

## 地铁施工坍塌事故致因机理及对策研究

刘耀轩

北京建工土木工程有限公司, 北京 100100

**[摘要]** 此次研究旨在探索地铁施工坍塌事故的致因机理, 并提出相应的对策。首先, 引入了人为因素分析与分类系统(HFACS)理论, 对其合理性进行了分析。然后, 构建了适用于地铁施工坍塌事故的 HFACS 模型。通过可靠性检验, 验证了该模型的有效性和准确性。在对地铁施工坍塌事故的原因进行分析时, 发现以下几个主要因素: 一是端头加固薄弱, 导致对到达风险产生误判; 二是不利的地质因素; 三是喷涌事件的发生; 四是对到达风险预估不足; 五是应急机制不完善。针对以上原因, 本研究提出了一系列防止地铁施工坍塌的应用技术分析。其中包括地质勘察与监测、地下水控制、深基坑支护、土方开挖与回填以及信息化施工与管理等技术手段。通过本研究的深入分析和对策提出, 希望能够为地铁施工坍塌事故的预防和控制提供科学依据, 提高地铁施工的安全性和可靠性。

**[关键词]** 地铁施工; 坍塌事故; 致因机理

DOI: 10.33142/ect.v2i1.10683

中图分类号: U231.3

文献标识码: A

### Research on the Cause Mechanism and Countermeasures of Subway Construction Collapse Accidents

LIU Yaoxuan

Beijing Construction Engineering Civil Engineering Co., Ltd., Beijing, 100100, China

**Abstract:** This study aims to explore the causal mechanisms of subway construction collapse accidents and propose corresponding countermeasures. Firstly, the Human Factor Analysis and Classification System (HFACS) theory was introduced to analyze its rationality. Then, a HFACS model suitable for subway construction collapse accidents was constructed. The effectiveness and accuracy of the model have been verified through reliability testing. When analyzing the causes of subway construction collapse accidents, the following main factors were found: first, weak reinforcement at the end, leading to misjudgment of the risk of arrival; The second is unfavorable geological factors; The third is the occurrence of gushing events; The fourth is insufficient estimation of arrival risk; The fifth is that the emergency mechanism is not perfect. In response to the above reasons, this study proposes a series of application technology analyses to prevent subway construction collapse. This includes technical means such as geological exploration and monitoring, groundwater control, deep foundation pit support, earthwork excavation and backfilling, and information construction and management. Through in-depth analysis and countermeasures proposed in this study, we hope to provide scientific basis for the prevention and control of subway construction collapse accidents, and improve the safety and reliability of subway construction.

**Keywords:** subway construction; collapse accidents; causal mechanism

### 引言

地铁施工坍塌事故是一种严重威胁城市建设安全的灾害事件。由于地铁施工的复杂性和高风险性质, 这类事故可能造成人员伤亡、财产损失以及对交通运输系统的瘫痪。因此, 深入研究地铁施工坍塌事故的致因机理, 并制定相应的对策措施, 具有重要的实践意义和社会价值。在过去的几十年中, 许多地铁施工坍塌事故发生, 给城市的可持续发展和公共安全带来了巨大挑战。然而, 目前对于地铁施工坍塌事故的研究还相对不足, 尤其是对于事故的致因机理缺乏深入的认识。因此, 本文旨在通过系统研究, 探索地铁施工坍塌事故的致因机理, 并提出相应的对策措施, 以促进地铁施工的安全性和可靠性。本文的研究方法主要包括两个方面: 一是基于人为因素分析与分类系统(HFACS)理论, 对地铁施工坍塌事故的致因进行分析和分类; 二是采用贝叶斯网络和Bow-tie模型等方法, 对地铁施工坍塌事故

的致因机理和安全对策进行研究。通过综合运用这些方法, 旨在提高地铁施工安全管理的科学性和有效性。

### 1 地铁施工坍塌事故致因 HFACS 模型建立

#### 1.1 引入人为因素分析与分类系统(HFACS)理论合理性分析

地铁施工坍塌事故的研究需要考虑许多因素, 其中人为因素起着重要作用。为了更好地理解和分析这些人为因素, 我们可以引入一种叫做人为因素分析与分类系统(HFACS)的理论。

HFACS模型是一种在航空、军事和医疗领域广泛使用的方法, 它可以帮助我们识别出人为错误、行为和决策在事故中的作用。当我们将它应用到地铁施工坍塌事故的研究中, 它可以提供一个有结构的框架, 帮助我们深入理解人为因素如何影响事故, 并揭示其影响路径。这个模型主要从四个层面进行分类, 包括个体层面、任务层面、组织

层面和环境层面。在个体层面，我们关注的是施工人员的个人特征、技能水平和注意力等因素。任务层面则考虑的是施工任务的复杂性、工作压力和负荷等因素。组织层面则关注管理体系、培训机制和沟通协调等因素。环境层面则包括施工现场的物理环境、人际关系和工作文化等因素。

## 2.2 构建地铁施工坍塌事故 HFACS 模型

HFACS 模型如下图所示，HFACS 模型考虑了施工人员在事故中的行为和决策对事故结果的影响。个体层面包括施工人员的技能水平、专业知识、经验以及对安全程序和规定的遵守情况等。任务层面关注施工任务的特性和要求，如复杂性、工作压力、时间限制和所需资源等。组织层面考虑施工组织和管理对事故的影响，如组织架构、管理体系、培训机制和监督检查等。环境层面关注施工现场的物理环境和人际关系，如布局、空间限制、设备可用性和工作条件的安全性。简而言之，HFACS 模型考虑了个体、任务、组织和环境这四个方面对施工事故产生的影响。个体层面关注施工人员的技能和心理状态，任务层面关注任务的要求，组织层面关注组织管理因素，环境层面关注施工现场的物理条件和人际关系<sup>[3]</sup>。



图 1

## 2.3 可靠性检验

可靠性检验是对地铁施工坍塌事故 HFACS 模型进行验证和评估的过程，以确定其有效性和准确性。这需要收集与地铁施工坍塌事故相关的真实数据，如事故报告、调查记录、目击证词和现场观察等信息。数据应包括多个案例，以涵盖不同类型的地铁施工坍塌事故，并充分反映人为因素的多样性和复杂性。收集到的数据需要根据 HFACS 模型的结构进行分类。按照不同层次（个体、任务、组织和环境）对每个事故事件中的相关因素进行归类。可以建立一个编码表来确保数据的一致性和可比性。对编码后的数据进行分析，计算各个 HFACS 类别的频率和关联性。可以使用统计软件或 Excel 等工具处理数据，生成图表和报告，以便进一步分析和解释。

## 3 引起地铁施工坍塌的原因分析

### 3.1 端头加固薄弱、对到达风险产生误判

在地铁施工过程中，如果端头加固措施不足或薄弱，

可能导致施工区域的土体支撑能力不足。此外，如果对到达风险的判断和评估不准确，即未能充分考虑周边建筑物、地下管线等因素对施工区域稳定性的影响，就可能出现施工区域的失稳和坍塌。

### 3.2 不利的地质因素

地质条件是地铁施工中的重要影响因素。如果施工区域遇到不稳定的地层，如软弱黏土、松散砂土、湿润黏土等，其承载能力有限，容易导致地铁施工区域坍塌。此外，地下水位过高、地下水涌入等地质因素也可能对施工区域的稳定性造成不利影响。

### 3.3 发生喷涌的原因

地铁施工过程中，如果未能充分了解地下水位、水文地质条件等相关信息，在开挖过程中可能会遇到超过设计预期的喷涌现象。喷涌水流的冲刷作用会削弱土体的稳定性，导致施工区域发生坍塌。

### 3.4 对到达风险预估不足

在地铁施工规划和设计阶段，如果对到达风险的预估不足，即未能全面考虑地下管线、邻近建筑物、地下设施等因素对施工区域的影响，就可能导致施工过程中发生意外事故。例如，未能及时获悉存在的地下管线，进行必要的探测和移位工作，可能会导致管线破坏引发坍塌。

### 3.5 应急机制不完善

在地铁施工过程中，如果缺乏有效的应急机制和紧急处置方案，一旦发生施工区域的坍塌事故，可能无法及时采取措施进行救援和修复，进一步加剧事故损失和影响。

总之，引起地铁施工坍塌的原因可能是多方面的综合作用。其中包括端头加固薄弱、对到达风险产生误判、不利的地质因素、发生喷涌、对到达风险预估不足以及应急机制不完善等。为减少此类事故的发生，施工前需进行充分的勘察和评估，采取科学合理的施工措施和加固设计，并配备完善的应急处置方案，以确保地铁施工的安全和顺利进行。

## 4 防止地铁施工坍塌的应用技术分析

### 4.1 地质勘察与监测

在防止地铁施工坍塌方面，地质勘察与监测是非常重要的应用技术。在进行地铁施工前，应进行详细的地质勘察，以充分了解施工区域的地质条件、地下水位、土层稳定性等情况。在地质勘察工作中，要采用地质勘探方法，包括钻孔、取样、岩芯分析等，获取地下土壤和岩石的物理力学性质、水文地质特征等信息。能够通过实验室试验和现场测试，确定土壤和岩石的力学参数，如抗剪强度、弹性模量、压缩性等，为后续的设计和施工提供依据。还需要通过水位观测井或水位计等设备，测量地下水位的高程和变化情况，确定地下水位对施工的影响。

在地铁施工过程中，还应设置专门的监测系统，对施工现场的地质变化、沉降、裂缝等情况进行实时监测，以

便及时发现并处理潜在的安全隐患。监测系统应包括设置水位监测井或水位计,实时监测地下水位的变化情况,及时预警地下水涌入等问题。通过使用沉降仪器、测量点网格等方式,对施工区域的地表沉降进行监测,及时掌握沉降速度和范围,判断是否存在异常情况。利用裂缝计、变形仪器等设备,对施工现场周边的岩土体进行变形监测,识别是否出现不稳定的地质变形现象,及时采取相应措施。还要设置水位计、流量计等设备,监测施工区域的地下水位、渗流量等水文信息,保证施工过程中的水文安全。

#### 4.2 地下水控制

地下水是导致地铁施工坍塌的主要原因之一。在施工过程中,有效的地下水控制措施至关重要,可以采取以下技术来降低地下水位、减小地下水对施工的影响。一方面,降水是指通过排水井和泵站等设施将地下水抽出来,以维持施工现场地下水位在可控范围内的一种方法。因此,在施工区域的周边或内部设置降水井,并进行合理布置,确保能够充分引流地下水。能够通过降水井进行抽水处理,将地下水抽出并排放到外部水体或排水管网中,以降低地下水位。

帷幕注浆是针对高含水量土层和岩石层的地铁施工常用的地下水控制技术。帷幕注浆通过在施工区域周边或内部钻孔注浆,形成一道防水屏障,控制地下水的流动。所以,要根据设计要求,在施工区域的周边或内部钻孔,形成一定间距和深度的孔洞,要选择合适的注浆材料,如水泥浆、膨润土浆等,将其注入钻孔中。还能够通过注浆设备将注浆材料注入钻孔中,形成帷幕状固体,以阻挡地下水的流动。地下连续墙是一种常用的地下水控制技术,通过在施工区域周边或内部建立一道连续的墙体,以隔离地下水和施工现场。在施工中,需要在预定位置进行钻孔,并同时进行灌浆,使钻孔形成墙体,并根据设计要求,可以采用加固钢筋、喷射混凝土等方式对墙体进行加固,增强其抗渗性能。

#### 4.3 深基坑支护

深基坑支护在地铁施工中起着至关重要的作用,因为这是防止坍塌的关键环节。在选择深基坑支护方法时,需要根据施工区域的地质条件、基坑深度等因素进行综合考虑。常用的深基坑支护方法包括桩基支护、锚杆支护、喷射混凝土支护和钢支撑支护等。这些方法各有优缺点,需要根据具体情况进行选择。

例如,桩基支护是一种常用的深基坑支护方法,其原理是通过在基坑周边打入一定深度的桩,利用桩的抗弯和抗压能力来稳定基坑。桩基支护适用于地质条件较好、基坑深度较浅的情况。其优点是施工简便、成本较低,但缺点是对于较深的基坑,桩基的施工难度会大大增加。锚杆支护是通过在基坑周边设置锚杆,利用锚杆的抗拉能力来稳定基坑。锚杆支护适用于基坑周边土质较差、基坑深度较深的情况。其优点是适应性强,对于各种地质条件都有

较好的效果,缺点是施工难度较大,成本较高。喷射混凝土支护是通过在基坑周边喷射一层混凝土,利用混凝土的抗压能力来稳定基坑。喷射混凝土支护适用于基坑周边土质较差、基坑深度较浅的情况。其优点是施工简便、成本较低,缺点是对于较深的基坑,喷射混凝土的施工难度会大大增加。钢支撑支护是通过在基坑周边设置钢支撑,利用钢支撑的抗压能力来稳定基坑。钢支撑支护适用于基坑周边土质较差、基坑深度较深的情况。其优点是适应性强,对于各种地质条件都有较好的效果,缺点是施工难度较大,成本较高。

#### 4.4 土方开挖与回填

在地铁施工过程中,土方开挖与回填作业是坍塌事故的高发环节。为了防止坍塌,必须严格按照规范进行土方开挖与回填,确保施工过程中的稳定性。首先,合理的设计是防止坍塌的关键,设计时应充分考虑地质条件、地下水位等因素,选择合适的开挖方式和回填材料。

在土方开挖过程中,应采取分层开挖的方法,以减小开挖面上的应力集中,降低坍塌风险。分层开挖的厚度应根据土壤的稳定性、地下水位等因素合理确定。同时,在开挖过程中应严格控制土体的侧压力,避免超挖或欠挖。对于不良地质条件下的开挖,可以采用预加固措施,如注浆、锚杆等,提高土体的稳定性。土方回填是防止坍塌的另一个重要环节。回填材料的选择应根据设计要求和实际情况进行,确保回填材料的质量。在回填过程中,应采取分段回填的方法,以减小回填土体对周围环境的影响,降低坍塌风险。此外,回填过程中应严格控制压实参数,如压实遍数、压实速度等,确保回填土体的密实度,提高其承载能力。为了减小土方开挖与回填对周围环境的影响,还可以采取一系列环境保护措施。例如,设置临时围挡,减少施工对周围交通和环境的影响;对开挖和回填过程中的废水、废渣进行妥善处理,避免对环境造成污染;在施工过程中进行实时监测,发现潜在的安全隐患,及时采取措施进行处理。

#### 4.5 信息化施工与管理

信息化施工与管理在防止地铁施工坍塌方面具有重要意义。通过利用物联网技术、大数据分析等手段,可以实现对地铁施工过程的实时监控与管理,从而及时发现并处理安全隐患,提高施工安全性。

物联网技术在地铁施工中的应用可以实现对施工现场各种设备、材料、环境等因素的实时监测。例如,通过安装在施工现场的传感器,可以实时收集土壤压力、地下水位、沉降、裂缝等数据,并将这些数据传输至监控中心。监控中心可以利用大数据分析技术对这些数据进行实时分析,从而判断施工现场的安全状况,及时发现潜在的安全隐患。此外,信息化施工与管理还可以实现对施工过程中各种资源的优化配置。通过收集施工现场的实时数据,可以对施工进度、材料消耗、设备使用等情况进行精确控

制,从而提高资源利用效率,降低成本。同时,信息化施工与管理还可以实现对施工质量的实时监控,通过对施工数据的分析,可以发现施工质量问题,及时采取措施进行整改,确保施工质量符合设计要求。在实际施工中,应根据具体情况选择合适的信息化施工与管理技术,确保施工质量和人员安全。例如,对于地质条件复杂、安全风险较高的地铁施工项目,可以采用高级信息化技术,如人工智能、虚拟现实等,实现更加精确、实时地监控与管理。同时,还应加强对施工人员的培训,提高他们的信息化技术水平,使他们能够熟练运用信息化工具进行施工操作,提高施工效率和安全性。

## 5 结语

通过本研究,认识到地铁施工坍塌事故的发生往往是多个因素交互作用的结果,其中包括人的行为、组织管理、技术设备等方面的问题。为了预防和减少地铁施工坍塌事故的发生,我们提出了一系列针对事故的事前预防对策和事后减轻对策。这些对策包括加强培训教育、改善组织管理、完善技术设备、强化监测与预警等方面的措施,旨在提高地铁施工的安全性和可靠性。然而,我们也意识到地铁施工坍塌事故的防范工作仍然存在挑战和难点。希望通过深入理解地铁施工坍塌事故的致因机理,并采取相应的对策措施,我们可以进一步提高地铁施工的安全性,确保施工人员和公众的生命财产安全。我们鼓励未来的研究者

继续探索和改进地铁施工安全管理的方法和技术,以促进城市轨道交通建设的可持续发展。

## [参考文献]

- [1] 林涛. 地铁施工事故分析研究[J]. 建筑安全, 2023, 38(4): 79-83.
- [2] 李德林, 范晓蕾, 张恕震. 地铁工程建设施工危险辨识与施工坍塌事故应急预案的探讨[J]. 工程与建设, 2022, 36(5): 1427-1429.
- [3] 陈赞, 陈玉斌, 刘湘慧. 基于 CBDT 和 KNN 的地铁施工坍塌事故应急措施生成研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2021, 18(3): 45-54.
- [4] 杜婷婷, 任翔, 张宁等. 基于 STAMP 模型的地铁施工坍塌事故致因分析[J]. 建筑安全, 2021, 36(9): 64-69.
- [5] 左九如. 地铁工程建设施工危险辨识及施工坍塌事故应急预案的探讨与实践[J]. 工程建设与设计, 2019, (5): 220-221+224.
- [6] 柴乃杰, 张梦, 鲍学英, 等. 基于事故树模型的地铁施工地表坍塌事故分析[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(6): 114-119.

作者简介: 刘耀轩(1982.2—), 毕业院校: 石家庄铁道学院, 所学专业: 土木工程, 当前工作单位: 北京建工土木工程有限公司, 职务: 项目副经理, 职称级别: 高级工程师。