を媒介として活動が展開されており、人命でさえ「お金」に換算する方法があるそうで（「お金」で買えないものはない？）、経済損失を通貨で表現することに異論はないと思います。損失評価が、地震が「経済性」に及ぼす影響の大きさの評価を目的にしている場合、評価指標として通貨は最も有効な指標であることに間違いはないと思います。

一方、損失評価が「機能回復性」などの建物性能の評価や定義を行うことが目的である場合、「通貨」は評価指標として適切ではないと考えられます。なぜなら、「通貨」は物理量（物理現象を表現するときに使用される量）ではないからです。通貨は、発行する国家の信用によって価値が変動し、また、その流通域での財政破綻や、信用が失墜することによって、価値が無くなって紙切れになる場合もあります。

通貨を単位として、建物性能を定義した場合（例えば、地震時の損失が100万円以内となる性能などで定義した場合）、建物性能になんら変化がない場合でも、国

家の信用が変化すると建物性能が変わってしまうことになります。工学性能である建物の耐震性は物理量で測られなくてはなりません。

質量、長さ、時間、電流、熱力学温度、物質質量、光度の7つの物理量は、基本量と呼ばれています。自然界で知られている全ての量はこれら7つの基本量、あるいは、これらの組み合わせ（組立量）で表現されます。以下では、基本量の一つである「時間」による損失評価の可能性を考えてみることにします。

世の中では、「事の重大さ」や「被害の大きさ」を通貨で次のように表現することが行われています。

①犯罪等における事の重大さ

⇒ 罰金（例えば100万円）

②事故等における被害の大きさ

⇒ 治療費や修理費（例えば100万円）

一方、時間による表現も同様になされています。

①犯罪等における事の重大さ

⇒ 懲役（例えば10年）

②事故等における被害の大きさ

⇒ 治療期間・修理期間（例えば10ヵ月）

何かが発生し「事の重大さ」や「被害の大きさ」を表現する際に、「時間」は「通貨」と並び一般に尺度として使用されており、「通貨」（＝経済）に最も近い物理量が「時間」であると言えるのではないのでしょうか。

大地震時における損失を「時間」を単位にして評価してよさそうです。すなわち、この建物を、「大地震時に失われる時間を7日以内になるように設計しよう」（損失の設計目標を「7日」にする）といったことが考えられます。以下では、まず、具体的にどのような被害が人々から「時間」を奪うのか、について解説し、その後、地震時に失われる時間の評価の方法について述べたいと思います。

■ 5. 「時間が失われる」最近の地震被害事例

5.1. 生活を支える部材（非構造部材）の被害

1995年兵庫県南部地震では、想定をはるかに超える強烈な地震動によって多数の建築物が倒壊しました。多くの人命が失われただけでなく、構造部材（柱や梁など建物を支える部材）・非構造部材（窓やドアなどの生活に必要な部材）・設備機器等に大きな損傷が生じ、「すまい」としての機能が失われ避難所など自宅外での長期の生活を強いられる例が多く見られました。すなわち、このような被害が生じた建物の持ち主から「日常としての時間」が失われたと考えることができ

ます。

また、最近の特筆すべき被害事例として、構造部材の損傷は小さく安全性は問題ない場合でも、非構造部材の損傷のために、建物の継続使用に支障を来たケースが多く生じていることです。このようなことが起こるのは、非構造部材が構造部材よりも脆く壊れやすいためです。

窓やドアなどの建物使用に必要な部材である、非構造部材の被害は深刻な生活被害や多大な経済損失を引き起こします。【写真 1】は東北地方太平洋沖地震で発生した非構造部材の被害状況です。大地震に対して、安全性だけでなく、耐損傷性能（地震時の損傷を小さく抑え、地震後に速やかに人々の生活や経済活動が復旧できる性能）の確保が、今後の耐震設計では重要であることが分かります。

建築基準法では極希に発生する大地震に対して安全性を確保することが要求されていますが、耐損傷性能の確保については要求されていません。安全性（人命の確保）のみを追求する設計では耐損傷性能は確保されず、場合によっては、耐損傷性を犠牲にすることによって必要な安全性能を確保することも起こり得ます。大地震に対して、これまで行われてきた安全性を目標とした設計に加えて、耐損傷性を目標とした設計法の導入が求められています。

5.2. 地震が引き起こす建物の機能低下と回復

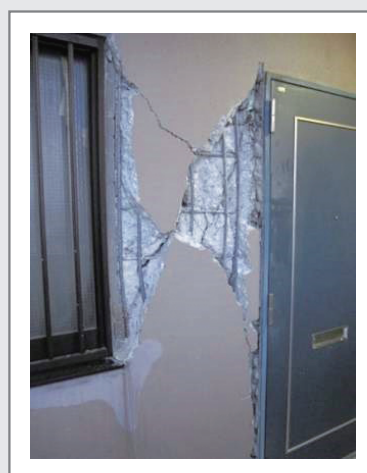
【図 5】は地震発生時点からの建物の機能の推移を模式的に示したものです。建物に生じた損傷によって地震直後（ $T=0$ ）に機能低下（ F ）が起こり、その後建物の修復によって機能は回復し、時間 T_R で人の生活・経済活動は地震前の元のレベルに回復することを示しています。また、回復の際には、例えば、同図中に示す修復に必要な費用（修復費用 C ）が回復負荷として発生します。

耐損傷性能とは、損傷を抑制し機能低下量（ F ）をできるだけ小さく抑え、かつ、機能回復が容易に行え、回復時間（【図 5】の「機能停止時間」（ T_R ））を短くできる性能です。

5.3. 建物の回復時間の限界を考える

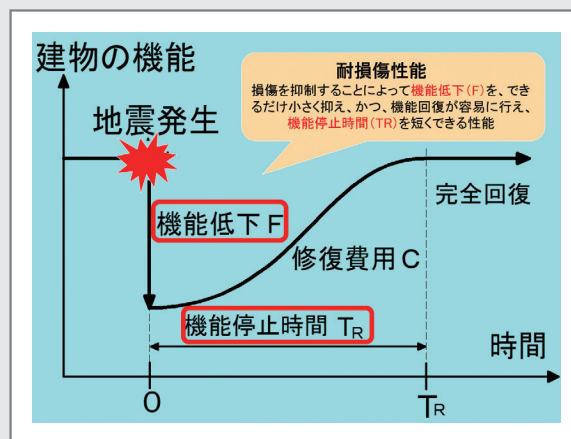
耐震設計を行う上で、許容できる機能低下量・回復時間を適切に設定する必要があります。許容値は建物の用途や重要性によって異なります。

都市には多くの収益用不動産が存在します。収益用不動産とは、貸しビル等の都市の経済活動の場の提供



【写真 1】

東北地方太平洋沖地震（2011）における非構造部材の被害。建物の継続使用が困難となるケースが発生した（「平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告」国土交通省国土技術政策総合研究所 独立行政法人建築研究所、H24.3、より抜粋）



【図 5】地震時に発生する建物の機能低下と回復

を目的として存在する建築物群のことです。以下では、これら建物を対象に、許容できる機能低下量・回復時間の考え方の一例について述べたいと思います。

収益用不動産の存在価値は、収益性（投資と収益のバランス）によって決まっており、【図 6 (1)】に示すように「投資<収益」の関係が成り立てば、この建物は利益を生む、すなわち、経済的に存在価値のある建物と判断されることになります。一方、供用期間中に地震が発生し機能低下による収益の減少と、修復費用発生による投資の増加が起こり、もし、この結果「投資>収益」となれば、この建物の経済的価値は消失することになります【図 6 (2)】。

地震時の大きな機能低下や長い回復時間は、投資と収益の大小関係を逆転させ収益用不動産の経営破綻を引き起こす可能性があります。設定賃料や割引率などの不動産データさえあれば経営破綻を引き起こす限界機能低下量・回復時間を推定することは可能です。

都市機能を守る耐震設計の 1 つの方法として、建物経営の観点から許容できる機能低下量や回復時間を明らかにし、建物の経済的な死である「建物経営破綻」に対する安全性確保を目的に、適切な強度・剛性



(1) 都市の経済活動の中で生きている建築物



(2) 地震後に建築物は生き残れるか？

【図6】地震が引き起こす建築物の経済的な死

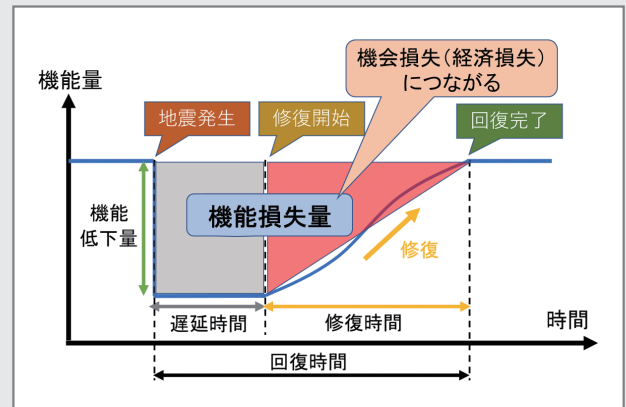
を与える（適切な耐損傷性能を与える）ことが考えられます。

次章では、これまで耐震設計で使用されてこなかった「時間」を評価指標として用いる場合に必要となる、具体的な回復時間の評価法に関する議論について紹介したいと思います。

■ 6. 回復時間の評価方法と考え方

地震時に失われる時間とは、地震の発生により、通常の経済活動や日常生活が妨げられる時間であり、【図7】に示す建物機能と時間の関係における、地震発生から建物機能回復までの時間がこれにあたると考えることができます。また、図中に示した灰色と赤で示した面積が大きいほど、経済損失や人々の生活の困窮度が大きくなると評価されます。

【図7】に示した回復時間（【図5】の「機能停止時間」(T_R)）は、地震発生から修復を開始するまでの時間である「遅延時間」と修復が始まり完了するまでの「修復時間」の和で与えられます。



【図7】地震時の回復時間と遅延時間・修復時間

$$\text{回復時間} = \text{遅延時間} + \text{修復時間} \quad (1)$$

遅延時間は、修復作業の前に必要となる時間であり、発生要因として【図8】に示す8要因：被害調査、修復方法の策定、再設計、修復工事業者の調査・選定、資金調達、意思決定、資材の入荷待ちなどが挙げられます。また、修復時間は、修復作業で必要となる時間であり、これの大きさに影響を及ぼす可能性のある要因として、同図中に示す8要因：損傷の量、損傷の広がり、工事作業者の効率、工程計画、指定工期、作業不能日、周辺環境、社会的環境、などが挙げられます。

回復時間の評価には、実に多くの種類の影響要因があり、それらの中には、施主の考え方や、経済状況やインフラを含めた地震直後の周辺環境・社会的環境など、建築学の研究者や技術者にとっては予測や評価が難しいものが多く含まれています。また、考慮すべき要因があまりに多いために一見そのような評価は不可能のようにも思えてきます。しかし、そもそもすべての要因を考慮すべきでしょうか。

建物の回復時間評価には次の2つがあると思われます。①地震時の実際の回復時間を予測すること、②建物の耐損傷性能を評価すること、です。前者の評価目的は、地震の際に実際に起こることをできるだけ正確に予測し、建物所有者が経験するであろう地震時の生活困窮度や事業困難度を示すことにあります。この目的における回復時間の評価では、上記の影響要因の全てを考慮する必要があります。

一方、後者は建物の構造性能の評価指標として、地震時の回復時間を用いようとするものです。この目的において、考慮する影響要因は多ければよいというわけではなく、評価対象とする要因に絞った回復時間の評価が必要となります。具体的には、地震直後の社会状況や評価対象建物の周辺環境、また、施主の希望す

る工期など、建物の構造性能と関係のない要因の影響を回復時間の算出において考慮すべきではありません。構造性能と関係のない要因を考慮して算出された回復時間は、構造性能が同じ場合でも異なる値を示すため、構造性能の評価指標としては不適切です。このことを車の性能指標である「燃費 (km/ℓ)」を例に説明します。

「燃費 (km/ℓ)」は車の性能評価指標としてよく知られています。燃費は、燃料（ガソリン、軽油など）の単位容量あたりの走行距離、もしくは一定の距離をどれだけの燃料で走れるかを示す指標です。燃費には、カタログ燃費と実燃費があり、カタログ燃費は各国・各地域が制定した走行パターン（テストサイクル）に基づき、一定の技術を持ったテストドライバーが走行させて計測されます。

一方、実燃費は、実際の生活における燃費です。所有者が運転する道路の、交通状況、路面状況、積載重量、ドライバーの運転技術などにより値は異なります。カタログ燃費は実燃費と乖離しますが、車の燃費性能（車の工学的性能）を表す指標としては有効であり、車の売買における情報として機能しています。カタログ燃費の目的は車の性能の相对比较であり、この目的では、必ずしも全ての影響要因を考慮する必要はありません。実燃費は多くの要因を考慮して求められますが、車の性能と異なる要因、例えば、ドライバーの運転技術などの影響が入るため、車の性能を評価する場面ではかえって不適切な指標となります。

回復時間の評価が、建物の構造性能の評価を目的であるとする、カタログ燃費と同じ考え方で求める方法（影響要因を絞った回復時間の評価方法）でよいように思います。

■ 7. まとめ（今後の耐震設計法）

耐震設計の目標は、人命保全から、経済活動・人々の日常生活の保全へと広がってきました。今後はさらに地震後に必要となる回復力が設計目標に加わるのではないかと考えています【図9上段】。近い将来に発生が予想されている大地震が、社会の持つ回復力を超えてしまうのではないかという懸念が広がっているからです。回復力を表す指標として回復作業にあたる人の数が有力と考えています。なぜなら、最近の自然災害において、復興を妨げた要因として、必ずと言っていいほど作業員数の不足が挙げられているからです。

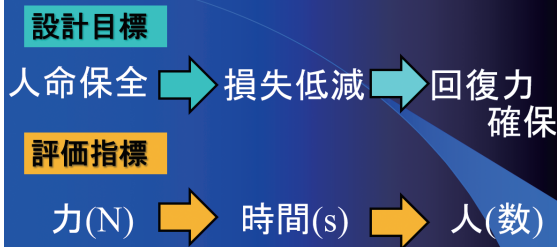
設計目標の進化に伴い、評価指標の単位は「力 (N)」（強度）から、「時間 (s)」, そして、回復力評価

回復時間（＝遅延時間＋修復時間）に対する影響要因

遅延時間：Ⅰ.被害調査、Ⅱ.修復方法の策定、Ⅲ.再設計、Ⅳ.修復工事業者の調査、Ⅴ.業者の選定、Ⅵ.資金調達、Ⅶ.意思決定、Ⅷ.資材の入荷待ち
修復時間：Ⅰ.損傷の量、Ⅱ.損傷の広がり、Ⅲ.工事業者の効率、Ⅳ.工程計画、Ⅴ.指定工期、Ⅵ.作業不能日、Ⅶ.周辺環境、Ⅷ.社会的環境

多岐にわたる

【図8】回復時間に影響を及ぼす要因は多岐にわたる



【図9】設計目標と評価指標の変遷

では、「人数」になるのかもしれませんが【図9下段】。例えば、「今回の地震被害の大きさは作業員 100 人」あるいは、「この都市の損傷を、「作業員 5000 人に抑えることを設計目標とする」と言った耐震設計です。この場合、許容限界値は、日本の作業員の総数（復興作業にあたることのできる人数）を基に定められます。

以上、耐震設計の最前線について解説しました。少しでも耐震設計・建築学に興味を持つ方、日本を自然災害から守りたいと思う方が増えれば幸いです。

参考文献

- 1) 増田幸宏他 5 名：「大都市の自然災害危険度指数」に関する考察と展望、日本建築学会技術報告集 第 15 巻 第 31 号、833-838、2009 年 10 月
- 2) 国土交通省・総務省ホームページ：
<https://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/r01/hakusho/r02/html/n1222000.html>,
https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/hyouka/hyouka_kansi_n/saikin_pdf/070613_2.pdf

