

基于强度折减的小净距隧道中夹岩柱稳定性分析

王争瑞

(新郑市公路事业发展中心, 新郑 451100)

摘要: 以某小净距公路隧道为分析背景, 采用有限差分软件 FLAC 3D 构建隧道施工仿真模型, 将强度折减法代入隧道研究领域当中, 通过对岩土体参数进行折减进而实现周边岩体裂化, 分析不同强度折减系数工况下小净距隧道中夹岩柱的围岩塑性区、位移、应力变化规律, 定义隧道围岩安全系数为强度折减系数临界值, 结合相应评价标准共同评价隧道中夹岩柱安全稳定性。研究结果表明: 折减系数 1.0~1.4, 中夹岩柱施工稳定性特征分别为塑性区发展无突变、位移变化速率较小、应力无显著变化; 折减系数变为 1.6, 局部塑性区贯通, 位移与应力特征值发生突变; 中夹岩柱塑性区、位移与应力等三方面分析出应取折减系数 1.4 作为隧道围岩安全系数。研究成果可为小净距公路隧道的施工与运营安全稳定性提供一定建议。

关键词: 强度折减; 小净距隧道; 中夹岩柱; 稳定性分析; 数值仿真

中图分类号: U451 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 03-0133-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.022

Stability Analysis of Rock Pillar in Small Spacing Tunnel Based on Strength Reduction

WANG Zhengrui

(Xinzheng City Highway Development Center, Xinzheng 451100, China)

Abstract: Using a small-clearance highway tunnel as the analysis background, the finite difference software FLAC3D was employed to construct a tunnel construction simulation model. The strength reduction method was introduced into the field of tunnel research. By reducing the parameters of the rock and soil, the surrounding rock fracturing was achieved. The study analyzed the variation laws of the surrounding rock plastic zone, displacement, and stress of the rock pillar in small-clearance tunnels under different strength reduction coefficient conditions. The tunnel surrounding rock safety factor was defined as the critical value of the strength reduction coefficient. Combined with the corresponding evaluation criteria, the safety and stability of the rock pillar in the tunnel were evaluated. The research results indicate that in the reduction coefficient range of 1.0~1.4, the construction stability characteristics of the rock pillar are as follows: no abrupt changes in the development of the plastic zone, a small rate of displacement change, and no significant stress changes. When the reduction coefficient reaches 1.6, local plastic zones connect, and there is a sudden change in displacement and stress characteristics. Analyzing the plastic zone, displacement, and stress of the rock pillar, it is concluded that a reduction coefficient of 1.4 should be taken as the tunnel surrounding rock safety factor.

Key words: strength reduction; small spacing tunnel; middle rock pillar; stability analysis; numerical simulation

作者简介: 王争瑞 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 交通工程。

收稿日期: 2023-07-26

岩土力学

0 引言

地下岩土工程变形与受力永远是复杂多变的,考虑到多因素影响下地下结构物安全稳定性的不确定性,常常利用经验类比法、地层-结构法、约束-收敛法与荷载-结构法等对岩体工程稳定性进行分析^[1]。隧道结构是地下岩体结构重要组成部分,其中按双洞距离又分为小净距、连拱与分离隧道^[2],隧道优点在于可进一步扩展交通运输空间,节约行车时间,但其缺点表现在造价贵、施工难度大与运营成本高。小净距隧道进出口位置普遍存在着偏压现象,其将导致左右双洞应力应变状态存在差异性,鉴于此在施工期间要分为先行洞与后行洞,进而确保中夹岩柱开挖稳定性^[3-4]。

目前小净距隧道施工重难点主要在于确保浅埋偏压影响下的进出口稳定性,分别从开挖方法、支护优化设计与防护加固措施等方面开展研究,归纳得出定性或定量标准判别小净距隧道岩土体稳定性与隧道支护安全性。宋洋等^[5] 引用强度折减建立浅埋偏压小净距隧道仿真模型,综合隧道安全系数与现场监测数据分析隧道稳定性;张胜等^[6] 针对最小二乘法曲线拟合的缺陷性,提出有关于地表下沉的新曲线拟合方法,并对隧道施工洞口段地表下沉数据进行拟合分析;闫振虎等^[7] 以某小净距隧道为工程背景,基于普氏平衡拱理论提出中夹岩柱上覆围岩压力计算公式,探究中夹岩柱稳定性、加固方案与相关影响因素;戴俊等^[8] 建立不同开挖方法数值模型,重点对分析先行洞围岩与中夹岩柱力学特征变化,确定采用全断面法开挖先行洞,台阶法开挖后行洞的方案;宋应潞等^[9-10] 考虑两折减系数与刚度参数退化对小净距隧道围岩稳定性的影响;侯瑞彬等^[11] 采用有限元强度折减法研究隧道开挖进程中各工艺的安全系数动态变化规律,且综合分析极限状态下关键工序的隧道围岩塑性区与位移分布规律;高永涛等^[12] 基于广义 Hoek-Brown 屈服准则强度折减法,以数值计算收敛和特征位移突变作为判据,求解安全系数;夏梦然^[13] 理论推导出浅埋超小净距隧道中隔岩柱失稳机理,确定出中隔岩柱上覆应力,结合土体极限应力对中隔岩柱失稳破坏特征进行分析;贺鹏等^[14] 基于改进非连续变形分析

(DDARF) 法对浅埋小净距隧道围岩变形破坏规律及裂隙演化进行数值模拟,并以裂隙扩展破碎区贯通与否作为中夹岩柱稳定性的评定依据,针对无锚、有锚支护条件下的围岩稳定性进行了对比分析;李然等^[15] 依托实际大断面三孔小净距隧道进行分析,为防止围岩失稳破坏,提出纵向超前控制和横向夹岩控制等施工方法,对超前支护参数进行数值优化分析,并研究管棚与帷幕注浆联合超前控制效果;已有研究分别从理论计算、现场测试、试验分析与数值模拟等方面展开,但考虑到不同地区岩体性质存在偏差,隧道工程整体分析评估需结合最新理论与工程类比经验,其中小净距与连拱隧道施工稳定性关键点在于中夹岩柱是否失稳,因此针对某具体地区小净距公路隧道最不利区段(软弱岩体)展开分析,分析不同强度折减系数下中夹岩柱围岩的塑性区、位移、应力变化,并利用塑性区、位移、应力失稳标准评价中夹岩柱稳定性,为对应软弱围岩区段小净距公路隧道隧道施工稳定性提供一定参考。

1 工程简介

该公路隧道位于高原地区,场区属溶蚀地貌单元,进出口穿越山脊,最高点海拔为 1 900 m,隧道出露地层岩性为黏土、块石土、灰岩夹泥质灰岩、泥质灰岩等,V 级岩土体区段长度约为 26%,区间最大埋深约为 150 m。选取浅埋偏压 V 级围岩区段进行分析,采用复合式衬砌支护结构,初支选取 24 cm 厚度的 C20,二衬选取 50 cm 的 C25 钢筋混凝土结构,为确保小净距隧道施工安全性,采用 CD 法分别对先行洞(左洞)与后行洞(右洞)进行开挖。

2 数值模型与参数设置

基于影响范围边界约为 3~5 倍,建立不同强度折减系数 w (取值 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0) 工况下的仿真模型,利用实体单元模拟岩土体与二衬,初支采用壳单元,其中实体单元与壳单元分别为 M-C 与弹性本构,左右边界设为 X 限制约束,前后边界设为 Y 限制约束,下端设为 Z 限制约束,提高周边岩土体参数实现锚杆与超前支护的加固效应。模型尺寸、测点布设与隧道开挖工序如图 1 所示,岩

土体与支护力学参数见表 1。

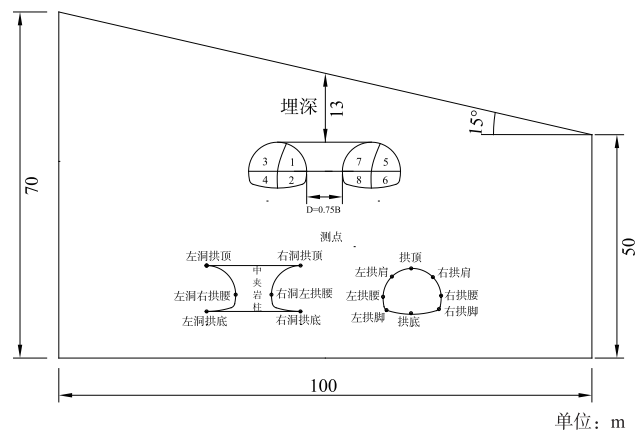


图 1 模型尺寸、测点布设与开挖工序
Fig. 1 Grid size, measuring point layout and excavation process

表 1 小净距公路隧道相关力学参数
Table 1 Related mechanical parameters of small spacing highway tunnel

材料	密度 / (kg/m ³)	泊松比	弹性模量 /GPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 / (°)
岩土体	1 960	0. 38	1. 89	135	23
初期支护	2 250	0. 20	23. 20		
二次衬砌	2 780	0. 20	27. 30		

3 小净距公路隧道中夹岩柱稳定性分析

强度折减法适用于弹塑性体极限状态，针对小净距隧道而言，是为了探究折减系数逐级增大时，隧道中夹岩柱何时失去稳定，选取此折减系数作为隧道围岩安全系数，可较好评价隧道中夹岩柱稳定性。提取不同工况数值模型（ $w = 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8、2.0$ ）的相应数据，分别对中夹岩柱围岩塑性区、位移、应力展开分析，建立统一标准综合评价小净距公路隧道中夹岩柱稳定性。

$$\begin{aligned} c' &= c/w \\ \tan\varphi' &= \tan(\varphi/w) \end{aligned} \tag{1}$$

式中： w 为强度折减系数； $c、c'$ 分别为折减前、后的黏聚力； $\varphi、\varphi'$ 为折减前后的内摩擦角。

3.1 小净距公路隧道中夹岩柱塑性区分析

中夹岩柱稳定性是确保小净距隧道施工安全性的关键。分析不同折减系数工况下的周边岩体与中夹岩柱塑性区分布规律，以塑性区贯通工况的强度折减系数作为隧道围岩安全系数，从塑性区角度评价隧道施工安全稳定性，具体情况如图 2 所示，其中黑色部分为剪切塑性区，红色部分为拉伸塑性区。

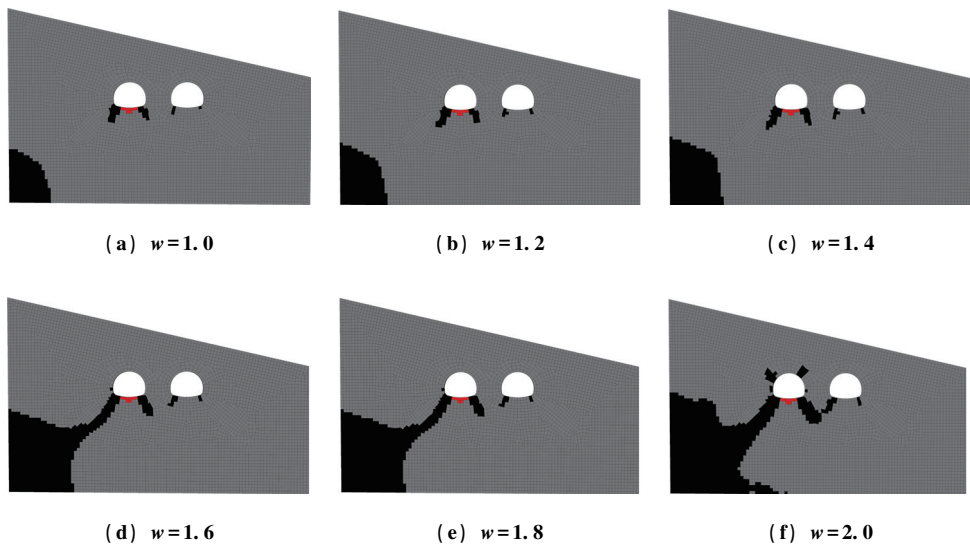


图 2 不同 w 工况下的小净距公路隧道围岩塑性区分布规律
Fig. 2 Distribution law of plastic zone of surrounding rock in different reduced factor small spacing highway tunnels

针对于整个模型而言，剪切塑性区主要存在于拱脚处，拉伸塑性区仅位于拱底部位，说明当小净距隧道存在浅埋偏压情况，拱脚处存在大量剪切变形，施工期间应尽快封闭成环避免塑性区过度发展，而拱底变形形式为隆起，底部岩土体上端受拉产生

裂缝，施工阶段应注意仰拱支护结构施工工艺优化。随折减系数逐渐增大，左下边界、双洞拱脚处剪切塑性区快速发展，底部拉伸塑性区无明显变化；在 1.0~1.4，左洞左拱脚剪切塑性区虽快速发展，无突变发生。在 1.6 时，左下边界、左洞左拱脚塑性区

岩土力学

发生贯通,说明此时隧道岩土体已失稳;随 w 增大至2.0,中夹岩柱(左洞右拱脚、右洞左拱脚)的剪切塑性区即将发生贯通,说明双洞施工形成的相互影响,已严重威胁到小净距隧道施工整体稳定性。对隧道整体围岩与中夹岩柱塑性区分布特征进行分析,得出隧道局部稳定性优劣排序为左洞左拱脚<中夹岩柱<右洞右拱脚,为保障隧道施工稳定性,折减系数 w 应为1.4,因此隧道围岩安全系数取1.4。

3.2 小净距公路隧道中夹岩柱位移分析

小净距隧道受浅埋偏压影响,岩体位移分布特

征与深埋单洞隧道存在着较大差异,不同折减系数工况下的隧道围岩位移分布如图3所示($w = 1.0/1.4/1.6/2.0$ 工况),从隧道周边岩土体垂直位移分布特征可知,拱顶沉降与底部隆起较为突出,且随折减系数 w 增大而增大;周边岩土体水平位移数值较小,其位移突变发生于 $w = 1.6$,位移达1 mm以上。由于水平位移较小,因此选取隧道中夹岩柱对应特征点垂直位移数据进行整理分析,不同折减系数工况下的中夹岩柱垂直位移变化规律如图4所示。

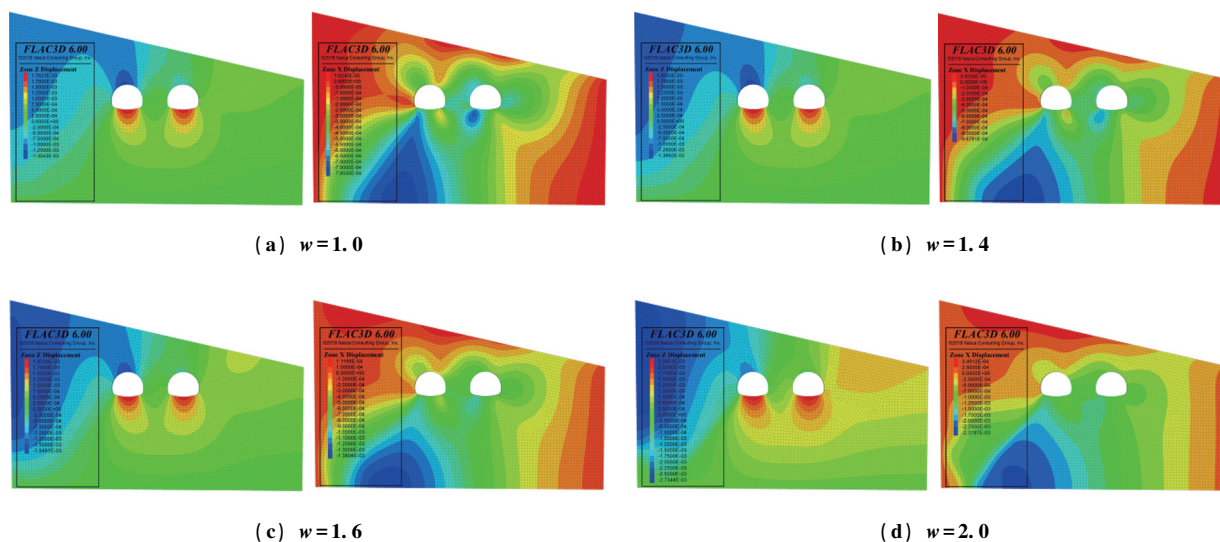


图3 不同 w 工况下的小净距公路隧道围岩位移云图

单位: m

Fig. 3 Displacement nephogram of tunnel surrounding rock with different reduction coefficients

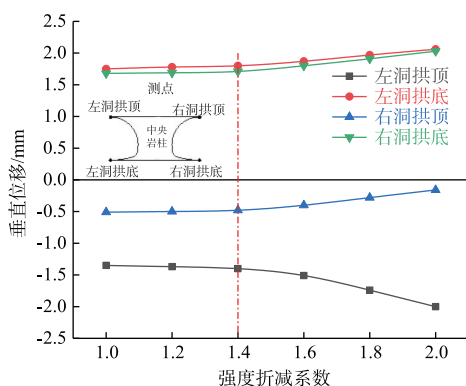


图4 不同 w 工况下的隧道中夹岩柱垂直位移变化规律

Fig. 4 Variation law of vertical displacement of rock pillar in tunnel with different reduction coefficients

小净距隧道中夹岩柱受偏压影响,垂直位移分布特征呈现不对称。中夹岩柱顶部表现为向下沉降,

底部表现为向上隆起,底部隆起随折减系数增大而增大,但中夹岩柱左右两端的拱顶沉降呈现不一致变化,左洞拱顶沉降量随折减系数增大而增大,但右洞拱顶沉降与之相反。

在折减系数1.0~1.4,无论是拱顶沉降量与拱底隆起量变化速率较小,当折减系数变化为1.6时,两种中夹岩柱特征位移值发生显著变化,且于此处发生突变,1.6~2.0位移变化速率明显快于1.0~1.4。为确保隧道中夹岩柱施工稳定性,从位移角度分析出应取折减系数1.4作为隧道围岩安全系数,折减系数高于1.4的隧道稳定性快速下降,应尽量避免。

3.3 小净距公路隧道中夹岩柱应力分析

MC本构模型应满足莫尔圆方程,小净隧道中夹岩柱应力在施工工程中发生多次重新分布,复杂应

力状态下的岩土微元体截面上应力分量之间关系应满足莫尔应力圆准则^[16]，因此提取隧道模型中夹岩柱处的垂直与水平应力进行分析，两者可通过公式转化求解主应力。

对图 5 与图 6 中的应力分布与应力变化规律进行综合性分析，由于隧道受浅埋偏压的作用，不仅使得双洞应力存在较大差异，单洞岩土体应力也呈现为不对称分布特征，应力随不同折减系数的变化进行重新分布。垂直应力表现为压应力，压应力较小

值位于中夹岩柱的拱顶与拱底，两拱腰处表现为压应力峰值；中夹岩柱周边岩体水平应力也表现为压应力，峰值位于左洞拱底部处。中夹岩柱从水平与垂应力角度分析出整体处于受压状态。

由图 6 可知，中夹岩柱各个特征点显著应力突变发生于折减系数 1.4 后，左洞右拱腰垂直应力峰值、左洞拱底水平应力峰值均在折减系数 1.6 发生突变，因此从中夹岩柱垂直与水平应力角度分析得出隧道施工围岩安全系数为 1.4。

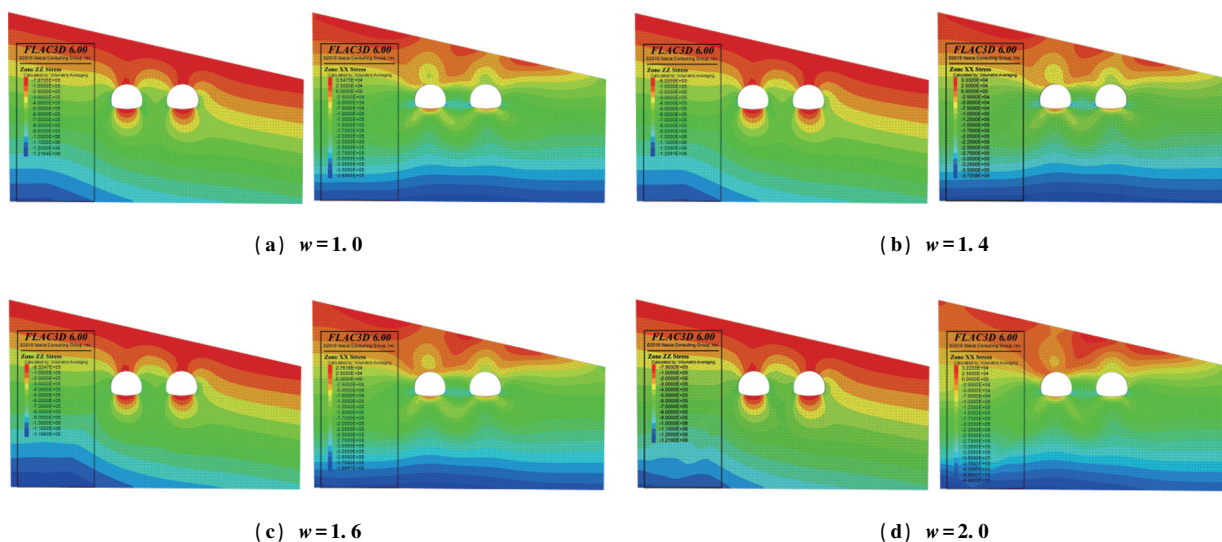


图 5 不同 w 工况下的小净距公路隧道围岩应力云图 (单位: Pa)

Fig. 5 Stress nephogram of surrounding rock of small spacing highway tunnel with different reduction coefficients

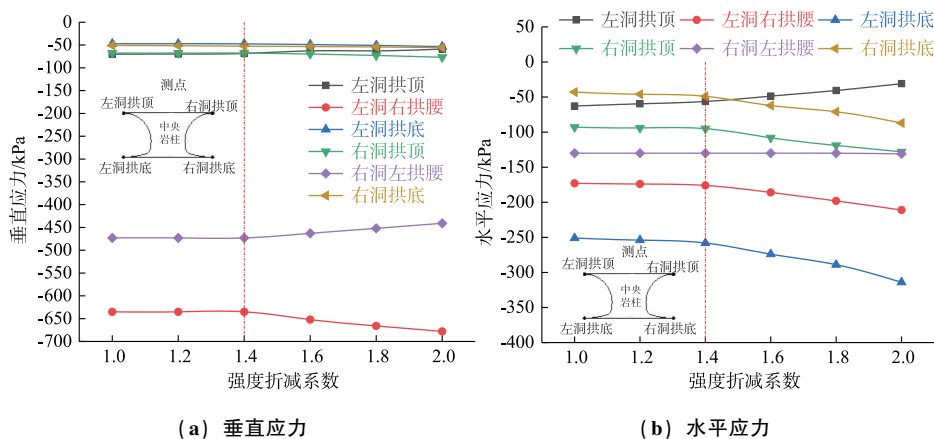


图 6 不同 w 工况下的隧道中夹岩柱应力变化规律

Fig. 6 The stress variation law of rock pillar in tunnel with different reduction coefficients

4 结论

以某小净距公路隧道为分析背景，利用 FLAC 3D

差分软件建立浅埋偏压小净距隧道施工模型，探究不同折减系数工况下的隧道中夹岩柱施工稳定性，并得出下列结论：

岩土力学

(1) 折减系数 1.0~1.4 区间, 左洞左拱脚塑性区发展但无突变, 折减系数 1.6 时, 左下边界、左洞左拱脚塑性区贯通, 折减系数增大至 2.0, 中夹岩柱塑性区即将贯通, 已严重威胁小净距隧道施工稳定性, 由中夹岩柱塑性区分布特征分析出隧道围岩安全系数取 1.4。

(2) 中夹岩柱垂直位移受偏压影响呈现不对称分布, 双洞底部隆起、左洞拱顶沉降随折减系数增大而增大, 右洞拱顶沉降与之相反; 折减系数 1.0~1.4 区间, 位移变化速率较小, 中夹岩柱特征位移值于折减系数 1.6 处发生突变, 1.6~2.0 区间位移变化速率明显加快, 从位移角度分析出应取折减系数 1.4 作为隧道围岩安全系数。

(3) 浅埋偏压作用导致双洞应力呈现不对称分布, 垂直应力较小值位于中夹岩柱的拱顶与拱底, 拱腰表现为垂直应力峰值, 水平应力峰值位于左洞拱底部处, 水平与垂应力显示隧道整体受压; 中夹岩柱中的左洞右拱腰垂直应力峰值、左洞拱底水平应力峰值于折减系数 1.6 处发生突变, 从中夹岩柱垂直与水平应力角度分析出隧道施工围岩安全系数为 1.4。

参 考 文 献

- [1] 刘国锋, 江权, 段淑倩, 等. 大型地下洞室硬岩应力-结构型塌方特征与机制 [J]. 岩石力学与工程学报, 2026, 45 (4): 1048-1064.
- [2] 郑寰宇, 唐振华, 骆俊辉, 等. 填充型岩溶隧道复合基础协同作用及隧道变形机制研究 [J]. 公路, 2026, 71 (3): 442-448.
- [3] 孙博涛, 陈家征, 李忠, 等. 浅埋双侧偏压小净距隧道围岩压力变化规律研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 50-58.
- [4] 朱洪骏, 蒋敏, 张加兵, 等. 软弱破碎围岩小净距隧道塌方机制及变形控制技术 [J]. 广西大学学报 (自然科学版), 2026, 51 (1): 64-76.
- [5] 宋洋, 常泳涛, 李永启, 等. 小净距隧道洞口段围岩变形与坡体稳定性分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报 (自然科学版), 2020, 39 (1): 24-33.
- [6] 张胜, 何文超, 黎永索, 等. 小净距隧道洞口段地表下沉分段曲线拟合研究 [J]. 湖南城市学院学报 (自然科学版), 2019, 28 (5): 1-5.
- [7] 闫振虎, 王凯, 唐坤, 等. 浅埋小净距隧道中夹岩柱稳定性及加固方案研究 [J]. 长江科学院院报, 2022, 39 (11): 126-134.
- [8] 戴俊, 田国宾, 熊咸玉. 基于围岩受力影响的小净距隧道开挖方法优化 [J]. 科学技术与工程, 2019, 19 (29): 307-311.
- [9] 宋应潞. 基于强度折减法公路小净距隧道围岩稳定性研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2016.
- [10] 宋应潞, 潘建平. 基于强度折减与刚度退化小净距隧道围岩稳定性研究 [J]. 中国安全生产科学技术, 2015, 11 (9): 24-30.
- [11] 侯瑞彬, 申玉生, 陈明奎. 基于强度折减法的浅埋偏压小净距隧道围岩稳定性分析 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (4): 55-60.
- [12] 高永涛, 范高龄, 吴顺川, 等. 基于不同强度折减路径下的隧道围岩稳定性分析 [J]. 北京科技大学学报, 2013, 35 (3): 393-401.
- [13] 夏梦然. 小净距隧道围岩稳定性的影响因素 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2021, 43 (5): 73-80.
- [14] 贺鹏, 李术才, 李利平, 等. 裂隙岩体小净距超大断面隧道围岩非连续变形分析 [J]. 岩土工程学报, 2018, 40 (10): 1889-1896.
- [15] 李然, 陈平, 张顶立, 等. 大断面三孔小净距隧道围岩稳定性数值研究及工程实践 [J]. 土木工程学报, 2022, 55 (11): 83-95.
- [16] 潘峰, 伍小方, 吕中玉. 硕龙隧道超小净距段围岩稳定性及加固方案研究 [J]. 公路, 2025, 70 (9): 357-364.