

建築構造の強さを決めるもの

和田 章

東京工業大学・教授 建築物理研究センター長

1 序

神様が人間を創った時、人は年齢に応じて自力で採ることができるものを食べていれば、健康に生きていけるようにしたそうだ。動物を捕まえられるほどの体力がある若い時なら肉を食べればよいが、歳をとってそれほどの体力がなくなったら魚や野菜を食べた方がよいというようである。人間も数ある動物のうちの一つと思えば、あたりまえのことである。この神様の考えを無視して、いつまでも若者と同じものを食べていると成人病になってしまう。

これを建築にあてはめると、人間は自分の足で昇り降りできるほどの建物に住むべきということなる。5階建ての公園のアパートにはエレベーターがついていないから、この程度の低層建築までならよいことになる。超高層建築に人が住んだり、そこで仕事をするのは、もともと神様の許さない無理なことをしているのかも知れない。

文明化は英語ではCivilizationといい、Civil Engineeringは文明化のための技術といえる。われわれもこの技術に関係して日々の生活を続けているが、これは人間の物理的な能力の限界を広げるための活動と言える。さかのぼって振り返ると、産業革命以後の鉄道、船舶、道路、自動車、ダム、港湾、高層建築、航空、宇宙、通信、情報、医学など多くの技術的進歩は、このための努力の成果である。現代文明社会を作り上げるために、二百数十年にわたり非常に多くの努力が続けられてきた。爆発的な人口増加を受け入れ、止めどのない人々の欲望を満たすための努力であったとも言える。現在でも工学部の教育はこのために行われ、ここからの卒業生は文明社会を

さらに発展させるために日々の努力を続けている。

あってはならないことであるが、2001年9月11日に同時多発テロが起き、ニューヨークの世界貿易センタービルが崩壊し、ワシントンDCのペンタゴンにも大きな惨事があった。原因は、人間のスケールをはるかに超える高さ400mの超高層建築と、やはりその能力をはるかに超える時速数百キロで飛ぶジェット旅客機の故意の衝突である。人間がおかしな行動を取った時、技術の進歩に支えられた現代文明システムは、非常に脆弱な反応を起こすことが分かった。

この事件のあと、世界の建築構造に関わる研究者、技術者たちはこの現象の解明、現象に関する意見、考え方を色々な場面で論じている。イタリア・カタニア大学のOliveto教授は論文の結論に、核戦争が起きるかもしれないという前提で、都市の中に超高層建築を数多く建設する合理性はないと、はっきり述べている。イタリアには、新宿や品川のような超高層ビルが林立する町はない。陸続きで国が分かれば、歴史上大きな戦争を何度も経験していると、超高層建築を建ててみたいという気にはなれないのかも知れない。

進んだ科学技術を思う存分使って、現在の文明を自由に謳歌するためには、平和が前提になる。もちろんテロなどもあってはならない。平和を前提にして合理性を追求した時に得られる結果が、ニューヨークの都市であり、東京の都市である。しかし、平和を軍事によってしか守れないのは、人間として情けなくなる。深入りして議論するつもりはないが、人類の戦いの理由をさかのぼると、根幹には人間にとって最も重要な「愛」と「平和」があるように思う。これは博愛と言えるものではなく、身内への愛、身内の平和かも知れない。文明が生まれて数千年、愛と平和を求めつつ行動しながら、戦争が絶えない

のは仕方のないことかも知れない。すでに構築してしまった都市、これからも作られていく都市の安全を守るためには、構造工学からだけでなく、人間、社会、政治の問題からのアプローチが必要である。しかしここでは本筋に戻り、構造工学からの議論を進める。

世界貿易センタービルが航空機衝突から1時間ほど立ち続けたこと、その後の崩壊が非常に短時間で進んだことに関し、「構造システムの冗長性」が話題になっている。別の言い方では、「壊れても壊さないために」の方法が議論されている。

2 冗長性

冗長性は英語ではRedundancyと言われ、Oxford American Dictionaryによるとmore than is requiredまたはno longer neededのように不要なものの意味が強い。しかし、研究社・新英和大辞典によると、「余分なこと」、「余分なもの」、「豊富」、「文章などの冗長・多言」の意味の他に、「電算機・宇宙船などの装置が故障したときに備えた代行能力」、「冗長ビット (parity bit)」の説明があり、複雑なシステムの安全性を高める方法、情報伝達の確実性を高めるための方法として使われる言葉であることが分かる。土木、建築の構造に関しては「機械、建築構造などにおいて、構造物が余分な部材により構成されていて、各部材の力、反力などが静学的には、確定できない」状態をRedundantと呼び、不静定構造Statically Indeterminate Structuresといわれる構造物を考える時に使われている。

冗長性を考えたシステムは他の分野でも使われる。大型ジェット旅客機のエンジンの数は2基、4基などの複数になっており、1基が壊れても飛行が続けられるようになっている。都市の交通システムは道路、JRの鉄道、私鉄、都市間の交通についてはこれらに加え、海上、空路が用意され、事故が起きた時に全体が止まってしまうことがないようにしている。都市への送電経路も複数化、ループ化されており、送電鉄塔が強風で倒れた場合などに、長時間の停電が起きないようにしている。身近なことでは、待ち合わせ日、会議の日程などを知らせる時に、日付と曜日を組合わせて連絡する方法が取られる。冗長性を持たせることにより情報の信頼性を高める例と言える。7桁の郵便番号と住所を併記する方法にも同様の効果がある。構造物の安全性を高めるために、部材断面を必要なものより大きくしてゆとりを持たせる方法と、構造システムに冗長性をもたせる方法は、必ずしも同じではないことがこれらの例からも分かる。

3 保有耐力接合と塑性変形能力

大きな地震も台風も来ないヨーロッパの国で何千年に

もわたり造られてきた組石造のあとを継ぐ鋼構造があり、アメリカ東海岸の超高層建築はこの流れの中にあるように思う。わが国には南禅寺三門、清水寺舞台の構造のように、大きな木材を縦横に組合わせて骨組を作ってきた木構造の伝統があり、今の日本の鋼構造、超高層建築はこの木造の伝統の上に成立っているように感じる。ニューヨークの世界貿易センタービルの部材接合部の図面、写真を見ると日米の違いが良く分かる。この建物の場合、重力に抵抗することと強風時の揺れを極力小さくすることが主な設計要求であり、梁から柱へのせん断力は下向きにしか働かないし、柱には圧縮力しか生じない。このような応力条件のもとで、梁は柱の側面につけたブラケットに載せ、柱の接合にはメタルタッチを使うことは非常に合理的な方法と言える。

米国西海岸、日本には大きな地震が起きることで共通性がある。ツーバイフォーの木造のように構造物の重量が軽く、それに比べ構造強度が十分な場合、加えて低層の壁式鉄筋コンクリート構造のように剛強な構造の場合などでは、大地震を受けた時の応答がその強度を上回ることはほとんど有りえないと考えてよく、強度抵抗型の耐震構造を造ることができる。

一方、鉄筋コンクリートラーメン構造、鉄骨ラーメン構造などは、大地震時には骨組が塑性域に進入することを認め、靱性に期待した設計が行われる。この方法は、地震動そのものの性質、大きさの不確定さを、構造物に生じる塑性変形の不確定さに置き換えて、耐震構造を成立させていると言える。

これらの考え方は、米国西海岸も日本も同じである。わが国で、大地震時に構造物の塑性化を許容して設計が行われたのは、高さが45mを越える初期の超高層建築の設計からであり、1960年代の後半である。一般の建築構造物の設計に、この考えが取り入れられたのは、1981年6月に施行された新耐震設計法からである。この丁度3年前の1978年6月に宮城県沖地震が起き仙台市に建てられていた比較的新しい建物にも被害が出た。この地震の直後に旧・建設省は基準法の改正が待たず、14号通達といわれる緊急対策を発表した。この中には、建物の重心と剛心の位置の偏心が建物にねじれ振動を生むとし、平面的な剛性の釣り合いを確認する方法が示され、高さ方向の剛性分布に乱れがあると、柔らかい層に塑性変形が集中することに関する確認法も示された。さらにこの通達では、鋼構造物の設計にとって重要な保有耐力接合の考え方が初めて出された。

これらの考えは少し形を変えて新耐震設計法の中にも組込まれている。筋違や鉄骨梁の端部など、地震時に塑性変形を許容している部材では、筋違や鉄骨梁の母材が十分な塑性変形を生じるまで、これらの接合部は破断しないようにすべきという考えである。塑性変形はその部分に生じる塑性歪にそれが生じている部分の長さに乗じ

て求まる。接合部のように短い可撓長さしかない部分だけに塑性歪が生じて、部材全体として大きな塑性変形には追従できない、塑性歪は母材に生じる必要があり、接合部は先に破断してはならない。

梁端部の接合部の設計において、曲げはフランジ接合で、せん断はウェブ接合でと分けて考え、弾性設計用の荷重によって求めた曲げモーメントとせん断力をそれぞれ伝達すればよいという考え方は、ほぼ20年前までは誰でもが行っていた設計法である。地震力などのように想定外の外力が作用することを考えないヨーロッパ、米国東海岸で使われているなら問題のない考え方である。接合部の設計に応力計算の結果を用いたのでは、保有耐力接合にならない。母材に塑性歪が生じるまで、接合部を破断させるべきでないという考え方がどうしても必要である。

ノースリッジ地震（1994）、兵庫県南部地震（1995）を経験し、溶接部には欠陥が生じやすいため、母材に十分な塑性歪が生じるまで、溶接部分は塑性化させないように弾性範囲におさめた方がよいとの考え方をとる設計者が増えている。

4 建築構造の終局強さ

4 建築構造システムの最終的な強さを決めるのは、いうまでもなく使用した各部材の強度が基本になる。小さな断面により構成した構造と、これらを個々に太くして造られた構造物の終局強さを比べると、後者が勝るのは自明である。これらの個々の部材耐力が思い通りに集合として働き、構造システム全体が外力に抵抗するために、次の3点が重要である。

- a) 構造部材の塑性変形能力を確保する
 - b) 力の通り道を複数にしておく
 - c) どうしても壊れてはならない部材は十分に強く作る
- 構造設計の段階で、骨組の弾性応力解析を行い、各部材に生じる部材力を求め、これらの数値を根拠に、各部材の断面の大きさは決められていく。耐震設計の場合にはこのようにして構成された骨組全体の終局耐力を求めするために、非線形増分解析が行われるが、重力に対する設計ではこのような計算が行われることは少ない。重力を受けている実際の構造物の各部材に生じている曲げモーメント分布、軸力分布などは、基礎の実際の境界条件、施工時のサポート及びその解除の方法、接合部の施工時期、コンクリートの打設のタイミングなどによって影響を受けるから、上記の弾性応力解析の通りにはなっていない。このような状況にあって、構造物に設計上考えていた以上の荷重が作用した場合、前節で述べたように、各部材の接合部強度が、それぞれの母材の降伏強度より強ければ、母材に塑性変形が生じ、応力の再配分が始まり、構造物は構成されている部材全体の総合力で外力に

抵抗しようとする。

この時に接合部の強度が十分でなく、母材が塑性化する前に接合部が破断してしまうと、接合部を含めた部材の塑性変形能力は非常に小さいため、応力の再配分が起きる前に、過大な力を受けている部材が先に破断してしまう。このような場合、一部の部材の落下は周辺の部材に負担をかけるから、隣接する部材にも過大な力がかかり、やはり塑性変形を生じることなく破断する。その周辺の部材はさらに大きな負担を受けるため、さらに破断が進行する。このように、接合部も含めて部材が変形能力を有していない場合には、破壊の連鎖反応が始まってしまう。これは各個撃破、進行性破壊、ジッパーフェイル、ドミノ倒しなどといわれ、最も悲劇的な破壊現象である。部材に塑性変形能力を持たせるように設計することが重要であり、もし壊れたとしても次の部材の破壊に繋がらないこと、または繋がりにくいことを確認する必要がある。これらを保証するためには、鋼材の降伏比、部材断面の形状、長さ方向の形状の変化、接合部の強度などにも注意が必要である。

鉛直荷重の伝達経路を複数にしておくことも有効である。2001年9月11日のニューヨーク世界貿易センタービルが、航空機の衝突後約1時間の間、崩壊せずに直立していたのは、小さなスパンで林立している柱が、成の大きな梁と剛接されていて、鉛直荷重が破壊していない柱に再分配されていたこと、さらに頂部の6層部分でコア柱群と周囲の柱をアウトリガートラスで連結していたため、衝突階から上の層で、鉛直軸力の再配分が起きていたのではないかとされている。

重要部材はキーエレメントとし、十分な安全率を用い、想定外の力が作用しても破壊せず他の部材の塑性化によって力の再配分が行われるようにしたほうが良い。

5 結

建築物は人間の生活のための少なくともシェルターでなくてはならない。風雨を防ぎ、寒さ暑さを防ぎ、地震・強風に耐えるなどが基本的な条件であり、もちろん、建築そのものが重力によって壊れるようなことがあってはならない。火災に対する安全性も必要である。すべて、これらは常識的に考えられる状況下において、その安全性を確保するのがわれわれの仕事である。戦争状態においてだけでなく、航空機を使ったテロに対しても安全な建築物をつくることになるならば、その方法は大きく異なってくる。20世紀には科学技術が進んだと同時に多くの戦争を経験した。21世紀は戦争の心配などない平和な世紀になると夢みていたが、始まりの年に同時多発テロが起きた。自然現象としての地震、風だけを対象に、力学問題のみを考えて建築の安全性を語る時代が来ることを切望する。