

模型を用いて 「ちからとかたち」を理解させる構造教育

福井 實 大野 治代
神農 悠聖 藤本 幹也

Structural Lecture Using Original Models

FUKUI Minoru/OHNO Haruyo
KONO Masami/FUJIMOTO Mikiya

—目次—

§ 1	まえがき	128
§ 2	教材模型について	129
	2-1 荷重・応力度	129
	2-2 力学模型	131
	2-3 地盤・基礎関係	134
	2-4 一般模型	135
§ 3	学生のアンケート調査	138
	3-1 学生の理解度	138
	3-2 学生の感想文	140
§ 4	モルタルアーチの製作	143
§ 5	オープンキャンパスおよび日本建築学会での展示	143
	5-1 オープンキャンパス (伊丹)	143
	5-2 建築学会大会 (中央大学)	144
§ 6	あとがき	144
	参考文献	145

§ 1. まえがき

大手前大学の社会文化学部人間環境学科が設置されて2007年で5年を迎える。人間環境学科には人間環境コースと環境デザインコースがあり、環境デザインコースでは建築学を総合的に勉強することを目標にしている。一級建築士受験資格（実務経験3年、二級建築士は実務経験はなし）取得希望者のために一級建築士コースが置かれている。資格に必要な64単位のうち構造系の授業は、1年次建築構造概論Ⅰ、Ⅱ、2年次構造力学Ⅰ、Ⅱ、3年次環境と建物Ⅰ、Ⅱ、及び4年次環境構造特論の科目があり、合計14単位取得することが必要である。本学は文系の学生が多く、数学や物理の基本的知識の乏しい学生をも受け入れているので、学生に分かりやすい授業を提供する必要がある。

建築を学ぶ学生にとって建築構造学は重要な科目の1つであるが、目に見えない「力」を対象にしているため、理解しがたい分野である。建築物に作用するのは地球の重力による自重が主であるが、短期荷重として扱う積雪荷重、地震力や風圧力のように短期的に作用する水平荷重もある。建築物は立体架構であって、さまざまな力の作用の仕方を理解するには実際のかたちを模型にして視覚的に説明することが必要である。

本報告は、筆者らが構造系の講義において用いた各種の構造模型とその制作意図、学生のアンケート調査と感想などについてまとめたものである。これまで日本建築学会の論文では、このような教材が用いられ発表された例は少なかったため、2001年（関東）と2002年（北陸）に発表した。さらに2003年には中部大学において日本建築学会東海支部の主催で構造模型展示会が催されたので、主な模型作品を展示し諸先生方や学生達に見て頂き関心を集めた。

この模型製作の主な目的は以下の通りである。

1. ものづくりに関心をもつ

建築は生活空間を作るのが目的であり、絵画や映像と異なり、重さがある。

地球上にある全てのものは引力を受けており、ちからとかたちの感覚を養う。

2. もののかたちにひそむ重力感を理解する

ものに作用する重力は必ず支える点があり、荷重は最終的に地盤まで伝わる。

建物に作用する力は骨組みを通して伝わりこの流れを理解する。

3. 建築のスケール感、素材感を理解する

建築は立体的なものであるため、実際に近い模型を用いてスケール感を養う。

§ 2. 教材模型について

2-1 荷重・応力度

1) 集中・等分布荷重

構造力学は建築空間を作るための梁材とそれを支える柱とによって構成される架構を解くことが基本になる。梁を支える距離を自由に変化させる状態を作るために、針金を柱材として埋め込んだモルタル製架台を作成し、梁は針金等の材料である。支点距離と荷重を任意に変化させることにより、梁のたわみと剛性の関係が簡単に理解できる。荷重として、砂を入れたプラスチックケース（約50g／1個）や粘土塊（約80g／1個）を用いており、集中荷重と等分布荷重の説明に役立っている。

単純梁の1点に荷重が作用したとき、この荷重は左右の支点に分割されるがその大きさは、作用点から支点までの距離に関する。俗に「お猿のかごや」として学生に指導している。公式を下に示す。

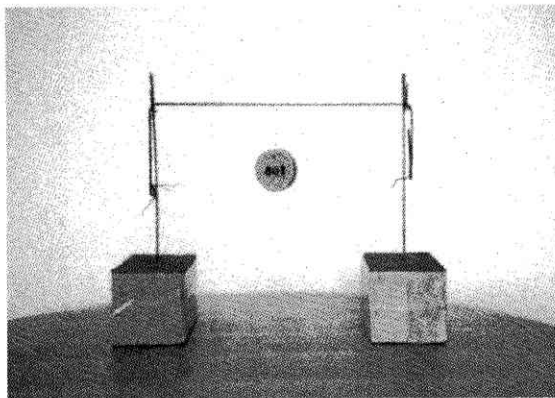
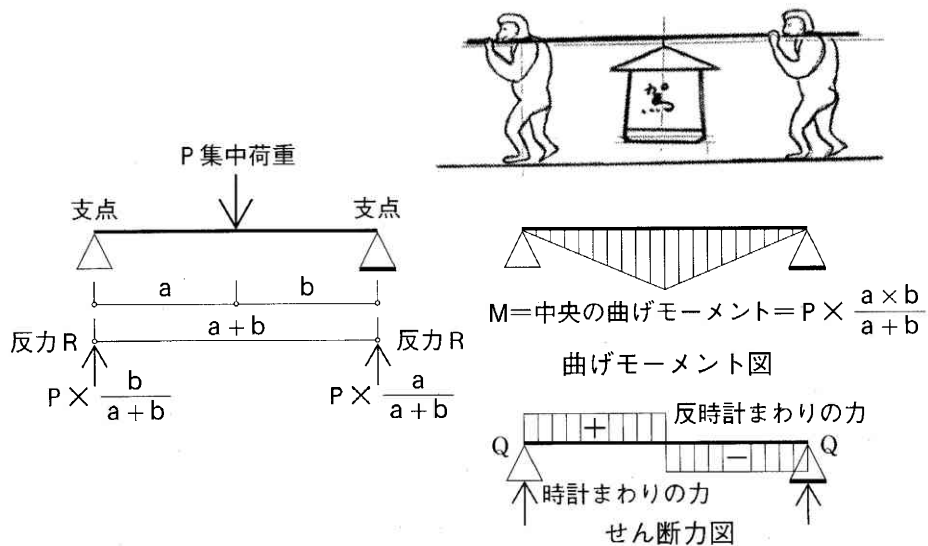


写真 2-1 集中荷重

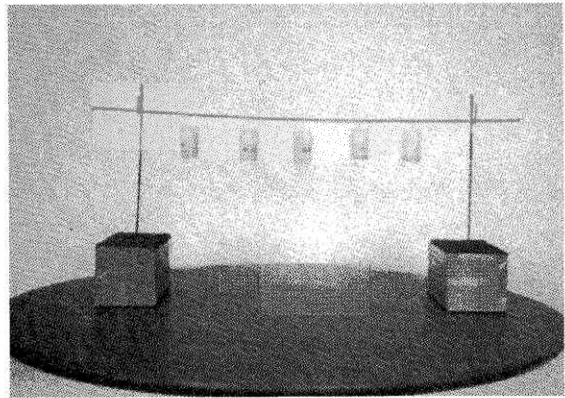


写真 2-2 等分布荷重

2) 標準荷重

力、応力度、荷重度などの概念は目に見えないので、形にして実感することが必要である。モルタルにて1kgの荷重を作成した。荷重度は質量を支える材の断面積で除した値であり、 1cm^2 、 10cm^2 の柱体の上に荷重を載せることで、応力度とは何かを理解することができる。

3) 単位について

構造力学で扱う主な単位は、力の単位としてこれまでkg、t、応力度の単位は kg/cm^2 であった。平成11年10月から国際単位系(SI)に移行し、力の単位はニュートン($\text{N} \approx 102\text{g}$)が用いられることになった。この単位は日常生活において用いていないので、重さの実感がなく理解しがたいものである。そこでリンゴ1個の重さが約100gであることに着目し、リンゴが落ちることから引力を発見したと伝えられるニュートンとリンゴの重量が1ニュートンであることを説明している。補習授業のとき、重さにお札の金額に置き換えて学生に説明したところ、学生たちは力の配分にすばやく反応した。生活実感のないN(ニュートン)を用いていることが、力学を難しい学問にしているようである。

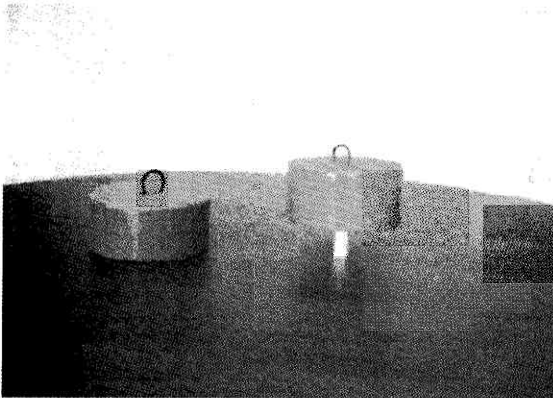


写真2-3 単位荷重

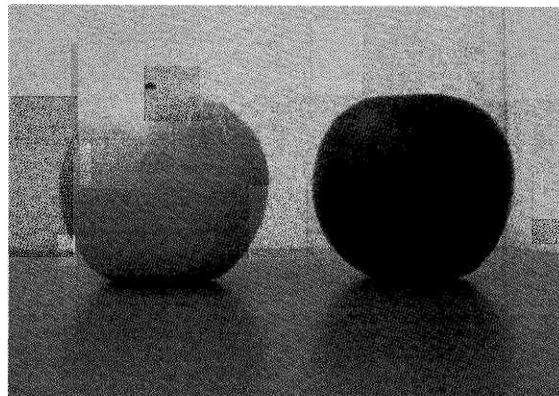


写真2-4 りんご

4) 屋根勾配と三角関数

三角関数は三角形の斜辺に対して対辺を正弦、底辺の比を余弦として表したものである。水平材に対してある角度に対する正弦・余弦の値は、角度が大きくなるに従って変化するが、この模型は角度の変化に従ってこの両者が視覚的に分かりやすく表現できるようにしたものである。建築構造学では屋根に作用する力を屋根面に直角方向と屋根面に平行方向に分けて考える必要がある。三角関数の知識は不可欠である。また、エンパイヤステートビルを例にして水平角が $\sin 12^\circ$ の場合は、水平力が約0.21、 $\sin 18^\circ$ の場合は約0.31であることを示す模型を作成した。

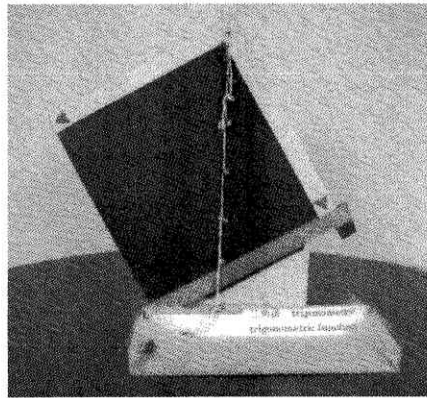


写真 2-5
屋根勾配と力の分力を示す模型

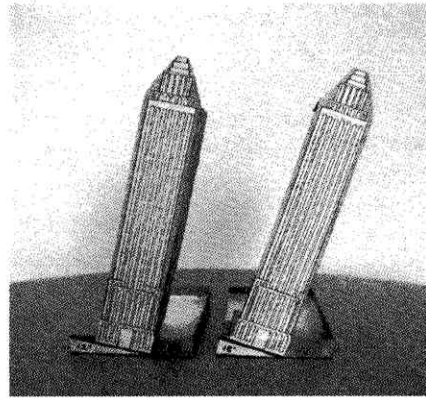


写真 2-6
傾斜角度と水平力を示す模型

2-2 力学模型

1) ビームバランサー

この模型は梁に荷重が作用した場合、曲げモーメントの大きさと支点反力の求め方を理解するための模型である。支持点は自由に回転できるようにしてあり、それに対する支持点は部材を取り外せるようにしている。この部材を取り外すと、棒ばかりとして利用できる。棒ばかりとは天秤のことであるが「荷重が釣り合っている」状態を視覚的に理解するかが、構造力学を理解する基本といってよい。シーソーゲームにおける荷重と距離との関係を理解するのに効果がある。

また、片持ち梁として考える場合、梁の長さや荷重位置を移動させることにより、支持点ともう一方の反力の大きさが変化する。この様子を理解させる「可変式反力算定模型」といべきもので、架構反力の計算を理解するのに有用である。

片持ち梁の公式を示す。

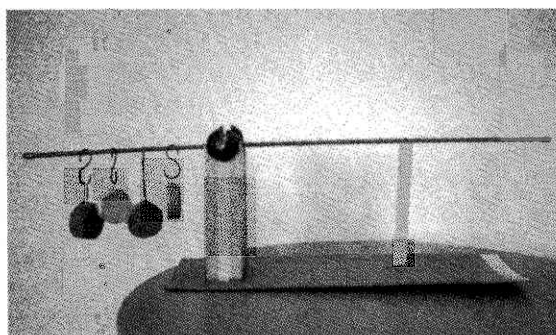
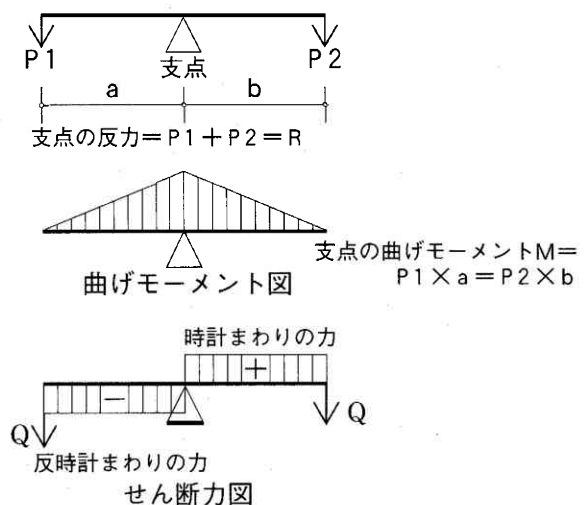


写真 2-7 可変式反力算定模型



2) 山型・平行弦トラス

単純梁には曲げモーメントとせん断力が作用する。トラスは組立て梁であって上、下弦材、束、斜材からなっている。梁材は上側が圧縮、下側が引張りとなる。斜材は支点からの方向によって圧縮か、引張かになる。トラスの説明には、弦材・斜材に紙材とタコ糸、節点にはボルトを用いた。図解法により力を解くことが出来るが、圧縮材は紙材、引張側はタコ糸にすることによってトラスの部材の応力が理解できる。

写真2-8は山型トラス、写真2-9は平行弦トラスである。支点からの方向により、斜材の応力が引張力か圧縮力が理解できるのが面白い。

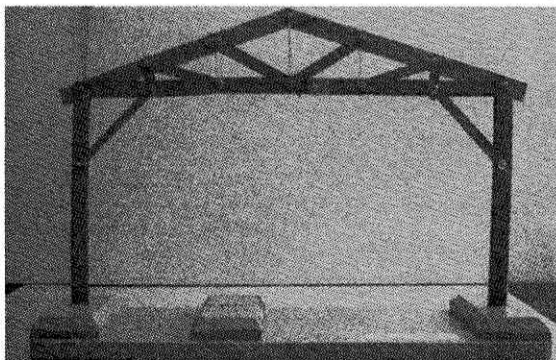


写真2-8 山型トラス

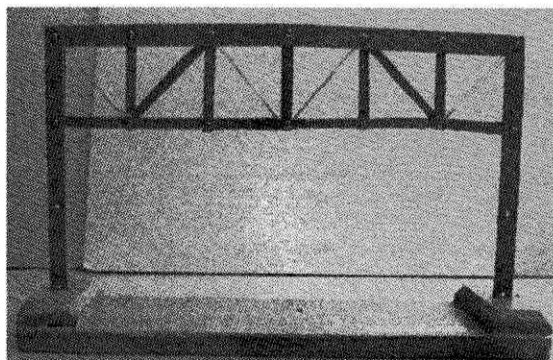


写真2-9 平行弦トラス

3) 片持ち梁

ボックス型の箱の中にプラスチック板を差し込んで片持ち梁を作成した。荷重の位置により、梁の曲げモーメントと撓みの大きさが理解できる。

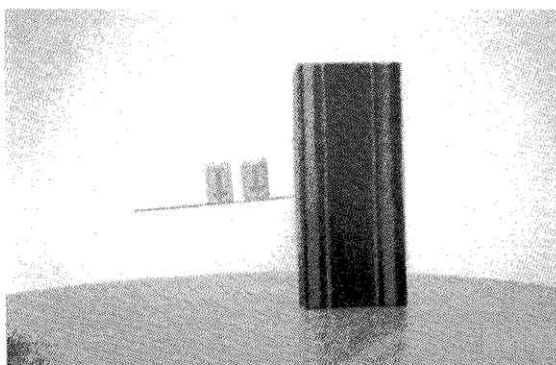


写真2-10 片持ち梁

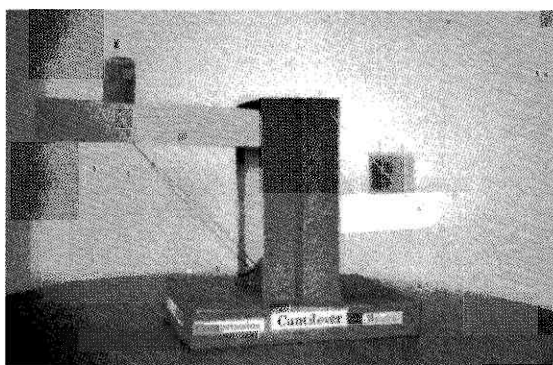


写真2-11 片持ち梁トラス

4) 片持ち梁トラス

片持ち梁をトラスで作成したものである。トラスは弦材と斜材とからなるが、下に斜材があるトラスは上弦材が引張力、斜材には圧縮力が作用する。斜材が上にあるトラスは下弦材が圧縮力となり、斜材は引張力となる。斜材にたこ糸を用いてある。両者の違いも一目に理解できる模型である。

5) 架構

紙材を用いて架構模型を作成した。写真2-12は片持ち梁トラス、写真2-13は2階建て建物である。外力と反力の関係を説明している。平面的な図の説明よりも立体的な構造模型にすることで、深い理解を得られる。このような架構に外力が作用すると反力が支点に作用するが、この構造を解くには1)で説明したビームバランサーの理論を理解した上で、さらに2)のトラスの知識を重ねて理解することが出来る。

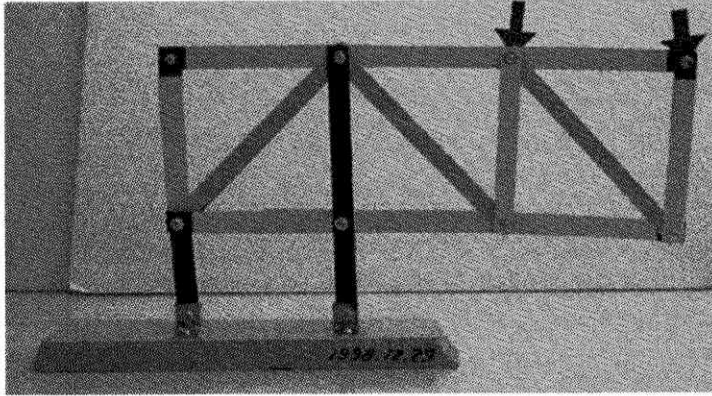


写真2-12 片持ち梁トラス架構

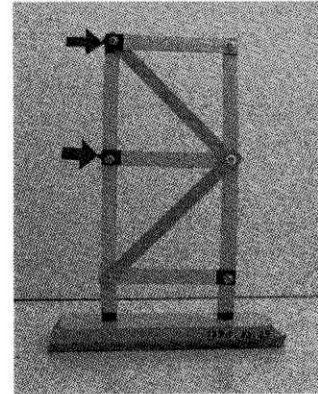


写真2-13 2階建架構

6) 釣鐘堂

建物に作用する鉛直力は、梁を伝わり柱に作用し基礎に伝わる。この流れを最も簡潔に理解するのにこの模型は最適である。柱、梁には割箸を用いて釣鐘堂を作成したもので、釣鐘の重さは4隅の柱に確実に伝わる事が視覚的に理解できよう。



写真2-14 釣鐘堂

釣鐘(風鈴)を集中荷重とした場合の、各柱への伝達力は「お猿のかごや」の理論により、梁の掛け方と釣鐘の位置を変えることにより、梁の反力は柱への力として伝わるの流れを理解できる。

7) 質点

建築構造体の振動現象を説明するために、粘土を質点にした針金の構造モデルを作成した。一質点は平家建、二質点は2階建ての場合を示している。

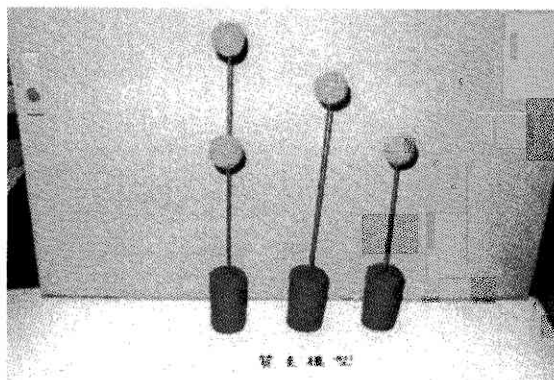
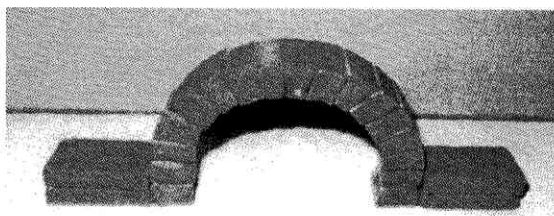


写真2-15 質点

8) アーチ

軸組構造に対してアーチ構造を説明するために、モルタルを用いてアーチを作成した。モルタルには重量感があり、個々のブロックを組立てることにより迫持力の伝達が理解でき、アーチ空間が作られる。学生達に自由に組み立てたり、ばらしたり出来るので体験教育として喜ばれている。



アーチ構造

2000.3.16

写真2-16 モルタルアーチ

2-3 地盤・基礎関係

1) ひな壇型造成宅地

斜面地に建設する場合、切土地盤と盛土地盤の相違を知ることは重要である。この模型はそのために作成したもので、建築基礎及び擁壁の問題を考えるのに有用である。

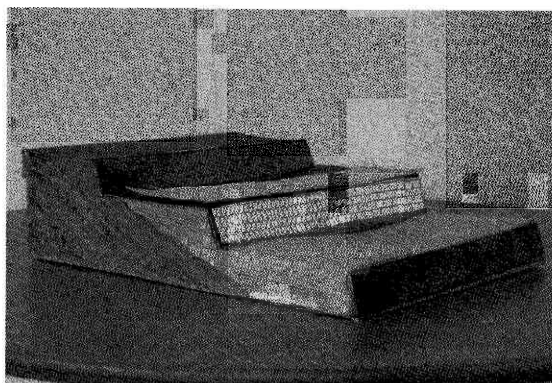


写真2-17 ひな壇型造成宅地

2) 地盤と杭基礎

ペットボトルを用いて簡単な地盤モデルを作成した。下部に砂礫、粗砂、上部に砂質土を入れて支持層の説明が容易にできる。また写真2-19に示すような杭基礎、場所打ちコンクリート杭を作成し、基礎フーチングの関係を説明している。

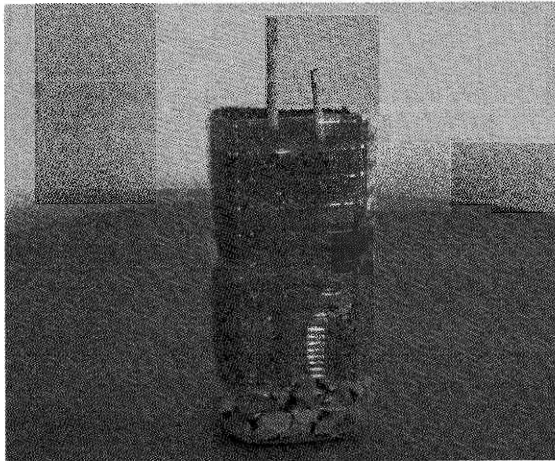


写真 2 - 18 プラスチックと砂で作成したモデル地盤

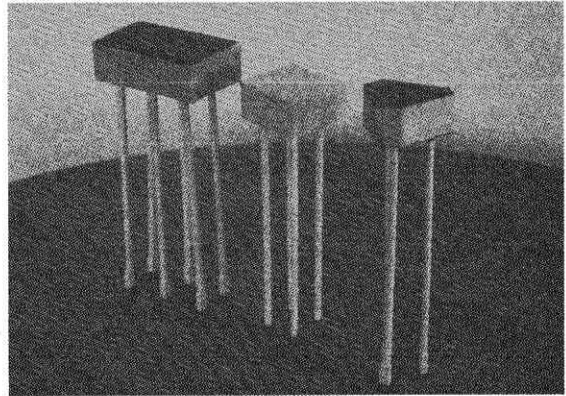


写真 2 - 19 杭基礎

3) ピサの斜塔

ピサの斜塔は建設後約800年にわたって沈下測定が行われている。この斜塔の地盤の荷重度は約 $50\text{t}/\text{m}^2$ で、沈下の原因は支持層の強弱にあると言われている。地盤調査と基礎設計の重要性を説明するのに役立っている。
この原因を知っている学生は少ない。

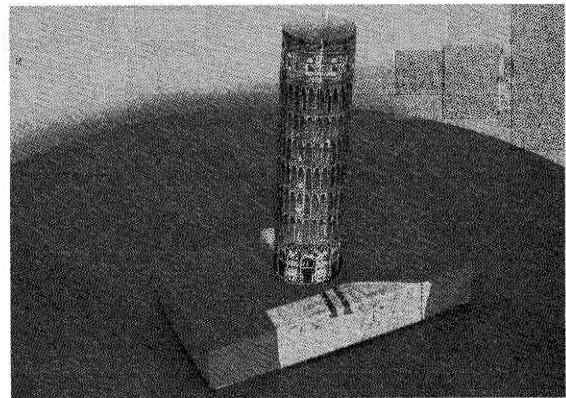


写真 2 - 20 ピサの斜塔

2-4 一般模型

1) ゴシック建築

石造りのゴシック建築における飛び梁を説明するために作成したものである。屋根からくる水平力(スラスト)を外柱の柱脚まで移動する手順を、力の平行四辺形の原理を用いて説明している。外側の柱は何故太いのか。水平力の処理方法が理解できる。

ゴシック建築の特徴であるフライングバトレス(飛梁)が構造デザインではなく、工夫を重ねて考え出された構造である。

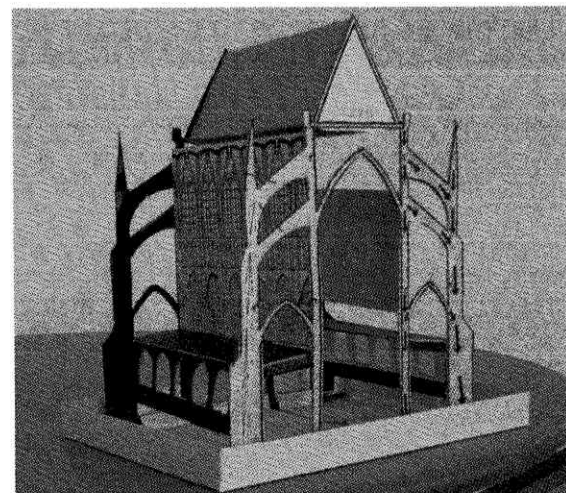


写真 2 - 21 ゴシック建築

巧みに力を地盤まで伝えていくことができたため、それ以前の壁だけに頼っていた建築に比べ飛躍的に大きな窓が設けられることになったことが理解できた。

2) 合掌造住宅

この模型は白川郷の合掌造民家をイメージして作成したものである。小屋組の1つである「さす組」トラスと下部の壁構造からなっており、壁を取り外すことにより架構全体が崩れるようにしてあり、壁・壁配置の重要性を説明している。

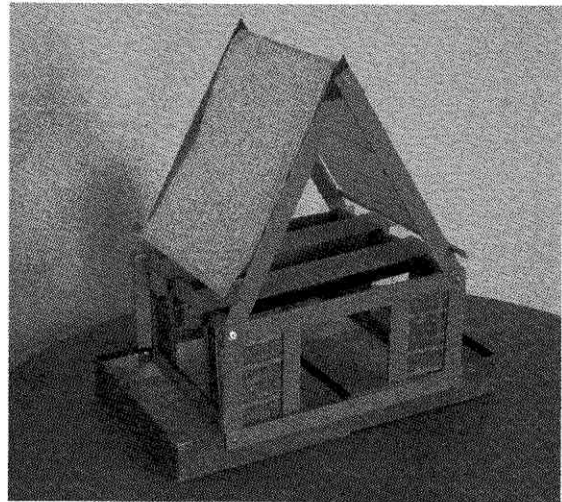


写真 2 - 22 合掌造住宅

3) 高層建築

木片を用いて10階建てのラーメン骨組を作成した。

建物のスケール感を養い、短辺方向、長辺方向により反力の大きさが変化することが理解できる。

この模型の下部構造に場所打ちコンクリート杭が接続できるようにしてあり、地盤・杭・上部構造とが一体であることが理解できる。

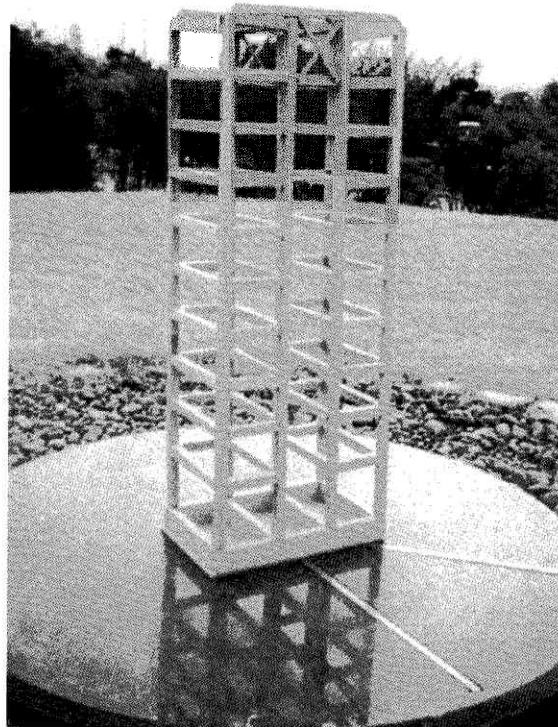


写真 2 - 23 高層建築

4) 2階建て模型

構造設計の演習課題にこの模型を用い、床、小梁、大梁、柱、基礎構造の組み方を説明している。柱に作用する直圧力、地震力の考え方など大いに活用している。

基礎の大きさは柱の位置により変化している。

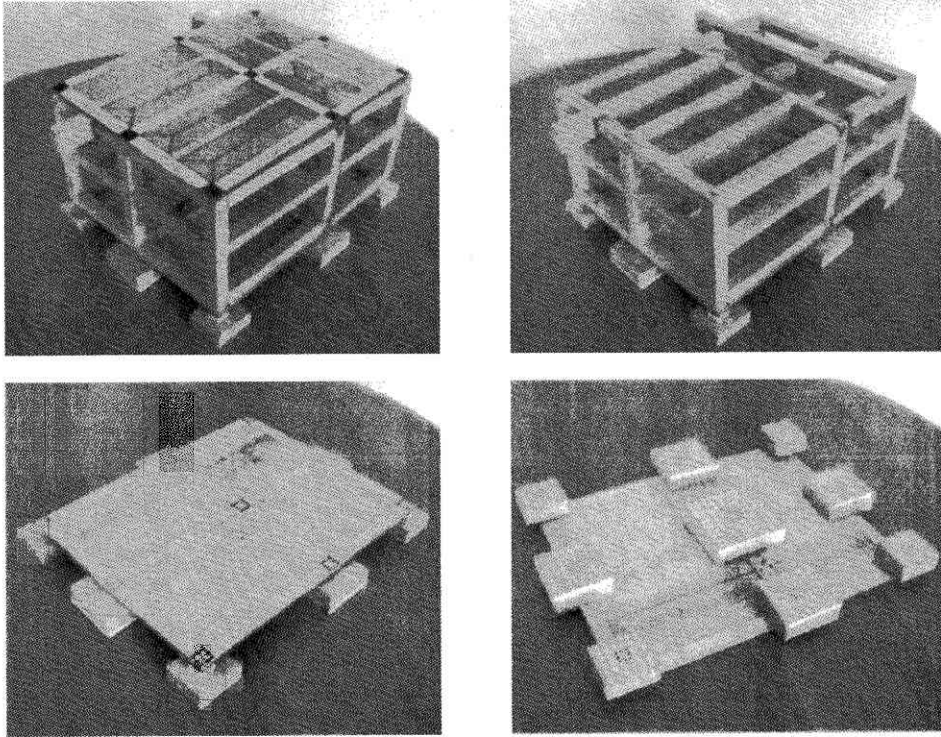


写真 2 - 24 2階建骨組

5) 木造住宅模型

この模型は実物の20分の1に縮小され製作された精巧なものである。日本建築学会の「構造用教材」に掲載されている木造骨組みで、屋根瓦と下地との関係、壁と下地材料との関係、土台と鉄筋コンクリート基礎との関係などが極めて詳細に作られている。

大手前短期大学の西孝夫教授が専門の大工さんに作らせ、住居研究室に寄贈されたもので、教育上おおいに役立っている。

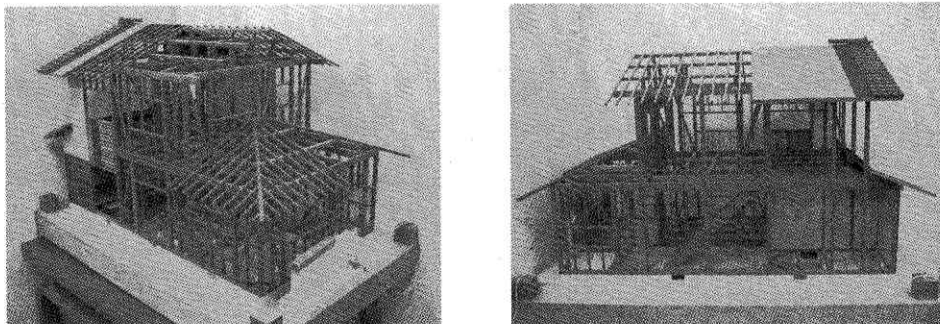


写真 2 - 25 木造住宅構造模型

§ 3. 学生のアンケート調査

3-1 学生の理解度

模型を使った授業が学生にどのように理解されているかについて、「建築構造」を学ぶ2年生と、「環境と建物」を学ぶ3年生にアンケートを実施した（2004年10月20日）。

調査対象者は環境デザインコースの「建築構造」を受講している2年生57名と、「環境と建物」を受講している3年生40名とした。「構造模型は授業を理解する上で参考になったか」という質問に対して、図1に2年生、図2に3年生の理解度を示す。「非常に参考になった」「だいぶ参考になった」の合計が、2年生は63%、3年生は52%と模型による効果は高いといえる。次に、模型の意味と構造との関係について各種模型がどの程度理解されたかを知るために質問をした。図3に2年生、図4に3年生の結果を「非常によくわかった」「だいぶわかった」の合計の多い順に示す。これより、2年生はアーチやトラス等、形状から直ちに構造形式を理解できる模型の理解度が高く、3年生は等分布荷重や棒はかり等の力学的意味を理解する模型の理解度が高い。全体的には2年生・3年生とも、集中・等分布荷重、アーチ、トラスについて意味をよく理解したようで、アーチの原理、トラス材の圧縮・引張の違いなどについてよく理解できたとの感想が多い。立体的な模型で、荷重や重力などの目に見えない力を視覚的に説明する効果は充分にあると考えられる。

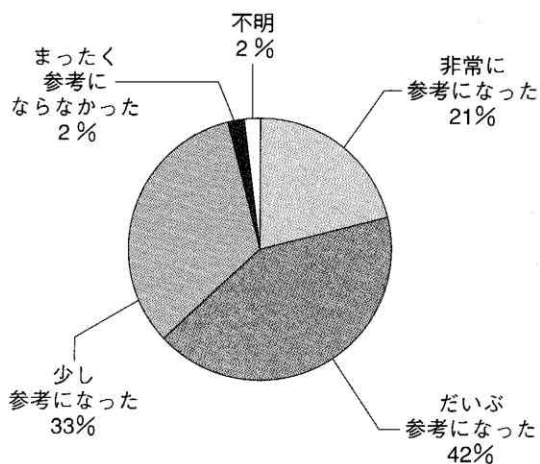


図3-1 2年生の理解度

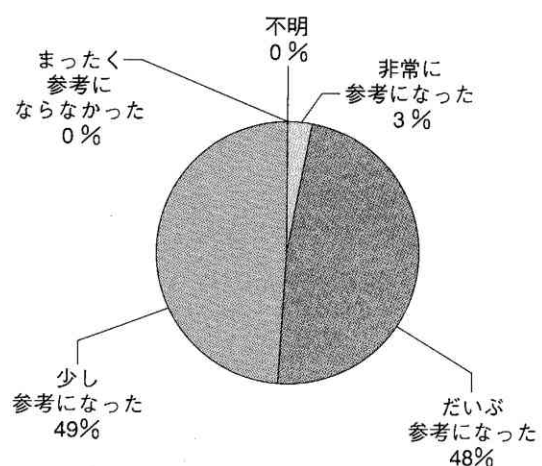


図3-2 3年生の理解度

模型を用いて「ちからとかたち」を理解させる構造教育

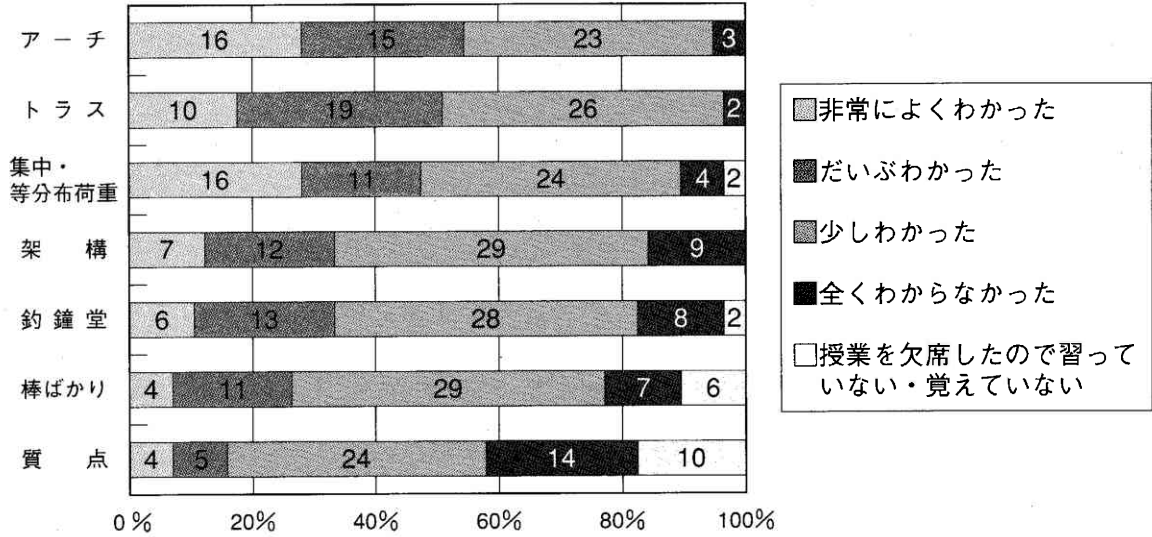


図 3-3 2年生の模型種別理解度

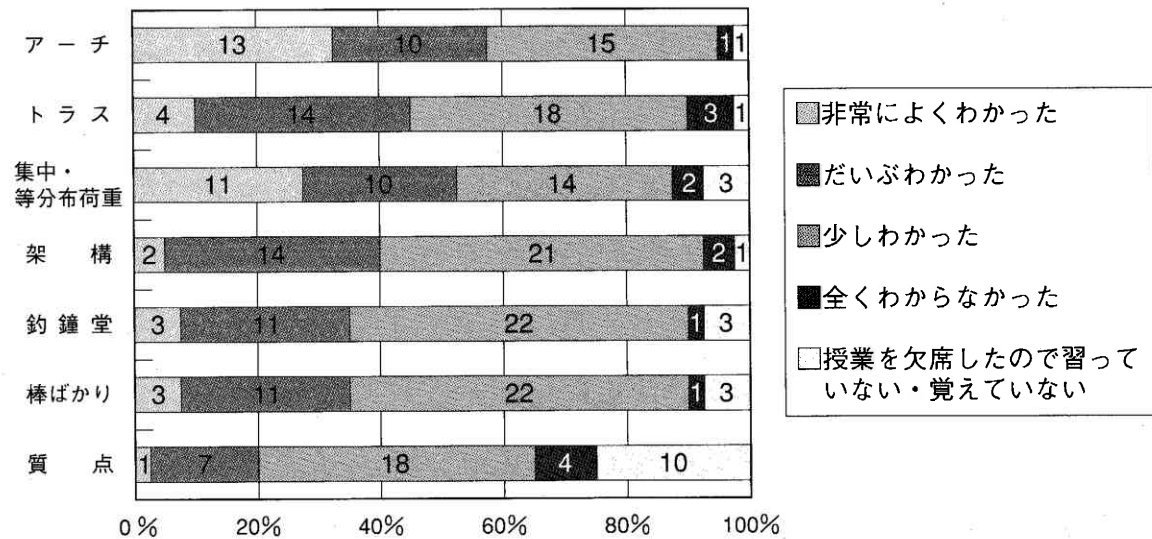


図 3-4 3年生の模型種別理解度

3-2 学生の感想文

学生の感想文の主なものを分類して示す。

A：模型全般

- 黒板や口で説明されてもすぐには理解出来なかったり、すぐに忘れてしまうけど、目で見て模型で説明された方が覚えてそうでこれから役に立つことがあります。
- 実物に近い模型は構造の仕組みについても視覚で立体的に見れるので非常に役に立ったと思う。
- 実際に見れて、触れて、動かしてみたりできるので。骨組など、建物になった後では見れないものとかも分かりやすかった。言葉だけで説明されるよりも理解しやすい。作りが簡単なものなので分かりやすかった。
- ただ単に漠然とした説明や公式だけでは急に想像がつかなかったことも、模型を見て説明されると、考えるときにも思い出すことができて分かりやすかった。
- 教科書の図や言葉だけでは理解しにくい部分も立体的に目で見ることにより理解しやすくなったから。
- 黒板で書かれた絵とかOHPで見た絵だけでは理解することはできても、あまり印象には残らない。やっぱり模型を見てより深く構造を知ることができると思う。
- 荷重、重力などの目に見えない力の動きを理解するためには、頭の中で思考するだけでなく、立体的模型を使い、距離を置いて全体像一望できるもとのと考えると、よりよい理解の架け橋となった。
- 構造は力の動きが目で見れば一番良いのでとりわけ、アーチや釣鐘堂などはわかりやすいものでした。力は目に見えるものではないので、それをいかにして模型でわかるように説明するかが重要だと思うので、単純なものほどいいと思います。
- 「重さが変われば力も変わる」とは言葉で分かったつもりでも実際よくわかっていなかったが、模型から考えていくうちに理解できたと思う。2級建築士を受験するにあたって必要な知識が身についた。
- 何度も授業の中で出てきて、説明があったから。模型を使っていたことで、頭でただ考えるよりも分かりやすく、理解しやすかったと思う。
- テキストなどで見ているだけだと、その時わかっていてもすぐわすれてしまうけれど、実際に模型で見たことは、頭の中に残りやすい。

B：荷重について

- 一目で集中荷重と等分布荷重の違い、力の伝わり方が理解できた。アーチも実際に組み上げることによって理解でき、棒ばかりは重りの重さ、力のかかる距離の変化で釣り合うのがよく分かった。
- 一番わかりやすかったのは集中・等分布荷重です。
- 架構、集中・等分布荷重、アーチ、棒ばかりについてはよく授業で先生がよく使って説明してくださったので、公式の理解に役立ちました。
- 集中荷重・等分布荷重は実際に重りがついていて動くので分かりやすかった。
- 集中荷重・等分布荷重は力のかかり方がそのまま目で見て分かるので理解しやすかった。アーチは圧縮だけの力で支えられることが理解できた。

C：アーチについて

- 石をアーチ状に重ねて左右を固定しただけなのに崩れなかったし、思っていた以上に丈夫なの分かった。
- 自分で1回アーチ構造を作らせてもらったときに、どういう仕組みになっているのかよく分かった。
- アーチは実際に組んで試してみたので仕組みが分かってよかった。棒ばかりは距離と重さの関係が分かりやすかった。
- アーチをどうやって作るかを実際にやってくれたので分かりやすかった。
- アーチについては1つ1つの部品がくっついているわけではないのに、見事に崩れなかったのも、すごいと思って一番印象に残っています。集中・等分布荷重については曲げモーメントがとてもわかりやすかったです。
- アーチの模型は実際自分で使ってみたので、すごくわかりやすくとても理解することができました。

D：トラス、架構について

- 模型を実際に動かすことにより、力の伝わり方がよく分かった。アーチを目の前で作った時は感動した。
- トラスや架構などはどこが圧縮になりどこが引張になるかなど、実際に模型を見た方が分かりやすかった。
- 力の動きが実際に見た目で分かったからです。公式を見ても未だに理解したとは言えないのですが、力の方向性などは、模型を見ることで視覚的に理解することができました。

例えばトラスの場合、圧縮と引張の違いが理論や解き方だけでは理解できなかったが、模型を見ることで少しでも理解できるようになった。構造は目に見えて分かるものではないので、模型を見ることで少しは理解できるようになる。

E：釣鐘堂・棒ばかり

- 釣鐘堂は模型を見る前までは理解できなかったが、模型を見るとすぐに理解でき、計算できた。
- 釣鐘堂の置く場所によって重さのかかり方がよく分かりました。
- 教科書の図形だけでなく、重さを載せたときの動きを見たほうがわかりやすかった。
- 棒ばかりは計算の原理がわかったのでだいぶためになりました。図の方が僕にとってはわかりやすいので、他のは少し参考になりました。

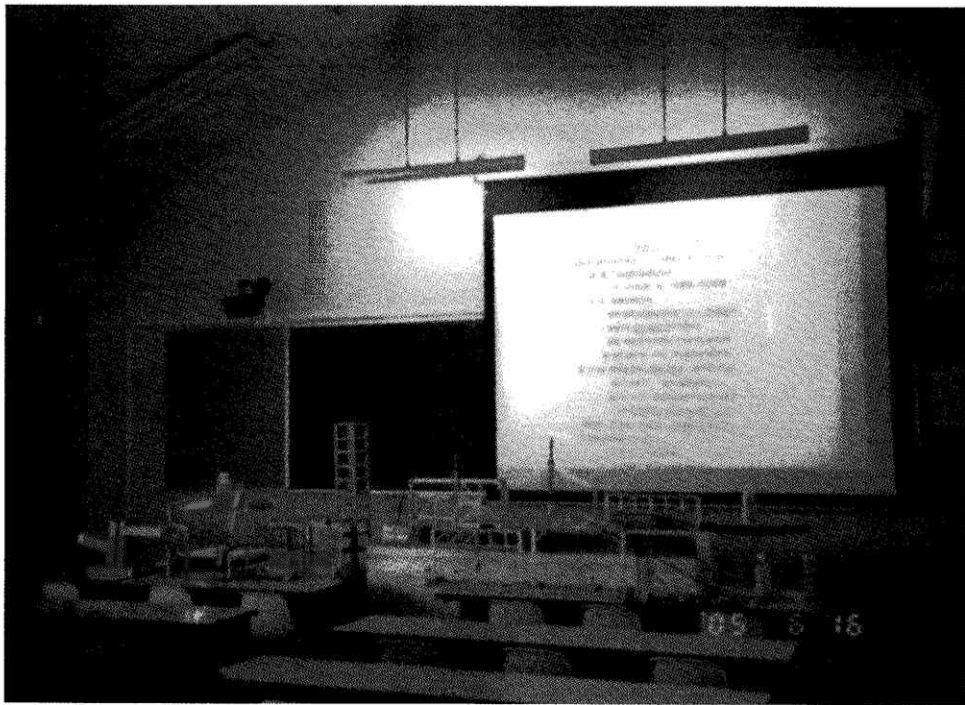


写真3-1 模型教材を使用した授業風景

§ 4. モルタルアーチの製作

福井ゼミでは毎年夏休みに学生らで新たなモルタル製アーチの製作を行った。その様子を紹介する（2003年8月11日・12日の両日）。

まず、配合を決めた上で、セメント、水、細骨材をバケツに入れてよく混ぜる。

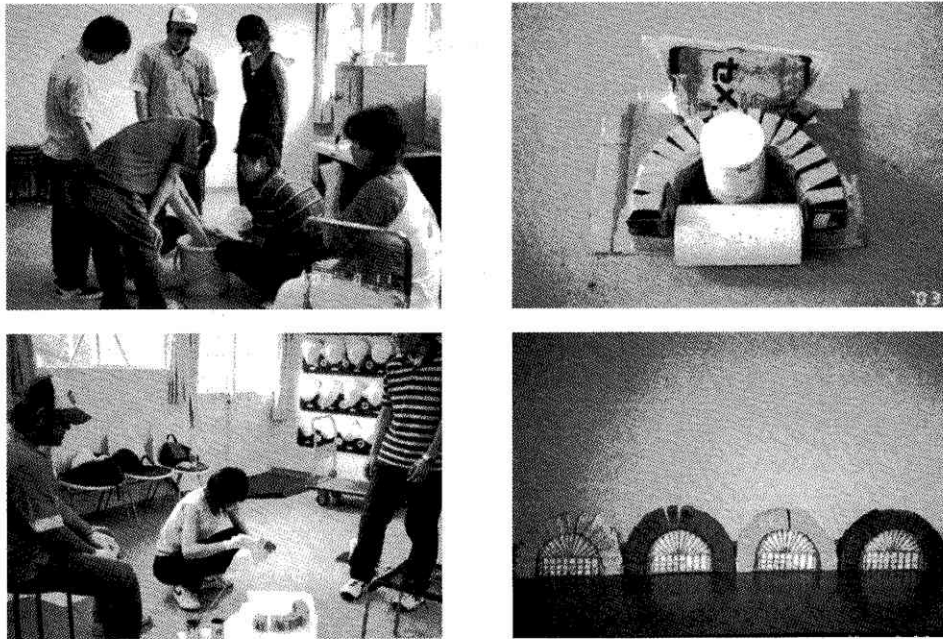


写真4-1 完成したモルタルアーチ

あらかじめボール紙等で作っておいた型に仕切りをし、モルタルを流し込む。
モルタルが固まった後、型から取り外し順番にブロック番号を付け、着色して完成。

§ 5. オープンキャンパスおよび日本建築学会での展示

5-1 オープンキャンパス（伊丹）

年オープンキャンパス時にこれらの模型を展示して、訪問学生に本校での構造講義の様子を説明している。

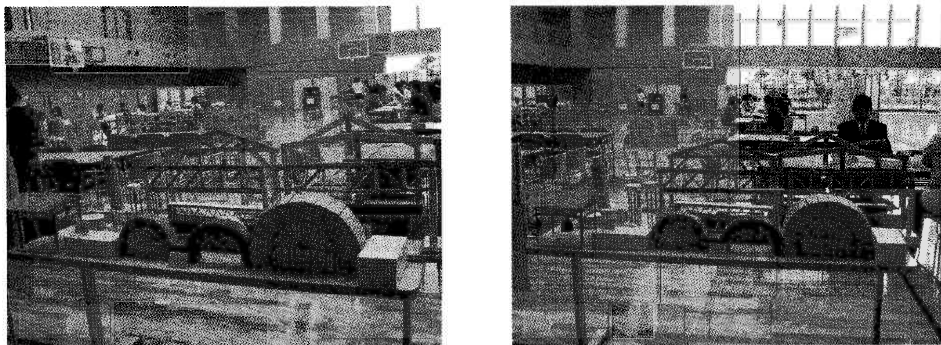


写真4-2 体育館に展示した模型

5-2 建築学会大会（中央大学）

日本建築学会大会でこれらの模型による講義について、2001年（関東／東京大学）、2002（北陸／金沢工業大学）で講演した。2003年には中部大学において大会があり、「見て触って感じる構造教育」というテーマで模型を展示するよう依頼された。参加校は、日本女子大学、名古屋大学、名城大学、愛知産業大学、日本大学、大阪大学、大手前大学である。9月5日、6日、7日の3日間、秋山建築学会長はじめ多数の先生方、学生の皆様が来ていただき盛会であった。近年、構造を勉強する学生が減少傾向にあり、コンピューター重視の教育に対して「親しみやすい、分かりやすい教育」が望まれていることが実感された。展示会場の様子を写真4-3に示す。



写真4-3 日本建築学会(中央大学)における展示風景

§ 6. あとがき

文系の学生にとって、建築構造学や環境系の数式を含む講義を容易に理解することは難しい。§3で述べたように学生を対象に行ったアンケートでは、多くの学生が「教科書や黒板に書かれたことを見ただけでは理解しがたい」と答えており、それと同時に、「模型を見ることによって、感覚的に理解できる」とも書かれている。アーチやトラスの模型はその代表で、それらの仕組を目で見て触ることによって理解を深めた学生は多い。

学生の中には三角関数がまだ理解出来てなくて、関数表の見方が分からない、分数の掛け算、割り算がおぼつかなくて公式が理解出来ない人も若干いるので、学生の視点にたった念入りな授業が必要で、あせらずあわてず十分に時間をかける必要がある。

4年次の環境構造特論の講義では、2階建の鉄筋コンクリートの建物の構造設計のプロセスを理解させ、計算書を作成する講義と演習を行っているが、授業を終了した多くの学生の感想として、入学後3年半の間の模型を用いた授業は大変良かったと述べている。

建築構造の意味を理解し親しみを感じ、面白さを見つけた学生がほとんどと言ってよい。これらの模型は、ありふれた材料で手作りなので親しみを感じた学生も多い。模型を使った授業は非常に効果的であると言えよう。学生諸君が自分で建築士試験に挑戦するときには、これらの模型が脳裏によみがえり役立つであろうことを期待している。

参考文献

1. 福井實、大野治代、神農悠聖「構造教育に用いた模型－その1－」
日本建築学会講演梗概集（関東）2001年9月
2. 福井實、大野治代、神農悠聖「構造教育に用いた模型－その2－」
日本建築学会講演梗概集（北陸）2002年8月

キーワード：構造 教育 模型 アンケート

Keywords：Structure, Education, Models, Questionnaire