

## 構造設計の不易流行

和田 章  
東京工業大学教授

### 1. 序

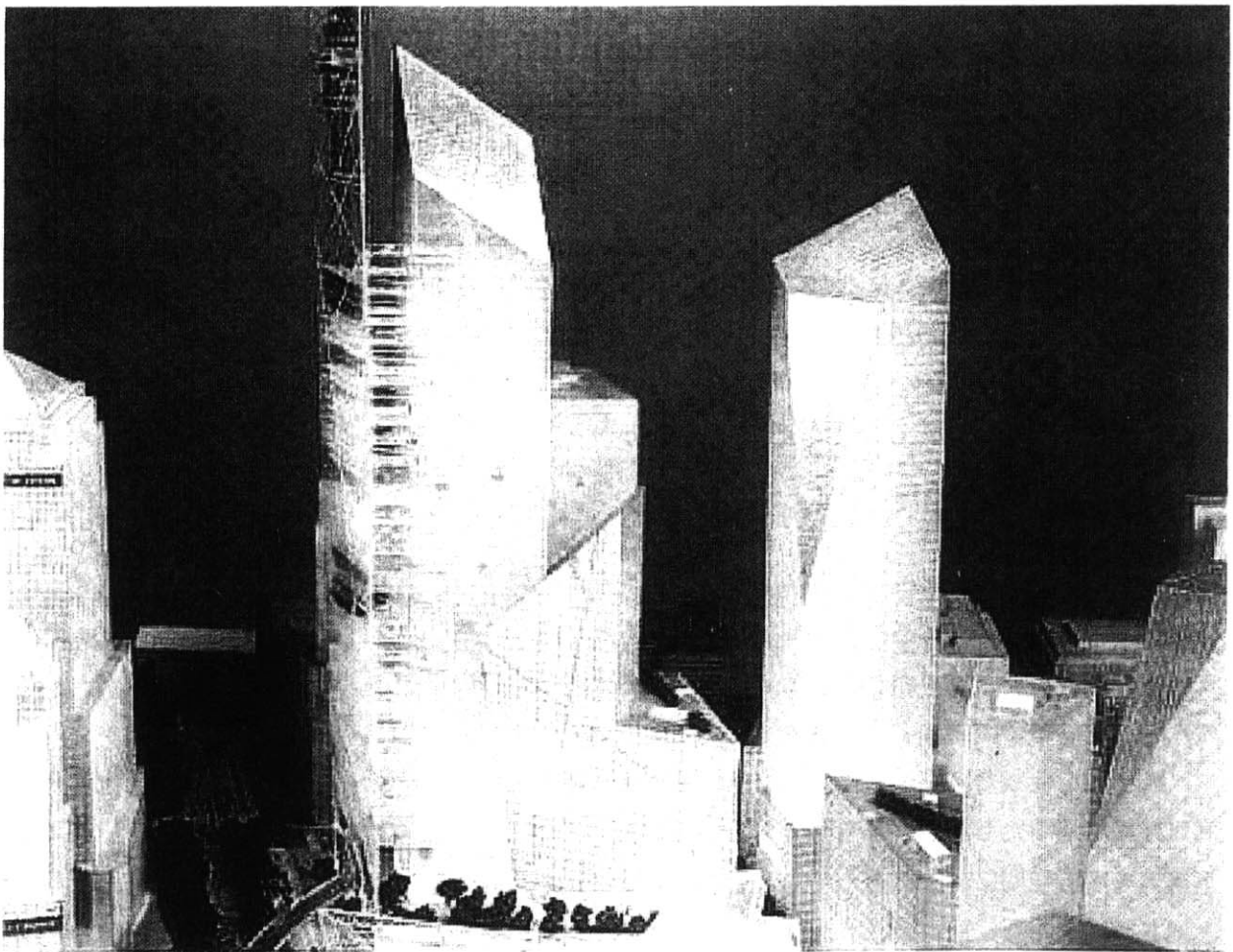
親を亡くして打拉がれているときなど、夜空の星を眺め、100光年を越える気の遠くなるような宇宙の大きさや無数の星の数に比べ、一人の人間の悩みなど小さなものだと思い直し、生きている間だけでも頑張ろうと元気を取り戻すことがある。今の瞬間でも地球には数十億の人々が暮らし、一人の一生は大きな時と空間の流れの中にもうまれてしまうような小さな存在と思えるし、それで良いのかも知れない。ただ、生きている人間にとって、人間の一生はそれほど短くはない。人類の歴史の原点をどこに置くかによって、気持ちは変わってくるが、西暦元年からの2000年と比べて人間の一生80年は4%であり、産業革命後の230年を考えると30%以上になる。これだけの割合で生きていると、世界的な大きな出来事、歴史の変化を実感することが出来る。その中で最も印象的だったのは、永遠に続くかと思っていた資本主義と共産主義のイデオロギーの戦いが、ソ連の崩壊、東ヨーロッパの変化であっけなく終わってしまったことである。もう一つ挙げるとすれば、ニューヨーク世界貿易センタービルの崩壊である。一人の一生には責任があるように思い直す。

昭和30年頃の東京の下町に、お化け煙突と呼ばれ四本の煙突が千鳥状に立っていて、見る角度によって色々な本数に見え名所になっていた。しかし、そこからでる煙のことを問題にする人はいなかった。都内では、杭を打つ大きな音が至るところでして、焼いたリベットを飛ばす風景も見え、リベット打ちの大きな音も、発展する都市の音としてほとんどの人が問題にしていなかった。このような時代に、科学技術の発展は人々の生活を豊かにすると信じて、理数系の大学に進学し、建築構造学分野を選び、ここまで来た。振り返ると、多くの人が夢を追い続けた20世紀は人類の歴史上、最も激しく戦争が起きた世紀という。21世紀は始めの年から、同時多発テロの勃発、イラクの問題、北朝鮮の問題など考えさせられることが多い。

航空機を使った自爆テロによって崩れてしまった世界貿易センタービルは、20世紀を代表する超高層建築であったし、我々が目標としていた建築の一つである。重力加速度は $980\text{cm/s}^2$ であり、建築構造を宇宙空間においたとして考えると、基礎部分がこの加速度で永遠に速度を増し続けているのと同じ状態である。長くても数分で終わってしまう地震動などとは比較にならないパワーである。ストロークが1mの振動台に $10\text{cm/s}^2$ の一方向加速度を与えると $x=(1/2)at^2$ であるから、4.5秒でストロークが足りなくなる。このように、簡単な計算でも重力の加速度の大きさが分かる。

高さ400mの超高層建築物の持っている地表面に対する位置エネルギーは $Mgh=M \times 980\text{cm/s}^2 \times 20000\text{cm}$ で計算される。地震入力をエネルギーで評価し、これを速度に換算すると、我が国の設計基準で示されている地震動の場合およそ $100\text{cm/s}$ から $200\text{cm/s}$ になる。質量Mの建築物に入力されるエネルギーは $(1/2)Mv^2$ として計算でき、地球上の重力加速度を用いて位置エネルギーに換算すると

$Mgh=(1/2)Mv^2$ であるから、 $h=v^2/(2g)$ だけ建築構造物を持ち上げるのに必要なエネルギーと等価であることが分かる。上記の速度換算置を代入すると  $h=5.1\text{cm}$  から  $h=20.4\text{cm}$  となる。これは高さ 400m の超高層建築物の持つ位置エネルギーの  $1/3900$  から  $1/980$  である。このような惨事は二度とあってはいけないのであるが、地震入力に比べ重力による効果は非常に大きなものであることが分かる。大きな地震災害のたびに言われることであるが、地震による惨事についても地震動そのものによって起きているのではなく、柱などの鉛直荷重支持部材の破壊によって構造物が鉛直荷重の支持能力を失い、重力が構造物を破壊することによって起こる。地震時においても鉛直荷重を支持している部材は壊してはならない。



AP

Berlin-based architect Daniel Libeskind has been chosen for the WTC site. The world's tallest building - a 1,776-foot, garden-filled tower - to soar over the site where the twin towers once stood.

世界貿易センタービルに限らず、我々が行っている建設作業は、柱・梁などの骨組、壁・床など、外装、内装などの何万トンにおよぶ建設資材をクレーンなどにより揚重して組み立てることによって成立つ。建設地に非常に高いポテンシャルエネルギーを集中させているようなものである。2001年9月11日のあと、新聞のインタビューに対し若い建築家が、超高層建築に凶器性を感じたとコメントしていたが、事実であろう。ハイキングに用いるようなテントは壊れても人に危害を加えないが、我々の扱っている建築構造は大きな重量物を空中に高く掲げて作られ、危険なものを作っていると考えなければならない。この大きなポテンシャルエネルギーをその高さに保つ構造の仕組みを作るのが、我々の仕事である。

ニューヨークでは世界貿易センターの跡地の再建計画が進められてきたが、2003年2月に高さ541mになる計画案が選ばれた。アメリカは先進国の面子にかけて、軍事で安全を確保し、都市は今までの勢いで作っていくように見える。世界政治の話題に入るつもりはないが、個人的には悩みが深まるばかりである。人間は負けなために勝たなければならない。科学技術に支えられた現代文明を生き伸ばすために、弱気になってはいけないのであろう。

## 2. 構造設計の不易流行

世界貿易センタービルの構造設計者のレスリー・ロバートソンは2001年春に行われた講演会で、日本の建築で最も素晴らしいものとして京都や奈良の歴史的木造建築を挙げた。我々は戦後に多くの建築を建ててきたが、ロバートソンの言うことに同感せざるを得ない。100年前まで木造建築を造ってきた日本において、コンクリート、鉄とガラスを使う現代建築をにわかには造っても、本当に人を感動させるまでにはなかなか到らない。ヨーロッパでも同じであろう。時間をかけて造られたミケランジェロらの設計によるサンピエトロ寺院は圧巻である。ロンドンやパリに滞在していて、100年以上の歴史のある厚みのあるレンガや石を積み上げて造った建築と、10年または20年ほど前に建てられた金属カーテンウォールで囲まれた建築を比べて、後者の方が良いと感じる人は少ない。

多くの人々はその経済力の中で手に入れられることに重点をおいた住宅、事務所建築などと、経済性以外に重点をおいて造られた歴史的建築を比べることに無理があるのかも知れない。例えば、奈良の東大寺にある木造建築に使われている太い柱を見て、経済性を考えた構造計算では決まらない太さにあらためて感心する。

我が国だけでなく、仕様に基づいた設計から、性能に重点をおいた設計へ、建築の設計に関する法体系を変えていこうとする動きがある。数年前の日本建築学会大会のパネルディスカッションで中村恒善先生が指摘されていたように、英語では Performance Based Design が使われ、外乱が作用したときの構造物の挙動に注目して判断する意味で、「性能設計」より英語の表現の方が明快である。長年の仕様設計と呼ばれた時期においても、あるレベル以上の設計者はパフォーマンスに気を配って設計を進めていたから、性能設計といっても、特に新しいことではないようにも感じる。しかし、法体系にこの考え方が組み込まれようとしていることに意味があるのだと思う。

パフォーマンスに気を配った設計を推進するためには、建築にとって要求される項目とその満足

度を決めなければならない。構造設計にかかわるものだけを取り上げると、自重、積載荷重などの静的荷重と風圧、地震力などの動的な外力に対し安全であり、使用上に支障が生じるような振動や撓みを起こさないことが挙げられる。要求事項とその満足度には建築基準法のように国の法律で決められる項目もあるが、施主と設計者の判断によって決めるものがある。いずれにしても、実験などの研究成果、現在持っている解析技術、過去の経験などに基づいて設計は進められる。

ここで最も問題になるのが、設計から施工の全体プロセスに対し、無駄を極力省き、合理性を追求し、効率を高め、経済性を重視しなければならないという大前提である。東大寺や法隆寺を造った人たちに合理性の追求がなかったとは思えないが、現在は時の流れが速すぎるように思う。ここでは、仕事を仕事として終わらせることが重要視され、心をこめて良いものを作る気持ちは少なくなってしまう。同じことを2度考える必要がないようにマニュアル化が進められ、施工の段階においても極力効率化が迫られる。

構造の安全性、使用性に関するパフォーマンスを論じているときに、「歴史に残るような建築」、「人々を感動させるような建築」などの評価軸は話題にならない。物理的な要求事項だけ満足させるために、現在の技術、工業のレベルは十分高く、コンピュータを用いた構造計算、構造解析により要求をぎりぎり満たすような設計を行うことは可能である。建設時点の経済性を重視するならば、この方法でよいのかも知れないが、歴史に残り、後世の人々に感動を起こさせる建築は造られにくい。

長い歴史の中で建築構造材料の性能は進歩し、古くから使われているものも含めて考えれば、使用材料のバラエティは年々広がる。設計技術、構造解析技術も進歩し、施工技術も進歩する。これらを十分に活用して、素晴らしい建築を造り世に残さなくてはならない。

「不易流行」は松尾芭蕉の言葉であり、人間の文化と社会は、万物が生滅して定まりのない無常なるもの、変転きわまりないものようであるが、深く洞察してみると、そこには、「時代を超えて変わらないもの」と、「時代とともに変化していくもの」があり、しかもこの両面は分かち難く結びついているという。前者を「不易」、後者を「流行」と呼ぶ。

建築構造にあてはめると、1万年も続いたといわれる縄文時代においても、奈良時代、平安時代においても、もちろん現在においても、建築は人々の生活を基本的に支える重要なものであり、普段の使用にも便利で、地震や台風でも壊れず、長持ちして、中にいて快適で、外から見ても美しく、できれば、その集合体である村や町の風景も美しいことを望んでいたに違いないし、これからも、その気持ちは変わらない。第一に、間違いなく重力に抵抗し、常時の使用に支障がない状態を「不易」と考えれば、地震や台風を受ける時の状態は「流行」になる。先にも述べたように、建築構造物は重力に抵抗することが絶対に必要である。第二に、1000年以上も健在な法隆寺などは例外としても、東京の建築の寿命は30年から40年という。地球温暖化がいわれてからの問題ではなく、現代建築の寿命は短すぎる。長い時間にわたり、人々に使われつづけることを考えた建築を「不易」と考えれば、建てた瞬間にのみ話題になる建築は言葉通り「流行」となる。建設時の合理性、建設直後の合理性を追求するのではなく、地震後の補修性、財産価値維持、継続利用などを考慮し、建築の寿命を延ばすことを考えることが必要になる。建築設備の更新サイクルと構造の寿命が異なることを考えて、設備配管

と構造を一体化させない、梁貫通は行わないなどの工夫も必要である。30年前に竣工した新宿住友ビルでは、パネル式の床構造を開発し、パネルの下面と天井との間に設備のための空間を用意している。不易を考慮した構造設計と言える。

### 3. 構造設計のひとつの基本

塑性変形能力を有する部材で構成された構造物の最大耐力を論じる理論として、「下界の定理」、「上界の定理」および「解の唯一性の定理」がある。構造設計を考える上で非常に重要な理論である。ここで理論について詳細に議論することはしないが、上界の定理を挙げて、我々が構造設計を進めるとき、構造実験を準備し進めるときの基本を考える。

30年以上前になるが、コンピュータのソフトウェアを作る際の標語に、下記のようなあたり前の文があった。

「プログラムは考えたようには動かない。作った通りに動く」

構造設計を行い実際に施工し、設計で考えていたような大きな外力を受けたとき、構造物が起こす挙動についても同じである。

「構造物は考えたようには挙動しない、作った通りに挙動する」

日本免震構造協会会長の山口昭一先生は、

「事故やトラブルは考えたところでは起きない。考えてもいなかったところで生じる」

といわれている。

ここで上界の定理「構造物について崩壊形を考え、このメカニズムにおける外力のなす仮想仕事と内力のする仮想仕事を同じとおき、得られる荷重は、真の崩壊荷重に等しいか大きい」を思い出す。さらに、真の崩壊荷重は、ありうるすべての崩壊形を仮定して上記の計算を行い、得られた値の最小値である。構造設計はいかに色々な場合を考え抜くかということである。考え抜くことこそ、常に忘れてはならない構造設計の不易である。流行に追われ、他の人が行った設計を表面的に模倣して行うことは良くない。考え抜かれていないだけ、危険が潜む可能性が高くなる。

過去にあった事例であるが、連層の鉄板耐震壁を有する鋼構造建築物において、ある階の上下の鉄板耐震壁の板厚に比べ、間にある梁のウェブが薄い設計になっていたことがある。梁は梁としての設計、鉄板耐震壁は鉄板耐震壁の設計として別々に行うとこのような設計になる。大きな地震を受けると梁のウェブの耐力が限界になり、鉄板耐震壁の本来の強度は発揮されない。

別の事例はやはり鋼構造の超高層建築であるが、中間階までCFTの柱が使われ、上層階では純鉄骨の柱が使われていた。このとき、CFT柱では内部のコンクリートが軸力を分担するため、鋼板の板厚は薄くすることができ、上層階の純鉄骨柱の板厚より薄くなっていた。このような設計では、上層階の鉄骨に生じている軸力はCFTの階で、一気にコンクリートに移動しなければならなくなる。一つ一つの部材を独立に注目しているために生じたミスである。作られる建築に心をこめてあたらなければならない。

#### 4. 結

戦後の教育を受け、自由に生きてきたように思っているが、何か大きな流れに乗せられてきたようにも感じる。工業の発達、文明の発達は素晴らしいこととして、すべての基本とされてきた。効率を上げることを悪く言う人はいない。応用力学などの学門の分野はすべての基本であるから問題はな  
いが、構造設計の教育については気にかかる。骨組の力学を教えたあと、四角い鉄筋コンクリート造骨組の構造計算法をどこでも教える。これを習得した卒業生は工業高校、大学からそれぞれ毎年1万人以上輩出される。この種の構造計算のためのパーソナルコンピュータ用のソフトウェアは日本中に普及している。日本中に住宅、学校、病院などを沢山建てなければならず、効率のよさを第一の目標に、つまらないミスを無くすためには、これが最も良い方法であった。しかし、この状況の中から、建てられた建築を長い年月にわたり使い、人々が感動するような素晴らしい建築は生まれられないように思う。性能設計をかかげて改正された建築基準法においても、構造材料、構造部材、構造計算法まで細かく施工令、告示で決められた。構造設計は益々つまらないものになってくる。我々は、このおかしな大きな流れの方向を変えなければならない。

#### 5. 付録（杭基礎の耐震設計に関して行った最近の研究）

1964年に起きた新潟地震では地盤の液化化が問題になったが、杭にも被害が出ていたことが後に報告された。1978年の宮城県沖地震では鉄骨鉄筋コンクリート構造の高層集合住宅が杭の破壊により傾斜してしまい、問題になったことがある。兵庫県南部地震においても杭基礎の破壊が起きている。ここでは杭の損傷による建築構造物の被害は、上部構造への損傷を低減する効果があることが報告されており、大地震時に人命確保を第一と考えるならば、杭基礎が壊れることは許容される。しかし、杭の破壊により上部構造が傾斜し、これが残留変形となり建物の財産価値はなくなり、継続使用も難しくなる。さらに、この傾斜を元に戻すためには多額の費用がかかるなど、別の問題が大きくなる。

ここで行った研究は、杭基礎を2種類の杭の組合せで作ろうという考えである。第一の杭は上部構造の重量を支持することに目的をもった杭であり、地盤の変形に対し追随性の高い鋼管杭を用いる。場合によっては、杭頭と建物の接合をピン接合にすることを考える。これを支持杭と呼ぶ。第二の杭は上部構造の重量は支持せず、地震時に上部構造と地表面の間で水平力を伝達することに専念させる。これを耐震杭と呼び、径が太く長さは短くて良い。地震時にはこの耐震杭が軟弱な地表面の地盤を破壊することによって、地震時のエネルギーを吸収する方法。耐震杭の杭頭を小さな変形から塑性化するように設計し、地震時の入力エネルギーを吸収する方法が考えられる。ここでは、鉄板と積層ゴムにより弾性地盤を模擬し、アクリルの細長い板により杭を模擬した模型実験によってこの効果を調べた研究を発表する。