

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.030

隧道掌子面超前锚杆平面布设方案比选研究

杨黎宏¹,陈党辉¹,郑超²

(1.福建路桥建设有限公司,福建福州 350002;2.福州大学 土木工程学院,福建福州 350116)

摘要:为解决隧道掌子面超前锚杆平面布设方案的选择问题,基于国内外工程实例,将掌子面超前锚杆平面布设方案的构成要素总结为形状以及线形,并在此基础上归纳出以矩形和圆形为基础形状的4种不同平面布设方案。以渭武高速公路木寨岭隧道为工程依托,通过数值模拟研究在不同锚杆布设密度、锚杆布设长度、围岩等级以及隧道埋深条件下,掌子面超前锚杆采用不同平面布设方案支护效果间的差异。研究结果表明:隧道掌子面超前锚杆采用不同的平面布设方案会对其支护作用效果产生一定影响,通常采用圆形的平面布设方案产生的支护作用效果可较矩形平面布设方案提高2%~6%。

关键词:隧道工程;掌子面超前锚杆;平面布设方案;数值模拟

中图分类号:U455

文献标志码:A

0 引言

在软弱围岩隧道工程中,由新奥法原理派生出的施工方法在围岩变形控制、施工安全以及施工进度等方面均表现出了明显的局限性^[1-3]。对此,有学者^[4]在总结新奥法原理以及围岩压力拱理论的基础上提出了新意法,该工法强调通过各种超前预加固措施对掌子面及其前方土体的强度以及变形特性进行人工干预,从而达到维持隧道短期稳定,实现机械化全断面开挖的目的。该工法突破了传统新奥法的局限性,并成功地解决了许多软弱围岩隧道的施工难题^[5-7]。目前,该工法已广泛地应用于欧洲国家的隧道工程建设并纳入意大利的隧道设计和施工规范,而中国对于新意法的相关研究还处于萌芽阶段。

叶飞等^[8]根据新意法对于隧道围岩拱效应的分析,以太沙基理论公式为基础,推导出可适用于确定新意法超前核心土加固参数的理论计算公式;李斌等^[9]基于新意法基本理念,采用理论分析与数值模拟相结合的方法提出了掌子面超前锚杆加固密度、加固范围、加固长度的具体确定方法;崔柔柔等^[10]采用数值模拟的方式,对软岩条件下掌子面超前锚杆设计参数变化对于支护效果的影响进行分析,认为掌

子面锚杆的搭接长度是控制掌子面稳定的关键因素;王志杰等^[11]针对昔格达组地层大断面隧道,采用理论分析与数值模拟相结合的手段,提出了相应的掌子面超前锚杆加固参数的确定方法;赵岩等^[12]以野猪山隧道为工程依托,通过数值模拟以及现场实测对新意法开挖进行系统性评价,结果表明:掌子面锚杆等超前预加固措施可以显著提高围岩结构性能,足以为全断面开挖创造条件。

隧道掌子面超前锚杆作为新意法主要的超前预加固工法之一,目前中国对于其加固参数的研究多集中在加固长度、加固密度以及搭接长度上,而对于其平面布设方案的选择鲜有研究。针对该问题,本文以渭武高速公路木寨岭隧道为工程依托,在对比分析国内外隧道掌子面超前锚杆应用工程实例的基础上,将确定掌子面超前锚杆平面布设方案的要素总结为形状以及线形,并归纳出以矩形和圆形为基础形状的4种不同平面布设方案,进而通过数值模拟对平面布设方案的选择展开研究。研究结果可为隧道掌子面超前锚杆平面布设方案的选择提供参考。

1 工程概况

木寨岭隧道是国家兰海高速(G75)重要组成路

收稿日期:2023-07-10(修改稿)

作者简介:杨黎宏,男,大学本科,高级工程师.E-mail:1113074632@qq.com

段渭武高速公路的控制性工程,其在施工期遭遇了与其毗邻的兰渝铁路木寨岭隧道相类似的高应力软岩大变形问题。现场施工监测数据反映,隧道开挖后围岩变形剧烈,普遍在 500 mm 以上,严重时可达 3 000 mm。现场围岩大变形造成掌子面失稳、初支结构侵限破坏等一系列施工难题,施工拆换拱率达 30% 以上,施工成本难以控制。

掌子面稳定是隧道安全施工的基本前提。然而破碎的岩体结构与高应力的相互叠加,使得木寨岭隧道的掌子面稳定性难以保证,时常表现为掌子面围岩的局部松动掉块。在部分地质条件极差区域,隧道掌子面在开挖后随即呈流塑性状态,引发掌子面围岩大变形,进一步造成掌子面附近初支结构受力的急剧增加,导致初支结构发生开裂乃至崩塌。由于地质条件极差,常规采用的预留核心土法以及喷射混凝土联合支护掌子面的措施已经很难发挥作用,隧道掌子面稳定性难以保证。

近年来,隧道掌子面超前锚杆已应用在不同工程实例中,并且获得了显著成效。相较于常规掌子面支护措施,掌子面超前锚杆不仅可以提供强有力的支护,而且应用时并不占用施工空间,方便机械化施工,可以显著提高开挖以及初期支护施工效率,显然这对于高应力软岩变形的控制更加有利。掌子面超前锚杆通常采用玻璃纤维锚杆,玻璃纤维锚杆相较于传统的锚杆具有质量轻、抗拉强度高、抗剪强度低、耐久性好的特点^[13],使得其能在提供足够掌子面支护抗力的同时易于随掌子面推进同步挖除,可以很好地满足隧道掌子面的支护与开挖需求。

鉴于掌子面超前锚杆在掌子面变形控制方面体现出的优越性,针对木寨岭高应力软岩大变形隧道的掌子面稳定性问题,拟制定掌子面超前玻璃钢纤维锚杆支护方案。然而,目前对于掌子面超前锚杆平面布置方案的研究较少,相应的平面布置方案选择问题并无相关依据可循。通过合理制定掌子面超前锚杆的平面布置方案,有望将锚杆支护效果最大化,充分发挥锚杆支护作用。

2 掌子面超前锚杆平面布置方案总结

通过对比分析国内外隧道掌子面超前锚杆的工程应用实例^[5,14-20],可将确定掌子面超前锚杆平面布

设方案的基本要素总结为形状以及线形。在此基础上,按照形状和线形的不同,将掌子面超前锚杆平面布置方案归纳为如图 1 所示的矩形梅花布置、矩形直线布置、圆形梅花布置以及圆形直线布置 4 种。例如,兰渝铁路桃树坪隧道作为采用新意法施工的隧道,采用的掌子面超前锚杆平面布置方案如图 1(a);宁波野猪山隧道采用的掌子面超前锚杆平面布置方案如图 1(b);意大利的 Vasto 隧道、瑞士的圣哥达基线隧道采用的掌子面超前锚杆平面布置方案则如图 1(c)所示。

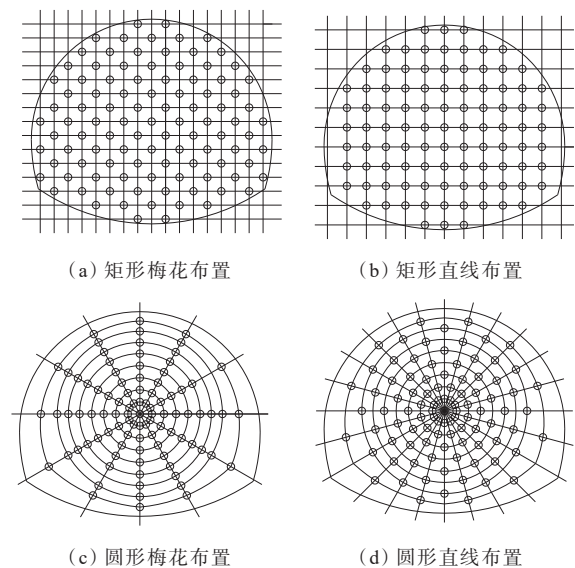


图 1 常用掌子面超前锚杆平面布置方案

3 数值模型及计算参数

为分析不同隧道掌子面超前锚杆平面布置方案对于支护效果的影响,采用 FLAC^{3D} 进行数值建模分析。以木寨岭隧道的常规开挖断面为研究对象建立基本模型。木寨岭隧道常规开挖断面最大开挖跨度为 13 m,最大开挖高度为 11 m,开挖总面积约 115 m²,研究段埋深约 300 m。建模时为简化计算,取上覆土层厚度为 40 m,其余埋深影响通过在模型顶面施加土体自重进行等效考虑。模型边界尺寸依照圣维南原理确定,左右边界与隧道中心线的距离取 4D(D 为断面最大开挖跨度),底部边与隧道底部的距离取 3D,最终建立的模型尺寸为 116 m×50 m×90 m。隧道模型网格划分如图 2 所示。隧道模型四周以及底面采用位移边界条件进行约束,顶面

为无约束的自由面。不同掌子面超前锚杆平面布设方案在模型中的实现如图3所示。

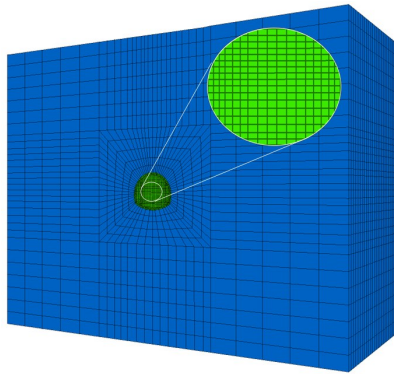


图2 隧道模型

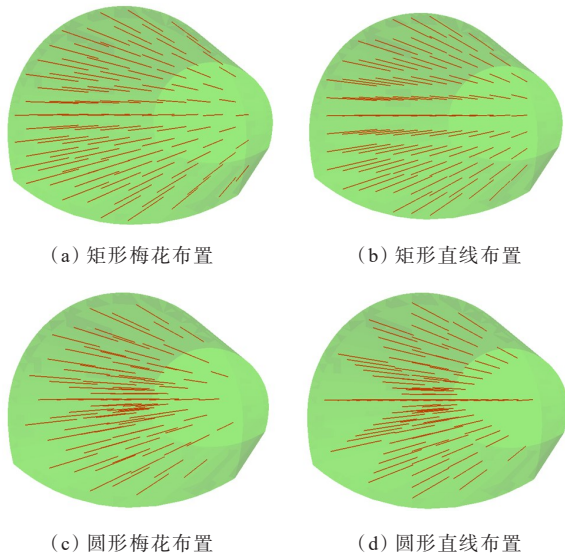


图3 掌子面超前锚杆布设模型

数值模型中围岩采用实体单元进行模拟,混凝土喷层采用Shell单元进行模拟,钢筋网、钢拱架的作用采用等效刚度折算的方式通过提高Shell单元的弹性模量予以考虑。掌子面超前锚杆为玻璃纤维纤维锚杆,采用水泥砂浆全长锚固于围岩中,应用时主要考虑其轴向上的抗拉作用,因此采用Cable单元进行模拟。Cable单元包含锚杆构件以及水泥砂浆,其结构示意图如图4所示。

模型中涉及的结构单元具体参数见表1、2。模型采用全断面开挖,每循环开挖进尺为2 m,数值计算过程中假定围岩服从Mohr-Coulomb屈服准则。为充分消除边界效应对计算结果的影响,当模型逐步开挖、计算至模型中部 $y=26$ m断面时,再进行掌子面超前锚杆布设。

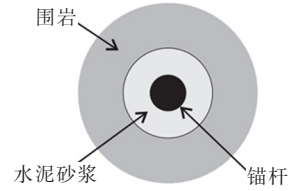


图4 Cable单元结构示意图

表1 初支参数

重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	厚度/cm
25	50	0.2	28

表2 掌子面超前锚杆参数

弹性模量/GPa	锚杆直径/mm	横截面积/ mm^2	单位长度水泥浆黏结力/($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	单位长度水泥浆刚度/($\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$)	抗拉强度/kN
45	25	490.625	2×10^5	1.75×10^7	3×10^5

4 平面布设方案选择影响因素分析

掌子面超前锚杆的支护效果主要受到其布设参数以及围岩稳定性的影响。因此通过单一改变锚杆布设数量、锚杆布设长度、围岩等级以及隧道埋深,探究在锚杆布设数量相同的条件下,采用不同平面布设方案对锚杆支护效果的影响。设定基本计算工况见表3,相应围岩参数见表4。为量化评价掌子面超前锚杆的支护效果,定义掌子面挤出变形约束量 λ :

$$\lambda = \frac{\lambda_0 - \lambda_s}{\lambda_0} \quad (1)$$

式中: λ_0 、 λ_s 分别为无锚杆支护、有锚杆支护条件下掌子面挤出变形最大值(mm)。

表3 基本计算工况

围岩等级	埋深/m	锚杆长度/m	锚杆数量/根	锚杆布设密度/(根 $\cdot\text{m}^{-2}$)
V级	300	12	101	0.88

表4 围岩参数

围岩等级	重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/($^\circ$)
V级	18	1	0.4	0.1	25

4.1 锚杆布设密度影响

锚杆布设密度是掌子面超前锚杆布设方案的关键参数之一。通过单一改变基本工况中锚杆布设密

度,研究4种不同掌子面超前锚杆平面布设方案支护效果间的差异及其随锚杆布设密度的变化规律。共设置锚杆布设密度为 $0.31\text{根}/\text{m}^2$ 、 $0.46\text{根}/\text{m}^2$ 、 $0.88\text{根}/\text{m}^2$ 3种工况。根据数值计算结果得到掌子面挤出变形约束量随锚杆布设密度变化曲线见图5。

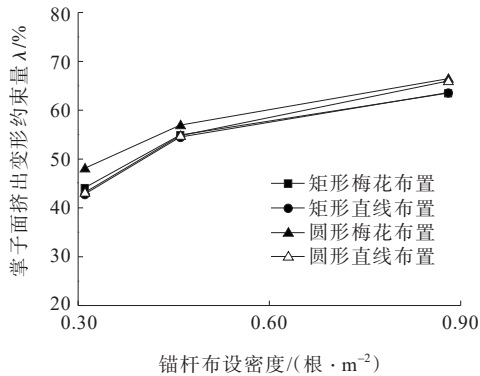


图5 掌子面挤出变形约束量随锚杆布设密度变化

由图5可知:①掌子面超前锚杆采用不同线形的矩形平面布设方案时,产生的支护作用效果基本相同,均低于采用圆形梅花平面布设方案产生的支护作用效果,且该规律不随锚杆布设密度的变化而变化。如锚杆布设密度为 $0.3\text{根}/\text{m}^2$ 时,采用圆形梅花布设方式时对应的掌子面挤出变形约束量要比矩形平面布设方案高出5%;②采用圆形直线平面布设方案产生的支护作用效果在锚杆密度较小时,与采用矩形平面布设方案相近,但当锚杆布设密度增大到一定程度时,圆形直线平面布设方案产生的支护作用效果将与圆形梅花平面布设方案相近;③随着锚杆布设密度的变化,圆形梅花布置始终是最佳的平面布设方案。改变布设线形对矩形布设方式的支护作用效果基本没有影响;对圆形布设方式的支护作用效果影响主要体现是:锚杆布设数量较少时采用梅花形布置可显著提高支护效果(约5%),提高程度随着锚杆布设数量的增多逐渐减小。

4.2 锚杆布设长度影响

掌子面超前锚杆布设长度也是确定掌子面超前锚杆支护方案的关键参数之一。通过单一改变基本工况中锚杆布设长度,研究4种掌子面超前锚杆平面布设方案支护效果间的差异及其随锚杆布设长度的变化规律。共设置5种工况,锚杆长度分别为6 m、9 m、12 m、15 m、18 m。根据数值计算结果得到掌子面挤出变形约束量随锚杆布设长度变化曲线见图6。

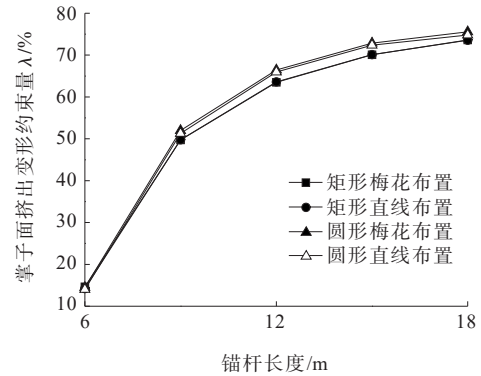


图6 掌子面挤出变形约束量随锚杆长度的变化

由图6可知:①当掌子面超前锚杆长度大于9 m时,采用相同形状不同线形的平面布设方案产生的支护作用效果基本相同,采用圆形平面布设方案要优于矩形平面布设方案,支护效果间的差异为2%~3%,基本不随锚杆布设长度的变化而变化。当掌子面超前锚杆布设长度较短时,改变平面布设方案对支护效果基本不产生影响;②随着锚杆布设长度的变化,掌子面超前锚杆采用圆形平面布设方案始终可以最大限度地发挥支护作用,改变布设线形对矩形以及圆形平面布设方案的支护作用效果基本没有影响。

4.3 围岩等级影响

通过单一改变基本工况中的围岩等级,研究4种不同掌子面超前锚杆平面布设方案支护效果间的差异及其随围岩等级的变化规律。通常软弱围岩所包含的围岩等级范围为IV~VI级,因此在基本工况上再增加IV级、VI级围岩工况,共3种工况。围岩参数如表5所示。根据数值计算结果得到掌子面挤出变形约束量随围岩等级变化曲线如图7所示。

表5 围岩参数

围岩等级	重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	黏聚力/ MPa	内摩擦角/ (°)
IV级	22	5.0	0.32	0.5	35
VI级	16	0.5	0.45	0.05	18

由图7可知:①掌子面超前锚杆采用相同形状不同线形的平面布设方案产生的支护作用效果基本相同,采用圆形平面布设方案要优于矩形平面布设方案,该规律不随围岩等级的变化而变化;②采用圆形平面布设方案与矩形平面布设方案,产生的支护效果间的差异随着围岩等级的降低而缩小;③随着围岩等级的变化,掌子面超前锚杆采用圆形平面布

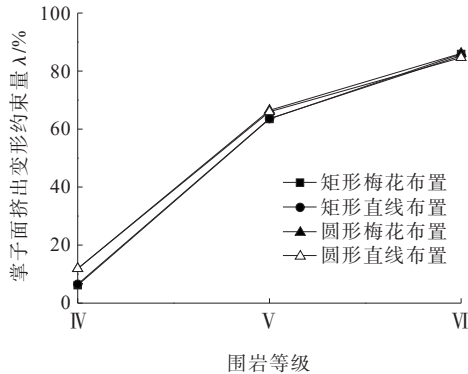


图7 掌子面挤出变形约束量随围岩等级的变化

设方案始终可以最大限度地发挥支护作用,改变布设线形对矩形以及圆形平面布设方案的支护作用效果基本没有影响。

4.4 隧道埋深影响

通过单一改变基本工况中的埋深,研究4种掌子面超前锚杆平面布设方案支护效果间的差异及其随隧道埋深的变化规律。共设置3种工况,埋深分别为100 m、300 m、500 m。根据数值计算结果得到掌子面挤出变形约束量随隧道埋深变化曲线如图8所示。

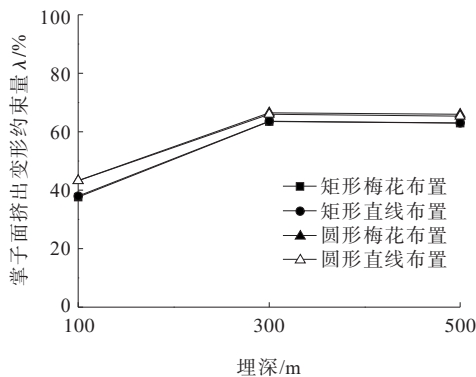


图8 掌子面挤出变形约束量随隧道埋深的变化

由图8可知:①掌子面超前锚杆采用相同形状不同线形的平面布设方案产生的支护作用效果基本相同,采用圆形平面布设方案要优于矩形平面布设方案,该规律不随隧道埋深的变化而变化;②采用圆形平面布设方案与矩形平面布设方案,产生的支护效果间的差异在埋深100 m时最大,约6%,当埋深增大至300 m之后,两平面布设方案支护作用效果间的差异较埋深100 m时有所减小,约3%;③随着埋深的变化,掌子面超前锚杆采用圆形平面布设方案始终可以最大限度地发挥支护作用效果,改变布设线形对矩形以及圆形平面布设方案的支护作用效果基本没有影响。

5 结论

(1) 隧道掌子面超前锚杆平面布设方案会对其应用支护效果产生影响,因此在设计掌子面超前锚杆布设方案时应考虑平面布设方案的影响。

(2) 通常情况下,隧道掌子面超前锚杆采用相同形状相同线形的平面布设方案产生的支护作用效果相近。只有当锚杆布设数量较少时,采用圆形梅花平面布设方案会明显优于圆形直线平面布设方案。

(3) 通常情况下,隧道掌子面超前锚杆采用圆形的布设方式能将支护效果最大化,相较于矩形的布设方式,其支护效果可高出2%~6%。

参考文献:

- [1] 唐勇三,林剑飞,叶飞,等.基于新意法原理的隧道全断面预加固效果研究[J].公路,2017,62(11):296-301.
- [2] 梅志荣,陈涛.高速铁路隧道全断面预加固技术的应用研究[J].隧道建设,2008,28(5):542-547.
- [3] 聂奥祥.软弱围岩隧道掌子面稳定性及预加固工法研究[D].北京:北京交通大学,2019.
- [4] 肖广智,魏祥龙.意大利岩土控制变形(ADECO-RS)工法简介[J].现代隧道技术,2007,44(3):11-15.
- [5] 张允海,蓝柳海,周晨.新意法在卵形大断面富水全风化凝灰岩隧道中的应用[J].公路,2017,62(7):310-316.
- [6] 翟进营,杨会军,王莉莉.“新意法”在国外隧道工程中的应用[J].隧道建设,2008,28(4):469-475.
- [7] 李小勇,贾晓刚.新意法在国内隧道工程中的应用研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S2):715-719.
- [8] 叶飞,樊康佳,宋京,等.基于不完全拱效应的隧道预处理机制与计算方法[J].岩石力学与工程学报,2017,36(6):1469-1478.
- [9] 李斌,漆泰岳,吴占瑞,等.隧道掌子面锚杆加固参数确定方法[J].铁道学报,2012,34(10):115-121.
- [10] 崔柔柔,杨其新,蒋雅君.软岩隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究[J].铁道标准设计,2015,59(11):79-83.
- [11] 王志杰,杨宝,高靖遥,等.昔格达组地层大断面隧道掌子面玻璃纤维锚杆加固参数研究[J].现代隧道技术,2019,56(2):92-97.
- [12] 赵岩,冯东阳,蔡永昌.新意法隧道核心土稳定性模拟分析与加固策略研究[J].地下空间与工程学报,2017,13(S1):257-262.
- [13] 蒙胜益,张伟,沈锋,等.GFRP锚杆拉伸及剪切力学性能试验研究[J].广州建筑,2018,46(5):11-14.

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.05.031

国标和欧标工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性案例研究

林波,谢文博,许修亮,刘磊

(保利长大海外工程有限公司,广东 广州 510623)

摘要:在不同标准体系下寻找可供替代的钢材以保证工程项目的有序推进,是海外土木工程施工领域需要面临的工程问题。为了评估欧标 IPE 200 工字钢和国标 I20a 工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性,首先建立了隧道初期支护结构力学模型,利用实测的试验数据对模型参数进行标定,从而获取两种工字钢对应的初期支护结构内力的解析解。进一步地,将弯矩、轴力和剪应力作为评价指标,对比分析两种工字钢在隧道初期支护结构中的可替代性。研究结果表明:将两种工字钢互换之后,初期支护结构内力的分布规律并未发生改变,只是在数值上产生了可接受的倍数关系。将国标 I20a 工字钢替换为欧标 IPE200 工字钢时,需要保证拱顶和拱脚处的施工质量,必要时可辅助一定的加强措施。

关键词:隧道工程;可替代性;对比研究;工字钢;力学模型

中图分类号:U455

文献标志码:A

0 引言

随着“一带一路”倡议的稳步推进,中国施工企业凭借自身优势在共建国家开展了大量的交通基础设施建设,一批具有代表性的铁路、公路、港口、机场和跨境桥梁等项目的建设为促进区域互联互通注入了强劲动力,采用中国标准进行建设的土木工程设施也在共建国家多点开花。中国过剩的产能和低廉的价格以及快速的供应能力使得承包商更倾向于在中国完成建筑钢材的采购,再通过海运的方式发运至项目所在国的项目部。这一供应链通常需要跨越不同的经济制度和气候区域,极易受到供货周

期、海运途径、清关方式以及天气等不确定因素的影响。在这一背景下,采用中国标准设计的建筑材料能否正常供应至项目所在国,或者在项目所在国寻求可以替换国标的建筑材料,将成为制约工程建设进度的关键因素。因此,在不同标准体系下寻找可互相替代的钢材成为工程师的研究课题,也是保证项目顺利实施的安全储备。

一些学者根据海外施工经验,对不同体系下钢材的可替代性进行了研究。卢家森^[1]对国标 Q345GJ-B 钢材替换欧共体标准 S355JR 钢材的技术可行性进行了探讨;沈擎^[2]系统地对比了中标、美标和欧标体系下钢结构柱脚材料的选用、设计要求以及计算公式的不同;何彦舫等^[3]对比分析了国标和美

[14] 沈向前,陈道云,郑超.隧道掌子面预应力锚杆支护作用效果研究[J].中外公路,2023,43(2):150-156.

[15] 赵立财.山岭隧道注浆锚杆布置规律研究[J].中外公路,2023,43(1):173-177.

[16] 王小林,黄彦波.中外高地应力软岩隧道大变形工程技术措施对比分析:以兰渝铁路木寨岭隧道与瑞士圣哥达基线隧道为例[J].隧道建设(中英文),2018,38(10):1621-1629.

[17] 祁宝贵.软弱围岩隧道变形特性及控制措施[J].铁道建筑,2019,59(10):80-83.

[18] 肖红武.隧道玻璃纤维锚杆全断面预加固机理与应用[J].现代隧道技术,2019,56(5):163-169.

[19] 田佳,李金鹏.软弱围岩地层隧道大断面机械化施工工法应用[J].隧道建设(中英文),2018,38(8):1350-1360.

[20] 展宏跃.重载铁路隧道穿越富水砂层综合施工技术研究[J].铁道标准设计,2017,61(4):111-116.

收稿日期:2023-01-13

作者简介:林波,男,博士,工程师.E-mail:linboyhit@163.com