

I-4 実環境を扱う学生のための数値構造実験の導入と問題点

New Approaches for Educational Numerical Experiments in Structures

伊藤 義人* 平野 徹** ハマード・アミン*** 二宮公紀****
 Yoshito Itoh Tohru Hirano Amin Hammad Kohki Ninomiya

【抄録】本研究はパソコンを用いて学生のための数値構造実験を行うためのシステムの導入と問題点を扱っている。本システムは、振動解析プログラムとプリ・ポストプロセッサを持ったFEM弾性解析プログラム及びデータベースを組み合わせて作成されている。本システムを用いることにより、危険を伴う実験、模型実験では時間がかかりすぎる実験など、今まで学生模型実験では扱うことが難しかった実験についても行うことができるようになり、単なる知識の吸収だけでなく学生自身が考えながら種々の実験が行えるように工夫した。その結果、学生が興味を持ち積極的に取り組む数値実験システムとなった。また、このシステムを用いて実際に学生実験を行い、実験終了後に学生にアンケートを取ることによって、数値構造実験の利点や欠点、数値実験システムの今後の課題について検討している。

【Abstract】 This paper introduces a student numerical structural experiments system using PC and discusses the related problems. The proposed system has two programs: vibration analysis and FEM elastic analysis with pre- and post-processors. In addition, databases of experiments' data are included. The system can simulate the model-based experiments that are dangerous or difficult, or need long time to prepare the model. The students not only absorbed the knowledge but could also participate effectively in the numerical experiments. As a result, the students found interest in the numerical experiments and were involved positively. The system has been used in actual education and a questionnaire has been collected from the participating students. The questionnaire showed the advantages and disadvantages of the numerical structural experiments and helped in indicating the future research topics.

【キーワード】 学生実験, 数値実験, 振動実験, FEM解析, パソコン, データベース

【Keywords】 Educational Experiment, Neumerical Experiment, Vibration Experiment, FEM Analysis
 Personal Computer, Database

1. まえがき

現在、各大学や高専において行われている学生構造実験は、指導者のもとで、学生が実際に模型構造物を対象にして計測器を取り付けて実験を行っていることが多い。従来、名古屋大学工学部土木工学科においても構造実験として弾性実験、弾塑性実験、振動実験が模型を使って行われていた。しかし、一般に模型実験では、構造工学上は重要であるが時間が非常にかかる実験、危険を伴う実験及び実構造物を直接モデル化し

た複雑な構造実験を行うことはきわめて困難である。また、模型実験では限られたパラメータの実験しか行うことができず、学生が自分自身で考えて主体的に取り組むことも困難である。さらに模型実験は一部の積極的な学生のみが行い、他の学生は何もしないという欠点も持っている。

上述のような模型実験の欠点を解消する手段としてコンピュータを用いた数値実験が考えられている。欧米においては構造解析の一部にコンピュータによる解析を組み込み、ラーメンの形状と荷重条件による応力

* 正会員 工博 名古屋大学助教授 工学部土木工学科
 ** 学生会員 名古屋大学工学部 工学部土木工学科
 *** 正会員 博士(工学) 名古屋大学助手 工学部土木工学科
 **** 正会員 工博 鹿児島大学助教授 理学部情報処理センター

の変化を学生により深く理解させるのに役立っている例がある^{1)・2)}。米国では、科学教育にコンピュータを有効利用するためにマルチメディアを利用した ACSE プロジェクト (Advanced Computing for Science Education) も進められている。

数値実験の利点としては、以下のようなことが挙げられる。1) 模型を設置する手間がないため実験にかかる時間が模型実験より短いため考察の時間が十分にとれる。2) 実際に模型や機材を扱わないために危険を伴わない。3) 数値実験を行うにはコンピュータとソフトがあれば良く、実験用の特別な機材を必要とせずに種々の実験が行える。4) 同じ条件下で何度でも繰り返して実験を行える。5) モデルや種々のパラメータを変えらることにより学生自身が考えながら多様な実験が行える。6) 実験に対する特別な訓練を受ける必要がなく、授業時間に拘束されずに実験を行え、構造物の挙動などに対する感覚的な理解ができる。逆に数値実験の欠点として以下のことが挙げられる。1) コンピュータが仮定に基づく理論を用いて結果を出すため、実際の構造物の挙動、誤差などのばらつきを見ることができない。2) 実験の手順、機材の扱い方などの経験の蓄積ができない。

本研究では名古屋大学を例とし、数値実験の特性を活かし、欠点をなるべくカバーできる実験方法を考察し、模型実験の代わりとなるコンピュータによる数値構造実験システムを作成し、その問題点を考察した。

学生数値実験として、橋脚の 1 自由度系振動解析プログラムによる振動実験、ブリ・ポストプロセッサを活用した FEM 解析による構造物の形状と応力分布の関係を理解するための実験および一定条件下における構造物の最適形状の作成実験を行った。また、実験終了後に学生にアンケートを取り、それをもとに実験システムについての評価を行っている。

2. 学生数値構造実験のためのシステム開発

(1) 構造実験の概要

名古屋大学土木工学科では、学部 4 年生の構造実験として従来、模型を使って以下の 3 つの実験を行っていた。1) I 形及びチャンネル形断面はりの弾性実験、2) はりの振動実験、3) 連続はりの弾塑性実験。この実験内容の改訂にあたって、1) と 2) を橋脚の数値振動実

験と構造数値解析実験に変更した。3) 連続はりの弾塑性実験は従来行われていた実際の供試体を用いた模型実験を継続し、残りの 2 つの実験を新しく数値実験として試行している。模型実験を一つ残したのは、実験誤差と計測器等にふれる機会をつくるためである。また、数値実験に対する経験が不足しており、当初予定していた LAN 結合されたパソコンが十分そろわなかったためでもある。実験は、学生 50 人を 6 班に分け、1 班 8 ~ 9 人で行った。数値実験においては本年度は 1 班に対しパソコン 2 台を割り当てている。また、実際に実験を行う前に実験マニュアルを学生に配布し、2 時間程度の講義を各実験に対して行った後に実際の実験を行っている。

(2) 数値実験のための環境

名古屋大学では、大型計算機、ワークステーションおよびパソコンなどの異なる種々の計算機が利用可能である。コンピュータの学生実験への適用を考えたとき、大型計算機やワークステーションを用いた実験シミュレーションはメモリーや計算時間の制限がほとんどないため、複雑なものを詳細に再現できる事が予想される。しかし、大型計算機やワークステーションに熟練し、そのアプリケーションを使いこなすためにはかなりの時間が必要である。また、ID や料金の問題も生じてくる。また、学部の学生がいつでも専有して使える必要などを考えると、大型計算機やワークステーションは学生実験には向いていないと思われる。一方、パソコンは安価になってきているために相当普及してきており個人で所有している者も多い。また、最近ではほとんどの小、中学校、高校及び専門学校に、パソコンが導入されつつあり、技術課の授業などで、パソコンの使用法や、アプリケーションソフトの利用法が学ばれている³⁾。そのため、数年後の大学入学者のほとんどがパソコンに慣れ親しんでいる可能性があり、その使用についてもかなり熟練している事が予想される。そこで、今回は NEC の PC9801 シリーズのパソコンを数値実験に用いた。

パソコンには、BASIC, Fortran, Pascal, C など多様な言語が使用可能であるが、BASIC はプログラムが理解しやすく、必要であれば学生が手軽に書き直すことが可能であるので、学生実験用のプログラム言語としては適していると考えられる。そこで、local 変数

が使えないなどの従来の BASIC の欠点を取り除いた新世代の BASIC である Microsoft BASIC Version7.1⁵⁾ を使って実験用プログラムの開発を行うこととした。

(3) 橋脚の振動実験のためのシステム開発

本研究で用いている 1 自由度系の応答解析システム (OVES, One-degree-of-freedom Vibration Experiment System) は、完全弾塑性と実際の復元力特性をモデル化して取り入れた弾塑性応答解析および弾性応答解析を行うシステムである。このシステムは、図-1 のように構造物を 1 自由度系にモデル化したものを用いて解析を行い、解析プログラムでは一般的な復元力の挙動を図-2 のように近似して解析を行い、解析結果として、応答加速度、応答速度、応答変位が得られる。(b) の復元力モデルは、鋼橋脚用に局部座屈が繰り返す荷重により発生するものに対しても適用可能である¹⁾。

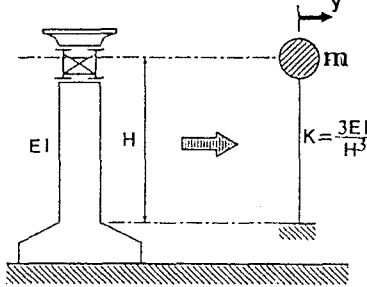


図-1 橋脚のモデル化

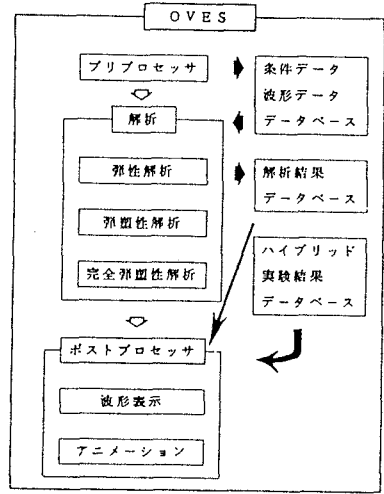


図-3 OVESの構成と機能

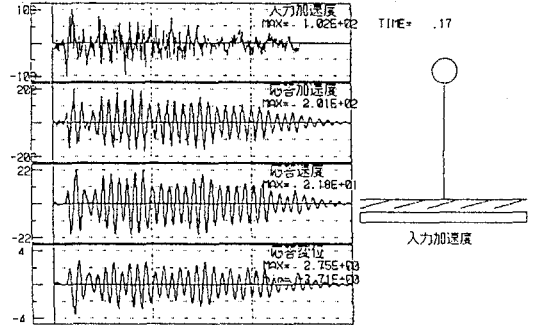
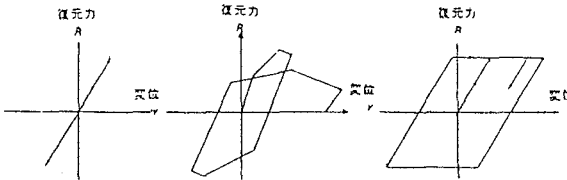


図-4 OVES の波形表示及びアニメーション



(a)弾性解析 (b)弾塑性解析 (c)完全弾塑性解析

図-2 復元力の挙動モデル

本研究では文献4)を参考にして、学生実験用に MS-BASIC⁵⁾ を用いてグラフィック機能を持ったシステムを開発した。このシステムは共振の生じる周波数、固有周期や減衰係数の変化による応答の変化が確認できる機能を持っている。また、模型実験では行うことが難しい実際の地震波を入力して、その応答を見ることも可能である。OVES の構造を図-3 に、結果表示画面を図-4 に示し、その特徴について以下にまとめる。

① 応答変位、加速度、速度の解析データをグラフの形で表示できるため、応答波形の様子、共振の生じる場所などが分かりやすい。

② 応答変位について、実際の実験のように振動の様子をアニメーションを用いて表現できる。

③ 振動数と、振動回数を入力するだけで周期入力波データを作成できる。

④ 供試体データ、入力波データ及び解析結果データを別々のデータベースに登録するため、種々の組み合わせによる解析を簡単に行え、1度解析した結果を何度でも見ることができる。

⑤ 地震波のデータとして、土木研究所が開発し、道路示方書と文献8)に示されている、I種、II種及びIII種地盤の地震波がそれぞれLevel 1 (弾性応答解析用)、Level2 (保有水平耐力照査用)について入っており地震波による解析が手軽に行える。

⑥データベースには、鋼橋脚の実際のハイブリッド実験⁹⁾の結果も予め入っておりパソコンによる解析結果との誤差の検討ができるようになっている。

(4) 構造数値解析実験のためのシステム開発

本研究で用いられている2次元のFEMプログラム(Quick-FEM)は図-5のような構造を持っている。

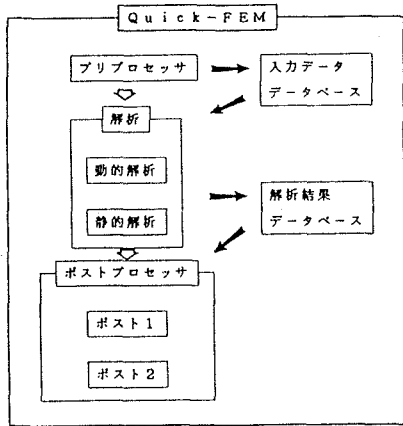


図-5 Quick-FEM の構成

Quick-FEM は、簡単に操作できるプリ・ポストプロセッサを持っており、画面は図-6のようにビジュアルで非常に見やすくなっている。

本研究においては Quick-FEM を学生実験において使いやすくするためにプリ・ポストプロセッサの開発、拡張を行っている。

Quick-FEM の特徴を以下にまとめる。

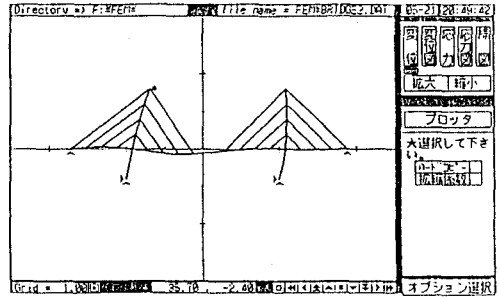
①解析結果を同時に多数画面表示できるようにした。そのため、N-図、Q-図、M-図及び変位図を同時に確認でき、様々な形状を持った構造物の断面力図や応力図を比較しやすくなっている。

②各部材ごとに許容応力図の表示と各接点における応力のグラフ表示ができるようにした。これは、最適形状の考案を学生実験に取り入れているために、実験を行いやすくするために作成したものである。

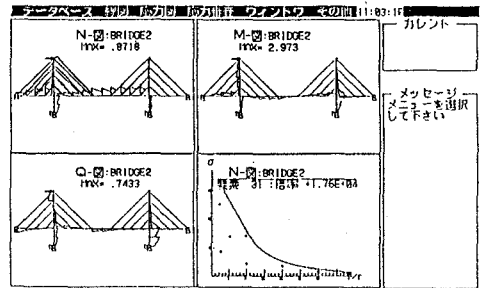
③データベースには、各実験の参考用のデータファイル以外にも多数のデータファイル(はり構造物、斜張橋など)がそろっており学生が自由に参照できるようになっている。

④学生実験を行う上でデータの数が増加されると思

われるため、データベースの階層を2層にしてある。1層目に学生各自用のディレクトリを作成し、その下に各自で作成したデータファイルを保存する。このために学生のファイルの管理が簡単になっている。



(a) ポスト1画面



(b) ポスト2画面

図-6 Quick-FEM ポストプロセッサ画面

3. 学生数値構造実験の概要と課題内容

本研究において作成された数値構造実験システムを用いて名古屋大学土木工学科において実施されている実験について以下に説明する。

(1) 橋脚の数値振動実験

橋脚の数値振動実験は、OVES を用いて行う数値振動実験であり、以下のような2つの実験項目から成り立っている。

①周期波外力を入力したときの応答を調べる実験

この実験は、構造物の固有周期と共振についての関係を学生が理解し、さらに減衰定数を変化させて数値実験を行うことによる減衰定数の影響についても学生が理解できる事を主な目的として構成されている。

②地震波外力を入力したときの応答を調べる実験

地震波を外力として用いる実験では、弾性、弾塑性

及び完全弾塑性の復元力を仮定して応答解析を行い、その結果をデータベースに予め格納されている実際の供試体を用いたハイブリッド実験により得られた結果と比較することにより各解析の特徴についての理解を学生ができる事を目的として構成されている。地震波は土木研究所により作成されたⅠ種地盤、Ⅱ種地盤及びⅢ種地盤に対しそれぞれLevel 1, Level 2の計6つが用意されており、学生はこれらの地震波を任意に選択して応答解析を行う。このために地盤種による応答の特性についての認識を学生に与えることができる。

(2) 構造数値解析実験

構造数値解析実験は、Quick-FEM を用いて構造物の弾性解析を行う実験であり以下のような4つの実験項目から成り立っている。

① Quick-FEM の修得その1

この実験は、Quick-FEM のシステムの操作を学ぶとともに、あらかじめ入力データがつくられているトラス、平板(図-7(a))の解析を行う。この実験を行うことにより学生は、トラスの形状と各部材の役割について、また穴あき板の応力集中、メッシュの切り方の影響について理解できるような構成になっている。

② Quick-FEM の修得その2

Quick-FEM のプリプロセッサの使用法を学ぶとともに、2層ラーメンに色々な斜材を挿入して解析を行う。この実験は、学生が斜材の形状(図-7(b))とそれによる応力分布の変化を理解できるような構成になっている。また、時間的余裕のある学生に対して様々な形状のラーメンを考案し解析するように指示してあるので、学生がさらに深く実際の形状のラーメン構造物に対する認識を深めることが期待できる。

③ 片持ちトラスの最適形状実験

学生に、使用できる部材の長さ、形状等の諸条件を与え、その条件の中で最も強い形状のトラスを考案する実験である。この実験は、自由にトラスを考案させるものであり、学生の創造性を高め、また「①Quick-FEM の修得その1」で学んだトラスの特性についての復習もかねている。作成したトラスを道路示方書に規定された座屈を考慮した許容応力を考えて構造物の最大許容荷重の計算を学生が行うようになっている。なお、図-8に示すような例をあらかじめデータベースの中に入れてあり自由に参照できるようになっている。

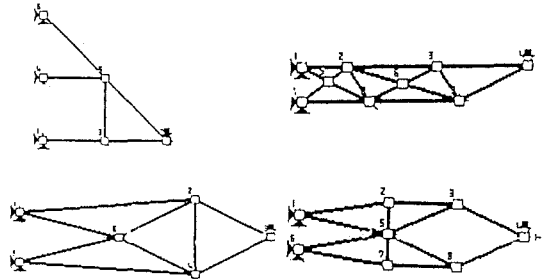


図-8 片持ちトラスのデータベース中の形状例

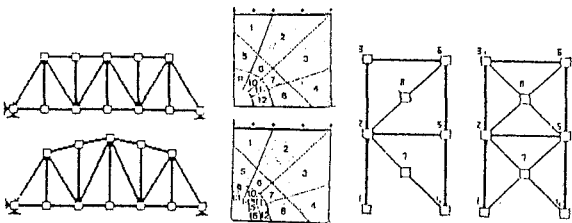
④ 自由課題

自由課題は、時間的に余裕のあるものに与えられ、身の周りにあるラーメンやトラス構造物及び複合構造物を数値モデル化し Quick-FEM を用いて解析を行う実験である。この実験を行うことにより、学生が身の周りの構造物に対して関心を持ち、数値実験に積極的に取り組む姿勢を引き出すねらいがある。

4. 学生数値構造実験の実施状況と今後の問題点

(1) 橋脚の数値振動実験実施状況

実験は、最初は多少とまどっている学生が見られたが、OVESの操作が簡単であり多様な実験を手軽に行える事が分かるにつれ OVES に対する興味がわいてきたようである。実験の最初にあらかじめ講義の時に渡してあるマニュアルを補足する形で操作方法を実際のパソコンで教えたために、時間不足で全ての学生が実験全てを授業時間内に行うことはできなかった場合があった。しかし、常に実験室を開放しており、学生が空いている時間に残りの実験を行えるようになっているため、ほとんどの学生が積極的に残りの実験を行った。



(a) トラス、穴あき平板の例 (b) 斜材挿入の例

図-7 データベースの入力データの例

学生が実験により作成した共振の例を図-8 (a)に、弾性と弾塑性の復元力を用いた数値解析結果とハイブリッド実験結果との比較を図-8 (b)を示す。

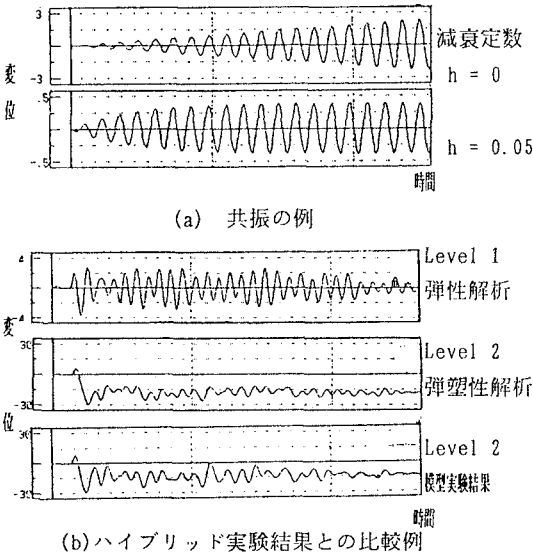


図-8 学生の作成した応答波形例

(2) 構造数値解析実験の実施状況

実験実施日までに「③片持ちトラスの最適形状」実験用のトラス案を考案することを学生に課した。実験当日にはほとんどの学生がトラス案を作成してきていた。学生は始めのうちは Quick-FEM の操作に多少とまどっていたが Quick-FEM のプリ・ポストプロセッサがビジュアル的あることから実験に対して始めから興味を持って数値実験を行っていた。指導者側にとっても初めての試みであるために実験の進行があまりスムーズに行かない例もあったが規定の実験時間内(約3時間)ではほとんどの学生が実験を終了した。

時間内に実験を終了できなかった学生も、常時開放されている実験室で積極的に実験を行っており、その積極性は、模型実験にはない特徴と言える。

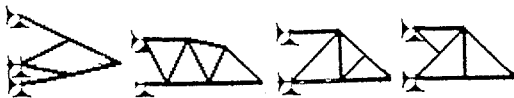


図-9 学生の作成したトラスの例

特に片持ちトラスの最適形状を探す数値実験においては、学生は Quick-FEM を用いて図-9 に示されている

ような多様な形状の解析を行って結果についての比較を行っていた。

(3) アンケート調査の概要と結果

橋脚の数値振動実験、構造数値解析実験に対するアンケートの概要を表-1 に示す。また、回答は学生が答えやすいように5段階評価を基本として作成してある。アンケート結果について以下にまとめる。

表-1 アンケートの構成及び内容

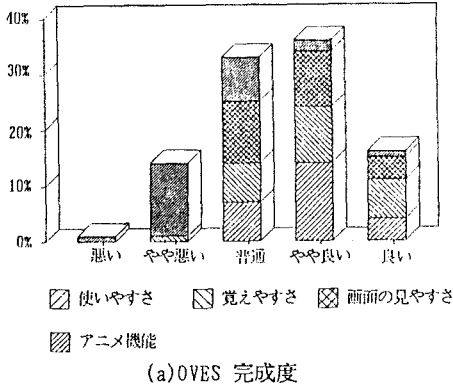
アンケート内容	調査目的
実験システムの完成度に対する質問	実験システムがどの程度学生に受け入れられているか、又その操作性に対する調査
学生の積極性、教官の指導法に対する質問	学生がどの程度積極的に実験を行ったか、教官の対応は適切であったかに対する調査
実験内容の理解度に対する質問	数値実験を行うことにより学生がどの程度理論や現象についての理解を示したかの調査
数値実験と模型実験との比較調査	一般的に言われている数値実験の長所短所を学生に答えてもらい、その有用性についての調査
実験の感想、システムの改良	実験の感想、システムの改良点についての調査

(a) 実験システムの完成度に関する調査

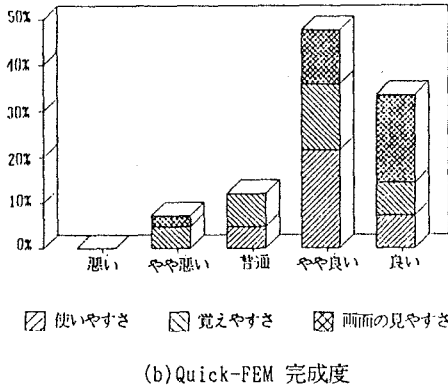
OVES, Quick-FEM のそれぞれのシステムに対する完成度に関する質問のアンケート結果を図-10に示す。図-10から分かるように両システムともかなり良い結果を示しており、学生に受け入れられているといえる。

(b) 学生の積極性に関する調査

数値実験では、全ての学生が積極的に取り組み、種々のパラメータについて自分自身で考えながら取り組むことができる可能性がある。構造数値解析実験に対しては、学生はかなり興味を持って積極的に行っていた(図-11(b))が、橋脚の数値振動実験に対しては余り良い結果(図-11(a))を得られていない。この原因は、橋脚の数値振動実験に用いたパソコンが Quick-FEM で用いたパソコンよりスピードが遅いこと、パソコンが各班2台しかなく学生全員が同時に操作できないことが考えられる。このことは、アンケート中の実験の感想として、「1人1台のパソコンがほしい」、「パソコンのスピードが遅い」などが数多くあったことで裏付けらる。

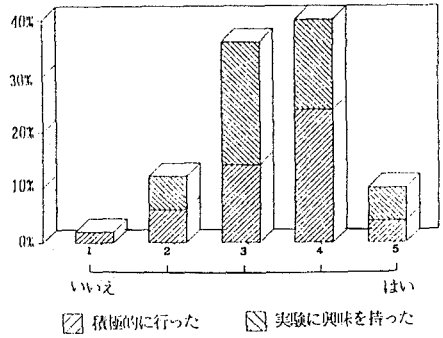


(a) OVES 完成度

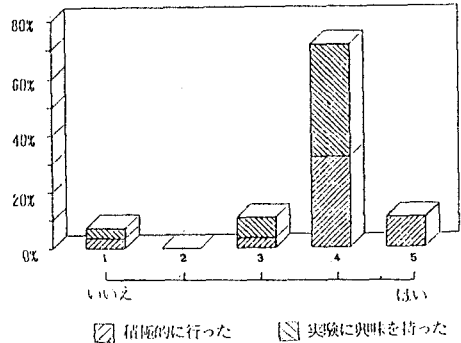


(b) Quick-FEM 完成度

図-10 各システムの完成度に対する調査結果



(a) 橋脚の振動実験に対する積極性



(b) 構造数値解析実験に対する積極性

図-11 数値実験への興味に対する調査結果

(c) 数値実験と模型実験との比較

数値実験と模型実験を比較したアンケート結果について図-12に示す。ここでは、数値実験に主眼を置いて回答をしてもらった。アンケートの内容は以下の通りである。

①実物の挙動：数値実験の長所として、模型実験では行えない実物の挙動を見ることができますがあなたはそう思いますか。

②実験時間：数値実験の長所として、準備時間や実験時間が短いことが挙げられますがあなたはそう思いますか。

③感覚的理解：数値実験の長所として、同じ条件下で何度でも実験でき、又各種条件下で実験できることが挙げられ、構造物の挙動を感覚的に理解できると言われますがあなたはそう思いますか。

④経験の蓄積：数値実験の欠点として、実験装置、測定装置および供試体に直接さわれないため、実験方法などの経験の蓄積とならないことが挙げられます。

そのため、あなたはこの実験を模型実験で行った方がよいと思いますか。

⑤誤差の検討：数値実験の欠点として、理論値との比較をして誤差の検討ができないことが挙げられますがあなたはそう思いますか。

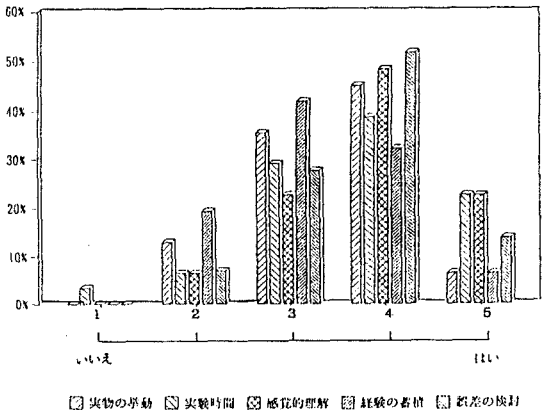


図-12 数値実験と模型実験の比較結果

数値実験と模型実験の比較調査より、数値実験は構造物の挙動の把握、実験時間、感覚的理解の手助けにおいて模型実験よりも有効であるとの回答が得られた。また、数値実験の欠点といわれる実験経験の蓄積とならないことに対しては、学生が実験の感想の中で、「企業に行って役に立つ」と書いている例があるように、供試体の設置の仕方などの経験は積めないが、構造物のモデル化の仕方や、解析方法についての経験を積めることに意義を見いだしているようである。

(4) 今後の問題点と改良点

①OVES の問題点としては、OVES は1自由度系にモデル化できるものを対象にしているが、多自由度系の振動解析を行えるようにし、さらに幅広い実験の行えるシステムの作成が考えられる。

②Quick-FEM は、2次元の弾性解析を対象にしているが3次元の弾塑性解析を行えるものに拡張することにより、より幅広い実験の行えるシステムの作成が考えられる。

③本実験ではパソコンは個別に独立しており学生が作成したデータは、作成したパソコンでしか利用できず他のパソコンで利用するには、一旦フロッピディスクにデータを落とす必要があった。そのため、当初予定していたように LAN (Local area network) を形成するパソコン機器を充実させる必要がある。

5. 結論

模型実験の欠点を解消し、より広範な実験を行い学生の積極的参加のできるような数値実験方法の考案と数値構造実験システムの開発を行った。本研究により得られた主な結論は以下のようである。

①数値実験は、模型実験を行うときよりも準備時間と実験時間を短縮できるため数多くの実験を短期間の内に行うことができ、また、各パラメータを自由に变化させられるため模型実験より幅の広い実験が行えることを実証した。

②パソコンによる数値構造実験を試行し、学生から模型実験よりも積極的に実験に取り組む姿勢を引き出すことができた。

③振動実験は数値実験に変えても、アニメーション機能を用いることにより、模型実験よりも構造物が振

動する様子を詳細に示すことができ、学生に感覚的にかつ深い理解を与えることができることが分かった。

④模型実験により得られた実験結果を、理論値と比較できるようにデータベースとして取り入れていくことにより、誤差に関する論議ができ数値実験の欠点がある程度カバーすることができることが分かった。

⑤数値実験は、様々な実験を手軽に比較的短時間に行えるため、学生の自主的な実験を促すことができ、単なる知識の吸収だけでなく、自分自身で考える学習が可能であることが明らかとなった。

名古屋大学土木工学科における数値実験は、まだ始まったばかりであり、学生に十分な満足を与える実験システムにするためには種々の問題点があると考えられる。アンケート結果により得られたように、LAN で統合されたパソコンの充実、より汎用性を持つシミュレーションソフトの作成などが今後の課題となる。

しかし、今回使用した数値実験システムでもかなりの成果を上げ、学生に構造実験に対し興味を持たせたといえる。これは、数値実験システムがビジュアル的であり自由度が高く、学生はゲーム感覚で実験を行いながら知識を吸収できたからであると考えられる。

参考文献

- 1) David Brohn : Understanding Structural Analysis, BPS, 1990.
- 2) John F. Abel : Project Socrates Workshop, CADIF, 1987.
- 3) Takashi Sakamoto and Sam Stern : Educational Computing in Japan, Educational Technol. RES, 11, 1988.
- 4) 木村欽一 : パソコンで解く振動と力, 丸善, 1989.
- 5) マイクロソフト株式会社 : Microsoft BASIC プログラミングガイド, Microsoft Corp., 1991.
- 6) 伊藤義人, 木曾英滋, 才塚邦宏, 宇佐美勉 : ハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 第49回土木全国大会概要集, 1994. 9.
- 7) 寺田昌弘 : 強震時の構成橋脚の安全性評価法に関する研究, 名古屋大学工学部土木工学科修士論文, 1993.
- 8) 建設省 : 道路橋の免震構造システムの開発報告書, 平成4年10月, pp. 204-216.