

## 【委員会報告】

## 建設技術の研究開発と計算力学の役割

ROLE OF COMPUTATIONAL MECHANICS ON RESEARCH  
AND DEVELOPMENT IN CONSTRUCTION ENGINEERING

構造工学委員会非線形解析小委員会

*Subcommittee on Nonlinear Analysis, Committee on Structural Engineering*

## 1. はじめに

先端技術を海外に倣うことが難しくなり、創造的技術開発の位置付けが見直されるようになって久しいが、これは建設業界においても例外ではない。建設産業に関連する技術の研究開発を担う役割の重心が漸次民間に転移して、技術の水準が成績に反映し、妥当な競争の中で技術が進歩発展する、正当な状況が出現しつつある。

技術開発を取り巻く環境の中で、コンピュータが果たしている役割は大きく広汎である。設計過程における数値シミュレーションの積極的利用、複雑な数値解析を伴う施工管理システムに基づいた新技術の具体化など、激変するコンピュータ環境を最大限に利用して、新しい技術の研究開発が活発に行われている。

構造工学委員会の中に設置された非線形解析小委員会では、設計・施工・管理およびそれらを支える研究開発業務などの実務における、非線形解析あるいは数値解析全般の果たすべき役割ならびに重点的に取り組むべき課題などについて、アンケート調査を含む種々の検討を行い、それらの成果をこれまで土木学会論文集に委員会報告として発表してきた<sup>1)~4)</sup>。

本報告では、これらの活動経過を基礎に、土・コンクリート・鋼などにより構築される土木構造物を対象として、コンピュータを利用した数値解析に基づいて現象を解明しようとする学問分野である計算力学の、実務への適用について具体的事例を下に現状を把握する。さらに入出力機器および手法ならびにネットワーク環境の著しい進展を背景とする、建設技術研究開発の発展の可能性と、21世紀に向けての土木界共通の道具としての計算力学を有効に展開すべき方向とを探ることを目指して、建設技術の研究開発に果たす計算力学の役割と課題とを考察した結果を報告するものである。

初めに、固体力学を中心として、現在日常業務において最も頻繁に用いられている線形問題を対象とする各種の解析コードならびに数値解法、要素分割などを自動的に制御し所要の精度の解を得ようとする順応型解析、時間依存問題を扱う際の種々の方法と課題、今後重要性を

一層増すことになるであろう各種の非線形解析、ならびに計算力学がその前提とする計算機環境など、計算力学に関わる理論および環境そのものの現状を概観する。次いで、そのような現状の計算力学が建設分野の技術開発の各場面において具体的にどのように応用されているのか、いわゆる計算機支援工学(CAE)の事例を示す。取り上げる事例は、施工の各段階でクリープ解析などを必要とするPC斜張橋の設計施工管理、材料非線形性の取扱い方が結果に重要な影響を及ぼす地盤の安定化処理の問題、形状制御に計算力学が有効である鋼長大橋の設計施工管理などであり、これらの事例を通じて計算力学の有効性を実証する。

一般に、計算力学により得られる解は近似解であり、使用する解析コードの適用限界、使用方法を正確に理解し、その精度を何らかの形で検証しなければ、有効な解析結果を得ることができないばかりでなく、危険な誤った結論を導き出すことにもなりかねない。このような観点から、解の信頼性とモデル化の関係について考察する。計算はあてにならない、やはり実験を行わなければ安心できないという考え方がある反面、スーパーコンピュータを駆使した計算を行っているのだから問題はないとする場合もある。実際には、技術開発の時間を短縮し、同時に経費を節減するためには、実験と計算とは車の両輪となって、相互に補完しあうことが必要であり、解の信頼性とモデル化の関係の考察の一つの結論として、実験と計算力学との関係を述べる。

さらに、比較的定常的な業務に効果的な汎用解析コードも、技術開発の場面においては機動性に乏しい場合も少なくなく、解析コードを自主開発する必要性に迫られる場合がある。自主開発の最大の意義を、技術力、技術開発力の養成と確保のためとして、自主開発が不可欠であることを指摘する向きもあり、開発経費などを考慮した総合的な観点から、自主開発の意義を考察する。

一方、例えば自動車衝撃解析専用の解析コードであるPAM-CRASHにしても、スーパーコンピュータと解析コードを導入すれば即有効に利用できるようになるわけではなく、利用目的である、実験の相当部分を計算に

より代替することができるまでに利用方法に習熟するには、専門チームによる数年を単位とした長期的な研修・検討期間が必要である。また、計算力学理論の高度化の課題を別にすると、扱う問題の規模の巨大化とともに、開発作業時間の圧倒的部分を占めるようになったいわゆるプリ・ポストプロセッシングに、どのような機能を要求し、費用との対応でどのような機種・ソフトを導入すべきかといったことは、技術開発にとって決定的な影響を及ぼすことにもなりかねない判断事項である。

このような建設技術・研究開発場面での計算力学・計算機関連教育として、大学および企業内教育は如何にあるべきかを、理論、計算機利用のソフト面、計算機環境整備を行う管理者としての視野の養成、といった種々の側面から提言する。

## 2. 計算力学の現状

現在、コンピュータは工学における幅広い分野で日常の道具として用いられていることは周知の事実であり、その総合的環境に対してCAE (Computer Aided Engineering) という名称が付けられている。これは製品開発から設計・製図、製作に至る一連の技術者の活動に対して理想的なコンピュータ利用環境を提供しようとするものであり、技術者の生産性向上のために工学に関わる企業において着目されている。この考え方の中核を成すものは計算力学であり、また一方で、現状で理想的なCAEシステムの構築を時期尚早としているものもまた計算力学である。ここでは力学的理論、数値解析法、コンピュータ科学の観点から計算固体力学の現状を要約する。

### (1) 線形問題

あらゆる力学的現象は非線形であるが、その挙動に対して線形性の仮定を導入できる場合もある。一般に日常製作される構造物や機器においては、この線形性の仮定の成り立つ範囲で設計されるものが多い。このような場合、計算固体力学に関わる問題は一般に線形代数方程式に帰着する。連立一次方程式の解法は直接法と反復法に大別されることは良く知られているが、ウェーブフロント法やスカイライン法と呼ばれる大次元の疎行列に対する効率よい直接解法の開発や、計算回数を縮小するための方程式の番号付け替えのための各種アルゴリズムの開発により、現在では直接法が広く用いられている。しかし数十万元以上の超大型の方程式に対して、過去にコンピュータの能力から数千元の方程式を解くために用いられてきた反復法が再評価されつつあり、反復に先立って行列の条件を改良するための前処理 (pre-conditioned) アルゴリズムの開発が話題として続いている。

### (2) 順応型解析

一方、実際の工学の分野で取り扱う問題は複雑な幾何

形状を持っている場合が多く、その形状の認識、解析モデルの自動作成及びコンピュータグラフィックスを利用した解析結果の表現に対する研究やプログラム化も積極的に行われている。しかし計算固体力学の観点から現在最も重要なことは、力学的な意味での解析結果の精度の保証であろう。一般に計算固体力学の分野で用いている手法は近似解法であり、当然のことながら解析結果の精度は解析モデルに依存する。一般に採用されている数値解析法では解の収束、即ち解析モデルをより一層細かくして行けば真の解に近づいていくことを保証しているだけである。従って解析モデルを作成するためには、その問題に対する技術者の経験や力学的センスが重要となり、今日のように多くの技術者が計算固体力学に基づくコンピュータ解析を行っている現状では、線形問題であっても精度が十分でない解析結果が日常の設計で用いられている可能性も大いに有り得る。このような弊害を取り除き、健全な解析手法を技術者に提供するための方法として、順応型数値解析法 (adaptive numerical method) の研究が進められている。これは解析モデルに含まれる近似誤差を予測し、その予測に基づいて解析モデルを再構築し、十分な精度が得られるまで自動的に解析を繰り返す方法であり、解析モデルに対する近似解だけを用いて、真の解との差をいかに的確に予測するかがキーポイントである。

### (3) 時間依存問題

一般に力学現象は時間依存であり、定常状態や静的状態と仮定できる現象については空間モデルだけが考察される。時間を含む現象の解明に対しては、線形問題では固有値問題として取り扱い、一般の非線形問題に対しては空間の離散化によって得られる時間に関する常微分方程式を取り扱うことが多い。時間積分法の数値スキームの開発に関しては従来より多くの研究が続けられているが、計算効率を高めるためのアルゴリズムとして作用素分割法 (operator splitting method) や陰解法と陽解法とを組み合わせた方法が最近の話題である。作用素分割法は連立方程式の解法を含まない陽解法のアルゴリズムを用いて、陰解法の無条件安定性を得ようとするものである。一般に陽解法では、そのアルゴリズムに連立一次方程式の求解過程を含まないが、時間刻みに対して条件付き安定となり、陰解法アルゴリズムを用いた場合と比較すると非常に多くの時間ステップを必要とする。しかし衝撃問題のような非常に高速な力学現象に対しては、陰解法を採用したとしても空間モデルに対応した適切な時間増分を必要とし、陽解法と比較すると計算効率が悪いのが普通である。しかし実際に解明したい問題では、複雑な現象が組み合わさっており、その複雑な力学現象に対応して最も効率よい時間アルゴリズムを採用することが理想である。そのようなアルゴリズムを構築するた

めの第一歩として、種々の陰解法スキームと陽解法スキームとを任意に組み合わせた数値解法や時間増分に対する順応型アルゴリズム及びそのプログラム化に関する研究が進められている。

#### (4) 非線形問題

現在計算固体力学に関わる研究者が最も多く携わっている問題は、非線形現象の解明であろう。非線形問題に対する力学的基礎事項としては、次にあげるような課題等に関する研究が積極的に続けられている。i) 従来広く用いられてきた Jaumann 応力速度が大きくなるとせん断変形を伴う問題に対して物理的に妥当でない結果を生じることより大ひずみ領域に対する変形と応力の定義とその数値アルゴリズムの構築、ii) シェル等の曲げを含む問題での有限回転を多様体上の指数射像として取り扱うことにより高精度の解析を行う試み、iii) 弾塑性構成方程式の有限増分に対する評価、iv) 混合型変分形式の採用による高精度の有限要素の開発。

非線形問題に対する数値計算法としては、古くから Newton 法が用いられており、現在でもこの単純明快な反復法が最も広く用いられている。この方法は局所的収束が保証されているだけで、構造力学における座屈現象のように不安定領域を含む場合には問題が生じる。このような問題に対しても Newton 反復法を安全に適用するための工夫として弧長増分法 (arc length method) が提案されている。この方法は個々の反復過程において既知ベクトルの量をコントロールすることを基本としている。また、Newton 法では個々の反復において連立一次方程式の求解過程を含むが、これを行列の乗算で置き換える BFGS 法のような準 Newton 法 (quasi Newton method) に対する研究も進められている。この方法を極言すれば、Newton 法は接線を基本とするのに対して、割線を用いて反復を繰り返すものである。この方法は非線形性の強くない問題に対して効率良く働く場合が多いが、汎用性を持つアルゴリズムの構築のためには更に研究が必要である。

#### (5) コンピュータ環境

現在のハードウェアの環境は非常に多様性に飛んでおり、スーパーコンピュータ、ミニスーパーコンピュータ、パーソナルスーパーコンピュータ、EWS、パーソナルコンピュータ等様々な機種が開発されているが、現在のスーパーコンピュータの能力は、計算固体力学における大規模の問題に対しては十分であるとは言えないのが現状である。また数年前と比較すると技術者に与えられているコンピュータ環境は格段に改良されている事も事実である。現在総合的なコンピュータ環境の中で計算固体力学に関わるコンピュータ利用をどのようにしたらよいかという研究が着手されているが、非常にダイナミックな状態のもとで、唯一の理想的利用形態を提案すること

は不可能に近い。現在計算固体力学の分野でハードウェア・アーキテクチャに最も関連した話題は、ベクトル処理や並列処理の機能を持つスーパーコンピュータの能力を十分に生かすようなアルゴリズムを構築するために、力学的問題の定式化から計算に至る過程を見直す試みである。(武田 洋)

### 3. 建設技術開発における CAE の事例

#### (1) PC 斜張橋の設計と施工管理

PC 斜張橋とはプレストレスコンクリート (PC) 製の主桁を有する斜張橋のことで、主塔は鉄筋コンクリート (RC) か PC、斜材は、鋼ケーブルか PC から成っている。本格的な PC 斜張橋が建設されるようになったのは、1960 年頃からで、初期のものはすべて少数斜材ケーブルタイプであったが、1970 年代から、マルチケーブルタイプが出てきて長大化が図られてきた (写真-1, 2)。PC 斜張橋の開発に当たっては、コンピュータを用いた解析技術の開発が行われ、各検討項目に対する設計法が確立されてきた。長大 PC 斜張橋の場合、通常、カンチレバー架設工法で施工されるため、各施工段階で構造系が変化することになり、施工中の応力検討やたわみ形状管理を十分に行うことも必要となる。最近の PC 斜張橋の設計・施工でよく用いられるコンピュータ利用技術について以下に例示する。

斜張橋の場合、景観シミュレーションが行われることが多く、コンピュータ・グラフィクスがよく用いられる。橋面上を自動車で行った場合、橋梁及びまわりの景色がどのように見えるかをコンピュータ・グラフィクスで動画として作成し、景観検討に役立てる場合もある。

PC 斜張橋特有の主な解析として、全体系クリープ解析がある。長大 PC 斜張橋の場合、一般に不静的構造物で施工中の構造系と完成後の構造系に変化があり、また、クリープを起こすコンクリート部材とクリープを起こさない鋼部材 (斜材) から成っているため、全体系で、クリープによる不静定力や変位を逐次計算で求める解析 (全体系クリープ解析) が、PC 斜張橋の設計では不可欠である。クリープ解析結果の一例を図-1 に示す。

長大 PC 斜張橋の場合には、通常、耐震性、耐風性の検討のために動的解析が行われる。特に、最近の耐震設計では、中小規模の地震に対しては、弾性地震応答解析を行い、稀にしか起こらない大地震に対しては、剛性低下の影響が大きいため、弾塑性地震応答解析を行う場合がある<sup>5)</sup>。図-2 に示すモデルに対して全く同じ地震波を入力した場合のそれぞれの応答解析結果の例を比較して図-3 に示す。

カンチレバー架設される長大 PC 斜張橋の施工時応力度の検討では、各施工段階 (各施工時構造系) において、すべての荷重作用に対して、すべての設計断面で生



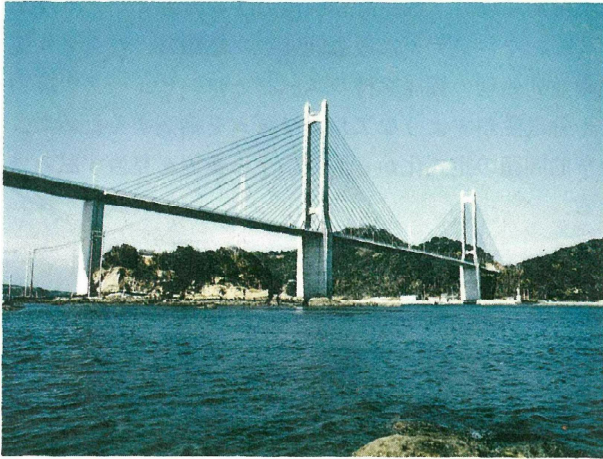


写真-1 呼子大橋



写真-2 青森ベイブリッジ (施工中)

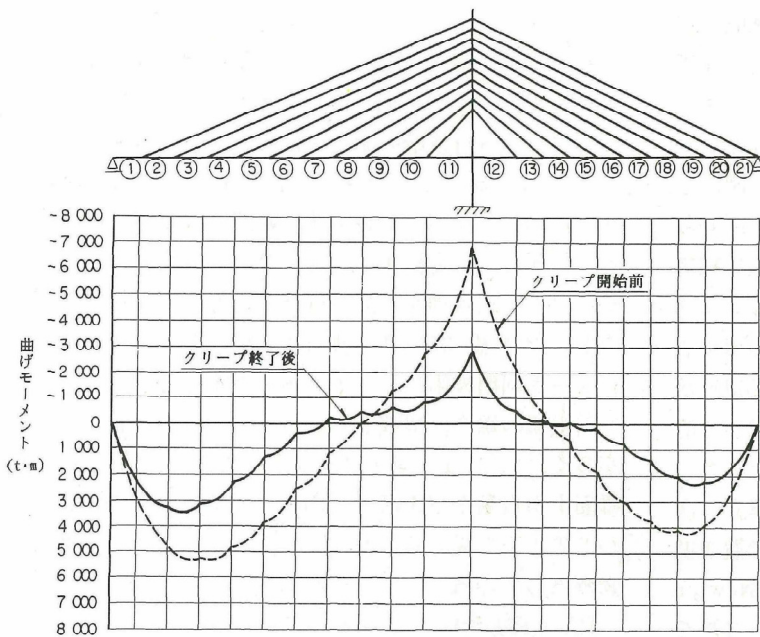


図-1 死荷重による主桁曲げモーメント (クリープ開始前と終了後)

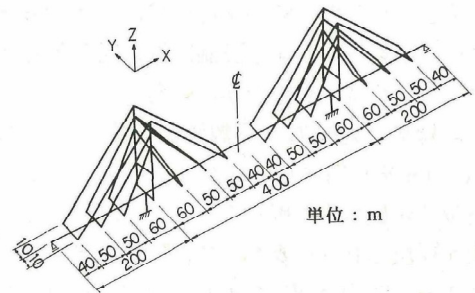


図-2 動的解析モデル

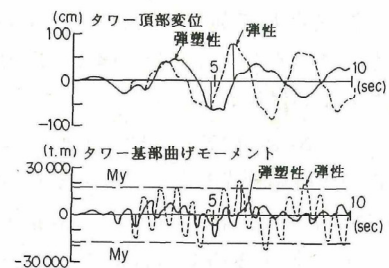


図-3 弾性応答および弾塑性解析による応答波形

じる応力度がすべて許容応力度を満足するように施工時斜材調整力が決定される。また、長大PC斜張橋の施工にあたっては、ある程度、たわみ形状や斜材張力が設計値から変動することは避けられないので、この変動量を的確に把握し、必要に応じて、斜材張力の調整を行い、たわみ形状・斜材張力・主桁応力度を改善することが重要となる。通常、大型コンピュータとマイクロコンピュータを駆使して、データ処理・解析が行われ、施工時の精度管理が行われる。(中山 等)

## (2) 地盤工学におけるコンピュータ利用

土質力学や岩盤力学に関連した地盤工学分野での設計に関わるコンピュータ利用は、構造工学分野での成果をいち早く取り入れ、現在では数値解析のみならず情報化施工など多種多様な領域に浸透している。

複雑な境界条件や強度の非線形性のため、それまで解

析困難であった地盤工学上の多くの問題が、計算力学の応用によって、取り扱われるようになってきた。現在、地盤工学に用いられる計算力学の体系は多岐にわたるが、その多くは有限要素法や境界要素法など、連続体の概念に立脚した手法といえよう。この点については、巨視的にみれば、連続体としてモデル化できる場合が多いのは事実であるが、土粒子構造や岩盤節理などの不連続性が問題となる場合もあること、すなわち、本来連続でない地盤を対象としているため無理が生じる場合もあることを認識しておく必要がある。

また、土に関わる構造の自然災害や、予想し得ない施工に伴う変状など、現状の技術では及ばない領域も存在しているのも現状である。このように、現在の地盤工学に関わるコンピュータ利用は一つの側面にすぎず、現実の地盤構造の挙動を的確に表現し得る技術に昇華してい



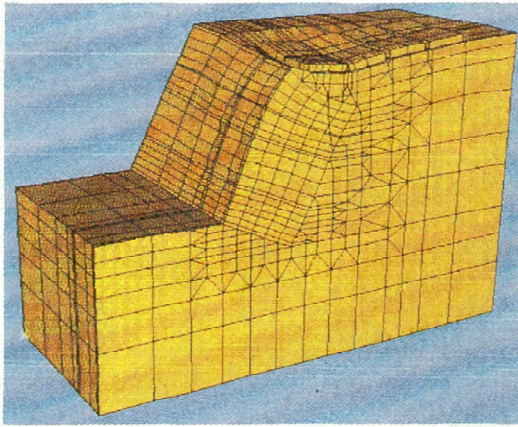


図-4 3次元非線形 FEM 解析による切土の変形

かなければならない。

ところで、地盤工学に関わる解析技術においては、地盤の物性値評価に必要なサンプリングと要素試験、土固有のダイレイタンス特性など複雑な挙動の表現、地盤の広がりに関する無限性の表現など、それぞれ非常に解決が困難な問題を抱えている。また、その施工管理においては、直接目視できることは少なく、離散的に配置された変位計や土圧計など、かなり限定された情報に頼らざるを得ない。そのため、過去の経験を含め工学的な判断を盛り込まざるを得ない面も存在している。

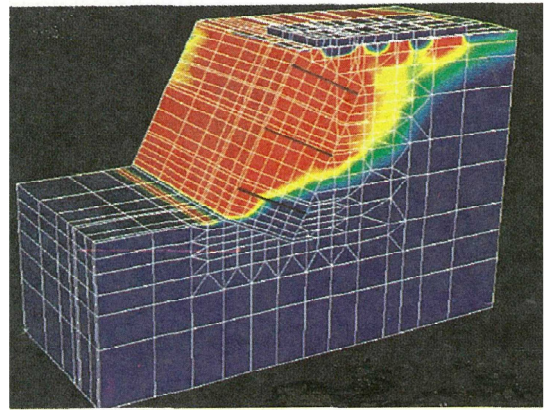
このような状況下において、地盤工学において現在試みられつつある先進的なコンピュータ利用技術の一端として、高度な計算力学の結果、および、人工知能を施工に結びつけた例を紹介する。

a) 鉄筋補強切土のり面：数値シミュレーションによる施工時挙動の予測<sup>6)</sup>

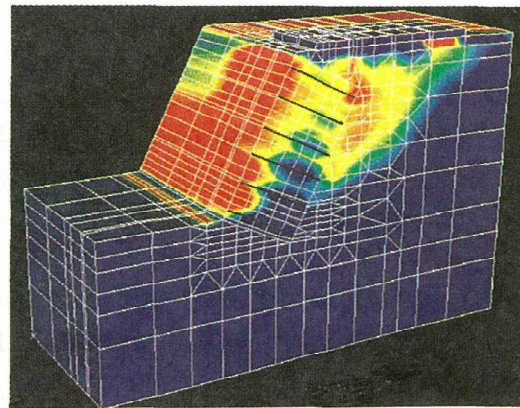
切土のり面の安定対策工法として、多数の鉄筋をのり面に挿入してその安定化を図る工法（鉄筋補強土工法）がある。この工法の施工に当っては、掘削に伴う地盤の変形挙動や鉄筋に発生する軸力など、解析による予測と施工中の計測によるフィードバックが重要である。ここでは、挿入する鉄筋のピッチをパラメータとした解析の結果を示す。解析方法は3次元の非線形 FEM である。図-4は無補強の切土のり天端に鉛直荷重を載荷したときの地盤の変形状態である。のり肩の沈下とりのり表面のはらみだしが表現されている。図-5は鉄筋の挿入ピッチをパラメータとした解析での、地盤のすべりに関する安全率の変化を示したものである。図から、挿入ピッチを半分にした場合、赤色で示されている破壊領域はのり表面付近にしか存在せず、全体的なのり面のすべり破壊は防止できると推定される。このような、解析結果をもとに、最適な鉄筋の挿入ピッチが決定される。

b) トンネル切羽評価と支保選定：エキスパートシステムの導入<sup>7)</sup>

山岳トンネルの支保規模に関して、従来の専門技術者



(a) 鉄筋挿入 1.5 m ピッチ



(b) 鉄筋挿入 0.7 m ピッチ

図-5 鉄筋補強土工法の効果

の経験や知識をコンピュータへ組み込み、その支保規模を決定する方法がある。この方法は、支保規模決定に関する技術者の経験や知識と現場の状況をコンピュータに取り込み、支保規模の定量的な判断をコンピュータで解決させようとするものであり、いわゆるエキスパートシステムと称するものである。このシステムはトンネル切羽の情報抽出部と評価推論部とから構成されている。切羽の情報抽出部では、正確な情報の把握と処理の効率化のため、スチールビデオと各種のフィルターを用い亀裂や湧水状況の視覚的な把握とそのデジタル化が行われる（図-6）。切羽の評価推論部では、各種の岩盤分類に関するデータベースを基に切羽状況を評価し、今後の適切な支保規模の決定に反映される。このほか、内空変位など掘進に伴う現場計測結果や弾塑性 FEM による解析結果から、総合的な評価が行われ、最終的な支保規模の決定がなされる。このシステムを用いることによって、切羽観測記録が自動化され、トンネルの本質である支保を合理的かつ迅速に決定することができる。

（徳永正博・松田隆）

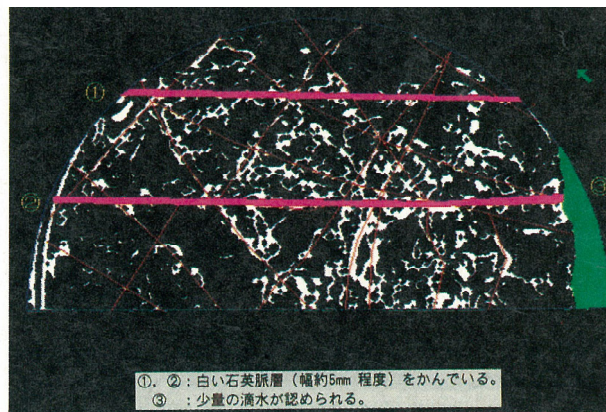
(3) 鋼長大橋の設計支援・施工管理システム

吊橋では明石海峡大橋（写真-3参照）、斜張橋では多々羅大橋と、世界最大規模の橋梁が既に着工され、我





(a) 切羽実写



(b) 解析図化

図-6 トンネル切羽の観察・分析

が国における鋼橋の長大化の歴史は飛躍的な発展を遂げている。ここでは、このような状況の下、鋼長大橋の製作設計、施工管理における計算力学の適用の現状について述べる。

長大斜張橋の製作設計業務では、設計計算には微小変位理論による解析法の適用が現在も一般的であり、最適化手法なども用いてプレストレスや断面剛性が決定される。その後、必要に応じて有限変位理論によるものが適用され、非線形性の確認、特に架設系における安全性の照査などが行われている。微小変位解析には、当初は斜張橋独特の解式が用いられていたが、変形法によるマトリックス骨組構造解析法が確立されるにしたがって、任意構造物を対象に一般化された解式を組み込んで開発された解析プログラムが使用されるようになってきている。

有限変位解析プログラムには同様に一般化された解式が現在では組み込まれているが、斜張橋特有の設計条件を満足させるために、いわゆる形状決定の手法が導入されている。また、ケーブルのサグの影響などの特有の非線形問題を検討するような場合のために、特殊な解式が組み込まれたものも開発されている。この形状決定は、所定のプレストレスを含む完成時張力を有した状態で所定の完成形状となるように、各ケーブルの製作長に対応する無応力長、および、主桁、主塔の製作キャンバーに対応する無応力形状、を算定するものである。すなわち、これは工場製作された各種部材を架設現場で実際に組み立てる作業をコンピュータ上で行うことに相当しており、製作・架設誤差解析などにも適用できるものである。

吊橋については、微小変位理論では解析できないが、非線形理論の一種で固有の古典的理論である「たわみ理論」による解法の存在が、有限変位理論の適用を遅らせたといえる。しかしながら、現在の製作設計業務では、より厳密な理論を適用してより経済的な断面とする考え方から、設計計算への有限変位解析法の適用が一般的に

なっている。その結果、完成時に補剛桁は無応力で、死荷重は所定のサグを有した状態の主ケーブルが全て担い、主塔は直立しているなどの吊橋特有の設計条件を満足させるための形状決定の手法を導入して開発された解析プログラムが使用されている。また、架設検討にも当然、有限変位解析プログラムが適用されており、主ケーブルの二次応力の影響などの特有の非線形問題を検討するための特殊な解式が組み込まれたものも開発されている。

立体モデルを対象とする場合には、汎用有限変位解析プログラム(MSC/NASTRAN, COSMOSなど)と連動させるのが現状では一般的であるが、コンピュータ技術や数値計算技法の飛躍的な進歩によって、明石海峡大橋級の長大吊橋の補剛桁をほぼ忠実に立体トラスモデルに置き換えた場合でも、パソコンあるいはEWSで実行できる専用プログラムも開発されている(図-7参照)。なお、長大斜張橋の塔の設計では、全体系の立体モデルについて、吊橋の主塔の設計では、主塔モデルについて、それぞれ弾塑性有限変位解析法が適用されることが多い。また、長大斜張橋の耐震設計では特に、橋軸方向変位の影響を考慮した動的有限変位解析が行われることもある。

これらの長大斜張橋・吊橋の設計計算、架設検討用の解析プログラムはシステム化され、膨大な量の入、出力データの前、後処理プログラムを整備して、入力データの自動作成、省力化が図られるとともに、出力データとして設計図書にそのまま使用できる日本語表示の集計図表の自動作成も可能となっており、設計支援システムとしての機能が今日では整っている。また、例えば、塔の形状の詳細や、橋梁各部の塗装色などを決定するために、CGプログラムとのデータの遣り取りによって景観検討を容易にすることも試みられている。

一方、施工管理業務における架設精度管理計測は、吊





写真-3 明石海峡大橋 (本四公団提供)

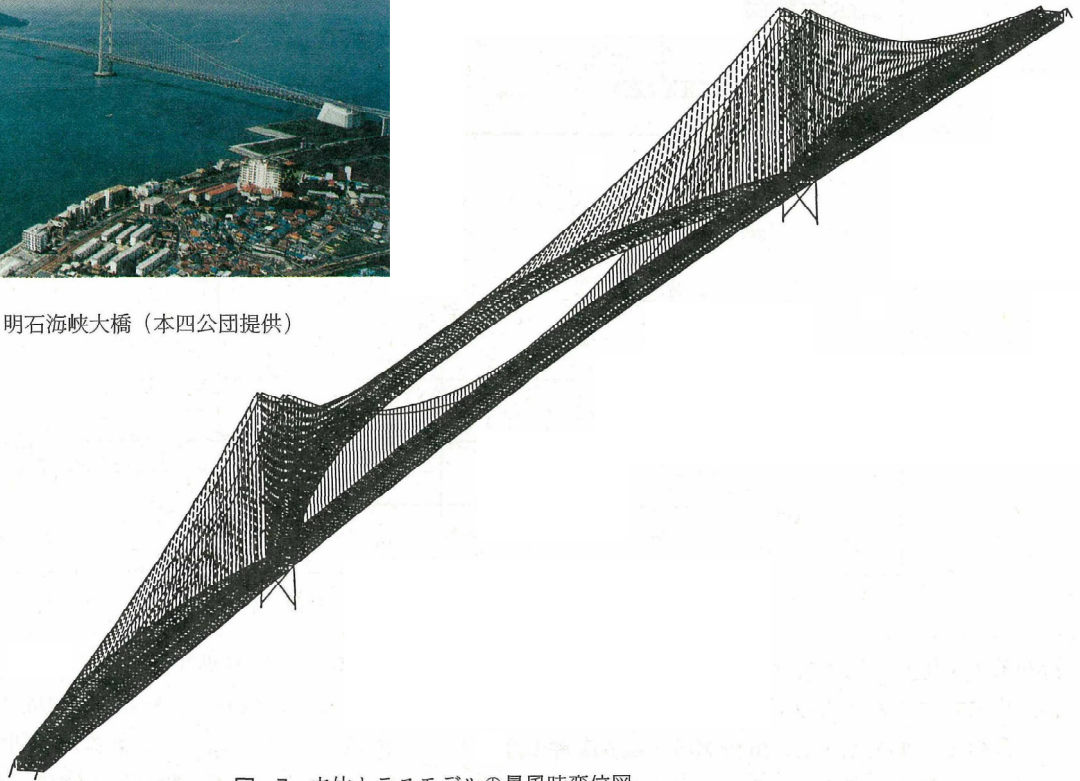


図-7 立体トラスモデルの暴風時変位図

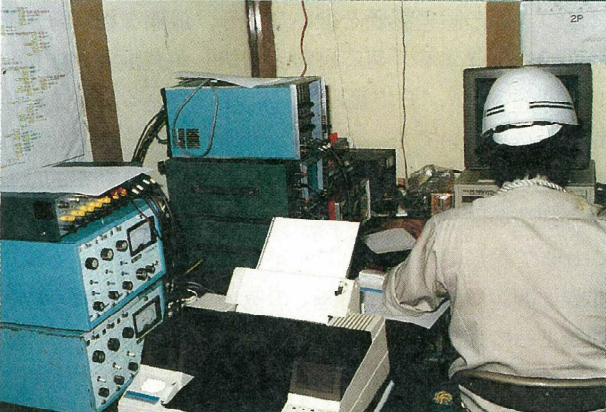


写真-4 櫃石島橋橋上の施工管理システム

橋の場合には確認計測の性格が強いが、長大斜張橋の場合には、管理値との誤差を調整する現場作業が各架設ステップにおいて行われるのが一般的である。したがって、工程短縮のためには竣工図書用の管理図表の作成までを一夜で実施する必要があり、センサー、自動計測、インターフェース、データ通信などのハイテク技術を駆使した施工管理システムが架設現場に構築されている(写真-4, 図-8参照)。管理値計算は、最新の現場データを基に有限変位解析法を用い、橋上の測定小屋内の計測制御用パソコンを現場端末としてホストコンピュータとオンラインすることなどによって実行されてきたが、EWSの適用の例も既に報告されている。なお、誤差の調整に際しては、最適化手法の他、ファジィ理論を応用したエキスパートシステムなども最近では用いられている。(前田研一)

#### 4. モデル化と解の信頼性

力学における数値解析とは、実際の現象を支配する方程式を近似的な数値として解く手法である。その解法の各段階において、様々なモデルによる理想化が行われる。したがって、用いられるモデルによる実際現象の近似の程度により、得られた解の信頼性が左右されることはいうまでもない。理想化は大きく、「力学的モデル化」と「解



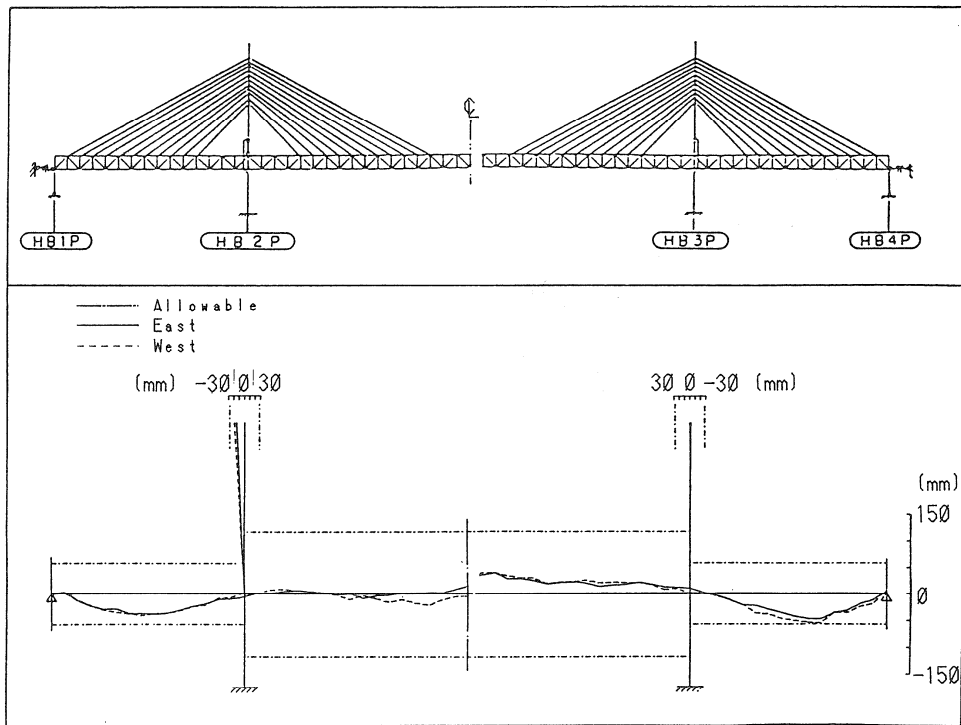


図-8 形状誤差 (管理値-実測値) 図

析的モデル化」の二者に分類することができよう。前者は、構成式で代表されるように材料特性など現象のメカニズムのモデル化であり、解析領域・境界条件の設定もこれに含まれると考えられる。一方後者は、有限要素法で代表されるように支配方程式の数値解を求める際の数学的モデル化であり、計算機による数値演算も計算のモデル化としてこれに含めてもよい。ところで土木工学で扱われる現象は多岐にわたり、かつ極めて複雑な構造物を対象とすることが多い。そのため数値解の信頼性を評価するには、それぞれの段階でのモデル化の意義と精度とを十分に検討しなければならない。

### (1) 力学的モデル化

粘土・砂などの粒状体は、これまでに提案された高度な構成モデルをもってしても、挙動を統一的に表現することは難しい材料である。特に、ひずみの範囲が大きい場合には非線形性が卓越し、たとえ単純な構造物であっても的確な変形予測をすることは容易ではない。また、塑性、弾塑性あるいは粘塑性理論などを基礎とするモデルによって局所的な挙動が再現できるとはいえ、モデルに必要なパラメータの設定方法やその感度評価に大きな課題を残している。そのほか、岩盤やコンクリート構造物でしばしば大きな問題となる分離面、クラックなど不連続面のモデル化あるいは材料の非均一性のモデル化も解決しなければならない課題である。

このような問題点に対し、様々な方向から解決が図られようとしている。そのひとつは、材料をマクロな立場からモデル化しようとする構成式の研究と、ミクロな力学機構を集積して全体をモデル化しようとするマイクロ

メカニクスの研究が次第に接近しつつあることである<sup>8)</sup>。とくに後者では粒状体を中心に精力的な研究が進められている。ここには計算機の利用が大きな役割を果たしている。また、数値解と実構造物における観測値の比較からモデル化のパラメータ同定が逆問題として定式化されている。まだ一般化するには至っていないが、これからの一つの有力な手法として期待される。

### (2) 解析的モデル化

有限要素法などの離散化数値解法は、微分方程式のモデル化による近似解法であり、得られた解は常に誤差を伴っている。しかし、誤差は直接評価することが不可能であり、また自由度や分割方法に影響される。そのため、得られる結果は解析する個人の経験や知識に大きく依存することになる。計算力学における解の信頼性を向上するには、必要とされる精度の解を径験によらず効率よく求められなければならない。近年では、得られた近以解に基づき解の誤差評価を行いながら、最適な要素分割を合理的に生成する「適応自動分割法」が有限要素法において開発され<sup>9)</sup>、その適用が試みられている。一方、境界要素法においても、この分野の研究が盛んに進められており<sup>10)</sup>、理論的有効性の検討と併せ、より効率的な要素分割法の開発が期待される。なお、適応自動分割法は、これまで線形問題において一定の成果を収めているが、非線形問題や時間依存問題での有効な分割方法は今後の課題として残されている。

数値解の信頼性とモデル化は表裏一体の関係であり、モデル化の精度を上げることはそのまま信頼性を高めることにつながる。しかし、一連のモデル化の精度に対し

ては、むろんバランスが必要であり、ひとつの部分的なモデル化にのみ注意をはらっても解の精度が向上するとは限らない。つまり全体のなかで精度に大きな影響をもつモデル化を見極めたいうえ、それらの改善を図るべきである。また、数値解を応用する立場から数値解の妥当性を判断できるセンスを養成しなければならない。そして、あるべき解を予測し、結果との間に本質的な相違があれば、その原因を考察しモデル化を見直すことが重要である。

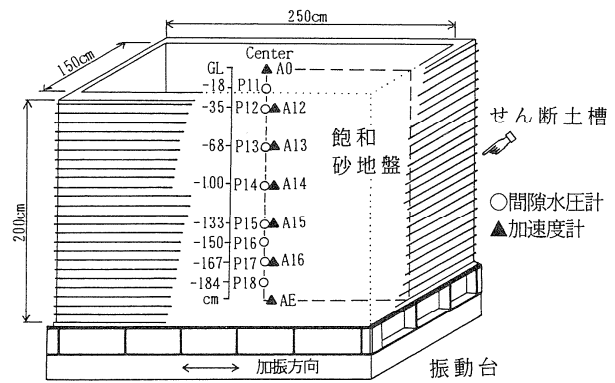
一方、近年スーパーコンピュータを中心に計算機の進展は目ざましく、計算力学の名のもとで新しい力学の分野が開拓されつつある。これは、いわば理論とも実験とも独立したジャンルであり、その研究成果は逆に理論や実験に波及することになる。このような状況のもとで、実験と数値計算との対応がきわめて注目される。整理された条件のもとで信頼できるデータを生み出す実験手法の開発が数値解析の発展に大きな寄与をすることになる。(田村武・阿部和久)

### 5. 実験と計算力学

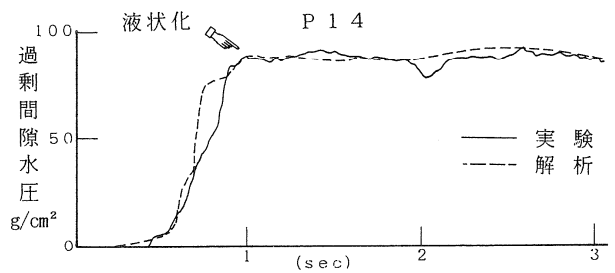
3章で述べられたように、建設分野における計算機利用は広範囲に亘り、高度な数値解析を駆使した各種の設計検討や現象予測技術への普及は著しい。この高度な数値解析技術の妥当性や適用性の検討には、実現象との対照が不可欠であることはいうまでもなく、実現象を再現する手段としての『実験』は、数値解析技術の検証に重要な位置を占めている。また、相似則が不明確な分野においては、縮小モデル実験の結果を実構造に適用する際、計算力学すなわち数値解析が有効に用いられている。このように、実験と計算力学とは相互的で、密接した関係と言えよう。

前章では、計算力学におけるモデル化の意義と解の精度検討の重要性が指摘されているが、前述したように、このような検討の材料として実験は有益な資料を提供している。ここで、計算力学の面から実験事象との対照の効用をまとめてみると、

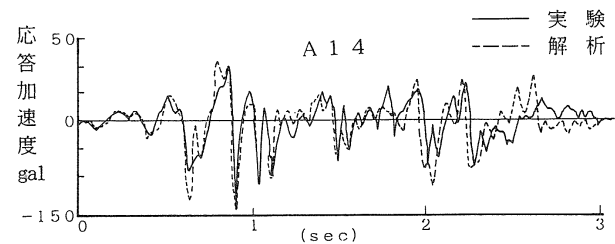
- 1) 現象再現性：解析手法が対象としている現象の再現性に関する定性的な確認
- 2) 数値解析解の精度：実験値と解析値との比較検討による、解の精度の定量的な評価
- 3) 適用範囲：物性に関する種々の非線形性や動的問題での時間積分に関連する現象の速さなど、数値解析に伴う適用限界に関して、パラメトリックな実験結果との対比による適用範囲検討
- 4) モデル化：解析次元、離散化法における使用要素タイプと要素分割、構成式や非線形方程式の解法などモデル化に伴う仮定や理想化に関する妥当性の検討



(a) 模型地盤と計測点



(b) 過剰間隙水圧



(c) 応答加速度

図-9 飽和砂地盤の液状化現象

5) 物性値：複雑な分布構成を示す地盤物性値の設定や、各種の非線形構成式に含まれる決定困難なパラメーターの設定を、パラメトリックな解析結果と実験結果との対比を通して決定

などが挙げられよう。

特に、地盤を解析の対象とした場合、土の複雑な材料特性や、地盤の半無限性の解析的な表現は非常に困難である。そのため、解析結果の検証のみならず、解析手法における構成式の提案や特殊境界の開発にも実験は非常に重要な位置を占めている。

実験と計算力学とを対比させた一例として、地震時の軟弱な飽和地盤にみられる液状化問題を対象に、実験と解析とを比較し、その解析手法の適用性を検討した結果<sup>11)</sup>を紹介する。この例は、2次元の時刻歴有効応力解析手法を用い、水平地盤の液状化の発生と残留沈下量を予測したものである。実験は、地盤の半無限性を表現できる大型のせん断土槽に緩い飽和砂地盤を作製し、振動台にて加振したものである。図-9に地盤の応答加速度と液状化への指標である過剰間隙水圧の上昇を、実験結

果と解析結果とを比較して示す。過剰間隙水圧および応答加速度振幅と周期の変動過程が数値解析によって表現できていることが分かる。これに対して、地表面の沈下については再現性が悪く、解析では実験結果の約1/10程度しかでていない。このように、数値解析による現象再現性に関する適用範囲、あるいは、その精度が実験を通して明らかになり、実使用上の問題点の抽出や解析結果の解釈に有効に反映されることになる。(松田 隆)

## 6. 解析コード自主開発の意義

現在、多くの解析コードが市販されている。構造解析の分野では、NASTRAN, MARC, ADINA, ABAQUS等といった汎用解析コードが市販されており、静的弾性解析のみならず、動的解析や非線形解析も可能となっている。また、設計業務等を見ると、一貫解析システム等のコードが市販されている。多くの日常業務に関してはこれらのコードを使う事で処理できそうであるが、一方では、自主開発コードの開発、使用も盛んである。例えば、本研究委員会の調査<sup>2)</sup>によれば、建設会社、コンサルタンツでは汎用コードより自主開発コードの使用の方が多いし、鉄鋼、重工、橋梁メーカーでも両コードをほぼ同程度に使用している。ここでは、解析コードを自主開発する意義を考えてみる。

自主開発コードの意義を考えるには、その前に市販コードの特徴を考えてみるのがよさそうである。本委員会ではアンケート結果を基にして汎用コードと自主開発コードの現状と問題点をまとめている<sup>1)</sup>が、ここでは単に汎用コードだけでなく、市販コード全体を対象として考えてみる。

市販コードの第一の特徴として、その信頼性がある。プログラムにはバグがつきものであるが、市販コードは多くの人を使う事からバグが発見され易く、また、改良もすばやく行われるので結果としてバグの少ないものになる。

コストが安いというのも大きな特徴であろう。特に大規模なプログラムになるとその開発・維持費は膨大なものとなるが、市販コードはこれを複数の機関で分担しているわけで、個々の機関の分担分は小さい。最近ではマルチクライアント方式として、自主開発と市販コードの中間に行くような方法で開発費用を低減する方式も採用されている。

次の特徴として、これは、市販コードでは当然といえる事であるが、実用的に使う問題に対してはそれを解ける機能が備わっている事である。特に先に挙げたような汎用コードでは非常に広い範囲の問題を解く事ができる。

この様に市販コードは実用上有利ないくつかの長所を持っているが、反面、短所も合わせ持っている。文献1)

では汎用コードの問題点として、①ソースが未公開である、②プログラムの内容が分からない、③修正が困難である、④マニュアルが使いにくいなどが挙げられており、これはそのまま市販コード全体の特徴と言えよう。このうち④に関しては、例えば大規模な汎用コードでは運用法のコンサルティングをする人がいるケースもあつたりするし、マニュアルがユーザーの立場で書かれていないというのも良く聞く意見である。しかし、一方ではこれは使い始めだけの問題であり、例えば設計業務などのように類似の問題を解くのに使う場合等では次第に使い方になって来るので余り問題にならないという意見もある。いずれにしる余り本質的な問題では無いように思われる。

これに対して、①～③はかなり本質的な問題である。販売元から言えば、ソースを公開しないのは技術の流出を避けるために当然の処置とも言えるが、ユーザー側からは不信感があるわけで、特に非線形解析など解法や使い方の難しいプログラムではこの傾向は強い。

この様に見てくると、解析コード自主開発の意義は自然と明らかになってくる。つまり主要な目的の一つに技術力の確保ということが挙げられよう。ここで、技術力という場合には、解析コードを開発・維持する力という場合と、独自の技術のコード化という二つの面があるが、どちらも重要な要因である。前者は、例えば日々新くなる技術の要求に応じて解析コードを改良したり、より使いやすい様にコードを修正したりといった面から重要である。また、非線形解析のように式はあるが、それをコード化する事が難しいような問題を正しく解けるようにするという技術力は重要なことである。さらに、仮に市販コードでソースが公開されていたとしても、これを解読するのは大変な作業であるし、新しい機能をユーザーが付け加えるというのはもっと大変な作業であり、技術力無くしてできる作業ではない(前述の③の問題点はこの辺にも起因している)。

次に後者については、各機関の技術力のアピールという面からも重要なことである。この様な問題については、技術の流出を避ける意味でもコードは自主開発する必要がある。

文献1)のアンケート結果を見ると、研究が主の大学では自主開発コードが大多数であり、また、企業では建設業やコンサルタンツのような地盤材料やコンクリートのように多様な非線形性を扱うところで自主開発コードの使用が多いがこれは、この様な結果と考えられる。

この様に、解析コード自主開発の意義は、単に市販コードに機能の無い解析をしたいからと言うのではなく、技術力の確保、アピール等といった、技術競争に勝ち抜くための一つの手段として位置づけられるべきであろう。



市販コードを使っているこの様な技術力をつけていない場合には、現有のコードの中だけで問題を解こうとするため、検討が十分できないといった問題も生じる。特に研究開発の分野では、新しい技術のためには新しい解析法が要求されることも多く、この様な場合に対応できるように技術力を上げておくためにも解析コードの自主開発は重要である。

しかしながら、一方では、市販コードの特徴として挙げたコストや信頼性、多機能性等は解析コード導入の際には重要な事項であり、それらと技術力の問題を検討した上でどちらをとるべきかを決めるようにする必要がある。(吉田望・中山等・吉川弘道)

## 7. CAE 関連教育の在り方

### (1) 大学におけるコンピュータ教育

土木工学における様々な分野において、コンピュータは必要不可欠なものとなりつつあり、それに伴い大学におけるコンピュータ教育への期待も高まりつつある。コンピュータのハードに関する知識、FORTRAN や BASIC を用いたプログラミング教育、さらにエネルギー原理などの定式化の教育を基礎教育とし、既存ソフトや自作ソフトによる実用モデルの解析手法の教育を応用教育とするならば、基礎教育については多くの大学で既に実施されている。構造工学委員会非線形解析小委員会の報告<sup>3)</sup>によれば、コンピュータ関連の講義が大学の学部で平均2科目開講されており、今後その重要性は益々高まるものと考えられている。一方、応用教育についても、一部の大学ではFEMのサブルーチン作成を主体とした講義が学部学生を対象に実施されている<sup>12)</sup>。ここでは、自己採点システムなどを含む教育支援システムを自己開発している。しかしながら、限られた時間内において、FEMの基礎理論から応用教育までを行うことは簡単なことではなく、どちらに重点を置くべきかは今後の課題とされている。文献3)においても、応用教育の重要性は認識しつつも、多くの大学では時間的制約から科目数を増やすことができないとの報告がされている。

産業界においては、大学に対して、基礎学問を中心とした創造性の養成と同時に、CAE 関係教育においては基礎教育の他に実業務に沿った応用教育を期待する声が多くある。解析プログラムの作成や解析結果の評価は勿論のこと、入出力インターフェースの利用技術、人工知能、CG、CAD などに関しても、基本的なソフトを使いこなせるよう大学教育に期待している。また、多くの企業がコンピュータ関連の企業内教育を実施しており、土木学会や大学に対し、「トピックス的な講習会」、「ソフトの公開」、「テキストの出版」等を期待する声が多い<sup>3)</sup>。

大学教育における今後の課題としては、応用教育をどの範囲まで広げるかが重要になるであろう。解析対象の

モデル化及び解析結果の評価ができる技術者を養成するための基礎教育が必要不可欠あることは言うまでもない。一方、数値計算にその威力を発揮していたコンピュータが、熟練技術者の勘や知識に頼っていた意志決定まで行えるようになりつつある現在、これまでの解析を中心としたコンピュータ教育の他に、FORTRAN や BASIC 以外の言語教育や人工知能などに関する教育も今後必要となるであろう。(井浦雅司・吉川弘道)

### (2) 企業におけるコンピュータ教育

大学等の教育機関においては、応用範囲の広い、ハードに関する知識やプログラム作成法などの基礎知識を教えるのが主である。これに対して企業では業務の分業が進むので、大学で教えられた知識は素養として重要なものではあるが、日常業務でそのようなことに関係する人は一握りで、多くの人はプログラムを使用するだけになり、さらには、コンピュータを使わなくなる人もいるので、必要な知識も当然異なってくる。

大学で学んだ知識がコンピュータの使用を前提としたものであるのに対し、企業においても一つ重要なものに、コンピュータの現状を認識できる能力がある。つまり、コンピュータとはどのようなもので、何が出来て、何が出来ないかというようなことに関する知識である。コンピュータが万能で何でも答えてくれるものとする人はいないであろうが、コンピュータを導入したがすぐ業績が上らないというようなよく聞く不満や、コンピュータを使えば効率的に出来そうな業務を、従来からの能率の悪い方法を守って行っているという事例はこの様な知識がないためと考えられる。コンピュータの利用範囲は今後ますます広がると考えられるが、それでも管理職に要求されるのは、FORTRAN でプログラムを作成することや、FEM プログラムの使い方を知ることではなく、業務のどの分野にコンピュータが使える、どの程度の仕事をしてくれるか、それに対してどの程度の投資が見合うのかといったことを的確に判断できる能力であり、このためにはコンピュータの現状を把握することが必要である。

前者の直接コンピュータを使う業務に関しては、基礎的な知識や特定のコンピュータコードの使い方等については外部の講習会もある。しかし、コンピュータを使うということは多分に経験に依存する面があり、各部署での業務に応じた経験を積み重ねていくことによって能力が伸びる面も多いので、教育も業務を通じて行われるのが主となる。ただ、この様な方法では教える側が教師としての能力を持っているわけではないこと、能率が悪いことなどの問題もある。前節で述べた土木学会や大学への要望もこの様な下地から出てきていると考えられる。

後者のコンピュータの現状を認識することは、コンピュータを使わない人にとっても必要な知識であるが、

これまでは個人の勉強による部分とされ、特にこの様な事項を教育することは考えられていなかった様に思える。しかし、今後の技術競争に勝ち抜くためにはコンピュータの有効利用は必須のことと考えられ、そのためには、この様な知識を教育することは重要となろう。

(吉田望・徳永正博・中山等)

## 8. おわりに

土木工学分野での研究開発を考えると、コンピュータはなくてはならない存在であることに異論をはさむ余地はなかろう。事実、技術開発分野では、CAD・CAM、FAを初め、コンピュータ技術に支えられた先端技術としてのAI(人工知能)、画像処理等が導入されつつあり、着実にCAEが一般化してきている。その背景には、建設分野以外の産業の生産性に比べて建設業の生産性が低いことがあり、高度情報化社会に向かって建設技術の情報システム化は戦略上欠くことが出来ない事情がある。生産性を向上させるためには計画から設計・施工・維持管理に至るまでの全ての段階で自動化・省力化を図らなければならない。建設技術の自動化・省力化にあたってコンピュータが果たす役割は大きく、様々な形で利用されている。特に、計算技術を支える計算力学はコンピュータ利用の分野で重要な位置を占め、その将来に大きな期待がかかっている。

このような背景の下で、コンピュータによる力学系の解析、いわゆる計算力学を核とする技術の研究開発とその応用に焦点を絞り、建設分野での現状と課題をまとめた本報告が、建設技術研究開発の一層の発展に寄与することを願うものである。本委員会報告の原稿そのものは小委員会において十分な議論を経たものであるが、主観的な考察も多く含まれており、紙面の制約から、意の尽くせなかった点多々あると思われる。

最後に、当小委員会の構成員を以下に記載する。吉田裕(委員長)、阿井正博、安部和久\*、井浦雅司\*、依知川哲治、岩熊哲夫、大槻明、尾崎浩明、川原睦人、後藤芳顕、坂井藤一、崎山毅、武田洋\*、田村武\*、徳永正博\*、中村秀治、中山等\*、野上邦栄、野村卓史、長谷川俊昭、林正、檜貝勇、平島健一、前川宏一、前川幸次、前田研

一\*、増田陳紀(幹事)、松田隆\*、山口宏樹、山崎淳、吉川弘道\*、吉田望\*、依田照彦(幹事)、黛巖(事務局)。  
(\*は本稿の執筆担当委員)

## 参 考 文 献

- 1) 構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：建設分野からみた数値解析の現状と将来の展望，土木学会論文集，第403号/VI-10，pp.17～23，1989年3月。
- 2) 構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：構造工学における非線形数値解析の現状と将来，土木学会論文集，第404号/I-11，pp.11～21，1989年4月。
- 3) 構造工学委員会非線形解析小委員会：数値解析関連の力学・計算機教育の現状と実務から期待される将来像，土木学会論文集，第410号/I-12，pp.71～23，1989年10月。
- 4) 構造工学委員会非線形解析小委員会：スーパーコンピュータ利用環境の現状と展望，土木学会論文集，第421号/VI-13，pp.43～52，1990年9月。
- 5) 三村長二郎・武田哲夫：PC斜張橋の耐震設計，プレストレスコンクリート，Vol.28，No.4，pp.15～25，July 1986。
- 6) 山本彰・鳥井原誠・平間邦興：鉄筋で補強した切土のり面の挙動に関する研究，大林組技術研究所報，No.42，pp.77～84，1991。
- 7) 畑浩二・藤原紀夫・木梨秀夫・中尾通夫：トンネル支保選定エキスパートシステムの構築(その1)，トンネル工学研究発表会論文報告集，第一巻，pp.65～70，1991。
- 8) Satake, M. and Shen, H. H. (editors): Proc. of 2nd US-Japan Joint Seminar on Micromechanics of Granular Materials, Potsdam, 1991.
- 9) Babuska, I. and Rheinboldt, W.C. : A-posteriori error estimates for the finite element method, Int. J. Num. Meth. Eng., Vol.12. pp.1597～1615, 1978.
- 10) Rank, E. : Adaptive h-, p- and hp-versions for boundary integral element methods, Int. J. Num. Meth. Eng., pp.1335～1349, 1989.
- 11) 松田隆：液状化による飽和砂地盤の沈下特性に関する模型実験とその有効応力解析，第19回地震工学研究発表会，pp.245～248，1987。
- 12) 酒井信介・久田俊明・中島尚正・及川和広・常磐裕司：計算機援用有限要素法教育システムの開発，日本機械学会論文集(A編)，55巻，510号，pp.348～355，1989年。(1992.5.7受付)