

建築の構造設計における電子計算機の利用の功罪

建設省建築研究所 第2耐震工学室長 工博 和 泉 正 哲

1 建築の構造設計における電子計算機利用の経過

1.1 一般的経過

電子計算機の歴史が、わずか22年であり、これが、土木・建築の構造設計にはじめて利用されてから、まだ12、3年ではあるが、この間の発展は、当に驚異的である。はじめの段階では、人が、手でも計算出来るものを、色々と計算機に、かけて見て、その計算の速さと正確さに感心するという類の問題が多かったが、次の段階では、構造設計自体を計算機に適したものに變形して行なうようになった。今迄、混然としていた応力解析法は、未知数のとり方により、応力法(FORCE METHOD)と変形法(DISPLACEMENT METHOD)にはっきりと分類され、変形法を中心とするマトリックス計算が、弾性応力解析の中心となってきた。この弾性解析法は、荷重段階を、細分し、マトリックスを各荷重段階で組み立てることによって、塑性問題の解析の分野に迄、応用されている。マトリックス演算を可能にしたのは、計算機の演算速度の向上と、メモリーの容量の増大によるものであるが、マトリックスの分割、統合の容易さと、座標変換の便利さが、マトリックス計算に今日の地位を与えたということが出来る。更に計算機は、人手では、殆んど、計算困難な問題を解いて、その応用範囲をひろめた。例えば、構造物の弾塑性地震(或は風)応答や、弾塑性有限要素法(FINITE ELEMENT METHOD)がこれで、時刻を細かく分割し、或は構造体を細かく分割して、多くのマトリックスを多数解く(弾性問題では、逆マトリックスを一回だけ求めれば、後はマトリックスの乗算として解が得られる)ことが、現在、行なわれている。

1.2 我が国での状態

我が国の建築構造における電子計算機の利用の発展経過は、やや、特殊で、地震応答計算からはじまった観が最も多い(*1)。丁度計算機が利用された時期に、建物の高さ制限の31mは廃止され、我が国では未経験であった高層建物の耐震性能についての検討を加えるために、盛んに、建物の地震応答を計算した(建築学会でまとめた高層建築設計者の指針にも動的計算を行なうように示唆している)。与えられた地震波に對する地震応答計算は、現在、ほぼ行きつく處迄行きついた感じがする。地震応答計算、応力計算の何れにも必要とする剛性マトリックス([K]又は[F]')を電算機で求めることが、我が国では第2の段階であったが、建築で、これが、第1の段階でなくて済んだ理由の一つに、D法の存在をあげることが出来る(*2)。武藤博士により開発、発展されたこの略算法により、電算機に頼らずとも、[K]に相当する三対角線マトリックス[D]を計算することが出来、これより、剪断型振動系の問題が、解決出来たからである。曲げ及び剪断変形を含むと、建物の振動系への置換は最早、三対角マトリックスでは、表示出来ず、更に、立体振動となるとマトリックスを要素としたマトリックス、即ち二重マトリックスによる表現を必要とし、手計算では、行なえない。平面向題のプログラムとしては、武藤博士により3モーメント法が(

*3) 服部博士によりSTAN(POLの一つ)が(*4)開発されている。振動の方程式は

$$[m]\{\ddot{\delta}\} + [c]\{\dot{\delta}\} + [k]\{\delta\} = \{P\} \text{-----}(1)$$

の形で示され、例えは $[k]$ の要素 K_{ij} は、

$$K_{ij} = \begin{bmatrix} K_{ij}^{xx} & K_{ij}^{xy} & \dots & K_{ij}^{xz} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ & & & K_{ij}^{zz} \end{bmatrix} \text{-----}(2)$$

の形の 6×6 の大きさのマトリックスである。ここで K_{ij}^{rs} は点*i*で*s*方向に単位変形を命じたとき点*j*で*r*方向に拘束する力である。現在の處、 6×6 のマトリックス要素が使用された例は少ないが、換れの問題を検討するために 3×3 のマトリックスが実質上のマトリックス要素に採用されている例は多い。

勿論、剛性マトリックスは、建物の構造設計に結びつけられ、応力計算、断面計算、部材の選別、そして、最も経済的な設計へと、当然の事ながら発展して来た。X-Y PLOTTERを使用しての作図も、色々と行なわれている。(ただし、これはON-LINEでは非常に時間がかかるので、MTに一旦入れ、再生装置とPLOTTERを結ぶ方式に素りつつある。)

分割と変位関数採用の自由さの代は、特に普通の変位法と違ってはいない有限要素法が、この1、2年盛んに用いられ来ている。特に、従来、余り応力解析の進んでいなかった多層で非線型性質を有する地盤の考慮に多く用いはじめている。有限要素法のNON-LINEAR問題への応用は、しかし、可成り、計算時間を要するため、仮定値と計算結果値を合わせる上で、各段階のはじめの予想の良否が、相当重要な問題である(*5)。勿論、振動問題と有限要素法とは、簡単に結びつけられ、若し弾性ならば、荷重項のみを時刻により変化させればよいので、特に問題はないが、非線型応答とすると、プログラム上の問題はなくとも、計算時間上で、実施が、可成り困難である。

2 建築物の構造設計

2.1 建物の安全と経済

建物の設計を行なうのは、勿論「快適」で「能率のよい」、「安全」な生活が出来る空間を確保するためである。建物には、色々な危険が伴う。力学的な破壊、化学的な老化、虫害、火災、そして社会の老化に伴う機能の老化のため、建物は設計が出来たその時から、これらの危険に曝されるわけであり、その空間で生活する人間も、やはりこれによる危険性を受けている。勿論、これらの危険に對して、建物の抵抗力から得られる安全性は、バランスのとれたものでなければならず、例えば、力学的には極めて丈夫だが、火災に弱く、その危険度が高く、構造耐力を発揮する、チャンスを与えられぬうちに消失するような、アンバランスな建物では困るが、これは設計者の総合判断によるもので、ここでは力学的な問題、即ち、建築構造のみを対象として考えて見よう。

安全が確保されれば、建物は経済的なものに越したことはない。殊に、機能上の耐用年限が、近來の人間生活の急激な変化によって、短くなりつつある今日では猶更である。一般的に丈夫につくる程、コストも高くなる傾向にある。(但し、建築物では、仕上げ、設備等の占める割

合が大きく、構造強度と、コストの関係は、多少緩和されている。) そこで、「安全」とは、どの程度の安全を考へればよいか、次の問題であるが、将来、我々の予想した力を上回る自然的、或は人為的な力が絶対に起らないという保証がないので、100%の安全を期待することは出来ず、恒に幾分かの危険性を含んでいる。この危険性をどの程度迄認めるかは、決手がない。たゞ人命をも経済価値に置きながら、最も経済的な建物を、建物の用途環境に応じて設計することは出来る。(*6)、一つの計算方法例として、統計的に実際の外力と同じ平均値、分散を持つ外力モデルを作成し、モンテカルロ法を適用するものがある。又、他の危険性とのバランス(例えば、現在、統計上人命の損傷の最も多いのは、交通事故であり、各人の曝されている危険度は、殆んどこれによって定まってきた)から、建築の安全性を数値的に定めることも可能である。たゞ、交通災害の場合は、多分に人為的であり、従って、人為的に解決の方法がないわけでない。建築災害では、予知による避難等、人命を救い得る点か、或る程度の大きさの危険性の存在を認める一つの根拠となっている。而し、現在の建築構造設計は、多分に過去の経験に依存している。勿論、災害経験、実験、解析を組合せて得られて来たものであるが、他の構造工学同様、解析を容易とするために、荷重外力と構造耐力の両者に分けて考へている。

2.2 荷重、外力と応力解析

建物にとって固定荷重(自重)を除いては、建物の耐用年限中、全く同一の荷重状態となることは、一度とはない。即ち、荷重自体は、恒に変位している。従って、建物が災害を受けた場合、その荷重状態を再現することは、難しい。勿論、嚴重な意味で、構造自体も、実験や解析に用いるモデルと、実際のものとの対応をとることは、難しいが、それでも、実大モデルによる実験や、小型モデル実験等を繰返ししながら、その対応を求め、数式に表現して行くことは、不可能ではない。当然の結果として、応力解析の分野での進歩は、荷重外力に関する研究よりも、精度的に進んでいる。

建物設計用としての荷重、外力には、更にもう一つの条件「単純性」が加わる。現在迄、一応手計算を中心に、規準或は基準が作成されていたために(規準はRECOMMENDATION, 基準はSTANDARD)、複雑な荷重状態を仮定することは、不可能であり、又、荷重の変動性や、不確実性を考へれば、なをのこと、単純なものがよいわけである。例えば積載荷重は、決して、一様分布などという状態はあり得ないが、一様分布として取扱っている。又、値自体も、各国の規準を見た場合(許容応力度、施工精度等が一定でない)ので、そのまゝ安全性の検討と結びつけられないが)驚く程、同じような値を採用している。氣象荷重、即ち雪、風、地震力等は、勿論、各国により、又各地により条件も違うので、値は、まちまちであるが、特に地震荷重は、短周期での建物での荷重値は、我が国での値が、ずば抜けて大きい。

3 構造設計と電子計算機

3.1 構造設計に電算機を使用する場合の問題点

電子計算機が与えられた仕事を迅速に且つ正確に行なうために、現在、二つの方向で使用されている。一つは、我々が行なう単なる日常計算や作図の代行であり、他の一つは、我々のコ

ンサルタントとしての使い方である。一については、特に問題はない。即ち、我々が、建物の形状、部材の性質、荷重条件、及び色々の規準、基準をデータとして与えて、計算機から回答を求めることで、計算機は単なる計算のための道具として、我々のコントロールにある。この場合、人間側は、計算機に入れたかったデータ、即ちエンジニアとしての経験をINPUT DATAとして与えるとき、或は OUTPUTとして受けるときに、充分發揮すればよい。

第二の用法は、今後非常に発展していくものであろう。計算機とのCONVERSATIONにより、我々は計算機から色々を教わることが出来る。仮定断面の可否、応力状態、最も経済的な設計法等、その例である。しかし、ここで、一度、前述の問題、「荷重、外力」と「構造耐力」の問題をもう一度、ふり返って見よう。「荷重、外力」は、いくつかのものを除いては、非常につかみにくく、経験に大きく頼っている。日本で容易に建物の高さ制限の廃止に思ひ至らなかったのも、地震国と高層建物に対する経験に乏しかったからである。しかし、日本ほど、地震活動の活発な国も稀でありながら、地震に対するデータは、果たに少ない。従って設計荷重も、試行的な性格を帯び、0.1の震度で設計したものが、関東大震災で殆んど無事であったので、(許容応力度等の関係で、現在は、この値が0.2に相当し、0.2が採用されている)一応この点を基準の基本値としている。このような値は、建物や、地盤、地震条件が異なれば、そのまま採用するわけに行かず、この点、エンジニアとしての判断が要求される点であるが、この点が、しばしば忘れられ、或は、建物を出来るだけ安く建てねばならぬ立場に至って、無視される。1968年6月の十勝沖地震でも、従来の壁の多いRC造に、殆んどケレシも入らなかった建物が多かったのに対し、同じ震度で設計した柱間隔の大きい壁の少ない建物での被害が目立っている。

ところで、電算機にコンサルタントを頼んだ場合は、現在の段階では、経験豊かなエンジニアに相談したと云うよりは、「計算機」に相談している感じがしないでもない。近い将来、これは改善されて行くとは思いますが、例えは、現在、「最も経済的」な設計を計算機に相談すれば、結局、基準の旨意のあら探しの仕事をこなす可能性がある。基準は、このような使われ方を予想して作られたものではない。最も、電算機に問題があるわけでは、決してなく、たゞ、電算機に、不十分な資料で、このような仕事をさせる例に問題がある。更に、一番の根本は、荷重、外力に関する資料の乏しさに問題が立ち戻って行く。風、地震力等については、今後、相当の研究を進めないと、電算機をコンサルタントとして使う迄に到りそうもない。例えは、地震では、先づ、第一に力を対象としてよいかの問題がある。むしろ力と変位の両者の考慮されたもの(エネルギー)を尺度にあべきではないだろうか。次に、地盤と建物との間のエネルギーの伝達である。この間に、塑性を有する土が入った場合、存在地震力と入力地震力とは、全く違ったものとなろう。地震エネルギーを全エネルギーとして、構造は内にとり入れようFLEXIBLEな建物と、すぐ地盤へ逃がしてしまう剛な建物との違い、そして、現在の応答計算式の再検討、等々、地震荷重についての基準は、根本的に再検討されねばならぬ立場に来ている。

4 結び

建築構造への電算機の利用は、目も追って盛んになって居り、我々の仕事の多くは、次第に計算機に任せて行くことになる。今後、特に、入出力の改善、POLの簡便化、一層使い易いものになり、TIME SHARE 方式によって、誰でも、計算機に直接話しかけ、使用する時代が来ると考えられる。このとき、中央のCONSOLEに、エンジニアとしての判断が持てるだけの充分の資料を揃えることが、目下の急務であり、現在は、電算機を、「計算機」としての範囲で使用し、これにより、我々に生じた時間を、この急務の解決に当てて行くのがよいのではないかと考えている。

(参考文献) *1) 和泉 建築技術者のための 電子計算機の応用 (オーム社)

*2) 武藤 耐震設計 シリーズ (1-5) (丸善)

*3) 武藤 全上

*4) 服部 STAN (構造計画研究所)

*5) 松下 土の応力状態および復元力特性を求めるための有限要素法の適用 (建築学会) 1968・10

*6) 高橋 モンテ・カルロ法による再現期間と設計荷重に関する研究 (気象研) 1967