



随想（その1）

和田 章

Akira Wada

1946年 岡山県生まれ
1968年 東京工業大学卒業
1970年 (株)日建設計入社
1982年 東京工業大学助教授、1989年同教授
2011年 日本建築学会会長、日本学術会議会員
2014年 日本免震構造協会会長

分からないことの多い地震動と 構造物の鈍な耐震設計

Simple design is recommended rather than
too sophisticated (Part 1)

1. 研究の進展とともに構造物から遠ざかる地震動の設定

阪神淡路大震災は1995年に起きた。建築基準法の耐震基準が改訂されたのはこの地震の前の1981年である。さらに遡って関東大震災1923年の起きた次の年に作られた建築物の耐震基準では、鉛直荷重による骨組の部材応力と、各階の重量の10%（慣性力）の水平力を骨組に与えたときに生じる部材応力を合算して、鉄筋コンクリート構造の場合も鉄骨構造の場合も構造材料の許容応力度以内に収めることが決められていた。この時代には構造材料の許容応力度に長期、短期の区別はなかった。

戦後の建築基準法では長期の許容応力度と短期の許容応力度が考えられ、コンクリート材料の短期許容応力度は長期の2倍、鉄筋や鉄骨の短期許容応力度は長期の1.5倍に設定された。地震時の水平力は各層の重量の20%に割り増されたが、地震時には短期の短期許容応力度まで使って良いことになった。

始めに述べた新耐震設計法では、すでに米国で使われていた層せん断力係数が用いられるようになり、建物の各床に作

用する慣性力を直接扱うのではなく、地震時の高さ方向の応答せん断力の分布に注目するようになった。

2000年の建築基準法改正では、建物から離れた工学的基盤に注目して応答スペクトルが定義され、敷地の表層地盤の動特性を考慮して建築物の基礎部分に与えるべき地震動スペクトルを計算するようになった。

最近では長周期・長時間地震動が問題になり、大阪・名古屋・静岡・東京などに従来の建築基準法のレベルを大きく超える工学的基盤の入力地震動のスペクトルが定義された。

一方で、政府の地震調査委員会が発表している全国地震動予測地図（図1）がある。人々に地震発生の危険性を知らせるために役立つと思うが、毎年のように更新されている。一度、構築したら何十年と使われる土木構造物や建築構造物の耐震設計に、常に更新されるこの地図情報を反映することはできない。確率が小さいからといって、襲ってくる地震動が小さいわけではない。確率は小さくてもその地を襲う可能性のある地震動の性質や大きさを知って、これに耐えるように構造物を作るのが我々の仕事である。この地図で確率の小さいところは、地震対策を後回しにしても良いと受け取られる恐れもある。

建築物の耐震設計において、上部構造の力学的挙動、及び動的応答に関する研究が推進されただけでなく、地震動とその発生・伝播メカニズムに関する研究も進み、長い年月をかけて、この両者の研究成果が耐震設計法に組み込まれてきたことが分かる。

最近では、地震観測網が整備されたため、従来の設計で用いていた地震動を超える観測記録が次々に採られている。同

時に地震動に関する研究も精緻になり、スーパーコンピュータを用いて、従来の地震動レベルを越える地震動が計算されるだけでなく、起き得ると言われるようになった。

2. 計算は精緻になったが構造物の耐震性は向上していない

これらの100年にわたる努力は研究進展という意味では有意義であったが、建築物や土木構造物の設計プロセスに、地震動のわからなさ、地盤のわからなさが組み込まれてしまったという意味で、耐震設計そのものが進展したようには思えない。

19世紀末の濃尾地震の教訓、20世紀初頭のサンフランシスコ地震、メキシコ地震、関東大震災の教訓を経て進んできた構造物の耐震技術であるが、21世紀になっても、日本も世界も地震被害は止まっていない。研究を精緻に深めて設計の手順を難解にしても地震災害は減少しない。地震被害を減じたいなら構造物そのものの仕組みに戻って考え、素材により良い構造を考え、耐震性を高めることが必須である。

取り壊されることが決まっている浜松町の世界貿易センタービル（160m）は三井霞ヶ関ビル（147m）に続いて日本に建設された高さ100mを超える超高層ビルであるが、1967年、大学4年生の頃、構造計算を手伝った。耐震設計を進めていた須藤福三は、この頃に就航していた大型タンカーの設計法を調べ、船を一本の大きな梁とした時の中央断面の設計せん断力が船の片側半分の重量の数%程度であることを調べ、超高層ビルの一階の弾性設計用の層せん断力係数を同様に数%にすることに納得したと言われていた。

万年筆や携帯電話の強さを設計するとき、丁寧に扱う女性を想定して華奢なも



図1 政府が発表する全国地震動予測地図（2017）

のを作り、乱暴な少年が使うことを想定して壊れにくいものを作ることはなく、机から落としても壊れないなどの素朴なスペックを使うと思う。

日本は地震国であり、地震に耐える建築を建てるのが我々の仕事である。建築を設計する際に、敷地周辺の数百 km の範囲で生じるかも知れない断層を仮定し、そこまで潜ったわけでもなく、手に取って見たこともない地中の伝播のメカニズムを考え、工学的基盤の地震動を考え、表層地盤の動的性質を考慮し、建物と地盤の連成を考えなければならないことが正しい方法のように思えない。線形とは $f(nx) = nf(x)$ が成り立ち、 $f(x+y) = f(x) + f(y)$ が成り立つ数学モデルであるが、基本的に大地震が発生したときの地殻内部や地盤の挙動がこのように単純な線形かつ弾性的な性質で表されるわけではない。正確に計算しようとすればするほど、必要な情報は無限に広がるように思う。

数値計算によって求められた精巧な地震動には、南北、東西、上下の6成分の何分間にもわたる時刻歴データもある。設計している構造物の方位と地震動の成分を合わせて応答解析をするほどの精度があるのかどうか、疑問であり、行き過ぎているようにも感じる。土木構造や建築構造の設計は研究ではなく、設計である。

以下に示す図2は、1977年の日本建築学会大会において、斎藤幸雄・川村政美が発表した「実施設計建屋における入力地震波と設計用せん断力に関する一考察」に示された図である。設計に用いる2種類の地震動スペクトルの谷間の周期に実際の建築物が設計されていることが示されている。当時としては最新の技術によって、個々の超高層ビルの設計は行われていたはずであるが、コンピュータを用いた応答解析の結果に翻弄されて設計を進めた結果、多くの建物の固有周期がスペクトルの谷間に集まることを見て、恐ろしくなる。

これらの建物の敷地を襲う将来の地震動は設計に用いたものと同じではない。このレポートは40年前であるが、今の技術によって敷地に将来に起こる地震動

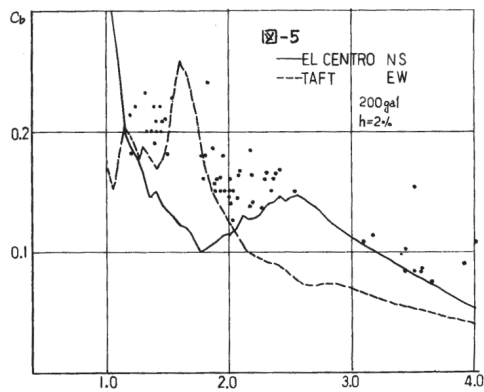


図2 二つの設計用地震動の応答スペクトルと、超高層ビルの固有周期・ペーシアア係数 (1977)

を特定できると考えるのは楽観的すぎるように思う。

ここまで述べてきたように、設計している建物からはるかに離れたところに、極めてまれにしか起こらない自然現象を想定し、地震の発生から地震動の伝播、地盤と建物の連成などを考える場合、この計算には多くの仮定と境界条件があり、設定しなければならない多くの数値もある。このような華麗な方法によって建築物を設計することに多くの不安がよぎる。このプロセスに、理論の間違い、数値の間違いがある場合、建物そのものまで違えてしまうことになる。

3. 耐震設計の起承転結

小説にも論文にも、その全体構成としての起承転結が重要である。建築物の耐震設計にも起承転結が重要であり、この「起承転」までの流れは単純である。建物に作用する地震動を考え、これによって設計しようとしている建物を受ける挙動を調べ、これらの結果が社会的に受け入れられるかどうかを判断して、建築物や土木構造物は設計され建設される。

地震国に建つ建物は、建主の一生の長さの何倍も長い期間に一度起こるような地震動を受けることがある。このようなときでも、建物を続けて使えるようにすべきと法律で規定するのは難しいことを理由に、現状の設計体系は稀に起こるとされる地震動には、地震後に建物は続けて使えるようにするが、極めて稀に起こるとされる地震動には、人命を守るために倒壊は防ぐが、地震後に建物は使えなくなっても良いとされている。この思想

に基づき、骨組の塑性変形に期待した設計法は、建物に必要とされる強さを低減して良いため、他の構造方に比べ安価で構造体が構築できる。結果として、わが国でも他の国でも大地震後には多くの建物が塑性変形を受けて使えなくなる。

問題は起承転結の「結」の部分である。わが国では、使えなくなった建築物の取り壊しと後片付けに公的な資金が使われる。個人の土地に個人の建築を建て、大地震時には大きな塑性変形を起こすが命は助かる。しかし、「取り壊しと片付け」は自分では行わない。個人や私企業が公共に甘えていることになる。「耐震設計の起承転結」は全体として「閉じた筋書き」になっていないことがわかる。地震後に住宅が傾いて住めなくなり避難生活を強いられ、事務所や工場が壊れて仕事ができなくなるのは建主やその関係者である。法律に書いてなくても、建主と構造設計者がより高い耐震性を自ら求めて設計を決めるのが本筋である。さらに、大地震を受けたのちに倒壊したり損傷した多くの建物で構成される村やまち、都市・大都市の状況を考えねばならない。

地震動の研究は必要である、構造物本体の塑性変形能力の研究も必要である。これらに関するコンピュータを用いた精緻な解析も必要である。ただ、建てられている建築物の耐震性能を高めなければ意味がない。大地震の後にも続けて使える建築が必要であり、直せば使える建築が必要である。もちろん土木構造物についても同様であるが、耐震工学に関わる皆で考え直さねばならない。

4. 構造物の華麗な設計

ここまでは地震動に関する研究の進展と耐震設計について述べてきたが、上部構造の耐震設計においても、コンピュータを用いた計算はますます複雑、華麗、精緻になっている。この傾向について、ドバイに高さ800mを超える超高層ビルを設計したシカゴのSOMの構造設計者 William Baker は "Does 'design by analysis' provide sufficient insight?" と言って批判している。