

椅子製作を通じた建築構造教育の実践

Architectural Structure Education

プレキャストプレストレストコンクリートの椅子

Precast Prestressed Concrete Chair

田島 祐之
Yuji TAJIMA

キーワード：建築構造教育、プレストレストコンクリート、椅子製作

1. はじめに

建築・インテリアデザインにおいて、想像することは非常に大切な要素である。特に建築学においては、建築物に加わる「力」の作用に対して安全であること、つまり安全性の確保が第一義的に求められる。さらには、使用性能の確保や耐久性の確保といったものが求められるが、いずれにせよ基本的性質としての「力」というものは、目に見えにくく想像することが肝要になってくる。しかし、昨今では外で自由に幼少期に遊ぶことは少なくなった上に、建築現場は現在安全のため仮囲いで見えなくなっていることや、関係者以外立ち入り禁止の現場が殆どで、建築・建設実現場を知る機会・触る機会は格段に少なくなってきた。そのため最近の学生の多くは、前述したことに派生し、建築物躯体構造のイメージ、さらに「力」が「材料に及ぼす」イメージができなくなってきた。実際、建築構造力学の授業アンケートでもイメージが湧かないので、何をやっているか全然わからないというコメントが書かれることもある。上記の内容は、筆者自身のみが感じている現象ではなく、2章にて既往の報告および研究で述べるが、全国の建築系大学においての問題であり、建築学特に建築構造の理解を深くするにはどのようにすれば良いかという共通課題でもある。

そこで、「建築・インテリア演習」いわゆるゼミ授業での筆者の取り組みに関して論ずる。構想・設計・施工という流れを通して建築物ではないが身近な題材（製作物）を基に、製作に関わる一連の工程を自ら行うことにより、製作した達成感や感動および製作物への愛着等を感じてもらうことを第一の目的とした取り組みである。付随した目的として建築学の習熟度を増すことと建築構造力学のイメージを湧かせる手助けにすることである。

なお本論文は、2章既往の報告および研究・3章製作工程の流れと狙い・4章実際の製作工程の流れおよび5章まとめという構成になっている。

2. 既往の報告および研究

構造力学教育に関する取り組みは、今に始まったことではない。建築学教育に関連する論文

は多いが、本章では建築構造教育に関する論文や報告書について特に筆者と関連の深い論文をピックアップした。

2-1. 構造力学教育のための模型実験の開発

1992年に水野・平野が発表した論文で、この頃はまだ教育現場において教材・教具を用い感覚的に力学的現象を体験させる試みが少ないことを危惧し、初学者が興味を持って「構造力学」の学習の発展を促すための模型実験の開発を試みた。手順として、教科書の中からテーマを選択し、これに適した材料の選択を行い設計・製作する。これを用いて実験・検討を行い、模型実験の完成となる。実際に行った実験では、開発者側の評価では教育効果が大きく期待できたものと思われた。しかし実際に学習する学生の評価は調査しておらず、その必要性も説いている。【文献 1】

2-2. 構造力学の教育手法に関する研究

2008年に久木が発表した論文で、文系学生の多い建築系大学における授業理解度の調査とサブタイトルにもあるようにクラス内での理解度合に大差が生じている問題に着目し、e-Learning教材の必要性について調査研究した。この調査の中で着目すべきは、自分の欠点に関する自己評価の自由記述では、「計算ミス」という回答が最も多かった点である。結びとして、e-Learning教材は必要であるが、あくまで学習到達度における個人差の補助的役割に留めており、通常講義は行ったうえでの議論であった。【文献 2】

2-3. 体感・実験・考察を通じて育む「初年次構造力学教育」

2013年の建築雑誌にて連載 Series として、石川・平田が執筆した 1 コラムである。この中で著者の所属する大学では、数学・物理を得意とする学生ばかりではなく、構造力学をいきなり講義すると構造嫌いな学生にしてしまうことがあり、構造の魅力にたどり着く前に学生が躊躇している状況をなんとかしなければならぬと色々と思いついた取り組みを行っている。主に 3 つの取り組みが示されているが、①簡単な実験をする②力学の原理を可視化する③考察力を育てることである。ある一定の評価を得ているものの、時間の制約が大きく、満足した教育まで至っていないことが示されている。【文献 3】

2-4. 授業アンケートによる建築構造力学を受講した学生の特性

2013年に山岸・西村が発表した論文で、工業大学の学生を対象としたものである。アクティブラーニングによる授業形式が学生の理解を向上させるものとして、「建築構造力学 I」の座学の授業にて、設計から断面算定に至る設計プロセスを簡略的に経験する「創作レポート」の実施を試みている。アクティブラーニングの試みのアンケート結果によると、創作レポートが学生の理解の深化に一定の効果がみられるものの、全体の比率から鑑みると低い結果だった。【文献 4】

2-5. 既往の研究や取り組みに対して

構造力学教育に関する論文や報告書は、1990年頃から発表されている。しかし1990年代の学生と現在の学生では質が変化しているため教材内容について同一に議論してはならない。文献2・3・4に共通して述べられている、学生の理系離れ・学力の低下および学習意欲の低下が年を追う毎に顕在化しているからである。筆者としては以下のように考える。かつての学生は、未だ見ぬ建築物を創りたいという思いのみで構造力学という重要で難解な学問を耐え学んでいたが、現在の学生は、目前（自分自身が知り得る限りでの）の現実的な目標でしか動けず、重要であっても難解な学問は耐えられないと思える。しかし現実的な目標があれば、多少の問題は乗り越えられる心持は僅かながら残ってはいる。当然難解な学問でもやる気をもって挑む学生はいるが、全体の傾向であることは付記しておく。

文献2において提唱しているe-Learning教材や画像および動画等については、筆者も同時に取り組んでいる課題ではあるが、学習意欲の低い学生にとっては、補助的教材の役割を果たすことはできないように感じている。

文献3では、数学・物理を得意とする学生ばかりではない建築系大学において、構造力学をいきなり講義すると構造嫌いな学生にしてしまうことを指摘し、「初年次構造力学教育」に重点を置く報告がなされている。しかしこの論文では、1コマの講義内で実験等を終わらせることの限界についても言及がなされており、これに関して筆者も同感である。

3. 製作工程の流れと狙い

前述した構想・設計・施工の流れの中で、各々の工程には製作物に辿り着くための助言ポイント（材料特性・力の流れや伝達方法および図面化における注意点）があり、そのことに関して道筋を示しながら学生が自ら修正しつつ実際に製作を行う。

3-1. 条件に基づいた製作物の構想

まず、自由な構想をしてもらいたいためなるべく条件は少なくしたが、最低限の条件は付した。それは以下の2点である。a. 製作物の大きさとして大学内8号棟東にある倉庫内に納まるモノであること。b. コンクリート製であること。この2点の条件により、椅子を作製したいということになった。ここで重要な点を助言した。コンクリートの場合椅子を一体化して出来栄良く作製することは困難であり、コンクリートに明るくない学生にとっていわゆる生コン状態において、左官職人が用いるモルタルと同様と考えている学生が多い。結果的には製作材料としてはコンクリートではなくグラウトを使用することになるのだが、この材料も左官の腕が必要であり、左官作業をなるべく最小にする（左官面積を小さくする）必要があった。そこで、一体化ではなく部材に分割した上で後に一体化させるというサブタイトルにもあるプレキャストであり、プレキャストのコンクリートの椅子で構想を進めようということになった。

この節の狙いは「自ら椅子を製作するという現実的な目標をたてさせること」および「プレキャストプレストレストコンクリート構造への誘導」である。

3-2. 助言を受けながら修正された案

誘導されたにせよ、プレキャストプレストレストコンクリート（以下 PCaPC）の椅子を製作しようとして決定した。しかし、PCaPC 技術は、構造技術者においても小難しく感じるようであるが、学生となれば全く何が何だかわからないのは当然である。そこで、PCaPC 構造についてのスライドにて小講義を行い、どのような原理かを説明した。その後デッサン図を作成させ、原案に始まり、製作実現可能な形になるように助言をしながら修正を重ね、4次案でほぼ実現可能であるデッサンになった。

この節の狙いは PCaPC 構造に誘導した後、建築物ではなく椅子という題材だと「難しそうな PCaPC 構造技術でも聞く気になること」さらには「理解しやすくなること」である。

3-3. 3D プリンターでの模型出力

実際の椅子を作図する前に大学が保有する 3D プリンター Afinia3D を用いて、縮小版の椅子模型を出力した。デッサンの時点で大体の寸法は定まっていた。狙いとしては 3D 出力の椅子模型で、実際の椅子に対する問題点を抽出することであったが、狙いは外れ模型は精巧に出来上がり、そのまま作図することになった。しかし 3D 出力したことより、イメージは確実なものとなり、次の段階である作図において、問題なく進むこととなった。

3-4. 図面化（設計図・施工図）

図面化における大事なポイントが2つあった。①構造力学計算とは、②図面は2次元で描くが、それが立体的（3次元）にイメージができていくかという点である。①について、構造設計とは、必要とする耐力・剛性等の性能を充足するように、架構形式、鋼種、部材の断面形状を決めることである。しかし、建築構造物では、部材や接合部形状を未知数としていくら必要な条件を与えても、解が得られない。つまり、架構形式と部材や接合部は設計者が仮定し、その仮定した断面・形状について耐力や剛性を算定し、必要な性能の充足状況を検討することが構造技術者の常識である。しかし、馴染みの無い人にとって構造力学の最適解は1つというイメージがある。建築構造力学を受講している学生も例外ではない。答えは1つという間違えた固定観念から解き放たないといけない。これは何度も以下のようにゼミ授業の学生に伝えた。「私には答えはわからないし、知らない。しかし設計したものが、安全か安全でないかの判別はできる」と。つまり、構造計算とは、設計（仮定）したものが安全かどうかを計算し、安全でなければ設計を変更して再計算を行う行為であり、このことを実体験として学んでもらいたかった。②について、実際の建設現場においても、図面上で立体的な考慮がなされていないために、接合部において鉄筋が桁行方向と張間方向でぶつかり合うということは、しばしば生じる。立体的に考える行為の大切さを学んで

もらいたいというポイントである。具体的には、製作する椅子のコンクリート厚さとワイヤーの太さが適切であるかどうか、また4本のワイヤーは6の字を描きながらコンクリートの穴の中を通る設計であり、このワイヤーが交差する点で、立体的な考慮ができるかどうかである。

追記として、きれいなコンクリート面を造るには、学生の技能では困難と判断し、型枠は業者に業者に依頼した。しかし業者との図面のやり取りにおいて、実際の仕事と同様の体験をしたことは学生の成長にとって良かったと思っている。これに関しては副産物の効果であった。

3-5. 施工

施工での注意点は、実際に作業をしながら助言を行った。前述したように、型枠は業者に依頼した。具体的な後工程としては、①グラウトの打設・②型枠の解体・③横向きでの仮組・④ワイヤー通し・⑤横向きでの設置・⑥接合部分のグラウト注入・⑦緊張力導入・⑧椅子起こし・⑨研磨や塗装等の仕上げである。作業としては、コンクリート構造建物を施工することと何ら変わりはない。しかし、⑦緊張力導入に関して実際の大規模建築物では、ジャッキやポンプ等の機械を用い施工するが、この椅子の場合は緊張力が小さいこともあり、てこの原理でバールを使用してワイヤーに緊張力を導入した。この節の狙いは、紙面上でのPCaPC技術、つまり各々のピースがどのようにして一体化したものになるかを体験してもらうことである。

4. 実際の構想・設計・製作工程の流れ

この章では、3章で示した製作工程の流れ（構想・具体案・3D模型・構造設計・図面および施工）に関して、学生が作成したものを基に図や画像等で順を追って示す。なお、最初の構想自体の学生のメモやデッサンは残っていないので省略する。

4-1. デッサン案の軌跡

図1に学生が修正しながら作図したデッサン案の軌跡を示す。図の左上が原案になる。これは椅子の部材を分割してピースを作製するために同じピースを組み入れることにより椅子全体を構想した。しかしコンクリート内にワイヤーを通すため、図の組み立てではワイヤーを通しなおかつ緊張力を導入するには難しいことを説明し、同じピースに拘らないように助言し、2次案で修正することになる。

図の右上が2次案であるが、床との接触部分の曲面（円を描く半径）が小さいことより、

と案の変遷

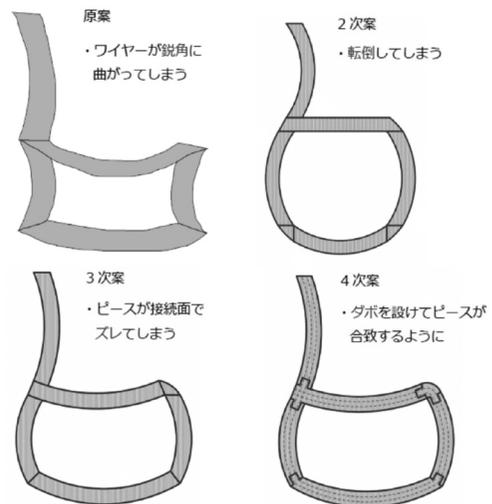


図1. 案の軌跡

座った時、後ろに転倒するおそれがあった。さらに座面が直線であることより、座りにくさも指摘し、次の修正案に進んだ。

図の左下が3次案になるが、この時点でほぼ全体の形は良いと判断した。しかし、ピースとピースを接続する部分は直面同士だとずれるおそれがあったので、この点を指摘し最終的な4次案で次の段階に進むこととした。

4-2. 3Dプリンターでの模型作製

写真1に学生の3Dプリンターを使用しての作業の様子を示す。3-3にて言及したように、3Dプリンターに関しては、学生は難なく模型出力に至った。写真2に実際に出力された直後の模型の部材を示す。それぞれのピースは、実際の椅子と同様の部材を出力した。写真2に見られるそれぞれのピースをつなぐ水平材は、3Dプリンター側の支持棒が組み込まれた結果であり、椅子模型に組み立てる際に水平材はカットした。写真3には部材を組み立てた椅子の模型を示す。また、デッサン図の精巧さもあり、写真3に見られるように、非常に出来栄の良い模型が作製された。ただ、椅子内部のワイヤーを通すための穴は、樹脂という材質もあり、つぶれていた。したがって、プレストレストコンクリートのイメージは実現できなかった。



写真1. 3Dプリンター作業の様子

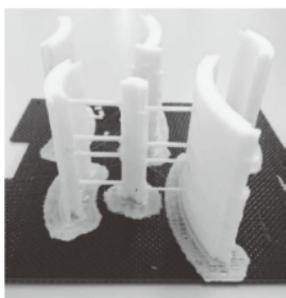


写真2. 出力直後の模型



写真3. 椅子模型

4-3. 構造計算の経緯

図2に学生の作成した構造計算概要を示す。前述したように構造計算は、答えが一つではなく、設計(仮定)した構造物に対して、考えられる荷重に耐えられるか、または安全であるか(使用方法とは別)を選定することにある。実際の仕事であるならば精密に考えなければならないが、構造計算の概要を学ぶために諸条件はなるべく簡潔に考慮するよう求めた。計算をするよう求めた部材は、座面部分と床と接する部分の2部材に限定した。

まず座面部分に関して、人が座るといふ状態は座面に対してどのように荷重がかけられていると考えれば良いのか。悩んだけれども結果的に学生は、答えを求めた。しかし即座に答えを述べるのではなく、授業内で実際に座る行為をしながら、既に習得済の建築構造力学Iのテキストを参考にして根気強く学生からの答えを待った。すると、等分布荷重で考えたらどうかという不安気な回答ではあったが、正解という返事をした後からその先の計算はスムーズに進められた。

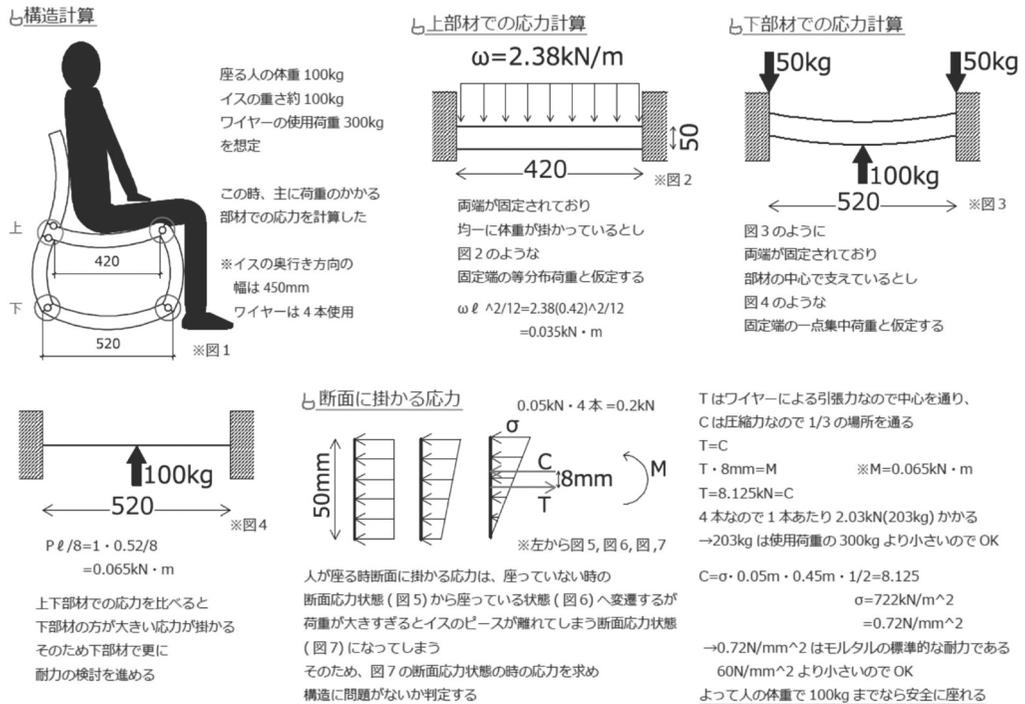


図 2. 学生の作製した構造計算概要

次に床と接する部材に関して、曲面を描いているので、接する点は 1 点である。このような説明をすると、学生は集中荷重で考えることに辿り着く時間は短かった。部材にかかる荷重を設定すれば、次は断面にどのような応力が発生しているかを考えなければならない。コンクリートの断面応力は、受講している途中であった建築構造設計法の資料を参考にして計算をさせた。

初年次構造力学を重要視する考えも同意ではある。しかし力学の明確なイメージが湧かないながらも構造力学・構造設計法を座学で学んだ後に、椅子という実際の製作物で構造計算を行った先には、「こういう風に使うんだ」とか「実際に使える学問なんだ」という感想を学生は感じたと授業終了後に聞いた。

4-4. 図面化

3-4 で述べたが、きれいなコンクリート面を造るには、学生の技能では困難と判断し、型枠は業者に依頼した経緯もあり、担当学生は直接業者とやり取りしながら図面は進めた。筆者の考えの通り、業者よりまず指摘されたのはコンクリート内を通るホースが交わる箇所でかち合うので修正してくださいとのことだった。図 3 に最終的な図面を示すが、図中の点線がホースの設置位置であり、部材毎に少しずつホースを平行でなく斜めに設置している。(最初の図面ではホースは部材と平行に設置していた) 建築構造設計法の授業では、口頭で桁行方向と張間方向の鉄筋の交

わりについて説明をしていることの伝わりにくさについて筆者の痛感するところであった。部材同士の接合面は、型枠にパイプをいれて円筒状に抜き、後のグラウトで埋めるよう修正した。

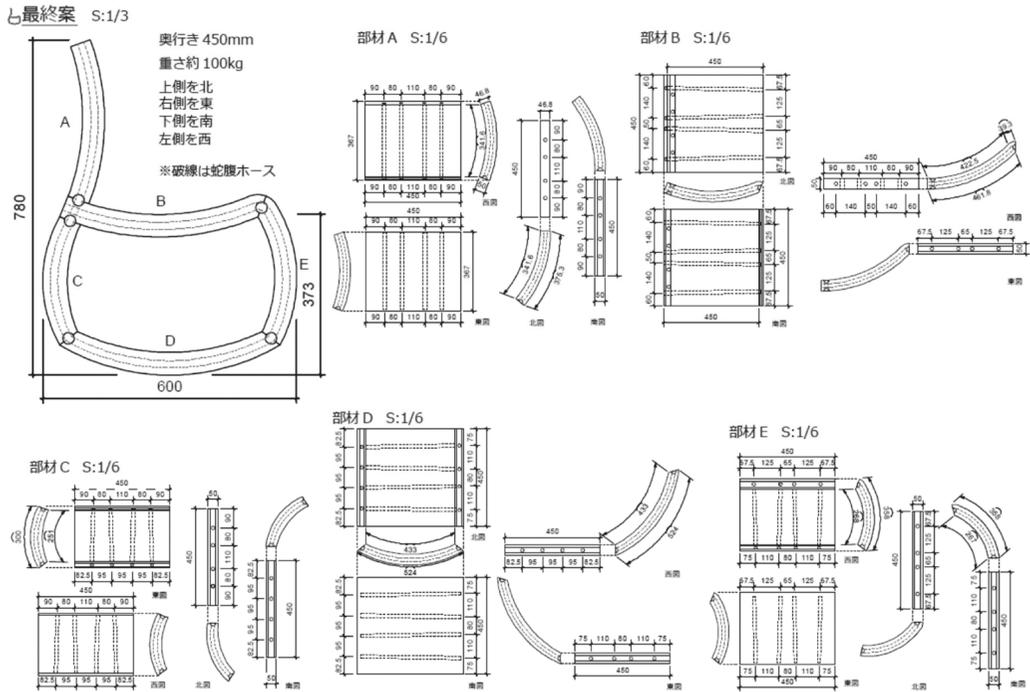


図 3. 学生が作図した椅子

4-5. 施工

当然ではあるが、学生にとってはグラウト打設を始め工程のどれをとっても初めての経験であった。作業的な安全に関しては、注意を促しながら作業を進めたが、それ以外の余計な手出しはほとんどせず、学生に任せた。写真 4 は、攪拌機を使用してのグラウト練り混ぜ状況を写真 5 は、グラウト流し込み状況を写真 6 は、型枠の脱型作業状況を示す。グラウトは、小さな骨材が入っているので、練り混ぜ後速やかに型枠へ流し込まなければならないので、学生は少し慌てたものの、作業自体は滞りなく進んだ。写真 7 は、脱型完了状況を写真 8 は、別々に出来上がった部材は少し間隔を置いて設置し、ワイヤーを通した状況である。業者の方で、脱型しやすいように型枠を組んでいたの、あまり損傷もなく脱型はできた。写真 9 は、横向きの設置状況を図 4 は、緊張する方向のイメージ図を写真 10 は、組立完了し椅子を起こした状態を示す。



写真 4. 練り混ぜ状況



写真 5. グラウト流し込み状況



写真 6. 脱型作業状況



写真7. 脱型完了状況



写真8. ワイヤーを通した様子



写真9. 横向き設置状況

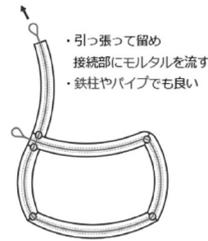


図4. 緊張イメージ図



写真10. 組立完了状況

写真9に見られる椅子表面が打設面で、あまりきれいな見た目ではない。しかしながら写真10に見られるように、反対側から見るとグラウト素地のままでも充分見栄えのする椅子が完成した。このままで終了しても良いと筆者は感じていたが、担当学生は椅子に対して非常に愛着が湧き、打設面にグラインダーをかけ、椅子を塗装したいとの希望であったので、最終仕上げは塗装までとなった。椅子の床面と接する面は曲面であったため、椅子は揺れることは認識していたものの、ロッキング性（何度まで椅子は傾けられるのか）までは考慮していなかったため調べるよう指示をした。図5に見られるように、角度計を用い学生が調べたところ、背面方向へは35° 前面方向へは50° 傾けられることを確認した。最後に写真11に完成した椅子の写真を示す。グラインダーも上手にかけられ、出来栄の良い椅子が完成した。



図5. ロッキング性の調べ



写真11. 完成した椅子

5. まとめ

椅子を題材とし、条件付きの構想から始まり、3D模型を作製し、椅子製作までの各工程で助言しながらも学生が自ら行い体験・経験を得て、学習してもらった。筆者としての最大の狙いは、構造計算・力学計算を楽しみながら行うことであった。楽しみながらという点に関して真偽は定かではないが、3D模型を作製したことより、力学イメージは着実なものとなり、簡略ではあるがなんとか構造計算も取り組んだ。完成した椅子は、出来栄えが良く、冒頭にも示したように、製作したことへの達成感・製作物への愛着は申し分なく学生に与えることができたのは確実である。その証拠として、担当学生は100kgに及ぶ重いコンクリートの椅子を実家に持ち帰りたいとのことで、実家の庭に飾っていることを付記しておく。製作物を通し、建築・インテリアの基礎となる各工程において、学生にとって非常に教育効果があったと言える。

しかし、この教育方法には問題点がある。それは、時間を要する点や多人数では教えることが難しい点さらには、材料費等のコストがかかる点である。この椅子製作に取り組んだ学生は、2名であり、前述した問題点は無かったので、教育的効果が上がったとも言える。

今後は、多人数でも教育的効果が上がる手法、特に構造力学に対して楽しみながら取り組める教材の開発を考える必要がある。

参考文献

1. 水野隆介、平野道勝：構造力学教育のための模型実験の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸）、E-2、pp.1227-1228、1992.
2. 久木章江：構造力学の教育手法に関する研究（その1 文系学生の多い建築系大学における授業理解度の調査）、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.473-476、2008.
3. 石川孝重、平田京子：体感・実験・考察を通じて育む「初年次構造力学教育」、建築雑誌、vol.128、No.1640、pp.62、2013年1月号
4. 山岸邦彰、西村 督：授業アンケートによる建築構造力学を受講した学生の特性、日本建築学会北陸支部研究報告集、第56号、pp.629-632、2013.