建築構造の性能と構造設計

和田　章*

1. はじめに

誰でも，仕事が巧く終わったら，ビールを飲んでおいしいものを食べ，いろいろな話をして，大きな声で歌いたくなる。この夏，イタリアのシシリー島で，免震構造と制振構造に関する国際会議があった。世界中から研究者，技術者が集まり非常に有意義な発表があり，熱心な討論も行われた。夜のパーティは地中海に面した砂浜で行われ，みんなで飲んで歌って踊って楽しい会であった。旧ソ連や東欧からも参加者があり，地震災害の軽減という世界共通の問題に向けて，協力して研究を進めている実感がした。本当に平和はいいものと思う。建築を設計し，実際に材料を集め，加工し組立て，建設していくことは，汗水流して大変な仕事とも言えるが，人間にとって最も生き甲斐のある仕事の一つと思う。だからこそ，一つの研究でも，設計でも，工事でも，終われば楽しく酒が飲みたくなるのである。

性能設計という言葉が多く言われるようになった。たとえば，万年筆，時計，テレビ，自動車などの工業製品で考えてみる。性能は，製作者が前もって試作品をつくりテストすれば，ほとんどの場合，使用者に渡る前にわかる。この性能を他社の製品と比べ，適切な価格をつけて販売することになる。消費者は，商品を目の前にして比較して選ぶことができる。ただし，建築の場合は，設計者を決めるとき，施工者を決めるとき，どの場合をとってみても，完成品は目の前にはない。完成品の性能をはかって，商品を選ぶことはできない。でも，使い勝手などはモデルルームを見ればわかる。工事の緻密さ，耐久性はその設計者や施工者の評判を聞けばある程度わかる。難しいのは耐震性能である。建物が設計者の言う耐震性能を持っているかどうかは，地震が来てみなければわからない。実は，地震が来たからといってもわからない。設計で考えていたレベルの地震動と本当に来た地震動を比べることはできないからである。スペクトル，継続時間など地震動はそれぞれ特徴を持っており，単純に比較することはできない。この地震動に応答する建物の方もそんなに単純ではない。場合によっては，低い性能をうたって作った建物と高い性能をうたって作った建物が並んで建っていて，そこに地震が来たとき，結果が逆になることもありうる。性能設計と言っても，耐震設計に関しては，計算の上での性能と言うことになってしまう。それでも，性能設計は必要である。

日本の場合，建築基準法，施行例，告示，通達などの国の出す法律等の枠内で，一般の建築は設計され，建設されている。建築基準法を決める人たちは，基準法は最低基準であるといってそのレベルを決める。これに参加している有識者は，その基準によって作られた建物の被害に責任を持つつもりはなく，与えられた条件の中で，できる限り力学的に間違いのないコメントをする。このようにしてできた基準を使って設計や施工をする人たちは，基準を守っているのだから問題はないと考えて仕事を進める。社会も，基準法以上のものを望まなくなる。そのうち，下限のつもりで決めた基準が，それ以上のものは作らなくてよいという上限を示す基準になってしまう。

このような背景のもと，一つ一つの自分の担当する仕事が進み，みんな，それぞれの段階で満足し，仕事が終わればまた楽しい酒を飲むことになる。大きな地震はある期間をおいて必ず起きる。その度に，地震災害から得た教訓といって多くの出版物が出版される。何も，基準を守っていたから安全ではなかったわけである。今の方法は，多くの人々が仕事や責任を分け合って効率を上げているだけである。これは人間の知恵と言えるかもしれない。生涯収入の何十倍，何百倍に相当する資金を使って，人間の一生の何倍ものスパンで襲ってくる大地震に対して，一つ一つの建築を作り上げること，これは大変なことであって，これを設計者個人の責任で対処できるほど，簡単なことではないからである。

ポルトガルのリスボンでは，今から約200年前の18世紀の後半に，ロンドンでも感じるほどの大地震があり甚大な被害を受けた。その後，全く地震がないという。日本は，世界的に見ると頻繁に地震のある国である。寺田寅彦は，人間の寿命が今の百倍になるか，地震が五風十雨のように頻繁に来れば地震災害はなくなると言っているが，そのとおりである。雨漏りする建物がないのと同じように地震にも壊れない建物が作られるはずであ

＊ わだ・あきら／東京工業大学教授 建築物理研究センター長（正会員）

る。大地震があまりにも少ない頻度でしか来ないために，うまくすればその建物を建ててから取り壊すまで地震に遭わなくて済むという確率計算が，成り立ってしまうところに問題がある。それでもリスボンでは，耐震設計を間違いなくやっているそうである。強い忍耐力が必要と思う。

2. 構造設計の手順

建築の設計は言うまでもなく意匠，構造，設備，施工などの専門家の協力のもとに進められる。建築の意匠設計の進め方に決められた手順がないのと同じように，構造設計においてもその進め方に決められた手順はない。たとえば，荷重の流れる順に設計を進めるとして，始めにスラブを設計し，次に小ばり，大ばりを設計し，柱を設計し，基礎を決め，くいの本数を求めるというように，順に進めていけば終わるような簡単なものではない。

スラブの設計には小ばりと大ばりで囲まれたスラブの大きさが関係するから，スラブの設計の前に大ばりと小ばりの配置を決めなければならない。小ばりや大ばりの配置，はりせいには設備の設計が絡んでくる。はりせいつまり天井の高さは意匠設計にも関係してくる。大ばりのスパンを変えると柱の配置が変わる。これは意匠設計と直接の関係があると同時に，当然，構造設計に大いに影響がある。耐震設計上，柱の本数と配置，耐震壁の量と配置は重要な問題である。最終的に柱の配置は基礎の設計に関係してくるし，地下駐車場の駐車台数にも関係する。

このように構造設計は，意匠設計，設備設計と切り離して独立に進めることはできない。基礎の形式，柱の配置，耐震壁の配置，大ばり，小ばりの架け方，スラブの厚さ，これらすべてについて，意匠設計，設備設計，施工法を考えつつ設計をまとめるのが構造設計である。

多くの要求条件と制約条件の中で最終設計案はまとめられる。一つ一つの設計は特解であり，その設計手順も一通りではない。実際においても，設計の決まる過程は順序立ってはおらず，あるとき懸案事項が一度に解決し設計案が決まることも多い。当然のことであるが，多くの要求条件や制約条件に対して，ちょうどその条件上にのって満足するような場合と，十分の余裕をもって満足する場合がある。構造安全性にかかわるような場合ではありえないが，設定条件，要求条件を下回る設計案になることもありうる。これらの関係を総合的に理解し判断して，設計は進められる。

構造設計は創造的な仕事であって，上に述べたように決められた手順に従って行う仕事ではない。ただ，ある共通の方法で，設計された建築構造の性能を計る方法を作ることは可能である。これからの基・規準は設計の手順を示そうとするのではなく，設計された建築構造の性能を計る方法を示すことが必要と考える。

部材の配置とおおよその断面の大きさを決めたうえで，これらスラブ，小ばり，大ばり，柱などに必要な配筋量を決める作業を構造設計と勘違いしている場合が多い。これは単なる配筋計算であり，構造設計ではない。

3. 性能設計の必要性

建築の設計の中で，構造設計に限っても，設計変数 (Design Parameters または Design variables) となりうる要素は非常に多い。重要なものから挙げると，全体構造の仕組み，基礎構造の仕組み，上部構造の部材配置，これに使用する構造材料，部材の形状，断面の大きさがあり，コンクリート，鋼材を使用する場合，その強度，降伏点，伸び能力などの設定，鉄筋コンクリート構造の場合はその配筋法，鋼構造では接合法の選択などがある。設計に当たって決めなくてはならないことは無数にある。

これらの設計変数の値の設定に応じて各種の構造物の設計案が構築され，それぞれの案がそれぞれのレベルの性能を持つことになる。実施される設計案は建築主および設計者の設計要求 (Design Requirements) を満足するものでなくてはならない。設計要求の中には建築の美しさ，建築としての機能，建築家の満足度もあるが，工事費用も一つの重要な要求事項である。構造として発揮しなくてはならない性能として，使用状態におけるたわみ・ひび割れ，振動などが許容できる範囲内にあること，地震，風などの非常時の外乱に対してある居住性・安全性を持ってなくてはならないことがある。さらに耐火性，耐久性も重要な要求性能である。最近の話題として，修復性も重要な性能の一つとして挙げられている。兵庫県南部地震を受けて，損傷個所の発見，修復に多大な費用を要したことからの反省である。

各種の設計要求に対するそれぞれの満足度つまり各種の性能は，設計変数の値を変化させることによって，一般には非線形に変化する。設計は，多くの設計変数の関数として表される多くの設計要求への満足度，性能の非線形多元方程式を解くこととして，説明できる。この問題に対して，陽な解を求めることは難しいため，実際の設計の場面では，過去の設計を参考にしたり，長年の設計経験によって培われた洞察力に頼って，試行錯誤の繰り返しの中から設計案をまとめていくことになる。

構造設計，施工は建築の構造的な安全性にかかわることであるので，どこの国においても法規として設計基準を持ち，その前提条件のもとに構造設計が行われる。先にも述べたように，設計とは，設計要求を満足する設計変数の値を決めることと言えるが，法規との整合性を確認する許認可業務に関連した事項も考えておかなければならない。

法規の中では建築構造の種類を，壁式鉄筋コンクリー

ト構造，鉄筋コンクリートラーメン構造，鉄骨構造のように分類し，それぞれの種類に応じて，建物の高さに制限を与えたり，壁の厚さや量などにも条件を与えている。このほか多くの規定が決められ，仕様指定型で現在の日本の設計基・規準はまとめられている。たとえば，壁式鉄筋コンクリート造の壁と床で構成される2階建ての住宅の一部に鉄筋コンクリート造の柱とはりを組み込んだ建物は，法規の分類に当てはまらないという理由で，特別な許可を取らなければ建設できない。このように，仕様型の法体系は非常に窮屈なものである。一方ではこれらの法体系が果たしてきた効用もある。分類された範疇の中で仕様規定を守って仕事をする限り，設計式などが整備されているため，設計も許認可も効率的に進むことである。

しかし，現在は多様化，規制緩和の時代である。自由度の向上が望まれている。自由に選べるはずの設計変数に規則で枠をはめることによって，設計全体について合理性を追求できなくなる。できるならば，要求性能だけをはっきりすることにし，設計変数は自由に選べるようにすることが理想である。

4. 耐震設計への応用

耐震設計に関して性能設計を考えてみる。入力としての地震動の扱い，地盤と建物，さらにくいまでを含めた地震時の挙動の解明，上部構造に与えるべき強さ，変形能力，減衰性，さらに大地震時のエネルギーを吸収させる部分などを，総合的に考えて耐震設計は行われる。性能としては，地震時に生じる床加速度の大きさ，層間変形の大きさ，残留変形などが物理的な数値として用いられる。最終的には，地震動の発生頻度と大きさに関係して，構造部材，2次部材，設備などの損傷の度合いおよび建物の機能の損傷レベルを対応させて，耐震性は判断される。

建築構造物の耐震工学に関するこの30年の研究の大きな成果の一つに，構造物への塑性変型能力の付与に関する技術が挙げられる。これにより，相当の塑性変形能力を建築構造物に持たせることが可能になった。地震に対して崩壊というような悲劇的状態が生じるのはかなり大きな変形のときに起きるのであって，問題としなければならないのは，悲劇的状態に至る前の応答変形や残留変形であり，これらが建物の持ち主に受け入れられるかどうかである。このように設計された建物の場合，損傷の状況は入力の増大に伴って連続的に悪化していく。これを設計の時点ではっきりと明示するためには，構造物に生じる損傷の度合いを求めるための技術が必要である。構造物の非線形解析技術，入力レベルに対応して建物各部に生じる変形を知る方法が必要である。これらの各部の変形を，実験や被害の写真を用いて，一般の人々に理解させることなどが必要である。

現在の耐震技術の中で，建物内部の加速度の低減までを可能とする構造形式は免震構造だけである。建築構造に対して耐震性能を最後まで追及していくと，一般的な構造は建築主の要求を満たすとは言えなくなり，免震構造だけが満足することになってしまう。このほかに，この追及に耐えられる構造としては，中高層の建築に使われているパッシブ型の制振構造がある。これは，建物の各階に層間変形に応じて地震時のエネルギーを吸収する部材を組み込み，柱・はりの損傷を極力小さくし，できれば，床加速度の低減も目指す構造法である。

床加速度の低減を諦めるならば，数階建てまでの集合住宅に用いられている鉄筋コンクリート造壁式構造がある。強度指向型の建物である。

このほかに，現在最も多用されている鉄筋コンクリート造ラーメン構造および，箱形断面の柱にH形鋼のはりを用いた鉄骨ラーメン構造がある。これらは，相当の大地震動を受けても崩壊することは免れるであろうから，現状の法規は満足する。しかし，地震時の加速度低減は期待できず，地震時のエネルギー吸収をはり端部に集中させた塑性変形に頼っているため，地震後の検査が非常に大変になり，補修費も多く必要とする。この形式の構造は総合的に耐震性能をみたとき，優れた構造形式とは言えなくなる。

たとえあまり経験のない新しい技術であっても，その効果に期待の持てる構造法があれば，自由に使われる社会が望まれる。免震構造も，パッシブ型の制振構造も現状の法規の中には含まれていない新しい技術である。そのため，建設に当たっては特別な許可を取得する必要がある。免震構造が採用される建築物の規模は従来の構造法によっても建設が可能な場合が多い。設計者としては二本の道のうちどちらかを選ぶことが必要になる。一つは従来から用いられているルーチン的な方法，もう一つは免震構造や制振構造の選択である。この場合は審査資料の作成のために通常の設計の何倍もの作業量が必要になる。この作業量が摩擦抵抗となって免震構造の選択の際にマイナスの作用をする。その結果，出来上がるものの性能は明らかに免震構造の方が優れているとわかっていても，一般の構造法が選択されてしまうことがありうる。

多くの建築の群としての耐震性を高めるために，免震構造や制振構造が申請手続きの面で特別扱いされないことが望まれる。先にも述べたように，現在の耐震技術で性能の議論に耐えられる構造は，免震構造と一部の制振構造しかありえないからである。

5. 動的問題と静的問題

地震時の構造物の挙動は動的現象である。我々は常時には静的な重力しか感じていない。構造物が壊れるのは，部材に働く力がその強度を越えたときであるという

感覚からどうしても逃げ切れない。そこで考えられたのが，地震時に部材に生じる力を，動的解析によって求めるのではなく，等価な静的解析によって求めようとする方法である。静的計算によって求められた地震時の部材応力は，重力の作用によって生じる部材応力と組み合わせ，部材の強度と比較して安全性を確認することが簡単にできる。しかし，この方法が使えるのは，構造物がほぼ弾性範囲で挙動しているときだけである。

大地震時には，剛強に造られた構造物は別として，構造部材の多くは塑性化を起こす。部材の降伏耐力を越える力が作用するから塑性変形を生じるのであって，このような現象を把握するために，部材の強度と，発生応力を比べても意味はない。ここで必要になるのは，塑性化する部材の塑性変形量，そこに生じる変形速度，変形力，繰返し回数に応じて，塑性化した部分が耐力劣化を起こさないかなどが重要になる。

部材の強度という意味で重要となるのは，塑性変形を生じさせないと決めた部分に必要な強さを持たせることである。たとえば，鉄骨構造ではブレースの端部接合部，鉄筋コンクリート構造では柱のせん断耐力などである。基礎固定の普通の建物の耐震設計において，上で述べたことを正しく進めることは非常に難しい。塑性化を許容した部分は壊れることを始めから認めていることになり，地震後の補修のことを考えると，あまり勧められた耐震設計法とは言えない。そのうえ，このような構造物の地震時の挙動は発生する地震動の性質に敏感であり，ある特定の地震動に対して適した設計は，他の地震動には適さないことになり，最大公約数的な設計を行うことになってしまう。

6. 解析と創造

「解析」に対する言葉に「総合」がある，「創造」と言ってもよいかもしれない。英語では「Analysis」と「Synthesis」に対応する。与えられた液体の中に含まれる成分を分析することを Analysis と言い，ある性質を持ったものを人工的に合成することを Synthesis と言う。

構造工学，耐震工学の中で，構造力学，振動力学の果した役割は大きい。断面２次モーメント，曲げモーメント，せん断力，振動数，固有周期，振動モード，刺激係数，刺激関数など知っていなければならない言葉，数学的な原理などがたくさんある。これらの理論展開は，教科書のレベルではすべて陽に展開されており，構造物の力学的挙動，振動問題を理解するのにそのまま役に立つ。これらの学問は分析にも創造にも役に立つ基本である。

しかし，実際の構造物の設計に当たって，たとえば，設計しようとする構造物が大地震を受けて起こす挙動を見極めようとすると，教科書に書かれている数式だけではなにも具体的に得ることはできない。これは対象が多自由度非線形の複雑な挙動を起こすため，時々刻々の状態を陽に記述する数式は作れないからである。

過去には非常に洞察力の優れた先駆者がいて，電子計算機などを使わなくても，多自由度非線形の地震時の構造物の振動問題に潜む動的性質を読み取っていた。同じような洞察力をすべての人に要求することはできない。現在は建築構造が地震動を受けて揺れる様を解析することはパーソナルコンピュータでも容易くできる時代である。ただ，この方法は非常に分析的な取組みであり，創造的な側面は持っていない。数学的な洞察力と，多くの数値解析の結果から，建築構造の震動現象の中に潜んでいる性質を抽出した良い例が，秋山　宏のエネルギー理論であり，これは創造的な側面を大いに持っている理論である。

設計しようとする構造の持つ性質を全体的にとらえ，設計を意図的に進めるために，エネルギー理論が役に立ち，地震時の構造の時々刻々の動きをとらえるのに時刻歴応答解析が役に立つ。これら二つの側面から建築構造の挙動を理解することができ，より良い設計が可能になる。

7. おわりに

新しい材料，解析技術，設計法の開発や研究，新しい構造の発想，こうして進んでいく先に，神様だけが知っている最終的な一つの理想形があるのだろうか。自然の水辺や野原に咲く花や飛んでくる蝶や鳥には，本当にいろいろな種類がある。神様の考え，自然界が最適値を求めて突き進むならば，同じ環境は同じ花や動物だけで占められてしまうはずである。神様の望む最終的な姿は，美しい多様化であろう。建築構造の設計においても，「美しく多様に」を目指さなくてはならない。