

EPC 项目引水隧洞衬砌之钢筋的设计优化

林晓旭, 夏维学

(中国水利水电第七工程局有限公司, 四川 成都 610213)

摘要:以固增水电站 EPC 工程为依托,阐述了固增水电站引水隧洞工程施工受征地拆迁、围岩地质条件变化、特殊洞段(如大塌方、蠕变)施工难度大、工期紧等因素影响而无法按期完成建设任务的情况下,项目部在充分考虑围岩稳定、施工安全、施工进度存在问题的前提下,结合经营管理的要求,通过对引水隧洞衬砌钢筋进行设计优化,加快了引水隧洞衬砌的施工进度,提前完成了引水隧洞的工期目标;在降低投资成本的情况下保障了施工安全,满足了设计对围岩稳定的要求。该设计优化为 EPC 项目的整体建设创造了一定的经济效益,为类似 EPC 工程水工隧洞施工积累了经验。

关键词:固增水电站;EPC 项目;征地拆迁;地质条件变化;特殊洞段;设计优化;快速施工;成本控制

中图分类号:TV7;TV52;TV554;TV22

文献标志码: B

文章编号:1001-2184(2023)05-0043-04

Design Optimization of Reinforcing Bars for Headrace Tunnel Lining of EPC Projects

LIN Xiaoxu, XIA Weixue

(Sinohydro Bureau 7 Co., LTD., Chengdu Sichuan 610213)

Abstract: Based on the EPC project of Guzeng Hydropower Station, this paper expounds the construction of headrace tunnel of Guzeng Hydropower Station is affected by factors such as land expropriation and demolition, geological changes of surrounding rock, difficult construction of special tunnel sections (such as collapse and creep), tight construction period, the project department fully considers the problems existing in surrounding rock stability, construction safety and construction progress problems, combined with the requirements of operation and management and accelerated the construction of the headrace tunnel lining by optimizing the design of the headrace tunnel lining reinforcing bars, and the construction period target of headrace tunnel is completed in advance. Under the condition of reducing the investment cost, the construction safety is guaranteed and the surrounding rock stability is satisfied. The design optimization has created certain economic benefits for the overall construction of EPC projects and accumulated experience for similar EPC engineering hydraulic tunnel construction.

Key words: Guzeng Hydropower Station; EPC projects; Land expropriation and demolition; Geological change; Special cave segment; Design optimization; Rapid construction; Cost control

1 概述

固增水电站位于四川省凉山州木里县境内的木里河干流上,系木里河干流(上通坝~阿布地河段)水电规划“一库六级”中的第五个梯级,采用引水式开发,上游与俄公堡电站衔接,下游与立洲电站相连。电站装机容量为 4×43 MW,正常蓄水位高程为 2 215.00 m,水库总库容为 48.4 万 m^3 ,利用落差 127 m,具有日调节能力。工程的主要任务为发电,兼顾下游生态环境用水要求。电站多年平均年发电量,单独运用时为 6.856 亿 $kW \cdot h$,

联合运用时为 7 387 亿 $kW \cdot h$ 。工程静态总投资为 18.92 亿元,总投资为 21.60 亿元。

工程枢纽由拦河闸坝、进水口、引水隧洞、调压室、压力管道、地面发电厂房组成。闸坝轴线位于小沟河河口下游 400 m 处,从右至左依次为右岸连接坝、泄洪闸、冲沙闸、左岸连接坝和进水口。

引水隧洞布置在木里河右岸,全长 11.036 km,平面上共设置 5 个转点,除第一个拐点转弯半径为 150 m 外,其他拐点的转弯半径均为 300 m。进口底板高程以及调压井底板高程均与初设阶段一致,分别为 2 198.00 m 和 2 175.00 m,纵

收稿日期:2023-05-20

坡 $i=2.0869\%$ 。

引水隧洞的开挖与衬砌均为马蹄型,过流断面的尺寸为 $6.1\text{ m}\times 7.8\text{ m}$ (底宽 \times 高)^[1],并根据不同围岩类别(Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类)^[2]采用不同的支护形式。

2 设计方案优化前的施工方案

原设计方案:引水隧洞 K0+006.5~K11+036.119 范围内不同围岩的钢筋布置情况为:

(1) Ⅲ类围岩(单层钢筋):K0+006.5~K5+500 段的分布筋布置为 $\Phi 12@25\text{ cm}$,主筋布置为 $\Phi 20@20\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 0.47 t;K5+500~K11+036 段的分布筋布置为 $\Phi 16@25\text{ cm}$,主筋布置为 $\Phi 22@16.7\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 0.71 t。

(2) Ⅳ类围岩(双层钢筋):K0+006.5~K1+400 段的分布筋布置为内外环均为 $\Phi 16@25\text{ cm}$,主筋布置为内环 $\Phi 20@20\text{ cm}$,外环 $\Phi 16@20\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 0.95 t;K1+400~K3+500 段的分布筋布置为内外环均为 $\Phi 16@25\text{ cm}$,主筋布置为内环 $\Phi 22@20\text{ cm}$,外环 $\Phi 20@20\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 1.16 t;K3+500~K5+550 段的分布筋布置为内外环均为 $\Phi 18@25\text{ cm}$,内环顶拱及外环均设置 $\Phi 22@16.7\text{ cm}$ 主筋,内环底板设置 $\Phi 28@16.7\text{ cm}$ 主筋,每延米钢筋单耗为 1.5 t;K5+550~K7+600 段的分布筋布置为内外环均为 $\Phi 18@25\text{ cm}$,主筋设置为内环 $\Phi 18@16.7\text{ cm}$,外环 $\Phi 25@16.7\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 2.02 t;K7+760~K9+700 段的内外环设置的分布筋均为 $\Phi 20@25\text{ cm}$,主筋设置为内环 $\Phi 18@14.3\text{ cm}$,外环 $\Phi 25@14.3\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 2.39 t;K9+760~K11+036 段的内外环设置的分布筋均为 $\Phi 20@25\text{ cm}$,内环设置的主筋为 $\Phi 18@12.5\text{ cm}$,外环设置的主筋为 $\Phi 25@12.5\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 2.66 t。

(3) Ⅴ类围岩(双层钢筋):K0+006.5~K1+400 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 16@25\text{ cm}$,主筋设置为 $\Phi 22@20\text{ cm}$,每延米钢筋单耗 1.26 t;K1+400~K3+500 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 16@25\text{ cm}$,主筋设置为 $\Phi 25@20\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 1.54 t;K3+500~K5+550 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 20@25\text{ cm}$,主筋设置为 $\Phi 25@14.3\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 2.21 t;K5+550~K7+600 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 20$

@25 cm,主筋设置为 $\Phi 28@14.3\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 2.74 t;K7+760~K9+700 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 25@25\text{ cm}$,主筋设置为 $\Phi 32@14.3\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 3.73 t;K9+760~K11+036 段分布筋的设置内外环均为 $\Phi 25@25\text{ cm}$,主筋设置为 $\Phi 32@12.5\text{ cm}$,每延米钢筋单耗为 4.13 t。

原设计报告中的衬砌配筋方案于 2018 年 11 月 2 日上报,并于 2018 年 11 月 30 日经监理工程师审批执行。

3 设计方案优化的原因及过程

3.1 设计方案优化的原因

(1) 由于原设计方案中的衬砌配筋未将初期支护作用效果与永久衬砌作用联合统一考虑,而是按照水头压力的大小及围岩类别不同计算配筋的。

(2) 由于所揭示的地质条件较招投标阶段发生了较大变化,若按照原设计方案实施,其实施工程量较清单工程量将增加 1 672.333 t,并在施工成本增大的同时施工工期将延长,不利于固增水电站发电目标的顺利实现。

(3) 通过设计优化变更,可以将钢筋断面减小,在长引水隧洞施工中可以减少施工难度,提高施工效率,节省工期。

3.2 设计方案的优化过程

2019 年 7 月初,项目部进行了内部方案讨论,并对引水隧洞洞内衬砌钢筋进行设计优化,提出了优化建议;2019 年 7 月 16 日,业主单位、监理单位同意施工单位提出的钢筋设计优化建议,同意进行进一步研究并签署了现场备忘录;项目部于 2019 年 9 月委托河海大学开展了衬砌结构数值分析工作并出具了相关成果;然后由水电七局组织外部专家并邀请项目业主单位、监理单位等各参建方共同对河海大学提供的计算成果进行了评审验收。评审会委员一致认为该科研成果与固增水电站引水隧洞开挖支护施工的实施情况紧密结合,可以作为引水隧洞衬砌结构配筋优化的重要技术支撑。2020 年 9 月 13 日,业主与监理单位同意按科研成果报告进行引水隧洞衬砌配筋的优化调整。

4 围岩稳定性的研究与分析

(1) 项目承包部针对Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩的整体稳定性开展了分析研究,建立了二维模型和三维

数值模型。计算了考虑初期支护(喷锚支护^[4]、工字钢支护)与不考虑初期支护情况下不同围岩类别不同工况下典型断面的洞室围岩稳定性,分析了永久衬砌、初期支护及围岩联合受力时不同工况下的应力^[5]状态与变形情况,根据衬砌的应力计算成果开展了相应的配筋及裂缝宽度计算。

(2)针对不良地质洞段,选取断层所处断面作为典型截面进行建模分析,计算了不考虑初期支护和考虑初期支护两种情况下衬砌、支护及围岩的应力状态与变形情况,开展了该断面衬砌结构配筋及裂缝宽度计算。

(3)针对施工过程中出现的大变形洞段,选取开挖过程中变形量最大的断面作为典型断面,根据监测资料反演岩体参数和初始地应力场,并考虑到围岩浸水后其强度会发生劣化的性质,开展了干燥与浸水两种不同状态下典型断面围岩的应力、变形及塑性区范围等计算,评价了围岩稳定性,提出了加强支护的建议;分析了支护系统与衬砌的受力和变形,开展了该断面衬砌结构配筋及裂缝宽度计算。

按照变形收敛率和塑性区开展深度的标准,Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩在支护后都是稳定的。所有断面在各工况下的围岩最大竖向位移均在规范允许范围内,所受到的应力强度均未超过其抗拉和抗压强度,塑性区开展深度均未超出与其相对应的锚杆长度。

按照运行期衬砌与围岩接触的不良情况,将接触层顶拱 90°范围内的部分单元进行了脱空处理,计算显示围岩位移、围岩应力的分布规律和大小没有出现太大的改变,但衬砌结构的受力局部明显增加。经对比是否施加初期支护时围岩稳定计算的各项数值结果可以看出:施加初期支护能够有效改善围岩的变形和受力情况,控制塑性区开展范围,提高围岩的稳定性。例如破碎带部位未施加初期支护时其围岩变形和应力均较大,围岩处于不稳定状态;采取加强支护措施后,围岩的承载能力明显提高。计算显示:实施支护后围岩的最大变形和相对位移均没有超出规范中的规定值,其应力强度在抗拉和抗压强度范围内,临时支护能够较好地改善塑性区开展范围,在该支护体系下,围岩稳定性能够满足安全运行要求。针对断层部位的围岩稳定性,由计算结果可知:在无初

期支护的情况下围岩的竖向位移较大,所受应力较大,塑性区开展已超过灌浆圈厚度,故必须对断层洞段进行支护。施加支护后,围岩变形得到了有效控制,未超过规范允许的变形量,且其所受到的应力强度均未超过其抗拉和抗压强度,围岩能够保持稳定的状态。

5 优化后的施工方案

2020年9月26日,总承包项目部正式报送了“固增水电站引水隧洞钢筋图”,监理单位于2020年10月6日进行了批复:同意实施。优化后的各类围岩在不同水头段的配筋情况为:

(1)Ⅲ类围岩(单层钢筋):渐变段末端~K3+500~K5+500段的分布筋布置为 $\Phi 12@25$ cm,主筋布置为 $\Phi 20@20$ cm,每延米单耗为0.47 t;K5+500~K11+036.119段的分布筋布置为 $\Phi 16@25$ cm,主筋布置为 $\Phi 22@16.7$ cm,每延米单耗为0.71 t。

(2)Ⅳ类围岩(双层钢筋):渐变段末端~K1+400段的分布筋布置为内外环 $\Phi 12@25$ cm,主筋布置为 $\Phi 16@20$ cm,每延米单耗为0.66 t;K1+400~K3+500段的分布筋布置为内外环 $\Phi 12@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 18@20$ cm,内环底板为 $\Phi 20@20$ cm,每延米单耗为0.8 t;K3+500~K5+500段的分布筋布置为内外环 $\Phi 12@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 20@20$ cm,内环底板为 $\Phi 22@20$ cm,每延米单耗为0.95 t;K5+500~K7+600段的分布筋布置为内外环 $\Phi 16@25$ cm,主筋布置为内外环 $\Phi 22@20$ cm,每延米单耗为1.23 t;K7+600~K9+700段的分布筋布置为内外环 $\Phi 16@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 22@20$ cm,内环底板为 $\Phi 25@20$ cm,每延米单耗为1.27 t;K9+700~K11+036.119段的分布筋布置为内外环 $\Phi 16$ mm@25,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 25@20$ cm,内环底板为 $\Phi 28@20$ cm,每延米单耗为1.27 t。

(3)Ⅴ类围岩(双层钢筋):渐变段末端~K1+400段的分布筋布置为内外环 $\Phi 12@25$ cm,主筋布置为内环 $\Phi 20@20$ cm,外环 $\Phi 16@20$ cm,每延米单耗为0.81 t;K1+400~K3+500段的分布筋布置为内外环 $\Phi 16@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 22@20$ cm,内环底板为 $\Phi 25@$

20 cm,每延米单耗为 1.3 t;K3+500~K5+500 段的分布筋布置为内外环 $\Phi 16@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 25@16.7$ cm,内环底板为 $\Phi 28@16.7$ cm,每延米单耗为 1.82 t;K5+500~K7+600 段的分布筋布置为内外环 $\Phi 20@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 25@14.3$ cm,内环底板为 $\Phi 28@14.3$ cm,每延米单耗为 2.35 t;K7+600~K9+700 段的分布筋布置为内外环 $\Phi 22@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 28@14.3$ cm,内环底板为 $\Phi 32@14.3$ cm,每延米单耗为 2.93 t;K9+700~K11+036.119 段的

分布筋布置为内外环 $\Phi 22@25$ cm,主筋布置为内环边墙顶拱及外环 $\Phi 28@14.3$ cm,内环底板为 $\Phi 32@14.3$ cm,每延米单耗为 2.95 t。

6 设计方案优化前后的对比情况

通过对设计方案优化前后的施工方案进行对比得知:优化后的方案因原设计图纸对于Ⅲ类围岩按构造配筋,故对其配筋未做调整,仍按原方案执行;对于Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩典型洞段的钢筋直径、间距均进行了适当调整。设计方案优化前后Ⅳ、Ⅴ类围岩典型洞段钢筋布置情况见表 1。

新的设计方案优化了钢筋型号,对钢筋间排

表 1 设计方案优化前后Ⅳ、Ⅴ类围岩典型洞段钢筋布置表

桩号	Ⅳ类围岩变更后较原设计方案的變化	Ⅴ类围岩变更后较原设计方案的變化
渐变段末端~ K1+400	(1)分布筋由 $\Phi 16$ 变化为 $\Phi 12$; (2)内环主筋由 $\Phi 20$ 变化为 $\Phi 16$; (3)延米单耗减少了 0.29 t	(1)分布筋由 $\Phi 16$ 变化为 $\Phi 12$; (2)主筋由 $\Phi 22$ 变化为内环 $\Phi 20$,外环 $\Phi 16$; (3)延米单耗减少了 0.45 t
K1+400~ K3+500	(1)分布筋由 $\Phi 16$ 变化为 $\Phi 12$; (2)内环边墙及顶拱主筋由 $\Phi 22$ 变化为 $\Phi 18$,内环底 端由 $\Phi 22$ 变化为 $\Phi 20$,外环主筋由 $\Phi 20$ 变化为 $\Phi 18$; (3)延米单耗减少了 0.36 t	(1)分布筋无变化; (2)内环边墙顶拱及外环主筋由 $\Phi 25$ 变化为 $\Phi 22$, 内环底板无变化; (3)延米单耗减少了 0.24 t
K3+500~ K5+500	(1)分布筋由 $\Phi 18$ 变化为 $\Phi 12$; (2)内环边墙顶拱及外环主筋由 $\Phi 22$ 变化为 $\Phi 20$,内环 底板主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 20$,主筋间距由 16.7 cm 变化为 20 cm; (3)延米单耗减少了 0.55 t	(1)分布筋由 $\Phi 20$ 变化为 $\Phi 16$; (2)内环边墙顶拱及外环主筋无变化,间距由 14.3 cm 变化为 16.7 cm,内环底板主筋由 $\Phi 25$ 变化 为 $\Phi 28$,间距由 14.3 cm 变化为 16.7 cm; (3)延米单耗减少了 0.39 t
K5+500~ K7+600	(1)分布筋由 $\Phi 18$ 变化为 $\Phi 16$; (2)内环主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 22$,外环主筋底筋由 $\Phi 25$ 变化为 $\Phi 22$,主筋间距由 16.7 cm 变化为 20 cm; (3)延米单耗减少了 0.79 t	(1)分布筋无变化; (2)内环边墙顶拱及外环主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 25$, 内环底板无变化; (3)延米单耗减少了 0.39 t
K7+600~ K9+700	(1)分布筋由 $\Phi 20$ 变化为 $\Phi 16$; (2)内环边墙及顶拱主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 22$,内环底板 主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 25$,外环主筋由 $\Phi 25$ 变化为 $\Phi 22$,主筋间距由 14.3 cm 变化为 20 cm; (3)延米单耗减少了 1.12 t	(1)分布筋由 $\Phi 25$ 变化为 $\Phi 22$; (2)内环边墙顶拱及外环主筋由 $\Phi 32$ 变化为 $\Phi 28$, 内环底板无变化; (3)延米单耗减少了 0.80 t
K9+700~ K11+036.119	(1)分布筋由 $\Phi 20$ 变化为 $\Phi 16$; (2)内环边墙及顶拱主筋由 $\Phi 28$ 变化为 $\Phi 25$,内环底板 主筋无变化,外环主筋无变化,主筋间距由 12.5 cm 变化为 20 cm; (3)延米单耗减少了 1.12 t	(1)分布筋由 $\Phi 25$ 变化为 $\Phi 22$; (2)内环边墙顶拱及外环主筋由 $\Phi 32$ 变化为 $\Phi 28$, 内环底板无变化,主筋间距由 12.5 cm 变化为 14.3 cm; (3)延米单耗减少了 1.18 t

距进行了加大,使每延米的耗筋量降低。通过对引水隧洞衬砌钢筋的设计方案进行优化调整,加快了隧洞混凝土衬砌的施工进度,大大降低了施工成本,同时,经专家组、监理部审查并实施的优

化后的设计方案的围岩稳定性要求满足施工要求,工程安全得到了保证。该设计方案优化为项目的整体建设创造了一定的经济效益,同时也

(下转第 70 页)

生产措施,通过现场认真落实,结合安全责任制、科技兴安措施,合规投入安全费用,有效地保证了工程施工安全,实现了安全生产“零事故”目标,取得了良好的管理效果和经济效益,具有一定的针对性、可行性、可靠性、经济性,为类似工程建设安全规范化、标准化管理总结出一定的经验,具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 张璇,谭洪波,吴爽. 水利工程建设施工单位安全生产管理问题探讨[J]. 水利建设与管理,2019,39(12):36-39.
- [2] 田志勇,骆双,廖重阳. 高原峡谷大型水电站起重设备交叉

作业安全管理[J]. 四川水利,2020,41(6):127-131.

- [3] 邹勤. 水电站大坝施工的安全问题分析[J]. 现代物业(上旬刊),2014,13(7):98-99.
- [4] 赵晓妮. 建筑施工安全管理措施优化研究[J]. 山西建筑,2019,45(2):245-246.
- [5] 郭攀. 位于高陡边坡的路基桥梁施工安全措施分析[J]. 山西建筑,2018,44(7):140-141.

作者简介:

袁 亮(1973-),男,四川达州人,分局安全部主任,注册安全工程师、工程师,从事工程建设安全管理工作;

张国平(1976-),男,四川乐山人,项目副经理,高级工程师,从事工程项目管理工作。 (责任编辑:李燕辉)

(上接第 46 页)

提前完成了引水隧洞的衬砌施工,为首台机组发电目标的实现打下了坚实的基础。

7 经济与社会效益分析

原设计方案中的衬砌钢筋为 16 770.333 t,设计方案优化后的衬砌钢筋实施工程量为 13 484.771 t,减少了 3 285.562 t。

该工程采用 EPC 模式,通过设计方案优化减少了实施工程量,降低了施工成本,取得直接经济效益约 1 925.76 万元。引水隧洞衬砌钢筋方案优化后缩短了现场施工工期,使每仓钢筋转运的次数减少,安装钢筋的工序时间缩短,优化后的配筋经受力验算得知:在引水隧洞实施及运行阶段无安全隐患,整体受控。

8 结 语

此次设计方案优化结合工程项目的实际交地

情况,从工期和成本的角度出发,在保证围岩稳定和施工安全的前提下对引水隧洞的衬砌钢筋进行了优化,增大了钢筋间距,节约了钢筋用量,优化后的施工方案其施工工艺得到了简化,节省了隧洞钢筋制安的时间,减少了施工工期,创造出较大的经济效益。

参考文献:

- [1] 水工隧洞设计规范,SL279-2016[S].
- [2] 工程岩体分级标准,GB/T50218-2014[S].
- [3] 水工混凝土钢筋施工规范,DLT 5169-2013[S].
- [4] 水电水利工程锚喷支护施工规范,DL/T5181-2017[S].
- [5] 水电水利工程预应力锚固施工规范,DL/T 5083-2019[S].

作者简介:

林晓旭(1986-),女,四川资中人,副高级工程师,从事水利水电、市政、铁路工程施工技术与管理工作。

夏维学(1972-),男,四川仁寿人,分局总工程师,正高级工程师,从事市政、水电、铁路工程施工技术与管理工作。 (责任编辑:李燕辉)

(上接第 65 页)

(2)通过对隧道典型变形段变形规律进行分析得知:近平行陡倾薄层状软岩隧道极易在隧道拱腰至拱脚边墙处发生大变形灾害,且其变形随岩层走向的改变存在明显的不对称性。

(3)近平行陡倾薄层状软岩隧道大变形灾害的发生机制主要是由于地应力方向、层理结构和洞轴线处于不利的组合位置所导致,隧道开挖后围岩尽早闭环,及时施作系统锚杆以增加拱架刚度等。

参考文献:

- [1] 康永水,耿志,刘泉声,等. 我国软岩大变形灾害控制技术与

方法研究进展[J]. 岩土力学,2022,48(8):21-25.

- [2] 曹兴松,周德培,刘国强,等. 陡倾小交角层状围岩浅埋隧道锚杆支护优化研究[J]. 地下空间与工程学报,2013,33(增刊 2):1926-1930.
- [3] 郭小龙,谭忠盛,李磊,等. 高地应力陡倾层状软岩隧道变形破坏机理分析[J]. 土木工程学报,2017,50(增刊 2):38-44.
- [4] 张宁,郑国强,袁文强,等. 陡倾层状软弱围岩隧道变形特征及变形处治技术研究[C]//2022 年工业建筑学术交流会议论文集,中冶建筑研究总院有限公司,2022:1022-1027.
- [5] 陈子全. 高地应力层状软岩隧道围岩变形机理与支护结构体系力学行为研究[D]. 西南交通大学,2019.

作者简介:

孙慕楠(1995-),男,天津宝坻人,工程师,学士,从事建设工程施工技术与管理质量管理工作。 (责任编辑:李燕辉)