

耐震設計と 保有水平耐力

和田章

……東京工業大学教授

1. 建築構造全体の釣合と強さ

ひところでは、全鋼材量を延床面積で除した単位面積当たりの鋼材量が 120 kg/m^2 であるとか 150 kg/m^2 であるという話を構造設計者の間からよく聞かされた。その中で、一流の構造設計者が設計をしたのであれば、鋼材は適切な所へ適切な量で配置されているはずだから、同じような形の建物であれば鋼材量の少しでも多い建物の方が強いはずであるという話もよく言われていた。このように細かい計算によるより、使用鋼材量によって建物の強さを計っている構造設計者が非常に多い。

主に耐震設計によって建物の形や鋼材の断面が決まっているとして、上で述べた望ましい部材選択と配置が行われた建物の形の一つを $f(x, y, z)$ とする。これは建築構造全体の望ましい釣合を表している3次元空間での関数と考えることができる。これに建物の強さを表す係数 a を考え、設計案としての建物の形を表す関数を $F(x, y, z)$ とすると $F(x, y, z) = a \cdot f(x, y, z)$ となる。

先に、主に耐震設計によって建物の構造が決まっているとすると述べたが、実際の設計では鉛直荷重、風荷重に対しても設計を行わなければならないから $F(x, y, z) = \max\{a_1 f_1(x, y, z), a_2 \cdot f_2(x, y, z), \dots, a_n \cdot f_n(x, y, z)\}$ のように式は複雑になる。しかし、ここでは最も単純な先に示した式を用いて考える。 a の値は社会がその経済力と起こるであろう地震動の強さによって最低値を決め、施主や設計者の判断で実際の建物の設計には最低値より大きな値を用いるというのが一般的な考え方であろう。 $f(x, y, z)$ は望ましい建物の形を表す関数であるが、これを決めるのが構造設計者の腕ということになるし、設計法の役目ともいえる。しかし真に望ましいかどうかは実際の大地震を受けてみなければ分からない。設計の時点で、地震時の建物の挙動をできる限り正確に予測することが地震工学、構造工学の役目である。

正確に予測するためには、まずプレートテクトニクスの理論に基づき地震の発生機構の解明から始め、波動伝播、建設地盤の特性による増幅によって建設地の地震動を予測しなければならない。次にこの入力によって起こる建物の振動現象や建物を受ける力と変形、最終的には建築構造物の破壊の性状までを見極めなくてはならない。このためには解析理論の研究だけでなく、計算のために設定しなければならない数値そのものの研究が必要になる。このように、これら一連の解析は多くの仮定と数値の設定によって可能になるから、最終的に建物の挙動に関する情報が定量的に示されたとしても、絶対値としての大きさをそのまま信じることは難しい。しかし、これらの解析によって得られる建物の地震時の挙動に関する定性的な情報は先に示した $f(x, y, z)$ が適切であるかどうかの確認に非常に有益である。ここで行われる計算は、仮定された地震動、建設地の地盤の状況に関する数値および上部構造としての建物に一つの設計案を用いて得られる詳細なデータに基づいて進められる。これは設計という行為ではなく仮に設計した案の解析を行いその挙動を調べ確認するという行為といえる。実際の設計の場面においてこのように地震応答計算を行いながら進める手順で建物の望ましい形 $f(x, y, z)$ を突き止めるのは非常に効率が悪い。

実用的な耐震設計法としては上に示した確認に関する一連の計算量を減らすことが必要となる。そのために、動的計算を静的計算に置き換え、許容応力度設計と終局強度設計の両者を行っているのが現在の形である。この二つの設計法の手順が建物の形や断面の形状と大きさを決めるとい流れに作られているか、やはり仮定した一つの設計案に対して地震時の安全性を確認するという流れで作られているかについては二通りの考え方がある。

基準法施行令、学会規準等の手順に従って計算を進めて行った先に構造設計の結果があるというのでは、構造設計の楽しみが無くなってしまい、単なる計算の連続になってしまう。建築の設計は彫刻家が作った形から始めてもよいわけであるから、形を決めるのは設計者であり、計算は安全性を確認するために行っていると考えた方が可能性が大きく拡がり構造設計が楽しくなると考える。初期の設計を作り上げて行くために、大きな力の流れや釣合、構造物の安定と不安定、動的な挙動、壊れ方、終局耐力等を頭にえがき、簡単な計算で建物の安全性を確認できることが必要であり、その時は設計行為と確認行為が非常に早い速度で繰り返されていることになり、その結果として第1次の設計案が形作られて行くと考えられる。

2. 終局強度設計法と耐震設計

構造物の安全性を確認する方法として、使用する材料の強さに安全率を考え許容応力度を設定し、構造物を弾性体として応力計算を行い、その求められた応力が許容応力度を超えていないことを確認する許容応力度設計法が長い間使われてきた。これに対し、構造物に与える設計外力に安全率を考え割増した外力と材料の塑性化を許した構造物の終局耐力を比べ、外力より耐力が上回っていることを確認する終局強度設計法が30年以上も前に提案され、その合理性が盛んに述べられていたが、我が国の設計法には取り入れられていなかった。約10年の実績となったが、現在では我が国の耐震設計法は2段階設計法となっており、このうちの1次設計は許容応力度設計法であるが、2次設計には終局強度設計法が取り入れられている。

終局強度設計法は欧米で考えられた方法であるが、我が国の構造設計では耐震設計が最も重要な問題であり、これはもともと動的な現象であるから、欧米のように静的な鉛直荷重に対する設計が重点であるところの考え方をそのまま導入することは無理であった。

昭和20年代の後半に建築雑誌、建築界等を通して終局強度設計法の合理性を盛んに発表していたのは東大生研の小野薫と田中尚であり、この意見に対してまだ時期が早すぎるとして反論していたのが建研の竹山謙三郎、京大の小堀鐸二、金多潔、六車照である。これらの議論も含めて昭和31年に「建築物のリミットデザイン」が小野薫・田中尚の共著で発行されている。現在では絶版となっているが30数年前の活発な討論に胸打たれるところが多い。このとき、構造設計法について次のような提案がすでに書かれている。

- ・ 靱性材料には塑性解析、脆性材料には弾性解析を使うべきである。
- ・ 変形の検討と、強度の検討を許容応力度という同じ尺度でカ

パーすべきでない。

- 強度の検討は終局荷重により、変形の検討は使用荷重によればよい。
- 構造計算は大きく分けて二つの立場から行わなければならない。一つは崩壊に対する安全性の検討であり、他の一つは常時使用中に障害が起らないかどうかの検討である。
- この二つの検討は、2種類の許容応力度によらないで、荷重を二つの種類に分けて考えるべきである。
- 安全率については、荷重の責任分野と、材料の責任分野をはっきり分けて考える必要がある。

この中で耐震設計について次のように述べ、現在の方法を35年も前に示唆していたことになる。

『水平荷重については、極めて稀に起こる震度0.3について強度の検討をし、変形の検討は度々起こる震度0.1について行う。』

しかしこの時代には次に示すようなことが未解決であり、実際の設計法としてはまだ使える状態ではなかった。

- 繰返し荷重を受けたときの部材破断。
- 脆性材料への適用限界。
- 早期に塑性化した部材の破断。
- 座屈問題の扱い。
- 軸力と曲げを受ける部材の塑性条件。
- クリーブによって生じる塑性変形の扱い。
- 地震荷重を静的な水平力として扱ってよいか。
- 動力学的な見地に立って検討すべきである。

3. 耐震設計に関する多くの研究成果

2.で述べた問題点は現在でもすべてが解決しているとは言えないが、この時点で多くの問題点をはっきりさせていたことに意義がある。その後の耐震設計に関する多くの研究はここで言われていた問題を解決するために行われてきたと言ってもおかしくない。十勝沖地震、宮城県沖地震、サンフェルナンド地震等における実際の地震被害、地震動記録の採取、コンピュータの発達による応答解析技術の確立、鉄筋コンクリート構造、鉄骨構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造等が大きな繰返し荷重を受けたときの挙動の解明に関する実験および解析的研究の成果、各種構造について繰返し荷重下の安定した力学的性状を確保するための構造法の開発等、ここには書ききれないほどの研究すべてが現在の耐震設計法の確立に生かされていると考えられる。現行の2次設計において前提としている重要な考え方を次に列記するが、このことが良く分かる。

- 弾性応答加速度は1Gに達する。
- 構造物の固有周期が長いほど応答加速度は小さくなる。
- 構造物は大きな地震に対して力と変形の積から求まるエネルギー吸収によって耐える。
- 構造物の変形能力に対応して耐震性を確保するために必要な水平耐力は異なってくる。
- 高さ方向の剛性分布、強度分布が適切でないときには特定の層に変形が集中する。
- 重心位置と剛心位置の平面的なずれによって生じる地震時のねじれ振動は被害を大きくする。

4. 2次設計

極めて稀に起こる大地震時において建築構造物はある程度の被害を受けることは許容するが、人命を守るため建物が倒壊することは防ぐという思想のもとに現行の耐震設計における2次設計は作られている。構造物の固有周期と建設地盤の良否によって応答レベルを変化させる、構造物の靱性能の大小によって構造物の必要耐力を変化させる、高さ方向の剛性分布の不均一性、平面的な偏心の大きさに対してペナルティを設ける、建物の高さ方向に理想的な耐力分布形を提案する等、約10年前に行われた耐震設計法の改定は大英断であったと言える。しかし、本来動的現象である地震時の構造物の弾塑性挙動を静的問題に置き換え、複雑な一つの設計手順としてまとめてしまったことが色々な問題を発生させていることも事実である。

5. 保有水平耐力計算の問題点

何ごとについても、問題点を挙げて批判することはたやすいが、代案を出すことは難しい。2., 3.に述べたように現在の耐震設計法は、それまでの50年間に使われていた静的震度法と許容応力度設計法にかわる、多くの研究成果に支えられ、大きな時代の流れに乗った現在では最良の方法であると考えられる。ここで、あえて問題点を列記するが、重要なことは、批判することではなく新しい合理的な方向を見付けることであると考えられる。

[必要保有耐力の計算]

- D_s の決め方が細かすぎる。
- D_s は設計思想、部材のプロポーシオン、およびディテールで決めるべきであるのに計算が終了しないと決まらない形になっている。
- F_e , F_s 等のペナルティによって耐力を増加させたことが耐震性を高めたことになっている保障がない。
- F_e を決めるための根拠となっている剛心計算法が壁の剛性評価に影響を受けやすい。

[保有水平耐力の計算]

- 計算法により保有水平耐力の値が大きく変化するため、信頼性のある値を求めることが難しい。
- 許容応力度設計の時代では代表的な架構の中の代表的な柱・梁の計算を行い、その他については全体のバランスを考えて部材断面を決めていたが、保有耐力の計算のためにはすべての部材の計算を行わなくてはならなくなり、計算機の利用が必須になってしまった。このほか、設計が2段階になったことなどにもより、十分にディテール、部材のバランスを検討する時間が減ってしまった。

6. おわりに

1981年6月に現行の耐震設計法が使われ始め9年間は過ぎたが、この間に建築学会では「保有耐力と変形性能」(1981年6月発行、現在改定中)、「鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」(1988年4月改定)、「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説」(1988年10月発行)、「鋼構造限界状態設計規準(案)・同解説」(1990年2月発行)のように新しい合理的耐震設計法を確立するための努力が続けられている。一方新しい方向としては「免震構造設計指針」が1989年9月に発行され、実際に免震建築も約40棟が建設され、高層建築への制振構造の開発も行われる等色々な動きがでてきている。