建築耐震設計と計算工学

和田 章

1　はじめに

日本計算工学会の発足は素晴らしいことと思う。修士課程の1年の頃、1968年だったと思うが、日本鋼構造協会の第3回大会の中でマトリックス構造解析シンポジウムの第1回が開かれた。ここで、建築骨組のように部材に生じる曲げ変形が他の変形成分に比べ多い場合には、一定歪みの三角形要素や単純な長方形要素では精度の高い計算はできないことを示し、辺の中央に節点を設けた6点三角形要素と8点四角形要素を使うことの有効性について発表した。このシンポジウムはその後、2年に一度の間隔で開かれ、さらに最近になって毎年開かれるようになった。これとは別に、毎月有楽町の新東京ビルやその近くのビルの地下の会議室などでSTANと呼ばれる会合が開かれていた。STANはStress Analysisの略だと思うが、関西や九州ではWESTANという会も開かれていた。このSTANの会合では、建築骨組解析への有限要素法の応用、ドイツで出版されている論文の抄録としてガラーキン法によるシェルの解析などについて発表したことがある。鷲津先生、山本先生、山田先生が中心になっていたころである。

現在でも、ほとんどの大学の建築学科ではクレモナ図式解法、固定モーメント法、撓角法などがカリキュラムの中に入っていると思う。約30年前、建築構造の計算法には、こんな鶴亀算みたいな方法しかないのかと、がっかりしていた。これらの会合に出席するようになって、造船や航空の分野の進んだ解析技術、さらにはアメリカ

筆者紹介

わだ あきら
1946年1月岡山生まれ。1968年東京工業大学卒業、70年に修士、同年4月より日建設計に入り建築の構造設計、構造解析のためのプログラム開発を担当。1982年より東工大建築学科助教授。1989年より工業材料研究所教授。現在に至る。研究は数値解析、実験などにより建築の合理的な構造設計、耐震設計を目指している。

やヨーロッパの進んだ解析技術に触れることができて、感動的な日々であった。1969年には日米シンポジウムも開かれた。まだ1$が360円だった時代であり、数年前から交流のあるICES-STRUDL の開発者の一人 MIT の Jerome J. Connor 先生らに聞くと、アメリカ人にとってとても快適な滞在だったといっている。

建築構造の分野でも先進的な人々がおり、東京オリンピックのためのスポーツ施設の建設、霞が関ビルや大阪万国博覧会のパビリオンの設計、建設が行われていた時代である。1968年の春には十勝沖地震が起き、それまで耐震的な構造と信じられていた鉄筋コンクリート構造が大きな被害を受けた。その直後から、多くの実験研究が行われ、設計法の見直しもされ変化の多い時代であった。

この30年近い間のコンピュータの計算能力の進歩は目覚ましく、鉄骨骨組については有限変位理論と弾塑性解析理論を組み合わせ、二次元骨組や三次元骨組の高度な解析ができるようになり、鉄筋コンクリート構造ではコンクリートのひびわれ、鉄筋の降伏を考慮した解析が、一般の設計の中でも行われるようになった。耐震設計にはなくてはならない振動応答解析については、単純な串団子モデルから2方向やねじれ変形を考えたモデル、骨組の一本一本の弾塑性状態を追跡しながら応答解析を進める方法を用いるまで進んできた。

先日、ロンドンにある科学博物館を訪ねたとき、コンピュータの歴史のコーナーに1960年代後半の大型計算機室のミニュチュア模型が歴史として展示してあった。カードリーダー、テープ、ディスク、プリンターなどの周辺機器が整然と沢山並んでいて、コンソールのところにいるオペレータがマイクを使って、別のオペレータにテープやディスクの交換の指示をしている場面の模型である。自分の関係してきたことがすでに歴史になっていることを見て、一つの時代が過ぎていくことを感じた。

2 耐震基準と構造設計

兵庫県南部地震後に出された多くの報告書の共通点は、耐震基準の変遷と地震被害の関係を述べ、基準が新しくなるごとに被害率が激減していることを示している。壊れた建物は古い基準によっていたから仕方なく、今の基準なら問題は少ないという主張である。耐震工学の研究者だけでなく、耐震設計を行っている構造設計者においてもこの主張はほぼ同じである。ただ、一部の進んだ技術者は地震災害を基準の変遷と対応させ古い基準で設計されたものは壊れてもよかったという言い方に、異議を唱えている。その理由は簡単である。構造設計者は建築物や土木構造物を耐震的に作るために日夜努力しているのであって、国で決められた基準や学会で決められている規準に合わせてぎりぎりの設計をするのが仕事でないからである。

もし、設計した時代の基準に合わせていれば壊れても許されるのであれば、設計者の立場はかえって弱いものになってしまい、何も主張できなくなってしまう。この度の地震災害でも、すべての建物が壊れたわけではなく、古い基準の時代に設計し、建てられた建物にも無被害のものも多い。

1981年6月から建築構造の耐震設計法は今の形になり、すでに言い古されている説明であるが、中小地震には機能を維持させ、大地震には人命を確保する条件のもと、建物は壊れてもよいというコンセンサスのもとに組み立てられている。大学の講義でも、一般の講習会でも、めったに来ない地震に対して壊れないように設計したら、経済的にも勿体ないし、普段の使い勝手の悪い建物ができてしまうから、大地震動に対して建物が壊れることは仕方のないことだと説明している。この説得力のある説明にほとんどの学生や技術者は納得してしまい、「人命を守れば、建物は壊れてもよい」と言う大方針のもと、研究も設計も行われてきた。その結果、新しく建てられた建物でも、この度の地震で多くの建物にコンクリートのひびわれができ、また鋼構造の場合は柱梁接合部にクラックが発生した。そのため、取り壊しになったり、復旧に多くの費用を要したものが多い。

一度、大方針が決まり、それが説得力のあるものであればあるほど、その分野の人々にその考え方は深く浸透していき、その大方針の中である最適化が進められ、ある谷へ落ち込んでしまうことになる。

今の耐震基準に従うと、鉄筋コンクリート構造に耐震壁を組み込んだり、鉄骨構造に筋違を組み込むと、これらがない場合に比べ、構造物の変形能力が小さくなるという理由で、構造物が持つべき終局的な水平耐力を割増さなくてはならないことになる。その結果、弱い建物であっても、耐震壁や筋違が無いほうが許可が下りると言う理由で、柱、梁だけからなる骨組構造が多く建設されることになった。実験研究をしている研究者も設計法を考えている研究者も、構造物は耐力は少々小さくなっても変形能力が大きいことが良いことであると信じて20年走ってきた。これらの成果は思っていた通り実現し、人命を保証して財産は失ってもよいとするコンセンサスは実際のものになった。確かに、新しい建物で完全に倒壊してしまった例は非常に少なかった。しかし、最近になっても報道されているように、大規模な建物にコンクリートのひび割れ、鉄骨構造の溶接部に多くのひび割れが発生し、比較的新しい建物であっても、取り壊すことになってしまった建物があり、社会問題になっている。これらの建物はほとんどの場合、耐震壁や筋違の組み込まれていない柱と梁だけからなる骨組構造である。適度に耐震壁が組み込まれ、使用上も問題のない古い建物が無損傷であった例を聞くと、なんのために耐震研究を進

めてきたのかと思われる。

骨組の塑性変形、塑性変形能力の研究が盛んに行われるようになったころ、これでは「骨組を壊すことになってしまう。やはり、地震が終わったあと、もとの形に戻るのがいちばん良いのだが」と言っていた設計者もいた。考え方の中心は時代とともに変動する。この度の地震を受けて、過度の塑性変形は許したくないと考える人が増えていることも事実である。

3 新しい耐震設計

前章に述べたように従来の耐震構造は骨組そのものを壊すことによって、地震時のエネルギーを吸収させる考え方で成り立っている。これに比べ、最近になって注目されている新しい耐震設計法に免震構造、制振構造と呼ばれる設計法、構造法がある。免震構造は建物の下部に積層ゴムとダンパーを設け、地震時の入力エネルギーをここでほとんど吸収させ、上部構造にはほとんど弾性変形だけしか生じさせない考え方である。制振構造は、柱と梁でつくられる骨組構造が塑性変形を起こす前の段階で粘性ダンパーや弾塑性ダンパーを効かせるように設計する方法である。この制振構造の基本となる柱や梁には、この10年に研究開発の進んだ高張力鋼材、高強度鉄筋高強度コンクリート、鋼管の中にコンクリートを充填するCFT柱などの応用が考えられる。これらはすべて、部材の大きさに対して強度が非常に高いため、弾性変形量が大きいという特徴を持ち、制振構造に適用するのに向いている。これに加えて、地震時のエネルギーを吸収するためのダンパーの開発も盛んに行われている。粘性体、粘弾性体、鋼材の塑性変形、さらには摩擦を応用したものが用いられる。

免震構造、制振構造の考え方を具体化している段階で、積層ゴムの耐荷機構の解明、骨組中に組み込まれたダンパーの性質を正しく評価した応答解析、最適な骨組の剛性分布やダンパーの配置計画など、コンピュータを用いた各種の解析が大きく役立っている。

4 解析技術の進歩

言うまでもなく、建築は一品生産である。他の工業製品のように、一つの製品の開発に膨大な費用と労力を掛け、試作品のテストまで行うという方法は使えない。ほとんどが机上のスタディをもとに設計が進められ、設計図に書かれたものが正しいとして試作品をつくることなく、具体的な建設が行われていく。このような状況で仕事が進められるため、計算、解析は非常に重要である。高さが100mを越すような超高層ビルは次々に新しい形を求めて設計が行われていき、大スパン構造なども、空気膜方式、開閉式など新しいものがつくられている。これらの設計にはコンピュータを用いた数値解析が大いに役立てられている。

優れた設計かどうか、その設計がプロの仕事と言えるかどうかは、建物全体に用いた鋼材やコンクリートの総量が同じとして、それをいかに意味のあるところに適量配置することであると言われる。所謂、最適設計の研究分野になるが、このような領域にも実用性が出ている。

最近のニュースでIBMのスーパーコンピュータがロシアのプロとチェスの闘いを行い、6戦中一勝しかできなかったと報道された。将棋や囲碁のプログラムはさらに難しいそうである。コンピュータは何手も先まで読んで、各手を評価関数に代入し、最も評価値の高い手を選ぶことになる。評価値の大小だけで判断し、全体的な評価や、総合的判断がないために負けてしまうそうである。構造設計においても、構造物全体のバランスの良さなど、偏心率、剛性率などの数値で表してしまうと見えなくなってしまうことがある。地震動入力を時系列で与え、動的応答解析を行うことも日常的になっているが、細かい数値ばかりが気になって、全体が見えなくなってしまうことがある。役に立つ数値解析を役立てるには使う側の能力も必要であることになる。ただ、両者の能力が揃ったときに最高の設計ができる可能性は高い。精緻な解析法の開発と同時に、全体感をつかむための法則を見つけることが必要である。

5 耐震設計の原理

日建設計が神戸地区にある約20棟の本格的なビル建築について、この度の被害状況と設計の関係を詳細に調査した。その結果によると、大きく損傷を受けたものは全体的な水平耐力が小さなものばかりであった。水平耐力が小さくても、大きな損傷を受けなかったものもあるが、水平耐力の大きなもので壊れた建物はなかったとされている。第一にある強さをもっていることが必要なのであろう。

そのつぎに、構造物が塑性変形することになるが、容易にせん断破壊や、部材の破断が起こらないようにしてあることが必要である。その結果、地震入力エネルギーを建物の中の多くの構造部材の塑性変形によって吸収することができるようになる。当然、全体の水平耐力が小さければ大きな塑性変形を受け、逆に、水平耐力が大きければ塑性変形は小さくて済む。構造技術者としてはどちらも倒壊しないという意味で同じ評価である。

しかし、耐力が小さく、塑性変形の大きな構造物はそれだけ損傷が多いことになる。構造物の吸収エネルギーの観点では同じであるが、地震後の再利用という点では大きな差となってしまう。壁式構造のアパートがほとんど無損傷であったのは、言うまでもなく十分な強度があり、塑性変形を起こす必要がなかったからである。

最も変形能力が高いと考えられている鉄骨構造におい

て筋違のない建物の場合、重量の25％の水平耐力が基準法で要求されている。この建物の弾性応答レベルが1Gであるとするとその最大層間変形角は、この1/5の外力に対して1/200の層間変形角を許しているから、1/30を越えることになる。層間変形量としては10cm以上となる。

耐震性の総合評価は構造物のエネルギー吸収能力で計られることになるが、材料の塑性変形によるエネルギー吸収に期待するならば、柱、梁が損傷を受けることを覚悟しなければならない。先に述べたように、免震構造のように積層ゴムとダンパー部分にそのエネルギーを吸収させ、上部構造は無損傷にする方法、制振構造のように柱、梁でつくられる骨組には高い弾性変形能力を持たせ、地震のエネルギーを吸収させるダンパーを建物内に釣り合いよく配置するのがこれからの考え方であろう。多様化の時代であるから、今までやってきたように建物を上手に壊すことで建物を倒壊させないという最も難しい方法を使っていくことも有りえる。その他、壁式構造のように水平耐力を十分大きくして地震に耐えるという方法も使える。

6　設計法

構造物の崩壊強度に関する基本原理に「下界の定理」、「上界の定理」および「解の唯一性」の3つがある。これらの原理は構造部材が十分な塑性変形能力を有していることが前提で成り立つが、特に下界の定理で言われている「構造物のどの部分でも降伏条件を越えておらず、その応力分布が外力に釣り合っているならば、その構造物の真の崩壊強度は今の荷重より大きいか等しい」は、従来から行われてきた許容応力度設計においても、少なくとも材料安全率で考えていた値の倍率までは設計外力を割り増しても、構造物は崩壊しないことを意味している。

許容応力度設計では、構造物に作用する力と変位の関係を線形においた応力解析が行われる。この結果は部材の剛性評価に直接影響を受けるから、実際の構造物のモデル化に当たっての単純化、それに応じた部材の剛性評価、施工順序によって構造物内に残ってしまう応力等を考えると、複雑な構造物内部に、解いた通りの応力が発生しているとは考えられない。しかし、このようにして求めた応力は上で言っている一つの静的許容応力場であり、線形計算はこれを求めるための便法と考えれば、気が楽になる。

ただ、この度の地震災害で、大きな鉄骨断面がほとんど伸びもせずに破断したり、せん断補強鉄筋が少ないとはいえ鉄筋コンクリート構造の中間層が完全に潰れたのを見ると、下界の定理が成り立つ程度の塑性変形能力も持てない構造物があるのかと考えてしまう。

何度も述べてきたが、現状の設計法ではこの度のレベルの地震動に対しては、構造物の塑性変形によるエネルギー吸収に期待することになる。この方法によるならば、塑性化する部分に適度な変形能力が必要なことは言うまでもない。

7　計算工学への期待

鋼構造協会の会誌での座談会に載っていたと思うが、鷲津先生のお話で「コンピュータを用いた構造解析を実際の設計に用いるとき、部材に生じる応力、変形などの最も出力の多い段階に人間が関与して判断しているのは非効率かもしれない。将来はコンピュータからただ一言、＜この構造物は安全です＞とだけ出力される時代が来るかもしれない」と言われていた。しかし、まだこのような段階には到達していない。

構造部材の破壊問題、耐震設計を行うに当たって用いる地震外力の設定問題、地盤と建物の相互作用問題など、まだまだ未解明なことが多い。計算工学の進歩に期待することが多い。