

設計のための技術

解析技術の発達

手計算から

スーパーコンピューティング

和田 章 東京工業大学教授(建築物理研究センター長)

田村哲郎 東京工業大学教授

数百トンから数万トンの資材を使って人間のスケールの何十倍、何百倍の建築構造物は作られる。これらの構造設計は、場合によっては一人、多くても数人のチームで行われるが、責任の重さから考えて、数式に数値を入れていくだけで進められるほどたやすいものではない。このとき、先人から設計の考え方、取り組みを聞き、設計哲学をもつことが重要である。坪井善勝先生は1976年度日本建築学会大賞を受けられたときの記念講演で、深海調査艇の設計のお話をされ、設計者本人がその潜水艇に乗り込んで海底に行き、外から大きな水圧を受ける気持ちにならなければ、鋼板の厚みは決められないと言っておられた。我が国に免震構造を広めた多田英之先生は、設計は順々に答えを出して繋いでいくようなものではない、多くの解決しなければならぬ問題を目の前に混沌とした状態があり、この中からあるとき一本の筋が見えて、一度に解けていくようなものだと言っている。

耐震設計、耐風設計の場面では出来る限り真の挙動を見極め、より良い設計をまとめるために多くの計算、解析が行われる。電子計算機が現在のように普及されるまでは、鉛直荷重時について固定モーメント法、水平荷重時について武藤式略算法が使われることが多かった。最近ではマトリックス変位法により立体解析を行うことも珍しくなくなった。地震時の応答解析に電子計算機が用いられるようになったことも大きな進歩といえるが、初期に使われていた等価せん断形モデル

から、最近では一本一本の部材に注目し時間刻みごとに部材の弾塑性判断を繰り返す解析も行われる。

これらの進歩は、「対象物を出来る限り細かく基本要素に分解し、その性質を明らかにしたうえで、電子計算機の力を利用して全体を再度組み立てることによって、対象物の挙動を把握できる」という大方針のもとに進められてきた。ここで、先に述べた設計者の哲学をはぐくむ要素が抜けてしまったように感じる。このままでは混沌とした状態から一本の筋は見えてこない。例えば武藤式略算法では建築構造物全体に作用させようとする水平力が設計者の手元にあり、これを各柱、各耐震壁にどのように分担させるか、その分担率は柱・梁の剛性によってどのように変化するかなど、すべてが手の内にあった。現在の方法は計算途中の数値の変化が見えず、計算の中から感覚を養うのが難しくなっている。20世紀には多くの進歩があった。この中で忘れられてきたものに目を向けて次の発展を考えなければならない。一方、この時代で最も進み、次の時代にさらなる発展が期待されている分野が流体計算である。従来の方法では手がつけられなかった分野であり、設計哲学はこれから生まれるといってもよい。

高層建築物あるいは大空間構造物の耐風性能を評価する際、従来風洞実験が行われていたが、20世紀の終わりのここ10数年ぐらい流体計算技術(CFD; Computational Fluid Dynamics)が頻繁に使われるようになってきた。ただし、まだ研究段階のものがほとんどで、必ずしも実用段階ではない。

CFDとは、流れの支配方程式をコンピューターを用いて近似的に解を求める技術のことで、構造物に作用する風の力あるいはそれによる構造物の振動応答挙動を予測することのほか、物理機構の理解に利用できる。空気力を評価するためには風を粘性流体として扱わなければならない、ポテンシャル理論などは使えないので近似計算が必要となる。その近似法の特徴として

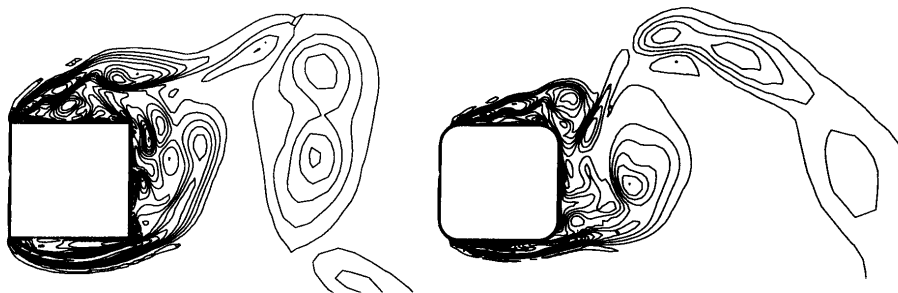


図1 隅角部形状の変化による角柱の空気力制御*1: (左)角が尖った場合、(右)角が丸い場合

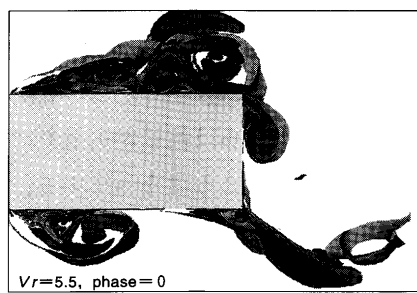


図2 振動時の渦の発生とその励振機構*2

は、流れの非線形現象を時々刻々追いつながら計算するため、計算負荷は膨大で、通常スーパーコンピュータが用いられる。

一方、耐風工学といった分野を考えると、これまで振動解析的な面からの考察がなされていても流体力学的な面からの取扱いは必ずしも十分ではなかった。風に含まれる乱れの効果が本質的な現象となるので流体力学を用いた解析的な評価が絶望的で、入力部分をスペクトルで実験的

あるいは経験的に表し、その後の建造物の振動応答を捉えるというのが耐風工学の研究的な根幹をなしていた。つまり風といった流れを対象としながら流体现象そのものに立ち入ることはあまりなかったといえる。それがCFD技術の登場によって一変することになる。

流体の基礎方程式を取り扱うことになるので、流体力学を物理的な観点からきちんと展開することが必要となる。あまりなじみのない数理的学問への取り組みは、これまで風洞実験技術を中心に考えていた耐風工学者を大いに躊躇させた。しかし入力部分を物理法則に基づき決定するので各種条件によって制限されることが少なく、また数値モデルとして近似的に予測するので精度に対する数学的な配慮が慎重になされればその汎用性はきわめて高い。実験とは異なり、複雑な形状であってもその数値モデルの作成は容易であったので、コンピュータの仮想的な世界で生み出される空力データは相当魅力的であったようである。

ただし当初は、一様流中における空力特性が検討され、流体力学的な議論が先行し、先に述べたように乱流が本質である耐風工学の分野では直ちに広く取り入れられたわけではなかった。設計のための荷重を予測するなどの実用面での活用は限られ、もう一步の技術的な発展が要望されていた。それでも耐風工学における風外力の物理的な意味合いを明らかにさせたということについては、その貢献はかなり大きい^{*1*}^{*2}。CFDによれば時々刻々変化する渦の動きを可視化することができるので、その挙動を分析すれば、空気力を低減するにはどの

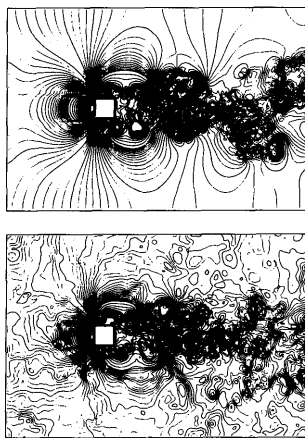


図3 三次元角柱まわりの瞬間圧力場^{*3}
：(上)一様流中、(下)乱流境界層中

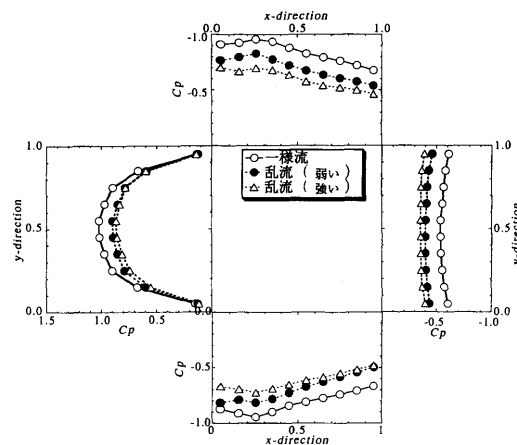


図4 風圧力係数分布^{*3}

ようにすればよいか、風の振動がどうして不安定に増幅されるかなどが推定できることになる(→図1・2)。

21世紀を迎えるにあたって、CFDの実用性への見通しに関してさらなる発展の兆候が現れている。スーパーコンピュータのベクトル型からパラレル型への移行期におけるこれまでの使い勝手の悪さがソフトウェアの進歩によって改善され、また並列向きの計算アルゴリズムが提案されたことから、計算性能が著しく向上してきた。その結果、風に含まれる乱れの効果を解析に取り込むことにより成功し始めており、耐風工学でのCFDの役割が飛躍的に向上しつつある。建造物の空力特性に与える乱れの影響は、剥離せん断層が刺激を受けて乱流化しその連行効果からせん断層が建造物に近づき空気力が大きく変化することにある。図3・4に最新の解析結果^{*3}を示すが、乱れの影響によって建造物から剥がれたせん断層の挙動が変化し、風荷重が異なってくるのが捉えられている。こういった予測が可能となると建築物に作用する風荷重の定量的評価が実現することになり、CFDの実用化も随分と近い将来になってきたものと大いに期待される。

◎—参考文献—◎

- ★1—T.Tamura, T.Miyagi, T.Kitagishi: "Numerical Prediction of Unsteady Pressures on a Square Cylinder with Various Corner Shapes", *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vols.74-76, 531-542, 1998
- ★2—T.Tamura, Y.Itoh: "Wake structures around a rectangular cylinder in unstable oscillations", *Physics of Fluids*, Vol.8, No.9, s9, 1996
- ★3—野津剛・田村哲郎:「都市域での乱流境界層における3次元角柱まわりの流れ—一様流中と乱流境界層中での比較」、『1999年度日本建築学会大会(中国)学術講演梗概集 B-1』、1999、pp.267-268



わだあきら 1946年岡山県生まれ／東京工業大学卒業／同大学院理工学研究科修士課程修了／建築構造／工学博士／共著に「建造物の理論 一次元部材論」「建築物の損傷制御設計」ほか／1995年学会賞(論文)受賞

たむらでつろう 1954年東京都生まれ／東京工業大学建築学科卒業／同大学院理工学研究科博士課程修了／建築構造／工学博士