

CAD/CAE と 3D プリンターを用いた橋梁模型製作による演習型授業 ～理論と実践に橋を架ける～

東京大学 正会員 ○菊地 由佳、大野 元寛、京川 裕之、大岩 敬太
東京大学 正会員 蘇 迪、高橋 佑弥、渡邊 健治

1. はじめに

東京大学工学部社会基盤学科では、学部 3 年次の冬学期に応用的な演習授業を実施している。座学で得た知識を活かし、自ら課題およびその解決策を見つけるトレーニングを行うためである。「基盤技術と設計グループ」を構成する土質/地盤、コンクリート、橋梁・風工学の 3 研究室は、社会基盤に関わる理論の構築・現象の解明と、実社会への応用を両軸に活動しており^[1]、その理念を伝える演習授業を長年にわたって模索してきた。

従前は材料・構造・施工の重要性を伝えることを意図し、パスタブリッジの製作を題材とした演習を実施していたが、2020 年、新型コロナウイルス感染症の流行により非接触型演習授業への転換が求められ、演習内容の再構築を行った。演習内容の設計にあたり、近年のデジタル技術の急速な発展と社会基盤分野への活用の要請を意識した。

本稿では、2021 年度に実施した CAD/CAE と 3D プリンターを用いた橋梁模型製作に関する演習型授業について報告する。まず、「基盤技術と設計グループ」の理念を伝える明確な演習目的を設定するとともに、先端技術を取り入れた演習内容を構築する。次に、演習の成果を示し、最終課題における学生の自由記述により本演習授業の教育効果を評価する。

2. 演習授業の提案

2.1 演習授業の目的

本演習授業では、橋梁模型を製作することを通して、学生が 3 つの項目を学ぶことを目的とした。最も重要とした項目は、仮説と検証の繰り返しにより最適解を導出する理論的考察手法の習得である。定まった答えのある問題を解いていた座学とは異なり、卒業論文や実務では、答えが唯一ではない課題に取り組むことが求められる。「基盤技術と設計グループ」の分野における課題解決には、仮説を立て、実験による観測、解析による予測を繰り返すことにより最適解を導出することが必要である。一連のプロセスを印象付けるため、「理論と実践に橋を架ける」というキャッチフレーズを定めた。第二の項目は、先端的なデジタル技術に代表される CAD/CAE を用いた設計と解析手法、3D プリンターを用いた構造物の製作手法を習得させることとした。第三の項目は、班による設計・製作と施工マネジメントの習得とし、将来携わる実務を見据えたテーマとした。

2.2 演習授業の内容

演習は、週に 1 回、105 分授業 2 コマで、全 6 回からなる。2021 年度は 24 名の受講生を 6 班に分けた。演習

を通して、強く・軽く・長い橋梁模型を設計・製作する。なお、本授業では、CAD/CAE ツールは Autodesk 社の Fusion360^[2]を、3D プリンターは FLASHFORGE 社の熱溶解積層方式のプリンター Adventure 3^[3]を用いた。以下、全 6 回の具体的な演習内容について述べる。

第 1、2 回の授業では、設計・製作ソフトの習熟と基礎的検討のため、幅 50 mm、長さ 150 mm、厚さ 2 mm の平板を、CAD ツールを用いて設計し、3D プリンターを用いて製作する。製作した平板の中央に集中荷重を作用させ、荷重と変位の関係を計測する。また、CAE ツールを用いた平板の静的解析を実施し、予測値と観測値との比較を行うことにより、解析の妥当性や 3D プリンティング製作の特徴などについて考察する。

第 3～6 回の授業では、各班で自由に橋梁模型を製作する。橋梁模型は、幅は 50 mm とし、高さとは自由とする。载荷試験条件は、図 1 に示すように、桁部の 3 点への集中荷重とする。橋梁模型の支点は机上面でとり、机上面に固定された角柱により水平方向の反力をとる。载荷方法は、桁部に吊した袋に鉄球を入れる。载荷は 3 点の集中荷重によるものの、車両通行スペースの確保を求めるなど、実橋梁を意識した設計を求める。

橋梁模型の評価は、強さ、軽さ、長さの観点から、次式(1)で定量的に評価する。

$$Score = \frac{P}{W} \times \left(\frac{L}{150}\right)^3 \quad (1)$$

ここで、 P は载荷試験による耐荷重、 W は模型の自重、 L は支間長である。耐荷重は 10kg を上限とし、それ以上の耐荷重でも得点が頭打ちとなるように設定する。特に支間長を重視した評価となっている。また、各班に設計理念、解析による検討内容、破壊予想について最終発表を行ってもらい、教員による評価を行う。

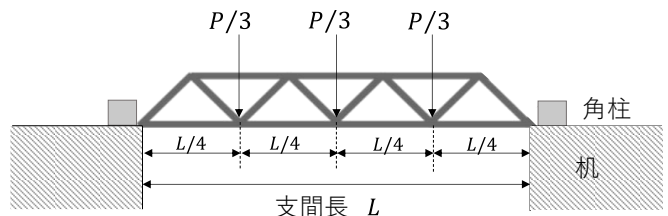
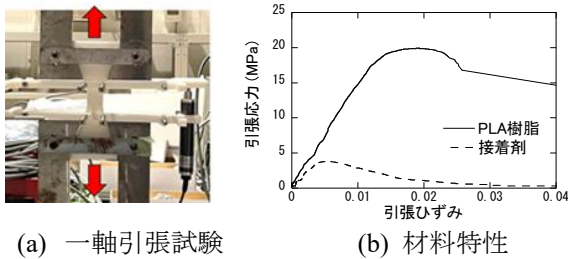


図 1 载荷試験条件

CAE ツールの構造解析に入力する材料物性には、別途実施した材料試験の結果を用いた。ダンベル型の試験体を 3D プリンターで製作し、図 2(a) に示した一軸引張試験に供した。3D プリンターに使用したフィラメントは、橋梁模型の製作に用いたのと同じの PLA（ポリ乳酸）樹脂とした。3D プリンターの充填率の設定は

20%とした。また、試験体の中央を接着剤で繋ぐことにより接着剤の材料物性も調べた。計測した応力ひずみ関係を図2(b)に示す。

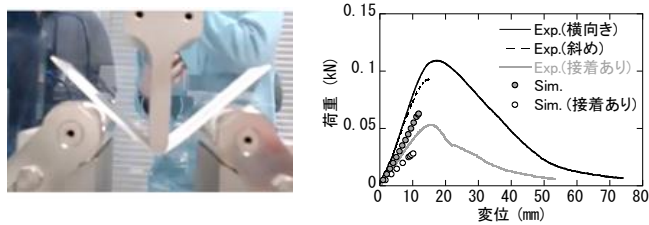


(a) 一軸引張試験 (b) 材料特性
図2 材料試験の実施

3. 演習授業の成果

3.1 演習授業の結果

平板の荷重試験の様子と、学生が行った荷重-変位関係の予測値と実測値との比較を図3に示す。ある学生は、熱溶解積層方式の3Dプリンターにおけるフィラメントの積層方向に起因する異方性を観測し、3Dプリンティングならではの特徴を考慮した設計が求められることを示した。また、接着がない一枚板の場合と、平板中央で接着がある場合を比較し、接着剤による影響を評価した学生もいた。さらに、剛性の予測値は実測値を過小評価することを示し、充填率を20%として平板を製作した場合にも、表面の充填率は100%となっていることが理由であるという考察もあった。



(a) 荷重試験の様子 (b) 予測値と実測値との比較
図3 平板による基礎的検討の一例

最終成果として製作された各橋梁模型の諸元を、最終得点が高かった順に表1に示す。また、荷重試験の様子と静的解析の一例を図4に示す。3Dプリンティングにより、形状の自由度が高まり、創意工夫に満ちた橋梁が製作された。重量は168~563g、支間長は570~1073mmの範囲となった。荷重試験は、得点となる上限の10kgを超えても、損傷形態をみるために追加の荷重を認めた。表1の耐荷重には、損傷が生じた模型については損傷時の荷重を、損傷が生じなかった橋梁については時間内での最大荷重を括弧書きで示した。式(1)で評価される得点は、耐荷重は全模型が上限の10kgに達し、支間長が1mを超えた模型1が最高点となった。

各班、CAEツールによる静的解析を実施し、予め損傷箇所や損傷形態を予測したが、予測通りになる場合もある一方、橋台や背面土を想定した支点がずれることによる落橋など思いもよらない損傷形態を示す場合もあった。

表1 製作された各橋梁模型の諸元

No.	形式	重量 (g)	支間長 (mm)	耐荷重* (kg)	損傷形態
1	アーチ	563	1073	(25)	損傷せず
2	アーチ	404	950	21	支点ずれ
3	アーチ	252	760	17	部材破断
4	アーチ	206	690	(15)	損傷せず
5	トラス	168	570	15	部材破断
6	トラス	269	668	(15)	損傷せず

* 耐荷重は、模型損傷時の荷重を示し、括弧書きは時間内での最大荷重を示す。得点は上限10kgで評価された。



(a) 荷重試験の様子 (b) 静的解析による変位予測
図4 橋梁模型製作の最終成果の一例

3.2 演習授業の教育効果

最終レポートにおいて、学生に本演習で学んだことの自由記述を求め、授業の教育効果を分析した。理論と実践を繰り返すことの重要性を認識できたとの感想が最も多く、重要としていた演習の第一の目的が達成された。また、CAD/CAE技術、3Dプリンティング技術といった先端技術に対して、学生が強い熱意を持っており、短期間で詳細な技術が習得された。デジタル技術を積極的に授業に取り入れ、必要な知識を学生に提供することが求められているといえる。なお、本演習授業は完全なオンライン授業での実施も可能であり、感染症流行期における演習授業の1つの在り方を示すことができたといえる。班活動・施工管理の点についても、CAD/CAEを用いた班活動の工夫、3Dプリンターの製作精度の課題への対応などの学びがあった。

最後に、長い橋を作ることのロマンを感じた、実橋梁を学生同士で見学したといった感想があり、長大構造物への知的好奇心を引き出すことができた。

4. まとめ

本稿では、CAD/CAEと3Dプリンターを用いた橋梁模型製作による演習型授業について報告した。

- 1) 橋梁模型の設計・製作を実施し、構造解析による予測と荷重試験による実測を繰り返すことにより、学生に予測と実測の双方の重要性を伝えた。
- 2) CAD/CAEによる設計・解析と3Dプリンティングによる製作を取り入れ、近年のデジタル技術の急速な発展に応える演習を実施した。

謝辞 本演習の実施にあたり、渡辺泰充氏に多大なる御助言を頂きました。深く御礼申し上げます。

参考文献

- [1] 東京大学社会基盤学専攻 HP, http://www.civil.t.u-tokyo.ac.jp/laboratory/group_e/
- [2] Autodesk, Fusion360, <https://www.autodesk.co.jp/products/fusion-360/overview>
- [3] FLASHFORGE, Adventure3, <https://flashforge.jp/product/adventurer3/>