特集

規基準の数値は「何でなの」を探る

監修
和田 章
東京工業大学建築物理研究センター教授

●建築を設計し施工するにあたり，守らねばならない数値が非常に多くあるが，
これら一つ一つが決められた根拠には，普遍的に正しいと言えるものから，
経験的に決められたものまで，いろいろある。
中には，決められた当時に，はっきりとした根拠はなく，何らかの値に決めざるを得ず，
委員会の議論などを経て決められたものもある。
●このような値は，その後の地震災害，強風による災害，
長期の使用にあたって生じる損傷などの経験を積んで，修正しなければならないし，
技術的な進展によって見直さなければならないこともある。
このような変更がなかった場合においても，設計者，施工者の判断によって，
これらの値を安全側に変更して用いることがあってもよい。
●このとき，最も重要なことは，これらの数値が決められた根拠が明らかになっていることである。
学会規準などには，これらの記述があると思うが，根拠が明記されていないものもあり，
今回の特集はこれらを整理するよいきっかけになると思う。
（和田 章）

総論

数値より，決められた根拠

和田 章●東京工業大学建築物理研究センター教授

数式や数値とその意味

建築の構造設計から施工にいたる技術は，経験・直感によることはもちろんあるが，ガリレオ・ガリレイに始まる静力学・動力学に支えられていることは言うまでもない。その著書『新科学対話』には梁の曲げ強度を表す式として，

$$M_{max}=f_t\frac{BD^2}{2}$$

が示されており，この分母の2は現在使われている弾性設計のための6でもなく，終局強度設計に用いられる4でもない。一見すると大間違いのように思えるが，この式は石材の梁の終局耐力として導かれたものであり，石材の引張強度は圧縮強度に比べて非常に小さいから，中立軸は圧縮力の集中する断面の縁にあると考えてよく，断面全体がほとんど同時に引張強度f_tに達したときに終局耐力を発揮すると考えれば，ガリレオの説でよい。平面保持の仮定，ヤング係数の発見，断面2次モーメントなどが見つけられるずっと前のことである。材料の引張強度を調べる試験機もなかったから，具体的にf_tを調べてこの式を用いていたわけでもない。要するに，$\frac{f_t}{2}$は単なる係数と言え，梁の曲げ強度がBD^2に比例することを説明したことに意義がある。一様な断面を持つ単純梁の自重による中央の曲げモーメントが

$$M_0=\rho\frac{BDl^2}{8}$$

で表せることもガリレオは示していて，断面の曲げ強さは大きさの3乗に比例するが，発生モーメントは4乗に比例することから，同じ材料で同じプロポーションの大きな構造物をつくろうとしたら，いずれ無理が生じ，大きな構造物には相対的に太い部材が必要になることも述べている。

以後三百数十年の間，数学・物理学の発展，新しい建築への要求，構造材料の進歩，各種の自然災害や構造実験から得た教訓，構造工学の進歩に従い，構造設計・施工に関わる多くのことがわかるようになり，多くの計算式が導かれ，守るべき数値が定められてきた。ただ，ここで重要なことは，数式や数値そのものより，その導かれた根拠を知り，意味を理解することである。

建築構造の成立ちと構造設計

建築構造物を成立たせる基本は，「強さ」「変形能力」「一体性」の3点であると考える。誰にでもわかるように，強い材料・部材・骨組が強い構造物をつくる基本である。ただ，ほとんどの構造物は不静定構造物であり，部材の製作から，構造物の構築までには多くのプロセスを経るから，構造物に実際に生じている応力状態は机上の計算と同じではなく，強風や大地震を受けたときに構造物内に生じる応力状態も机上の計算どおりではない。

この計算と実際の間にある谷を埋めてくれるのが，構造材料，部材，骨組に持たせるべき変形能力，粘り強さである。一般の人には理解しにくいが，構造設計の上で最も重要なことである。構造物の終局強度に関する「下界の定理」「上界の定理」および「解の唯一性」の3定理が成立つためにも必須である。重ねて，構造物の塑性変形能力は地震時のエネルギー吸収能力を高めるためにも重要な働きをする。構造設計の段階で構造物の壊れ方を想定し，骨組を構成する各部材や各接合部について，塑性化を許容するところと，ほぼ弾性域で挙動させるところに区別して設計することも必要である。すべての部材や接合部に十分な塑性変形能力を持たせる設計より，合理的な構造設計が可能になる。

もう一つ重要なことは，構造物の一体性である。英語では「integrity」，中国語ではもう少し広く「整体性」というが，長期にわたり構造物が安定して存在し，強風や地震に耐えるために絶対に必要な条件である。2008年5月に起きた中国・汶川地震で多くの学校建築，集合住宅が大きな被害を受けたが，この原因の一つにプレキャストコンクリートパネルを梁の上に平行に並べただけの一体性のない床構造があり，構造物の一体性の重要性があらためて認識された。わが国の耐震基準にもある偏心率の規定，剛性率の規定も，建築構造物を全体として釣合いのよい整った形状にすることを目指して決められている。これら3点の基本は，上部構造だけでなく，杭などの基礎構造についても重要であり，この特集で述べられる項目は，これらに関わる内容が多い。

未解明なこと、将来への可能性

建築の構造設計に関しては，未解明のまま残されている多くの問題がある。例えば，上部構造はこれより

丈夫につくった基礎構造に緊結して施工した方がよいと，誰でもが考える。ただし，過去の地震災害やE-Defenseで最近行われた実物大の振動実験によると，上部構造が地盤または基礎の上で滑ったり，浮き上がることにより，大被害を免れうることがはっきりしてきた。両者が緊結してあった建物でも，地震時に杭基礎が先に壊れたために上部構造の被害が軽減されたこともある。重要な問題であるにもかかわらず，曖昧にされているところである。重力加速度（980cm/s^2）は一方向に永遠に働き続けているから，上部構造も基礎構造も鉛直荷重の支持能力を失わないことが絶対条件である。しかし，地震動は長くても数分間，加速度は瞬間的には重力加速度と同じになることはあるものの正負3方向の震動である。これを受ける構造物は振動するのであって，静的な力の釣合いでは説明できない多くの現象があり，地震に耐えうる構造には多様な可能性のあることもわかる。ここには一例を述べたが，われわれの用いている設計法・計算法の中にはまだ未解明なことが多く，一方で将来の建築構造に多くの可能性があることも忘れてはならない。少なくとも，わかっていないことをわかったことのように法律に定めたり，このことで次の発展を拘束することはあってはならない。わからないが今はこう定めたとして，記録に残すべきである。

構造物に必要な強さ

材料の性質から構造物の挙動まで，すべてが解明されたとしても，建築構造の設計において最も難しいこととして残るのは，将来に襲ってくる地震動や強風の自然現象であり，その大きさと発生時期はわれわれにはとらまえきれない。地震の発生メカニズムや伝播，台風シミュレーションなどの研究が進んでいたが，1万年以上の長い期間に一度のような起こりうる最大を用いるべきということはできない。これらの大きさは，国の豊かさ，技術の高さ，人びとの生活や経済を考えて社会的かつ総合的に決められることであり，物理的な理屈だけでは決められない。この特集では，これらの自然現象と構造設計に関しても多くの項目が説明されており，大いに参考になる。一か所にまとめられているわけではないので簡単ではないが，元となる文献・資料を自力で調べることも必要であり興味深い。いずれにしても，法律で最低基準が決められ，構造設計者や発注者の判断でより性能の高い構造が設計される仕組みになるのであろう。

これに比べ，鉛直荷重に対する構造物や基礎の強さや剛性，変形は，一般的な構造物から大スパン構造物まで，竣工後にその結果が表れてくるから，法律や設計規準などに何と書かれていようと，それこそ真剣勝負である。ただ，地球上で常時作用している力であり，問題は顕在化しやすく，規準に反映し次の設計に役立てることができると言える。

原点に戻り，これからすべきこと

われわれは3次元空間に物理的に大きさと空間を持った建築物を設計し施工している。この特集で説明されている設計法や計算式はこれを支えるものであるが，すべてを簡単な数式・数字に置換えることには無理がある。この特集のように決められた根拠を知り，ときには本当の目的を見直してみる必要がある。

最近では構造設計図がCADによって描かれることが多くなり，使われる線は繊細になり，情報は詳細になったが，図面の線そのものに設計者の思いが入らなくなった。耐震壁と間仕切壁の区別は柱型と壁型の間が線で区切られているかどうかをよく見ないと認識できず，30年程前に太い赤鉛筆で耐震壁を描き，全体の釣合いを見ていたときのような実感が湧かない。偏心率のような数値は，良しあしを決めるのに便利ではあるが，赤鉛筆を持ってなど全体の把握をもっと重んじるべきである。

わが国に限らず，建築構造物の耐震設計には層せん断力と層間変形の関係が基本となっており，この関係と建築物の重量，地震動の強さ・性質をもとに構造物の応答を調べ，耐震性を評価している。これらの方法は地震時の動的挙動を等価な静的計算に置換えるために考えられたもので，本当の挙動は動的であることを，ときには思い出すべきである。

梁より柱を強く設計したとしても，特定層に変形が集中すれば，その層にある柱の上階の柱の脚部，下階の柱の頭部には，その柱に取付く梁と同じ方向の曲げモーメントが生じ，注目している柱に過大な曲げモーメントとせん断力を与えてしまう。米国などでは，梁をピン接合と考え鉛直荷重のみを伝える柱「gravity columns」または「leaning columns」がよく使われ，耐震設計上は無視されているが，地震時には特定層破壊の防止に非常に役立つことが再認識されている。地震時の挙動は動的現象であることをあらためて思い起こす。

人が病気になってから快復してもとの元気に戻る力を，英語で「resilience」という。われわれは建築一つ一つを設計施工しているが，無数の建築の集まりが都市や国を構成しており，大きな台風や地震のあとの社会の快復力を持たせるため，より高い性能の建築構造を，現状と変わらない建設費で構築できる技術の開発が必要である。

（わだ　あきら）