

8/9

August/September
2006

不動産調査月報

No.340/341

第5回 REIカレッジ公開セミナー

建物構造の安全性—耐震問題を背景として—

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授
神田 順

Japan real estate institute



当研究所は「不動産に関する理論的および実証的研究の進歩発展を促進し、その普及実践化と実務の改善合理化を図ること」を目的として、昭和34年に、各般の専門家を集めて設立された財団法人です。
【不動産に関する理論的・実証的研究】【不動産の鑑定評価】及び【不動産に関するコンサルティング】の3部門の調和のとれた有機体たることを目指し、本所のほか全国52支所が一体となって活動しております。

編集発行人／調査企画部長 北川 雅章／財団法人 日本不動産研究所 調査企画部 © 2006
〒105-8485 東京都港区虎ノ門1-3-2 勸銀不二屋ビル TEL03-3503-5330 FAX03-3592-6393 2006年(平成18年)9月10日発行

JREI Japan Real Estate Institute

不動産調査月報 No340/341 ISSN 1344-8765

JREI 財団法人 日本不動産研究所



CONTENTS

第5回 REIカレッジ公開セミナー

建物構造の安全性 -耐震問題を背景として- 2

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授 神田 順

地震被害と構造設計	2
構造設計の意味	4
建築構造物のあり方	6
安全性の尺度	9
社会制度・法制度へ向けて	11

第5回 REIカレッジ公開セミナー

建物構造の安全性 -耐震問題を背景として-

東京大学大学院新領域創成科学研究科教授

神田 順 (かんだ じゅん)

1970年東京大学工学部建築学科卒、1972年同修士終了後竹中工務店に入社、1979年英国エジンバラ大学より博士号授与、1980年東京大学助教授、1996年東京大学教授、東京大学新領域創成科学研究科教授 社会文化環境学専攻として現在に至る。

環境問題の本質的解決を図るべく千葉県柏キャンパスで、従来の建築構造学の枠をこえて建築を始めとする社会基盤施設の構造安全性の問題を中心に最適信頼性指標の概念を用いた研究を行っている。誰でも利用可能な標準的ツールとして「既存建物の標準的構造性能評価」をインターネットで公開している。受賞歴 1991年日本建築学会賞が関ビル記念賞、1996年日本建築学会論文賞。著書は多数あるが、岩波科学ライブラリー「耐震建築の考え方」(1997年)が一般向けに書かれているのでわかりやすい。



開催日 2006年5月22日 (月)
主催 財団法人 日本不動産研究所

建物構造の安全性 - 耐震問題を背景として -

はじめに

昨年11月に構造計算書偽装問題が発生し、それ以来、さまざまな形で構造安全についての議論がされています。国会で建築基準法をはじめとする法制度の改定などの提案がされていますが、国の対応の仕方は極めて表面的な対応で、本質的な大きな課題が取り残されているように思います。現実に社会の中で、建築構造物の安全性をどうとらえるかは難しい問題ですが、建物構造の問題について、どういう側面があって、どういう方向で取り組むことが必要かをこの機会に少しでもお伝えできればと思います。

安全性については、法律で基準を満足していれば安全、満足していなければ危険といった、簡単に割り切って受け取られがちで、当初のマスコミの報道なども問題を複雑にしているところがあると思います。

一般に安全の問題は、国民一人ひとり、いろいろなところで関係していますが安全を確認して安心したいと思っても、法律で規制する安全と現実との間には常にギャップがあり、冷静な対応をするためには、適切な形での情報の流通あるいは情報の開示がされる必要があります。安全の問題に対して一般の国民から専門家がうまく使われる状況ができてくれば、と思います。

地震被害と構造設計

関東大震災1923

震度による耐震設計法(佐野利器)
建築基準法制定・施行 1950

新潟地震1964

地盤の液状化

十勝沖地震1968、宮城県沖地震1978

コンクリートのせん断強度、鉄骨の溶接
新耐震設計法(保有耐力設計)1981

阪神淡路大震災1995

耐震基準の性能規定化2000

?

図表1

実際に地震が発生しますと、特に大きな地震の被害は、目に見える事実で、それを基に構造物をどうすればいいかという社会の仕組みができています。

1923年の関東大震災の少し前に、東大の佐野利器先生が震度による耐震設計法(震度法)を開発し、構造物の耐震性が担保されるという方向が打ち出され、それをベースに1950年には建築基準法が制定されました。それ以前は市街地だけの建物の安全に対する市街地建築物法により、危険な建物を造らせないように警察が取り締まるという位置づけでした。

震度法は関東地震をベースに、どの程度の力が発生するかを考えておけば、地震に対して大きな被害が出ないで済むということで設計がされましたが、地震が起きると思わぬ状況が発生します。

1964年の新潟地震では、地盤の液状化問題が発生しています。地盤の液状化に関しては、法律として決められていませんが、砂地盤の軟弱なところでは対策も取られている例が多くあります。1968年の十勝沖地震では、鉄筋コンクリート構造物のせん断耐力、柱が横にずらされるような力で壊れたことに対して耐力を増すための方策を考えるということで、施行令が改正されています。宮城県沖地震でも結果を反映させて、鉄筋コンクリートのせん断力に対する抵抗、あるいは鉄骨の場合は溶接部分がどういう形で抵抗するかが大きなテーマとなりさまざまな検討がされています。

集大成という位置づけで、1981年には建物がある段階で大きな変形をしても倒壊はしない保有耐力設計(新耐震設計法)が開発されています。例えば鉄を引っ張ると、弾性の状態を超えると急に伸び出す塑性変形が起こります。鉄筋コンクリート造はコンクリートの中に鉄筋が入っていますので、急に伸び出すけれど、すぐにはちぎれないという鉄の良い性質でエネルギーを吸収して地震が来ても、倒壊する手前で大きな変形だけでとどまるという概念を設計の中に組み込んでいます。

構造計算書の偽装問題で、「許容応力度等設計」という言葉がよく出てきます。いわゆる許容応力度設計は、佐野利器の提案した横力を建物の重量の10%、20%加えてどうなるかという計算法です。鉄筋がある程度のところから伸び出して、さらに倒壊するまでには大変形をしていくことをどう設計の中に組み込むかは、保有耐力設計と言い保有耐力を評価する設計法になっています。許容応力度等設計法の「等」のところは保有耐力の計算ということです。

許容応力度設計は比較的小さな地震力に対して鉄筋が余裕を持って、あるいは鉄骨が余裕を持って耐力を満たすことを検討するものですが、保有耐力設計は鉄

筋が弾性を超えて大きく変形するところまで評価の対象に入っていますので、大きな地震力を想定した設計法になっています。そこで1995年の阪神・淡路の震災の場合も、1981年以降の建物に関しては比較的大被害が少なかったということで、保有耐力を検討する形で設計法が用いられていることに対しても評価がされています。

これに対して2000年に耐震基準の性能規定化という方法が取り込まれて、設計法の中に具体的な耐震レベルとしては地震動の強さがどの程度のものに対して設計するのか、という形で法律が整備されました。計算法も詳しく規定されることになり、確認審査の行政の側で十分に内容を把握することが追いつかない状況も出ています。今後、法律での整備と技術的な設計法の整備とのバランスを、どうとっていくかが一つのテーマになっていると思います。

図表2の阪神・淡路の被害の例は、建物の4、5階部分の1層分の柱が全部つぶれている中間層崩壊です。この建物以外にも中間層崩壊が出ましたが、実際にでき上がったものは人間がある程度の判断をして造るわけですから、地震力がどう働くかという基準の説明の仕方と、実際に作用した力との関係がうまく合っていないということではないかと思えます。それだけが理由というわけではありませんが、この建物が設計されたときには地上から16mの高さまでは一律の水平力を考えて、比率は一律のものを考えて、そこから上は直線的に比率を増やすような形になっていました。ちょうど16mぐらいのところは弱点になるという形の基準が使われていたということが言えます。

それから壊れるパターンとして随分ありましたが、図表3の1階のピロティ部分の倒壊です。柱はまさに横から押されて壊れたということですが、2階の床部分については梁があって、フロアとして水平面を構成しています。1階のレベルと平行にずれることによって、柱が曲げられていることがわかります。少しちぎれているものもありますが、柱の周囲を巻いている鉄筋をフープ筋といいます。フープ筋が、必ずしも十分にせん断力を確保できなかったと考えられ、構造的には左から右に向けて力が働いて、あるいは柱に対しては左から右に力が働いていて曲げられていると見ることができます。柱に対して左から右に力をかけますと、引っ張られてこのような形で曲がってくるのが見てとれるわけです。



中間層崩壊

図表2



ピロティ柱崩壊

図表3



老朽化木造住宅が放置されたことによる被害

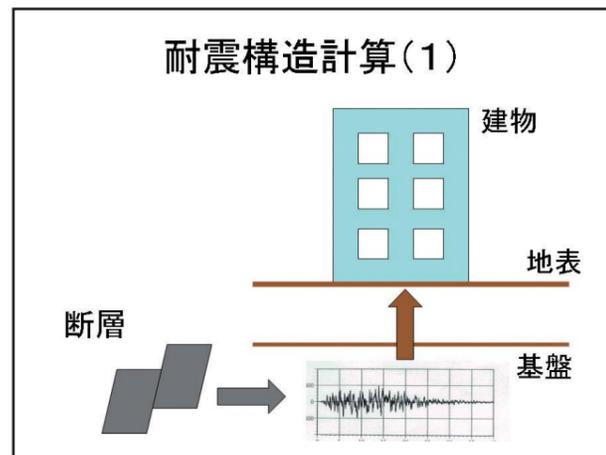
図表4

構造計算で力の流れをとらえることと少し別の問題ですが、図表4の木造住宅の場合は特に老朽化した状態が放置されていたことが、現実には阪神・淡路の地震の場合の被害の大半を占めています。老朽化した建物に対して我々がどう対応していくのが、大きな課題として投げかけられたと思います。

構造設計の意味

1 構造設計とは

地震の被害を踏まえて設計という流れの中では計算によって安全性を確認することが行われます。図表5で模式的に表現しますと、地震が建物にどのような形で力が作用するかということです。地中深く、ものによっては数十キロ、数百キロのところで断層が発生します。あるいは阪神・淡路の地震のように地表に近いところで、地表にも断層が出てくる場合もあります。断層がいきなり切れてずれることで岩盤の揺れとして伝わってきます。図表5の右下のグラフは横が時間、縦軸が揺れの強さをコンピュータでシミュレーションして描いたものです。揺れが建物の地下数十メートル、場合によっては数百メートルの基盤という比較的硬い岩盤に伝わって表層の地面で、さらに増幅します。その増幅の度合いも地表面がしっかりした地盤であれば、基盤とほとんど同じ揺れになる場合もありますし、地表面が柔らかい層で構成されている場合には、2倍、3倍と増幅する場合もあります。増幅された波が建物に入って、さらに揺すられます。揺すられる度合いにつきましても、地面が柔らかくて建物も周期が短い場

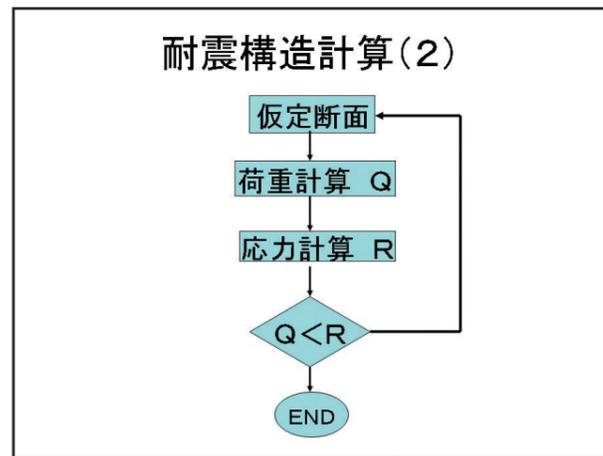


図表5

合には大きく崩れますし、地面がしっかりしていて建物の周期が長い、あるいは建物が背の高い建物だと周期が長い建物になりますので、揺れがあまり増幅しません。

このように構造計算上、どの程度の力が入ってくるかはメカニズムとしてはとらえられますが、現実にとどのぐらいの大きさの地震が発生するのか。あるいはマグニチュード7.5、7.9といった地震が発生したときに、どのくらいの揺れになるのか。あるいは基盤に入った揺れが、建物にどの程度の揺れになって増幅されるのか。それらについては科学的にはわかってきてはいますが、現実の一つひとつのケースについてまだまだばらつきが大きい要素です。自然現象ですので、我々が理解できるといっても、評価しようと思えばと20%、30%、場合によっては倍半分の誤差が伴い、ある程度取りまとめた形で計算の流れに乗せることになります。

図表6で構造計算を簡略化した流れで書きますと、柱、梁の断面を仮定し、地震が建物に入ってくることを想定して荷重の計算を行います。地震の力がどの程度横力として作用するかを、そしてそれぞれの柱、梁にどの程度の曲げる力、押す力、引っ張る力、せん断で切る力が働くかの計算をします。そして発生した地震によってもたらされた力と、建物がもともと持っている耐力と大きさの比較をして、耐力が大きければ安全であるという判断をします。

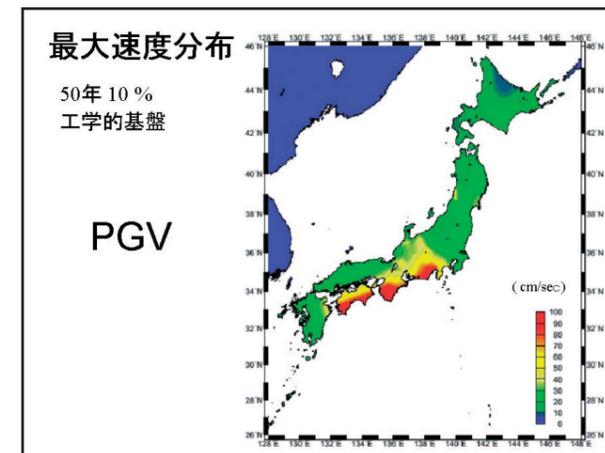


図表6

しかし現実にはどの程度の地震が発生するのか、あるいは地震動としての揺れがどの程度の頻度で発生するのかに関しては、将来発生することですので大きな不確実性を持っているので、ある程度モデル化して評

価した一例が図表7です。これは私どもが計算したのですが、昨年は国のほうからも確率論的な予測地図が発表されています。数日前でしたか、新聞で地震保険の料率の見直しが出ていましたが、地震に関しても断層の活動度やさまざまな知見が取り込まれて、どの程度の危険性を持っているかを評価しています。

図表7は一般には地震ハザードと呼びます。この指標は最大速度、PGV(Peak Ground Velocity)です。50年間で、ある速度の値を超える確率が10%となるような速度の値がどの程度かを、日本全国に対して評価することができます。私どもで開発していますインターネットを使った評価システムの中で扱っている一例です。



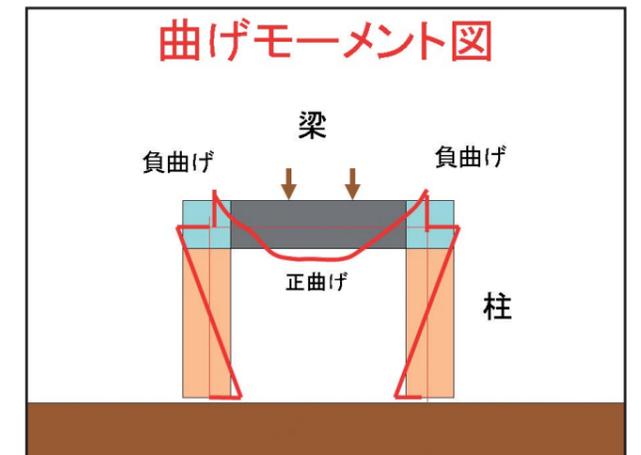
図表7

建築構造の授業では、いちばん最初にどのような力がかかると、どのような曲げモーメントが発生するかを説明します。図表8は柱が梁を支えている、上からの力がかかると端部には上のほうが引っ張りになって、下が圧縮になるような形で曲げがかかります。梁の曲げは柱にも直接釣り合う形で影響しますが、上から一般に重力によって力が作用するときこのような曲げがかかるということです。

こういった計算は5%を切るような精度で我々は評価できると思いますが、よくよく考えてみますとこういったモデルも、ここは1本の線で考えていますので、例えば柱と柱の間隔が6m、10mあるときに、柱の太さが40cm、50cmあるものを1本の線として、大きさのないものとして力の釣りを考えます。

実際は面積があるので、実際の力の流れがどのようになるかを詳細にとらえていこうとしますと、柱、梁の断面を全部細かくメッシュに切って評価する方法も

あります。一般に力の釣り合いをわかりやすくとらえようとすると、単純化したモデルで評価しますが、必ず評価誤差が出てくることをお示したかったのでこういう図を載せました。



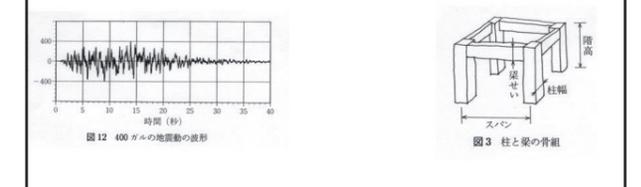
図表8

2 安全ってどういうこと?

安全はということかというときに、地震によって発生する力によって、図表9では例えば柱にどの程度の力が加わったかを考えます。一方でこういった柱と梁で組み立てられた構造物、場合によっては壁が入っていて、壁が力を分担することもあります。柱一つの曲げに対する強度、地震によって発生した曲げモーメントがどの程度か。建物、柱の持っている耐力のほうが大きければ、安全と基本的には考えます。

安全ってどういうこと?

地震の力 < 建物の強さ

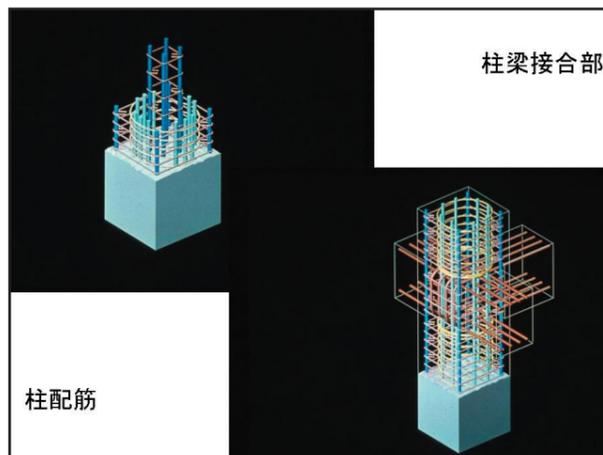


図表9

一般に設計を考えてみましょう。例えばこの柱と柱の間隔をスパンと呼びます。スパンは例えば6mぐらいであれば、鉄筋コンクリートの梁の高さ、これは梁

せいと呼んでいますが、梁せいは60cmぐらいが常識的な大きさです。それを少し鉄筋の量を多くして梁のせいを50cmでもできるようにするといったところが設計の工夫の見せどころです。一般に、頑張れば倍半分ぐらいは何とかなるということもありますが、それも材料の開発、例えばコンクリートの強度などにしても、従来30年ぐらい前までは1cm³あたり240kgぐらいの強さのコンクリートが、性能の良いコンクリートと言われていましたが、最近、超高層の鉄筋コンクリート造がたくさん建てられるようになってコンクリート強度としても600kgと2倍以上の強さのコンクリートを造ることができるようになってきました。最近ではさらにその1.5倍、1000kgを超えるようなコンクリートも使えるようになり、240kgの時代から考えますと、4倍、5倍の強さのコンクリートが使えます。同じ断面で強度が満足するという考えれば5倍の強度を持つのであれば5分の1でもいい。しかし5分の1にしますと今度は断面が小さくなってたわみが大きくなり、単に強度だけで設計できません。けれどもそういった状況が設計の中で考察されながら、断面が決まってくるということになります。

図表10は鉄筋がどのように配置されているのを見えるために、超高層の住宅の柱の中にいろいろな形で鉄筋が入っていることをグラフィックで描いたものです。鉄筋もそれぞれ役割があり、柱の中には5cmを超える太いものがあります。柱の中心部にある鉄筋は横から曲げる力には抵抗しませんので、一般に軸力、軸方向に作用する圧縮する力に対しての抵抗を持つものになります。それから柱の外周に近いところに置かれた鉄筋は、曲げる力に対して抵抗します。



図表10

※日本建築学会「建築構造パースペクティブ」より

それをかご状に組んで、フープ筋はコンクリートの柱全体が、横からせん断される力に対して抵抗するような形のものとして用いられています。1970年代からはこのようなフープ筋の間隔を細かくして、コンクリートの柱が簡単にせん断で壊れないように配慮されています。設計にあたりそういったことを配慮しますが、せん断する力で壊れますと、先ほどピロティの建物が壊れた例をお見せしたようにもろく壊れてしまいます。曲げる力で鉄筋が伸びるときには、すぐには倒壊には至らないわけです。それが大変形になって建物としては大破する状況にはありますが、ただ倒壊には至らないということで曲げに対する耐力とせん断に対する耐力のバランスを、どのようにするかも構造設計のテーマになっています。

建築構造物のあり方

構造計算の安全性が確認されますと、それに応じた形で図面が作られ、建物の構造設計が完了することになります。一般的に建築構造物が構造安全としてどうあるべきかという話をします。

1 地震を知ること

まずは地震を知ることです。図表7の日本地図で50年に10%を超える確率の強さの地震動がどのくらいかを表していますが、計算にあたり日本全国に活断層があって、特に主要な活断層と地震学の研究の中でもある程度認知されているものが98ほどあります。

そういった活断層一つひとつが、どの程度の確率で地震を起こすのかについては、200年に一度程度繰り返し地震を起こしている断層もあれば、1000年に一度という例もあります。1000年に一度になりますと、記録がないのでトレンチ調査で活断層のある場所を掘って、地層断面を見て過去にさかのぼって、1000年に1回ずつ地震を起こしていることを確かめることができます。

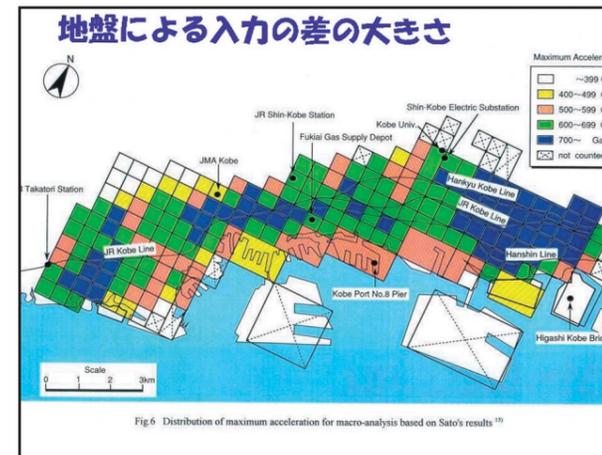
我々の生活のタイムスケールは、50年、100年程度ですから、これから先50年にどのくらいの確率で地震を起こすか、この断層は必ず地震を起こすあるいは、地震を起こすことを考えなくていいという確定的な判断はできないので、確率的に、どの程度の強さの地震動が、どのくらい起きるかを評価しなければいけないこととなります。

確率的に見ると同時に、逆に地盤による揺れの違い

も地盤の構成ではっきりわかります。一般に台地や山間地では比較的硬い岩盤で支えられていますが、大阪平野や関東平野は、岩盤に比べると柔らかい地層で覆われていますので、地層がどのくらいの深さで堆積していて、どの程度の厚さの地層かによって、揺れ方は随分変わってきます。

図表11は兵庫県南部地震のときの揺れを、500mごとのメッシュで取り出したものです。関東地震は、今の耐震設計を考える目安になっていますが、壊れないという扱いをするためには、地表面で400ガルを目安にすると考えています。ガルというのがcm/sec²です。重力加速度は1000ガルあるいは980ガルですから、400ガルは重力加速度Gの0.4倍です。ただその0.4倍は地表面の加速度ですので、建物で増幅しますと、それが1Gに相当するということで、一つの設計の条件として考えることができます。

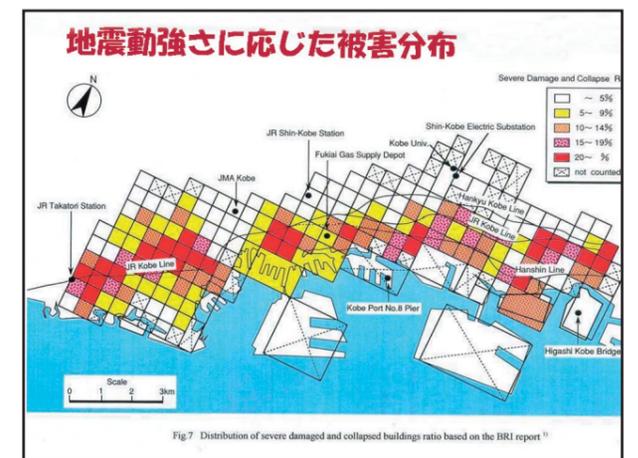
しかし兵庫県南部地震の場合は、それをはるかに超える状況が見てとれます。ここで青色になっているところは700ガルを超えているところ、緑のゾーンで600ガルを超えているところですので、かなりのゾーンで600ガルを超える。それは保有耐力で設計を考えているレベルにしますと、5割増しぐらいのレベルになっています。関東地震のときも震源に近い横浜、小田原では、神戸の兵庫県南部地震とほぼ似たような状況もあったのではないかと思います。東京はそういう意味で関東地震のときは少し離れていたので400ガル程度というのが一つの目安で生きていて、それが兵庫県南部地震のときは関東地震よりもさらに強い状況が再現していた、ということになるわけです。



図表11

2 地震動と被害

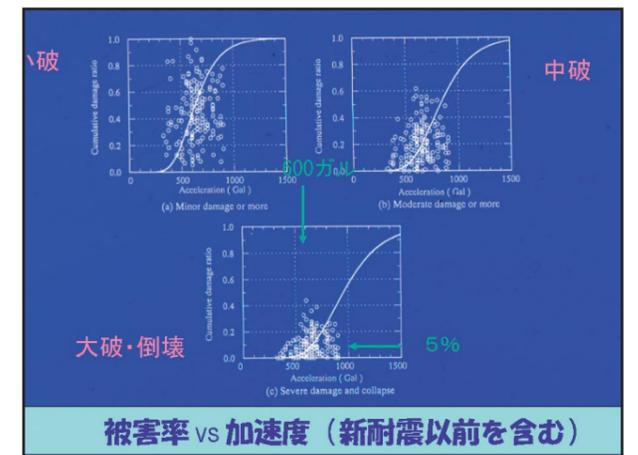
図表12で被害の分布を見ますと、これは先ほどの老朽化した木造は省いてあるのですが、構造計算をしている対象の建物だけを計算したものです。これも同じ500mのメッシュの中で、大破、倒壊している割合を表したもので、大破以上の被害をしているものが20%を超えているものが赤、5%以上が黄色で加速度の強さ、分布と被害の大きさの分布がある程度は対応



図表12

していることが見て取れます。

これをグラフにプロットしますと、図表13の横軸が加速度で、縦軸が被害率で小破、中破、大破・倒壊で見ます。600ガルぐらいのところできくばらついているのは、地盤、建物の強度によって地震の揺れそのものが増幅することで大きなばらつきとして出ます。オーダー的に見ますと、600ガルで5%程度の大



図表13

破・倒壊の率になっています。これを建築基準法で求めている許容応力度と、計算法が要求する最低水準が満足していればどの程度になるかを考えたときに、実は新耐震（1981年）の設計法で設計された建物より古い建物も含めて5%になっています。

1981年以降の建物に限定しますと3分の1程度になります。これは平均で5%ですから、5%の被害が1.5%ぐらいになります。さらに大破した建物と倒壊した建物を合わせた被害統計ですので、倒壊に限定するとさらに少なくなって0.5%となります。しかも考えているレベルが600ガルという、もともと構造計算で前提としている400ガルの5割り増しのレベルということで耐震基準を改めてレベルアップする必要はないという考え方が判断の一つになっています。

耐震基準をどの程度の水準で最低とするかについても、そのレベルを上げれば確かに被害が少なくなることはわかりますが、実際にはでき上がった建物の強さの分布が幅広く、地震の入力そのものがどの程度の精度でとらえられるかといったときに、地震が発生したという条件が与えられていればある程度のばらつきで抑えられますが、これから将来を考えると大きなばらつきが存在します。そうした中で計算という約束事の中で、どの程度とらえるかということになるわけです。

3 安全に絶対はない

耐震基準を事前に想定していても、それを上回るレベルの地震動で被害（図表14）が発生します。飛行機が飛び込むという人的な衝撃荷重の状況は全く想定されていませんが、それに対しても設計の中でどの程度余裕を持たせることによって、例えばニューヨークのワールドトレードセンター（図表15）の場合も瞬時に崩壊することなく、1時間あるいは2時間ある程度そこで踏みとどまったことが避難できた状況をつくっています。それも建物が想定しているレベルよりはるかに大きい外力が加わったときに、どういった挙動をするかを設計でどの程度見込んでおくかが結果に影響してきます。

図表16は、安全の可能性を評価する上でのインターネットのシステムです。国土交通省からサポートいただいで私どもが開発したものです。アドレスにアクセスしていただきますと使えるようになると思います。

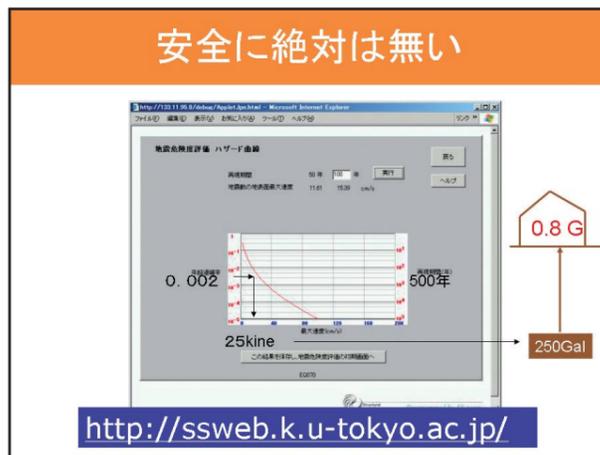
そこでインターネットでアクセスしていただきサイトを入力しますと、そこがどの程度の地震でハザードの場所であるかが計算されます。ここに500年、



図表14



図表15



図表16

0.002と書きましたのは、1年間の超過確率が0.002、1000分の2です。その逆数をとって再現期間と呼びます。500年という数値はそのレベルを超える地震動の発生が、平均的には500年と確率的なモデルとして想定されるということで再現期間500年、あるいはそれと同じ意味で年超過確率が1000分の2という言い方をします。

この場合、横軸が速度で25kineという速度値で加速度に換算すると250ガルとなり、建物に入力すると増幅して、例えば0.8Gの水平力が加わるということが、この図の危険ハザードとしては説明されます。建物の耐力は、鉄筋コンクリートの建物、木造の建物であるか、1981年以前あるいは以降のものかということにより統計的にどの程度の強度を持っているかということから、建物の地震による被害のリスク計算できる仕組みになっています。

4 自然+人間+社会として捉える建築構造設計

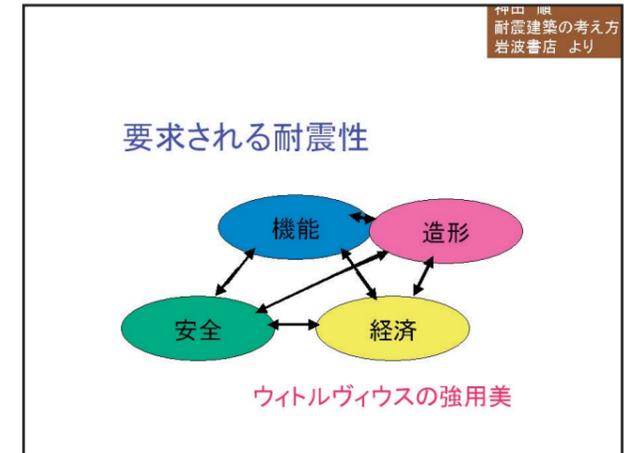
建築構造の安全の問題は、自然の起こす地震、台風なども設計では対象としています。それに対して人間が判断してルールを作って、建物を設計するので、単に自然だけで被害が起きるわけではなくて、人間がそれをどう解釈するかによって被害の種類、大きさが変わります。まさに自然系と人間系が、一緒になった結果としての安全の問題になると捉えるべきだと思います。

図表17は1997年に私が書いた『耐震建築の考え方』の中の図で、四つの要素のバランスの中で、耐震性が考えられています。機能、造形、安全の三つのバランスは、紀元前のローマでウィトルヴィウスが『建築書』で建築のあり方を説いています。そこでは「強、用、美」と言っていますが、強さは安全性、用はどの用いることができるか、それから美しさの三つのバランスこそが、建物の本質であるとしています。現在の経済活動の中では経済性といった問題も性能、要素の一つとして出てくると思います。この四つのバランスを、どうとっていくかがポイントではないかと考えています。

安全性の尺度

経済の面から例えば予算が限定している中で、より高い機能を求めようとするれば安全が犠牲になる場合がありますし、機能を決めておいてその中でより高い安全ということになれば、経済性との関係でバッティン

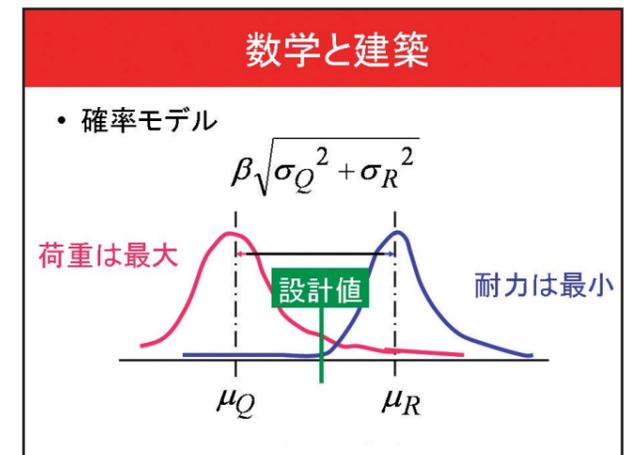
グすることもあります。現実にもそういったことを評価しようと思えば、安全性をどのような形で評価したらいいかが問題になります。それがこれからご説明したいと思っている安全性の尺度です。



図表17

図表18は、数学モデルで確率的にモデル化をすることによって、定量的な数値で表すことができます。これを概念的にとらえていただければと思います。左側の赤い山は、地震力がどのくらいの大きさを持っているかを描いたものです。 μ_Q と書いてあるのは地震力の平均値です。平均値回りの地震力は割と起こりやすいわけですが、例えばその2倍、3倍の力も、確率的には小さいが、起きるかもしれない。確率モデルの中では確率密度関数と呼んでいますが、こういった分布を持っていると推定できます。

建物の耐力の μ_R は平均的な耐力の大きさです。建物の耐力も構造計算の精度の問題もありますし、それ



図表18

からコンクリート、鉄骨の強さといっても管理はされていますが、5%や10%といったばらつきを持っています。例えばコンクリートの柱を曲げたときに、どのレベルでその降伏、弾性を超える鉄筋が伸び出すような変形が、どの程度出てくるのかは実験でわかっています。しかし、10%、15%のばらつきを持っています。

そうしますと地震力もばらつく、耐力もばらつく。そういった中で平均のレベルとして、耐力がかなり大きな余裕を持っているようにすれば、そのばらつきの評価がここでは σ 、標準偏差で表しているのですが、標準偏差の二乗和で全体のばらつきがどの程度離れているか、ばらつきに対してどの程度余裕を持っているかを定める数値が β という数値です。この β を0にしますと、この距離が0になりますので μ_R と μ_Q が一致して、壊れる、壊れないは50%、50%になります。 β の値を大きくするとそれぞれのばらつきを考慮した上で、この差が大きくなって発生した地震力が耐力を上回る確率がどんどん小さくなります。

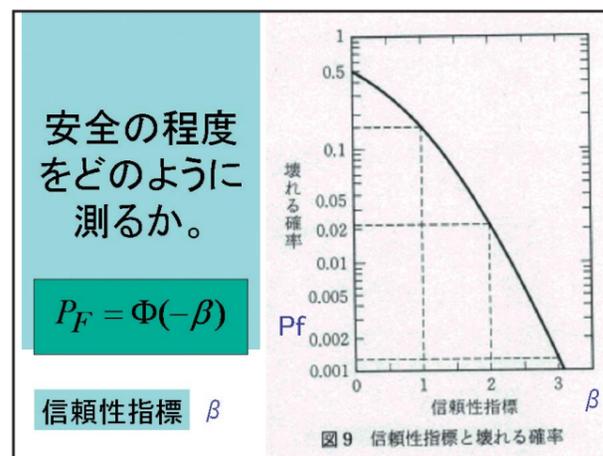
耐力は、最小値がどのくらいかという目で設計的に判断する必要がありますし、荷重の側は最大がどのくらいかで判断する必要があります。実は構造計算で安全をチェックすると言っていたのは、設計値をどこかに置くわけですが、荷重に関しては平均よりもどのくらい大きいかで最大の荷重を想定する。耐力のほうは設計値として、平均よりもどのくらい小さいところで評価するか。そこで設計値が、耐力が、荷重を上回っている形で評価する形になるわけです。

そういった目安としてこの β 信頼性指標を持てきますと、図表19も単に確率の式ですが、標準的な正規分布の関数を使いますと β は壊れる確率と1対1で対応した式が得られます。例えば β が0ですと、耐力の平均値と荷重の平均値が一緒ということは、すでに述べたように、壊れる確率50%となります。そんなところで設計していたら大変なことになりますので、 β としては普通1.5から2、3ぐらいを目安にします。現行の耐震基準で決められているレベルをこういった形で分析して読みとりますと、50年間で壊れる、あるいは大破よりも悪い条件になる可能性として、 β のレベルで1.5から2ぐらいになることが知られています。

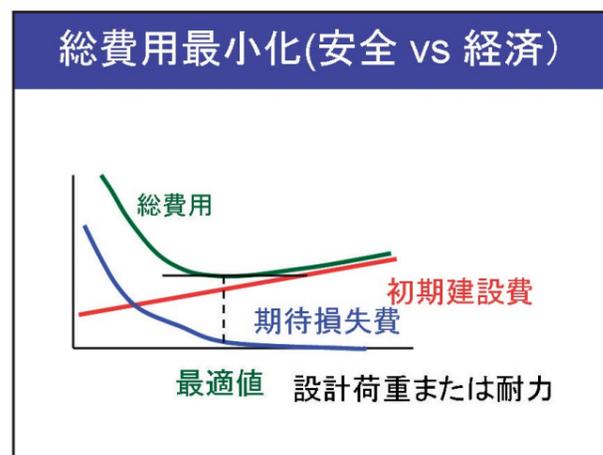
しかし実際に兵庫県南部地震の被害を見ますと、もっと小さな破壊確率になっていることもわかることで、現実には地震力がばらつきを持っていて、耐力についてもばらつきを持っている中で、 β として安全性

を定量的に指標で示すことができます。 β が1というのは、壊れる確率15%ぐらいのものを意味します。 β が2は2%、3ですと1000分の1ということで、 β が1上がりますと壊れる確率が一けた小さくなるオーダーになっていきます。

このような形で安全性を確率的に見て具体的な、定量的な数値で示すことができますと、総費用最小化といった概念を適用して計算の上で最適値を求めることができます。図表20は横軸に設計荷重または設計耐力を使いますが、これをより大きくするのは信頼性指標 β を大きくすることと同じです。あるいはもちろん設計荷重を大きくする、400ガル、600ガルにする、800ガルにするといったものです。設計荷重を大きくすると初期建設費は、ほぼ直線的に増えます。



図表19



図表20

これは例えば今400ガルに対して、建物が大破ぐらいにとどまるような設計にするというのが基準法のレベルですが、それを例えば2倍のレベルで設計しますと、建物トータルに関しては5%かもう少しぐらいコストが余分にかかるようになります。これは実は姉歯構造設計士が鉄筋の量を減らすために地震力を減らした。地震力を半分にするだけで、コストが5%ぐらい削減できたというようなことが出ていました。そのあたりの数字も、数字としては極めて理解できる範囲です。

要するに想定する設計荷重の大きさの半分にする、倍にするというオーダー、建物トータルのコストとしては5%、多くても10%にはならないようなオーダーで、初期建設費の安全性増加による伸び率は比較的勾配の小さなものになります。それは建物全体のコストに対して構造物の占める割合が、そもそも20%、25%程度のオーダーだからです。構造の材料の増加がコストに跳ね返ってくる部分は、それほど大きくないということからも想像できるのではないかと思います。

安全性を増しますと、設計荷重を増やすことは β を増やすということで確率が小さくなりますが、そうすると青の期待損失費は壊れる確率と、壊れたときのコストのかけ算です。建物が完全に倒壊すれば建物のトータルの額そのものです。それに対して壊れる確率は先ほど50年で計算の上ですが、 β が2であれば2%、3であれば0.1%というオーダーになります。荷重を増やしていきますと指数的に急激に小さくなります。

この期待損失費と初期建設費とを加え合わせたものが総費用、あるいは総期待費用といわれるもので、これは直線的に右上がりの線と急激に0に近づいていく損失費の和です。左に行けば大きくなりますし、右に行っても大きくなるというところでどこかに必ず最小値がある。これを期待損失費が最小になるところということで、経済的なバランスとしても適切な値をこのようにして決めることができます。もちろんこれは概念的な説明図ですが、数字を入れていけば値は割と簡単に決まります。現在、基準法などで設計されているレベルはこういったものから、大きく隔たるものではないということも確認されています。

問題は建物が例えば倒壊する、あるいは大破したときにどの程度の損失になるかを、安全性のレベルを決めるときを目安、議論のネタにすることができることです。それは法律で一意的に決められた安全性というのではなくて、個別の物件ごとにそこにおける地震の

ハザードとしての危険性がどの程度あって、どの程度コストをかけると壊れる可能性をどの程度減らすことができるかということから、適切なレベルの議論が可能になることです。それが構造の安全を、どう考えるかという意味で非常に重要なことだと思います。

社会制度・法制度へ向けて

最後に「社会制度・法制度へ向けて」ということで、お話しします。構造安全の問題は、単に工学的な調査だけでは答えの出ない問題だと思います。経済性の問題、場合によっては心理的な安心感の問題、それから現実には法律で規定されますと、それが実際に社会に存在する構造物の安全のレベルを決めていきますので、すべて絡んでくる問題と言えると思います。

そしてそういった問題に対して責任をどのように分担するのかが、まさに今問われていることだと思います。建築主から販売会社、不動産にかかわっている会社やコンサルタント、設計者、施工者、さらには今回の事件では審査機関、行政のあり方も問われています。すべての関係者がそれぞれ適切に業務を行っていかないと、安全なものがないということは一つあります。社会が企業をどう見るかというときに、単に経済性の追求でほかはなるべく目をつぶるということでは評価が得られない状況ができてきていると思います。そうしたときに情報が、どの程度適切に行き渡っているのかが問題です。例えば建築主にいたしましても一般の個人、国民一人ひとりには、例えば今日私がご紹介しているような地震動の危険性がどのくらいあるのか、それをどう判断したらいいのかがわかりませんが、専門家は、情報がある程度読み解いて自分なりの判断ができます。そういったことが一人ひとりの国民のレベルで、どれくらい判断できるかということが、企業として、例えば今回のような場合でいくとマンションを販売する状況にあれば、販売するマンションに対する安全性の問題になりますと、専門家が介在してどの程度の安全を担保できているのかを評価することが、社会的責任として問われるものだと思います。

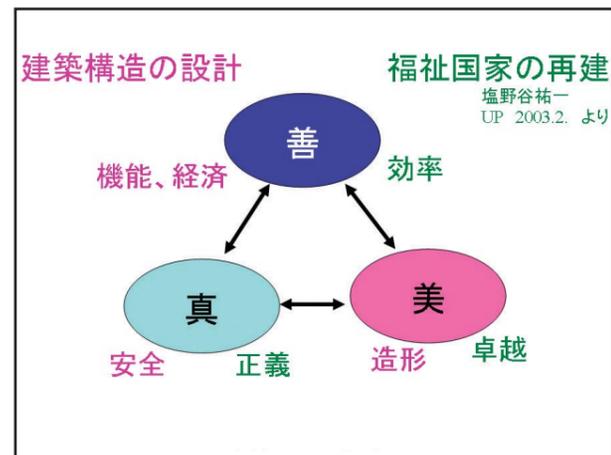
私が思いますには、行政はある意味で民間のそういった仕組みの中の調整役でなければいけないと思いますが、行政がそこで経済的な責任を取るように現実にはなっていないし、国の確認行政に対する批判を申し述べてはいるのですが、それはもちろん審査は適切に行わなければいけませんし、適切なレベルで審査されて

いるかどうかを見ることは社会の仕組みとしても必要なことだと思います。しかし、審査したことで直接的に経済的な責任を取るのかというところではなくて、建築主がそもそもの程度のグレードの建物を建てようとしたのが、まず問われなければいけません。またそこで想定された安全性の程度に対して、設計者がどういう形で答えを出しているのか、というところがまた問われなければいけないと思います。

そういった部分の役割分担、責任の分担を、我々はどういうふうにして確認しているのかがあまりにも議論されないで、単に1950年に作った基準法で結果的には安全なはずだということになっていると、いつまでも状況は変わっていかないのではないかと思います。

図表21に「福祉国家の再建」という論文の視点を示します。そこで効率、正義、卓越性といったもののバランスが問われていました。安全と機能と造形性のバランスが、全くアナロジーとして成り立つと思いを描きました。安全性は真実がどこかにある。確かにある地震が来たときに、壊れる、壊れないには真実があるのですが、ただ我々はそれを100%理解しているわけではありません。

そういう中で、基本的には安全に対する正しい評価というものが必要です。一方で効率性、あるいは使用性も必要ですし、それをさらに別の視点から快適性、あるいは美しさが見えてくるのが建物の価値にもつながるといように、バランスこそが求められているのは、いろいろな局面で共通してあるのではないかと思います。



図表21

そうした状況の中で、資料にあるように私は2003年8月に「建築基本法」というコンセプトを出しています。今までの建築基準法は最低基準を満足することによって財産権を保証する。国民は等しく土地を持っていれば、建物を建てる権利があることで法体系が作られています。21世紀になってすでに建てる時代から、今あるものをどう維持・管理していくかというストックの時代になっていると思います。そのストックをどう評価して、我々にとって土地を持っていることは家を建てる権利があるだけではなくて、建物の存在そのものが我々の社会的な財産であることを前提に、法体系全体を考えていかなければいけないと思います。

安全の問題に対して、いろいろな立場の関係者の責務は基本的に我々の持っている社会的財産としての建築をいかによく造って、よく運営していくのが原則としてあること。それを確認する中から本当に法で規制しなければいけないのはどの部分で、それぞれの専門家はどのような役割を果たすかという議論を進めていかなければいけないのではないかと思います。

「基本法」は建築の場合、建築の理念やそれにかかわる人たちの責務を明確にするところまで確認するわけで、国民すべてが同じ立場で議論に参加できて、責任をどう分担するのかに関して国民レベルでの合意をつくる必要があるのではないかと思います。目的から定義、安全であること、あるいは環境を考慮したものであること、そして維持・保全というコンセプトが基準法には非常に弱いものですから、こういったものも基本理念として存在すると思います。

また国の役割はどこまでであるかについても、基本に立ち返っての議論が必要だと思います。住宅のあり方として専門家の資格、倫理、そして最初に建物ができるにあたっては、まさに建築主がこういったものを造るのか。それは本人の自由の部分もあるが、社会資産の一部をつくるという意識が必要だと思います。こういったことを行政の立場からではなくて、社会全体のルールの基本的なあり方で議論していければいいと思って、日々活動しています。6月8日にまた総会を開いて、議論をつめます。今回の構造計算書偽装問題も、こういったあり方そのものをどうするのかというところに立ち返らないと、単に罰則を大きくするあるいは、別の機関をつくって計算だけチェックするというだけでは変わっていかないと思います。

参考図書を挙げさせていただきました。もしご興味をお持ちいただけましたら、ぜひご覧いただければと思います。

図表22は江戸時代の安政地震のあとに描かれたナマズ絵です。ナマズ絵に関してはたくさんものが出ています。地震そのものは災害ですが、町民たち、若者、物を持ってない人たちにとっては、それをバネにまた新しい社会が来ることを夢見てむしろ笑顔が見られます。単に災害を楽しんでいるみたいに見られると、国はこういったものはけしからんと言って、江戸幕府はナマズ絵を発禁にしています。ですからこれはいわゆるアンダーグラウンドの存在なわけです。それは庶民がこういったことをきっかけに、新しい世の中が来るということを力強く思い描いたということが表れていると思います。

今回のような事件に関しましても、幸いに物理的な被害が出ていないわけですが、大きな混乱がきたしている中で我々がそもそも質の高い建築を造っていくためにどうしたらいいのかという形に受け取ることができれば、これから新しい仕組みの中で良い建築物が生まれていくのではないかと。人間の知恵というのは物理的な被害が出なくても、想像できればそこで何か対応できるというところに期待できるのではないかと思います。最後にご紹介させていただきました。



図表22

参考図書

- ・ 神田順著: 耐震建築の考え方、岩波科学ライブラリー51、岩波書店
- ・ 神田順・佐藤宏之編著: 東京の環境を考える、朝倉書店
- ・ 神田順: 「耐震強度」とは何か、科学 vol.76, No.4, 2006、岩波書店

建築基本法 神田私案 (2003.8.)

(目的)

第1条: この法律は、建築物のあるべき基本理念を定め、それにかかわる国、地方公共団体、事業者、専門家および国民の責務を明らかにし、もって国民の健康で文化的な生活に資することを目的とする。

(定義)

第2条: この法律において、「建築物」とは、国民が自然の脅威から身を守り、健康で、快適な生活を送ることが可能なための人工的な構築物を言い、通常、屋根と壁を有し建築物の内部と外部が区別できるものを言う。建築物は、構造、内・外装、設備からなる。

2: この法律において、「事業者」とは、建築物の設計、施工、維持管理あるいは解体にあたり、それらの行為を業として営む主体を言う。

3: この法律において、「専門家」とは、建築物の設計、施工、維持管理あるいは解体にあたり、それらの行為遂行のために建築物の基本理念に基づく判断、決定を行う資格を有するものを言う。

4: この法律において、「住宅」とは、人が住むための建築物で、便所、台所を備え、住む人の人数に応じた規模の床面積を有するものを言う。

5: この法律において、「構造」とは、建築物を支える基礎、柱、梁、床、壁、屋根を指す。

6: この法律において、「内・外装」とは、内装および外装をまとめた表現で、それぞれ、建築物の内部に取り付けられる物および建築物の外部を保護するものを言う。

7: この法律において、「設備」とは、建築物の使用に当たり、快適な環境を保持するための機械を指す。

第3条: 建築物は、地震、強風、積雪、土水圧といった自然の作用や、使用に伴って発生が予測される人為的な作用に対し、十分に安全な構造を有すること。

第4条: 建築物は、内部の構成や材料が、使用に対して適切に選定され、外部の構成が、周辺の町並み、景観に対して配慮されたものであること。

第5条: 建築物は、その構成要素である、構造、内・外装、設備、それぞれの状況に応じて、適切な維持・保全がなされること。

第6条: 国および地方公共団体は、建築物により安全が阻害され、環境影響が無視できないと予見される場合には適当な措置を講じなければならない。措置は費用対効果を明らかにした上で、法律、条令、勧告などの形で行われるが、技術の向上を妨げてはならない。

第7条: 住宅は建築物の一つであり、安全および環境にかかわる公的規制の対象を免れるものではないが、国民ひとりひとりの生活に不可欠という点でその他の建築物と異なることを考慮し、住む人の責任において規制が緩和される。また、健康に対する配慮に関しては、住宅としての規制を必要とする。

第8条: 建築物を設計、施工、維持管理、解体するにあたっては、資格を有する専門家が、その建築物の目的に応じた適切な判断、決定、指示を事業者に対して行うものとし、また、必要に応じて国および地方公共団体に助言を行うことが出来る。建築物の規模と対応する資格の種類については、別途政令で定める。

第9条: 建築物を所有する者は、第3条および第4条が満足されるよう、建築物の内部および外部の環境を良好に保持しなければならない。また、建築物を所有するに当たっては、その建築物がそれらの条件を満たしていることを、専門家の助言のもとで、自らの責任において確認しなければならない。

資料

・ 本稿は、当研究所主催「第5回REIカレッジ公開セミナー」における講演内容を録音テープをもとに、とりまとめたものです。