

# 構造工学の科学から社会の強さ

Strength of Structures and Strength of Society

東京工業大学名誉教授  
(一社) 日本免震構造協会会長  
和田 章

## 1. 科学と技術

ピラミッド、万里の長城、パンテオン、法隆寺、正倉院などは、ガリレオ・ガリレイが梁の強さを論じるより遙か昔に建てられ、今でも美しい姿をはなっている。科学の前に技術があったことは間違いない。内田祥哉先生は「科学と技術」を「質量と重量」にたとえてその違いを説明された。科学は宇宙に浮かぶ恒星のようなものであり、大きな質量をもって存在し、直接に何かをしているわけではない。恒星は人類が誕生する遙か前からそこにあり、人類が滅亡してからも永遠に存在する。恒星にたとえられる科学は崇高なものである。重力加速度の中で質量が重量として力を発揮するのと同じように、科学は社会の要求という重力加速度の中で技術として力を発揮するのが順序であろう。

ただし、ほとんどの建築物、土木構造物は人間社会の欲望や必要性により、科学がわからない時代であっても経験と技術の蓄積で作られてきた。加藤勉先生は、人類が進めてきたこれらの技術の中から普遍性を見出し、これを昇華させ構造工学分野の科学を見出したいと言っていた。我々の構造工学の分野で科学といえるものは何か、技術といえるものは何か。数学・物理学はもちろん科学であり、構造材料、構造部材、構造物に作用する外力と変形の関係を、マトリックスを用いて関係付ける構造解析法も科学といえるであろう。この理論をコンピュータ上で展開し、構造物の変形や振動を求め、個々の構造部材に生じる力を求め、これらから構造物を構成する部材や材料に生じる応力や歪みを求めて、安全性を確認する手順も科学と言える。

## 2. 構造計算の意味

たとえば、長さ5mのH形鋼が建設現場に運ばれバタ角の上に置かれているとする。建築骨組の中の一部材として組み込まれる前であり、外力は作用しておらず、強さに比べ自重は十分軽く境界条件にも拘束のない、部材にとって最も自由な状態であり、このH形鋼のフランジやウエブにはほとんど応力は生じていない。ただ、本当にそうなのか。H形鋼が製鐵所で生産されるとき、フランジやウエブの断面は部分により冷える早さは一様ではなく、冷めたところから硬くなり、後で冷えて硬くなるところには材軸方向に

引張りの残留応力、先に冷えたところには圧縮の残留応力が残る(図1)。降伏応力度に近い残留応力が生じていることもある。構造設計では、軸力を断面積で除し、曲げモーメントを断面係数で除し、これらの和として断面に生じる応力度を求める。ただ、内部にある残留応力が加算されていないから、真の応力度を求めていることにはならない。

このように考察すると、構造設計の中で普通にしていることは科学といえるのか、怪しくなってくる。実際の建築構造物は独立した一部材に比べはるかに複雑である。無重力の宇宙空間で寸分違わずの精度で構築し、完成後に地球上にそっと降ろしたわけではない。構造物は地盤の上に徐々に建設され、骨組が完成する前にコンクリートスラブは下層部から打設されていき、工事の過程では溶接も行われ、構造計算の前提条件とは別の流れで建てられていく。構造物の中には、構造計算の時には考えていなかった色々な応力が存在することになる(図2)。真の応力状態が分からぬまま行われているのが、今の構造計算である。

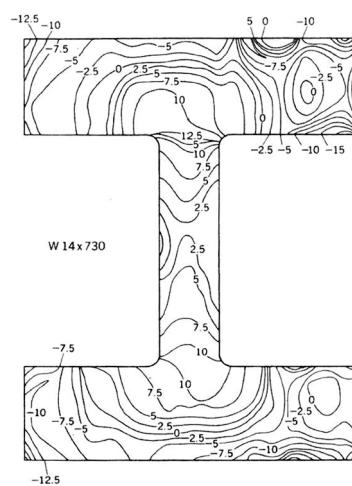
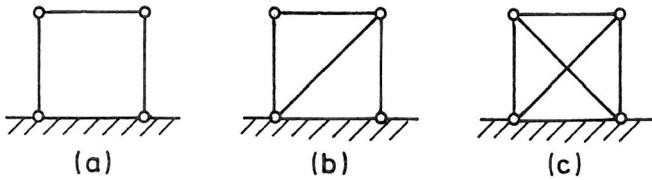


図1 極厚のロールHに存在する材軸方向の残留応力分布(単位:ksi)のセンター(10ksiは68.9MPaに相当する)  
Structural Steel Design,Lambert Tall編著,The Ronald Press Company 1974より

## 3. 塑性理論の復習

材料、部材、骨組に弾性限界変形とほぼ同じ塑性変形の能力、できれば材料には弾性限界変形の10倍程度、部材には2から3倍程度、骨組には2倍程度の塑性変形の能力が備



これらは平面トラスを示している。(a)は3本の部材がピン接合され基礎にも支持されているが、メカニズムを形成していてどんな荷重も受け止められず、構造体とは言えない（不安定構造）。斜材を一本追加した(b)は2つの三角形で構成される構造体になる。どれか一本の部材の長さが正しくないとき、これらの4本の部材を組み立てるのに無理はなく、どの部材にも軸力は生じない。結果として出来上がる全体形状は設計図通りではないが、この違いは目にはさやかに見えない（静定構造）。さらに一本の部材が追加された(c)は、力の釣り合いだけでは解けない。どの一本の部材の長さが正しくないときでも、これらを組み立てようとすると無理が起き、5本の部材には組み立てただけで軸力が生じる。外荷重は何も作用していないが、部材には自己釣合軸力が生じることになる。

図2 不安定構造、静定構造、そして不静定構造  
The Science of Structural Engineering, Jacques Heyman著, Imperial College Press 1999より

わっており、これらが変形を受け、材料、部材、部分骨組、骨組がある限界の抵抗力に達したのちに変形がさらに増加しても、抵抗力が突如にゼロになったりせず、減退することもない場合、次の理論が成り立つ。英国Cambridge大学のLord John Bakerらが1930年代に証明したように、塑性理論の3つの定理として、「下界の定理」、「上界の定理」および「唯一解の定理」がある。John Bakerの弟子のMichael R. Horneの著書Plastic Theory of Structures, 1971の記述を以下に引用するが、非常に明快である。ここでは、部材は曲げに対して十分な塑性変形能力を有し、 $M_p$ に達すると降伏ヒンジを形成する骨組を対象としているが、曲げモーメントだけでなく各種の力を受ける構造物一般に適用できる意味深い理論である。骨組に作用する複数の外力には共通の荷重係数 $\lambda$ が乗じられていて、 $\lambda$ がゼロであれば荷重は作用していないことになり、 $\lambda$ が1.0、1.5、2.0のように変わると各点に作用する外力も比例的に変化する。

#### 「下界の定理」 Static or lower bound theorem

If, at any load factor  $\lambda$ , it is possible to find a bending moment distribution in equilibrium with the applied loads and everywhere satisfying the yield condition, then  $\lambda$  is either equal to or less than the load factor at failure  $\lambda_p$ .

#### 「上界の定理」 Kinematic or upper bound theorem

If, for any assumed plastic mechanism, the external work done by the loads at a positive load factor  $\lambda$  is equal to the internal work at the plastic hinges, then  $\lambda$  is either equal to or greater than the load factor at failure  $\lambda_p$ .

#### 「唯一解の定理」 Uniqueness theorem

If, at any load factor  $\lambda$ , a bending moment distribution can be found which satisfies the three conditions of equilibrium, mechanism, and yield, then that load factor is the collapse load factor  $\lambda_p$ .

Michael Horneは「下界の定理」より、外力に釣り合い且つ降伏条件を満たす各種の応力分布のうち、荷重係数 $\lambda$ が

最大となる場合が崩壊時の応力分布であり真の崩壊荷重係数 $\lambda_p$ を示すこと、「上界の定理」より、各種の崩壊形から求まる荷重係数 $\lambda$ のうち、 $\lambda$ が最小となる場合が正しい崩壊形であり真の崩壊荷重係数 $\lambda_p$ を示すことを説明している。そして、「唯一解の定理」より、構造物と外力分布が与えられたとき、その崩壊荷重係数 $\lambda_p$ は初期条件や施工過程には影響を受けず、解は唯一であることを説明している。

上記の理論は、日本の大学では大学院で講義されることが多いが、これから述べるこの理論の深い意味については講義されていないと思う。ここでは「構造物の強さ・弱さ」に注目して議論しているが、梁や床に生じる撓みや振動、構造物全体の変形や振動の問題は剛性を考慮した考察に発展させなければならない。

#### 4. 下界の定理と構造設計

塑性理論は構造物の崩壊荷重つまり終局耐力について論じるものであり、「下界の定理」では各部材の終局耐力 $M_p$ を用いて理論が展開されている。ここで、この終局耐力 $M_p$ を安全率 $\alpha$ で除した許容耐力 $M_a (=M_p/\alpha)$ を用いて考察を進める。 $M_a$ は我国の設計法では、部材の長期許容耐力や短期許容耐力に相当する。一般の構造計算で行われるように、コンピュータを用いたマトリックス構造解析により、骨組に設計用の外力を作用させ、各部材に生じる部材力 $M$ を求める。各部材について、部材力 $M$ が上記の許容耐力 $M_a$ を越えないようにすることが、構造設計上の安全性確認である。このコンピュータを用いた弾性計算の手順では、曲げモーメント図は一つだけ正解のように求まる。ただし、塑性理論によると、外力に釣り合ってさえいれば曲げモーメント分布はある程度自由に考えて良いことも興味深い。

ここで用いる応力分布 $M$ は釣合方程式を解いた結果であり、間違なく外力に釣り合っている。そして、骨組のどの部分でも部材の許容耐力 $M_a$ を超えていないように設計が進められる。「下界の定理」により、真の崩壊荷重はここで与えた外力より大きいことが保証され、各部材の許容耐力は部材の終局耐力を安全率 $\alpha$ で除して求めているため、この構造物は与えた外力の $\alpha$ 倍以上の崩壊荷重を持つことが証明されたことになる。

「唯一解の定理」により、初期条件は崩壊荷重に影響を与えないことが証明されているから、外力が作用する前に部材の中にある初期応力や残留応力、施工法の違いによって各部材に生じる各種の応力の存在は無視して良いことになる。これこそ、構造設計を進める上で科学といえる素晴らしい理論であり、我々が普段行っている許容応力度設計の正当性を証明するものである。

「下界の定理」が成り立つための条件から、力の流れる道筋は部材だけではなく、接合部や基礎などすべての部分に気を使うことが必要であり、どの部分でもそこに伝わる

力が伝達可能なようにしなければならない。例えば、鉄骨骨組に19mm厚の鉄板耐震壁を設置しようとするとき、線材骨組解析を行うと壁で挟まれたH鋼梁には軸力も曲げモーメントもせん断力も生じないことがある。結果として、ウェブ厚が14mmしかないH形鋼が安易に採用されてしまい、地震時に鉄板耐震壁に流れるせん断力はこの梁のウェブを通り抜けられなくなってしまう。

さらに重要なことがある。設計荷重を伝達しうる曲げモーメント分布、つまり力の伝達経路や構造の仕組みには無限の可能性やパターンがある。これらは与えられるものではなく、構造設計者の意図によって、構造の形、部材の太さ、組み方、力の流し方を決めることができる。「下界の定理より構造物のどの部分を補強しても弱くなることはない」が証明できるが、部材の塑性変形能力を劣化させず、構造部材の強さの連続性を確保し、周辺の部材との強さのバランスを崩さず、建物全体の変形性状に大きな変化がない範囲であれば、実物の構造物に存在する非構造壁、床スラブなどの構造計算にのせにくく部分の剛性や強さは、無視したり小さめに評価しても構わない。同じように、骨組は無理に立体骨組と考える必要はなく、平面骨組の集合と考えても良いことになる。いずれの場合も、設計外力を許容応力度内で基礎まで伝達しうることを説明したことになり、構造物の実際の強さはこの設計外力より強いからである。

## 5. 上界の定理と構造設計

構造設計を行うときに、設計用の外力に対して各部材が耐えうるように設計するだけでなく、その構造物が過大な力を受けたときに、どこから壊すか、どこから壊れるかを考えるべきだと先輩たちがよく言う。「上界の定理」に従って構造物の崩壊荷重を考察することにも同じ目的がある。ただ、恐ろしいのは、構造物全体の正しい壊れ方や崩壊形を見極められない場合には、真の崩壊荷重より大きな抵抗力を期待してしまうことがある。

設計し施工される構造物の本当の壊れ方や崩壊荷重は神のみが知っているとも言える。我々が考えたうちの最小値が正解なのであるから、構造設計を進めるにあたり、設計チームで構造物全体の仕組の考察、ディテールや壊れ方について想像力を高めるだけでなく、真剣な議論が必要である。場合によっては初心者が重要な問題に気づくこともあります、ペテランが気づくこともある。設計の審査において、ピアーレビューが必要な理由もここにある。あらかじめ用意したチェックリストに従って事務的に確認する方法はあまり有効ではない。多くの考えの中の最小値が正しい崩壊状態であることを忘れてはならない。

## 6. 塑性変形能力の限界

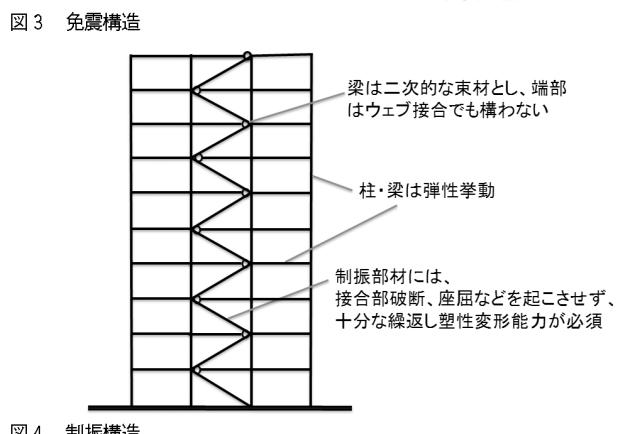
塑性変形を考慮した構造物の崩壊荷重を考察する際には、先にも述べたが、少なくとも材料、部材、骨組に弾性限界

変形のそれぞれ10倍、3倍、2倍程度の塑性変形の能力が備わっていることが条件と考える。「唯一解の定理」に期待して、施工中に部材や接合部に無理が生じても良いと誤解し、乱暴な施工は行うべきではない。材料や部材、接合部に生じる塑性変形量には限界があり、これを越えると構造物の崩壊の危険性が増す。耐震設計については次に述べるが、純ラーメン構造と耐震壁のように最大耐力の発揮時点の層間変形角が大きく異なり、塑性変形能力にも限界がある場合、これらの構造部材の最大耐力の発揮時期がずれてしまい、構造物全体の総合的強さを有効に確保できないことも忘れてはならない。

イギリスで研究の進んだ塑性設計、終局強度設計は、実際に作用する荷重に荷重係数を乗じて係数倍荷重“Factored load”とし、これより構造物の崩壊荷重が上回るようにしている。そのため、荷重係数を乗じる前の実際に作用する荷重時に、構造物に残留変形が残るような大きな塑性変形は起こらない。

地震国では建築骨組に耐震性を考慮した構造設計が行われる。中小地震動を受ける場合については、設計用地震力として静的な水平力を構造物に作用させ、部材に生じる応力が短期許容応力度を超えないように設計される。ここで述べてきた考え方方がそのまま使える。一方、大地震動を受ける場合については、イギリスで始まった上記の塑性理論を拡大解釈し、構造物に繰り返しの大きな塑性変形が生じても良いとしてきた。

大きな塑性変形を受けた骨組、傾いてしまった骨組は、地震後に続けて使うことは難しく、取壊すことになる。2011年東日本大震災の17日前にニュージーランドのChrist Churchで大きな地震が起きた。この地震で倒壊した建物は



2棟だったにもかかわらず、2,400棟あった中高層ビルのうち、損傷があったからという理由で1,700棟が取り壊されてしまった。この状況は我々構造技術者の最終目標ではなく、真の目標は、地震後にも使い続けうる建築物を建てることであり、柱や梁などの骨組本体に大きな塑性変形を与えてくれない。従来とほぼ同じ建設費で、これに応えられるのが免震構造（図3）と制振構造（図4）である。ここには大きな塑性変形を許容したダンパーが使われるが、長周期かつ長時間の地震動により何度も繰り返しの変形を受けることもあり、ダンパーのエネルギー吸収の限界についての考察が必要になる。

## 7. 期待した強さに比べ小さな真の強さ

タイタニックの氷山への衝突と沈没、旅客機コメットの連続墜落事故、鉱石運搬船のポリバア丸とカリフォルニア丸の連続沈没、尾翼の破壊による日航機の墜落、スペースシャトルの大事故、3度目になる原子力発電所の大爆発、東日本大震災の大津波による悲惨な災害、これらの大事故や大災害は大局的に見ると、文明を進めてきた人間の側の対処が足りなかったことが原因である。人工物を作るに際し、企画し設計し制作していく段階で、関係者は真剣に考えてきたはずであるが、足りないことがあり、大事故や大災害は起こる。設計チームやもう少し大きな組織に、考察や判断の過程で多くの意見を取り入れられなかつた問題があるに違いない。お金の問題やスケジュールの問題に心が奪われ、真剣な議論が行われなくなることもある。

塑性理論は部材が最大耐力を発揮したのちに、その抵抗力を維持しうる粘り強い部材を集合した骨組の場合に成り立つのであるが、部材がガラスのように途中で折れたり、脆性的破壊を起こす場合は各個擊破、ドミノ倒し、ジッパーフェイルなどと言われる壊れ方を生じるため、考えている崩壊荷重に比べ、真の崩壊荷重は圧倒的に小さくなる。鉄骨構造の部材座屈や接合部破断、鉄筋コンクリート構造の柱のせん断破壊、弱いクリップを用いた天井システムの落下など事例は多い。動くはずのジーゼル発電機が大津波で機能しなかつたことも同種の問題である。

要するに、人間の考えたある人工物の終局強さは、真の終局強さの上界であり、配慮が至らないときは過大な強さを期待してしまう。実際に発揮される真の終局強さは楽観的な人間の考える強さに比べはるかに小さいことを忘れてはならない。つまり、人工物は「思ったようには壊れず、思った強さは発揮されない」、「作ったように壊れ、作った強さしか発揮しない」と考えるべきである。

## 8. 組織や社会の強さ

複雑な実社会では、各種の法律があり、関係している多くの組織の内部や組織間には指示系統などのヒエラルキーがある。作ろうとしている人工物について、この雁字搦め



写真 2011年3月11日、東日本大震災後に運行を再開した京王線新宿駅に殺到する乗客（提供：朝日新聞社）

の仕組に阻まれて自由な議論が行われないことが問題である。人間は神ではない。真の壊れ方を見極め真の抵抗力を知るために、組織を越えた自由で真剣な議論が必要である。

もう一つ重要なことは、考える道筋や構造物を明快にすることである。システムが精巧で複雑で、ああしてこうして、その時こうしてああしてというように、迷路のように複雑に入り組んだ道の中から正しい道筋を探し求めねばならないようなものは作ってはいけない。原子力発電所の爆発のあと、多くの書籍が出版され、当事者ではないが専門に近い人達があの時こうすれば爆発は防げたなどと書いている。あの状況で正しい道筋が見えなくなることのほうが自然だと考えねばならない。

東日本大震災の日に東京で起きた大量の帰宅困難者や車の大渋滞も大きな問題である（写真）。携帯電話やメールを使えば、次の首都直下地震でも対処できると考えるのは間違いである。非常時に携帯電話は電話会社が自動的にかかり難くすることは常識である。平常時の毎朝のラッシュ時間帯でもプラットホームには10mおきに駅員が立っている。いつ起こるか分からない災害時に、多くの駅でラッシュ時間と同じ態勢をとることは難しく、プラットホームに溢れる人々を問題なく処置できると考えるのは楽観的すぎる。

華麗な大型情報システムを活用すれば、災害拡大を抑えると考えるのも楽観的すぎる。システムは予め考へた現象に対してプログラム化される。このプログラムが、その機能を超える悲劇的な出来事を何十年のうちに初めて迎えて、正しく対応できるとは考えにくい。さらに、コンピュータシステム開発の古い標語「プログラムは思ったようには動かない、プログラムは作ったように動く」を忘れてはならない。

脆い構築物やライフライン、過剰な人口集中と脆い人々、そして脆い情報システムによって構築される大都市の災害はさらに甚大化してしまう。神のみが知る構造物や人々の行動の終局的状況を想定し、社会が真に発揮しうる強さや能力を、我々は想像力と多くの議論により見極めねばならない。そして建築やまち、社会の作り方に戻って考えるべきときである。