連載コラム 建築技術のアクショム

21世紀を目前に控えた今，今後を担う若い世代に技術をどのように伝承していくかが大きなテーマになっています。建築技術支援協会（PSATS）は，こうした社会的な使命を担って設立されたNPOです。この連載コラムは，PSATSのメンバーが筆をとり，技術の根底に流れる本質的な原理・公理（アクショム）を再認識しながら，技術の継承・発展のあり方を模索していくものです。

http://www.serc.titech.ac.jp/PSATS/

第1回 建築構造と塑性変形

建築技術支援協会代表理事・東京工業大学教授●**和田 章**

アクショムとは

学問体系を作り上げるとき，他の命題から証明できないが，一般に自明な真理として認められ，他の命題を証明する前提になる原理のことを公理と言い，英語ではAxiomと書く。目の前に現れる各種の現象の解釈，自ら進める新しい発想，他の人の発想の理解などに，専門家はある種の公理をバックボーンに持ち，頭を働かせる。ある分野の学問について公理と呼べる幹をもち，その回りに多くの事実，論理的証明，経験などを枝葉として身に付けることによって，その分野の専門家と呼ばれることになる。

すべてをわかったような気持ちになって有頂天になるのは，その個人にとって低迷状態または衰退の始まりだから，このような誌面を使い，例えば私は構造力学をこのように理解しているなどと書くことは生きているうちにすることではないのかも知れない。しかし，経験を持つ技術者1人ひとりが読者に対し，私はこう考えていると手の内を明かすことはとても興味深いこととも思う。

この連載は建築技術支援協会の会員により執筆される。ほとんどの会員は東京オリンピックの建設ラッシュの前後に建築の仕事に入っている。それぞれ，専門家としてある公理をご自分の中に形作っているはずである。僭越ながら企画者の1人として初回を担当することにした。

下界の定理

日本の山あいに建つどこにでもある古い木造の旅館は，ほとんどの場合床や廊下が水平にはなっていない。建設当初は当然，水平に作られていたと思う。関東大地震以来れんが造が禁止された日本から行って驚いたのは，水の都「ベニス」のプチホテルである。百年，もっと前に建てられたのであろうが，わが国では最も変形能力のない構造形式と言われているれんが造の建築が長年の地盤変形その他に追随して変形し，結果として床面も相当傾いていた。ベッドの足の長さを調節して水平をとらなければ，気持ち悪くて寝られないほどである。

地盤の抵抗力と変形の関係，木造の柱や梁の抵抗力と木造に生じる変形の関係，目地を含んだれんが造の壁が伝える力と変形の関係，これらは材料の構成則とよばれるが，時間軸も考慮した上で，当然，非線形の関係を持つ。つまり，作用する力と発生する変形の間に比例の関係は成立せず，クリープ変形，塑性変形などが必ず生じる。ここで思い出されるのが，構造物の終局耐力に関する最も重要な「下界の定理」である。

わかりやすく説明すると，「構造材料，構造部材にある程度の塑性変形能力が備わっていることを前提にすれば，外力につり合う任意の応力状態を見つけ，この応力分布が構造物内のどの部分においても，その部分の耐力を超えていない場合，考えている応力分布に対応するこの外力はその構造物の真の最大耐力に比べ等しいか小さい」となる。ここで考えている任意の応力状態は，当然，実際に生じている応力分布と異なっていて構わない。

構造物は力の再配分で成り立つ

構造力学，骨組解析など何もなく，過去の経験に基づいて建設されてきた昔の建築物は，少なくとも組み上げたり，積み上げたりする木材やれんがなどの構造材料，構造部材の持つ強さに比べ，これらの上に載るものの重さを大きくしないとする原則は守られていたに違いない。しかし，部分的には地盤の支持耐力に比べ過剰な荷重がかかろうとするところ，木造の骨組やれんが造に部分的に過剰な力が作用しようとすることは，あったに違いない。これらの材料や部材は，その過剰な力にそのまま抵抗しようとすれば壊れてしまうが，他の部分に比べ，相対的に大きな力が作用しようとする部分は大きな変形，ずれを起こし，力は他の部分に再配分される。これらの長い年月に亘る繰返しにより，木構造，れんが造は徐々に変形し，水平に作られた床は傾いてしまう。

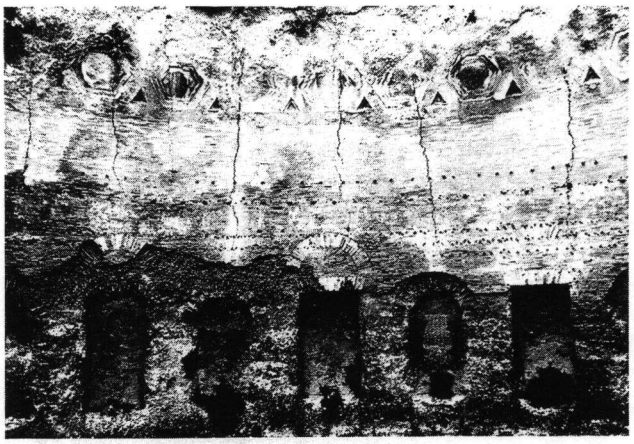
「下界の定理」によって考察すると，「構造物全体，またはその中のあるまとまりの部分を考えたとき，これらよりさらに小さな部分としての個々の部材や材料に働く力がその耐力の

限界を超えようとしたとき，これらを含むまとまりの中で力の再配分が可能であれば，クリープ変形・塑性変形は進むが，構造物は崩れることなくその後も成り立つことができる」ことになる。定理の考えに合わせて言うと，「外力につり合い，材料の終局耐力を超えない1つの応力分布」を見つけたことになる。

構造解析の3条件

構造解析を行う際に守らなければならない3条件に，「力のつり合い」，「変形の適合」および「材料の構成則」がある。上部構造，基礎構造および地盤のすべての「材料の構成則」を正しく知ることができ，荷重・外力も正しく算出できた上で，「力のつり合い」，「変形の適合」の2条件を満たすように解析を進めれば，実際現象をそのまま模擬していることになるから，構造物の挙動をすべて追うことができる。しかし，実際の建築構造において，これらをすべて知ることはできないため，通常の構造計算では，材料の構成則のうちの強さと荷重・外力に注目し，「力のつり合い」を守ることに重点をおいている。たとえば，上下に連なる柱の軸力の計算の際の「拾いの軸力」と言われる計算方法，地震時の骨組計算を行う際に，立体骨組を平面骨組の集まりであると認識し，立体的な効果を無視して解析を進めることなどである。これらは厳密に考えると，隣接する骨組との間で変位に差が出ていること，考えている架構に直交する骨組に生じているはずの応力を無視していることなど，「材料の構成則」，「変形の適合」の2条件を無視していることになる。厳密さを欠いても大きな問題が起きないのは，上記の計算結果は下界の定理で言う「外力につり合う1つの応力分布」に成りうるからである。

もし，設計の段階で考えていた力の流れ，つまり応力分布が実際の構造物内に生じるものに近く，その力や応力を負担する個々の構造材料，部材に生じる変形，ひずみが十分に小さければ，建設された建築構造物は建設当初の形をいつまでも維持できる。



①ドーム構造の支持部に沿って生じたひび割れと，その後の応力のつり合い
（出典：Rowland Mainstone, DEVELOPMENTS IN STRUCTURAL FORM）

これからの耐震設計

耐震設計において重要なことは構造物の強度と塑性変形能力の2つであり，ここで必要となる塑性変形能力は上で述べてきた静的外力に対する建築構造物を考えるときに比べ，さらに大きなものになる。

ノースリッジ地震，兵庫県南部地震により損傷を受けた構造物から多くの教訓を得た。第1に，塑性変形能力を耐震設計に取り込むためには塑性変形すると考えた部分にある有限な長さが必要であること，第2に過大な塑性変形は構造物の過大な損傷と同意であることの2点である。

第1に関する例は，ピノキオの鼻を顔につけるようにH形鋼の梁を柱に付けて梁端部に塑性変形を期待していたことに関する反省，第2に関する例は，梁降伏が思いどおりに生じた建物でも，その修復費が非常に大きくなってしまったため，取り壊されてしまった鉄筋コンクリート構造への反省である。

構造物の力学的挙動を表わすために，力を縦軸，変形を横軸で表わしたグラフがよく用いられる。専門家は建築構造の性能の表示を縦軸を用いて，「もつ，もたない」，「必要保有耐力に比べて保有耐力が大きい」のように表現する。しかし，建築の持主や利用者には力の軸は見えないから，構造物の性能を測る物差しは変形，加速度などの横軸になる。崩壊しなければ変形してもよいという判断ならば，力の軸に注目して考えることに間違いはない。しかし，変形量の大小に注目するならば，考えるべきことは沢山残っている。

耐震設計においては，構造物本体に大きな塑性変形を期待するのをやめ，エネルギー吸収を建物の外で行う「免震構造」の採用，または地震時のエネルギー吸収を目的としたダンパーを建物の各層に積極的に配置し，柱・梁などの鉛直荷重支持部材には塑性変形によるエネルギー吸収を期待しない「制振構造」の採用が必要になる。

まとめ

建築構造物は常時荷重に対しても地震荷重に対しても，塑性変形能力によって設計・計算と実際の構造物の間が関係づけられ，構造物を成り立たせている。これからは力のつり合いによる成立ちだけでなく，長期的な力，地震などの過大な外力に対して生じる変形・塑性変形の量そのものに注目することが重要になる。

（わだ　あきら）

PSAIS