

强风化岩公路隧道施工方法比选研究

范鹏举^{1,2}, 马文华³, 张堂杰^{1,2}, 樊纯坛⁴, 张 铎⁵

(1. 苏交科集团股份有限公司, 江苏 南京 210019; 2. 江苏省地下空间探测技术工程研究中心, 江苏 南京 210019; 3. 南平武沙高速公路有限责任公司, 福建 南平 353000; 4. 山东职业学院, 山东 济南 250104; 5. 南京百优工程技术有限公司, 江苏 南京 211300)

摘要:为探究强风化岩公路隧道最优施工方法,文章基于强风化岩实际地质条件开展数值模拟研究,重点分析两台阶预留核心土环向开挖法、CRD法及双侧壁导坑法对隧道围岩稳定性的影响,并从围岩变形位移、塑性区分布特征及经济技术指标3个维度进行系统对比。研究结果表明:CRD法在变形控制方面效果最优,可有效降低拱顶沉降风险,保持隧道结构稳定;该工法对应的围岩塑性区分布范围最小,围岩稳定性最佳。在经济与施工管理方面,CRD法虽初期投资较高、施工组织较复杂,但可减少后期维护成本与工期延误风险,材料消耗与施工速度适中,具有显著的技术经济效益。本文研究成果可为强风化岩公路隧道施工方法选择提供理论依据与工程参考。

关键词:强风化岩; 公路隧道; 施工方法比选; CRD法; 数值模拟

中图分类号:U455.4

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2026)04-0061-07

doi:10.13402/j.gcejs.2026.04.043

Research on the comparison of construction methods for highway tunnels in highly weathered rock

FAN Pengju^{1,2}, MA Wenhua³, ZHANG Tangjie^{1,2}, FAN Chuntan⁴, ZHANG Duo⁵

(1. JSTI GROUP Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China; 2. Engineering Research Center of Underground Space Detection, Technology of Jiangsu Province, Nanjing 210019, Jiangsu, China; 3. Nanping Wusha Expressway Co., Ltd., Nanping 353000, Fujian, China; 4. Shandong Polytechnic, Jinan 250104, Shandong, China; 5. Nanjing Baiyou Engineering Technology Co., Ltd., Nanjing 211300, Jiangsu, China)

Abstract: To determine the optimal construction method for highway tunnels in strongly weathered rock strata, this study conducts numerical simulations based on actual geological conditions of strongly weathered rock. The influence of three construction methods—the two-bench reserved core soil annular excavation method, the CRD (cross diaphragm) method, and the double-side drift method—on the stability of tunnel surrounding rock is systematically analyzed from three perspectives: surrounding rock deformation and displacement, plastic zone distribution characteristics, and technical-economic indicators. The results indicate that the CRD method achieves the most favorable deformation control, effectively mitigating the risk of crown settlement and maintaining tunnel structural stability. This method also yields the smallest extent of plastic zone distribution and the best overall surrounding rock stability. In terms of economic and construction management considerations, although the CRD method entails higher initial investment and more complex construction organization, it reduces long-term maintenance costs and the risk of construction delays, with moderate material consumption and

收稿日期: 2025-10-13

基金项目: 江苏省科技成果转化专项资金资助项目(BA2022009)

作者简介: 范鹏举(1982—),男,高级工程师,从事公路工程建设与管理工作。

通信作者: 张堂杰(1987—),男,高级工程师,从事隧道与地下工程及安全研究与技术咨询工作。

construction speed, thereby offering significant technical and economic benefits. The findings of this study provide a theoretical basis and engineering reference for the selection of construction methods for highway tunnels in strongly weathered rock strata.

Key words: highly weathered rock; highway tunnel; construction method comparison; numerical simulation; CRD method

我国交通基础设施建设不断推进,公路网络日益完善,众多公路隧道穿越复杂地质区,强风化岩区域隧道工程增多^[1-2]。强风化岩松散、低强度、稳定性差,易致隧道施工中围岩大变形,引发坍塌等灾害,危及施工和运营安全。鉴于此,研究强风化岩公路隧道最优施工方法对保障安全意义重大^[3-4]。

目前,关于隧道施工方法的比选与优化,学者们已开展了大量研究工作。贾江波等^[5]通过有限元模拟,分析了大跨度黄土隧道传统 CD 法和上台阶 CD 法的施工效果,揭示了两种工法在围岩位移、塑性区及初期支护结构强度方面的变化规律;丁祥等^[6]利用数值模拟,对比了第三系富水弱胶结砂岩隧道的 3 种施工方案,并结合现场监测数据验证了数值模拟的可靠性。孙科^[7]借助 Midas GTS 有限元软件,对比了公路隧道软弱围岩 CD 法和三台阶七步法开挖时的位移、塑性区及锚杆轴力。王圣涛^[8]对台阶法及双侧壁导坑法进行比选,确定了适用于卵石堆积层隧道的施工方法。金扬等^[9]采用数值模拟和现场监测相结合的方式,分析了 CRD 法不同施工工序下浅埋超大断面黄土隧道围岩受力及变形特点,并对工序进行了优化分析。

综上所述,现有施工方法比选优化的研究主要聚焦于黄土、砂卵石、富水弱胶结砂岩等软弱围岩地层,而针对强风化岩领域研究较少。为此,本文以安将隧道为背景,利用数值模拟软件,对大变形隧道常用的两台阶预留核心土环向开挖法、CRD 法及双侧壁导坑法进行模拟,分析其对围岩变形位移、塑性区分布的影响,并从经济及施工管理角度对比,探寻强风化岩隧道最优施工方法,以期可为类似工程提供理论与实践参考。

1 工程概况

安将隧道是双洞四车道的长隧道。左洞长度为 1 253 m(桩号 ZK45 + 635 至 ZK46 + 888),右洞

长度为 1 225 m(桩号 YK45 + 665.18 至 YK46 + 890.18),平均长度为 1 239 m,为分离式双洞布置。地质显示,洞口围岩多为厚层坡积土、全-强风化岩,属土质-类土质围岩,结构松散、易变形坍塌,施工难度大,围岩级别为 V 级。开挖断面尺寸及支护参数如图 1 所示。

2 数值模拟分析

2.1 计算工况设计

文献调研表明,强风化岩大变形隧道施工方法主要有台阶法和分部开挖法。鉴于安将隧道围岩强风化、松散、稳定性差,为减少围岩扰动,经综合考量,选择两台阶预留核心土环向开挖法、CRD 法和双侧壁导坑法作为优选对比方案,其开挖工序如图 2 所示。根据地勘和施工方案,安将隧道埋深为 80 ~ 160 m, V 级围岩开挖进尺为 0.6 ~ 1.0 m。为便于对比分析和建模,统一设定数值模型中隧道埋深为 100 m,开挖进尺为 0.6 m,具体计算工况如表 1 所示。

表 1 计算工况设计

工况编号	施工方法	开挖进尺/m	埋深/m
G1	两台阶预留核心土环向开挖法	0.6	100
G2	CRD 法	0.6	100
G3	双侧壁导坑法	0.6	100

2.2 模型建立

基于圣维南原理,隧道开挖扰动区范围一般为横截面最大直线尺寸的 3 ~ 5 倍。为兼顾精度与计算效率,此次模型计算范围定为 3 倍洞径,模拟地层尺寸为 78.12 m × 12 m × 78.12 m(长 × 宽 × 高),如图 3 所示。模型左右边界约束 X 方向,前后边界约束 Y 方向,下边界固定约束 X、Y、Z 三向,上边界施加竖向均布荷载模拟上覆岩体自重应力。围岩用 3D 实体单元,采用 Mohr-Coulomb 屈服准则,衬砌用 2D 板单元,锚杆为 1D

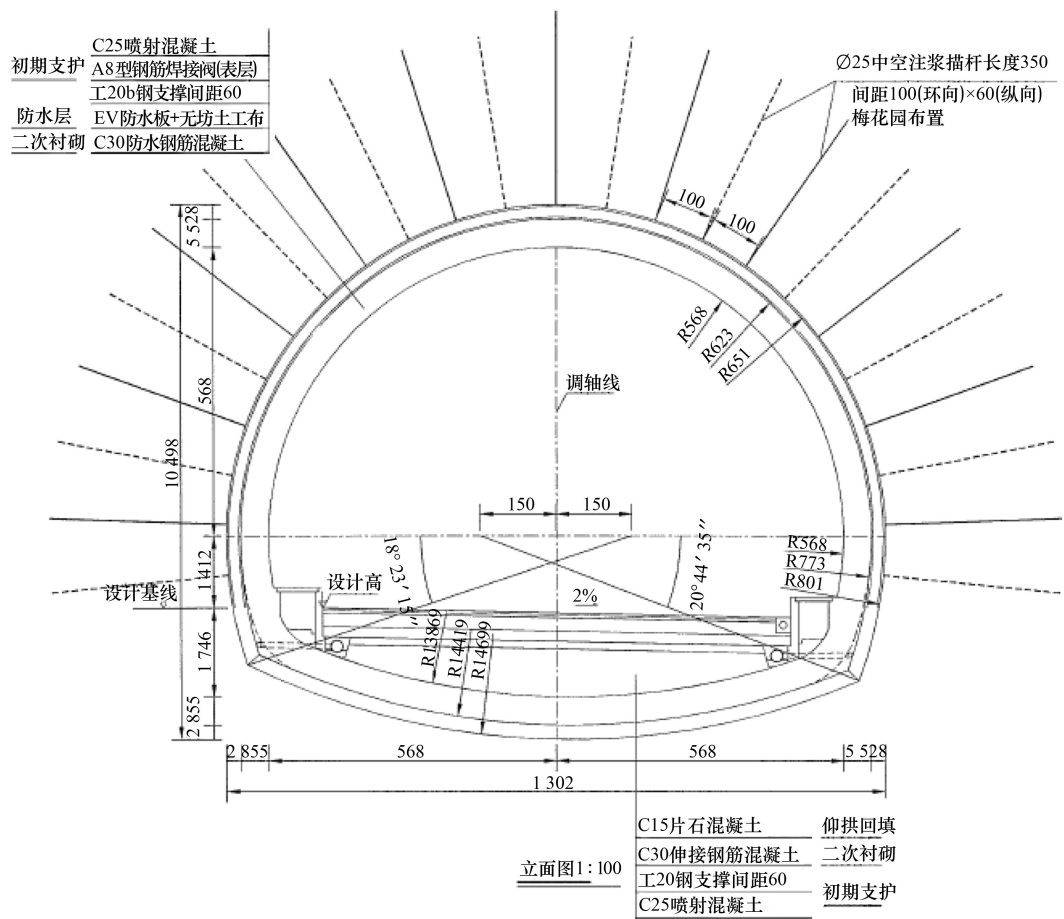
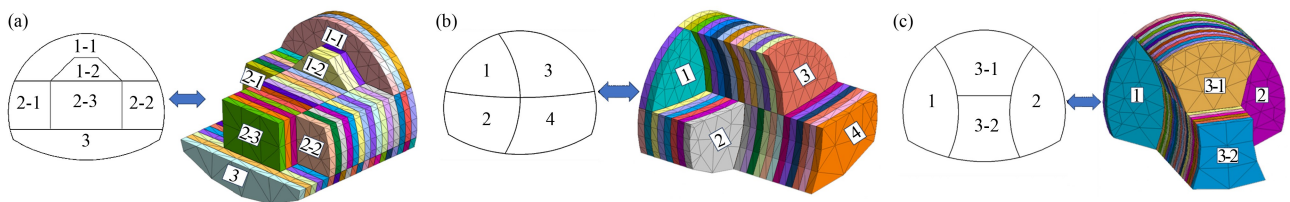


图 1 隧道开挖断面

cm



(a) 两台阶预留核心土环向开挖；(b) CRD 法；(c) 双侧壁导坑法

图 2 隧道开挖工序示意

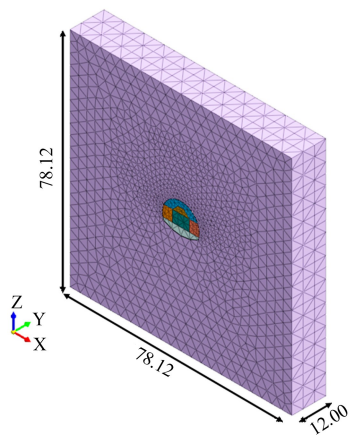


图 3 数值计算模型

m

植入式桁架，为了方便建模，本文将钢拱架与喷射混凝土看作一个整体，弹性模量换算公式为

$$E = E_0 + \frac{S_g \times E_g}{S_c} \quad (1)$$

式中： E 为折算后初衬的弹性模量，GPa； E_0 为原混凝土的弹性模量，GPa； S_g 为钢拱架截面积， cm^2 ； E_g 为钢拱架的弹性模量，GPa； S_c 为混凝土截面积， cm^2 。最终参考《公路隧道设计规范》、《岩石力学参数手册》及安将隧道地质勘探报告等相关资料，选定了数值模拟的物理力学参数，如表 2 所示。

表 2 数值模拟的物理力学参数

材料 类型	弹性模 量/GPa	容重/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松 比	黏聚 力/MPa	内摩擦 角/($^{\circ}$)
V 级围岩	1.0	18	0.45	0.1	20
初衬	27.9	22	0.25	—	—
二衬	31.5	25	0.25	—	—
锚杆	210.0	78	0.30	—	—
临时仰拱	26.8	22	0.25	—	—
临时支撑	26.8	22	0.25	—	—

3 数值计算结果分析

3.1 变形位移计算云图分析

通过数值模拟得到 3 种不同施工方法下隧道开挖贯通后的围岩变形位移云图，如图 4 所示。分析表明，施工方法的差异对隧道围岩的变形位移分布具有显著影响。

在水平位移方面，两台阶预留核心土环向开挖法的位移分布呈现出较明显的集中性，主要集中在隧道两侧墙脚及仰拱左右拱脚区域，且位移范围较广。相比之下，CRD 法与双侧壁导坑法的水平位移分布范围明显减小，其位移主要沿隧道左右侧墙展开。进一步比较发现，CRD 法的水平位移分布范围相较于双侧壁导坑法更为局限，表明 CRD 法在控制水平位移方面具有一定优势。

对于竖向位移，两台阶预留核心土环向开挖法的竖向位移主要集中于拱圈区域，以拱顶沉降为主，且沉降范围较大。而 CRD 法与双侧壁导坑法的竖向位移主要分布在仰拱处，拱圈处的竖向位移分布范围显著小于两台阶预留核心土环向开挖法。由此可见，采用 CRD 法与双侧壁导坑法可

有效降低拱顶沉降风险，其中 CRD 法的竖向位移分布范围同样略小于双侧壁导坑法。

综上所述，施工方法的选择对隧道围岩的稳定性起着关键作用。针对强风化岩安将公路隧道，仅从变形位移云图的计算结果来看，分部开挖法中的 CRD 法与双侧壁导坑法均优于两台阶预留核心土环向开挖法，且 CRD 法在控制围岩变形位移方面略胜一筹。

3.2 特征点位移计算结果分析

为了更直观地说明施工方法对强风化岩公路隧道稳定性的影响，按照图 5 所示的位移提取特征点，分别提取 3 种施工方法下其拱顶沉降(A)与周边收敛(B-C)，并绘制位移柱状图，如图 6 所示。

由图 6 可知，在隧道开挖贯通后，针对隧道周边收敛(B-C)和拱顶沉降(A)两项关键指标的监测结果显示：两台阶预留核心土环向开挖法引起的隧道变形量最大，具体数据表明，其周边收敛值和拱顶沉降值均显著高于其他两种方法。这表明在强风化岩地质条件下，该施工方法对围岩的扰动最为剧烈，导致围岩稳定性受到较大程度的削弱，进而引发较大的变形；双侧壁导坑法的隧道变形量介于两台阶预留核心土环向开挖法和 CRD 法之间。虽然其变形量较两台阶预留核心土环向开挖法有所减小，但仍存在一定的改进空间；CRD 法施工的隧道变形量最小，其周边收敛值和拱顶沉降值均显著低于前两种方法，表明 CRD 法在控制隧道变形方面具有明显优势。

3.3 隧道变形-施工步骤响应分析

强风化岩因松散特性,其扰动程度在施工中

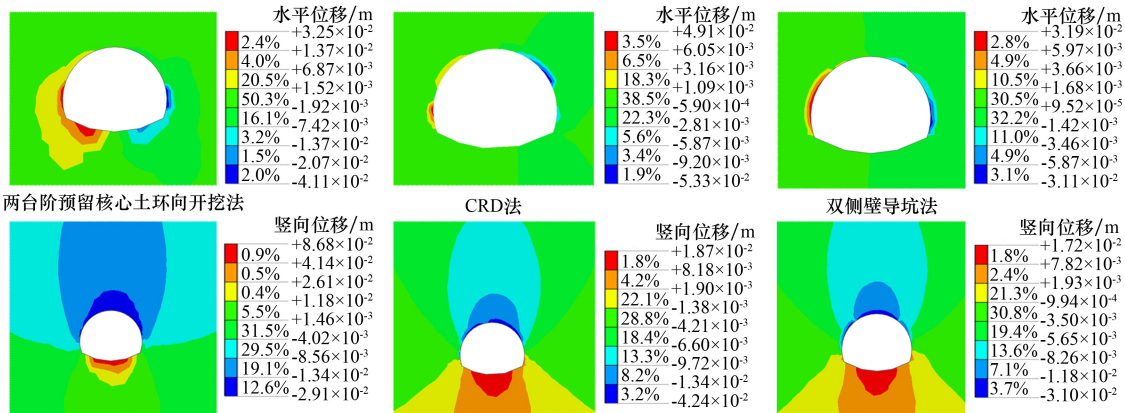


图 4 位移计算云图

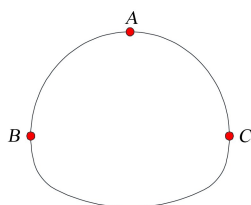
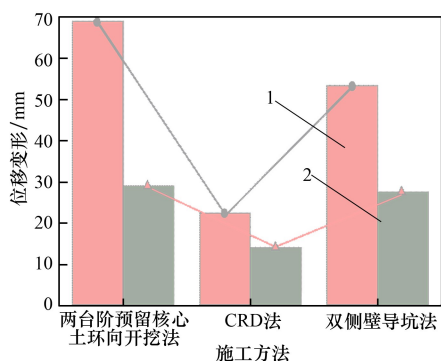


图5 位移结果提取点



1—周边收敛 (B-C); 2—拱顶沉降 (A)。

图6 位移柱状图

对围岩稳定性至关重要。因此, 为探究上述 3 种施工方法对强风化岩公路隧道围岩扰动的影响, 特绘制周边收敛 (B-C) 与拱顶沉降 (A) 随施工步骤变化的曲线, 如图 7 所示。

由图 7(a) 可知, 采用两台阶预留核心土环向开挖法时, 隧道上台阶 1-1 部与 1-2 部开挖引起的变形较小, 主要得益于及时支护有效控制了围岩变形。而下台阶 2-1 部与 2-2 部开挖后, 隧道变形显著增大, 尤其周边收敛出现突增, 反映下台阶开挖对围岩扰动更强, 导致应力重分布。待核心土 2-3 部与仰拱 3 部开挖后, 衬砌封闭成环, 支护体系趋于完整, 隧道变形逐渐收敛并趋于稳定。

由图 7(b) 可知, CRD 法在开挖 1、2 部时隧

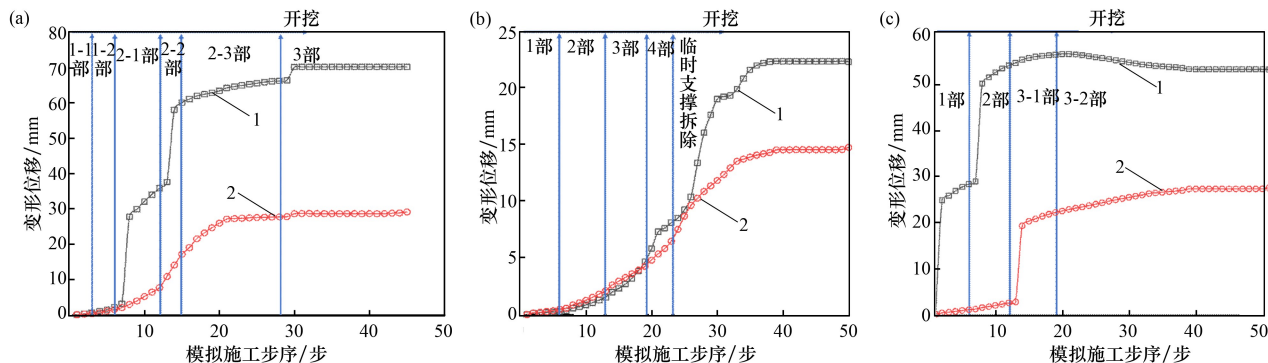
道总体变形趋势较缓, 这得益于导洞先行开挖与临时支护及时施作, 有效控制了初期围岩变形。进入 3、4 部开挖后, 变形曲线斜率增大, 表明变形加速。临时支撑拆除阶段斜率达到最大, 说明其拆除会引起围岩应力急剧释放, 显著增大变形。因此, 施工中应审慎确定临时支撑的拆除时机与方式, 以减小对围岩的扰动。

从图 7(c) 可知, 采用双侧壁导坑法时, 在开挖左导坑 1 部与右导坑 2 部阶段, 隧道周边收敛变形出现明显突增现象。这可能是因为侧壁导坑的开挖破坏了原始围岩的平衡状态, 导致围岩应力重新分布, 从而引发较大变形。而在中部核心土 3-1 部开挖时, 隧道拱顶沉降变形出现突增。这是由于核心土的开挖使得拱顶部位的围岩失去了支撑, 应力集中, 导致拱顶沉降加剧。随后, 开挖中部核心土 3-2 部后, 隧道衬砌基本成环, 形成较为稳定的支护结构, 隧道变形量逐渐趋于稳定。

综上所述, 强风化岩公路隧道中, 不同施工方法导致的围岩变形与扰动程度差异显著。两台阶预留核心土环向开挖法与双侧壁导坑法易引发较大变形突增, 围岩扰动较大; 而 CRD 法能有效控制变形, 维持变形速率均匀, 对风化松散围岩扰动较小。因此, 在强风化岩隧道施工中优先选用 CRD 法, 有助于减小围岩扰动, 提升施工安全与稳定性。

3.4 塑性区计算结果分析

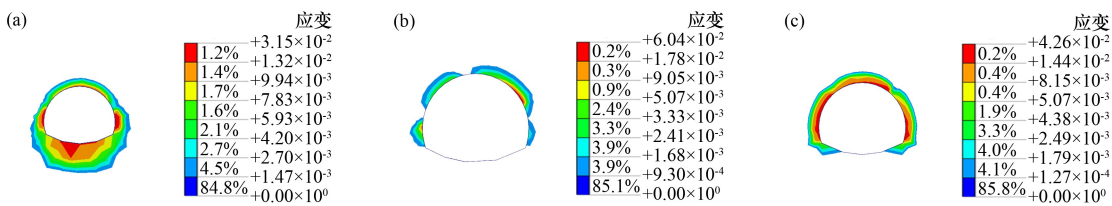
在强风化岩公路隧道 3 种不同施工方法下的开挖贯通过程中, 围岩塑性区分布呈现出显著差异, 其云图如图 8 所示。



(a) 两台阶预留核心土环向开挖法; (b) CRD 法; (c) 双侧壁导坑法

1—周边收敛 (B-C); 2—拱顶沉降 (A)

图7 隧道变形随施工步骤变化



(a) 两台阶预留核心土环向开挖法; (b) CRD 法; (c) 双侧壁导坑法

图 8 塑性区云图

如图 8(a)所示,当采用两台阶预留核心土环向开挖法时,隧道开挖贯通后,围岩塑性区广泛分布于整个断面。尤其是仰拱区域,围岩塑性变形程度较高且分布范围广泛,同时隧道左右两侧边墙处也出现了较为明显的塑性变形。

从图 8(b)可以看出,采用 CRD 法时,隧道开挖贯通后,围岩塑性区的分布范围相对较小,主要集中在隧道拱圈及两侧边墙处,仅在隧道拱肩位置产生了小范围的较大塑性变形。

图 8(c)表明,采用双侧壁导坑法时,隧道开挖贯通后,围岩塑性区的分布范围涵盖了隧道拱圈、左右两边墙以及左右仰拱拱脚,且整个拱圈与左右两边墙附近的围岩均产生了较大的塑性变形。

综合来看,在 3 种施工方法中,两台阶预留核心土环向开挖法引起的围岩塑性区最大,双侧壁导坑法次之,CRD 法最小。因此,从塑性区分布结果判断,CRD 法对围岩扰动最小,更有利于维持强风化岩隧道的稳定性。

4 经济及施工管理对比分析

在强风化岩公路隧道施工中,选择合适的施工方法对工程经济效益与管理效率至关重要。下面将从强风化岩特点出发,结合施工经济性(如成本、效率、资源消耗)和管理角度(如安全性、工序复杂性、风险控制),对 3 种方法进行深入对比分析。

4.1 经济性对比

基于系统的文献研究与丰富的工程实践经验,针对 3 种施工方法的经济性进行了细致对比分析,其详尽结果如表 3 所示^[10-11]。

由表 3 可知,在施工经济性方面,两台阶预留核心土环向开挖法初期投资低、施工速度快,但材料消耗大、后期维护成本高;CRD 法初期投资较高、施工速度适中,但材料消耗适中、后期维护成本低;双侧壁导坑法初期投资高、施工速度慢,材料消耗大、后期维护成本适中。

4.2 施工管理复杂性对比

在已有研究与工程实践经验支持下,经系统性分析,3 种施工方案的施工管理复杂性对比如表 4 所示^[12-13]。

由表 4 可知,在施工管理复杂性方面,两台阶预留核心土环向开挖法施工组织简单,但质量控制难度大、安全风险高;CRD 法施工组织较为复杂,质量控制适中、安全风险适中;双侧壁导坑法施工组织复杂,质量控制难度大、安全风险高。经对比分析强风化岩公路隧道 3 种施工方法,CRD 法在控制变形、减少围岩扰动及降低风险上优势显著。初期投资虽高,但长远来看可减少后期维护成本和工期延误风险。该法通过分部开挖和临时支撑,分解大断面隧道,减少围岩扰动范围,降低坍塌风险,控制围岩变形,提高支护质量。施工管理上,虽组织复杂,但合理计划与管

表 3 3 种施工方法经济性对比

施工方法	初期投资	施工速度	材料消耗	后期维护成本
两台阶预留核心土环向开挖法	较低(设备简单,支护简易)	较快(作业空间大,效率高)	大(围岩稳定性差,支护需求大)	高(对围岩扰动大,易生病害)
CRD 法	较高(需导洞、临时支撑,设备要求高)	适中(工序多,分部开挖)	适中(控制变形好,支护用量少)	低(扰动小,围岩自稳性好)
双侧壁导坑法	高(导坑多,临时支护工程量)	慢(工序最繁琐,分部最多)	大(临时结构多,支护要求高)	适中(控制变形较好,但结构复杂)

表 4 施工管理复杂性对比

施工方法	施工组织	质量控制	安全风险
两台阶预留核心土环向开挖法	简单(工序少,管理协调方便)	难度大(断面大,支护需及时,易坍塌)	高(对围岩扰动大,需加强监测)
CRD 法	较复杂(需开挖导洞、设临时支撑,工序多)	适中(分部开挖利于控变形,需保证临时支撑稳定)	适中(化大为小,扰动小,但临时支撑拆除有风险)
双侧壁导坑法	复杂(多导坑,多次临时支护与拆除,工序繁琐)	难度较大(重复作业多,核心土开挖是关键控制点)	高(易破坏应力平衡,临时支护拆除时风险高)

理可降低安全风险，保障质量。综合经济性和管理复杂性等因素，CRD 法是强风化岩公路隧道施工的优选。

5 结 论

(1) 变形位移控制方面：CRD 法在变形位移控制方面表现最优。数值模拟结果显示，CRD 法施工的隧道在周边收敛和拱顶沉降等关键指标上的变形量最小，能有效降低拱顶沉降风险，保持隧道结构的稳定性。相比之下，两台阶预留核心土环向开挖法引起的变形量最大，而双侧壁导坑法介于两者之间。

(2) 塑性区分布方面：CRD 法显著减少了围岩的塑性区分布范围。在 3 种施工方法中，CRD 法使得隧道拱圈及两侧边墙处的围岩塑性变形最小，围岩稳定性最佳。两台阶预留核心土环向开挖法导致围岩塑性区广泛分布于整个断面，而双侧壁导坑法的塑性区分布范围也大于 CRD 法。

(3) 经济与施工管理方面：CRD 法虽初期投资高、组织复杂，但能减少后期成本和工期风险，材料消耗与施工速度适中，长期效益显著；两台阶法初期投资低、速度快，但材料消耗大、后期成本高、安全风险大；双侧壁导坑法初期投资高、速度慢、材料消耗大，后期维护成本适中，安全风险高。

综上所述，CRD 法凭借其在变形位移控制、塑性区分布优化以及经济与施工管理方面的综合优势，是强风化岩公路隧道施工的最优选择。这一结论为类似地质条件下的隧道工程建设提供了理论支持和技术指导。

参考文献：

[1] 袁刚,徐金峰,李守仁,等. 强风化花岗岩混合岩上硬下

软地层公路隧道施工优化[J]. 公路交通科技,2024,41(7):153-162.

[2] 汪碧云,李小彤,杨佳奇,等. 强风化花岗岩隧道洞口段施工安全技术研究[J]. 山西建筑,2020,46(7):3-5.

[3] 衣忠强. 浅埋软弱围岩隧道围岩变形及施工方法探讨[J]. 四川建筑,2025,45(3):112-114.

[4] 李杨. 软弱围岩隧道施工方法及施工工艺[J]. 工程技术研究,2024,9(3):32-34.

[5] 贾江波,王博,刘亮. 大跨度黄土隧道施工方法对比分析[J]. 公路交通科技(应用技术版),2017,13(7):63-65.

[6] 丁祥,侯宗政,朱永全,等. 第三系富水弱胶结砂岩隧道施工方案对比[J]. 铁道建筑,2023,63(11):102-106.

[7] 孙科. 公路隧道软弱围岩不同开挖方法对比[J]. 福建交通科技,2021(4):30-33.

[8] 王圣涛. 卵石堆积层力学特性及隧道施工方法对比[J]. 建筑技术开发,2021,48(9):60-62.

[9] 金扬,阿尔木来,杜嘉轩,等. 浅埋超大断面黄土隧道CRD法施工力学特性分析[J]. 广东水利水电,2025(7):87-94.

[10] 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.

[11] 宋雄,蒋文杰,左双英. 基于数值模拟的软岩双连拱隧道施工工法比选分析[J]. 贵州科学,2019,37(3):81-85.

[12] 王思洋,陈道政,李鹏. 软弱围岩隧道两种开挖方法的对比分析及研究[J]. 天津理工大学报,2020,36(5):16-19.

[13] 秦煜杰,黎应书,李微. 软弱围岩隧道开挖方法比选及数值模拟研究[J]. 水力发电,2022,48(5):84-89.