



基于宏微观土拱效应试验的桩网结构路基 课程国际化教学设计

吴丽君, 孙晋玉, 吕 龙
(成都理工大学 环境与土木工程学院, 成都 610059)

摘要: 交通基础设施建设是共建“一带一路”倡议的重要内容, 面向“新工科”的国际化人才培养是“一带一路”中国倡议走向国际实践的原动力。课程以“交通强国”课程思政为教育教学基本理念, 围绕桩网结构路基的工作机理和土拱效应的发挥机制进行教学设计。从经典桩网结构路基工程案例出发, 讲授和讨论宏微观土拱效应试验结果, 运用数值模拟手段进行延伸教学, 构建“多模块、多层次、全过程、多途径”的国际化课程教学和实践体系, 促进力学基础理论、工程实践能力、创新教育的教学路径融合, 提升学生的国际化能力, 以适应土木工程专业的快速发展和国际市场的人才需求。

关键词: 土拱效应; 桩网结构路基; 力学传递机制; 模型试验

中图分类号: U416; TU472

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20240028

International Teaching Design of Synthetic-Reinforced and Pile-Supported Embankment Based on Macro-Micro Soil-Arching Effect Tests

WU Lijun, SUN Jinyu, LYU Long

(College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Transportation infrastructure is important to the “the Belt and Road Initiative”. The motivation of initiative sponsored by China originates from the international talent cultivation for the “New Engineering”. With the development of transportation engineering, a country with strong transportation network is an important moral education and intellectual education, and teaching designs of performance of geosynthetic-reinforced and pile-supported (GRPS) embankment as well as the mechanisms of soil arching effects are conducted. Based on the classical engineering cases of GRPS embankment, both laboratory tests and numerical simulations to model macro-micro soil arching effects are added into the multi-module international teaching course of embankment engineering, which contributes to improve the mechanical theoretical knowledge, the practical ability and the innovation education level of civil engineering students. The intellectual level and engineering attainment of civil engineering students can be promoted in order to satisfy a quick development of civil engineering and requirements of international labor market.

Key words: soil arching effects; geosynthetic-reinforced and pile-supported embankment designs; mechanical transfer; model tests

自 2013 年 3 月, 共建“一带一路”倡议提出以来, 秉承创造性地传承弘扬古丝绸之路这一历史文明成果, 并赋予其新的时代精神和人文内涵, 以互联互通为起点, “一带一路”合作推动共建国家持续深化基础设施建设。随着蒙巴萨至内罗毕标准轨距铁路、孟加拉帕德玛大桥铁路连

接线项目、匈塞铁路、雅万高铁等一批重点项目和标志性工程相继开工建设并投入使用, 越来越多的“中国技术”和“中国标准”走向世界。国内现有的人才培养体系如何满足国际工程建设需求, 并且能够运用前沿的工程设计理念提升结构的功能价值和使用效能, 是目前土木工程专业国

收稿日期: 2024-01-23

基金项目: 国家自然科学基金(52108113); 成都理工大学 2022 年中青年骨干教师发展资助计划(10912-JXGG2022-01607)。

作者简介: 吴丽君, 博士, 副教授, 主要从事道路与铁道工程专业相关教学和研究工作。E-mail: fwulijun@163.com

际化人才培养中亟待解决的问题。

桩网结构路基作为高速公路和高速铁路领域使用最为广泛的路基结构形式, 铁路行业 60% 以上的路基使用该结构形式。长期的工程实践表明^[1-2], 桩网结构路基工后沉降控制效果显著且施工方便, 但现有的设计规范对土拱效应理论考虑并不充分^[3-4]。2023 年 5 月发布的《铁路路基地基处理规程》中已经将土拱效应原理部分引入到桩网结构路基加筋垫层设计中^[5]。随着我国路基工程建设水平的快速发展, 桩网结构路基的力学传递机制和结构设计原理已经成为土木工程专业本科生应当掌握的知识内容和专业技能。

桩网结构路基内部的力学传递机制以力学理论课程为基础, 属于基础工程、土力学和路基路面工程课程的交叉知识内容, 对学生的力学素养和专业知识的综合运用能力有较高的要求。值得注意的是, 桩网结构路基属于柔性或半刚性基础, 与基础工程课程中介绍的刚性基础设计原理和设计方法有很大的差异。目前, 土木工程专业本科阶段的课程、教材和实践环节均对这部分内容涉及较少, 存在与生产单位的用人需求脱节、学生的知识更新速度滞后和实践创新能力不足等问题。在学生培养过程中, 绝大部分学生对桩网结构路基工作原理的认知和理解上存在较大困难^[6], 尤其是对土拱效应理论的运用和设计考量非常有限。长期以来, 我国现行的路基规范对桩网结构路基-地基系统力学传递机制的考虑仅停留在柔性垫层局部优化设计层面, 没有对桩承式路基中土拱效应和筋材拉膜效应的计算方法作出非常明确具体的规定, 因此国内绝大部分开设土木工程专业的高校在本科教学环节不会详细讲授土拱效应和筋材拉膜效应的耦合作用原理。然而, 欧洲、美国、日本等地区或国家在进行桩网结构路基设计时已经完整计入了土拱效应和筋材拉膜效应的影响, 以充分考虑桩-网-土之间的耦合调节性能和路基的全寿命使用价值。随着我国海外基建市场的不断拓展, 为满足国际工程建设标准并提升市场竞争力, 应在教学中对与土拱效应相关的知识内容进行及时地更新和补充, 以增强学生对前沿工程技术和行业发展的认知水平, 适应国内外道路与铁路行业的快速发展。

为适应面向国际化的技能实践型人才培养需求, 提升应用型专业人才的科研创新能力, 目前国

内高校陆续开展了路基路面课程的教学改革^[7-8]。近年来, 图像处理的颗粒流特性试验技术被引入到路基的土拱效应微观研究中^[9-10], 但对基于土拱效应试验的桩网结构路基课程设计和实践探索方面所做工作较少。学生在本科阶段对土拱效应试验方法和试验数据缺乏深度学习, 极大地限制了对桩网结构路基技术发展的认知、理解和运用。课程从宏微观角度借助室内模型试验和数值模拟手段, 帮助学生理解桩网结构路基中的土工效应原理及形成机制。通过讲解国内外主流土拱效应静力学理论模型, 分析和讨论桩网结构路基的内部力学传递机制, 理解此类路基的设计方法与土拱纯力学模型的映射关联性。课程旨在培养学生的工程思维和优化设计理念, 实现基础力学知识、专业基础课程和工程实践能力的有机结合和有效延伸。

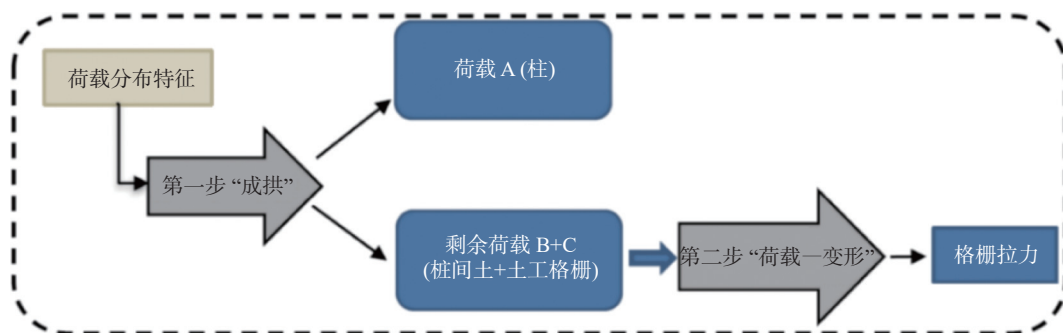
1 土拱效应力学模型理论教学框架

路基系统中的竖向土拱效应是利用桩顶和桩间土上方路基填料的差异沉降产生应力重分布。土拱效应是支撑桩-网(土工格栅)-土协调工作的重要作用机制, 其力学传递原理和荷载分布如图 1 所示。为有效计入土拱效应的影响, 单拱模型^[11]、多拱模型^[12-13]、Wedge(楔形)模型^[14]、集中拱模型^[15]被相继应用到桩网结构路基设计中, 以分析不同的路基填高、桩间距、桩径和置换率下的加固路基受力特征, 确定路基中等沉面位置和桩土荷载分担情况。以上模型可较好地反映土拱效应对桩网结构路基的力学传递性能和变形协调能力的影响, 计算参数较少且获取相对简单, 工程适用性较强。

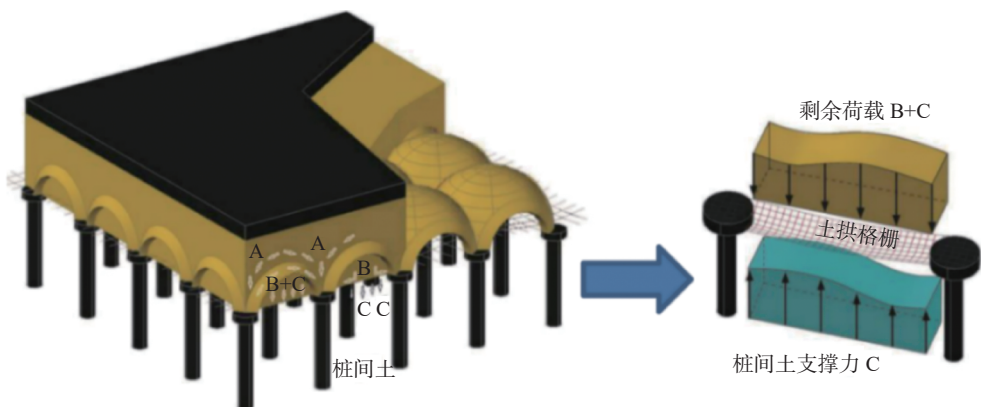
现引入几种考虑土拱效应的桩-网-土荷载分担计算的主流模型和计算方法。在进行桩网路基设计时, 根据路基的填筑高度和附加荷载类型, 将土拱按照全拱效应和半拱效应两类分别予以考虑, 具体计算方法如下。

1) 英国 BS8006 计算方法

目前, 英国 BS8006(2010)规范是国际上使用最广的桩网结构路基设计方法^[16]。该方法假设作用在土工格栅上的路基自重和路基顶面承受的荷载为三角形分布, 但没有考虑桩间土对上覆土工格栅的支撑作用。桩网结构路基中的半拱效应和全拱效应形成后, 土工格栅承受的垂直作用力 W_T 分别按照式(1)和式(2)计算如下:



(a) 土拱效应工作原理框图



(b) 桩承式路基荷载分布特征图

图 1 土拱效应工作原理和桩顶路基荷载分布特征图^[14]

$$\text{半拱效应: } W_T = 0.5(\gamma H + p)(s + d)\chi \quad (1)$$

$$\text{全拱效应: } W_T = 0.7\gamma(s^2 - d^2)\chi \quad (2)$$

式中: W_T 为加筋垫层所承受的垂直作用力, 单位 kN; H 为路基填高, 单位 m; γ 为路基填料重度, 单位 kN/m^3 ; p 为路基顶部承受的竖向荷载, 单位 kPa; s 为桩间距, 单位 m; d 为桩径, 单位 m; χ 为拱形系数, $\chi = \left(s^2 - d^2 \frac{p'_c}{\gamma H + p} \right) / (s^2 - d^2)$; p'_c 为桩帽承受的竖向荷载, 单位 kPa。

桩体荷载传递效率 E_p 按照式(3)和式(4)计算如下:

$$\text{半拱效应: } E_p = 1 - \frac{(s^2 - d^2)\chi}{s^2} \quad (3)$$

$$\text{全拱效应: } E_p = 1 - \frac{1.4\gamma(s-d)(s^2 - d^2)}{s(\gamma H + p)} \chi \quad (4)$$

2) 德国 EBGeo 方法

德国 EBGeo 方法按照多拱模型考虑路基中的土拱效应, 桩间土荷载按照三角形分布考虑^[16]。土工格栅拉力、桩体传递效率和加筋垫层的受力情况分别由式(5)~式(6)计算得到:

$$T_{rp} = J \max \varepsilon_k \quad (5)$$

式中: T_{rp} 为土工格栅拉力, 单位 kN/m; ε_k 是格栅最大应变; J 为土工格栅刚度, 单位 kN/m。

$$E_p = 1 - \frac{\sigma_{v,r}(s^2 - 0.25\pi d^2)}{\gamma H s^2} \quad (6)$$

$$\sigma_{v,r} = \lambda_1^x \left(\gamma + \frac{q_0}{h} \right) \left(H \left(\lambda_1 + \frac{H_c^2 \lambda_2}{4} \right)^{-x} - H_c \left(\left(\lambda_1 + \frac{H_c^2 \lambda_2}{4} \right)^{-x} - (\lambda_1 + H_c^2 \lambda_2)^{-x} \right) \right) \quad (7)$$

$$x = \frac{d(K_p - 1)}{\lambda_2 s}, K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'_k}{2} \right), \quad (8)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{8}(s-d)^2, \lambda_2 = \frac{s^2 + 2ds - d^2}{2s^2}$$

式中: $\sigma_{v,r}$ 是加筋垫层承受的竖向荷载, 单位 kPa; q_0 为路基顶部附加荷载, 单位 kPa; h 为换算土柱高度, 单位 m; φ'_k 为有效内摩擦角, 单位 $^\circ$; H_c 为土拱临界高度, 单位 m, 当 $H \geq \frac{s}{2}$ 时, $H_c = \frac{s}{2}$, 当 $H < \frac{s}{2}$ 时, $H_c = H$; K_p 为主动土压力系数, $K_p = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$ 。

3) 日本方法

日本按照楔形模型考虑路基中的土拱效应,

桩体传递效率 E_p 、加筋垫层上的垂直作用力 W_T 和土工格栅拉力 T_{rp} 分别由式(9)~式(11)计算得到^[13]:

$$E_p = 1 - \frac{W_T}{\gamma H s^2} \quad (9)$$

$$W_T = V_w \gamma \quad (10)$$

式中: V_w 为土拱形成的等效楔形体体积, 单位 m^3 。

$$T_{rp} = \sqrt{\left[\frac{\omega(s-d)}{2}\right]^2 + \left[\frac{\omega(s-d)^2}{8\delta_s}\right]^2} \quad (11)$$

式中: δ_s 为桩间土的沉降量; v 为参数, $\omega = \frac{W_T}{2(s-d)d}$ 。

4) 集中拱(CA)模型方法

集中拱(CA)模型由代尔夫特大学 Van Eekelen 提出, 桩体荷载传递效率、土拱径向应力、土工格栅拉力分别由式(12)~式(14)计算得到^[14]:

$$E_p = 1 - \frac{\sigma_{r,3D}}{\gamma H s_x s_y} \quad (12)$$

$$\sigma_{r,3D} = K_p H_{g3D}^{2-2K_p} \gamma \left[H - H_{g3D} \frac{2K_p - 2}{2K_p - 3} \right] \times R^{2(K_p-1)} + \frac{K_p R \gamma}{2K_p - 3} \quad (13)$$

式中: $\sigma_{r, 3D}$ 为三维集中拱的径向应力, 单位 kPa; H_{g3D} 为三维集中拱模型的最大拱高, 单位 m, 当 $H \geq \frac{s_d}{2}$ 时, $H_{g3D} = \frac{s_d}{2}$, 当 $H < \frac{s_d}{2}$ 时 $H_{g3D} = H$; R 为三维集中拱半径; s_x 和 s_y 分别为平行于线路

方向和垂直于线路方向的两桩桩间距, 单位 m。

$$T_{rp} = T_H \sqrt{1 + z'(x)} \quad (14)$$

式中: $z'(x)$ 为土工格栅的垂直变形量, 单位 m; T_H 为土工格栅的水平张力, 单位 kN/m。

2 课程内容与教学设计

2.1 课程内容

桩网结构路基中的土拱效应属于虚拟拱的范畴, 很难直观地观察到土拱的形成和变化过程。目前, 土拱的形态特征及发挥程度采用两类方法来观察和解析: 一类是试验方法, 在模型试验中运用粒子图像测速法 (particle image velocimetry, PIV) 和断层扫描 (computed tomography, CT) 技术来观察土颗粒的运动轨迹和土拱接触力链密度变化; 另一类是数值模拟方法, 基于有限元或离散元的数值模拟方法揭示桩、网附近的土颗粒运动规律。课程内容设计以学生能力培养为核心, 从模型试验结果出发讲授桩网结构路基中的土拱效应和成拱力学机制, 鼓励学生运用有限元和离散元方法分析和探讨土拱效应和筋材拉膜效应的影响因素, 架设力学理论-模型试验-工程模拟计算的桥梁, 提升本科学生的专业知识层次、技能水平和创新能力。

课程内容主要面向大四本科生, 开设于秋季学期, 分为 3 个阶段进行, 课程教学内容框图如图 2 所示, 具体课程内容如下。

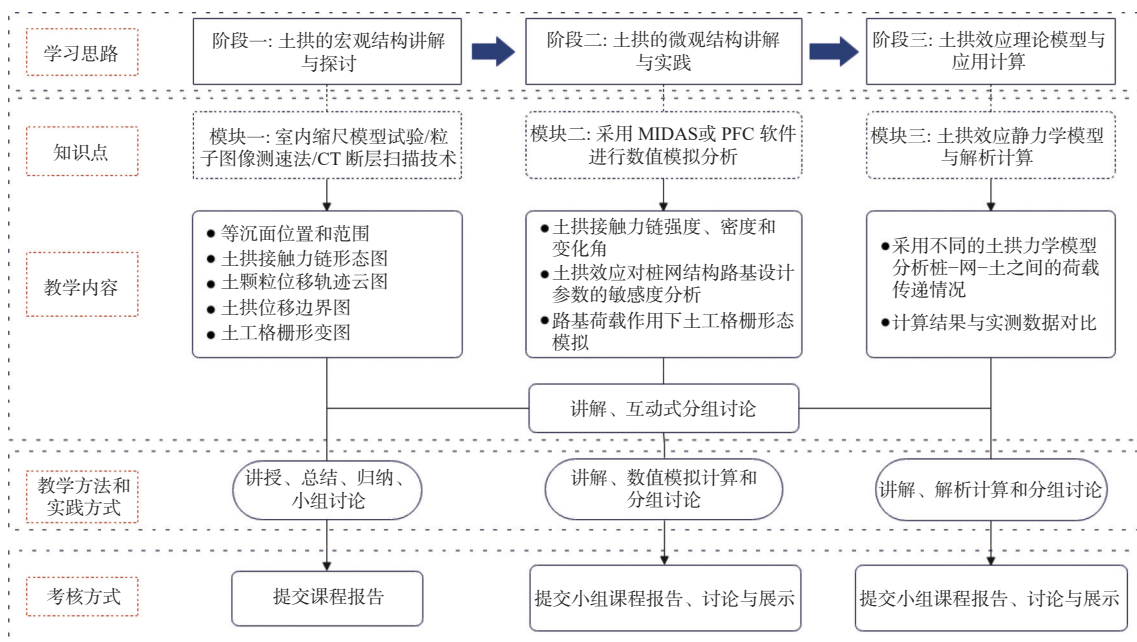


图 2 桩网结构路基力学传递机制实践课程教学内容框图

1) 第一阶段, 土拱的宏观结构讲解与探讨, 开展 8 个学时。讲授桩网结构路基结构和工作原理、缩尺模型试验、离子图像测速方法、CT 计算机断层扫描技术, 展示采用 CT 计算机断层扫描技术获取的岩土体微观结构图像和在桩网结构路基模型试验中获取的土拱结构宏微观图片, 如图 3 所示。

2) 第二阶段, 土拱的微观结构讲解与实践, 开展 8 个学时。运用 PLAXIS2D 或 PFC2D 软件模拟复杂条件下桩网结构路基的位移场和应力场, 讲授路基等沉面概念及多种控制因素。通过与模

型试验成果的对比、归纳和总结, 讲解土拱效应的形成机制和分布形态。

3) 第三阶段, 土拱效应理论模型与运用, 开展 8 个学时。从桩-网-土力学传递机制和土拱效应的形成条件出发, 讲解桩网结构路基桩土应力分配理论及各种计算方法的适应性。采用修正的 BS8006 方法、EBGEO 方法、集中拱模型方法和日本方法分析工程实例中桩-网-土荷载分担情况, 该部分内容以小组课后作业的形式完成。课堂展示和讨论后, 师生互动并延伸探讨桩间土均匀性和塑性拱形态对土拱效应发挥程度的影响机制。

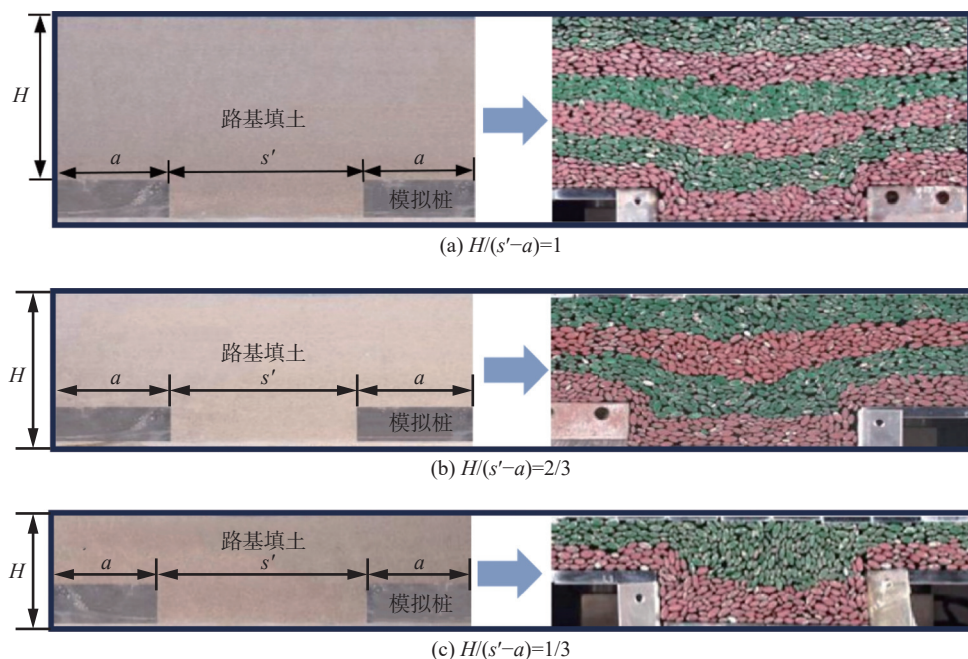


图3 不同填高的棒状土路基土拱效应模型试验图像^[17]

2.2 开放式教学方法探索

本课程作为路基路面课程的延伸和拓展, 旨在强化实践环节, 提升应用型技术人才的知识综合运用能力和科研潜力。在“互联网+新工科”教育教学重构背景下, 课程教学从构建深度课堂教学的内涵和形态出发, 探索“线上+线下”“讲授+开放式讨论”和“试验数据分析+数值模拟计算”的混合式教学方法。

1) 线上+线下教学方法探索

将桩网结构路基的力学传递机制分知识点进行讲解, 采用雨课堂线上教学平台上传典型工程案例(孟加拉达卡-杰索尔铁路线案例、柳州-南宁客运专线高填方桩承式路基设计和施工案例)视频及资料、试验视频、课程问卷和讨论专题、课堂

教学课件等相关资料。课程针对桩网结构路基的力学传递机制及长期工作性能抽象化的特点, 强化工程结构力学行为的感性认知和理性理解。学生通过网络平台, 学习典型工程案例视频并完成课程问卷。根据课程问卷的分析结果, 设置工程案例专题讨论环节, 形成对桩网结构路基设计与施工维护过程的初步认识, 引导学生全方位收集信息→多层次多角度分析工程问题→有的放矢地探索解决方法→提出行之有效的应对策略或切实可行的工程方案。通过对孟加拉达卡-杰索尔铁路线设计和施工案例、柳州-南宁客运专线高填方桩承式路基设计和施工案例的生动展示, 深入阐释课程中蕴含的思政元素。在传递专业知识和工程价值理念的同时, 引入“一带一路”倡议及

相关案例,将“交通强国”“建筑强国”等国家战略理念融入其中,厚植爱国情怀和敢为人先的创新品格,培养学生追求卓越、精益求精的工匠精神。

2) 讲授+开放式讨论探索

传统的单一课堂讲授模式,以书本教学为主,传递的知识信息量有限。当课程内容涉及较多专业概念和复杂计算时,学生往往表现出缺乏学习兴趣和认知理解困难。桩网结构路基力学传递机制中所包含的土拱效应、筋材拉膜作用、桩间土的网兜效应等知识点都比较抽象,并且部分土拱力学模型计算复杂,课堂讲授与开放式讨论相结合的教学方式有助于激发学生探索问题的积极性,深入浅出,循序渐进挖掘课堂教学的深度,实现教学知识点的课后有效延伸。在每次进行课堂讲授前,通过网络教学平台提前发放课程问卷和讨论专题,引导学生独立分析所遇工程问题和工程现象,提前思考和解答。通过线上专题讨论的方式,引导学生查询文献资料并开展交流讨论,对已有工程问题进行解答,总结归纳预备知识,修正和拓宽分析思路。针对线上专题讨论内容和解决思路,课堂讲授瞄准教学重点和教学难点,融合学生的关注点,激发学生的学习兴趣,培养开放性和创造性思维。

3) 试验数据分析+数值模拟计算探索

桩网结构路基课程具有较强的理论性和实践性,所涉及的宏观力学机制和岩土体的细观力学运动特征紧密相连,在路基工程结构设计及方案优化中有广泛的应用。课程需要从基础力学理论、模型试验、CT扫描解析、数值模拟计算等方面进行讲解。通过对试验数据的分析和讨论,认识土拱效应的形成机制和演化过程,理解其对桩网结构路基力学传递和长期工作性能的影响规律。考虑到成都理工大学土木工程专业本科学生已经在三年级系统学习过 PFC2D 软件,本课程采用 PFC2D 软件分别模拟不同桩型、桩间距、桩长、置换率影响下的填料颗粒流运动规律和粒间接触力链形态及强度变化。数值模拟计算以课后作业的形式布置并完成,通过对数值计算结果与试验数据的对比分析,强化学生对桩网结构路基力学传递机制的认识和理解。课后作业留置可巩固和促进他们对新知识的吸收和理解,重点训练学生自主学习和合作探索的能力,培养不畏困

难的科学精神和严谨求知的科学态度。最后,提交课程报告并进行课堂讨论,学生完成对知识点的理解、剖析和重构的进阶式学习过程。

3 课程特色

课程以考虑土拱效应和筋材拉膜效应的桩网结构路基设计为教学目标,完成路基路面课程专业知识的拓展和实践,旨在提升学生的力学理论知识运用能力,强化课外培养,拓宽专业视野。通过引导学生运用力学理论知识和前置专业课程知识,结合室内模型试验和计算机模态分析技术,初步掌握土拱效应对桩网结构路基工作性能的影响机制,多维度分析桩网结构路基工程问题。以团队协作方式对工程案例计算、分析讨论,尤其是桩体荷载传递效率、桩土应力分担比、土工格栅拉力等关键设计参数。实现学生运用专业知识解决工程问题和团队协作能力的综合素质培养,架起力学基础理论知识、仿真模拟、试验数据分析与工程实际应用之间的桥梁,课程特色如下。

1) 传统专业课程知识的有效延伸,以三大力学课程为基础,以桩网结构路基中桩-网-土之间力学传递机制为原点,对本科培养体系中的专业知识进行有效的延展和整合,扩大学生的学习自主权,构建理论-模拟-实践-创新的全方位、多层次培养模式。期间鼓励学生阅读期刊文献并进行分组协作,提交读书报告、课程报告和阶段性讨论总结,实现知识点的快速整合和平顺衔接。

2) 架设模型试验结果-仿真数值模拟-力学基础理论的桥梁,促使学生对土拱效应从感知认识-定性评价-定量计算和分析的快速转变,帮助学生分析桩网结构路基中桩-网-土之间的力学传递机制。通过室内模型试验印证土拱效应的长期存在和形成规律。采用 PFC2D 离散元软件土颗粒接触力链时空演化过程和路基内部变形规律。培养学生以批判思维分析、推导和解决工程问题,和纯粹的力学理论知识形成互补。

3) 理解传统力学模型与工程实际问题的关联性,实现土拱效应力学理论模型和工程问题的精准匹配。采用修正的 BS8006 方法、EBGEO 方法、集中拱模型方法和日本方法分析桩网结构路基的桩体荷载传递效率、土工格栅拉力和桩土荷载分担比。在前述 4 种方法中,前 3 种均建立在

严格的力学模型基础上。日本方法考虑到工程实际中计算参数获取和确定的难易程度,结构设计计算时使用了简化的楔形模型,计算结果介于EBGEO方法和修正的BS8006方法之间。与现场实测结果对比后发现,采用日本方法的计算结果优于EBGEO方法,但计算的难易程度明显低于修正的BS8006方法。这种思路可以帮助学生客观地建立工程思维,理解力学理论模型与工程实践之间的平衡关系。

近五年,成都理工大学土木工程专业(道路与桥梁方向)毕业本科生在道路与铁道行业的就业率已达到47.1%。学生就业现状调查结果表明,课程学习有助于学生提升职业技能和拓展就业面,能够帮助学生增强对国内外道路与铁道行业路基工程技术标准差异的适应性,激励学生追踪并掌握路基工程发展的前沿技术和最新研发动态。总体上,课程开设对土木工程本科人才培养层次的提升和深度挖掘有较大助益。

4 结束语

课程从国内外土木工程专业的人才需求出发,针对当前“路基路面工程”课程教学中的短板,将教学与科研试验成果融合以缩短学生对新结构和新技术的接纳路径,满足行业的快速发展需求。桩网结构路基课程针对当前高速公路和铁路路基设计中的难点和热点问题,围绕桩网结构路基设计的新方法、新标准和结构优化理论开展教学。课程在新工科背景下,坚持学生为本,以力学基础理论知识-室内模型试验结果分析-数值建模和计算结果讨论-解析计算延伸为教学贯穿线,鼓励学生加强课内外交流和团队协调工作,提升学生的专业技能和解决工程实际问题的综合素养,培养科研创新和实践探索精神。通过基于宏微观土拱效应试验的桩网结构路基课程教学设计,强化具有国际化视野的土木工程专业人才培养。

参考文献

[1] 赵新益,李时亮,汪莹鹤.铁路软土地基路基沉降控制技术[J].铁道工程学报,2015,32(5):18-22.

- [2] 罗强,冯桂帅,张良,等.铁路路基动力测试数据分析实验教学[J].实验科学与技术,2021,19(3):39-45.
- [3] 中华人民共和国交通运输部.公路路基设计规范:JTG D30—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.
- [4] 国家铁路局.铁路路基设计规范:TB 10001—2016[S].北京:中国铁道出版社,2017.
- [5] 国家铁路局.铁路工程地基处理技术规程:TB 10106—2023[S].北京:中国铁道出版社.
- [6] 段海娟,陈兵.土木工程材料研究性实验教学的探索与实践[J].实验室研究与探索,2020,39(6):203-206.
- [7] 魏莎,宋亦诚,宋丽芬,等.架起力学与实践的桥梁:“力学与实践”课程建设[J].力学与实践,2022,44(4):974-977.
- [8] 陈文礼,高东来,杨文瀚,等.土木工程专业桥梁风工程课程教学设计与实践[J].高等建筑教育,2023,32(2):110-116.
- [9] 江晨琦,刘磊,李世舟.基于图像处理的颗粒羽流特性试验研究[J].实验室研究与探索,2023,42(11):1-7.
- [10] RUI R, HAN J, YE Y Q, et al. Load transfer mechanisms of granular cushion between column foundation and rigid raft[J]. International Journal of Geomechanics, 2020, 20(1): 04019139.
- [11] HEWLETT W J, RANDOLPH M F. Analysis of piled embankments[J]. Ground Engineering, 1988, 21(3): 12-18.
- [12] ZAESKE D. Zur Wirkungsweise von unbewehrten und bewehrten mineralischen Tragschichten über pfahlartigen Gründungselementen[D]. Kassel: University of Kassel, 2001.
- [13] KEMPFERT H G, GOBEL G, GOBEL D, et al. German recommendations for reinforced embankments on pile-similar elements[C]//Proceedings of EuroGeo3-Third European Geosynthetics Conference, [S. l.]: [s. n.], 2004.
- [14] Railway Technology Research Institute. The design and construction handbook of mixing piled foundation machine mixing[Z]. Tsukuba: [s. n.], 1992.
- [15] VAN EEKELEN S J M, BEZUIJEN A, VAN TOL A F. An analytical model for arching in piled embankments[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2013, 39: 78-102.
- [16] British Standards Institution. Code of practice for strengthened/reinforced soils and other fills: BS8006-1[S]. London: BSI, 2010.
- [17] SOCIETY G G. Recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements: Ebgeo[M]. 2nd ed. Berlin: Ernst, Wilhelm & Sohn, 2011.

编辑 王燕