

基于城市地铁重大施工灾害案例的地铁工程教学研究

张拥军

青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛, 中国

【摘要】 地铁隧道施工安全事故是城市地下工程建设中的突出问题, 如何通过案例教学提升学生的工程安全意识和应急处置能力, 是隧道工程教学改革的关键。本文基于成果导向教育理念, 以青岛地铁4号线“5·27”突水坍塌事故为主要案例, 结合围岩与支护特性曲线的相互作用原理, 系统分析事故原因及处治措施。通过案例研讨与课堂小组讨论, 引导学生从理论走向实践, 提升其解决复杂工程问题的综合能力。教学实践表明, 案例教学法能有效激发学生的学习积极性, 增强其理论联系实际的能力, 适用于土木工程及城市地下空间工程专业的教学推广。

【关键词】 案例研讨; 地铁施工; 地下工程; 事故分析

【基金项目】 青岛理工大学研究生教改项目 (项目编号: Y022023-010)

1. 引言

隧道与地下工程是土木工程领域的重要组成部分, 其施工过程面临地质条件复杂、环境敏感、风险因素多等诸多挑战。近年来, 我国城市地铁建设进入高速发展期, 隧道施工安全事故时有发生, 不仅造成人员伤亡与财产损失, 也对工程进度和社会稳定带来严重影响[1-5]。如何培养具备扎实理论基础、敏锐风险意识和强实践能力的高素质工程人才, 已成为隧道工程教学改革的关键课题[6]。

传统的隧道工程教学多侧重于理论讲解与公式推导, 学生往往难以将抽象概念与工程实际相联系, 导致知识掌握浮于表面, 解决复杂工程问题的能力不足。案例教学法以真实、典型的工程案例为载体, 通过情景再现、问题分析和协作研讨, 引导学生主动探究、综合应用所学知识, 是连接理论与实践的有效桥梁。该方法自20世纪80年代引入我国后, 已在法学、医学、管理学等领域取得显著成效, 近年来在工科教学中也逐步得到重视与应用。

本文基于OBE教育理念, 以青岛地铁4号线施工事故为教学案例, 围绕围岩与支护特性曲线的核心理论, 开展案例设计与教学实施, 旨在探索隧道工程课程的教学新路径, 提升学生的工程素养与创新能力[7]。

2. 案例教学法的作用

案例教学法是一种以学生为中心、以案例为载体的互动式教学方法。其核心在于通过真实或模拟的工程情境, 引导学生自主分析、讨论并寻求解决方案, 从而加深对理论知识的理解, 提升综合应用能力。在隧道工程教学中,

案例教学具有以下突出价值:

首先, 案例教学有助于实现工程教育专业认证中对学生“解决复杂工程问题能力”的要求。隧道工程问题具有强非线性、多因素耦合和不确定性等特点, 单纯的理论讲授难以让学生形成系统性认知。通过真实事故案例的分析, 学生能够亲历工程问题的发现、诊断与处置全过程, 从而构建“理论—实践—再理论”的认知闭环。

其次, 案例教学能够激发学生的学习主动性与课堂参与度。传统教学中学生往往处于被动接受状态, 而案例研讨要求学生主动搜集资料、开展分析、参与辩论, 从而变“要我学”为“我要学”。在小组讨论与汇报过程中, 学生的表达、协作与批判性思维能力也得到有效锻炼[8]。

案例教学促进教师教学能力的持续提升。优质案例的选取与设计需要教师具备丰富的工程实践经验与跨学科知识储备, 同时要求教师掌握引导讨论、点评总结的教学艺术。这一过程推动教师不断更新知识结构、关注工程前沿, 实现教学相长。

最后, 案例教学承载着课程思政与工程伦理教育功能。通过对重大工程事故的反思, 引导学生树立安全第一、质量为本的责任意识, 培养严谨务实、勇于担当的职业精神, 实现知识传授、能力培养与价值引领的有机统一[9]。

3. 重大地铁施工灾害案例概况

本文选取青岛地铁4号线“静沙区间”突水坍塌事故作为教学案例。静沙区间位于崂山区, 连接静港路站与沙子口站, 为双洞单线隧

道，线间距约 13.8 m；区间全长约 1140 m，埋深约 15~33 m。隧道穿越地层以素填土、粉质黏土、砂层及强风化凝灰岩为主，且地下水赋存条件较为丰富，地下水位埋深浅、渗透条件复杂，是典型的富水软弱地层与风化岩互层地段（见图 1、图 2）。

2019 年 5 月 27 日下午，隧道掘进至里程 ZDK25+343 附近时，掌子面后方发生突水突泥，水流裹挟泥沙迅速涌入隧道并向后方扩散，对道路、周边农田及地下管线造成破坏。根据现场记录与相关估算，突水初始阶段泥浆流速大，最大速度可达 20.885 m/s，约 11 s 内抵达横通道位置（距掌子面约 110 m）；泥沙涌入量估算约为 6924 m³。清理后现场可见隧道侧壁泥水存留痕迹明显，泥水高度约 2 m，表明灾害发生时泥浆曾在较短时间内占据隧道大部分断面空间。事故发生后，施工单位启动应急预案组织抢险救援，并同步开展原因调查与风险处治。将该事故作为课堂案例，能够为学生提供“地质—水文—支护—施工”耦合失稳的完整情境，有利于训练其基于证据链的工程判断与应急处置思维。



图 1.静沙区间位置

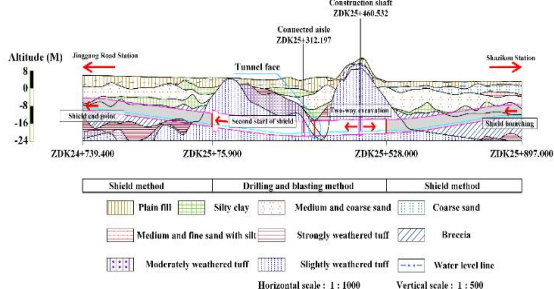


图 2.静沙区间地质剖面图

4.隧道坍塌失稳机理研讨

地铁隧道坍塌并非单一因素触发的瞬时事件，而是“地质体—地下水—支护结构—施工活动”复杂系统在时间与空间上逐步失衡后的结果。就工程机理而言，其演化过程可理解为开挖扰动引起的应力路径突变、水岩作用导致的强度与渗透条件劣化、支护体系与围岩协同关系破坏三者相互叠加，并在不利工况下形

成由“渐进劣化”向“灾变突发”的转折。

隧道开挖首先打破了地层的初始应力平衡状态，引发围岩应力重分布与塑性区扩展。掌子面前方围岩由三维受压状态转向二维甚至局部一维受荷状态，切向应力集中与径向应力释放并行发生，围岩等效强度参数随扰动产生损伤弱化[10]。在软弱或破碎围岩中，卸荷将促使微裂隙张开与扩展，导致黏聚力与内摩擦角等抗剪指标下降，自稳能力被削弱。与此同时，塑性区范围对支护阻力大小及其施作时机高度敏感：若支护滞后或刚度不足，塑性区将向外快速扩展，形成松散破碎的“承载环”失效区，使围岩变形从可控发展为不可控累积。对课堂教学而言，这一阶段是引导学生理解“围岩特性曲线—支护特性曲线”相互作用的关键切入点：围岩条件恶化会使围岩曲线整体上移、左移，而支护不足或滞后则对应支护曲线无法在允许位移范围内形成稳定交点，系统平衡因此丧失。

在富水地层中，地下水渗流与应力场耦合是促成突水坍塌的重要加速机制。孔隙水压力升高会降低有效应力，直接削弱抗剪强度；当降雨、补给或水力条件变化导致孔压短时间内增长时，潜在滑移面或破碎带的稳定储备将迅速降低。更重要的是，水的物理软化与潜蚀效应会通过“正反馈”加速劣化：细颗粒在渗流作用下发生迁移与流失，孔隙率与渗透性增大，进一步提升渗流速度并放大潜蚀，最终形成贯通性的优势通道（管道流），从而实现由滴渗、线流向突涌的转变。结合本案例的灾害表现，可在课堂中设置“预警信号识别”任务：引导学生从渗水形态、流量变化、掌子面与拱脚变形、喷层裂缝及监测曲线异常等证据，构建突水突泥的渐进演化图景，而不是将事故简单归因于“水多”或“地质差”。

支护结构系统的协同失效则是灾害由“围岩变形”转向“结构破坏”的关键环节。隧道支护并非单一构件承载，而是喷射混凝土、钢拱架、锚杆及超前支护等构成的整体体系，其有效性取决于刚度、强度与施作时机是否与围岩变形阶段匹配。若围岩等级在施工过程中显著劣化，而支护参数仍沿用较高围岩等级的设计取值，则支护曲线难以“拦截”围岩曲线的不利迁移，系统交点可能落入不稳定区或在允许位移范围内无法形成交点；若局部施工质量存在薄弱环节（如喷层厚度不足、拱架连接与锁脚约束欠佳、锚杆锚固质量不足等），则“木桶效应”将使局部破坏迅速扩展为整体失稳。

因而,将支护体系放在“曲线相互作用—时空演化”的框架下讨论,能够帮助学生把“支护不是越强越好、也不是越早越好”的工程逻辑讲清楚:关键在于与围岩阶段性变形规律相匹配,并在水文与地质条件变化时及时动态调整。

5.案例教学设计与实施

基于成果导向教育(OBE)理念,本案例教学以“能够解释事故机理、能够识别预警信号、能够提出处治方案、能够开展工程伦理反思”为核心学习产出,围绕围岩与支护特性曲线相互作用原理组织教学内容,强调从“公式记忆”走向“证据链推理”,从“单点知识”走向“系统决策”。教学目标不局限于让学生复述事故经过,而是促使其在不完备信息与多因素耦合条件下,形成可迁移的工程分析框架。

教学过程可按“课前准备—课堂研讨—课后拓展”一体化组织。课前阶段,教师提供区间地质概况、典型监测记录(位移、收敛、孔压/涌水量)、施工工法与支护参数摘要,以及事故过程文字与图片资料,要求学生以小组为单位完成两项任务:其一,整理“信息—证据—推断”的因果链,列出可能的触发因素与关键证据;其二,在给定简化参数条件下绘制围岩特性曲线与支护特性曲线的定性关系图,说明“围岩恶化/支护滞后”对交点位置与稳定性的影响。通过预习任务,学生在进入课堂前即可形成初步假设,课堂讨论因此更聚焦、更具问题导向。

课堂阶段以情境驱动开展研讨。教师首先用“事故发生前你最担心哪一个信号?”引导学生把注意力集中到风险识别上,再按“机理解释—方案生成—方案论证”的顺序推进:学生依据证据链解释灾害从渗流劣化到突涌坍塌的演化过程,并对支护体系的匹配性做出判断;随后提出处治策略,如超前地质预报与探放水、注浆加固与止水帷幕、超前管棚/小导管支护、支护参数动态调整、掌子面稳定控制与施工工序优化等,并说明各措施对应的作用机理与适用边界。教师点评时强调“方案必须与机理一一对应”,避免出现“堆措施”的经验主义表达,同时把工程伦理与安全责任纳入讨论,突出“安全红线”与“风险可接受性”的底线思维。

课后阶段鼓励学生以小论文或汇报形式完成迁移应用:选择一个同类型城市地铁突水突泥或坍塌案例,复用本课程的分析框架,形

成“地质—水文—支护—施工”耦合诊断报告,并在结尾进行反思性总结,说明在信息不充分情况下如何通过监测与预警实现风险闭环管理。评价方式可采取“过程性评价+结果性评价”结合:过程性评价关注资料搜集、证据链构建与课堂贡献度;结果性评价关注机理解释的完整性、方案的可行性与论证质量。通过上述设计,学生不仅掌握理论要点,更能在真实工程语境中建立“识别—诊断—决策—反思”的完整能力链条。

6.结语

地铁隧道坍塌灾害是一个典型的复杂系统失稳问题,其机理深刻揭示了地下工程中多物理场非线性耦合作用的本质。本文通过系统剖析,明确了从开挖应力路径突变、水岩相互作用弱化、支护系统协同失效到施工扰动触发的完整灾害演化链条。理解这一链条的内在逻辑,是实现从“事后补救”到“事前预警、事中控制”的现代工程安全管理的理论基础。

将这种对灾害机理的深度认知融入工程教育,通过构建以“机理剖析”为核心的案例教学模式,能够有效打破理论教学与实践应用的壁垒。它使学生在掌握经典理论的同时,更早地接触工程前沿的复杂性,锻炼其解决“模糊性”和“不确定性”工程难题的高阶思维能力。教学实践表明,这种基于真实灾难、聚焦科学分析的案例教学,不仅能传授知识,更能塑造学生严谨求实的科学态度、对工程安全的责任敬畏以及开拓创新的探索精神。

参考文献

- [1] 张丽,刘涛,王振海,等.无锡某地铁工程地质灾害危险性评估及防治措施研究[J].地下水,2025,47(06):225-228.DOI:10.19807/j.cnki.DXS.2025-06-066.
- [2] 刘俊城,谭勇,樊冬冬.深厚富水砂土地铁深基坑变形性状及频发地连墙渗漏灾害分析[J/OL].岩土工程学报,1-12[2026-01-20].
<https://link.cnki.net/urlid/32.1124.TU.20250513.1029.002>.
- [3] 潘正义.河南郑州“7·20”特大暴雨灾害对地铁区间人员疏散平台改进设计的启示[J].城市轨道交通研究,2024,27(08):271-274.DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.08.046.
- [4] 吕明苑.北京地铁沿线区地面沉降时空演变及灾害风险分析[J].测绘学报,2024,53

- (07) : 1458.
- [5] 李文倩, 陈紫佳, 双喆.地震灾害背景下地铁运营安全风险模糊综合评价研究[J].华南地震, 2023, 43 (03) : 110-121.DOI: 10.13512/j.hndz.2023.03.13.
- [6] 马宏强, 郑轩, 方有亮, 等.工程材料理论与应用研究生课程案例库建设和教学实践探索[J].中国教育技术装备, 2025, (14) : 74-77.
- [7] 张茹, 崔允亮, 丁智, 等.OBE 与案例双驱动的“土木工程+AI”教学改革体系的构建[J].教育教学论坛, 2025, (47) : 157-160.DOI : 10.20263/j.cnki.jyjxlt.2025.47.036.
- [8] 白利婷.工程案例融入土木工程施工课程思政的教学探索[C]//中国高校校办产业协会终身学习专业委员会.第六届教育信息技术创新与发展学术研讨会论文集.嘉兴南湖学院, 2025:5-8. DOI : 10.26914/c.cnkihy. 2025.056806.
- [9] 陈国周, 詹素华, 李杨.土木工程专业课案例教学[J].中国冶金教育, 2021, (06) : 65-66+70.DOI:10.16312/j.cnki.cn11-3775/g 4. 2021.06.018.
- [10]程马遥, 曾洋, 杨虹.佛山地区地铁粉砂层涌水涌沙灾害分析[J].科技创新与应用, 2020, (22) : 32-34+37. DOI:10.19981/j.cn23-1581/g3.2020.22.011.