

基于城市地铁施工灾害案例实践教学研究与探索

张拥军

青岛理工大学土木工程学院, 山东青岛, 中国

【摘要】随着我国城市轨道交通建设的迅猛发展,地质条件复杂、施工环境多变导致的地铁施工灾害事故频发,对高层次应用型工程技术人才的培养提出了新的挑战。为了使学生更好地理解、掌握并能够应用此基本原理解决实际工程问题,本文详细阐述了案例库的建设原则与内容体系,并以青岛地铁1号线“7·4”突水坍塌典型案例为例,探讨了“情景复现—机理剖析—方案研讨—伦理反思”四位一体的案例教学模式。实践表明,案例教学法不仅提升学生应对地下工程灾变的专业技能,更在工程伦理与职业素养方面起到了显著的育人效果。

【关键词】案例教学; 地铁施工灾害; OBE理念; 地下工程

【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

近年来,我国城市地下空间开发进入了高速发展期。据中国城市轨道交通协会数据显示,截至2021年底,全国共有51个城市开通运营城市轨道交通线路,运营里程达8736公里。然而,地铁工程通常穿越复杂的城市地质环境,面临“地质条件不清、周边环境敏感、施工工法多样”等难题,导致突水、突泥、大面积坍塌等灾难性事故时有发生[1-5]。这些事故不仅造成了巨大的人员伤亡和经济损失,也暴露出工程技术人员在面对复杂地质环境与突发工况时,往往缺乏快速识别风险、科学分析机理及制定有效处治措施的能力[6]。

案例教学法是一种能够使理论与实践有效结合的教学方法[7]。以往本科生的课堂教学以教师讲授、学生被动接受知识的教学方式为主,不能充分调动学生的主观能动性,严重阻碍了学生创造性思维的发展,导致大部分学生的研究和创新能力十分薄弱。本文以土木工程专业、城市地下空间工程专业的专业课程为例,探索引入案例教学法的路径,以期带动相关专业教学方法和课程体系的全面改革。

本文基于OBE教育理念,以青岛地铁1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。以期带动相关专业教学方法和课程体系的全面改革。

2. 基于OBE理念的案例库建设思路

OBE(成果导向教育)理念强调“以学生为中心,以产出为导向”。在土木水利专业学位研究生的培养中,核心产出即为学生解决复

杂岩土工程问题的能力[8]。传统的灌输式教学难以实现这一目标。一方面,地铁事故往往是多因素耦合的结果(如地质缺陷+降雨+支护不及时),单一学科知识难以解释;另一方面,事故惨痛的教训本身蕴含着深刻的工程伦理教育价值。因此,建设一个系统化、全景式的灾害案例库,是打破课堂沉闷氛围、实现知识向能力转化的关键基础设施。为确保案例库的教学效果,本研究确立了以下建设原则[9]:

首先,真实性与前沿性:所有案例均取材于真实发生的工程项目,剔除模糊不清的网络传闻。入库案例既包含经典的“新加坡尼诘大道坍塌”,也包含近年来发生的“青岛地铁1号线突水”等最新案例,确保教学内容紧跟行业动态。

其次,客观性与多维性:不仅提供事故现场的震撼照片与视频,更重要的是收集详尽的地质勘察报告、设计图纸、监测数据及事故调查报告。通过建立数值模型,还原事故发生全过程,实现从看热闹到懂门道的转变。

最后,典型性与覆盖面:案例需涵盖不同地域(南北方地质差异)、不同工法(矿山法、盾构法、明挖法)、不同灾害类型(坍塌、突涌、机械故障)。

3. 重大地铁施工灾害案例概况

青岛地铁一号线开胜区间,连接开封路站与胜利桥站,其位置如图1所示。隧道区间由两条平行的单线隧道组成,间距9.8m。区间隧道右线里程为YSK45+083.822m~YSK45+915.150m,全长831.328m。区间隧道左线里程为ZSK45+083.822m~ZSK45+913.855m,全长830.033m。



图 1.开胜区间位置

图 2 为里程 ZSK45+083.822m 至 ZSK45+913.855m 的开胜区间段地质剖面。区间地形起伏不大，地面高程 3.7m~4.3m。地下水位埋深为 1.10-2.10m。区间主要地层为含

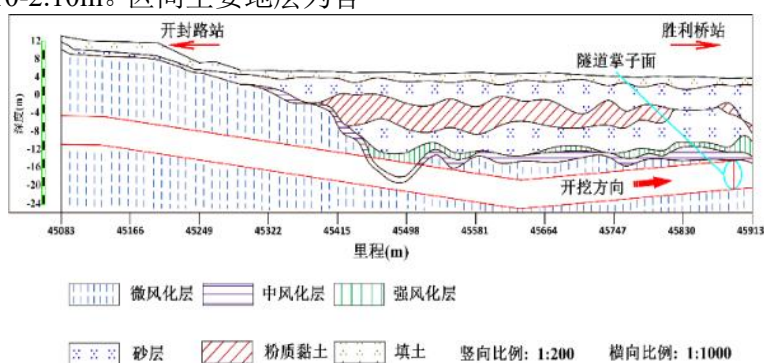


图 2.开胜区间地质剖面图

2019年7月4日上午，开胜区间左线里程为 ZSK45+891.5、距胜利桥站端部 16.5m 处在施工过程中发生坍塌，在地面形成直径约 10m，深 7m 的坍塌坑，如图 3 所示。本次灾害是由掌子面局部渗水演变为突水突泥，并最终演变为地表坍塌，对地下管线以及周边建筑造成了破坏。坍塌后隧道内堆积大量泥沙，泥沙最远流至距左线掌子面约 206m 的第二个横通道处，且积聚泥沙深度约 1.3m。坍塌后掌子面围岩完好，洞内塌腔未向掌子面前方扩展，同时已完成的隧道上台阶格栅钢架只有局部下沉，未发生格栅钢架垮塌。根据隧道二次衬砌和初支衬砌断面对土方量进行估算，左线塌方区域土方量约为 1888.945m³。

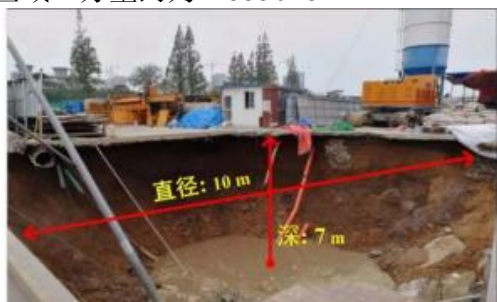


图 3.地面坍塌

4.隧道坍塌失稳机理研究

青岛地铁一号线开胜区间发生的突水突

粘性颗粒的砂层、粉质黏土、破碎的强风化岩、节理裂隙发育的中风化岩、较完整地微风化岩。区间基岩主要以花岗岩为主，局部有煌斑岩、凝灰岩侵入。胜利桥站附近基岩以凝灰岩为主。此外，区间砂层较厚，为 1.6~12.6m。隧道洞身大部分位于微风化地层，局部位于中粗砂层、强-中风化地层。拱顶埋深为 15.3~22m。开胜区间主要采取台阶法施工，隧道断面尺寸如图 3 所示，上台阶高度为约 3.2m，下台阶高度约为 3.4m，单个台阶长度为 4-5m。隧道初支由格栅拱架和喷射混凝土组成，拱顶布置超前小导管用以进行超前支护。

泥及地表塌陷灾害，其本质是在富水砂层特殊地质环境下，由地下水动力驱动导致的围岩结构体系失稳[10]。该区间地质条件极为不利，隧道拱顶穿越厚度达 1.6~12.6m 的富水砂层与基岩交界面，地下水位埋深仅 1.1~2.1m，形成了高势能的静水压力环境。松散且低粘聚力的砂性土体在台阶法开挖卸荷作用下，极其敏感且稳定性差，为灾害提供了物质基础。

从动力学机制分析，施工扰动破坏了原始地层的渗流平衡，高水头梯度引发了初始渗流。渗透动水压力直接作用于土骨架，当其超过土体抗剪强度时，诱发了由细颗粒流失的“管涌”向土体“整体液化”的突变。在剧烈的流固耦合效应下，围岩有效应力急剧降低趋近于零，呈流体状的泥砂迅速突破初期支护的薄弱环节或空隙涌入隧道，导致约 1889m³的土方瞬间亏空。

现场“掌子面围岩完好、塌腔未向前扩展”以及“钢架局部下沉但未整体垮塌”的特征表明，本次失稳模式属于典型的“拱顶垂向溃决型”破坏。由于大量泥砂流失，拱顶上方迅速形成空腔，而上覆无粘性砂土无法形成稳定的自然压力拱，导致塌腔产生“烟囱效应”不断向上扩展，最终贯通至地表形成直径 10m 的塌陷坑。泥砂在洞内流淌至 206m 远处，进一步

印证了突泥体的高流动性。综上所述,该区间的失稳机理可归纳为:开挖诱发强劲渗流,导致拱顶富水砂层液化失稳,进而引起围岩垂向连续崩解与地表塌陷的系统性破坏。

5.案例教学建设的实施和前景

在 OBE 理念框架下,地铁重大灾害案例教学的关键不在于“讲清事故经过”,而在于把事故信息转化为可评价的学习产出,进而反向设计教学活动与考核方式,使学生在有限课时内完成从“知道发生了什么”到“能判断风险、能解释机理、能提出方案、能进行伦理反思”的能力跃迁。围绕本文提出的“情景复现—机理剖析—方案研讨—伦理反思”四位一体路径,可将学习产出具体化为:能够识别富水砂层突涌的典型预警信号与关键控制参数;能够用渗流—强度—支护相互作用解释事故链式放大机制;能够在约束条件下形成处治与监测的组合方案;能够对方案的安全边界、责任边界与决策边界进行工程伦理层面的论证。

教学实施层面建议采用“课前定向输入—课中高强度研讨—课后证据化产出”的闭环组织。课前以事故调查材料、地质剖面、监测曲线、现场影像等为核心资源包,引导学生完成信息抽取与初步风险点标注;课中以分组方式开展推演:先在“情景复现”中还原开挖步序、支护配置与地下水条件,再在“机理剖析”中将渗流演化、管涌迁移、有效应力衰减与拱顶溃决等要素串联为机理链条;随后进入“方案研讨”,要求每组给出“超前预加固—止水降排—支护加固—监测预警—应急处置”的成套组合,并明确触发阈值与处置优先级;最后在“伦理反思”环节讨论信息披露、风险告知、停工决策、第三方评估等问题,使技术决策与责任体系同频呈现,从而实现“技术能力+职业素养”的双产出。

在资源建设上,案例库应坚持多学科交叉与虚实融合并行:横向打通工程地质、岩土本构与支护设计、施工组织、监测预警、盾构/矿山法工法机理以及工程管理与法规等知识界面,避免学生只从单一专业视角“线性归因”;纵向可分层配置资源难度,从“短文本+图片”的入门级案例到“勘察—设计—施工—监测—调查报告”的全链条案例逐步递进。虚实融合方面,除文字与图片外,可将 BIM 与 VR 用于典型断面、渗流通道、塌腔演化的可视化复现,让学生在虚拟巡检中完成隐患识别与处置选择,显著提升参与度与沉浸感。与此同时,本土化与国际化并重:既用青岛本地花岗岩地

层突水案例服务地方工程需求,又引入国际重大事故拓展比较视野,形成“地域差异—工法差异—灾害类型差异”的对照学习框架。

从推广前景看,该案例教学体系具备“课程内可落地、课程外可延展、行业端可迁移”的优势:既可嵌入研究生《高等隧道结构原理》等核心课程,也可作为本科《地下工程施工技术》等课程的拓展模块;同时可面向地铁一线技术人员开展继续教育,将案例研讨与标准化应急推演结合,服务行业风险防控能力提升。未来建议建立案例库动态更新与质量评价机制,以工程建设新风险为牵引持续补充案例,并通过学习产出量表、方案质量评分、课堂表现与反思报告等多元证据评估教学效果,逐步打造可复制、可推广的省级乃至国家级优质教学资源。

6.结语

“前事不忘,后事之师”。在城市地铁建设如火如荼的今天,基于重大工程事故案例的教学研究具有重要的现实意义。依托青岛理工大学城市地铁施工灾害事故案例,通过 OBE 理念下的案例研讨教学,我们成功地将枯燥的理论知识转化为鲜活的工程智慧。这不仅有效弥补了研究生工程实践经验的短板,更提升了其分析和解决复杂工程问题的综合能力。这一教学模式的探索与实践,为土木工程及相关专业的高层次人才培养提供了可复制、可推广的经验范式。

参考文献

- [1]张飞燕,张特曼,王泽武.城市地铁施工安全风险评价与控制研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(S1):443-448.
- [2]拓万盛.基于复杂地质条件的地铁盾构施工要点研究[J].中国设备工程,2025(8):242-244.
- [3]安永林,谭格宇,李佳豪等.非线性破坏准则下深埋小净距隧道围岩压力研究[J].灾害学,2023,38(01):18-24.
- [4]邢猛,李连崇.隧洞围岩损伤演化与时效破坏过程的模拟分析[J].地下空间与工程学报,2017,13(03):703-710.
- [5]周辉,宋明,张传庆,卢景景,刘振江,史林肯.水平层状复合岩体变形破坏特征的围压效应研究[J].岩土力学,2019,40(02):465-473.
- [6]管晓明,张鹏,刘延春等.基于重大工程事故案例的隧道工程教学研究[J].中国现代

教育装备, 2023 (19): 122-124.

[7]蔡国庆, 蔡靖.课程案例库教学改革与实验教学改革体系[J].高等建筑教育, 2019.

[8]邵光辉.专业学位研究生教育对案例教学的需求特点与案例库建设[J].学位与研究生教育, 2018.

[9]陈旭东.案例教学法在土木工程专业基础课中的应用[J].科技视界, 2019.

[10]王迎超, 靖洪文, 柳志军等.隧道塌方、涌水涌泥灾害案例研讨教学研究[J].课程教育研究, 2018, (16): 225-226.