

基于冲沟瀑布景观保护的某隧道洞口防冲刷设计与实践

向 昭^{1,2}, 张 琴¹, 蔡志伟², 张淑琴¹, 游珊珊¹

(1. 广安职业技术学院, 四川 广安 638000; 2. 中煤科工重庆设计研究院
(集团)有限公司, 重庆 400042)

摘要: 某公路隧道洞口位于傍山冲沟瀑布下方, 雨季面临冲刷威胁, 影响通行安全。为此, 文章综合考虑结构安全、运营安全、景观保护与成本控制, 提出了针对性防冲刷设计方案, 通过适度延长明洞、在洞顶设置受水池并整合截排水系统, 实现对洞口的有效防护。同时, 详细阐述了设计思路、过程、关键问题与控制要点。实践表明: 该设计不仅有效抵御了冲刷作用, 保障了洞口结构稳定与行车安全, 同时最大程度地保留了冲沟瀑布的自然景观, 使隧道与周边环境和谐相融。研究成果为类似工程提供了有益借鉴, 也为隧道洞口设计在安全、环保与美观方面的统筹提供了新思路。

关键词: 隧道洞口; 瀑布景观; 防冲刷设计

中图分类号: U452

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)03-0065-07

doi: 10.13402/j.gejs.2026.03.032

Anti-scouring design and practice of a certain tunnel entrance based on the landscape protection of gully waterfall

XIANG Zhao^{1,2}, ZHANG Qin¹, CAI Zhiwei², ZHANG Shuqin¹, YOU Shanshan¹

(1. Guang'an Vocational and Technical College, Guang'an 638000, Sichuan, China;

2. China Coal Technology Engineering Group (CCTEG) Chongqing Engineering
(GROUP) Co., Ltd., Chongqing 400042, China)

Abstract: The entrance of a highway tunnel is located beneath a waterfall in a mountain gully, facing erosion threats during the rainy season that affect traffic safety. To address this, the study proposes a targeted anti-erosion design scheme taking into account structural safety, operational safety, landscape preservation, and cost control. The scheme effectively protects the tunnel entrance by moderately extending the open-cut section, installing a water-receiving pool on the top, and integrating a water interception and drainage system. The paper elaborates in detail on the design concept, process, key issues, and control points. Practice shows that this design not only effectively resists erosion, ensuring the structural stability of the entrance and driving safety, but also preserves the natural landscape of the gully waterfall to the greatest extent, achieving harmony between the tunnel and its surrounding environment. The research results provide valuable references for similar projects and offer new ideas for integrating safety, environmental protection, and aesthetics in tunnel entrance design.

Key words: tunnel entrance; waterfall landscape; anti-scouring design

隧道工程是公路交通建设中的重要组成部分, 特别是在山区公路建设中, 隧道工程扮演着尤为

收稿日期: 2024-09-29

基金项目: 广安职业技术学院 2024 年度校级科研项目 (GAZYKY-2024A09)

作者简介: 向 昭 (1990—), 男, 高级工程师, 从事隧道工程、岩土及地下工程方面的设计与研究。

通信作者: 游珊珊 (1991—), 女, 工程师, 从事建筑景观设计方面的设计与研究。

重要的角色。隧道不仅缩短了路程,提高了通行效率,还减轻了山区道路对自然环境的影响。然而,在涉及自然保护区的山岭隧道项目中,由于地形复杂、建设成本高及环境保护等多重因素的限制,传统的进洞方案往往难以满足现代可持续发展的要求,往往选择沿傍山线路进洞的布置形式。在此类工程中,洞口边、仰坡的处理常采用刷坡方式,尽管这种方式施工简便且安全性较高,但它不可避免地会对洞口生态环境造成一定影响,裸露的边坡在视觉上也与周围自然景观不协调。此外,破坏后的植被恢复也更困难,这不仅增加了修复成本,还延长了修复周期。针对位于或毗邻自然保护区范围的公路隧道建设,生态环境保护显得尤为重要。在建设过程中,应最大限度地减少对原始植被的破坏,并努力使隧道洞口与自然环境相协调,以达到生态友好的建设目标。

目前,国内外学者和工程师在隧道洞口的生态保护方面已开展了一系列研究。其中,蒋树屏等^[1]提出的“零开挖”洞口的理念受到推崇,通过前置洞口工法,适当延长洞口和隧道的长度,可以有效避免对山体的大面积开挖和刷坡,从而减少对生态环境的破坏。李凯等^[2]基于“零开挖”理念,分析了传统洞口开挖方式的弊端,强调在森林公园等敏感区域需最小化对原地形与植被的扰动,从安全、环保、景观、施工及经济等多维度进行了细致的方案比选,提出隧道洞口设计应灵活运用“零开挖”理念,因地制宜选择洞门形式与进洞工法。AKINCI等^[3]研究了隧道入口在景观设计中的重要性,还对应用于隧道入口的建筑和景观设计方面进行了分析。可见,加强隧道洞口原始植被的保护,维护原有的生态地貌,是实现隧道与周边环境协调统一的关键。

此外,为防止雨水对边仰坡的冲刷和流入隧道洞内,需在确保边、仰坡安全稳定的前提下,结合隧道洞口的实际情况,及时完成洞口施工,并在进洞前采取有效的洞顶地表水截排措施。然而,在某些特殊情况下,如隧道洞口附近有冲沟或瀑布时,就需要特别注意防冲刷设计。在保障土建结构安全的基础上,如何将原始瀑布景观与隧道洞口结构巧妙融合,成为了一个亟待解决的

新课题。尽管在这一领域已经取得了一定的研究成果,但仍有许多问题需要进一步探讨。特别是对于那些位于复杂地形条件下的隧道洞口设计,现有文献中鲜有详细记载,该领域的研究与实践仍具有一定的探索空间^[4-7]。为此,本文以重庆市江津区某四级公路隧道项目出洞口的防冲刷设计过程为例进行阐述,以期可为相关工程提供参考。

1 工程概况

该隧道位于重庆市江津区四面山风景区内,所在线路为四级公路,设计时速为 20 km/h,采用单洞双向布置,全长为 633 m,纵坡 3%~3.85%,隧道建筑限界宽度为 7.0 m,高度为 4.5 m。隧道洞口现状为陡崖,陡崖高度为 14~27 m,陡崖坡度约为 67°~82°。

隧道穿越岩层主要为中生界白垩系上统夹关山组砂岩,出洞口位于现状斜坡的中部,洞口轴线与岩层走向斜交,洞轴线与地形线近斜交。洞顶现状环境边坡近直立,边坡倾向 149°,坡顶土层较薄,土岩界面平缓,表层土体未见变形迹象,现状环境边坡处于稳定状态。隧址区基岩大面积出露,砂岩中裂隙贯通性差,因此此类地下水富水性差,水量贫乏,但区域汇水面积大,由于横向沟谷发育,地形切割强烈,地表水排泄迅速,隧道出洞口陡崖顶发育一冲沟,在雨季汇集大量的雨水,并在洞口陡崖处形成了天然的冲沟瀑布,瀑布宽度约为 10 m,高度约为 14 m,堰口与隧道洞顶高差约为 7 m。隧道出洞口在雨季面临着大量的雨水冲刷,可能导致洞口周围的土体流失,破坏洞口结构,进而影响到隧道的安全和通行。隧道出洞口平面布置如图 1 所示。

2 防冲刷设计思路

2.1 设计需求分析

该隧道项目位于自然风景区,地理位置特殊,因此在设计时应充分考虑场地的自然环境和地形地貌,综合考虑气象水文、生态环境和人文特点,尊重自然规律,因地制宜,力求在保证隧道洞口美观的同时,尽可能减少对原始环境的破坏,实现人与自然的和谐共生。隧道洞口坡顶存在的冲

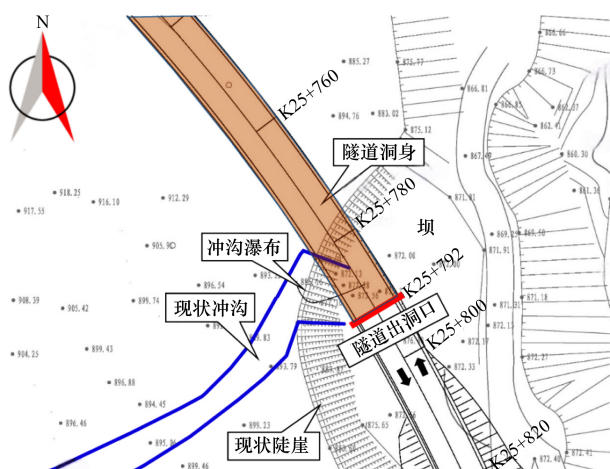


图1 隧道出洞口平面布置

m

沟瀑布作为自然风景区的一处特别的景点,也是所在地生态系统的重要组成部分,应尽可能加以保护和利用;考虑到雨季期间冲沟瀑布可能会对隧道洞口结构和行车安全产生不利影响,有必要采取措施规避这些风险^[8-10]。

2.2 设计方案比选

根据现场实际情况,有两种设计方案可供选择,一是对冲沟瀑布进行引流处理,避免直接冲刷隧道和公路路基,二是对隧道洞口结构进行适当加强,以抵御冲沟瀑布的冲击和冲刷。

方案一采用延长并加强隧道明洞,在隧道明洞顶靠瀑布一侧设置受水池,将瀑布水流通过洞顶天沟引流至附近溪流。该方案预计增加投资约120万元。方案一洞口平面布置如图2所示。

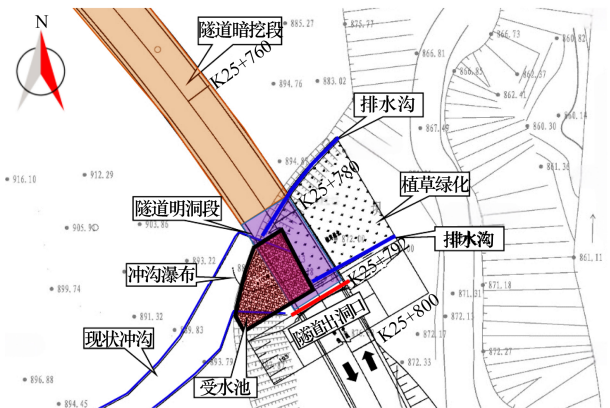


图2 方案一洞口平面布置

m

方案二采用修整瀑布堰口,新建跌水井及箱涵,将瀑布水流从道路路基下方进行引排。降低原瀑布堰口标高,在新建堰口处设置跌水井,跌水高度约15 m,考虑相应的消能措施,跌水井接

入排水箱涵,将瀑布水流引排至路基另一侧,再通过排水沟引排至附近溪流中。该方案预计增加投资约105万元。方案二洞口平面布置如图3所示。

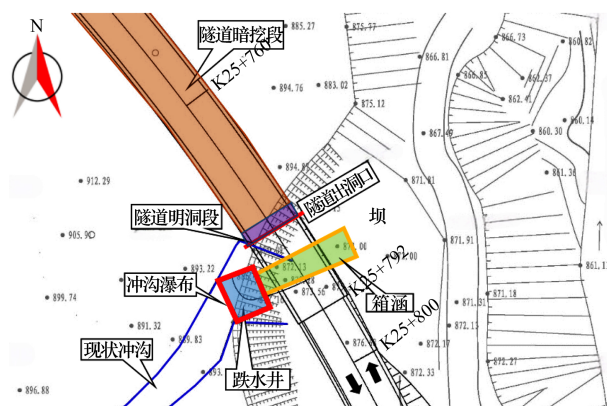


图3 方案二洞口平面布置

m

对比分析方案一和方案二,可以看出:两个方案在冲沟瀑布防冲刷上增加的费用差别不大,但在环境保护方面的表现却有着显著差异。方案一对环境影响小,保留了原始植被和瀑布景观,符合项目对环保的高标准要求。方案二虽更有效地降低了冲沟瀑布对隧道结构和运营安全的影响,但对原始瀑布景观和植被的破坏较大。鉴于该项目紧邻自然保护区,环境保护被视为设计工作的首要条件。方案一不仅能够一定程度上保护自然景观的原始美感,还能够促进景区内的可持续发展,让游客在享受自然之美的同时,感受到人类与自然和谐共处的美好愿景。因此,经过综合考量,最终决定选择方案一作为实施方案。

2.3 防冲刷设计

在冲沟瀑布冲刷的工况下,延长的明洞结构需充分考虑结构的防冲刷设计,为了确保隧道在长期运行中的安全性和稳定性,不仅需要考虑瀑布底部的受水池设置,还需要全面评估瀑布水流对明洞结构产生的不利影响。

(1) 应在瀑布底部设置防冲刷的受水池,以接收和缓冲从冲沟瀑布急流而下的水流。受水池的设计不仅要能够承受冲沟瀑布水流的强大冲击力,还需要具备将汇集的水流快速引排至附近低洼溪流的能力。受水池需具备足够的容积和坚固的结构,设计的受水池采用钢筋混凝土结构,以确保其具有一定的耐久性和防水性能。此外,在

$P(\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s})$ 。计算公式如下。

$$P = Qv\rho \quad (2)$$

式中: ρ 为水的密度, kg/m^3 。假设瀑布的水流在落到瀑底时速度减为零, 那么瀑底的冲击力 F 可以通过动量定理来估算:

$$F = \frac{P}{t} = \rho Q \sqrt{2gH} \quad (3)$$

式中: t 为水流与瀑底接触的时间, s ; H 为瀑身高度, m , 因动量 P 根据单位时间瀑布的流量计算得来, 将 t 取为单位时间, 则可得出瀑布水流冲击力的估算值。

3.3 考虑水力冲击的隧道结构计算

隧道洞口为浅埋明洞, 用 MIDAS - GTS 有限元分析软件模拟瀑布水流冲击力作用下的不利工况。岩土土体材料采用莫尔 - 库伦屈服准则, 岩体采用德鲁克 - 普拉格准则。

采用勘察报告中的岩土参数, 中等风化砂岩重度 $\gamma = 24 \text{ kN}/\text{m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 31.2^\circ$, 黏聚力 $c = 710 \text{ kPa}$, 弹性模量 $E = 6\,186 \text{ MN}/\text{m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.2$; 填土容重 $\gamma = 20 \text{ kN}/\text{m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 28^\circ$, 黏聚力 $c = 5 \text{ kPa}$, 弹性模量 $E = 10 \text{ MN}/\text{m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.35$ 。明洞衬砌结构、受水池结构容重 $\gamma = 25 \text{ kN}/\text{m}^3$, 弹性模量 $E = 31 \text{ GN}/\text{m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.2$; 浆砌片石采用经验参数容重 $\gamma = 24 \text{ kN}/\text{m}^3$, 内摩擦角 $\varphi = 35^\circ$, 黏聚

力 $c = 10 \text{ kPa}$, 弹性模量 $E = 1\,000 \text{ MN}/\text{m}^3$, 泊松比 $\mu = 0.25$ 。考虑施工扰动的影响, 对岩土体参数进行适当折减, 一般折减系数取为 $0.7 \sim 0.9$ 。受水池水深约 1.3 m , 池底 1 m 厚卵石, 卵石及水流重力均布荷载约为 15 kPa , 瀑布冲击力考虑为集中作用力, 其值约为 108 kN 。

为模拟洞顶瀑布冲击对岩土体和明洞结构的影响, 采用地层 - 结构法, 用有限元软件模拟多个施工步下的影响程度。采用二维平面应变模型, 隧道明洞衬砌、受水池底采用一维板单元。为了确保计算精度, 沿隧道横向取 65 m , 从地表向下最高处取 40 m , 最低处为 15 m , 其模型如图 6 所示。

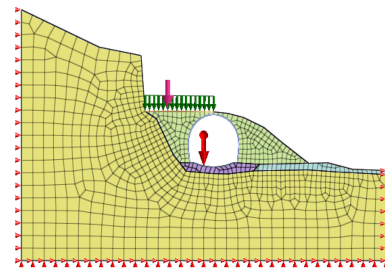
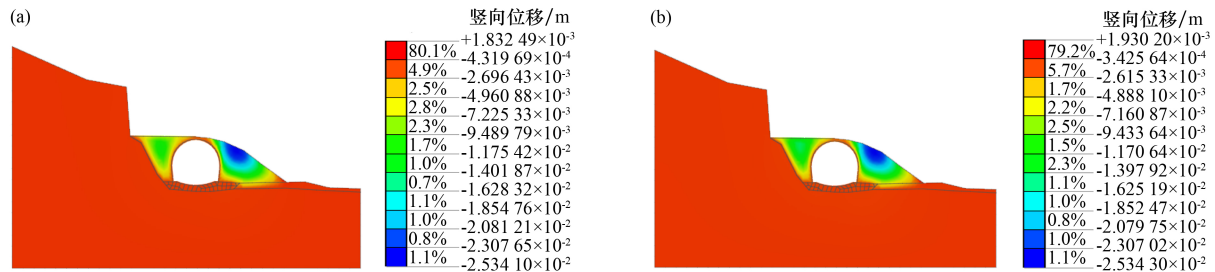


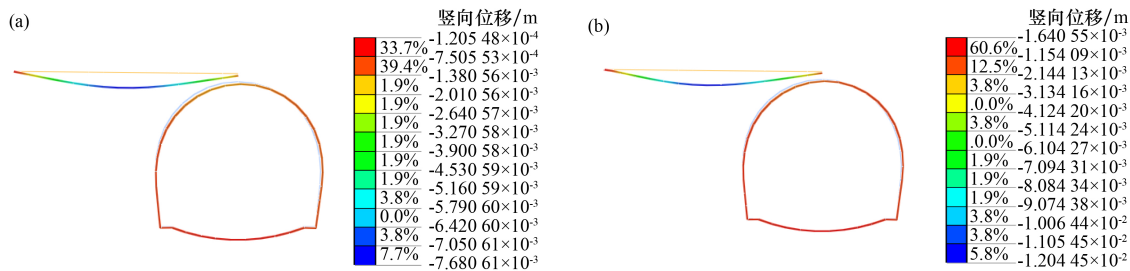
图 6 计算模型简图

模型一共设置 3 个计算步, 即原始地应力、隧道明洞开挖及回填、瀑布冲刷。设计过程中宜采用荷载 - 结构法对明洞结构计算加以验证。计算结果的竖向位移云图如图 7、8 所示。



(a) 无瀑布冲刷工况; (b) 瀑布冲刷工况

图 7 整体竖向位移云图



(a) 无瀑布冲刷工况; (b) 瀑布冲刷工况

图 8 明洞及受水池底板竖向位移云图

由计算结果可见,瀑布冲刷导致受水池底土体增加了约 4.6 mm 的竖向位移,最大竖向位移位于受水池瀑布冲刷位置,明洞结构最大竖向位移为 -2.3 mm,位于拱顶靠瀑布冲击侧,洞口位移整体较小。明洞及受水池底板内力图如图 9 所示,明洞结构拱部最大弯矩为 172 kN·m,出现在明洞拱腰靠受水池侧,受水池底板最大弯矩为 314 kN·m,出现在受瀑布冲击区域;明洞结构最大剪力为 253 kN,出现在明洞边墙靠受水池侧,受水池底板最大剪力为 62 kN,出现在瀑布冲击区域前端;明洞结构最大轴力为 490 kN,出现在明洞边墙靠受水池侧,受水池底板最大轴力为 54 kN,出现在瀑布冲击区域后端。

洞口段塑性区分布如图 10 所示,可见隧道偏压和瀑布冲击作用下,受水池底部出现一定程度的塑性区,但该塑性区在无瀑布冲击作用下也存在,主要由明洞回填土体沉降导致,因此在明洞回填过程中要尤其注意明洞背后土体的压实,避免受水池底板脱空。

4 设计要点分析

针对项目的特殊性进行了专项设计,具有一定特色。主要包含自然保护区的保护性设计、隧道洞口景观打造、防瀑布冲刷设计、隧道明洞结构的加强等方面。

(1) 对于位于或毗邻自然保护区的隧道洞口工程,设计时应充分考虑对现状生态环境的保护,力求将洞口与自然环境融为一体。设计过程中,应尽量减少对原始植被和地形地貌的破坏,保持生态系统的完整性和连续性。

(2) 方案制定应进行经济技术对比论证,确保方案的安全性和可行性,还应考虑洞口景观的

整体打造。对于那些存在冲沟瀑布的隧道洞口,可以通过延长洞口的方法来保留瀑布景观,同时严格控制延长的范围,以避免过度干扰自然环境,提升隧道洞口的美观度,为游客提供更加丰富的观赏体验。

(3) 在进行防瀑布冲刷设计时,宜考虑最不利工况,即最大水流量冲击的情况下的防冲刷设计,受水池的设置需要充分考虑瀑底的消能处理,以增强结构的耐久性和抗冲刷能力。此外,施工时间的选择也很重要,建议在旱季进行施工,以减少瀑布水流对施工期间的干扰和可能带来的安全隐患。

(4) 在瀑布冲刷作用下,应将瀑布冲击力作为附加荷载考虑,通过在洞顶设置受水池,可以有效分散瀑布冲击力,避免集中荷载对明洞结构的直接作用。在设计时,需要考虑受水池满水状态下的荷载,并据此对明洞结构进行适当加强处理。明洞回填材料的选择也十分重要,应采用透水性较好的材料进行回填并压实,以减少水流对结构的影响。同时,明洞结构必须加强防水措施,防止水流渗透侵蚀结构。此外,还应加强隧道后期的维护和保养,确保其长期的安全稳定运行。

5 结 语

在洞口需考虑保留现状冲沟瀑布景观的条件下,本文对隧道洞口的防冲刷设计进行了详细介绍,设计采取的明洞延长、洞顶防冲刷设计、雨水有组织排放、明洞结构和防水加强等一系列措施,有效地解决了隧道洞口在雨季面临的冲沟瀑布冲刷的问题。

(1) 在冲沟瀑布作用下的隧道零开挖洞口是可以实现的,隧道洞口雨水的截排方式应结合工

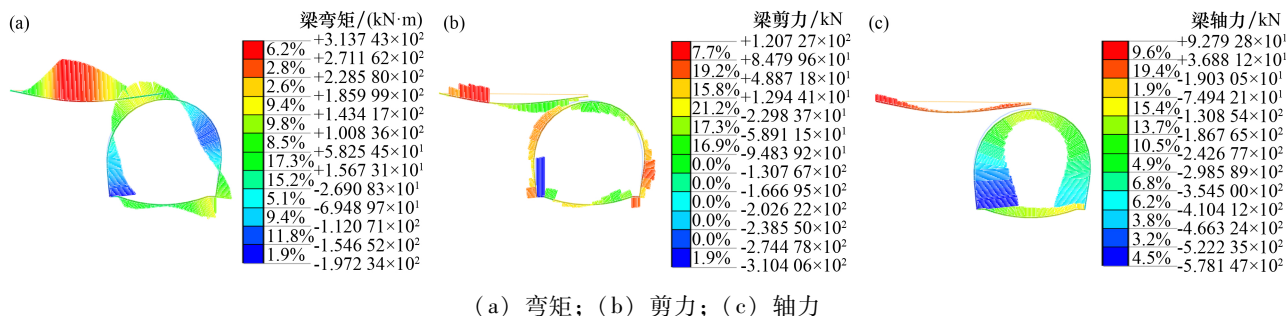


图 9 瀑布冲刷工况明洞及受水池底板内力

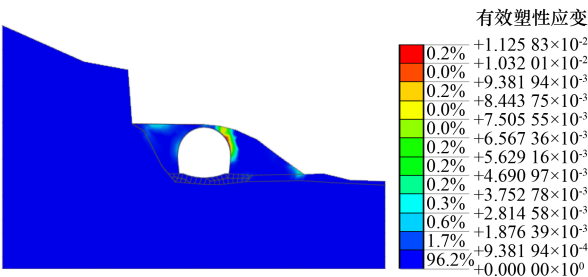


图 10 瀑布冲刷工况洞口段塑性区分布



图 11 施工现场照片（旱季施工）

程实际情况综合考虑。

（2）在瀑布冲击条件下，隧道洞顶设置含消能措施的受水池可极大的分散瀑布冲击力，明显降低瀑布巨大冲击力对隧道明洞结构的影响。

（3）文章中瀑布冲击力的计算方式偏于保守，后期类似的隧道项目中，可结合工程实际情况，通过现场实测、模型试验、数值分析等手段进行优化和改进。

参考文献：

[1] 蒋树屏,李建军. 公路隧道前置式洞口工法与工程实

践[J]. 现代隧道技术,2005(2):49-52;59.

[2] 李凯,成国文. 基于“零开挖”理念的公路隧道洞口设计方案比选[J]. 广东公路交通,2019,45(4):212-216;226.

[3] AKINCI C,DEMIREL V O,et al. Sustainability of landscape in the portals of highway tunnels[J]. Journal of environmental protection and ecology,2016,17(2):747-753.

[4] JIA L,ZHAO D. Study on green tunnel entrance landscape and its evaluation system[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition),2011,5(2):149-154.

[5] 叶飞,何川,王士民等. 公路隧道洞口景观的构造与分析[J]. 现代隧道技术,2009,46(2):15-21.

[6] 叶飞,苏恩杰,梁晓明,等. 公路隧道景观设计现状和思考[J]. 中国公路学报,2022,35(1):23-37.

[7] 雷红仙,黄萍. 公路隧道洞口景观设计浅析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2019,15(8):312-317.

[8] 刘刚,曹德万. 城市运营隧道渗漏治理技术研究[J]. 工程建设,2023,55(4):54-58.

[9] 杨强. 存量规划背景下山地城市道路建设存在问题及对策研究[J]. 工程建设,2022,54(11):31-35.

[10] 彭小庆. 公路隧道工程生态型洞门设计分析[J]. 黑龙江交通科技,2021,44(11):124-125.