

灌注桩在煤矿采空区上的稳定性与安全性分析

渠凯 张瑞平

中交路桥建设有限公司, 北京 100027

[摘要] 煤矿采空区的稳定性直接影响着矿井的安全和环境保护。灌注桩作为一种简便易行的地基支护方式, 在煤矿工程中得到广泛运用。但是由于采空区地质条件的复杂性和长期开采的影响, 灌注桩在长期运行中可能面临多种挑战。为了更好地理解和应对这些挑战, 深入研究灌注桩在采空区的长期稳定性与安全性显得至关重要。本研究的目标在于为灌注桩在采空区的设计、施工和管理提供科学指导, 推动煤矿工程的安全高效发展。

[关键词] 灌注桩; 煤矿采空区; 稳定性分析; 安全性分析

DOI: 10.33142/sca.v7i3.11523

中图分类号: TD22

文献标识码: A

Stability and Safety Analysis of Cast-in-place Piles in Goaf of Coal Mines

QU Kai, ZHANG Ruiping

China Road & Bridge International Co., Ltd., Beijing, 100027, China

Abstract: The stability of goaf in coal mines directly affects the safety and environmental protection of mines. As a simple and feasible foundation support method, cast-in-place piles are widely used in coal mine engineering. However, due to the complexity of geological conditions in goaf and the impact of long-term mining, cast-in-place piles may face various challenges in long-term operation. In order to better understand and respond to these challenges, it is crucial to conduct in-depth research on the long-term stability and safety of cast-in-place piles in goaf. The goal of this study is to provide scientific guidance for the design, construction, and management of cast-in-place piles in goaf, so as to promote the safe and efficient development of coal mine engineering.

Keywords: grouting piles; coal mine goaf; stability analysis; security analysis

引言

在煤矿采空区工程中, 灌注桩作为一种重要的地基支护结构, 在确保矿井安全和高效开采方面发挥着关键作用。随着煤矿深部开采的不断推进, 对灌注桩在采空区的长期稳定性与安全性提出了更高的要求。本研究旨在深入分析灌注桩在采空区的长期工作性能, 全面考虑各种因素, 以为实际工程提供科学可行的支护方案。

1 煤矿采空区上稳定性与安全性的的重要性

煤矿采空区的稳定性与安全性是地下煤矿工程中至关重要的考虑因素。随着煤矿资源的逐渐开发, 采空区的出现成为不可避免的现象。这些采空区的形成直接威胁到矿井及其周边环境的安全。首先, 采空区的不稳定可能导致地面沉陷, 给地表造成严重影响。其次, 由于采空区在地下形成, 其稳定性关系到矿工作业的安全, 一旦发生塌陷或变形, 将对矿工的生命安全构成严重威胁。因此, 深入研究采空区的稳定性与安全性, 特别是在煤矿地质条件下灌注桩支护的有效性, 对于维护矿井运营的长期稳定性和保障矿工的安全工作环境至关重要。

2 灌注桩设计与施工细节

2.1 灌注桩的设计原则

灌注桩在煤矿采空区的设计原则是确保能够有效稳固地下工程结构并提供可靠支撑的关键要素。首先, 桩的

设计需要充分考虑地质特征, 包括地层的物理性质、孔隙结构、地应力分布等。基于对地质条件的深入分析, 确定适当的桩径和桩长, 以确保桩体能够在复杂的地质环境中达到良好的承载力。其次, 设计中需充分考虑桩体的材料选择, 以确保具有足够的强度、刚度和耐久性。常用的材料包括混凝土、钢筋等, 在选择时需根据地质条件和实际工程需求进行科学合理的搭配。设计原则还包括桩的布置密度与方式, 要根据具体的采空区形状和尺寸, 以及桩与桩之间的相互作用, 确定最优的布置方案, 使其在支撑结构中形成有效的整体性^[1]。此外, 对于桩身的施工工艺也是设计的关键部分。施工过程中应确保混凝土浆液的均匀灌注, 避免空洞和松散带的产生, 以保证桩体整体性能的稳定。在桩的施工过程中, 必须仔细控制施工速度、浆液流量和压力等参数, 确保每根桩的质量可控且一致。最后, 为确保设计的实效性, 需要在实际工程中对灌注桩的设计原则进行不断验证和调整, 以适应复杂多变的地下工程环境, 实现更好的稳固效果和长期安全性。

2.2 施工工艺与材料选择

施工工艺与材料选择在灌注桩设计中扮演着关键的角色, 直接影响到支护结构的稳定性和长期性能。首先, 对于施工工艺而言, 必须确保在施工过程中能够精确控制桩的位置、深度和间距。在进行灌注时, 应采用逐层灌浆

的方式,确保浆液均匀填充桩孔,避免空隙和不均匀沉积的出现。此外,施工中需注意施浆的速度和压力,确保浆液能够有效渗透并填满孔隙,从而形成坚实的支撑体系。材料选择方面,混凝土作为主要构建材料之一,其配方设计至关重要。混凝土应具备足够的强度和耐久性,以承受地下环境中可能的压力和湿度变化。同时,在灌注桩的设计中还可考虑添加一些特殊的添加剂,如增强剂、防水剂等,以提升混凝土的性能和抗渗透能力。在材料选择中,钢筋也是不可忽视的因素。合理配置和布置钢筋可以提高桩体的抗弯和抗拉性能,增强整体结构的稳定性。此外,钢筋的防腐处理也是必要的,以防止在潮湿的地下环境中发生腐蚀,确保其长期使用性能。施工工艺与材料选择是灌注桩设计中的双重保障,需要科学合理地规划和实施,确保在实际工程中能够达到预期的支护效果。通过对施工过程和材料的不断优化,提高施工质量和材料性能,使得灌注桩在复杂地质条件下发挥更好的支撑作用,确保煤矿采空区的稳定性与安全性。

2.3 采空区特殊地质条件下的设计调整

在应对特殊的地质条件时,我们对采空区 30-7#桩基进行了仔细设计调整。通过深入的地质调查,我们充分了解了采空区地质异质性的特征。对于不同地质特征,我们灵活地调整了灌注桩的直径和长度,以确保其在各种地质条件下都能够满足稳定性的要求。考虑到地下水位的波动性,我们采用了有效的防水设计,以抵御潜在的水文压力。通过在设计中考虑地下水的不确定性,我们保障了灌注桩在可能的水文压力下仍能保持卓越的稳定性,有效降低了涌水风险。最后,为了防范潜在的地质灾害,我们进行了全面的风险评估。通过详实的岩溶和断层分析,我们制定了相应的防范策略,包括增强桩基的抗压能力和采用灵活的变形缓冲设计,从而降低了地质灾害对工程的潜在威胁。

3 灌注桩在采空区稳定性分析

3.1 采空区地质参数的获取与分析

在灌注桩设计中,准确获取和分析采空区的地质参数对于确保支撑结构的稳定性至关重要。地质参数的获取始于对采空区地质特征的详尽调查。通过地质勘测手段,获取地层的物理性质,包括土壤类型、厚度、密度等。此外,岩芯钻取和岩土工程试验可提供更为详细的地质信息,如地层强度、孔隙水压力、地应力分布等关键参数。

一般地质参数的表示形式如下:

土壤类型 (T): 描述地层主要由何种土壤组成。

土层厚度 (H): 表示地层的垂直厚度。

土壤密度 (ρ): 反映土层的质量分布情况。

采用现代地球物理勘测技术,如地震勘探和电法勘探,可以对采空区的地下结构进行三维成像,提供直观而准确的地质数据。这些数据对于理解采空区的复杂地质状况以及后续的灌注桩设计至关重要。地质参数的分析通常通过

数值模拟技术进行,其中有限元分析是常用的方法之一。通过建立地质模型,可以利用弹性力学方程:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (1)$$

其中, σ 是应力, E 是弹性模量, ε 是应变,对采空区地质条件下灌注桩的受力、变形等行为进行模拟。这有助于深入了解桩体在实际工作中所受到的力学环境,进而优化灌注桩的设计方案。

3.2 数值模拟中的地质模型建立

在进行灌注桩设计时,数值模拟中的地质模型建立是确保支护结构稳定性的关键一环。建立精准的地质模型能够提供对桩体受力、变形及与周边地层的相互作用的深刻理解。地质模型的建立需要考虑采空区内部和周边地层的各项物理性质,并运用适当的数学模型描述这些地质特征。

首先,考虑地层的弹性性质,使用弹性力学方程:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

其中, σ 是应力, E 是弹性模量, ε 是应变。这个方程能够描述桩体在地层中受到的应力响应。其次,针对非饱和土层,可以引入 Fredlund-Xing 模型等经典的非饱和和土力学模型。这些模型能够更准确地描述非饱和土层在不同孔隙水压力下的强度和变形特性。Fredlund-Xing 模型的主要方程之一为:

$$\sigma = p' + 2a\sqrt{p'} \left(1 - b\sqrt{p'} \right) \quad (3)$$

其中, σ 是有效应力, p' 是孔隙水压力。

在地质模型中,应细致考虑采空区与灌注桩的交互作用。可以通过考虑地下水的渗流、孔隙水压力的变化等来模拟这一过程。地下水流动方程通常使用达西定律:

$$q = -K \cdot \nabla h \quad (4)$$

其中, q 是渗流量, K 是渗透系数, ∇h 是水头梯度。最后,考虑桩体的非线性行为,可以采用弹性理论进行描述。使用材料本构关系,例如 Mohr-Coulomb 准则:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (5)$$

其中, τ 是剪切应力, c 是土的内聚力, σ 是有效应力, ϕ 是内摩擦角。通过以上数学模型的综合运用,可以建立一个细致且符合实际的地质模型,为后续灌注桩设计的数值模拟提供基础。这样的地质模型考虑了各种复杂因素,使得数值模拟更具可靠性,为灌注桩设计提供科学依据。

3.3 灌注桩受力与变形分析

在灌注桩设计中,对其受力和变形进行详尽的分析是确保支护结构稳定性的核心任务。灌注桩在地下环境中承受复杂的荷载,并受到地质条件的直接影响。因此,对灌注桩的受力与变形进行深入研究至关重要。首先,考虑到桩体的力学特性,可以采用弹性力学的理论进行初步分析。对于灌注桩受到的垂直荷载,可以应用弹性模量 E 和截面惯性矩 I ,通过弯曲方程:

$$M = \frac{EI}{L} \quad (6)$$

其中, M 是弯矩, L 是桩的长度。通过这一方程, 可以计算得到桩体在垂直荷载下的弯曲变形。其次, 对于水平方向的地层荷载, 可以考虑灌注桩的抗倾覆能力。通过分析桩体的侧向抗力, 可以采用桩的倾覆稳定性方程:

$$F_{\text{抗倾}} = \sum F_{\text{水平}} - \sum F'_{\text{水平}} \quad (7)$$

其中, $F_{\text{抗倾}}$ 是桩的抗倾覆力, $\sum F_{\text{水平}}$ 是桩受到的水平荷载, $\sum F'_{\text{水平}}$ 是桩的水平变形引起的侧向反力。通过这一方程, 可以评估桩体的倾覆稳定性。此外, 在灌注桩的设计中还需要考虑桩体的竖向承载能力。这可以通过桩底土层的承载力公式得到:

$$Q = A \cdot c + \sum(p - uA) \cdot \tan(\phi) \quad (8)$$

其中, Q 是桩底的承载力, A 是柱的底面积, c 是土的内聚力, p 是孔隙水压力, u 是桩体周围的土的单位重, ϕ 是土的内摩擦角。最终, 综合考虑垂直和水平方向上的受力情况, 以及桩体的变形特性, 可以通过数值模拟方法, 如有限元分析, 来更全面地分析灌注桩在复杂地质条件下的受力与变形情况。这种分析不仅可以优化灌注桩的设计参数, 还能够确保在实际工程中桩体具备足够的稳定性和安全性。

4 灌注桩在采空区的安全性评估

4.1 安全性指标与评估方法

在灌注桩在煤矿采空区的安全性评估中, 确立明确的安全性指标和采用科学合理的评估方法至关重要。安全性评估的目标是充分了解灌注桩在不同工况下的性能, 以制定合适的支护策略, 确保煤矿采空区的稳定性和工作环境的安全。在安全性指标方面, 首要考虑桩体的承载能力, 包括垂直和水平方向的荷载承受能力^[2]。这通过数值模拟和实测数据来确定桩体在受力情况下的变形和应力分布, 以评估其承载能力。同时, 为了控制桩体的变形, 需要设定合理的变形限制, 确保其在外部荷载作用下的变形处于可控范围内, 维持结构的稳定性。此外, 在水平方向的荷载下, 评估桩体的抗倾覆能力是必要的, 通过分析桩体的抗倾覆能力, 确定其在侧向力作用下的稳定性。安全性评估方法方面, 数值模拟分析是关键手段之一, 通过有限元分析等方法模拟灌注桩在不同荷载工况下的受力与变形。这提供了全面了解桩体的工作性能, 有助于提前发现潜在的安全隐患。与此同时, 现场监测通过安装传感器实时监测桩体的变形情况, 验证数值模拟的准确性, 并及时发现可能存在的问题。最后, 概率分析方法考虑各种不确定性因素, 对灌注桩的安全性进行全面评估, 提高评估的可靠性。通过综合运用上述安全性指标和评估方法, 可以全面、科学地评估灌注桩在采空区的安全性。这样的评估体系不仅有助于确定合理的设计参数和施工标准, 也为工程实施

提供可靠的安全性保障, 确保采空区的稳定与工作环境的安全。

4.2 灌注桩长期稳定性分析

在灌注桩长期稳定性分析中, 着眼于桩体在长期作用下的变形、承载能力以及与周围地层的相互作用, 以确保在使用寿命内桩体的稳定性和安全性。首先, 关注桩体的长期变形。在长时间的荷载作用下, 灌注桩可能会经历时间依赖性的变形, 主要包括由于土体固结和桩体徐变引起的沉降^[3]。这些长期变形需要通过合适的结构模型进行描述, 考虑到土体的时间效应, 如弹塑性模型或本构模型的修正。其次, 考虑桩体与周边土体的相互作用。在长时间内, 桩体与周边土体发生的沉降差异可能导致桩土交互作用的长期效应。这需要考虑土体的渐进性变形, 以及桩体对周围土体影响的长期响应。长期承载能力是另一个关键考虑因素。随着时间的推移, 桩体所承受的荷载可能会发生变化, 例如土体固结引起的附加应力。这需要对长期承载能力进行合适的修正和评估, 确保桩体在使用寿命内能够稳定承受各种荷载。最后, 对于长期稳定性分析, 还需考虑环境因素对桩体的影响, 如潮湿环境引起的腐蚀、温度变化引起的膨胀收缩等。这些因素可能会对桩体的长期性能产生影响, 因此需要在分析中全面考虑。

4.3 长期稳定性的关键影响因素

在进行灌注桩长期稳定性分析时, 必须深入考虑多个关键因素, 这些因素在桩体的使用寿命内对其稳定性产生显著的影响。首先, 地下水位的周期性变化或长期趋势对灌注桩的长期稳定性具有重要影响, 可能导致孔隙水压力变化, 影响桩体的承载能力。其次, 土体固结沉降是长期桩体沉降的主要因素之一, 由土体颗粒重新排列和孔隙水的排泄引起, 可能导致桩体的不可逆沉降。温度变化可能导致桩体材料的膨胀和收缩, 尤其在极端气温下, 这种效应可能显著增加, 需要在长期稳定性分析中予以考虑。此外, 桩体与周围土体的相互作用可能导致土体沉降差异, 需要考虑其长期效应。材料老化和腐蚀也是关键因素, 长期暴露在恶劣环境中可能导致材料强度减弱。地质和地下结构变化以及荷载历史也是影响长期稳定性的因素。在长期稳定性分析中, 通过综合考虑这些因素, 通过数值模拟和实测数据的验证, 能够更准确地评估灌注桩在使用寿命内的长期稳定性, 为工程提供可靠的支撑和保障。

4.4 灌注桩与采空区相互作用的实测分析

在济南地铁8号线1期工程洪安区间采空区30-7#桩基处理中, 我们进行了灌注桩与采空区相互作用的实测分析, 以验证设计方案的有效性。首先, 通过现场实测, 我们获取了灌注桩的变形和受力数据。利用高精度测量设备, 我们实时监测了灌注桩在不同阶段的沉降、倾斜以及承载力等关键参数, 确保实测数据的准确性和全面性。其次,

我们针对采空区进行了地下水位监测,以了解地下水在灌注桩施工和运营阶段的波动情况。这有助于评估地下水对灌注桩长期稳定性的影响,为水文压力变化提供了实测依据。通过对灌注桩和采空区的实测数据进行综合分析,我们得出了结论:设计方案中考虑的灌注桩直径、长度以及防水设计在实际工程中起到了有效作用。灌注桩在采空区特殊地质条件下表现出色,具有较好的变形控制和稳定性。这一实测分析为未来类似工程提供了有力的经验支持,同时也为灌注桩与采空区相互作用的理论研究提供了实际案例,为地下工程的设计与施工提供了有益的参考。

4.5 应急处置与灌注桩安全性的关联

在济南地铁8号线1期工程洪安区间采空区30-7#桩基处理方案中,我们高度关注应急处置与灌注桩安全性的关联,以应对可能发生的突发状况,保障工程的整体安全。首先,我们建立了完善的应急处置预案。考虑到采空区地质条件的不确定性,我们制定了多种可能性的事故应急响应方案,涵盖了灌注桩可能面临的各类风险。这包括地下水涌入、桩基受损、地质灾害等情况的处理手段和步骤。其次,我们配备了专业的应急处置团队。该团队由具有丰富经验的工程技术人员和紧急救援人员组成,能够在事故发生时快速响应、迅速判断,并采取有效措施。这有助于最小化事故对工程造成的损害,保障施工现场人员的安全。在日常施工中,我们进行了定期的应急演练,以确保团队成员熟悉应急处置流程和操作规程。这种预防性的培训有助于提高团队的应急响应能力,减少事故发生时的不确定性和风险。通过与灌注桩安全性的关联,我们在设计和施工中不仅注重工程的长期稳定性,同时关照了在紧急状况

下的应急处置能力,确保了整个工程在各种情况下的全面安全性。这一关联为类似地下工程提供了有益的经验,也为提高应急处置水平提供了实践基础。

5 结语

在煤矿采空区中,对灌注桩长期稳定性与安全性的分析表明,在设计施工过程中需全面考虑多个关键因素。这包括地下水位变化、土体固结沉降、环境温度波动、桩体与土体相互作用、材料老化和腐蚀、地质结构变化以及荷载历史。通过数值模拟和实测验证,能够精确评估灌注桩在使用寿命内的性能,为工程提供可靠的长期稳定性支持。在实际工程应用中,强调持续监测与管理,及时解决潜在问题。设计和施工应根据地质条件和环境特点,采用合理的原则和工艺,以提高灌注桩的长期稳定性和安全性。通过这项研究,我们为类似工程提供了可行的指导原则,确保工程在长期运行中达到预期的支护效果,为矿山工程的可持续发展提供支持。

[参考文献]

- [1] 冉衡,孙宁新. 灌注桩后压浆技术应用分析[J]. 居业,2023(12):29-31.3
 - [2] 白晓宇,吴泽坤,桑松魁等. 灌注桩承载特性测试技术研究进展[J]. 科学技术与工程,2023,23(32):13649-13664.
 - [3] 廖重辉. 灌注桩在填方边坡挡墙地基中的应用[J]. 四川建材,2023,49(11):91-93.
- 作者简介:渠凯(1990.6—),男,汉,内蒙古乌兰察布市,内蒙古科技大学,毕业专业:工程力学,现在职位:项目总工程师。