

DOI: 10.7672/sgjs2026030116

运河开挖施工对既有桥梁的影响*

赵信海¹, 段书龙²

(1. 安徽省淮北港航投资有限公司, 安徽 淮北 235199; 2. 安徽省现代交通设计研究院有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

[摘要] 为研究淮北地区运河疏浚开挖过程对既有桥梁的影响,以沱浍河航道李口至临涣段改造工程为依托,利用ABAQUS软件研究开挖过程桥梁基础变形情况,分析边坡顶部堆载对桥梁基础变形的影响,同时对桥墩与边坡位置关系影响规律进行分析。研究表明,由于土体受到回弹影响,开挖会引起桥梁承台发生变形,边坡顶部堆载对桥梁承台水平位移具有一定影响,开挖过程中不宜在边坡顶部堆放过多临时堆载。桥墩位于边坡顶部时边坡开挖对桥梁的影响最大,桥墩位于边坡底部时边坡开挖对桥梁的影响相对较小。在运河开挖工程中,桥梁基础变形控制是综合性问题,需采取多种措施减小对桥梁基础变形的影响。

[关键词] 运河;桥梁;基础;开挖;变形;数值模拟

[中图分类号] U445

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)03-0116-06

Influence of Canal Excavation Construction on Existing Bridges

ZHAO Xinhai¹, DUAN Shulong²

(1. Anhui Huaibei Port and Shipping Investment Co., Ltd., Huaibei, Anhui 235199, China;

2. Anhui Modern Transportation Design and Research Institute Co., Ltd., Hefei, Anhui 230088, China)

Abstract: In order to study the influence of canal dredging and excavation process on existing bridges in Huaibei area, based on the reconstruction project of Likou to Linhuan section of Tuohui River Channel, ABAQUS software was used to study the deformation of bridge foundation during excavation process, and the influence of surcharge load at the top of slope on the deformation of bridge foundation was analyzed. At the same time, the influence law of the position relationship between pier and slope was analyzed. The research results show that because the soil is affected by rebound, the excavation will cause the deformation of the bridge pile cap. The surcharge load at the top of slope has a certain influence on the horizontal displacement of the bridge pile cap. It is not suitable to pile up too much temporary surcharge load at the top of slope during the excavation process. When the pier is located at the top of slope, the slope excavation has the greatest impact on the bridge. When the pier is located at the bottom of slope, the influence of slope excavation on the bridge is relatively small. In the canal excavation project, the deformation control of bridge foundation is a comprehensive problem, and various measures need to be taken to reduce the impact on the deformation of bridge foundation.

Keywords: canals; bridges; foundation; excavation; deformation; simulation

0 引言

随着基础建设的不断发展,航道疏浚、升级改造工程越来越多。在航道提升改造过程中,航道疏浚开挖可能对上跨河道的既有桥梁造成一定影响。当开挖导致桥梁基础出现过大变形时,可能引起桥

墩内力出现过大变化,甚至引起主梁产生过大的附加内力,影响桥梁结构安全^[1-4]。

已有学者对邻近既有桥梁基坑及边坡开挖影响开展了研究。段书龙等^[5]结合引江济淮上跨桥梁工程实例,通过试验研究获得土层参数,并分析了河道开挖后边坡稳定性,明确了河道边坡开挖对不同桥梁结构的危害。张培生等^[6]研究了宽大航道开挖对邻近桥梁桩基的影响,研究表明采用围护桩挡墙与全包围隔离桩组合控制技术能够有

* 安徽港航集团科技项目:淮北典型航道数据对桥梁群影响分析与防护技术研究(AHGT2024038)

[作者简介] 赵信海,董事长,高级工程师, E-mail: 250731793@qq.com

[收稿日期] 2025-10-16

效控制桩基位移。邹佳成等^[7]采用非线性有限差分数值分析法研究了排洪渠道开挖对邻近桥梁桩基的影响,并对设计方案合理性进行了论证。王睿等^[8]以昆明市山邑村危岩体为例,采用现场调查、无人机三维倾斜摄影测量技术及三维激光扫描技术,对高陡边坡危岩体进行数据提取,采用RAMMS ROCKFALL软件模拟危岩体滚落时的运动情况,获取危岩体滚落过程中的运动路径及运动学参数。王建等^[9]利用ABAQUS软件分析了桥梁承台基坑开挖过程对邻近桥梁的影响,研究结果表明承台基坑开挖对邻近桥梁的影响较小。马梦娇等^[10]利用有限元方法分析了导流沟渠开挖过程中既有桥梁响应情况,并对不同方案加固效果进行了分析,优选了合理的加固方案。王海龙等^[11]对新建河道下穿既有高铁桥梁施工技术进行了研究,包括排桩支护结构施工、U形槽河道施工等,对桥梁及桩基所受影响进行数值模拟分析,研究结果表明新建河道下穿施工引起的既有高铁桥梁变形满足规范限值要求。高涛^[12]对边坡变形预测方法进行了研究,结果表明,对于点预测和概率预测,GF-DeepAR模型均能够在具有随机性、复杂性的边坡变形序列中提取特征信息并实现高精度和高可靠度的预测,满足实际边坡工程变形预测需求。李梅芳等^[13]通过理论分析和数值模拟手段,对浙江台州某公路工程互通区河道改移工程进行了分析,并基于计算分析结果提出了河道开挖施工工序优化方案及加固措施,研究结果表明河道开挖对邻近高架桥及匝道路基的控制性影响因素为桥梁附加位移、裂缝宽度及匝道路基稳定性。傅家颀^[14]以营运高速公路桥下河道改造工程为例,研究河道开挖对桥梁的影响,提出合理的保护设计方案和控制标准,并通过计算对设计方案进行验证。

本文以沱浍河航道李口至临涣段改造工程为依托,研究淮北地区运河开挖对既有桥梁的影响,并给出桥梁变形控制措施。

1 工程概况

沱浍河航道由沱河上段、浍河中下段及两河连接线大青沟航道组成,上接商丘市,下经淮北市、宿州市,于蚌埠市五河县汇入淮河,全长约340km,其中河南省段长约147km,安徽省段长约193km。沱浍河航道安徽省段建设标准为IV级航道,分为淮北李口至临涣段、淮北临涣至南坪段、宿州段、蚌埠段,其中,淮北李口至临涣段长约30.4km。因航道疏浚,需对现状不满足通航条件的桥梁进行改建。

对沱浍河航道李口至临涣段改造工程主跨跨

径130m的预应力混凝土连续刚构桥开展研究,桥梁与河道边坡位置关系如图1所示,其中边坡采用4级边坡,坡度为1:3,每级边坡台阶宽度均为3m,高度均为7m。桥梁跨径布置为(75+130+75)m,宽度为14.5m,采用单箱单室结构形式,支点梁高8.2m,跨中梁高3.8m。桥墩采用双薄壁形式,单肢宽度为1.0m。本工程地处淮北,主要地质以粉土夹粉细砂、粉质黏土夹粉土、粉土夹粉质黏土为主。

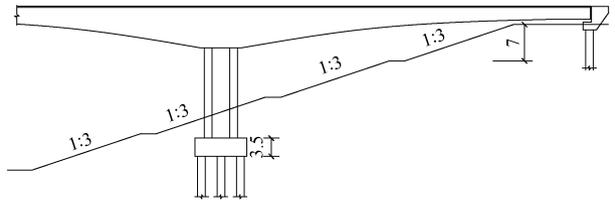


图1 桥梁与河道边坡位置关系(单位:m)

Fig.1 Position relationship between the bridge and the river slope(unit:m)

2 有限元分析

本工程施工时首先开挖航道顶部两级边坡,然后进行桥梁承台及桥墩施工,最后在主梁施工完成后开挖剩余边坡。其中承台施工通过先开挖围堰后回填的方式完成基础施工,并通过挂篮悬臂施工法进行主梁施工。

2.1 计算模型建立

为分析运河土体开挖对桥梁结构的影响,采用有限元软件ABAQUS建立土体与结构耦合模型进行分析,建立的计算模型如图2所示。计算采用的本构模型为经典莫尔-库仑屈服准则的扩展,采用莫尔-库仑屈服函数,包括黏聚力各向同性的硬化和软化,但该模型流动势函数在子午面上的形状为双曲线,在平面上无尖角,因此势函数完全光滑,确保了塑性流动方向的唯一性。

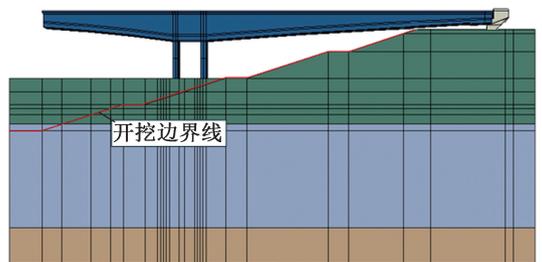


图2 计算模型

Fig.2 Calculation model

2.2 主要参数

计算中不同地层的土力学参数按照地质勘察试验获得的参数进行模拟,如表1所示。桥梁结构只考虑自重作用,按照材料容重自动计入。

表 1 土层计算参数

Table 1 Calculation parameters of soil layers

土层类型	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	压缩模量/MPa
粉质黏土	12.1	30.6	7.84
粉质黏土夹粉土	13.8	28.5	8.51
粉土夹粉细砂	14.5	28.6	8.77
粉质黏土夹粉土	14.2	27.9	7.69
粉土夹粉质黏土	14.4	26.8	7.88
粉质黏土夹粉土	13.6	27.8	7.86

3 变形影响因素分析

3.1 运河开挖施工的影响

运河开挖施工引起的软弱土边坡、桥梁基础与主体结构位移云图如图 3 所示。边坡开挖卸荷导致的土体变形起主导作用,开挖回弹为影响边坡变形的次要因素。未开挖时边坡土体处于平衡状态,由于土体压缩模量、强度均较低,开挖后在自重作用下边坡土体产生较大变形。开挖时边坡土体会产生回弹变形,但土体较软,回弹对桥梁基础的影响较小,同时回弹难以抵消边坡土体自重变形,在开挖卸荷及回弹共同作用下,桥梁基础产生指向河道中心的水平位移与转动。

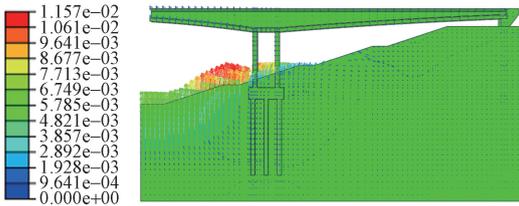


图 3 边坡土体与桥梁位移云图(单位:m)

Fig. 3 Displacement cloud map of slope soil and the bridge(unit: m)

边坡土体分 4 步开挖,前 2 步开挖过程中承台及桥墩水平位移逐渐增大,后 2 步开挖过程中桥墩水平位移略有降低。这主要是由于前 2 步开挖过程中回弹力较小,开挖卸荷导致边坡土体发生较大变形,进而使桥梁基础位移快速增大,当开挖深度足够大时,回弹作用逐渐大于卸荷作用,桥梁基础位移略有降低。

开挖过程中承台中心水平位移变化曲线如图 4 所示,由图 4 可知,承台中心最大水平位移约为 2.2mm,指向河道中央。

开挖过程中桥墩顶部水平位移变化曲线如图 5 所示。由图 5 可知,在主梁合龙前进行开挖时,随着开挖的进行,桥墩顶部最大水平位移达 9.8mm;在主梁合龙后进行开挖时,由于桥墩顶部水平位移受到主梁的约束,其值较小,最大水平位移为 2.8mm。为降低开挖过程对桥梁的影响,建议在主梁合龙后

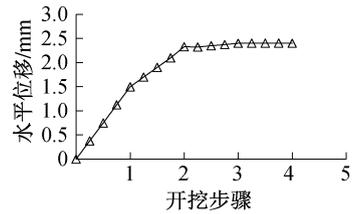


图 4 开挖过程中承台中心水平位移变化曲线

Fig. 4 Horizontal displacement curve at the center of the bridge pile cap during excavation

进行承台以下范围边坡开挖。

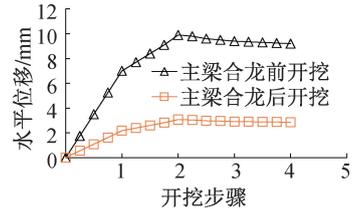


图 5 开挖过程中桥墩顶部水平位移变化曲线

Fig. 5 Horizontal displacement curves of bridge pier top during excavation

3.2 堆载的影响

考虑到在开挖过程中土体可能临时堆载在边坡顶部,为分析堆载对桥墩基础位移的影响,将开挖与堆载分为 2 个阶段进行,其中堆载取 1 000kPa 的边坡顶部均布荷载,此时边坡开挖与前述考虑回弹作用的正常土体边坡开挖相同。

堆载作用下边坡土体与桥梁基础位移云图如图 6 所示。边坡在开挖过程中,由于回弹作用,桥梁基础位移向边坡顶部方向发展,当边坡顶部出现堆载情况时,桥梁基础位移向河道中心方向发展。边坡顶部堆载距桥梁基础较远,堆载对边坡顶部土体影响较大,由堆载造成的边坡土体附加应力向深处扩散,在桥梁基础附近,边坡土体变形已抵消由回弹引起的变形,并使承台位移由负变正。回弹对边坡上部土体影响较大,在边坡上部土体水平变形作用下,桥墩与承台之间产生较大的相对转角,因此,承台水平位移虽由负变正,但桥墩顶部水平位移仍为负值。

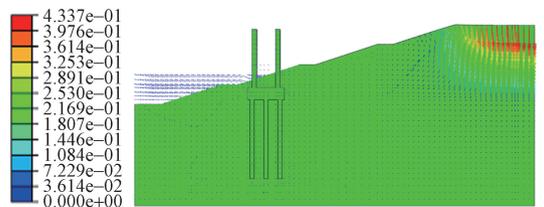


图 6 堆载作用下边坡土体与桥梁基础位移云图(单位:m)

Fig. 6 Displacement cloud map of slope soil and the bridge foundation under surcharge load (unit: m)

开挖与边坡顶部堆载过程中承台中心水平位移变化曲线如图7所示,其中工序0~4指边坡开挖过程,工序4~5指边坡顶部堆载过程。由图7可知,开挖结束时承台中心水平位移约为2.1mm(指向边坡顶部),堆载作用下承台中心水平位移约为3.9mm(指向河道中央)。

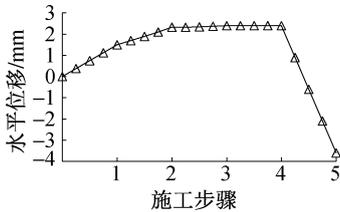


图7 开挖与堆载过程中承台中心水平位移变化曲线

Fig.7 Horizontal displacement curve at the center of the bridge pile cap during excavation and surcharge loading

开挖与堆载过程中桥墩顶部水平位移变化曲线如图8所示。由图8可知,在主梁合龙前进行开挖时,随着开挖的进行,堆载产生的桥墩顶部水平位移较开挖阶段有所较小,说明堆载产生的水平位移向相反方向发展,最大位移变化量为6.8mm。在主梁合龙后进行开挖时,堆载引起的桥墩顶部水平位移较小,最大位移变化量为1.6mm。在运河开挖过程中,应合理控制边坡顶部堆载数量,堆载不宜过大,尤其是堆载距承台过近时需重点控制。

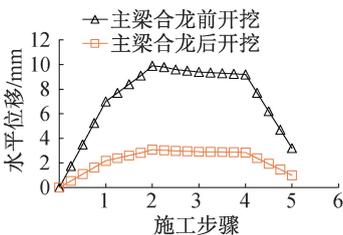


图8 开挖与堆载过程中桥墩顶部水平位移变化曲线

Fig.8 Horizontal displacement curves of bridge pier top during excavation and surcharge loading

3.3 桥墩位置的影响

桥墩处于不同位置时开挖对桥墩水平位移的影响程度可能存在较大差别,为分析不同位置影响程度,分别考虑桥墩位于边坡底部、中部和顶部(见图9)。由于桥墩在边坡上不同位置为假定工况,桥墩具体高度不定。当桥墩位于边坡底部时,桥墩高度为实际高度;当桥墩位于边坡中部和顶部时,桥梁基础模型未改变,桥墩高度非实际高度。

桥墩位于不同位置承台中心水平位移变化曲线如图10所示,水平位移负值表示向边坡顶部方向产生位移。由图10可知,边坡底部回弹力大、自重

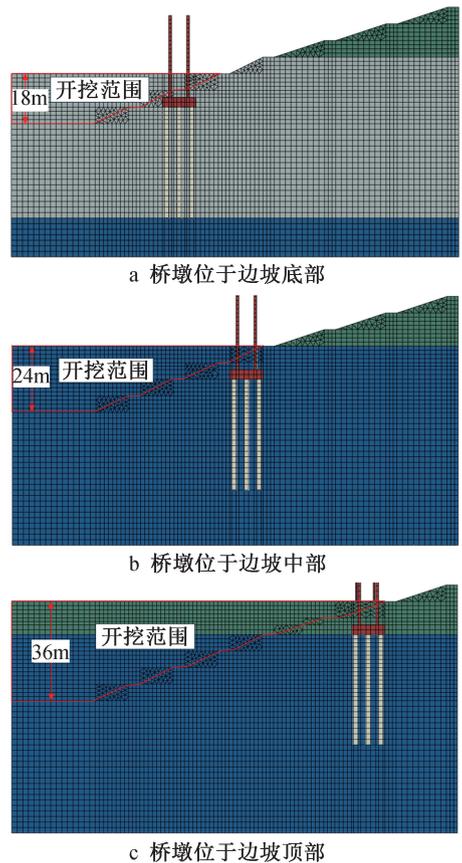


图9 桥墩与边坡不同位置示意

Fig.9 Different locations of bridge piers and slopes

应力大,边坡顶部回弹力小、自重应力小,当桥墩位于边坡顶部时,边坡土体开挖厚度大,此时边坡上部回弹力较大,承台中心水平位移变化最大。不同工况条件下边坡开挖后,回弹力与边坡自重水平方向的分量部分相互抵消,承台中心水平位移为水平合力作用的结果。

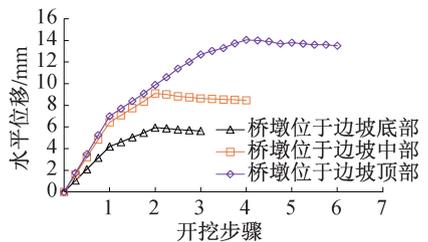


图10 桥墩位于不同位置承台中心水平位移变化曲线

Fig.10 Horizontal displacement curves at the center of the bridge pile cap at different bridge pier positions

在开挖过程中承台转动主要与承台两侧不相等的竖向位移有关,承台两侧竖向位移主要受边坡开挖回弹控制,桥墩在边坡上的位置不同、边坡开挖深度不同时,承台两侧竖向位移变化较大。当桥墩位于边坡底部时,承台两侧均受到较大的回弹影响,承台转动角度较小。当桥墩位于边坡顶部时,

承台受回弹影响较小,承台转动角度较小。当桥墩位于边坡中部时,承台两侧受不对等的回弹作用最明显,此时承台转动角度最大。对于位于边坡顶部的桥墩承台,开挖施工前需采取适当的防护措施,避免出现过大的水平位移。

4 桥梁变形控制措施

根据前文开挖过程分析结果可知,开挖过程中桥梁基础变形相对较小。本研究依托的上部连续刚构桥主梁跨中截面上、下缘,主梁支点截面上、下缘,墩顶截面中、边跨侧,墩底截面中、边跨侧开挖引起的应力增量分别为 0.31, 0.40, 0.22, 0.18, 0.42, 0.46, 0.38, 0.41MPa。边坡开挖过程对主梁截面应力的影响在 0.40MPa 及以下,对桥墩应力的影响在 0.46MPa 及以下。由于桥墩承台埋置于土体以下,采用低桩承台形式时,边坡开挖对桥梁结构应力的影响程度较小。在运河开挖工程中,桥梁基础变形控制是综合性问题,可采取以下措施减小对桥梁基础变形的影响。

4.1 加强变形机理与理论分析

1) 土体应力-应变响应

开挖引起土体卸载,导致有效应力路径改变,诱发桥梁基础周边土体发生弹塑性变形,需通过本构模型预测土体非线性变形特征。

2) 结构-土体相互作用

桥梁基础与周围土体的协同变形需基于 Winkler 地基模型或弹性半空间理论进行数值模拟,量化基础刚度对变形分布的约束作用。

3) 精细化地质建模

采用三维地质雷达与钻孔取样结合,构建高分辨率地质模型,识别软弱夹层、裂隙发育区等风险单元。基于室内三轴试验获取土体力学参数,如黏聚力、内摩擦角、压缩模量等。

4) 数值模拟与敏感度分析

利用有限元软件模拟开挖-支护全过程,分析不同工况下承台沉降、水平位移及弯矩响应。通过参数敏感度分析,确定关键控制变量(如支护刚度、开挖步长),优化施工方案。

4.2 加强开挖过程动态控制

1) 分阶段开挖策略

应用时空效应理论,将开挖区域划分为若干小单元,采用“分区跳挖”或“分层递进”模式,利用土体时空效应降低瞬时变形速率。进行支护协同设计,结合土钉墙、预应力锚索与钢支撑形成复合支护体系,实时调整预加轴力以平衡土压力。

2) 土体改良技术

采用袖阀管注浆或旋喷桩工艺,在承台周边形成“加固壳”进行注浆加固。

4.3 采用主动变形调控技术

1) 顶升纠偏技术

当桥梁基础变形超限时,采用液压千斤顶系统对承台进行动态顶升,结合反力架与监测反馈实现毫米级纠偏。

2) 应力补偿技术

通过预加载或施加反向荷载(如配重块),抵消开挖引起的附加应力,降低差异沉降风险。

4.4 建立一体化系统

在边坡开挖过程中可加强对承台水平位移的观测,实现对桥梁结构安全性控制,避免出现过大影响。

1) 多源监测技术集成

采用全站仪、GNSS 实时追踪承台位移,通过植入式光纤传感器监测土体应变分布,利用测斜仪捕捉深层水平位移,利用应变计与倾角仪记录承台内力与姿态变化。

2) 数据融合与智能预警

基于机器学习算法(如 LSTM 神经网络)建立变形时序预测模型,融合监测数据与数值模拟结果,实现动态风险评估。设定三级预警阈值(警戒值、控制值、极限值),触发分级响应机制。

3) 闭环控制体系

构建监测+分析+决策+执行闭环系统,通过 BIM 平台实现数据可视化与指令实时下达,动态调整开挖参数与支护措施。

4.5 加强后期稳定性保障措施

1) 长期性能评估

采用时变可靠性理论,考虑土体蠕变、材料老化等因素,预测桥梁基础全寿命周期内的变形演化规律。

2) 生态化修复

对开挖区进行植生混凝土护坡、生态袋回填等绿色施工,减少水土流失对桥梁基础的长期扰动。

5 结语

1) 在运河开挖过程中,由于土体受到回弹的影响,会引起桥梁基础明显变形,桥墩顶部水平位移与主梁约束情况有关,在主梁合龙后开挖时桥墩顶部位移较小,在主梁合龙前开挖时桥墩顶部位移较大。

2) 边坡顶部堆载会影响桥梁基础水平位移,在开挖过程中不宜在边坡顶部堆放过多临时堆载,以减小对桥梁基础的影响。

3)当桥墩位于边坡底部时,承台两侧均受到较大的回弹影响,承台转动角度较小。当桥墩位于边坡顶部时,承台受回弹影响较小,承台转动角度较小。当桥墩位于边坡中部时,承台两侧受不对等的回弹作用最明显,此时承台转动角度最大。

4)运河开挖前应根据桥墩与边坡的位置关系并结合地质特点开展综合分析,软弱地质条件下靠近边坡顶部的承台需采取合理的防护措施,避免开挖对桥梁带来病害。

参考文献:

- [1] 刘晓鹏,苏学林,旦东,等. 软土地带航道近接开挖对既有桥梁桩基稳定性的影响[J]. 科技和产业, 2023, 23(19): 225-232.
LIU X P, SU X L, DAN D, et al. Influence of adjacent excavation on the pile foundation stability of an existing bridge near channel in soft soil sites[J]. Science technology and industry, 2023, 23(19): 225-232.
- [2] 谷素兵. 软土地区航道开挖对邻近桥梁桩基稳定性影响研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
GU S B. Study on the influence of waterway excavation on the stability of adjacent bridge pile foundation in soft soil area[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022.
- [3] 李宝坤,蒋勇军. 桥梁墩台开挖对边坡的影响及治理措施[J]. 山西建筑, 2013, 39(19): 155-157.
LI B K, JIANG Y J. Influence on slope and remediation of bridge pier and abutment excavation[J]. Shanxi architecture, 2013, 39(19): 155-157.
- [4] 王辉,种子康,唐震,等. 常泰长江大桥天星洲专用航道桥支座灌浆施工关键技术[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(6): 110-115.
WANG H, CHONG Z K, TANG Z, et al. Key technology of bearing grouting construction of Tianxingzhou Dedicated Channel Bridge of Changtai Yangtze River Bridge [J]. Construction technology, 2025, 54(6): 110-115.
- [5] 段书龙,朱宇. 河道边坡开挖对桥梁结构的影响分析[J]. 低温建筑技术, 2021, 43(2): 91-93.
DUAN S L, ZHU Y. Analysis of influence of river slope excavation on the bridge structure [J]. Low temperature architecture technology, 2021, 43(2): 91-93.
- [6] 张培生,乔律,盛健超,等. 宽大航道开挖对邻近桥梁桩基的影响及控制研究[J]. 中外公路, 2025, 45(4): 144-151.
ZHANG P S, QIAO L, SHENG J C, et al. Analysis and control of impact of wide waterway excavation on adjacent bridge pile foundations[J]. Journal of China & foreign highway, 2025, 45(4): 144-151.
- [7] 邹佳成,翟祥军,陈旭东,等. 排洪渠开挖对桥梁桩基影响及其边坡稳定性分析[J]. 云南水力发电, 2019, 35(5): 48-53.
ZOU J C, ZHAI X J, CHEN X D, et al. The influence of a drainage channel excavation on pile foundation and the slope stability analysis[J]. Yunnan water power, 2019, 35(5): 48-53.
- [8] 王睿,阿发友,黄胜东,等. 高陡边坡危岩体运动学参数与防治措施研究[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(15): 62-68, 81.
WANG R, A F Y, HUANG S D, et al. Research on prevention parameters and prevention measures of dangerous rock mass in high and steep slopes [J]. Construction technology, 2024, 53(15): 62-68, 81.
- [9] 王建,李众,赵恺,等. 桥梁承台基坑开挖对临近桥梁结构影响研究[J]. 城市道桥与防洪, 2024(9): 124-127, 140.
WANG J, LI Z, ZHAO K, et al. Study on influence of foundation pit excavation of bridge base slab on adjacent bridge structures [J]. Urban roads bridges & flood control, 2024(9): 124-127, 140.
- [10] 马梦娇,畅宇文. 放坡开挖对既有桥梁的影响分析及加固方案比选[J]. 工程建设与设计, 2024(19): 143-145.
MA M J, CHANG Y W. Analysis of slope excavation on existing bridge and selection of reinforcement schemes[J]. Construction & design for engineering, 2024(19): 143-145.
- [11] 王海龙,任科,贾羽. 新建河道下穿既有高铁桥梁安全分析[J]. 科技创新与应用, 2023, 13(24): 109-112.
WANG H L, REN K, JIA Y. Safety analysis of new river crossing existing high-speed rail bridge [J]. Technology innovation and application, 2023, 13(24): 109-112.
- [12] 高涛. 融合降噪处理与深度学习的边坡变形预测混合模型研究[J]. 施工技术(中英文), 2025, 54(9): 83-90.
GAO T. Research on hybrid model of slope deformation prediction based on noise reduction processing and deep learning [J]. Construction technology, 2025, 54(9): 83-90.
- [13] 李梅芳,丰月华,夏华盛. 河道邻近开挖对互通区桥梁及路基的影响分析[J]. 武汉交通职业学院学报, 2020, 22(3): 74-79.
LI M F, FENG Y H, XIA H S. Analysis of the influence of adjacent river excavation on the bridge and roadbed in the interchange area [J]. Journal of Wuhan Technical College of Communications, 2020, 22(3): 74-79.
- [14] 傅家鲲. 河道改造对营运高速公路桥梁的影响分析[J]. 西部交通科技, 2022(11): 130-132.
FU J K. Analysis of the influence of river channel reconstruction on the operation of expressway bridges [J]. Western China communications science & technology, 2022(11): 130-132.