
委員会報告

Committee Report

委員会報告

構造工学における非線形数値解析の現状と将来

NONLINEAR NUMERICAL ANALYSES IN STRUCTURAL ENGINEERING —TODAY AND FUTURE

構造工学委員会 構造力学小委員会 非線形解析分科会
By Nonlinear Analysis Division of Subcommittee on Structural Mechanics,
Committee on Structural Engineering

1. まえがき

土木学会構造工学委員会構造力学小委員会に設置された非線形解析分科会(主査,東京工業大学教授 吉田 裕)では,調査研究活動の一環として,計算機利用技術の現状と展望に関するアンケート調査を昭和63年1月に実施した。「構造工学における計算機利用と数値解析に関するアンケート調査」と題したアンケート調査は,広く官公庁・大学・建設会社・コンサルタンツ・メーカー・一般会社を対象に行われ,491通のアンケート調査に対して合計293通(回収率約60%)の回答を頂いた。その後,分科会で調査結果について慎重審議を重ね,昭和63年11月集計結果報告書¹⁾を完成するに至った。

本報告は,アンケート調査結果をもとに,非線形数値解析の現状と将来について詳細に吟味し,考察を加えることを目的としている。取り上げた内容は,数値解析の実施形態の現状分析,数値解析における使用コードの調査,非線形解析の現状認識と将来展望などである。

2. 数値解析の実施形態の現状

まず,構造工学における数値解析の実施形態の現状を把握するために,問題の種類,線形・非線形の別,使用計算機,ならびに解析モデルの次元,自由度等の項目について実状を調査した。調査は表-1に示す12種類の適用構造物について実施した。さらに,これらに対する機関別の差異も調査したが,本項では,明瞭な差異がある場合についてのみ説明する。

調査対象とした機関は各適用構造物についてデータ数

が5以上のものを表-2に示す9種類の中から選んだ。

(1) 数値解析が対象とする問題の種類

各構造物ごとに,対象となる問題の種類を静的問題,動的問題,過渡応答問題(熱伝導,圧密,浸透問題など),

表-1 適用構造物と回答数

適用構造物	回答数
1. 橋梁上部構造	145
2. 土構造(塊体,盛土,軟弱地盤等)	142
3. 地中構造物(トンネル,地下タンク等)	119
4. 基礎構造物(ケーソン,杭等)	106
5. 橋梁下部構造	99
6. その他の地上構造物(鉄塔,タンク,サイロ等)	77
7. 港湾構造物(栈橋,護岸等)	71
8. ダム	66
9. 建築建屋	53
10. 海洋構造物	49
11. 原子力建屋(地盤との連成を含む)	37
12. 将来構造物(海洋都市構造物,宇宙構造物等)	10

表-2 機関とデータ数

機 関	データ数
1. 建設会社関連	93
2. 大学関係	74
3. 橋梁会社	32
4. コンサルタンツ	24
5. 官公庁およびその研究機関	23
6. 電力会社	13
7. 鉄鋼・金属	11
8. 重工・造船	8
9. 電鉄会社	5

Keywords: nonlinear analysis, numerical analysis, structural engineering, computer code

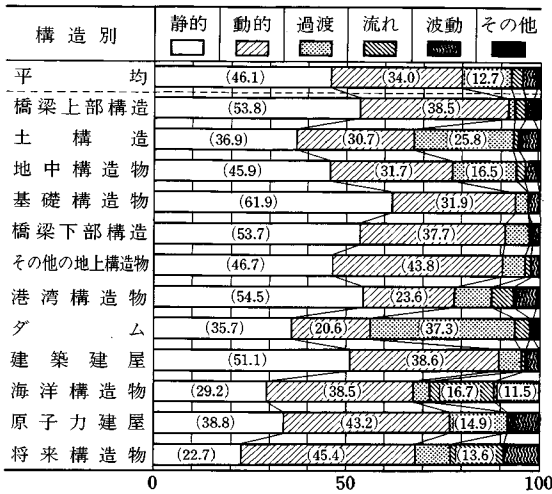


図-1 解析対象構造と問題の種類

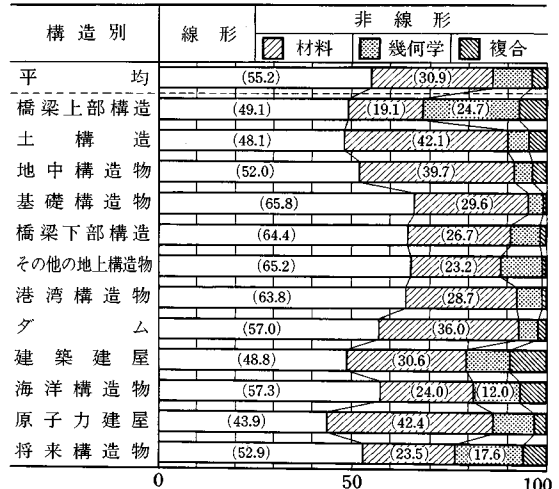


図-2 解析対象構造と線形・非線形解析

流れの問題、波動問題、その他に分類して集計した結果を図-1に示す。これより、全体として、静的問題が約半数を占めているが、動的問題、波動問題および過渡応答問題も比較的多く行われていることがわかる。

特に動的、波動問題の多い構造物としては原子力、海洋構造物等が挙げられるが、前者は構造物の性格上、地震等に対するより厳しいチェックが要求されるためと考えられる。また、後者は地震力のほか、波動等、動的外力を受けるため必然的に動的な解析が多くなるものと思われる。過渡応答問題としてはダム、土構造が多いが、ダムは熱伝導や浸透問題、土構造は圧密や浸透問題の解析が中心と考えられる。

逆に、静的問題の多い分野としては基礎構造物が挙げられる。これは動的解析の必要性が少ないというより、上部構造と地盤との境界領域であり両者の連成を解析で考慮するのが繁雑であること、さらに境界分野であるためいま1つ解析法の開発が進んでいないことにも起因しているように思われる。

なお、流れの問題は図-1に示す範囲ではいずれも少ないが、機関別では重工・造船部門における、橋梁上部および下部構造、港湾構造、ならびにダム構造の解析において20~50%を占めているのが注目され、風、波、動水圧等の解析が行われているのがうかがえる。

機関別にみても構造物ごとの対象とした問題の種類は、ほぼ図-1のようである。ただ、先に述べた重工・造船部門や大学関係については傾向が異なり、いずれも静的問題の割合が少なくなっている。これらには、扱う問題の特殊性や研究的性格が反映されているように思われる。

(2) 非線形解析の実施状況

各構造物における非線形解析の実施状況を線形、材料

非線形、幾何学的非線形、複合非線形に分類して集計した結果を図-2に示す。全体としての非線形解析の実施率としては45%程度で、計算機ならびに数値計算法の進展に伴い、近年、多くの非線形解析が実施されていることをうかがわせる。非線形解析の内容としては、大半を材料非線形解析が占める。幾何学的非線形解析は橋梁上部構造を除きそれほど多くなく、材料ならびに幾何学的非線形の両方を考慮した複合非線形解析は、さらに少ない。

非線形解析の実施率の高い構造物としては、原子力建屋、土構造、橋梁上部構造、建築建屋等が挙げられ、いずれも50%を超える。中でも原子力建屋における非線形解析の実施率が最も高いが、これは(1)でも述べたように構造物の性格上、より正確な力学挙動を知る必要があるためと考えられる。アンケートにおけるキーワードから非線形解析の内容をさらにみると、原子力建屋ではコンクリートならびに土、土構造では文字どおり土をそれぞれ対象とした材料非線形が大半で、建築建屋も鋼ならびにコンクリートを対象とした材料非線形問題が過半数を占める。橋梁上部構造では鋼構造が多く、幾何学的非線形解析が材料非線形解析より多くなるのは前述したとおりである。

各機関別の非線形解析の実施形態の差異を、上に述べた非線形解析の多い構造物にみると、橋梁上部構造以外では、大学関係を除いた他の機関はほぼ図-2と同様の傾向を示している。

橋梁上部構造については図-3に示すように、機関によりかなりばらついている。理由としては、橋梁上部構造といっても、長短スパンの差、材料的にも鋼、コンクリート、合成構造の差があり、機関で対象としている構造、素材にも差があることによると考えられる。すなわ

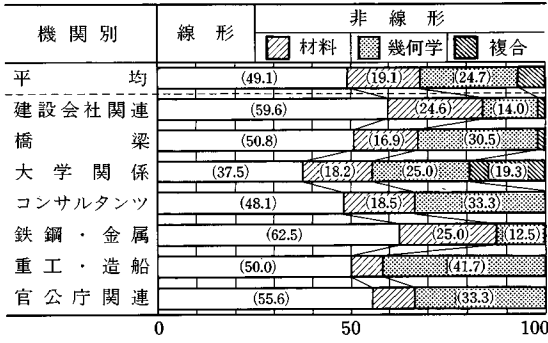


図-3 橋梁上部構造における線形・非線形解析

ち、重工・造船部門ならびに官公庁およびその研究所では幾何学的非線形解析が大半であるが、これは長大スパンの鋼橋を扱っていることによると考えられる。鉄鋼・金属関係では、逆に線形、および材料非線形解析が多いが、小スパン橋、ならびに非弾性特性を示す合成構造を対象とすることが多いためと思われる。建設会社関連でも材料非線形解析が多いが、これもコンクリート橋等を扱うことが多いことによると考えられる。なお、橋梁上部構造では、複合非線形解析は大学関係を除きほとんど行われていない。

前述した大学関係では解析が研究的性格をもつため、他の機関と比べ非線形解析の実施率はかなり高く、建築建屋(70%)、橋梁上部構造(63%)、土構造(62%)でいずれも60%を超える。

非線形解析の少ない分野としては、基礎構造、その他の地上構造物、橋梁下部構造、港湾構造が挙げられるが、これらは、その他の地上構造物を除くと、解析の実施形態も相互に類似している。(1)でも述べたように、これらは上部構造と地盤との境界を扱うが、境界の扱いが難しく、非線形解析の割合が少ないのではないかとと思われる。

(3) 数値解析に使用される計算機

各種の構造物の数値解析がどのような計算機により実施されているかをとりまとめたのが図-4である。全体では、大型汎用機の使用が過半数を占め、これにパソコンの使用が続き、スーパーコンピュータの使用は10%程度である。ミニコン、エンジニアリングワークステーションの使用率はいずれも1割以内で、特にワークステーションはわずかであり、現段階では数値解析においてそれほど普及していないようにみえる。

構造別にみると、大型汎用機の使用の多いのは原子力構造、土構造が挙げられ、パソコンは基礎構造、橋梁下部構造、スーパーコンピュータは海洋構造、将来構造での使用がそれぞれ多い。図-1, 2と比較してみると、当然ながら、時間に依存する問題や非線形解析の多い構

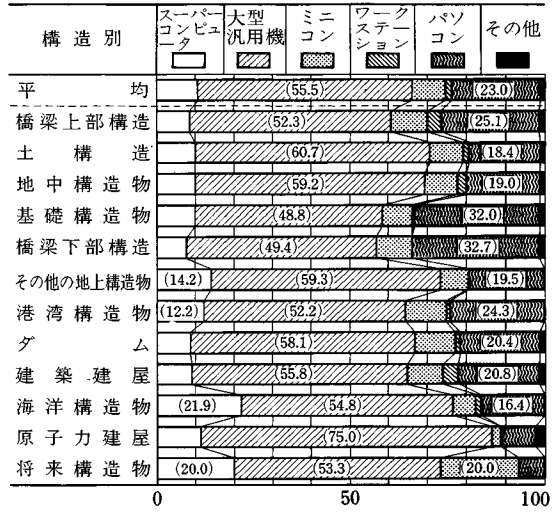


図-4 解析対象構造物と使用計算機機種

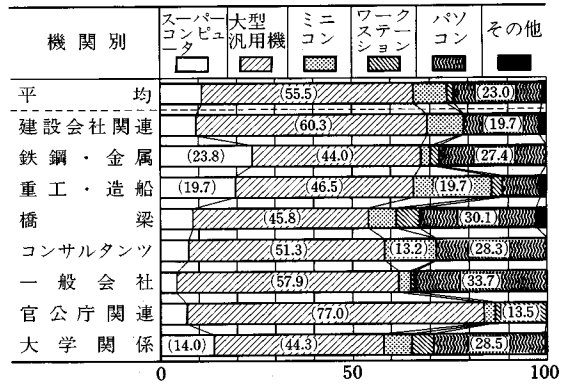


図-5 機関別使用計算機機種

造物での大型汎用機、スーパーコンピュータの使用率が高く、静的な線形解析の多い構造物ではパソコンも多く用いられているのがわかる。

計算機の場合、解析対象となる構造物のほかに機関の性格にも影響されることが考えられることから、さらに機関別の使用状況を図-5にまとめてみた。ほとんどの機関で大型汎用機の使用が最も多く、続いてパソコンの使用が多い。一方、スーパーコンピュータは鉄鋼・金属、重工・造船や大学等で比較的多く使用されており、中でも流体関係の問題を多く扱う重工・造船ではパソコンの使用率を上回っている。

(4) 数値解析における次元と自由度

各構造物ごとに対象とする解析モデルの次元ならびに最大自由度がそれぞれどのようなものであるかをまとめたのが図-6, 7である。

図-6より、次元について全体をみると二次元解析が過半数を占めているが、三次元解析もかなり多く行われ

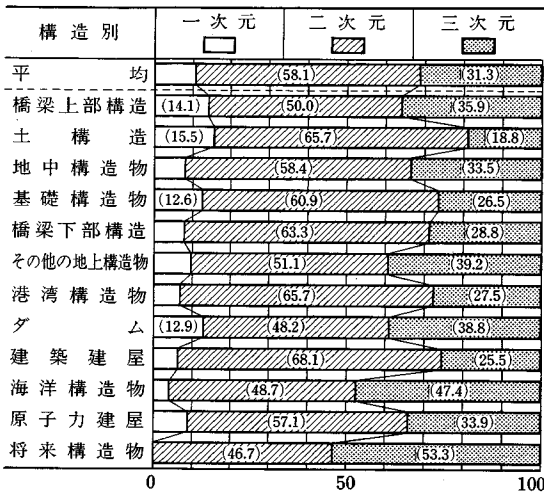


図-6 解析対象構造物と解析次元

ほぼ上記の傾向にある。橋梁上部構造もこのような傾向にあるが、最大自由度は低い値から高い値まで、満遍なく分布しており、扱う構造物の規模の多様さをうかがわせる。なお、少数の例外は建築構造、将来構造で5000自由度以上の割合が最大か、あるいは1000~4999の範囲と同等となっている。建築構造では橋梁上部構造と同様に、最大自由度は高い値から低い値まで分布している。

3. 数値解析における使用コード

次に、数値解析に用いられる使用コードの実現況および汎用コードの利点と問題点について、機関別、および適用構造別にまとめるとともに考察を加えた。さらに、非線形解析を行う業務上の理由およびこの解析を行うときに利用する使用コードについても機関別に比較検討を行った。

(1) 汎用コードと自主開発コード

図-8は、各機関に対して、最も利用している汎用コードと自主開発コードの関係を適用構造ごとにまとめたものである。建設会社関係およびコンサルタント関係は、ダム、橋梁下部および基礎構造において汎用コードに比べて自主開発コードを2~3倍多用している。鉄鋼・重工・橋梁メーカー関係は、橋梁上部およびその他の地上構造物に対して汎用コードと自主開発コードを同程度の割合で、しかも高い頻度で利用している。橋梁下部・基礎構造等において自主開発コードが多用されているのは、基礎・地盤の非線形問題および上部構造と基礎との連成問題が未だ解決できていない領域であり、既存の汎用コードではカバーしきれないためと考えられる。また、各企業とも自主開発コードを所有しているようである。これは、自社の技術力の向上のためとともに、官公庁・公団および他企業からの要請に対応できる体制を整えておこうとする現われかと思われる。

一方、大学関係ではすべての適用構造に対して自主開発コードを多用しているようである。研究・開発を専門とすることの当然な結果ではあるが、今後非線形問題が重要になるに従いこれらの自主開発コードの公開が要請されるであろう。

次に、適用構造物に対する汎用コードの利用状況についてまとめたのが図-9である。FLUSH, SIGNAS, SHAKE等は、土構造および地中構造等に多く用いられており、その適用構造物に偏りが著しい。この結果は、地盤、地震関係を対象にしたこれらのコードの特徴を表わしている。一方、NASTRAN, SAP, MARC等は橋梁上部およびその他の地上構造物に多く利用されているが、FLUSH等のコードと違い他の適用構造物にも広

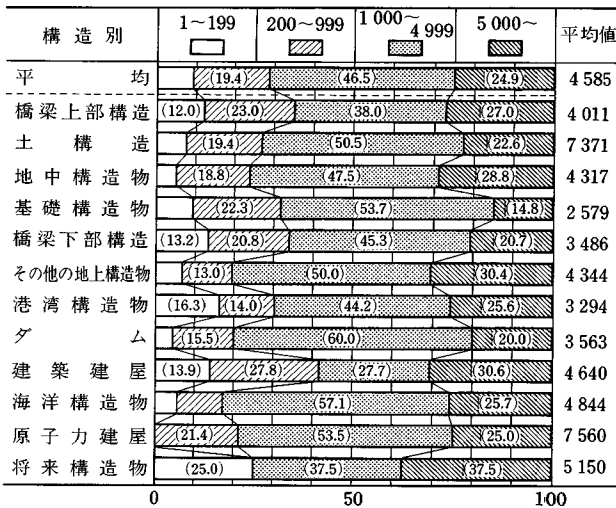


図-7 解析対象構造物と解析最大自由度

ているのがわかる。構造別にみると、二次元解析は土構造に多く、三次元解析は将来構造、海洋構造で多く行われている。これは、土構造では堤体、盛土等二次元平面ひずみ問題としての扱いが可能で、慣用的にこのようなモデル化が行われていることによるといえる。一方、将来構造(海洋都市構造、宇宙構造)、海洋構造では形状、外力の関係上二次元化が難しいこと、また新しい構造物であるため、二次元モデルへの簡易化等が十分検討されていないことなどによると考えられる。さらに、これらの構造ではより要素が主体を占めるため、三次元解析がしやすいことにも起因していると思われる。

最大自由度については、図-7にあるように、全体の傾向としては1000~4999の範囲が最も多く、5000以上も比較的多い。構造別にみても、少数の例外を除いて

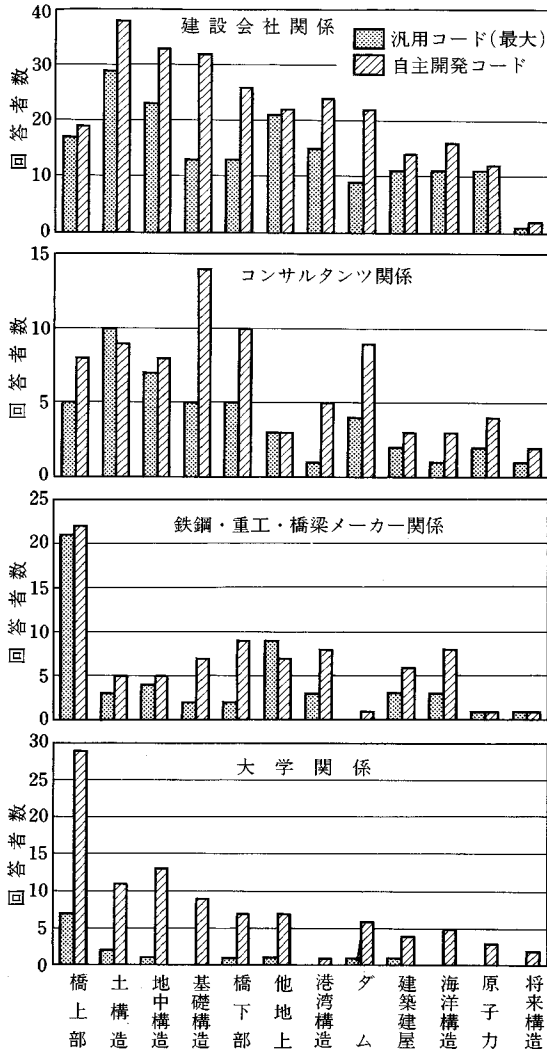


図-8 汎用コードと自主開発コードの利用状況

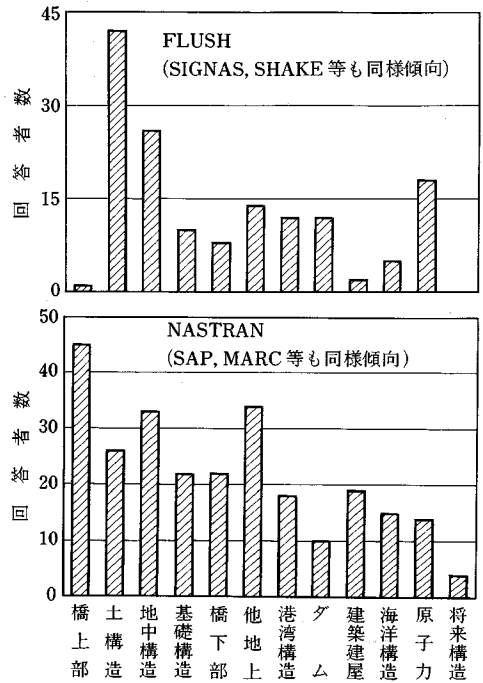


図-9 汎用コードと適用構造物

く利用されているようである。

以上の使用コードがどのような解析方法を用いている

かについて主要3解法を適用構造物ごとにまとめた結果が図-10である。すべての適用構造物における解析方法として、有限要素法が圧倒的に多用されている。これは、汎用コードが有限要素法により作成されていることにも一因はあるが、自主開発コードのそれを含めて多くの計算例においてその汎用性と有用性が確かめられているためと考えられる。また、有限要素法に比べると利用者が半数以下ではあるが、解析の方法および簡易法が次に続いている。これは、解析的方法が有限要素法の解の精度の検証のために用いられることも多く、また構造解析モデルによっては簡易法でも実験および実測結果と良い一致を得ることが可能なためと考えられる。

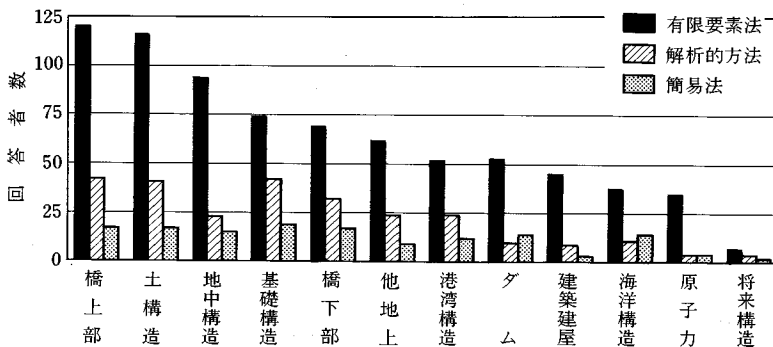


図-10 使用コードにおける解析方法

(2) 汎用コードの利点と問題点

前述のように汎用コードが種々の構造物に広く利用されている中であって、汎用コードの利点および問題点について機関ごとに整理した。その結果を示したのが図-11および図-12である。図-11から明らかなように各機関ともに同様な傾向を示している。最大の利点は信頼性が高いことであり、これは多くの数値解析事例を有し、発注者を含む対外的な説明が不要になるためと考えられる。次に、開発費用が安いことおよび機能の豊富さが続いている。汎用コードの利点として開発費用が安いことを挙げているのは、自主開発のためには費用がかかるばかりでなく、その有効性の検証が必要になるため、直面している業務あるいは研究に重点を置く立場をとっているためと考えられる。機能の豊富さの場合は、使用性の容易さと相反する面をもち、特定の問題に対して不要機能が多くなり、データ作成を困難にするなど汎用コードの機能が豊富であることがいつでも良いとは限らないことを示しているといえる。

汎用コードの問題点としては、図-12から明らかなように、修正が困難であることおよびマニュアルが不備であることが上位を占めている。前者は汎用コードのレベルアップを困難にし、応用性が薄れることになる。後者は、内容の不明確さを意味しているものと思われるが、

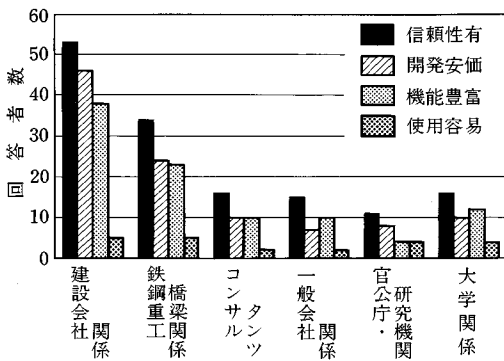


図-11 汎用コードの利点

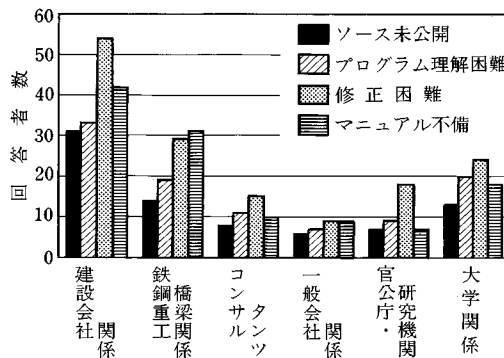


図-12 汎用コードの問題点

一方では汎用コードの機能性が豊富になることによるマニュアルのページ数の増大が使いにくくしていることも事実である。次に、プログラム理解困難、ソース未公開が続いている。これは汎用コードの開発に携わる専門技術者が、開発技術の流出や不当な利用法を防止するため、さらには著作権の問題があるため未公開にしているものと思われる。プログラムの理解および修正をより困難にしているといえる。

しかし、汎用コードを業務上修正して使用している割合は、部門全体の30~50%前後と高い結果を得ている。特にその修正部分について調べてみると、図-13に示すように入出力部分が最も多い。これは、解析に伴う作業として大きい部分を占めている入力データの作成ルーチン、および出力結果の図化等の解析結果処理ルーチンとの関連において、修正が多くなっているものと思われる。また、前述したように、本体ルーチンの修正の困難さが指摘されてはいるが、それでも各機関において本体ルーチンの修正努力も行っているようである。

(3) 非線形解析における使用コード

非線形解析を行う理由およびその目的のために用いる

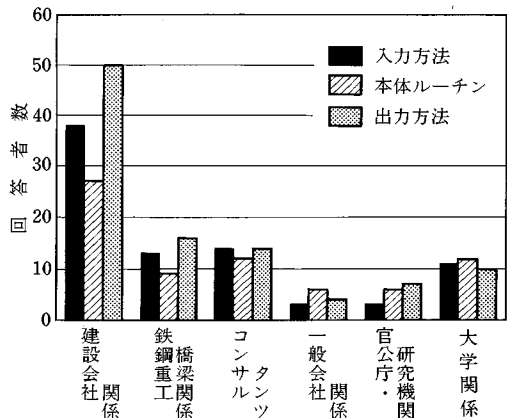


図-13 汎用コードの修正部分

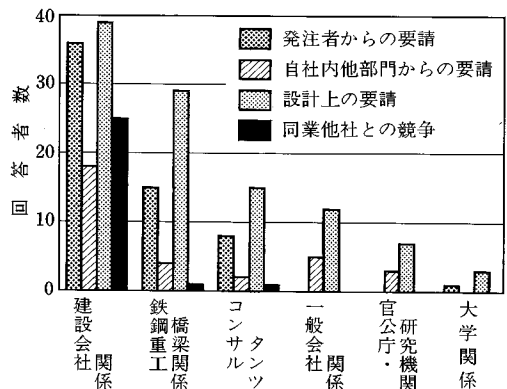


図-14 設計・開発部門で非線形解析を行う理由

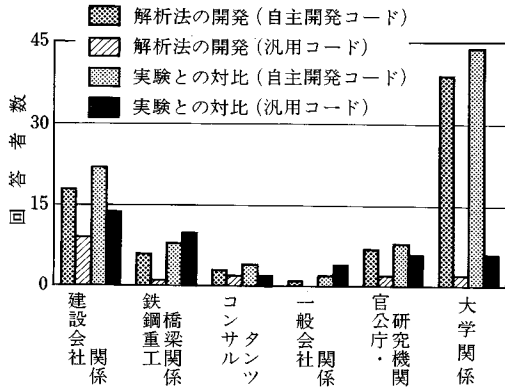


図-15 研究部門で非線形解析を行う目的

使用コードについて検討した。まず、設計・技術開発に携わる人が非線形解析を行う理由についてまとめたのが図-14である。業務上の理由として発注者および設計上の要請を挙げている専門分野が全体として多い。これに対して同業他社との競争のためという理由は、建設会社関係では多いものの他の専門分野ではほとんどなく、設計・技術開発部門において非線形解析はどちらかといえば消極的な姿勢で取り組まれているようである。

次に、上述の結果に比べると非線形解析を行うことに対して積極的な所属部門である各専門分野の研究部門を対象にして非線形解析を行う研究上の目的についてまとめた結果が図-15である。非線形解析法の開発および実験との対比を目的として用いる自主開発コードは、各専門分野ごとにみた場合ほぼ同等な比率を示しており、特に大学では高い頻度で利用している。一方、汎用コードは実験との対比のために多用されており、大学以外の専門分野ではデータ数に違いはあるもののその占める割合が大きい。中でも鉄鋼・重工・橋梁関係は、実験との対比のために利用する汎用コードの比率が最も高い。このように非線形解析に対して汎用コードの利用が多いのは、(2)で述べたような利点が汎用コードにはあること、また信頼性が高い非線形解析コードの開発には多大な手間を要すること等が理由として考えられる。

4. 非線形解析の現状認識と将来展望

非線形解析を行う際には、計算コストや計算結果の信頼性等に関するさまざまな問題に遭遇することになり、苦労や工夫をしながら計算が進められているものと考えられる。ここでは、現状の非線形解析に対する満足度、問題点、対処法について考察を加えた後、非線形解析へのこれからの期待についても言及する。

(1) 現状の非線形解析に対する満足度

現状の非線形解析に対する満足度をみると、図-16のようである。全体的に、“信頼性は不十分であるが、

かなり参考になる”とする回答が多く、専門別での地震・耐震系と土質系、および機関別の官公庁・公団等、建設会社、コンサルで特にこの傾向が目立つ。その中で例外は鉄鋼・重工・橋梁の区分であり、ここでは“信頼性は問題ないが、計算コストが不満”とする回答が最多となっている。その傾向は専門別での構造系、機関別の大学でも同様にみられ、最多は前述のようではあるが、非線形解析の信頼性を支持する割合が他に比較してかなり含まれている。

ここで、両極端の選択肢の意味は明確であるが、“信頼性は問題ないが、計算コストが不満”とするのは、非線形問題を解く最初から最後までの手順の煩雑さや費用に問題はあるが、その理論性や結果の合理性は認めるという立場と考えられる。2.(2)で述べたように、種々の非線形問題が近年現実には解かれるようになったのはいうまでもなく電算機の使用を前提としており、この意見に含まれる不満の多くはその利用環境や計算能力に関するものである。将来の電算機環境の整備によりかなりの部分が解消されるものと思われる。一方、“信頼性は不

- ▨ 非線形解析に特に不満はない。
- ▨ 信頼性には特に問題はないが、計算コストの面で不満。
- ▨ 結果の信頼性は十分ではないが、かなり参考になる。
- ▨ 信頼できず、ほとんど参考にならない。
- ▨ 無回答(非線形解析に関係しない人)

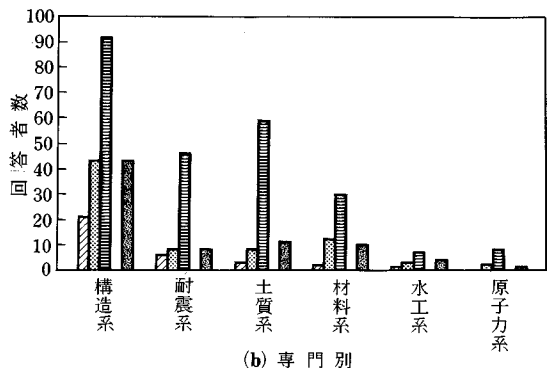
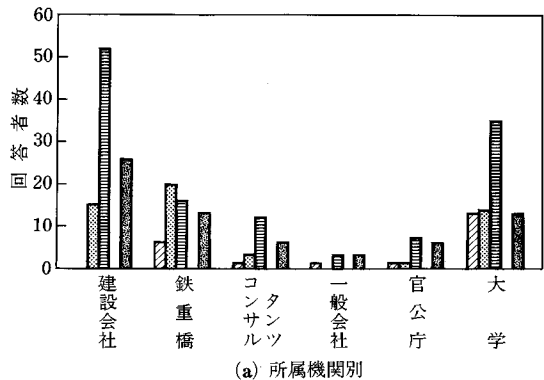


図-16 非線形解析に対する満足度

十分であるが、かなり参考になる”を厳しく判断すれば、現行の非線形理論の必要性や有意性（たとえば、線形理論に比較して）は認めるが、それ自身で問題を解決する解析法としてはいまだ不十分、との判断とみることができる。これは、非線形解析そのものの信頼性が十分でない領域と考えることができ、今後さらにその理論性が発展されねばならない分野といえる。ここで、これらの選択肢の間で、図-16の結果を現状の非線形解析の信頼性を認める側と必ずしも認め得ない側とに仮に分けるものとすれば、比較の問題として、鋼構造を扱う分野では、現状の非線形解析理論の信頼性を支持する割合が高いが、それ以外の分野では、解析理論として必ずしも十分ではないとする傾向が強いといえる。

(2) 非線形解析における問題点と対処法

a) 非線形解析における問題点

非線形解析に関する問題点を、計算コストがかかりすぎるという問題と、信頼性が十分でない場合があるという問題とに分け、このうち、非線形解析結果の信頼性に関して具体的に問題とされていることを図-17に示す。

まず、多くの人が指摘しているように、構成則モデルに必要な材料定数やパラメーターを設定するためのデータが欠けていたり、そのために適当な与え方をせざるを得なかったりする、という問題がある。表-1, 2に示されるように、回答者の中に建設会社で土構造に関与している人が多いことを考えれば、土の構成則モデルが精密になるほど、実験や現地で簡単に得られる限定されたパラメーター以外に、より多くのパラメーターを必要とするというような実状をかなり反映した結果であるといえることができる。

また、このような材料パラメーターのほか、増分パラメーターや、収束判定基準のパラメーターなどの与え方

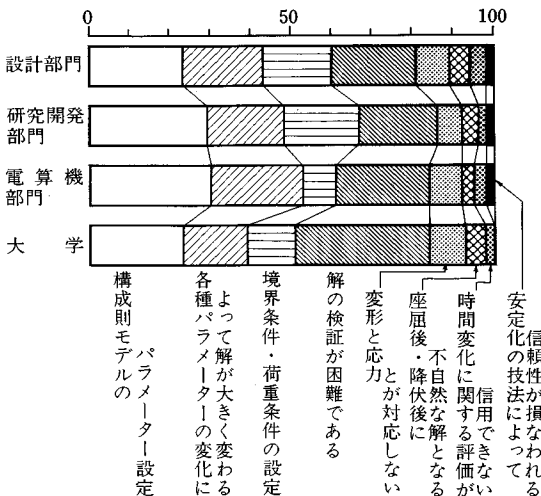


図-17 非線形解析結果の信頼性に関する問題点

によって解が大きく変わることがあるという問題も多くの人が指摘している。これらは解析対象問題を記述する諸データから直接的に決めることができないパラメーターであることが多く、その設定にはいっそうの困難が伴うことになる。さらに、設計部門の人と研究開発部門の人が比較的多く指摘しているように、境界条件や荷重条件の設定に苦勞することも、大きな問題の1つである。これらの、計算上のパラメーターや荷重条件、境界条件の設定の問題については、大学以外の人が指摘している割合に比べれば大学の人が指摘している割合は低く、大学で研究と関連して行われている解析では単純化されたり理想化されたりした問題を扱うことが比較的多いことと比べ、実務では必要によっては相当に複雑な問題でも解析しなければならないという状況があることに基づいた結果であるといえよう。

解析した結果を検証することが困難であることも、重要な問題点として多くの人が指摘しているが、前もって設定されるべき解析条件に不確実な要因が種々あることが、困難さを増しているものと思われる。

一方、非線形解析に関する計算コストや手間の面での問題点としては図-18に示すような項目が挙げられる。計算時間がかかることのほかに、計算モデルの作成に手間やコストがかかること、要素分割のしかたや、収束判定基準の設定のしかた・収束しないときの対応のしかた、についての適切な指針がないことを多くの人が指摘している。この中で、計算モデルの作成について大学の人があまり指摘していないが、これも前述したように実務と大学とで扱われる解析モデルの複雑さに差があることが理由であると思われる。

このように、非線形解析に関して問題となっているこ

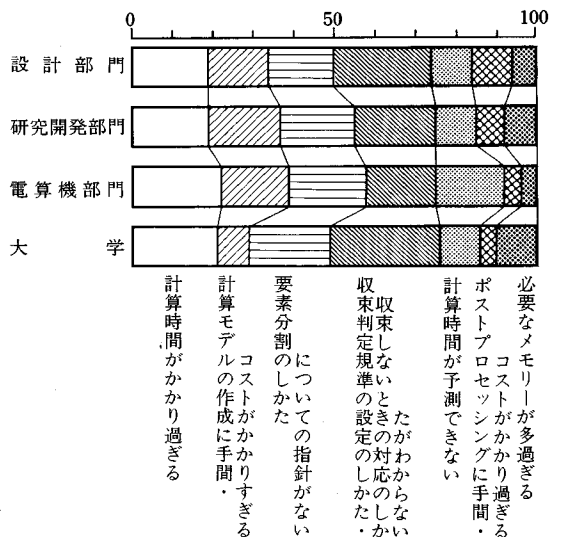


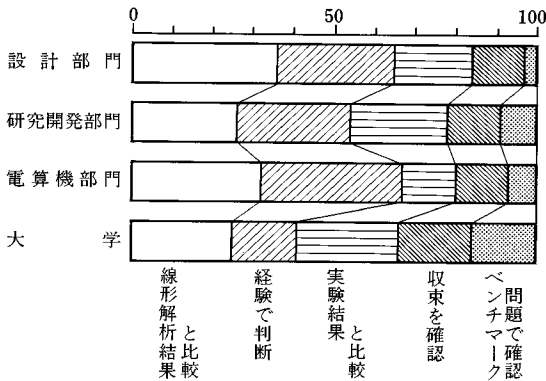
図-18 計算コストや手間の面での問題点

とは、増分計算や収束計算のプロセスに関する問題や、それに伴って計算コストが多くなるという問題のほか、どのようにして解析モデルを設定したらよいかという点についての困難も大きな問題としてとらえられている。これらの問題がある中で、実際にはどのような対処がされながら非線形解析が進められているのかについて次に述べる。

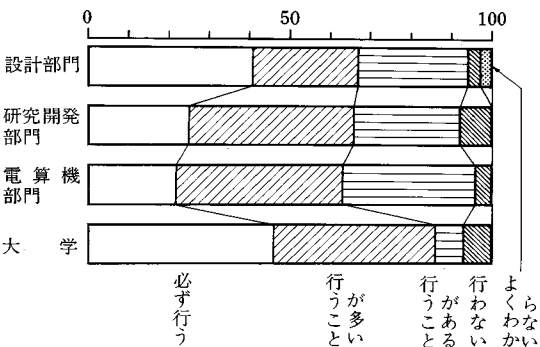
b) 問題点に対する対処法

図一17で、解析結果の信頼性の検証が難しいことが非線形解析に関する問題点として多くの人に指摘されていることを示したが、このことを指摘した人が実際にどのようにして解析結果の妥当性を判断しているかを図一19に示す。これによれば、企業では線形解析結果と比較することと経験によって判断することの2つが主な方法となっている。経験による適切な判断が要求されているということは、解析対象の現象に対する知識や理解、あるいは力学や数値解析のしっかりした素養を有する人が必要とされていることをうかがわせる。なお、この回答は大学の人に少ないが、これは研究上解析結果を検証するときには、もっと明確な規準で評価する必要があるためと考えられる。

線形解析を非線形解析と関連して行っている割合は、



図一19 非線形解析結果の妥当性の判断

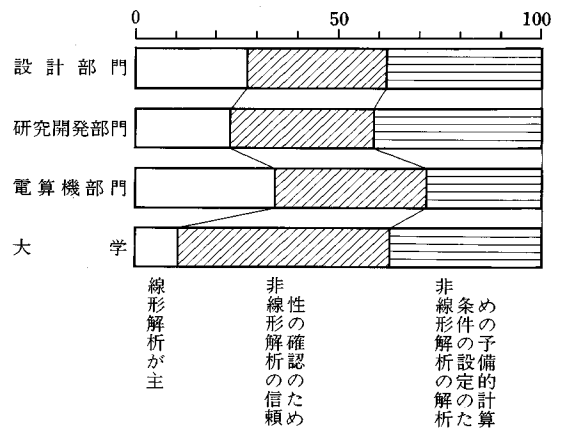


図一20 非線形解析との関連での線形解析

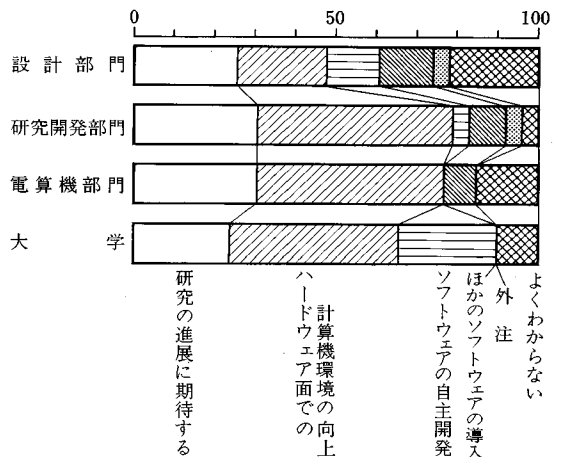
図一20に示すようにきわめて高い。ここで線形解析を行う理由には、図一21に示すように線形解析の方に重きが置かれている場合も含まれているが、そのほかに、非線形解析の信頼性を確認したり、非線形解析の解析条件を設定するための予備的計算として行ったりしている場合がかなりある。また、記述回答の中には、非線形解析によって非線形性の程度を知り、線形解析で判断できる範囲を見定めるという対応のしかたも指摘されている。いずれにしても、非線形解析を主体として線形解析がそれを補助するような解析の進め方が、実務においてもかなり多く行われているようである。

次に、現在非線形解析には計算コストや手間の面で問題があると考えている人、あるいは解析結果の信頼性について問題があると考えている人が、それぞれ問題点に対して今後どのように対処しようと考えているかを図一22, 23にまとめた。

計算コストや手間の面で問題であると考えている人の



図一21 線形解析を行う理由



図一22 計算コスト・手間の問題への対処方法

場合には、図-22に示すように計算機の性能がもっと向上すれば問題が解消されると考えている人と研究の進展を期待している人が多い。これは図-18に示した具体的な問題点と対比すれば、計算にかかるコストが下がれば非線形解析がもっと実行しやすくなるという判断と、要素分割や収束判定に関する指針に関する問題点のように、単にそのことだけでは解消されない問題があるという判断との両方に基づいた結果であると考えられる。

一方、信頼性について問題があると考えている人の場合には、図-23に示すように非線形解析に関する研究がもっと進むことを期待している人がほとんどであり、図-17に示した具体的な問題点と対比すれば理解できる結果であると思われる。

非線形解析はさまざまな問題を抱えてはいるが、実務や研究における必要性の高さから実施されており、今回の調査によって指摘された問題点を解消する方向で非線形解析に関する研究がさらに積み重ねられていくことが大いに期待されているものと考えられる。

(3) 非線形解析のこれからの位置づけ

本調査に関する限りどの分類においても非線形解析の必要性は明確に支持されているが、技術開発と研究上では、その位置づけが多少異なる。後者の観点では、おおむねどの分野でも“研究上の鍵”として評価されており、特に大学ではその傾向が強く、明確な研究対象とされている。一方、技術開発の立場からみると、“必要であるが、あくまでも補助的に”とする意見が、“技術開発上の鍵”と大きくは変わらないものの、最多となっており、設計施工の過程の中での今日の問題が、必ずしも非線形解析に直接関係するとは限らないことを表わしている。

大学や大学院での非線形理論の教育のあり方について

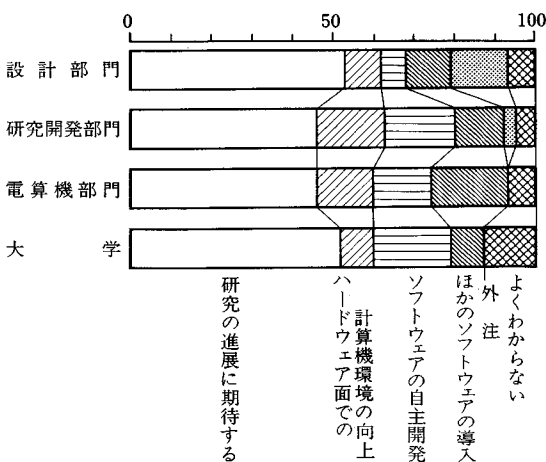
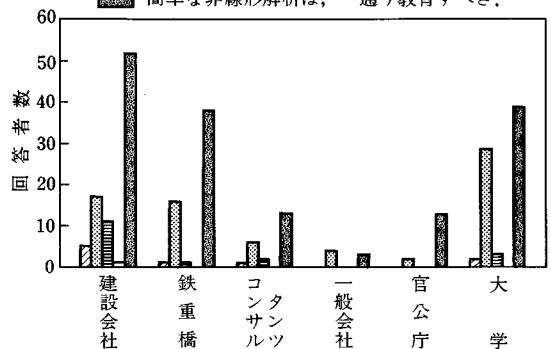


図-23 信頼性の問題への対処方法

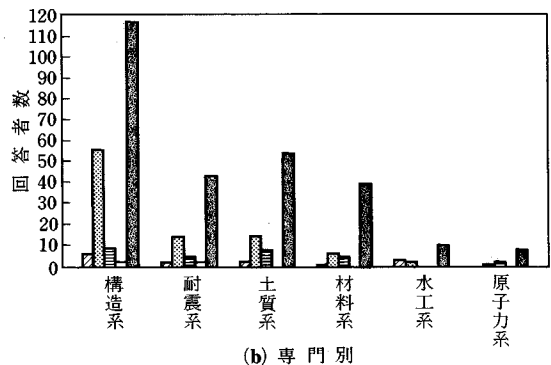
の調査結果を、図-24に示す。各区分で、“簡単な非線形解析は一通り教育すべき”が最も多い。その中で、機関別での大学と鉄鋼・重工・橋梁、および専門別での構造系では、“基礎となる力学理論は重視すべきだが、数値解析までは不要”とする割合が比較的大きいのが目立つ。このことについて、次のように考えられる。全体的に、その分野の問題解決のための非線形理論が必ずしも完備しているわけではなく、それとは別に簡単な非線形解析は教育されるべきとするのが多いが、それでも、非線形理論が比較的確立されている鋼構造に関係する分野では、その基礎となっている力学理論は教育すべきとする傾向にあるものと考えられる。これは、前述の非線形解析に対する満足度の結果に整合する。材料非線形と幾何学的非線形を区別している回答は少ないが、それでも、全体的に材料非線形だけでも教育すべきとする方が、幾何学的非線形だけの教育よりも多く、機関別での建設会社や専門別での土質系で特にそれが目立つ。

将来における非線形解析の必要性をみると、全体的に、

- 線形解析ですら不十分であり、非線形解析まで教育する必要はない。
- 基礎となる力学理論は重視すべきだが、数値解析までは不要。
- 材料非線形の方だけでも教育すべき。
- 幾何学的非線形の方だけでも教育すべき。
- 簡単な非線形解析は、一通り教育すべき。



(a) 所属機関別



(b) 専門別

図-24 大学/大学院での非線形解析教育のあり方

“設計に非線形解析が必要となり、この面の教育はさらに重要となる”とする回答が多かったが、なかでも、機関別での建設会社および専門別での土質系ではその割合が突出している。(2)a)で述べたように、これらの分野は、土の材料非線形挙動等に関係した解析が不十分と認識されている領域であり、設計のうえでこれらの問題の解決が強く要望されているものと考えられる。他方、鉄鋼・重工・橋梁および構造系においては、前述の選択肢と“ごく一部の人を除いて、あまり重要とはならない”および“非線形解析よりも、基礎となる力学教育が重要”の3つが同程度の支持となっていた。また、大学では、その社会的役割より十分理解できるが、“非線形解析よりも、基礎となる力学教育が重要”が最も多く、その半数程度の割合で他の2つが続いている。

以上をまとめれば、次のようにいえるのではなからうか。大学等では、教育としては全体的な力学教育を前提としているが、研究のうえで、非線形問題が1つの大きな柱となっていることがわかる。そこでの、理論としての着実な進展は十分うかがえるが、それらが実際の問題を十分解決する域に達しているかどうかは、分野によって異なる結果となっている。鋼構造を主な対象とする分野では、現行の非線形解析の有効性がある程度認知されており、全体の研究・技術開発の中での一定の落ち着いた位置づけがなされていることが感じとれる。しかし、その他の分野、たとえば、土やコンクリートの材料非線形挙動、それらが連成する構造物としての震動挙動等を明らかにすることは、設計の現場において強く求められているが、それらの実際の必要性に対して必ずしも十分な現状ではないことがうかがえる。現在、活発な研究・開発活動がなされている状況にあるといえる。

5. あとがき

本報告では、「構造工学における計算機利用と数値解析に関するアンケート調査」の膨大な集計結果¹⁾の中から、非線形数値解析に関連する項目を選んで整理し、検

討を加えた。非線形問題の数値解析については過去にアンケート調査を行った例はなく、非線形数値解析の現状を知り、これからの方向性を考えるうえで参考となれば幸いである。

本報告は委員会にて十分な議論を経たものであるが、委員会としての主観的な考察も多く含んでおり、調査結果が必ずしも正確な形で表現されていない部分もあるかと思われる。アンケート集計結果の生データについては集計結果報告書¹⁾を参照されたい。また、今後、異なった面・立場からの報告を続けるとともに、本報告で触れなかったアンケート項目についてもその結果を詳細に検討し、報告する予定である^{2),3)}。

なお、アンケート調査を含む本分科会の研究活動に対して、文部省科学研究費(総合研究(A)-62302039)の交付を受けている。ここに付記するとともに、アンケートに協力下さった方々に深謝の意を表する次第である。

最後に、当分科会の構成委員は以下のものであった。

主査：吉田 裕，委員：阿井正博*，阿部和久，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，中村秀治，野上邦栄*，野村卓史*，長谷川彰夫，林 正，檜貝 勇，平嶋健一，前川宏一，前川幸次，増田陳紀[幹事]，松田 隆，山口宏樹*，山崎 淳，吉川弘道，吉田 博，依田照彦[幹事]，黛 巖[事務局]
(*は本報告の執筆担当委員)

参 考 文 献

- 1) 土木学会構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：構造工学における計算機利用と数値解析に関するアンケート調査—集計結果報告書，1988年11月。
- 2) 土木学会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Ⅵ部門，1989年3月。
- 3) 土木学会構造工学委員会構造力学小委員会非線形解析分科会：計算機利用に関連した構造力学教育の現状と将来，土木学会論文集第Ⅰ部門(投稿準備中)。

(1989.2.6・受付)