土木学会全国大会 第77回年次学術講演会
2022年9月16日　土木教育一般(6)

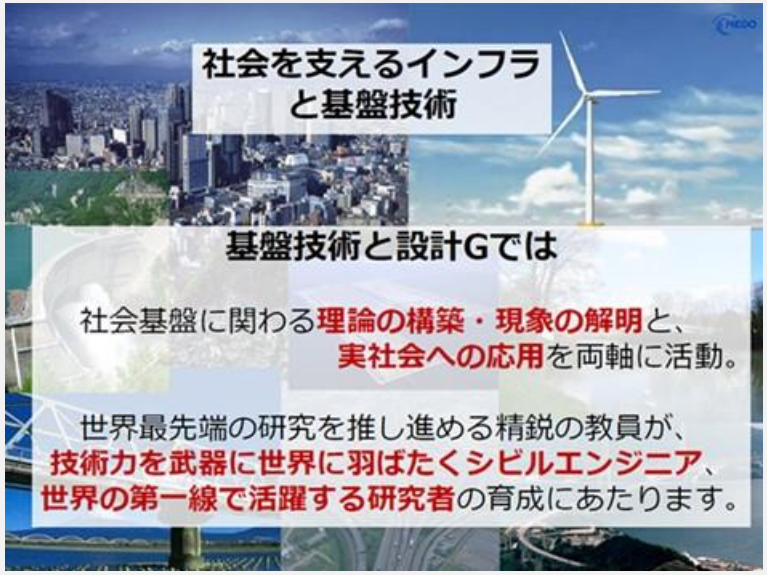
CAD/CAEと3Dプリンターを用いた橋梁模型制作による演習型授業
～理論と実践に橋を架ける～

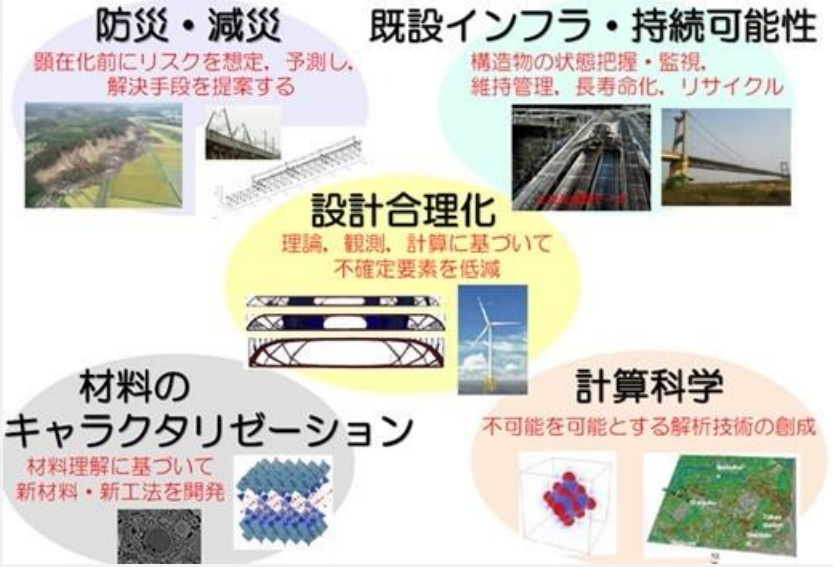
東京大学工学部社会基盤学科

〇菊地 由佳、大野 元寛、京川 裕之、大岩 敬太
蘇 迪、高橋 佑弥、渡邉 健治

はじめに

- 本学科では、学部3年次の冬学期に応用的な演習授業を実施
- 座学で得た知識を活かし、自ら課題と解決策を見つける
- 土質/地盤、コンクリート、橋梁/風工学の3研究室は、「基盤技術と設計グループ」として、社会基盤にかかわる理論の構築・現象の解明と実社会への応用を両軸に活動しており、その理念を伝える演習授業を模索してきた

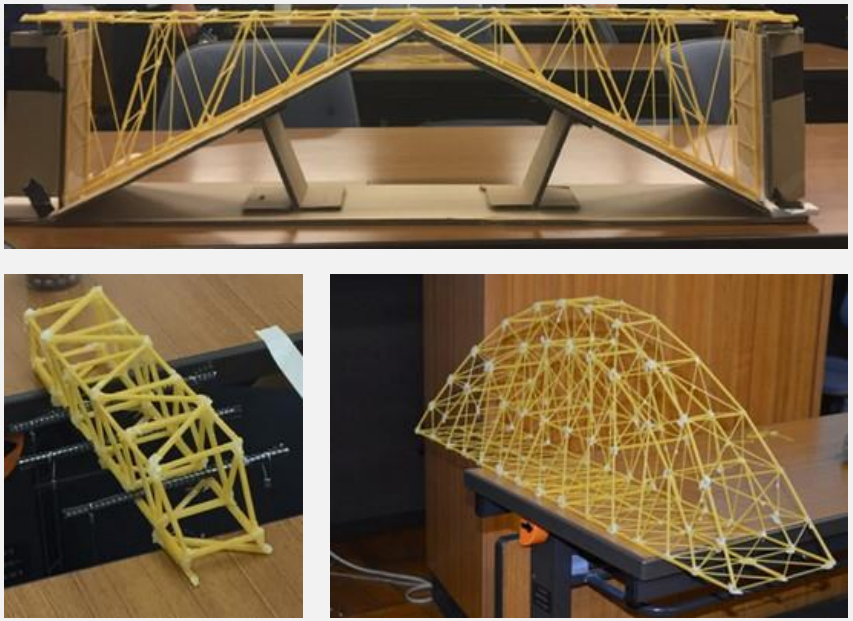




演習授業の目的

- 理論と現実の相違、背後にある仮定と適用条件の限界、および工学的判断の習得
- 将来携わる実務を見据え、班による設計・製作と施工マネジメントの習得
- 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の習得

2013頃-2019 パスタブリッジ



2020 3Dプリンター（完全オンライン）
2021 3Dプリンター（オンサイト）

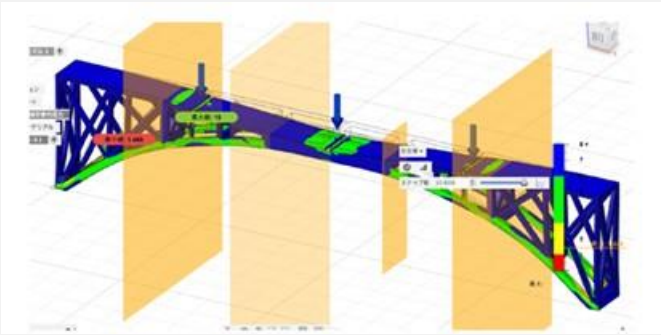
（2020 成果物例）

理論と実践に橋を架ける

- 定まった答えのある問題を解いていた座学と異なり、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
- 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
- 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

理論

実践



仮説

検証

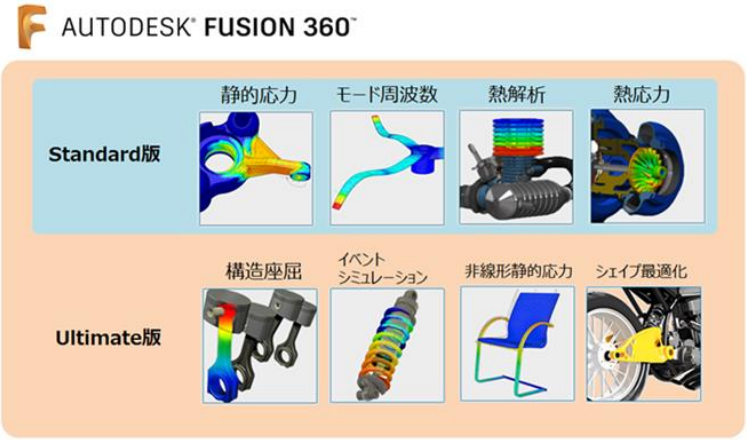
計算・分析

観察・計測

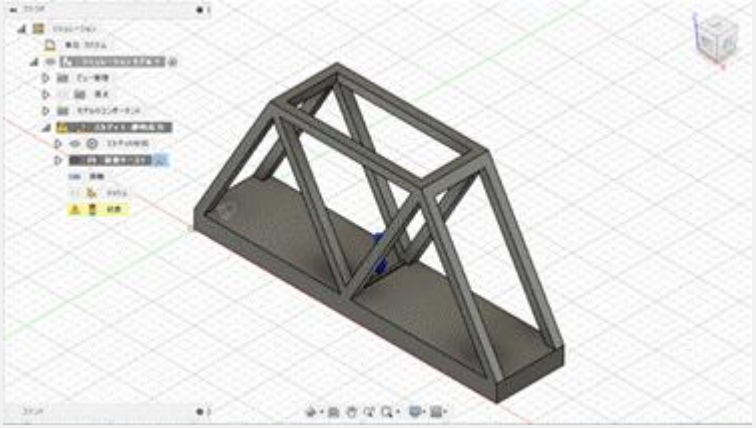
CADによる設計とCAEによる解析

- CAD/CAEを用いた設計と解析は実務で一般的となってきている
- Autodesk FUSION360を用い、シンプルなトラス模型の作成と解析のチュートリアルを用意し、学生に基礎を教えた

CAD（Computer-Aided Design）	コンピューター支援設計	設計
CAM (Computer-Aided Manufacturing)	コンピューター支援製造	製造
CAE（Computer-Aided Engineering）	CAMコンピューター支援解析	解析



準備したチュートリアル



3Dプリンティングによる施工

- 3Dプリンティング･コンクリート構造物製造技術を用いた研究開発が実用化に向けて進んでおり、最先端の施工技術に触れ、次世代の施工を考えてもらいたい
- 接着剤も用い、3Dプリンティングによる長い橋梁製作に挑戦
- 本演習では、FLASHFORGE社の熱溶解積層方式のプリンターAdventure3を用いた

世界の研究例

1. https://www.dezeen.com/2017/10/27/worlds-first-3d-printed-concrete-bridge-bicycles-bam-infra-netherlands/
2. Buswell, R.A. et al. (2018), Cement and Concrete Research, Vol. 112, pp. 37-49
3. https://www.constructionnews.co.uk/tech/why-post-virus-construction-needs-3d-printed-concrete-16-06-2020/

社会基盤学専攻での研究

https://www.criprof.com/magazine/2019/06/06/post-5940/

クラボウ寝屋川工場での開発の様子

https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-07-13-001

http://concrete.t.u-tokyo.ac.jp/ja_2017/

演習授業の構成

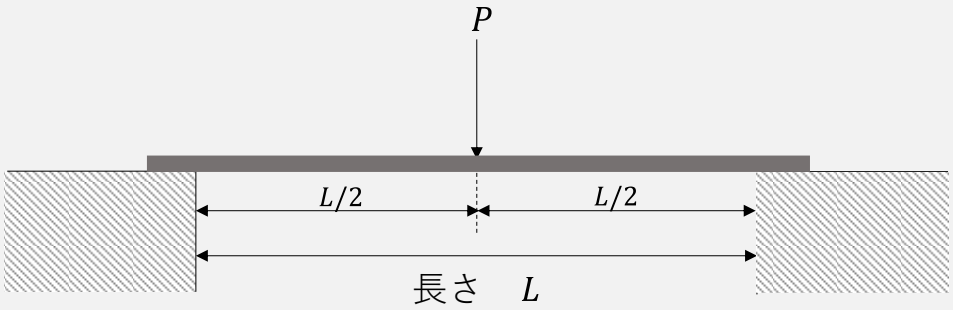
- 演習は週に1回、105分授業2コマで、全6回
- 2021年度は24名の受講生を6班に分けた
- 限られた時間の中で、できる限り基礎から習得し、理論と実践について考察を深めることができるように、工夫した

第1回　ガイダンス
　・Fusion360によるモデル作成方法・構造解析方法の説明
　・材料特性に関する講義および平板の設計・施工・解析
第2回　平板の載荷試験と考察
　・解析と観測値との比較・考察
第3回　橋梁設計・解析・施工
第4回　中間載荷試験
第5回　橋梁設計修正・再解析・施工
第6回　橋梁模型の最終載荷試験
　・プレゼン発表・解析と観測値との比較・考察

平板の載荷試験

- 平板を作成し、載荷試験を実施する
- シンプルな例で解析による予測値と観測値との比較を行い考察を深めてもらうこと、3Dプリンターの特質を習得してもらうことを目的とした
- 任意で接着剤や繋ぎ方による強度の違いも考察する

- 幅50mm、長さは150mm、厚み2mmの平板とする
- Fill Densityは20%とする
- 平板の中央に集中荷重をかけ、荷重と変位の関係を測定する



橋梁模型の載荷試験と採点ルール

- 強く、軽く、長い橋を目標に、各班で自由に橋梁模型を設計・施工し、点数で競う
- 橋梁の設計条件に近づけるため、3点で等荷重を載荷する
- 解析値と観測値からどれだけ深く考察できたのかも加点要素とした

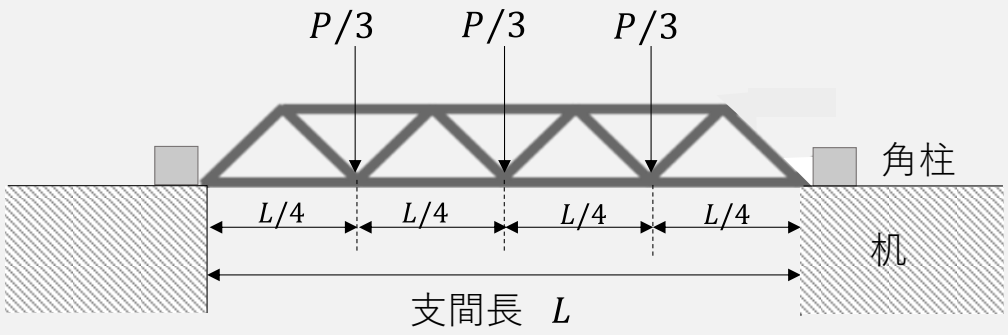
70点分

$$\text{総得点} = \frac{\text{耐荷重}}{\text{自重}} \times \left(\frac{\text{支間長}}{150}\right)^3$$

30点分

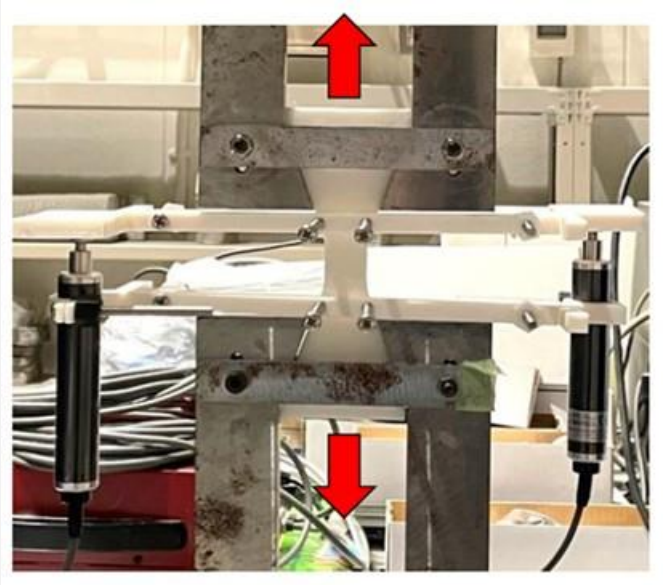
教員7人による採点

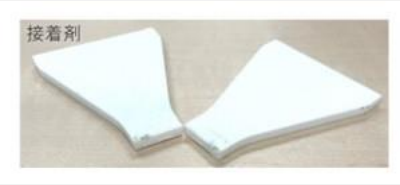
- 予想得点と総得点の差
- 破壊箇所・破壊形態
- 解析の工夫

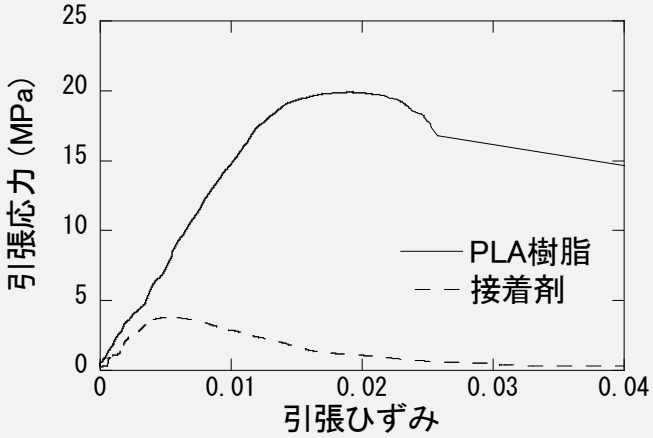


材料試験の実施

- 3DプリントされたPLA（ポリ乳酸）樹脂の供試体
- 一体型の供試体とアクリルサンデーで接着した供試体を用意
- 一軸引張試験を実施し、応力－ひずみ曲線から材料性能を取得



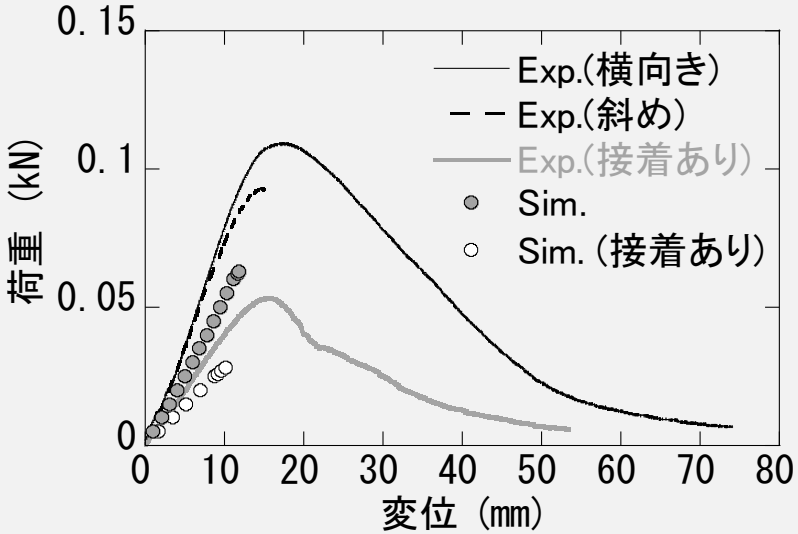




平板の載荷試験の結果

- 平板の載荷試験を実施し、荷重－変位関係の予測値と実測値との比較を実施
- 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プリンター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
- 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

実施の様子



（学生レポートより）

施工の様子

最終橋梁模型

- 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

A 班

B 班

C 班

D 班

E 班

F 班

最終載荷試験の結果

- 各班、静的解析を実施し、あらかじ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
- 長い橋を製作した班が得点が高く、評価式の狙いが達成された

損傷の瞬間

各班の載荷試験結果（得点順）

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

解析と観測による考察例 ①

- 中間載荷試験の結果を反映し、中央部に接着部がないよう奇数パーツに分けて設計
- 解析により安全率が低くなった部位が破壊され、解析の通りとなった
- 耐荷重は予測値より低く、3Dプリントの充填率によるものと結論づけている

中間載荷試験時の設計と載荷試験結果

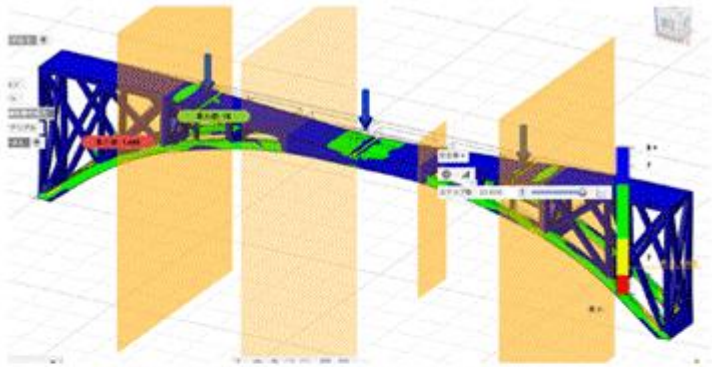


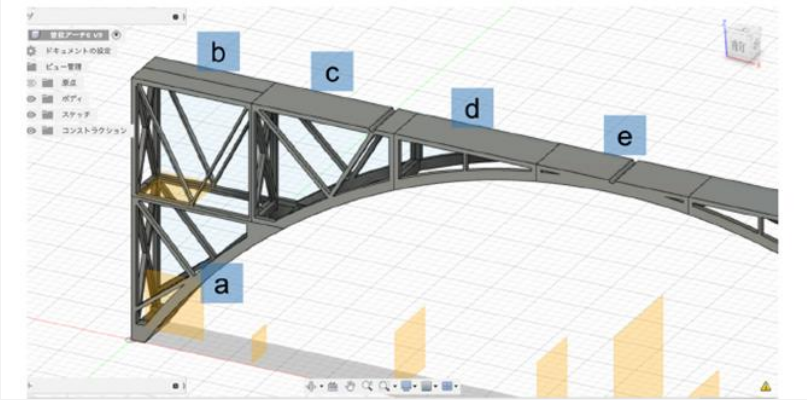
図2：アーチ ver.2 500N シミュレーション結果（安全率）

写真1：破壊部位（全景）

写真2：破壊部位（拡大）

（学生レポートより）

設計の改良

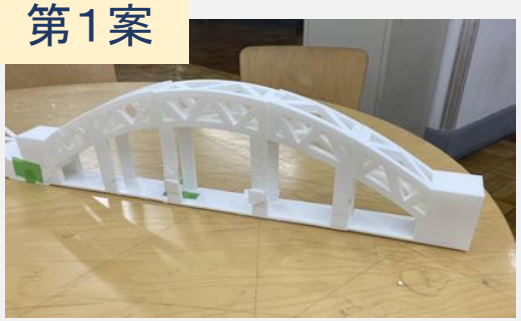


（学生レポートより）

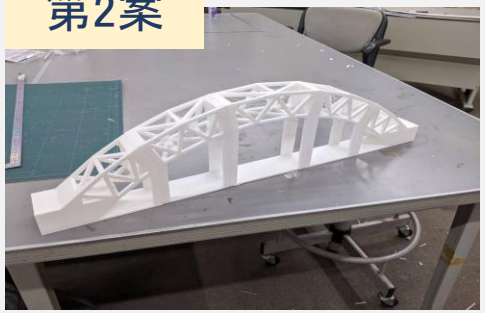
解析と観測による考察例 ②

- 接着部に圧縮力のみが作用して、接着の強度にあまり依存しない構造になるように工夫するとともに、軽量化に向けて試行錯誤
- サポート材の活用による施工精度の向上

第1案

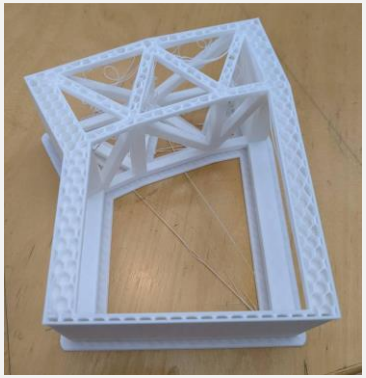


第2案

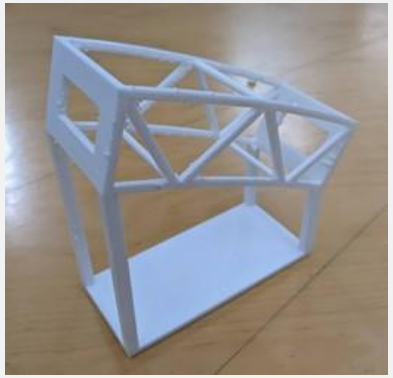


第3案

（学生発表資料より）



サポート材なし



サポート材あり

（学生発表資料より）

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
- 教員で振り返りを行い、来年度に向けた改善点の洗い出し

学生からの主な声

- 理論と実践を繰り返すことの重要性を認識できた
- CAD/CAE技術、3Dプリンティング技術といった先端技術を学ぶことができ、嬉しかった
- 今まで学んだ知識を自分の言葉として扱えるようになった
- 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に行っ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

教員による振り返り

- 解析の理論をもっと知りたかったという声が聞かれ、解析をどこまで説明するか検討する
- 3Dプリンターを前に「社会基盤に入ってよかった」との学生からの声が聞かれ、デジタル技術を積極的に取り入れた教育環境を整備する重要性を認識した

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

- 橋梁模型の設計・製作を実施し、構造解析による予測と載荷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
- 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
- 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に行っ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

本演習の実施にあたり、渡辺泰充氏に多大なるご助言をいただきました。深く御礼申し上げます