

城轨高架桥桩基影响下采空区沉降 预测与综合治理研究

吕显州¹,刘祝凯¹,刘源²,孙捷城³,张磊⁴,邓清海¹,张伟杰¹

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 济南国际机场建设有限公司, 山东 济南 250107;

3. 济南轨道交通集团有限公司, 山东 济南 250013;

4. 中铁建大桥工程局集团第三工程有限公司, 辽宁 沈阳 110000)

摘要:城市轨道交通高架桥穿越采空区施工时,覆岩受扰动易引发桩基不均匀沉降甚至结构失稳。为揭示桩基荷载与采空区覆岩变形的互馈影响规律并提出治理技术,以济南地铁8号线穿越采空区高架桥工程为背景,结合“砌体梁”理论与Geddes应力公式,构建了引入附加下沉系数的地表移动修正模型。通过桩长、桩径、桩距三因素正交试验,分析了设计参数对覆岩沉降特征的影响规律,并结合数值模拟优选了治理方案。研究结果表明:覆岩结构在设计荷载下保持稳定,地表沉降呈“中部大、外围小”的分布特征,最大沉降约138 mm。数值模拟揭示桩长与桩距是影响覆岩沉降的主控因素,合理增加桩长可显著改善沉降均匀性。半穿越法治理方案可将相邻桩基沉降差稳定控制在1 mm以内,较灌注充填法和全穿越法分别降低约2 mm,同时兼顾经济性与施工效率。该研究结果可为采空区条件下高架桥桩基的优化设计与稳定控制提供理论依据与工程参考。

关键词:采空区;桩基沉降;覆岩稳定性;桩基参数优化;治理方案

中图分类号:TU9

文献标志码:A

Settlement prediction and integrated control technology of pile foundations for urban metro viaducts over underlying goafs

LÜ Xianzhou¹, LIU Zhukai¹, LIU Yuan², SUN Jiecheng³,

ZHANG Lei⁴, DENG Qinghai¹, ZHANG Weijie¹

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. Jinan International Airport Construction Co., Ltd., Jinan 250107, China;

3. Jinan Rail Transit Group Co., Ltd., Jinan 250013, China; 4. China Railway Construction Bridge

Engineering Bureau Group Third Engineering Co., Ltd., Shenyang 110000, China)

Abstract: During the construction of urban rail transit viaducts crossing goafs, disturbances to the overlying rock are prone to induce uneven settlement of pile foundations and even structural instability. To reveal the mutual feedback mechanism between pile foundation loads and goaf overlying rock deformation, and propose corresponding control technologies, this study took the viaduct project of Jinan Metro Line 8 crossing goafs as the engineering background. By integrating the “voussoir beam” theory and Geddes stress formula, a modified

收稿日期:2025-07-14

基金项目:国家自然科学基金项目(42572362);山东省自然科学基金项目(ZR2021QE187);山东省高等学校“青创人才引育计划”项目(ZXQT20221228001)

作者简介:吕显州(1990—),男,山东滕州人,副教授,博士,主要从事城市与矿山地下工程灾害防治研究。

E-mail:lyuxianzhou0608@sdust.edu.cn

邓清海(1976—),男,江西新干人,副教授,博士,主要从事工程地质与水文地质研究,本文通信作者。

E-mail:dqh2004@163.com

surface movement model incorporating an additional subsidence coefficient was established. Through orthogonal tests on pile length, pile diameter, and pile spacing, the influence law of design parameters on the settlement characteristics of overlying rock was analyzed, and the optimal control scheme was screened out in combination with numerical simulation. The research results show that the overlying rock structure remains stable under the design load and the surface settlement presents a distribution characteristic of “larger in the middle and smaller in the periphery”, with a maximum settlement of approximately 138 mm. Numerical simulation reveals that pile length and pile spacing are the dominant factors affecting overlying rock settlement, and reasonable increase in pile length can significantly improve settlement uniformity. The half-crossing control scheme can limit the differential settlement of adjacent pile foundations within 1 mm, which is approximately 2 mm lower than that of the grouting filling method and the full-crossing method, while balancing the economy and construction efficiency. The research results can provide a theoretical basis and engineering reference for the optimal design and stability control of viaduct pile foundations under goaf conditions.

Key words: goaf; pile foundation settlement; overlying strata stability; pile parameter optimization; control scheme

随着城市轨道交通的快速发展,高架桥作为重要的交通枢纽结构,在城市交通体系建设和功能完善中发挥关键作用^[1-2]。然而,在部分矿区城市,由于历史采矿活动形成了采空区,导致地下地质条件复杂,上覆岩层变形特征显著^[3-4]。当高架桥桩基穿越采空区时,地基的不均匀变形会引发桩基的不均匀沉降,进而造成桩基结构失稳,严重威胁轨道交通工程的结构安全与长期运营稳定性^[5]。因此,如何准确预测采空区地质条件下桩基及地表的沉降行为,并提出科学、经济、可行的综合治理方案,已成为矿区城市轨道交通建设中亟需解决的关键技术难题^[6-7]。

目前,针对采空区变形及地表沉降预测的研究方法主要包括概率积分法、经验公式法和数值模拟法等。Hao等^[8]比较了标准推荐法与概率积分法,建立了适用于注浆加固后采空区地表残余变形定量分析的模型。Lu等^[9]结合采空区覆岩结构特征、空洞分布规律及处理工艺,对注浆条件下的附加应力计算公式进行了修正。Zhang等^[10]基于理论分析与数值模拟,对地面沉降、水平位移及应力演化特征进行了预测。上述研究为采空区地表沉降的计算与评估提供了重要参考。然而,现有研究多集中于采空区地表沉降的宏观监测与治理技术层面,对桩基-覆岩协同变形机制及桩基荷载传递规律的耦合效应缺乏系统性探讨。此外,现有沉降预测模型普遍未充分考虑桩长、桩径、桩距等关键设计参数的敏感性分析,导致采空区治理技术方案设计缺乏适应性理论支撑。目前,采空区治理技术主要包括注浆充填、地基加固和复合桩基结构等方法。程强^[11]通过对治理范围、钻孔数据和注浆参数的研究,设计了基于全充填压力注浆法的采空区地基加固方案。Alexey等^[12]提出荷载影响下的复合桩基路堤的设计理论,阐明了桩结构加固软弱地基的必要性及其适用范围。Jia等^[13]采用 Mathews 稳定性图法对采空区群的稳定性进行了评价,并结合数值结果和监测数据验证了回填土治理采空区的可行性。上述在采空区影响下工程施工安全控制方面的研究取得了积极进展,为地基稳定性治理提供了重要参考。然而,现有治理技术多侧重于地表变形的调控或单一加固措施的应用^[14],对桩基荷载与采空区复杂地质条件的耦合效应关注不足,缺乏桩基参数的系统优化设计思路与综合治理体系,使得现有方案难以满足城市轨道交通高架桥在安全性与耐久性方面的高标准要求。

针对上述问题,依托济南地铁8号线洪安段高架桥穿越采空区工程,基于 Geddes 应力公式和“砌体梁”理论,系统研究桩基荷载作用下采空区上覆岩层的稳定性特征与变形规律。通过数值模拟方法,分析桩长、桩径和桩距等关键设计参数对桩基沉降行为的影响机制,并在此基础上构建高架桥桩基-采空区加固分析模型,对不同治理方案的适用性与治理效果进行综合对比。本研究旨在为采空区条件下城市轨道交通高架桥桩基的优化设计与安全施工提供科学依据与技术支持,提升道路建设与运营阶段的整体安全性与可靠性。

1 桩基荷载作用下采空区覆岩附加沉降研究

1.1 覆岩沉降理论分析

1.1.1 基于关键块体力学模型的覆岩稳定性判据

根据 Geddes 桩基荷载分析模型^[15], 桩顶竖向荷载 Q 可分解为桩端阻力 Q_b 、桩侧均匀分布阻力 Q_u 和桩侧线性增长分布阻力荷载 Q_v , 其计算参数示意如图 1 所示。

在单桩荷载的作用下, 土体中任一点 (r, z) 竖向应力 σ_z 可表示为^[15]:

$$\begin{cases} \sigma_z = Q_b + Q_u + Q_v, \\ Q_b = (Q/L^2) \cdot I_b, \\ Q_u = (Q/L^2) \cdot I_u, \\ Q_v = (Q/L^2) \cdot I_v. \end{cases} \quad (1)$$

式中: I_b 、 I_u 和 I_v 分别为桩端阻力、桩侧均匀分布和桩侧线性分布阻力的应力系数, L 为桩长。

研究表明, 桩基荷载可通过土体逐级传递至采空区覆岩结构, 对关键岩块的应力状态产生显著影响。基于“砌体梁”结构力学模型^[16], 可将覆岩结构视作由关键块体 B、C 组成的力学系统(图 2)。当桩基荷载沿垂向传递至关键块体时, 会产生附加应力 P_0 , 并引起关键块体的水平推力 T 与摩擦剪切力 Q_B 、 Q_C 。

根据平衡条件推导, 关键岩块系统的受力关系可表示为:

$$\begin{cases} T = \frac{P_B + 2P_0 \frac{l_x}{l}}{l_B - \frac{1}{2} \sin\theta_1}, \\ Q_B = \frac{(4l_B - 3\sin\theta_1)P_B + (4l_B - 2 \frac{l+l_x}{l} \sin\theta_1)P_0}{2(2l_B - \sin\theta_1)}, \\ Q_C = \frac{\sin\theta_1}{2(2l_B - \sin\theta_1)} \left(P_B + 2P_0 \frac{l_x}{l} \right). \end{cases} \quad (2)$$

式中: P_B 和 P_C 为关键岩块 B 和 C 承受的荷载, h 为关键岩块的高度, l_x 为桩基荷载作用点至覆岩块体边缘的距离, l 为关键岩块长度, l_B 为关键岩块 B 的长度, θ_1 为岩块回转角。

当关键块体发生滑移失稳时, 应满足滑移条件^[17]:

$$T \tan\varphi \geq Q_B. \quad (3)$$

式中, $\tan\varphi$ 为岩块间摩擦系数。

而覆岩结构不产生回转失稳时, 应满足抗倾覆条件:

$$T \leq \alpha \eta \sigma_c. \quad (4)$$

式中: T 为引起关键块体的水平推力; α 为岩块铰接处的接触面高度; $\eta \sigma_c$ 为岩块在角端处的挤压强度, η 一般取值为 0.3。

将前述条件代入“砌体梁”力学模型, 可分别得到桩基荷载作用下覆岩结构的两种失稳判据:

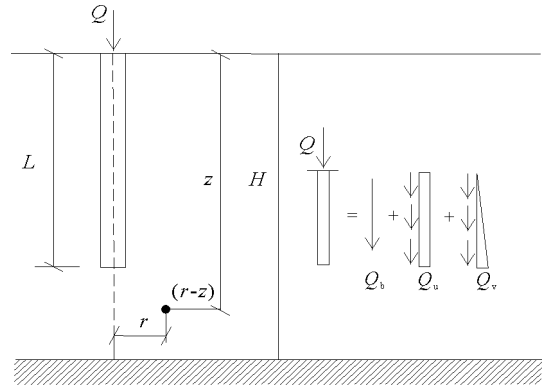


图 1 桩荷载计算参数示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pile load calculation parameters

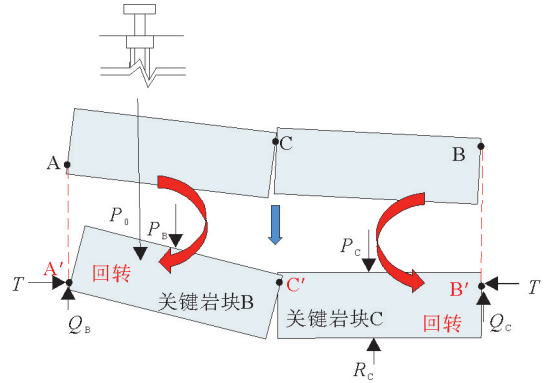


图 2 桩基荷载作用下关键块体力学系统图

Fig. 2 Mechanical system diagram of key blocks under pile foundation loading

$$\left\{ \begin{array}{l} P_0 \leq P_B \frac{\tan\varphi + \frac{3}{4}\sin\theta_1 - l_B}{l_B - \frac{1+k}{2}\sin\theta_1 - 2k\tan\varphi}, \quad S \text{ 条件;} \\ P_0 \leq \frac{0.15(l_B - \frac{1}{2}\sin\theta_1)(h - l\sin\theta_1)\sigma_c - P_B}{2k}, \quad R \text{ 条件.} \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: $k = l_x/l$; S 条件、R 条件分别为关键岩块发生滑落失稳和回转失稳时的条件。

1.1.2 桩基荷载作用下覆岩附加下沉系数计算方法

在明确桩基荷载作用下覆岩结构稳定性条件后,可进一步分析采空区地表移动与变形规律。由于桩基荷载会改变覆岩的应力传递特征,从而影响地表下沉的分布与幅度。因此,在地表移动与变形预测中,需引入附加下沉系数进行修正。

根据概率积分法,地表残余移动变形的下沉系数^[18]

$$q_c = k(1 - q)(1 - e^{-\frac{50-t}{50}}) \quad (6)$$

式中: k 为调整系数,一般取值为 0.5~1.0; t 为距开采结束时间, a 。

在预测桩基荷载作用下采空区地表的附加沉陷时,应综合考虑桩基荷载的大小及施加位置、垮落带岩块的压实特性以及裂隙带破碎岩体的失稳行为等多种影响因素。依据前述覆岩结构失稳判据,当覆岩发生不同形式的失稳时,其附加下沉系数需按分区方式计算。根据桩基荷载作用位置的不同,将地表附加下沉系数划分为 q_{cz} 和 q_{cb} 两类。

1) q_{cz} 表示桩基荷载作用于采空区中央上方且覆岩保持稳定时的附加下沉系数,其轴向应变 ϵ 可表示为^[17,19]:

$$\epsilon = \frac{\sigma_z K_p^{7.7} (K_p - 1)}{10.39\sigma_c^{1.042} (K_p - 1) + \sigma_z K_p^{8.7}} \quad (7)$$

式中: σ_z 为桩基附加应力,可由式(1)计算得到; K_p 为垮落岩体临界破断的碎胀系数。

因地表的附加下沉主要由垮落带压缩引起的,故附加下沉量与垮落带的压缩应变成正比,有

$$q_{cz} = \frac{\Delta H_k}{M} = \frac{H_k \epsilon}{M} = \frac{H_k \sigma_z K_p^{7.7} (K_p - 1)}{M [10.39\sigma_c^{1.042} (K_p - 1) + \sigma_z K_p^{8.7}]} \quad (8)$$

式中: ΔH_k 为垮落带压缩变形量, H_k 为垮落带高度, M 为开采厚度。

2) q_{cb} 表示桩基荷载作用于采空区边界上方且覆岩发生失稳时的下沉系数,此时计算 q_{cb} 需区分为滑落失稳(S 条件)与回转失稳(R 条件)两种模式。

当桩基荷载作用于采空区覆岩结构边界上方时,稳定性主要受关键岩块间水平推力 T 与摩擦剪力 Q_c 的平衡控制。结合式(2)和失稳判据 S 条件,当桩基荷载作用后覆岩达到极限平衡状态时,其最小回转角

$$\theta_{\min} = \arcsin \left[\frac{4P_0(h - 2l_x \tan\varphi) - 4P_B(l \tan\varphi - h)}{3lP_B + 2P_0(l + l_x)} \right] \quad (9)$$

若地表尚未受到桩基附加荷载作用,即 $P_0 = 0$,覆岩结构保持相对稳定,则初始回转角

$$\theta_0 = \arcsin \left[\frac{4(h - l \tan\varphi)}{3l} \right] \quad (10)$$

当桩基荷载施加后,关键块体发生微小旋转,回转角由 θ_0 减小为 θ_{\min} 。根据砌体梁几何关系,关键岩块的竖向附加位移可近似表示为:

$$\Delta W = l(\sin\theta_{\min} - \sin\theta_0) \quad (11)$$

将其归一化处理,得到采空区边界上方滑落失稳条件下的附加下沉系数

$$q_{cbS} = \frac{l(\sin\theta_{\min} - \sin\theta_0)}{M} \quad (12)$$

若覆岩发生回转失稳,其最大回转角

$$\theta_{\max} = \arcsin \left[\frac{M - \sum_{i=1}^n h_i (K'_{pi} - 1)}{l} \right] \quad (13)$$

式中: i 为岩层层数, h_i 为第 i 层岩层厚度, K'_{pi} 为第 i 层岩层垮落岩体临界破断的碎胀系数。

同理,可以得到采空区边界上方回转失稳条件下的附加下沉系数

$$q_{\text{cBR}} = \frac{l(\sin\theta_{\max} - \sin\theta_0)}{M} \quad (14)$$

当采空区覆岩保持稳定时下沉系数采用式(8)计算;当发生滑落失稳或回转失稳时,分别采用式(12)和(14)进行修正。

1.1.3 地表沉降分布计算与模型预测

地表沉降分布通常采用概率积分法计算,采空区地表最大下沉量

$$W_{\max} = qM \cdot \cos\alpha \quad (15)$$

式中: q 为地表下沉系数, α 为煤层倾角。

工程中大面积采空区可以视为半无限开采,对于水平煤层半无限开采,煤层为半无限开采断面的下沉值

$$W(x) = \frac{W_{\max}}{\sqrt{\pi}} \int_{-\sqrt{\pi} \frac{x}{r}}^{\infty} e^{-t^2} dt \quad (16)$$

式中: t 为积分哑变量, r 为主要影响半径, x 为计算点到开采界面的水平距离。

1.2 工程实例分析

洪家河西站至安莉芳路站段位于济南市经十东路,西起六号路以西 50 m 处,东至诺贝尔城小区北侧,全长 1.54 km。研究区地层结构主要由人工堆积层、第四系沉积层以及下伏石炭—二叠系基岩组成。岩性以泥岩、砂岩和石灰岩为主,各层厚度分别为 0.40~8.60 m、0.20~19.30 m 和 0.50~32.70 m,拟建线路地质剖面如图 3 所示。

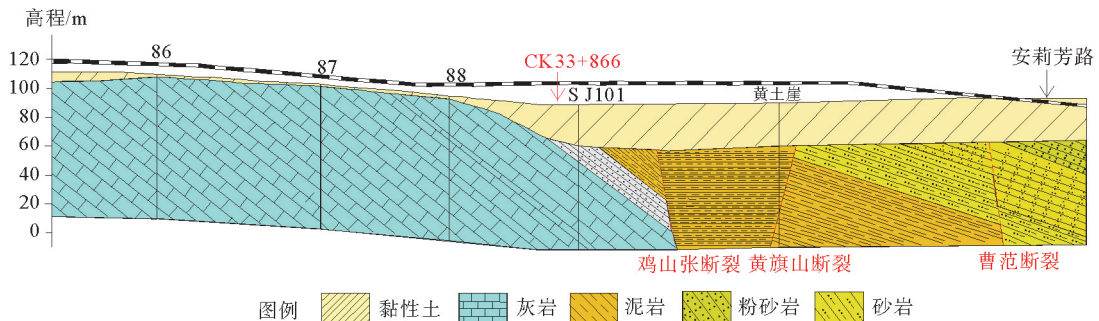


图 3 拟建线路地质剖面图

Fig. 3 Geological section of the proposed line

拟建城轨高架桥线路穿越圣井煤矿 3[#] 煤和 9[#] 煤采空区,地面标高为 95.0~104.0 m。圣井煤矿始建于 1991 年,1994 年投产,2015 年 3 月闭矿。煤层顶板主要为粉砂岩,近水平开采,垮落法管理顶板形成采空区,整体呈未充填状态。工程主要涉及 S-3-I 与 S-9-II 两处采空区:S-3-I 采空区呈不规则圆形,东西向延伸 600 m,南北向延伸 400 m,采深 60~100 m,煤层平均开采厚度 0.8 m;S-9-II 采空区呈葫芦状,东西向延伸 600 m,南北向延伸 1 500 m,采深 180~200 m,煤层平均开采厚度 1.01 m,如图 4 所示。

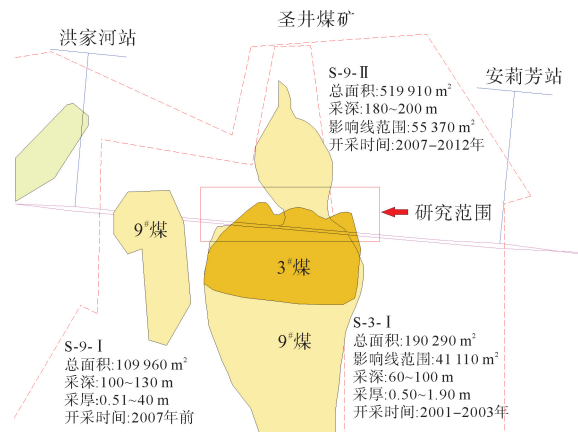


图 4 采空区分布图

Fig. 4 Distribution of goafs

根据现场实测数据可知,地表下沉系数 q 为 0.72,垮落带高度 H_k 为 10 m,导水裂缝带高度为 38 m。承载层为厚硬砂岩(抗压强度 35 MPa),上覆岩层为泥岩层(厚 11 m),初始回转角为 3° 。表层为第四系黄土,厚度 5 m,平均容重 18 kN/m^3 ,弹性模量为 20 MPa,泊松比为 0.4。基岩的平均容重 25 kN/m^3 ,弹性模量 30 GPa,平均泊松比为 0.24。

将上述参数代入式(5)计算,得出当桩基荷载传递到关键层关键岩块 B 的附加应力 $P_0 \leq 3\,240 \text{ kPa}$ 时,采空区覆岩保持稳定。而桩基作用在该采空区处的附加应力值 $P_0 = 551 \text{ kPa}$,满足稳定条件。因此,研究区桩基荷载作用下的地表附加下沉系数可按式(8)计算, $q_{cz} = 0.036$ 。由于采空区停采多年且监测沉降速率较小,残余沉降可忽略,总沉降取附加项。基于地表沉降计算方法得到桩基影响下采空区沉降值为 138 mm。由此可知,在现有荷载条件下覆岩结构整体稳定。若桩基荷载继续增大或上覆结构刚度不均,将可能触发关键块体滑移或回转失稳,应在设计中通过优化桩基施工参数重点控制覆岩受力状态。

2 采空区桩基稳定性分析与最优参数组合确定

2.1 采空区覆岩结构的稳定性与变形数值模拟计算

为进一步验证桩基荷载作用下采空区覆岩结构的稳定性与变形规律,采用 ABAQUS 建立拟建线路地层(图 5)。长 \times 宽 \times 高为 $200 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 200 \text{ m}$,沿地层倾向定义为 x 轴正方向,走向为 y 轴正方向。由于研究区地形起伏较小且煤层近似水平,地层倾角忽略不计。根据地质资料,9[#]煤和 3[#]煤采空区深度分别为 173 和 76 m,残余空隙高度为 2 m。

模拟采用 Mohr-Coulomb 屈服准则描述岩土体本构行为,桩基与地基之间的相互作用通过主从面接触算法实现。其中,桩体表面设为主接触面,土体表面为从属面;切向接触采用 Penalty 函数约束,摩擦系数取 0.3;法向接触采用“硬接触”模式,允许接触后分离;最大弹性滑移比例设为 0.005,弹性滑移刚度取无穷大,以保证接触计算的稳定性。网格单元类型为八节点六面体线性缩减积分单元(C3D8R)。前后、左右边界定为单约束边界,分别取 $x = 0, y \neq 0, z \neq 0$ 和 $x \neq 0, y = 0, z \neq 0$;底边界定为全约束边界,取 $x = 0, y = 0, z = 0$;上边界定为自由边界不予约束。

桩与承台均采用线弹性本构模型进行模拟。桩基体系为四桩承台结构,承台间距为 30 m,单桩直径 1.25 m,桩长 80 m。桩顶施加竖向荷载 6 000 kN,以模拟上部高架桥结构传递的恒载与活载效应。岩层物理力学参数见表 1。桩体与承台均采用 C30 混凝土材料,桩和承台材料参数如表 2 所示。

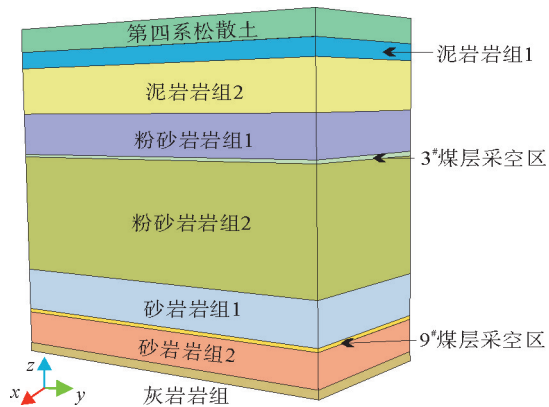


图 5 拟建线路地层示意图

Fig. 5 Stratum model diagram of the proposed line

表 1 岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock strata

层序	岩性	厚度/m	体积模量/Pa	剪切模量/Pa	黏聚力/Pa	内摩擦角/($^\circ$)	容重/(kN/m^3)
1	第四系松散土	14	3.82×10^9	1.23×10^9	1.2×10^4	18.6	18.5
2	泥岩岩组 1	10	4.90×10^9	1.88×10^9	5.0×10^5	26.9	24.2
3	泥岩岩组 2	28	6.46×10^9	2.31×10^9	5.8×10^5	27.8	24.3
4	粉砂岩岩组 1	24	6.08×10^9	2.33×10^9	4.8×10^5	29.1	26.3
5	3 [#] 煤层采空区	2	8.00×10^8	4.00×10^8	1.1×10^5	28.0	14.0
6	粉砂岩岩组 2	70	8.00×10^9	2.67×10^9	7.2×10^5	31.3	26.4
7	砂岩岩组 1	25	6.19×10^9	1.91×10^9	6.4×10^5	30.1	26.1
8	9 [#] 煤层采空区	2	8.00×10^8	4.00×10^8	1.0×10^5	27.0	14.1
9	砂岩岩组 2	20	7.06×10^9	2.71×10^9	1.1×10^6	34.3	26.0
10	灰岩岩组	5	1.48×10^{10}	1.02×10^{10}	2.1×10^6	46.5	26.7

表 2 桩和承台材料参数

Table 2 Pile and cap material parameters

材料	弹性模量/MPa	泊松比	密度/(kg/m ³)
桩	30 000	0.2	2 500
承台	30 000	0.2	2 500

2.2 采空区响应特征分析与正确性验证

图 6、图 7 分别为采空区沿倾向与走向方向的采空区主断面沉降云图和应力云图。结果表明,开采后形成对称沉降盆地,采空区顶板岩体沉降显著大于两侧围岩,其中 3# 煤层采空区顶板最大沉降量为 365 mm,表现出明显弯折变形但未发生垮塌;最大回弹量为 31 mm。由于 9# 煤层采空区埋深较大,其沉降难以传递至地表,地表沉降主要受浅部采空区影响。分析可见,沿倾向方向地表最大沉降量为 129 mm,边界处最大沉降梯度为 85.4 mm,显示出剪应力集中特征。沿走向方向,桩基荷载在桩端下方形成附加压缩区,从而引起局部沉降增大。总体而言,地表沉降由桩基附加应力与采空区卸荷效应共同作用形成。

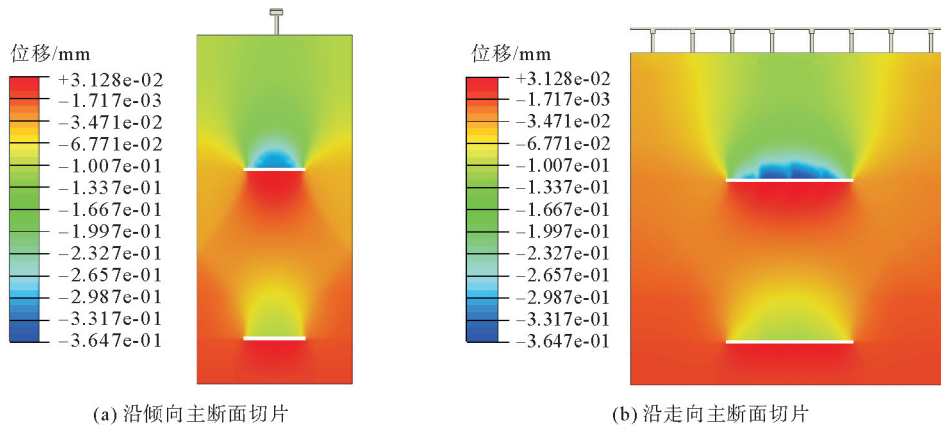


图 6 采空区主断面沉降云图

Fig. 6 Settlement contour of the main section in the goaf

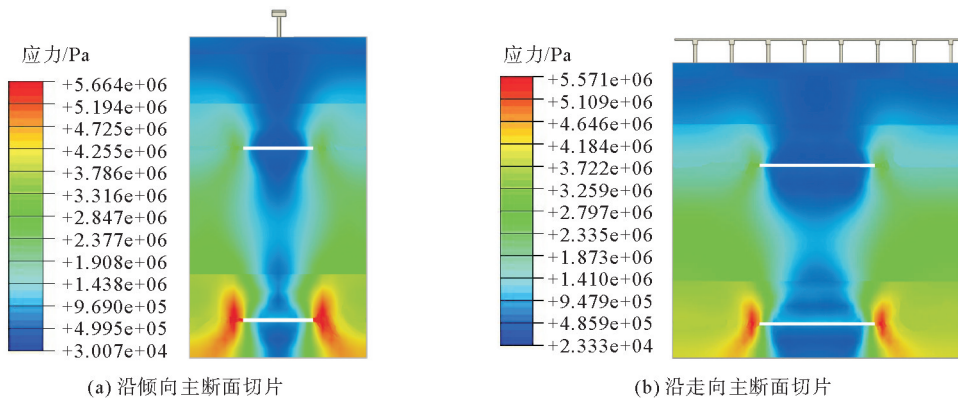


图 7 采空区主断面应力云图

Fig. 7 Stress contour of the main section in the goaf

图 8 为主断面理论计算与数值模拟地表沉降对比图,结果表明,理论计算与数值模拟所得的地表沉降曲线变化趋势一致,引入附加下沉系数后可有效反映桩基附加应力影响规律。模拟结果略小于理论值,主要由于理论计算采用相对保守的参数取值,使预测结果偏于安全。

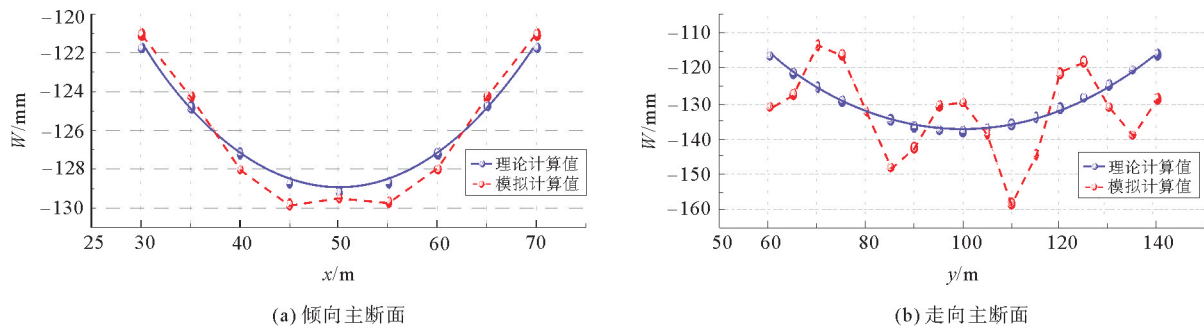


图 8 主断面理论计算与数值模拟地表沉降对比

Fig. 8 Comparison of settlement between theoretical calculation and numerical simulation for the main section

2.3 桩基设计参数的正交试验与沉降响应分析

为定量评估桩基设计参数对采空区地表沉降的影响规律,设计桩基参数正交试验方案(表 3)。选取桩长、桩径和桩距为主要影响因素,分别取值为 20、25、30 m,0.8、1.0、1.2 m 以及 4、5、6 倍桩径。以试验组 a 作为基准对比组,通过数值模拟计算不同参数组合下的地表沉降量,分析各因素的敏感性及其对桩基沉降的影响。

表 3 桩基参数正交试验方案表

Table 3 Orthogonal test scheme of pile foundation parameters

试验组号	桩长 l/m	桩径 d/m	桩距 j/m	桩基沉降值/mm
a	20	0.8	2.4	23.99
b	20	1.0	5.0	23.84
c	20	1.2	7.2	26.00
d	25	0.8	4.0	23.83
e	25	1.0	6.0	23.34
f	25	1.2	4.8	22.86
g	30	0.8	4.8	22.58
h	30	1.0	4.0	22.34
i	30	1.2	6.0	22.24
桩基沉降均值 1/mm	24.61	23.47	23.06	
桩基沉降均值 2/mm	23.34	23.17	23.31	
桩基沉降均值 3/mm	22.40	23.70	23.97	
极差	2.219	0.526	0.91	

由表 3 模拟结果可知,当桩长分别为 20、25、30 m 时,采空区上方桩基沉降均值依次为 24.61、23.34、22.40 mm,极差为 2.219,表明桩长对沉降的影响最显著,沉降量随桩长的增加明显减小。当桩径分别为 0.8、1.0、1.2 m 时,桩基沉降均值分别为 23.47、23.17、23.70 mm,极差为 0.526,说明桩径对沉降影响相对较弱,且在中等桩径时表现最优。当桩距分别为 4、5、6 倍桩径时,桩基沉降均值分别为 23.06、23.31、23.97 mm,极差为 0.91,表明沉降量随桩距的增大而略有增加,但变化幅度较小。可见桩基参数对桩基沉降的影响程度依次为:桩长>桩距>桩径。以沉降值最小为优化目标,并综合考虑各设计参数对桩基沉降的影响程度,确定最优组合为桩长 30 m、桩径 1.0 m、桩距 4.0 m,此时桩基沉降值为 22.34 mm,较基准组(23.99 mm)降低 1.65 mm,更接近工程允许控制值(20 mm)。

图 9 为采用最优参数组合后的沉降云图。可见采空区顶板中部发生明显下沉与弯曲变形,结合前述覆岩失稳判据,可判断此时采空区顶板已接近极限承载状态,具有局部垮落的潜在风险。从沉降控制角度看,桩基间相对沉降差控制在 5 mm 以内,但单桩平均沉降略超出控制限值,表明仍需进一步优化设计或采取加固措施以确保长期稳定。

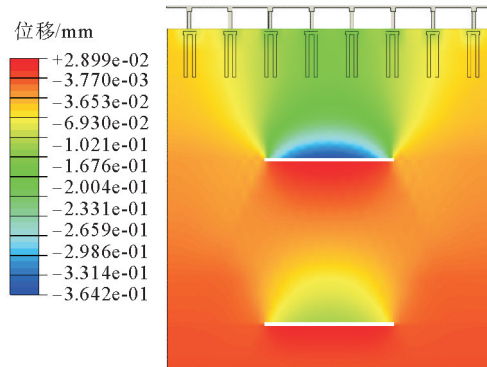


图 9 桩基参数优化后的沉降云图

Fig. 9 Settlement contour after optimization of pile design parameters

3 采空区治理方案选择与工程应用

3.1 治理方案选择

结合研究区地质条件与工程需求,参考常用的采空区治理技术,按照相关技术规范^[20]要求,设计三种治理方案:灌注充填法、全穿越法与半穿越法。为定量评价各方案的沉降控制效果,

采用 ABAQUS 进行三维数值模拟,对三种方案下的地表沉降特征进行对比分析。

图 10 为三种治理方案的地表沉降对比,可以看出,桩基施工后地表均出现一定程度的不均匀沉降,其中桩基作用区沉降最为明显,采空区边界处形成倾斜曲率集中区,易产生“倒八字形”裂缝。以采空区中部为界,地表沉降呈左右对称分布特征。三种方案的沉降控制指标均满足设计要求,均匀沉降量均小于 20 mm,相邻桩基沉降差控制在 5 mm 以内。

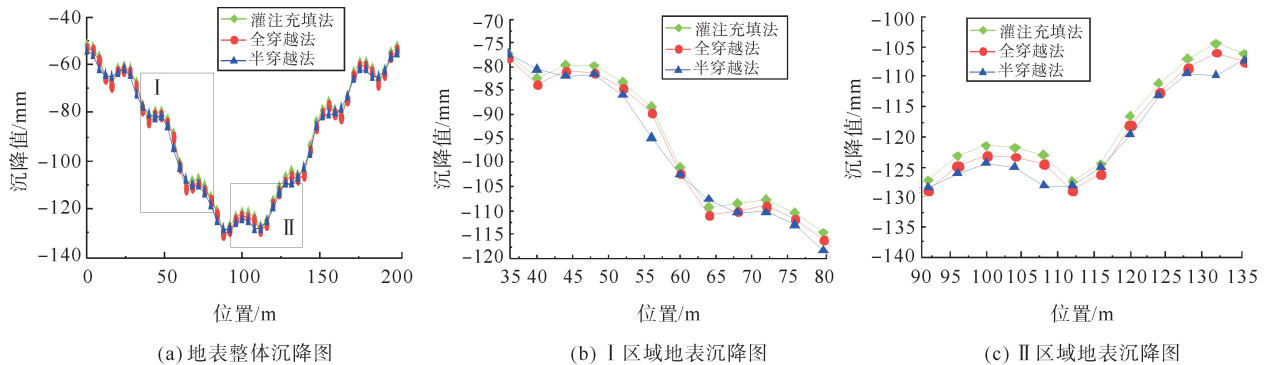


图 10 三种治理方案地表沉降对比图

Fig. 10 Comparison of surface settlement under three goaf treatment schemes

为进一步分析各方案差异,图 11 展示了不同治理方案的沉降云图。灌注充填法中(图 11(a)),水泥浆液在采空区内流动并固化成型,有效支撑上覆岩层,最大沉降值为 35.8 mm,桩基平均沉降 14.93 mm,相邻桩沉降差 1.25 mm;全穿越法(图 11(b))中,桩端进入采空区下方稳定地层,受底板回弹影响局部桩体产生微弱上抬,最大沉降值 36.36 mm,桩基平均沉降 16.19 mm,相邻桩沉降差 1.29 mm;半穿越法(图 11(c))中,部分桩基穿过采空区,其余桩基布设在稳定层内,最大沉降值 36.83 mm,桩基平均沉降 15.77 mm,相邻桩沉降差仅 0.34 mm,明显优于前两者。

如表 4 所示为三种采空区治理方案的适用性和经济性对比。结果表明,半穿越法在沉降控制、施工经济性与适应性方面综合表现最佳,可显著减小采空区边界桩基沉降差,提升结构整体稳定性,满足本工程的治理需求。

综上所述,半穿越法在沉降与适应性控制方面表现最优。其均匀沉降值虽略高于灌注充填法,但明显优于全穿越法;相邻桩基沉降差可稳定控制在 1 mm 以内,较其他方案缩减 2 mm,能够有效抑制采空区不均匀沉降,增强结构长期稳定性与安全储备。此外,半穿越法仅对部分桩基加长,在保证安全的前提下

兼顾经济性与施工效率,相较其他两种方案更具综合优势。

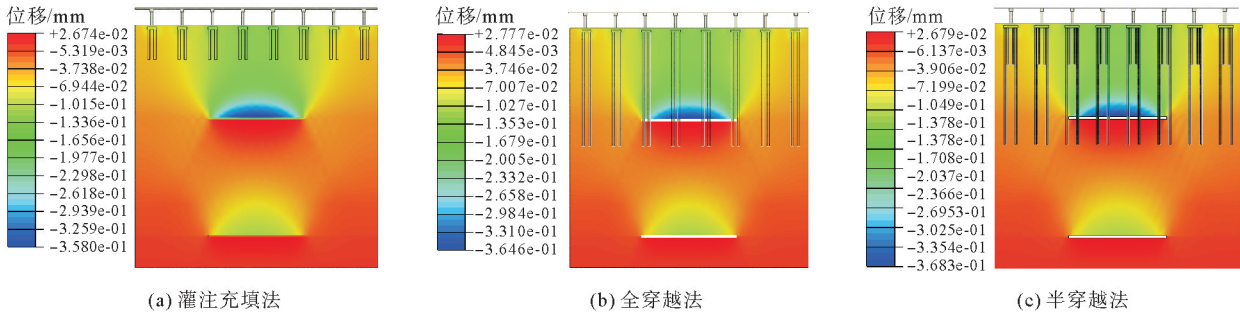


图 11 不同采空区治理方案的沉降云图

Fig. 11 Simulated settlement contour under different goaf treatment schemes

表 4 三种采空区治理方案的适用性与经济性对比表

Table 4 Comparison of applicability and economy of three goaf treatment schemes

治理方案	适用条件	成本特点	材料成本/万元	施工与设备成本/万元	间接及后期成本/万元	总成本/万元
灌注充填法	适用于小范围、不规则采空区或结构复杂区域	材料与工期成本高,占线时间长,充填体后期压缩可能需二次注浆	1 799.5	2 053.1	533.2	4 385.8
全穿越法	适用于大面积或深部采空区,需将荷载传递至稳定地层	施工复杂、桩体长度较大,设备磨损与维护成本高	2 203.6	1 983.6	328.9	4 516.1
半穿越法	适用于采空区分布不均、局部地层稳定区域,可灵活调整桩长	工期短,对交通干扰小,仅局部加长桩基即可兼顾成本与稳定性	1 513.8	1 625.7	257.3	3 396.8

3.2 治理方案工程应用

3.2.1 半穿越法治理方案设计

半穿越法在灌注充填法桩基设计的基础上进行改进,于承台两侧增设深桩并将桩端置于采空区下伏稳定地层,与全穿越法相比仅部分桩基加长,从而兼顾结构安全与施工经济性。本工程区段均为高架结构,采用简支 U 梁及双线连续梁形式,标准跨度为 25~30 m,基础形式为桩基础,桩径 1.25~1.50 m,单桩轴向承载力为 4 704~8 227 kN。结合工程实际,对于埋深较大的 9[#] 煤采空区,按常规设计采用四桩承台,桩径 1.25 m,桩底距裂隙带底部约 50 m,可满足稳定性要求;对于埋深较浅的 3[#] 煤采空区,采用桩基穿越方案,其中浅桩长度 30 m,深桩长度 80 m,以确保荷载传递至下伏完整岩层。

3.2.2 沉降监测结果与模拟预测值对比分析

为验证半穿越法治理效果,选取 1 月 4 日、2 月 1 日、2 月 28 日、3 月 24 日及 5 月 24 日 5 个监测时段的桩基沉降数据,与数值模拟预测值进行对比(见图 12)。监测结果显示,各阶段沉降曲线变化规律一致,累计沉降与沉降速率均未超过预警值。沉降初期发展较快,随后因岩层内力的重分布逐渐趋于稳定;施工结束后,荷载稳定、应力场重新恢复平衡,沉降速率显著降低并趋于稳定。

因此,数值模拟结果与监测趋势吻合良

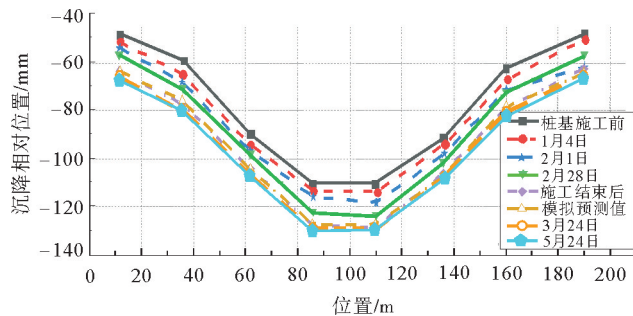


图 12 模拟预测值与现场监测值对比图

Fig. 12 Comparison between simulated predicted values and field monitoring data

好,平均绝对误差为 0.8 mm,平均相对误差为 10.9%,且误差随时间逐步减小。偏差主要来源于模拟简化及参数离散性。总体上,预测值与实测值高度一致,验证了数值模拟方法的可靠性与工程适用性,可为类似采空区桩基沉降预测与治理方案优化提供参考。

4 结论

本研究以济南地铁 8 号线采空区穿越区段为研究对象,综合理论计算、数值模拟与现场监测,分析了桩基荷载作用下采空区覆岩稳定性与地表沉降规律,提出并验证了适用于本工程的采空区治理方案。主要结论如下:

1) 基于覆岩沉降理论计算,桩基荷载传递至关键岩块的附加应力仅为安全阈值的 1/6,覆岩结构保持稳定。预测桩基附加下沉系数 0.036,最大地表沉降 138 mm,均低于工程允许值,桩基荷载不会引发采空区失稳。

2) 数值模拟结果表明,桩基荷载使采空区顶板岩层发生附加压缩变形,地表沉降呈非均匀分布。桩基参数对沉降影响显著,其中桩长影响最大,桩距次之,桩径最小。通过合理增加桩长、优化桩距可有效减小地表附加沉降并改善沉降均匀性。

3) 半穿越法于承台两侧设深桩,将荷载传递至下伏稳定地层,在控制桩基相邻沉降差方面表现优异。数值模拟与现场监测表明,该方案可将相邻桩基沉降差稳定控制在 1 mm 以内,且在结构稳定性、沉降控制及经济性方面最优,适用于本工程。

后续将结合施工期与运营期监测数据开展多源信息融合的智能反演研究,构建可自适应更新的施工扰动下覆岩稳定性预测模型,以提升研究成果的推广与应用价值。

参考文献:

- [1] 王滢,姚真,宋永山,等.地铁移动荷载作用下准饱和地基振动特性及隔振研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(5):48-57.
WANG Ying, YAO Zhen, SONG Yongshan, et al. Study on vibration characteristics and vibration isolation of nearly saturated ground under moving load of subway[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2023, 42(5): 48-57.
- [2] TRENTINI W V E, PARSEKIAN A G, BITTENCOURT N T. Multiobjective optimization of bridge and viaduct design: Comparative study of metaheuristics and parameter calibration[J/OL]. Engineering Structures, 2024, 312. DOI: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2024.118252.
- [3] YI X Y, ZHU W B, NING S, et al. Critical height of unfilled zone in underlying gob piles[J/OL]. Shock and Vibration, 2021. DOI:10.1155/2021/6634295.
- [4] 张明光.极近距离煤层采空区下巷道支护技术研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(4):35-41.
ZHANG Mingguang. Roadway support technology in goaf of ultra-close distance coal seams[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2018, 37(4): 35-41.
- [5] 王金淑,陈永泽,梅雪峰,等.膨胀岩土地基中影响桩基抬升的参数分析计算与理论研究[J].地质与勘探,2025,61(5):1094-1102.
WANG Jinshu, CHEN Yongze, MEI Xuefeng, et al. Calculation and theoretical research on parameters affecting pile foundation uplift in expansive rock and soil foundations[J]. Geology and Exploration, 2025, 61(5): 1094-1102.
- [6] 张乾青.竖向抗压桩承载机理与受力特性分析方法[J].山东科技大学学报(自然科学版),2020,39(4):93-105.
ZHANG Qianqing. Bearing mechanism and response analysis method of vertically loaded piles[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2020, 39(4): 93-105.
- [7] 牛地,吴倩,朱成林.基于 SBAS-InSAR 技术的安徽省砀山县地面沉降监测[J].中国地质调查,2022,9(5):15-23.
NIU Di, WU Qian, ZHU Chenglin. Analysis of monitoring ground subsidence in Dangshan county of Anhui Province based on SBAS-InSAR technology[J]. Geological Survey of China, 2022, 9(5): 15-23.
- [8] HAO Q, ZHENG Q Y, LIU S W, et al. Study on the influence of grouting treatment on the movement and deformation of surface in longwall coal mining goaf areas[J]. Mining, Metallurgy and Exploration, 2024, 41(4): 1835-1858.

- [9] LU W, GUO Z, HU H, et al. Stability evaluation of mined-out area and borehole grouting treatment; A case study in China[J/OL]. *Case Studies in Construction Materials*, 2023, 19. DOI:10.1016/J. CSCM. 2023. E02596.
- [10] ZHANG Z P, LI F L, CHENG Y, et al. Analysis and research of the stability about the gob of coal mine under the proposed buildings[J]. *Advanced Materials Research*, 2014(1065/1069):105-108.
- [11] 程强. 煤矿采空区全充填压力注浆治理及效果评价研究[J]. *工矿自动化*, 2025, 51(增1):192-195.
CHENG Qiang. Study on full filling pressure grouting treatment and effect evaluation in coal mine goaf[J]. *Journal of Mine Automation*, 2025, 51(S1):192-195.
- [12] ALEXEY L, VADIM K, IVAN U, et al. Theoretical approaches for modeling and calculating the consolidation of a composite weak bottom[J]. *Transportation Research Procedia*, 2022, 63:938-945.
- [13] JIA H W, YAN B X, YILMAZ E. A large goaf group treatment by means of mine backfill technology[J/OL]. *Advances in Civil Engineering*, 2021. DOI:10.1155/2021/3737145.
- [14] 孔德森, 吴绍娟, 马顺顺, 等. 地下空间增层开挖支护桩与基桩工作特性模型试验研究[J]. *山东科技大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(6):49-56.
KONG Desen, WU Shaojuan, MA Shunshun, et al. Model test study on working characteristics of support piles and foundation piles during excavation of additional layers in underground space[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science)*, 2023, 42(6):49-56.
- [15] 刘金砺. 桩基础设计与基础[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [16] 钱鸣高, 李鸿昌. 采场上覆岩层活动规律及其对矿山压力的影响[J]. *煤炭学报*, 1982(2):1-12.
QIAN Minggao, LI Hongchang. The movement of overlying strata in longwall mining and its effect on ground pressure[J]. *Journal of China Coal Society*, 1982(2):1-12.
- [17] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. *煤炭学报*, 1996, 21(3):2-7.
QIAN Minggao, MIAO Xiexing, XU Jialin. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. *Journal of China Coal Society*, 1996, 21(3):2-7.
- [18] 张华兴. 开采沉陷预测的标准化[J]. *煤矿开采*, 2014, 19(1):1-20.
ZHANG Huaxing. Standardization of mining subsidence prediction[J]. *Coal Mining Technology*, 2014, 19(1):1-20.
- [19] 邓喀中, 谭志祥, 张宏贞, 等. 长壁老采空区残余沉降计算方法研究[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(10):1601-1605.
DENG Kazhong, TAN Zhixiang, ZHANG Hongzhen, et al. Research on calculating method of residual subsidence of longwall goaf[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(10):1601-1605.
- [20] 中国煤炭建设协会. 煤矿采空区建(构)筑物地基处理技术规范 GB51180—2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.

(责任编辑:高丽华)