

既有公路隧道改扩建方案研究现状与展望

李鑫¹, 钱镇华², 宋延安³

(1. 内蒙古科技大学 土木工程学院, 内蒙古 包头 014010; 2. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019;

3. 中铁五局集团有限公司, 湖南 长沙 410017)

摘要: 随着我国经济社会的发展, 现有高速公路隧道无法满足迅速增长的交通量需求, 既有隧道改扩建成为提高通行能力的有效手段。通过文献检索梳理了国内近20年公路隧道改扩建方案选型发展动态, 指出了原位扩建、并行扩建、组合扩建等方案的优缺点; 结合公路隧道改扩建过程的各项指标, 给出了对方案选型影响最大的几种指标, 并介绍了其研究现状; 在大量调研典型案例的基础上, 总结认为单侧扩建适宜应用于大部分工程, 并对几种情况给出了推荐方案。

关键词: 公路隧道; 改扩建; 方案选型; 研究现状; 单侧扩建

中图分类号: U452

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)04-0240-07

Research Status and Prospect of Reconstruction and Expansion Schemes of Existing Highway Tunnels

LI Xin¹, QIAN Zhenhua², SONG Yanan³

(1. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. JSTI GROUP,

Nanjing 210019, China; 3. China Railway Fifth Bureau Group Co., Ltd., Changsha 410017, China)

Abstract: With the development of economy and society in China, the existing expressway tunnels cannot meet the needs of the rapidly growing traffic volume. The reconstruction and expansion of existing tunnels have become an effective means to improve the traffic capacity. Through literature search, the development trends of highway tunnel reconstruction and expansion schemes in China in the past 20 years are sorted out, and the advantages and disadvantages of in-situ expansion, parallel expansion and combined expansion are pointed out. Combined with the indicators of the whole process of highway tunnel reconstruction and expansion, several indicators that have the greatest impact on the selection of schemes are given, and their current research status is introduced. Based on extensive research of typical cases, it is concluded that unilateral expansion is suitable for the most projects, and the recommended solutions are also given for several situations.

Keywords: highway tunnels; reconstruction and expansion; solution selection; research status; unilateral expansion

0 引言

公路运输在中国运输业中占有十分重要的地位, 而公路隧道作为提升公路运输效率与道路服务水平的重要基础设施, 越来越受到重视和关注^[1]。2023年末全国公路里程为 543.68×10^4 km, 全国公路隧道27 297处共 $3\,023.18 \times 10^4$ km, 比上年增加了2 447处共 344.75×10^4 km, 其中特长隧道2 050处共 924.07×10^4 km, 长隧道7 552处共 $1\,321.38 \times 10^4$ km^[2]。早期修建的2车道隧道已无法满足日渐增长的公路运输需求, 同时4车道公路隧道受限于当时的设计

规范与施工技术, 普遍存在裂缝、变形、渗水等质量缺陷。这些日益突出的问题, 已成为我国交通运输业迅猛发展的瓶颈^[3]。

隧道改扩建是在既有隧道的基础上, 为提高技术等级、通行能力或改善技术指标而进行的隧道建设工程, 包括隧道的改建、扩建、增建等。由于原隧道环境及扩建需求不同, 改扩建方案的选择对隧道稳定、建设周期、工程造价和后期维护运营有很大影响。我国关于公路隧道改扩建方案的研究相对较少, 缺少匹配的设计规范和施工依据, 隧道改扩建工程领域的研究深度与系统性有待深化, 同时, 能够有效指导实践的针对性规范或标准也尚未建立^[4]。

本文对近年来国内发表的隧道改扩建研究进行梳理, 了解改扩建方案研究现状, 对各个方案的适用

收稿日期: 2025-08-17

作者简介: 李鑫(1999—), 男, 硕士在读, 研究方向为城市地下工程。

范围进行梳理与总结,希望这些数据对既有公路隧道改扩建方案的选型有一定帮助。

1 发展历程

隧道改扩建最早起源于 20 世纪 90 年代的铁路隧道,为满足列车限界要求及提高运输能力,对既有铁路隧道进行提速扩能。21 世纪初,为了提升道路等级、增强隧道系统稳定性以及改善交通容量、运输效率,改扩建公路隧道逐渐增多。2003 年重庆渝中区鹅岭隧道将单洞 2 车道扩建为单洞 3 车道^[5];2010 年福建大帽山隧道由双洞 4 车道改为三洞 8 车道^[6];2018 年后伺隧道将原 2 车道扩建为 4 车道,宽度由 9 m 扩建为 20 m,扩建长度达 1 002 m,形成了三洞 9 车

道的隧道群,这是我国目前最长的原位改扩建公路隧道^[7]。以上典型案例的实施,为既有隧道改扩建技术的发展奠定了实践基础。

自 1996 年李元福^[8]依托关村坝隧道进行隧道改扩建技术研究,到如今已有大量相关研究发表。为掌握公路隧道改扩建方案选型的研究动态,通过检索 CNKI、SCIE、ASCE 等数据库,以“公路隧道”“改扩建”“方案选型”为关键词,经过统计得到表 1,汇总了国内近 20 年相关研究的依托工程改扩建方案选型结果,其中部分工程已完成施工,部分尚在研究阶段。

隧道改扩建的常见形式为原位扩建、并行扩建、组合扩建、改建隧道 4 种。其中应用最多的原位扩建还可细分为单侧扩建、双侧扩建、周围扩建等。

表 1 隧道改扩建案例

工程名称	前后形式	改扩建方案
旦架哨隧道	新建 3 车道	并行扩建
大帽山隧道	2 车道→4 车道	组合扩建
楼山隧道	双向 4 车道→双向 8 车道	原位扩建四周扩建
渝州隧道	双洞 4 车道→双洞 8 车道	原位扩建双侧扩建
三房隧道		原位扩建
大茅隧道		原位扩建单侧扩建
汤坑隧道	双洞 4 车道→三洞 8 车道	并行扩建
廷心隧道		原位扩建单侧扩建
关村坝隧道	2 车道→5 车道	原位扩建单侧扩建
广西荆垭隧道	单洞→连拱	原位扩建两侧扩建
北茹隧道	双洞 4 车道→三洞 8 车道	组合扩建
重庆渝中区鹅岭隧道	2 车道→3 车道	原位扩建单侧扩建
金鸡山隧道	双向 4 车道→双向 8 车道	原位扩建单侧扩建
福州马尾隧道	双向 4 车道→双向 8 车道	原位扩建单侧扩建
福州鼓山隧道	双向 4 车道→双向 8 车道	原位扩建单侧扩建
泉州新琼隧道	双连拱 4 车道→双连拱 8 车道	原位扩建单侧扩建
阳朔荆垭隧道	单洞 2 车道→双连拱 4 车道	原位扩建双侧扩建
舟山海中洲隧道	2 车道→4 车道	原位扩建双侧扩建
福山后伺隧道	双洞 4 车道→三洞 9 车道	组合扩建
重庆宋家沟 1 号隧道	双洞 4 车道→四洞 8 车道	组合扩建
韩家岭隧道	单洞 4 车道→双洞 8 车道	并行扩建
泉厦高速大坪山隧道	双洞 4 车道→四洞 8 车道	并行扩建
九家湾隧道	双洞 4 车道→三洞 8 车道	并行扩建
重庆新中梁山隧道	双洞 4 车道→四洞 8 车道	并行扩建
玉佛山隧道	双洞 2 车道→双洞 4 车道	原位扩建单侧扩建
丽水塔下隧道	单洞 2 车道→单洞 3 车道	原位扩建单侧扩建
S218 利民隧道	单洞 2 车道→单洞 2 车道	原位扩建单侧扩建
四川盘龙山隧道	单洞单车道→单洞 2 车道	原位扩建双侧扩建
山西棚头沟隧道	单洞 2 车道→单洞 2 车道	原位扩建双侧扩建
临平邱山隧道	单洞 2 车道→双洞连拱 4 车道	原位扩建双侧扩建
福山当风凹隧道	单洞 2 车道→单洞 2 车道	原位扩建双侧扩建
吕梁董家沟隧道	双洞 2 车道→双洞 4 车道	原位扩建周围扩建
北京东长裕隧道	单洞单车道→单洞 2 车道	原位扩建周围扩建

表1(续)		
工程名称	前后形式	改扩建方案
浙金山后胡隧道	单洞单车道→单洞2车道	原位扩建周围扩建
淄博黑裕隧道	单洞单车道→单洞2车道	原位扩建周围扩建
高山隧道	双向4车道→双向8车道	组合扩建
金字山隧道	双向4车道→双向8车道	原位扩建单侧扩建
宜昌市夷陵区木鱼槽隧道		原位扩建双侧扩建
大罗山隧道	双向4车道→双向8车道	组合扩建
平涉线井陘隧道		原位扩建, 偏移中线后的单侧扩建
新岭隧道	双向4车道→双向8车道	并行扩建
南岭隧道		原位扩建双侧扩建
六台山隧道		原位扩建单侧扩建
下岷芝隧道		原位扩建周围扩建
樊村1号隧道		并行扩建
芜合高速公路试刀山隧道		原位扩建单侧扩建
松花岭隧道		原位扩建单侧扩建
G76高速漳州至龙岩段HC隧道	双洞2车道→双洞4车道	原位扩建单侧扩建

2 技术发展现状

2.1 原位扩建

隧道原位扩建,是一种在既有隧道内实施的改造工程。工程通过破除原有围岩来增大隧道断面,最终构筑出满足新功能需求的新隧道^[9]。如图1所示,原位扩建包括单侧扩建、双侧扩建和四周扩建。2003年重庆渝中区鹅岭隧道将单洞2车道扩建为单洞3车道,此外,福州金鸡山隧道^[10]、重庆渝州隧道^[11]、福州马尾隧道^[12]、福州鼓山隧道^[13]、泉州新琼隧道^[14]采用的都是单侧扩建。2007年舟山沈家门海中洲隧道采用双侧扩建,将2车道扩建为4车道^[15];2013年桂林阳朔荆垵隧道采用双侧扩建,由2车道扩建为4车道^[16]。2019年温岭楼山隧道采用周围扩建,由4车道扩建为8车道^[17]。

在对隧道进行原位扩建前,必须先行移除现有隧道的衬砌与支护体系。在此条件下,随着隧道向外侧扩展掘进,围岩将承受二次应力重分布,其力学响应将变得更为复杂。因此,在正式开挖之前,必须开展全面的稳定性评估,并完成详尽的力学计算分析^[18]。鉴于部分开挖断面位于既有隧道范围内,其土石方开挖及爆破作业量相对有限,同时避免了线路走向的二次设计,使得该方法在施工实践中显示出显著优势并被广泛采纳。

2.2 并行扩建

隧道并行扩建,是指新建隧道与既有隧道采用并行方式来满足目标通行能力的要求,在既有隧道不宜改建、扩建的情况下以及高等级公路隧道改扩

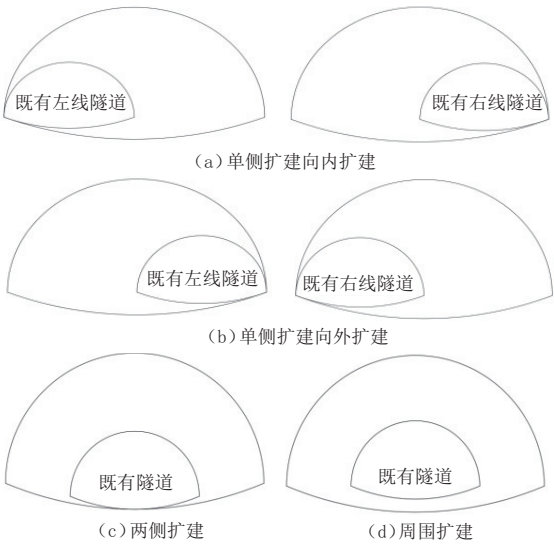


图1 原位扩建不同型式示意图

建中常有应用(见图2)。2003年沈大高速韩家岭隧道^[19]、2010年泉夏高速大坪山隧道^[20]、2014年成渝高速新中梁山隧道^[21]、2017年九家湾隧道^[22]都是采用并行扩建的方案由4车道扩建为8车道的。

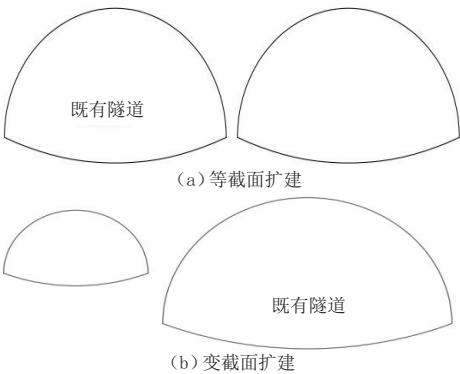


图2 并行扩建不同型式示意图

其显著优势是可避免改建中的中断交通问题,且可利用既有隧道已获得的地质情况资料,做到安全有序施工。该方案对现有道路布局的调整幅度不大,对施工场地的空间需求较为有限,能够在维持通车的状态下同步推进工程,且能较好地保持道路线形的顺畅。在施工方法上,该方案与新建隧道工程基本一致,仅需要在施工过程中关注对已有隧道结构的影响,因此对施工单位的技术能力要求不高。然而,由于新建隧道容易与既有隧道构成小间距并行的隧道结构,此类布置方式受地形条件制约较大,导致该方案在某些区域并不适用^[18]。

2.3 组合扩建

组合式扩建形式融合了前述两种扩建方式,具体表现为在既有的一条隧道侧新建一条单洞隧道,而对另一条隧道则实施原位扩建(见图3)。2010年福建大帽山隧道采用组合扩建,由双洞4车道改为三洞8车道^[6];2018年重庆宋家沟一号隧道由双洞4车道扩建为四洞8车道^[23];福建后伺隧道由双洞4车道扩建为三洞9车道^[6]。

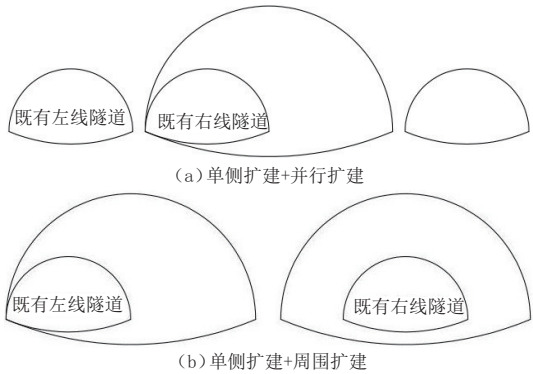


图3 组合扩建不同型式示意图

组合式扩建方案整合了前述两种隧道扩建方式的优势,一方面规避了因双洞开挖导致的邻近隧道间距过小问题,另一方面也显著缓解了在既有双隧道原位实施扩建时的工程难度与安全隐患。这种方案通过保留一条既有隧道维持正常交通,有效分离了车流与施工作业,从而大幅降低了通行车辆对扩建工程的干扰^[18]。

3 方案选型指标

目前,隧道改扩建方案的研究普遍采用某一指标作为标准来定性分析方案的优劣。图4是不同改扩建方案的控制评价指标,可以看出,指标类型多且无定量规定,由于不同改扩建方案在不同指标上的表现各有优缺点,因此不能一概而论。例如,李波

等^[24]从既有隧道增值保值、造价合理等方面分析改扩建方案,推荐高速公路改扩建全部新建隧道,而部分学者分析认为,原位扩建更能充分利用既有隧道,且不需要重新规划路线。

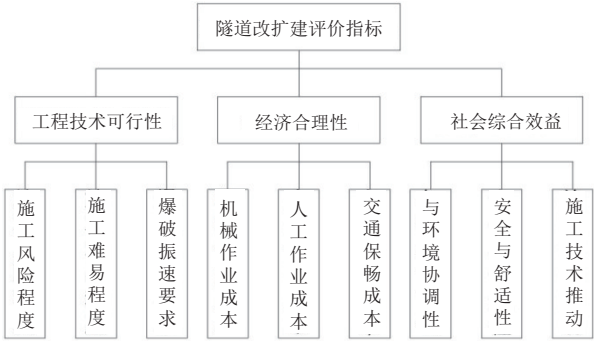


图4 隧道改扩建评价指标

通过整理文献资料,总结下列当前确定改扩建方案应用最多的几种指标。

3.1 围岩稳定

在隧道改扩建工程中,由于施工会破坏原有结构的受力平衡,导致围岩受到二次扰动,进而加剧其损伤与变形,具体表现如图5所示。这种变化无疑提升了工程实施的复杂性。目前,国内外在这一领域的研究与实践仍处于起步阶段,加之围岩在施工过程中力学行为复杂多变,相关理论支撑与工程经验尚显不足^[25]。宋战平等^[26]在查阅相关文献资料及对案例数据进行统计解析的基础上,系统梳理了改扩建公路隧道在围岩压力计算及其力学响应特性方面的研究进展与现存问题。

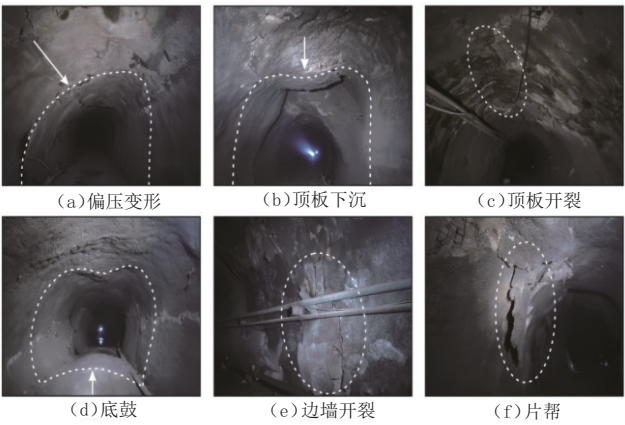


图5 围岩变形与损伤现场照片

为了清楚不同改扩建方案对既有隧道围岩扰动的程度,朱冠宇^[27]分析了增建隧道对既有隧道的围岩变形特性和应力的影响,提出了相应的变形控制措施。彭念^[28]以福建某隧道为依托工程探究原位扩建隧道施工围岩变形特征及力学机理,进而为原位扩建隧道的设计、施工、监控提供理论依据。

早期,选择改扩建方案和实现扩建方案寻优的方法有基于直觉模糊数的海明距离和结合TOPSIS方法增加专家权向量修正的数学模型两种。后来,研究人员结合数学理论、监控量测数据、数值模拟等针对围岩力学响应提出了不同的计算方法,这些方法能帮助项目更好地选择改扩建方案。郝哲等^[29]基于差分法、正交设计和人工神经网络建立了新的隧道围岩物理力学参数反分析方法,并对韩家岭隧道围岩物理力学参数进行了神经网络反分析,分析结果满足精度要求。柏谦等^[30]基于太沙基理论提出了改进的扩建隧道围岩压力计算方法。围岩力学响应的研究已经能更好地帮助改扩建方案的选型。

3.2 施工技术与安全控制

既要满足设计年限内交通量需求和道路交通运输功能,同时又要做到充分利用原有工程,节约用地,这对隧道改扩建施工提出了极高的要求。由于施工作业复杂,其中包括洞口工程挖掘作业、洞身开挖钻孔作业、洞身衬砌超前支护等,不同的改扩建方案选型即使都满足要求,但对施工的影响是不同的。例如,原位扩挖隧道可分为扩挖成连拱隧道形式和扩挖成大跨径单隧道形式两种方案,相较于增建复线隧道而言,对围岩的二次扰动程度更大,施工环境更加复杂,但原位扩挖隧道占地面积更少,工程量及工期也相对减少,并且可以利用既有隧道内部已有的线路设施,节约一定的经济费用。

安全控制是工程作业的重中之重,相较于新建隧道,既有隧道在改扩建过程中面临更高的施工安全挑战。这主要是由于既有隧道在长期运营后出现了多种病害,导致其整体应力分布产生变化,从而显著提升了施工风险,因此施工风险评估在隧道工程中必不可少。李健等^[31]基于既有隧道改扩建工程,采用数值模拟与理论分析等手段,对隧道改扩建工程施工结构安全性进行研究;王春和等^[32]在总结已有资料的基础上建立有效的公路隧道改扩建施工风险指标体系,评价包含了工程的特殊因素,使以后的工程风险评估实践变得简单易行。表2为施工风险普查清单。

3.3 环境保护与工程造价

在国家推行“双碳”目标以及公众环保观念不断增强的背景下,工程建设可能引发的环境问题及其社会影响日益成为各方关注的焦点。为保持改扩建项目的可持续性,落实环保举措已显得尤为关键。项目应严格遵循“减少破坏、强化保护;减轻干扰、加

表2 施工风险普查清单		
	作业内容	风险源
洞口工程	挖掘作业	
	超前管棚	
	危石清除	
	钻孔作业	
洞身开挖	既有隧道加固	物体打击、车辆伤害、塌方、高处坠落、触电、涌水突泥、爆炸、机械伤害、洞口失稳、路基边坡失稳
	新旧隧道交叉开挖	
	新旧隧道交叉支护	
	超前支护	
洞身衬砌	铺设防水层	
	二次衬砌混凝土浇筑	
	仰拱混凝土填充	
其他	器材运输、储存	

强防护;控制污染、着力防治”的方针,全面执行《环境管理体系要求及使用指南》(GB/T 24001—2016)^[33]中的相关规定。王重阳^[34]从改扩建总体施工思路,环保原则、方针,管理体系及环保措施等方面,对G5011合肥至芜湖高速公路改扩建项目中重要节点工程——高山隧道工程进行了阐述,以期探索出以智能型、资源节约型、环境友好型为主要特征的隧道设计、建造及管理创新技术。李洪永^[35]重点围绕隧道内部装修改进、废弃物管理、大气污染防治、排水系统监督及噪声治理等多项技术方法展开了系统分析,明确了施工期间需要特别关注的要点,并给出了针对性的解决方案与操作指导。公路隧道改扩建工程的环保措施通过合理规划、科学施工和有效管理,促进了生态与经济的均衡发展,并在公路隧道改扩建过程中有效保护环境资源,最终实现了该工程的可持续目标。

随着资源价格的波动和市场竞争的激烈,成本控制成为关键因素之一,提高资金使用效率,减少无效和非必要的开支,在项目实施过程中能够更为科学地进行风险评估和决策^[36],因此,造价成为决定改扩建方案的重要因素。国内现有高速公路投融资模式主要是政府投资或社会资本特许经营。社会资本特许经营权一般在30年,在特许经营到期前对既有高速公路进行改扩建。隧道主体结构设计使用年限为100年,改扩建时隧道设计使用年限还有70年,因此改扩建方案应先充分考虑既有隧道增值保值、综合利用方案。李波等^[24]考虑既有隧道的利用和国有资产增值保值,对原位扩建、并行扩建、组合扩建方案进行比选,得出不同形式方案在道路线形、国有资产增值保值及施工保通、造价等方面的优缺点。对于长、特长隧道采用原位拆除扩建,存在国有资产损

失、运营费损失、工期偏长、造价高、交通组织难度大等不利因素,一般不推荐采用原位拆除扩建方案。

4 改扩建方案选择

通过对典型案例的梳理,原位扩建成为大部分改扩建项目的首选方案。表 3 所示:经过学者们的研究,在 49 个依托工程中,有 34 个改扩建项目选择了原位扩建。图 6 所示:70% 的原位扩建占比,证明原位扩建适用于大多数改扩建工程。

表 3 改扩建方案项目数量

改扩建方案	数量
原位扩建	34
并行扩建	9
组合扩建	6
总计	49

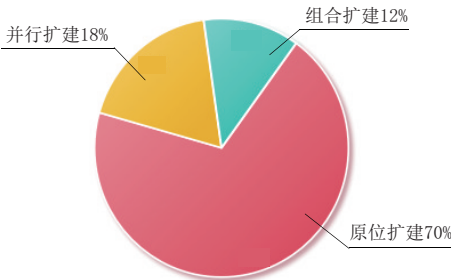


图 6 改扩建方案的占比构成

原位扩建的 3 种型式,单侧扩建在围岩位移、塑性变形、地下水、地表沉降、隧道周围地形破坏等方面的稳定性优于其他扩建型式。胡居义等^[37]依托大帽山隧道改扩建项目,对单侧扩建、双侧扩建、周围扩建 3 种方案建立模型分析稳定性,得出了采用单侧原位扩建的合理性。高干等^[5]利用 ANSYS 有限元分析软件,以重庆渝中区鹅岭隧道扩建工程为依托,针对 4 种扩建型式分别计算分析了隧道结构的稳定性和围岩的受力、变形,采用数值模拟方法,分别对单侧、双侧、右侧小净距、左侧小净距进行了扩建。在全面对比研究的基础上,结合隧道所在区域的工程地质、交通等具体情况,将单侧拓展确定为隧道的最佳拓展型式。朱根桥等^[11]、孙亮亮^[38]、杨利福等^[39]也进行了相关方面研究,结果一致。综上,对于大部分隧道改扩建项目,原位扩建优于并行扩建与组合扩建,其中单侧扩建稳定性优于双侧扩建和周围扩建。图 7 统计了采用原位扩建的工程中 3 种不同型式数量,明显单侧扩建得到了大多数研究人员的认可。

另外,要充分考虑改扩建方案与隧道周围环境的联系及影响,不同改扩建隧道的场景影响并决定

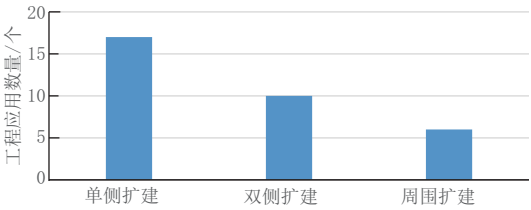


图 7 三种扩建形式的工程应用数量统计

着改扩建方案的选择。对于道路等级低、线形标准差、病害严重或事故率高的隧道,以改善线形、提高行车安全性为目的,应综合比较,优先采用重建新线方案。在既有隧道基础上,为提升道路等级、增强隧道稳定性及行车安全性,应对隧道结构、机电系统等设施进行补强、升级,可采用改建方案。对以下几种情况给出推荐方案。

- (1)既有双洞 4 车道隧道扩建成 6 车道隧道时,可采用增加单洞 3 车道方案或原位扩建方案。
- (2)既有双洞 4 车道分离式隧道扩建为 8 车道隧道时,可采用增建双洞 4 车道隧道或单洞 4 车道隧道方案或原位扩建方案。
- (3)既有双洞 4 车道连拱隧道扩建为双洞 6 车道隧道时,可采用增建一个单洞 3 车道隧道方案。
- (4)单洞双向行驶 2 车道隧道扩建为双洞 4 车道隧道时,宜利用既有隧道改为单洞 2 车道同向通行,增建一个 2 车道隧道。

5 结 语

5.1 存在的不足

- (1)由于不同隧道的围岩条件、周围环境、改扩建要求等差异巨大,使得已有案例方案选型的参考性大大降低,尚未找到确切的强关联点加以利用。
- (2)目前针对既有公路隧道的改扩建研究都仅局限于依托工程,少有的具有普适性的观点又不能综合考虑影响改扩建方案选型的因素。
- (3)缺乏相关的技术标准,既有公路隧道改扩建施工尚且可参考公路隧道修建标准,方案选型却没有参考依据。

(4)各算法仅局限于围岩、造价等某一领域,尚未有能统筹隧道改扩建相关因素的理论得到普遍认可。

5.2 展望

- (1)既有公路隧道改扩建技术标准。目前已有部分地方性公路隧道改扩建标准试应用,未来隧道改扩建将会有更加全面科学的技术标准依托。
- (2)技术革新。近年来,在技术层面取得显著进

步的同时,各地隧道扩建与改造工程项目也正在广泛启动。结合充分的工程实践及理论研究,未来几十年隧道改扩建技术将爆发式发展。

(3)隧道改扩建绿色施工、可持续发展。在国家致力于实现“双碳”愿景,且民众环保意识显著提升的当下,过往施工环节所存在的环境隐患及其后果会得到根本性治理,实现经济发展与环境保护的双赢局面。

参考文献:

- [1] 洪开荣,冯欢欢.中国公路隧道近10年的发展趋势与思考[J].中国公路学报,2020,33(12):62-76.
- [2] 交通运输部.2023年交通运输行业发展统计公报[N].中国交通报,2024-06-18(2).
- [3] 刘天琦,冯现大,何家智.公路隧道改扩建方案比选及施工工法数值模拟[J].济南大学学报(自然科学版),2025,39(1):56-62.
- [4] 张在晨,林从谋,李家盛,等.我国公路隧道改扩建技术发展现状及研究展望[J].隧道建设(中英文),2022,42(4):570-585.
- [5] 高干,刘元雪,周结中,等.地下空间扩建型式研究[J].现代隧道技术,2010,47(6):1-9.
- [6] 钟元庆.采用三台阶工法开挖的原位扩建隧道现场监测及分析[J].现代隧道技术,2019,56(5):170-179.
- [7] 刘泉声,孙兴山,苏兴矩,等.后祠改(扩)建隧道施工方案优化分析[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(4):544-551.
- [8] 李元福.关村坝隧道改扩建施工技术[J].铁道建筑技术,1996(4):22-26.
- [9] 黄强,李之达,吴延贞.浅埋隧道施工中围岩应力分析[J].湘潭大学自然科学学报,2010,32(1):25-29.
- [10] 杨利福,陈七林,杨艳,等.金鸡山隧道拓宽方案离散元分析[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3):339-344.
- [11] 朱根桥,林志,朱育才,等.隧道原位扩建对邻近建筑物影响评估的研究[J].岩土力学,2012,33(增刊2):251-256.
- [12] 张俊儒,史博然,汪家雷,等.塌方段原位扩建四车道公路隧道“回填-台阶法”施工力学及安全分析[J].中国公路学报,2021,34(6):109-124.
- [13] 黄林祥.双向四车道隧道原位扩建施工技术研究[J].现代隧道技术,2019,56(增刊2):591-597.
- [14] 高登,林孔斌.扩建连拱隧道初期支护及中墙受力研究[J].公路交通技术,2018,34(增刊1):12-17.
- [15] 来弘鹏,徐学深,常瑞成,等.公路隧道扩建力学特性研究[J].中国公路学报,2014,27(1):84-93.
- [16] 陈新栋.既有隧道改扩建为双连拱隧道的受力与变形规律研究[D].西安:长安大学,2016.
- [17] 陈枫,潘晓君,龚设,等.超大跨小净距隧道原位扩建施工技术探究[J].西部探矿工程,2020,32(7):187-190.
- [18] 叶连超,何江陵,李科,等.基于三角模糊数与GWO-ELM模型的公路隧道改扩建方案优选研究[J].现代隧道技术,2023,60(3):55-64.
- [19] 陈耕野,刘斌,万明富,等.韩家岭大跨度公路隧道应力监测分析[J].岩石力学与工程学报,2005(增刊2):5509-5515.
- [20] 林友辉.小净距交叠隧道交叠段围岩稳定性研究[D].厦门:华侨大学,2012.
- [21] 饶永进.中梁山新建隧道对接既有隧道渗流场影响研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
- [22] 陈进,高浩然,周中书,等.基于碳排放评价的节理化岩体大跨度隧道施工方法比选[J].贵州大学学报(自然科学版),2020,37(1):86-91.
- [23] 赖勇,张帅.流固耦合作用下隧道原位扩建扩挖方式研究[J].地下空间与工程学报,2019,15(增刊1):311-320.
- [24] 李波,李强,陈学刚.G85成渝高速缙云山隧道改扩建型式研究[J].交通科技与管理,2023,4(3):19-21.
- [25] 孙兴山,董会飞,苏兴矩,等.漳龙高速公路扩建隧道围岩力学特性三维有限元分析[J].隧道建设,2016,36(1):52-57.
- [26] 宋战平,张泽坤,程昀,等.既有公路隧道改扩建技术研究动态及展望[J].地下空间与工程学报,2023,19(4):1216-1234.
- [27] 朱冠宇.超大跨隧道近接增建作用下既有隧道变形特性与控制措施[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [28] 彭念.原位扩建隧道围岩力学响应机理研究[D].重庆:重庆大学,2010.
- [29] 郝哲,万明富,刘斌,等.韩家岭隧道围岩物理力学参数反分析[J].东北大学学报,2005(3):300-303.
- [30] 柏谦,赵文,王鑫,等.既有改扩建浅埋岩石隧道的围岩压力计算方法研究[J].中南大学学报(自然科学版),2021,52(5):1562-1569.
- [31] 李健,李昕,李华,等.既有隧道改扩建工程结构安全性研究[C]//中国公路学会隧道工程分会,重庆市交通委员会.2013年全国公路隧道学术会议论文集.武汉:中交第二公路勘察设计研究院有限公司.
- [32] 王春河,朱福强,罗兴,等.隧道改扩建工程施工风险评估研究[J].现代隧道技术,2021,58(2):63-70.
- [33] GB/T 24001—2016 环境管理体系要求及使用指南[S].
- [34] 王重阳.G5011莞合高速公路高山隧道改扩建环保措施探析[J].安徽建筑,2022,29(9):118-119.
- [35] 李洪永.公路隧道改扩建环保措施分析及策略[J].交通节能环保,2024,20(1):202-205.
- [36] 付玲琳.住宅建筑工程造价控制研究[J].居舍,2024(22):123-126.
- [37] 胡居义,陈礼彪,黄伦海.2车道隧道扩建成4车道隧道扩建形式研究[J].公路交通技术,2010(5):93-97.
- [38] 孙亮亮.公路隧道扩建施工力学行为试验研究与理论分析[D].西安:长安大学,2012.
- [39] 杨利福,陈七林,杨艳,等.金鸡山隧道拓宽方案离散元分析[J].武汉大学学报(工学版),2013,46(3):339-344.