

微扰动掘进条件下软弱围岩隧道 掌子面开挖坡角优化设计

张 江

(中煤中原(天津)建设监理咨询有限公司,天津 300121)

摘要:为了明确软弱围岩隧道微扰动机械掘进新工法中掌子面分部开挖的最佳坡角,以四川某高速公路沿线隧道为研究对象,通过融合筒仓理论与摩尔-库伦准则建立极限平衡模型,结合数值仿真开展Ⅳ、Ⅴ级围岩参数敏感性分析及极限平衡验证等方法,系统研究了掌子面坡角的优化设计。结果表明:Ⅳ级围岩在安全系数满足规范要求时,掌子面临界坡度角表现出显著的地层依赖性,变化区间为 $55.0^{\circ} \sim 60.5^{\circ}$;Ⅴ级围岩若需保证掌子面极限平衡安全系数 ≥ 1 ,开挖坡角需控制在 35.2° 以内,且坡角增大时需同步施加机械支护措施。本文成果可为软弱围岩隧道机械化施工的坡角设计与稳定性控制提供理论依据。

关键词:软弱围岩;微扰动;坡角设计;极限平衡分析;数值模拟

中图分类号: TU721.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)01-0080-07

doi: 10.13402/j.gejs.2026.01.011

Optimal design of tunnel face slope angle in weak surrounding rock under micro-disturbance tunneling conditions

ZHANG Jiang

(Middling Coal Zhongyuan(Tianjin)Construction Supervision Consulting Co.,Ltd.,Tianjin 300121,China)

Abstract: In order to clarify the optimal slope angle for the sectional excavation of tunnel faces in the new micro-disturbance mechanical tunneling method for weak surrounding rock, in this study a tunnel along a highway in Sichuan is studied. By integrating silo theory with the Mohr-Coulomb criterion to establish a limit equilibrium model and combining with numerical simulations to conduct sensitivity analysis of Class IV and Class V surrounding rock parameters and limit equilibrium verification methods, the optimal design of the tunnel face slope angle is systematically studied. The results indicate that for Class IV surrounding rock, when the safety factor meets the code requirements, the slope angle of the tunnel face exhibits significant stratigraphic dependency, with a variation range of $55.0^{\circ} \sim 60.5^{\circ}$. For Class V surrounding rock, it is required to ensure a limit equilibrium safety factor of the tunnel face ≥ 1 , the excavation slope angle must be controlled within 35.2° , and mechanical support measures must be applied simultaneously as the slope angle increases. The findings of this study can provide a theoretical basis for the slope angle design and stability control of mechanized construction in tunnels with weak surrounding rock.

Key words: weak surrounding rock; micro-disturbance; slope angle design; limit equilibrium analysis; numerical simulation

软弱围岩隧道施工中,掌子面稳定性直接关系到工程安全与施工效率。传统掘进工艺在软弱围

岩条件下易引发围岩大变形甚至坍塌事故,而微扰动掘进技术通过精准控制机械切削参数可显著

收稿日期: 2025-06-19

作者简介: 张江(1998—),男,助理工程师,从事隧道相关的设计和监理工作。

降低施工扰动，但其工艺参数的量化设计仍缺乏系统研究。因此，针对软弱围岩倾斜隧道开挖面稳定性问题展开深入研究十分必要。

国内外众多学者开展了相关研究。徐前卫等^[1]采用模型试验与数值模拟相结合的方法，对断层区隧道围岩稳定性问题进行研究，发现Ⅳ级围岩中隧道开挖时，断层的存在会导致下盘岩体出现悬挑破坏，同时应力重分布范围扩大；无断层工况下，破坏则主要表现为拱腰剪切破坏和渐进式应力外移特征。臧延伟等^[2]对坡道工况下矩形顶管施工稳定性问题进行研究，发现基于改进筒仓模型与极限平衡理论建立的失稳分析方法，能有效量化坡度角与土体参数对支护压力的影响。王恺等^[3]采用数值模拟方法，对风化Ⅴ级围岩隧道洞口稳定性问题进行研究，发现当仰坡坡角超过40°时，需实施纵向12 m范围内的预加固措施，这可有效控制塑性区扩展并降低竖向沉降量，且该临界参数为类似地质条件下洞口段支护设计提供了量化依据。莫佩浦等^[4]采用模型试验与数值模拟相结合的方法，对倾斜盾构隧道开挖面稳定性问题进行研究，发现隧道倾角与支护力需求呈显著正相关，且失稳模式随坡度变化呈现非线性特征，该量化规律为复杂坡度隧道支护设计提供了临界参数阈值。赵智涛等^[5]对地铁爬坡开挖稳定性问题进行研究，发现当采用合理超前支护时，爬坡工况与水平开挖的掌子面最大位移量差异不超过15%，且影响区范围扩展率控制在8%~12%，验证了坡度不大于15°的倾斜开挖在等效支护条件下具有与水平开挖相当的稳定性。

本文以四川某高速公路沿线隧道为研究对象，采用极限平衡理论分析和数值模拟相结合的方法，系统探究掌子面开挖坡角与围岩变形的动态响应机制，确定掌子面需施加机械支护时的参数最佳组合，以期对软弱围岩隧道微扰动施工的参数优化与实践提供理论支撑。

1 工程概况

某高速公路隧道位于四川省平武县境内，隧址区地处四川盆地西北部，青藏高原向四川盆地过渡的东缘地带，场地位于近龙门山脉中部，山脉走向呈南北向，山岭海拔标高一般为1 000~1 500 m，属构造侵蚀剥蚀中山峡谷地貌。崖悬壁陡，沟谷多呈Ⅴ型。仅局部为河流侵蚀堆积地形，沿松桥河谷底呈带状展布，地形较平坦。

根据现场地质勘察报告，隧址区大地构造位置隶属于扬子地台、松潘甘孜地槽褶皱系与秦岭地槽褶皱系的交会部位，位于虎牙断裂带东侧，横跨龙门山断裂带，地质构造复杂。勘察走廊带内断裂构造以龙门山断裂最为突出，其断裂规模大、破碎带宽、活动性强。隧道附近主要发育高庄复向斜、轿子顶复背斜等构造；褶皱构造紧密，揉皱发育，岩体较破碎，岩层产状变化较大。隧道围岩分级如表1所示。

2 理论计算

2.1 理论基础

断层破碎带与地下水是掌子面稳定性分析中不可忽略的关键因素，同时影响软弱围岩隧道微

表1 隧道围岩分级

围岩级别	地层代号	岩土名称	主要工程地质、水文地质特征	长度/m	
				左线	右线
V级	Q ₄ ^{c+dl}	块石、碎石	呈松散~松软结构；地下水不甚发育，局部呈淋雨状或细股状，雨季洞口沟谷可能与地表水关系密切，可能出现股状涌水	463	513
V级	S _m ³	千枚岩、薄层泥质灰岩	强~中风化段；柔性剪切带、向斜核部，岩石极软~较坚硬，岩体破碎~极破碎，呈散体~碎裂结构；地下水相对发育，主要呈滴水状，局部淋雨	463	513
Ⅳ级	S _m ³	千枚岩、泥质灰岩薄层	中~微风化段；岩石软~较软，岩体破碎~较破碎，呈镶嵌碎裂结构；平水期主要呈滴水状或线状，雨季局部呈小股状水	424	348

扰动机械掘进工法中掌子面的开挖倾角的确定和施工安全性。HORM 于 1961 年首次提出均匀软质地层隧道开挖面稳定性的计算模型(图 1)^[6-7]。其中: A、B、C、D 点围成的闭合区域为隧道开挖面, E、F、G、H 围成的闭合区域为地表面; ABCDIJ 为开挖面失稳时的下滑土体, F_{CDIJ} 、 F_{ACJ} 、 F_{BDI} 为滑动面, $F_{ABIJ-EFGH}$ 为下滑土体 F_{ABCDIJ} 带动的上部下沉土体; θ 为土体破裂角, ($^{\circ}$); α 为楔形块的破裂角, ($^{\circ}$); P 为楔形块上方作用荷载, kN; G 为楔形块自重, kN; T_s 为楔块两侧侧向剪力, kN; T 为滑动面上的剪力, kN; N 为滑动面上的法向压力, kN; b_z 为高度 z 处对应的楔块侧面宽度, m。

基于图 1 所示模型, 计算中假定圆形隧道开挖面面积与正方形 $FABCD$ 面积相等。此时, 楔形体的宽即为圆形隧道直径 D_r (m), 楔形块上方荷载可表示为

$$P = \sigma A = \sigma D_r (E + D_r \cot \alpha) \quad (1)$$

式中: P 为楔形块上方作用荷载, MPa; σ 为楔形块上方应力, MPa; E 为计算楔形体长度的过渡值, m; α 为楔形块的破裂角, ($^{\circ}$); A 为楔形块上方作用面积, m^2 。

楔形块自重:

$$G = \frac{1}{2} \gamma D_r^3 \cot \alpha \quad (2)$$

式中: G 为楔形块自重, MPa; γ 为土的天然容重, kN/m^3 。

根据摩尔库伦准则, 楔块两侧滑动面上任一点的剪应力和法向应力为

$$\tau(y, z) = c + \sigma_x(y, z) \tan \varphi \quad (3)$$

式中: $\sigma_x(y, z)$ 为滑动面上任一点的法向应力, MPa; $\tau(y, z)$ 为滑动面上任一点的剪应力, MPa; φ 为土体内摩擦角, ($^{\circ}$); c 为黏聚力, kPa。

假定楔块的竖向应力沿深度呈线性分布, 即:

$$K_0 = \frac{\sigma_x(y, z)}{\sigma_z(y, z)} \quad (4)$$

式中: K_0 为侧向压力系数; $\sigma_z(y, z)$ 为滑动面上任一点的法向应力, MPa。

可得剪应力随深度 z 的变化关系:

$$\tau(z) = c + K_0 \tan \varphi \left[(D_r - z) \gamma + \frac{z}{D_r} \sigma \right] \quad (5)$$

式中: $\tau(z)$ 为楔形块的剪应力, MPa。

楔块两侧侧向剪力:

$$T_s = 2 \int_0^{D_r} \tau(z) b(z) dz \quad (6)$$

$$b(z) = z \cot \alpha \quad (7)$$

式中: T_s 为楔块两侧侧向剪力, MPa; $b(z)$ 为高度 z 处对应的楔块侧面宽度, m。

即楔块两侧侧向剪力:

$$T_s = D_r^2 \cot \alpha \left(c + K_0 \tan \varphi \frac{2\sigma + D_r \gamma}{3} \right) \quad (8)$$

根据摩尔库伦准则, 针对倾斜滑动面建立的关系式如下:

$$T = N \tan \varphi + c \frac{D_r^2}{\sin \alpha} \quad (9)$$

式中: T 为滑动面上的剪力, kN; N 为滑动面上的法向压力, kN。

因此, 滑动楔块体所受下滑力和抗滑力可分别表示为

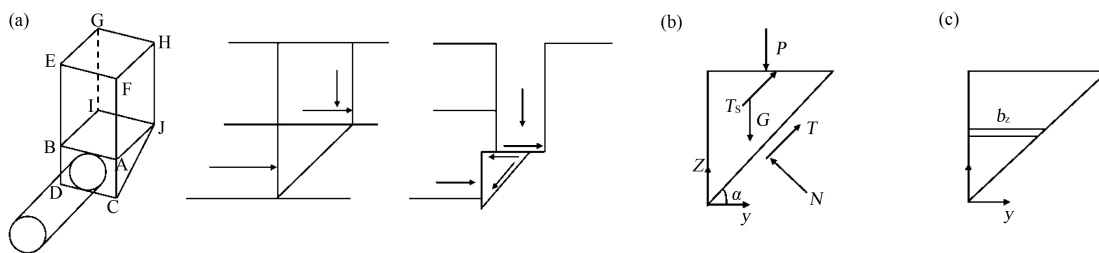
$$F = T_s + T \quad (10)$$

$$F = (P + G) \sin \alpha \quad (11)$$

式中: $T_{\text{抗滑力}}$ 为滑动楔块体所受抗滑力, kN; $T_{\text{下滑力}}$ 为滑动楔块体所受下滑力, kN; G 为楔块体自重, MPa。

根据与 N 相同方向的力平衡条件, 可得:

$$N = (P + G) \cos \alpha \quad (12)$$



(a) 隧道掌子面稳定模型; (b) 掌子面楔形滑动体受力分析; (c) 滑动楔形体侧壁应力分析

图 1 隧道施工掌子面稳定性模型

根据掌子面安全系数的定义，可得：

$$K = \frac{F_{\text{抗滑力}}}{F_{\text{下滑力}}}$$

(13)

式中： K 为掌子面安全系数。

联立式(12)、(13)，可得掌子面安全系数：

$$K = \frac{D_r^2 \cot \alpha \left(c + K_0 \tan \varphi \frac{2\sigma_z + D_r \gamma}{3} \right) + [(P + G) \cos \alpha] \tan \varphi + c \frac{D_r^2}{\sin \alpha}}{(P + G) \sin \alpha}$$

(14)

2.2 掌子面极限平衡计算

在既有理论框架的基础上，通过现场岩层物理力学参数测试与极限平衡理论的耦合分析，建立掌子面稳定性评价体系。隧道主要情况如下：

1) 隧道洞身依次穿过危关组上段(D_w^2)、危关组下段(D_w^1)、罗让沟组(T_{lr})、茂县群下段(S_{ml})，其岩性主要由地层中的绢云千枚岩、薄层变质砂岩、薄层~中厚层状灰岩及断层碎裂岩组成。隧道围岩以极软岩~软质岩为主，局部为较软岩。

结合现场地质勘察资料，选取最不利工况进行掌子面稳定性验算，共确定以下安全性验证参数，并分为5组进行计算，具体如表2所示。

基于极限平衡理论的计算分析,将各岩组物理力学参数代入修正的 Hoek-Brown 强度准则公式后,计算结果如表3所示。研究表明:在隧道安全施工控制中,掌子面稳定安全系数 K 需满足 $K \geq 1$ 的基本要求(其中 $K=1$ 表征极限平衡临界状态)。由表3可知:当安全系数满足规范要求($K=1.05 \sim 1.15$)时,掌子面临界坡度角呈现明显的地层依赖性,其取值范围为 $55.2^\circ \pm 0.8^\circ$ (千枚岩段)~ $60.3^\circ \pm 0.2^\circ$ (灰岩段),整体变化区间为 $55.0^\circ \sim 60.5^\circ$ 。具体物理力学参

数不同时,掌子面临界坡度角的取值也可优化:地质条件较好时,可适当加大掌子面开挖坡角。

3 数值模拟

3.1 模型建立

采用 Midas GTS 软件建立三维有限元模型，模拟超前护盾环向保护下隧道上下台阶分步开挖过程，分析开挖后护盾和掌子面土体的力学特性^[8-9]。模型尺寸为 50 m×40 m×50 m(长×宽×高)，整体模型和相关参数如图2所示，其中 $a/b = 1.50 \sim 1.65$ 。在隧道现场分别对各围岩级别取样，通过室内单轴、三轴压缩试验测得其物理力学参数；支护参数根据隧道设计方案选取，具体参数如表4所示。

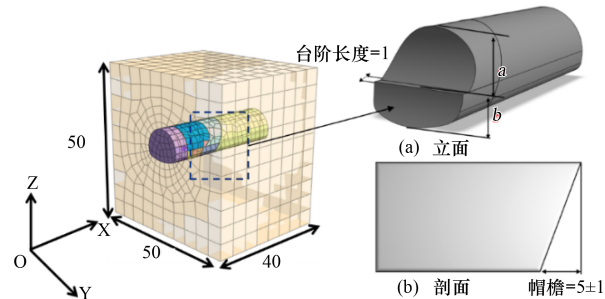


图2 数值计算模型

表2 计算工况参数选取

岩体类型	岩体结构	容重/(kN·m ⁻³)	内摩擦角/(°)	泊松比	弹性模量/GPa
D_w^1 绢云千枚岩	中~薄层状	20	25	0.38	1.2
T_{lr} 灰岩	层状碎裂	21	31	0.50	1.7
断层破碎1	碎裂~散粒	18	20	0.40	1.0
S_{ml} 绢云千枚岩	中~薄层状	20	27	0.35	1.5
断层破碎带2	碎裂~散粒	19	22	0.40	1.2

表3 理论计算结果

岩体类型	应力/kPa	荷载/kN	自重/kN	临界坡度/(°)	安全系数
D_w^1 绢云千枚岩	51.35	5 502.0	8 156	58.5	1.008 4
T_{lr} 灰岩	60.34	6 121.0	7 907	60.5	1.007 7
断层破碎1	33.38	3 929.3	8 388	55.0	1.053 9
S_{ml} 绢云千枚岩	51.35	5 427.0	7 997	59.0	1.021 6
断层破碎带2	42.36	4 855.0	8 529	56.0	1.004 2

表 4 模型建模物理参数

名称	容重/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/($^{\circ}$)	黏聚力/MPa
护盾	78.5	200.0	0.30	—	—
衬砌	24.0	34.5	0.30	—	—
V 级围岩段	22.0	1.0	0.45	27	0.005
IV 级围岩段	24.0	2.0	0.32	35	0.200

3.2 围岩变形计算

当选取 IV 级围岩段进行模拟时, 掌子面坡度模拟结果如图 3 所示。由图 3 可知: 当围岩条件较好时, 掌子面开挖坡度可以增大到 $60^{\circ} \sim 70^{\circ}$ 。而 V 级围岩段包含断层破碎带区域, 其破碎带内碎石因黏聚力低、整体性差, 基本不具备自稳能力。数值模拟过程中, 无论掌子面角度如何设定, 模型均无法收敛。因此, 需在隧道开挖面提供机械支护力, 并针对自动掘进机掌子面纵向加力系统开展模拟计算。

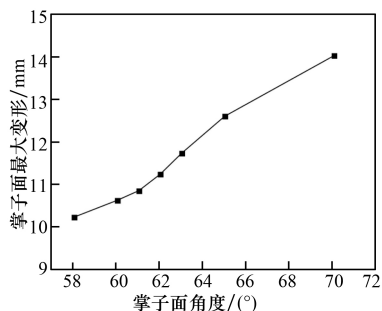
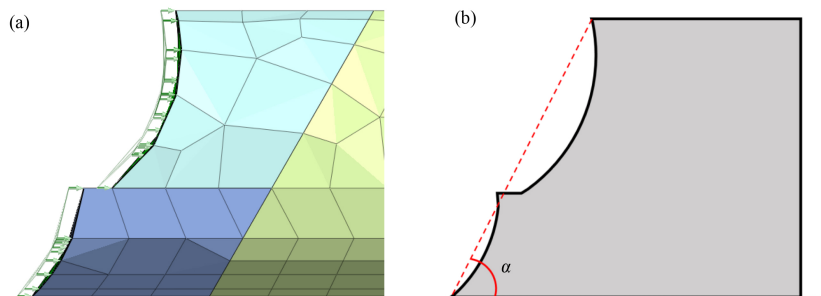


图 3 IV 级围岩段掌子面变形与开挖倾角的变化规律

3.3 掌子面支护力分析

开挖面的破坏主要由纵向变形引起, 因此在开挖面开展全封闭纵向加力的模拟, 如图 4 所示。其中 α 为掌子面坡度, ($^{\circ}$)。为合理确定该机械支护力, 针对不同掌子面坡度开展有限元模拟, 得到合理的掌子面坡度取值范围及其对应的机械支护力。



(a) 掌子面纵向封闭加力; (b) 综合坡率示意

图 4 掌子面纵向封闭加力

有限元模型掌子面综合坡率选取: 55° 、 57° 、 60° 、 63° 、 65° 。针对各坡度开展模型试算, 找到使模型收敛(即掌子面稳定不发生破坏)的最小机械支护力。隧道采用上下台阶开挖时, 上下台阶开挖面的极限机械支护力取值存在差异, 因此定义上台阶支护力为 P_s 、下台阶支护力为 P_x 两个变量。通过试算确定上台阶极限机械支护力 P_s 约为 10 kPa, 故将 P_s 的模拟试验值范围设定为 0、5、10、15、20、25 kPa(步长为 5 kPa)。针对每个 P_s 取值, 计算得到使模型收敛的最小下台阶支护力 P_{smin} 。进一步针对每个确定的角度, 开展上下台阶支护力(P_s 、 P_x)的双因素正交组合分析, 得到不同坡度下上下台阶施加极限支护应力时掌子面的变形情况如图 5 所示, 其中标注数值为对应的掌子面的最大纵向变形量。

极限支护力应遵循的原则: 1) 在保证安全的前提下, 极限支护压力和掌子面最大纵向变形应尽可能小; 2) 上下台阶极限支护压力相差不宜过大。由图 5 可知: 不同掌子面倾斜角度下的最佳机械支护力组合, 当倾斜角度为 55° 时, $P_s = 10 \text{ kPa}$ 、 $P_x = 20 \text{ kPa}$; 当倾斜角度为 57° 时, $P_s = 20 \text{ kPa}$ 、 $P_x = 20 \text{ kPa}$; 当倾斜角度为 60° 时, $P_s = 10 \text{ kPa}$ 、 $P_x = 15 \text{ kPa}$; 当倾斜角度为 63° 时, $P_s = 25 \text{ kPa}$ 、 $P_x = 25 \text{ kPa}$; 当倾斜角度为 65° 时, $P_s = 20 \text{ kPa}$ 、 $P_x = 20 \text{ kPa}$ 。

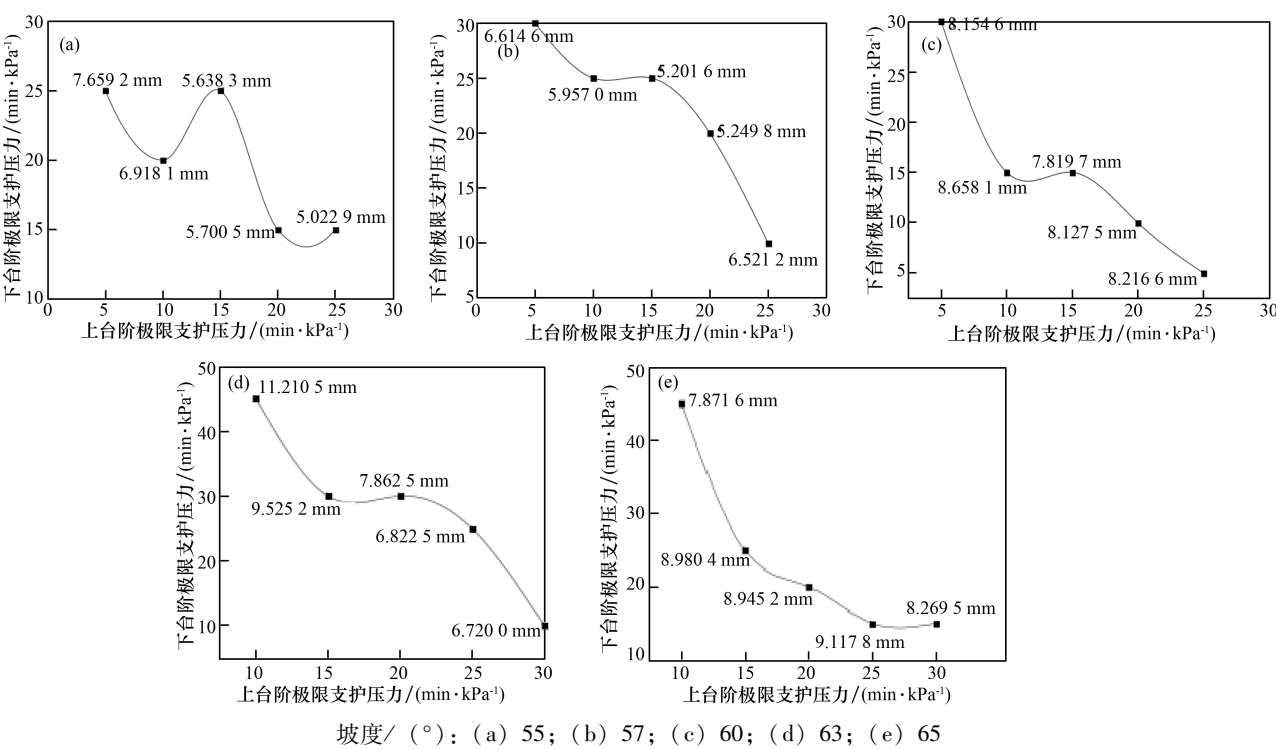


图 5 不同倾斜角度下掌子面的极限力

4 极限平衡验证分析

为补充验证数值模拟计算结果，基于前期理论分析结果，采用新的隧道工程实例现场地勘获取的岩层物理力学参数开展计算。将围岩划分为Ⅴ级和Ⅳ级两个等级，进行掌子面极限平衡验算。计算所采用的围岩物理力学参数如表 5 所示。

将各开挖坡度代入理论计算公式后，计算结果如表 6 所示。为保证施工安全，隧道掌子面安

表 5 围岩物理力学参数

围岩级别	容重/ (kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	内摩擦角/(°)
Ⅴ	22	1	0.45	27
Ⅳ	24	2	0.32	35

全系数 K 需大于 1；而在理想状态下，极限平衡状态需近似为 1 (即 $K = 1$)。

由表 6 可知：对于隧道Ⅴ级围岩，当掌子面极限平衡安全系数 ≥ 1 时，开挖坡度应不大于 35.2° ，

表 6 理论计算结果

围岩	应力/kPa	荷载/kN	自重/kN	坡度/(°)	安全系数
Ⅴ级	139.73	28 758	20 910	35.2	1.003 0
	139.73	16 450	10 252	55.0	0.547 1
	139.73	15 591	9 508	57.0	0.516 1
	139.73	14 770	8 797	59.0	0.486 6
	139.73	13 983	8 116	60.0	0.472 4
Ⅳ级	62.59	6 438.3	9 221	60.0	1.116 9
	62.59	6 092.7	8 492	62.0	1.085 5
	62.59	5 759.6	7 790	64.0	1.058 2
	62.59	5 437.7	7 111	66.0	1.035 1
	62.59	5 125.6	6 453	68.0	1.016 5
	62.59	4 972.9	6 131	69.0	1.009 0
	62.59	4 822.2	5 813	70.0	0.996 9

此时掌子面安全性系数为 $K = 1.003$ 。根据前期计算,参考开挖坡度取值范围为 $55^\circ \sim 60^\circ$,该区间内安全系数随开挖坡度增大而变化。当开挖坡度为 55° 时, $K = 0.547\ 1$, 60° 时 $K = 0.472\ 4$,整体呈逐渐减小趋势。此范围内安全系数均小于 1,无法保证掌子面开挖时的稳定性,需额外施加机械力辅助稳定掌子面。

对于隧道Ⅳ级围岩,当掌子面开挖坡度由 62° 增大至 69° 时,安全系数由 1.085 5 减小至 1.009 0,仍能满足极限平衡要求;但当开挖坡度增至 70° 时,安全系数 $K = 0.996\ 9 < 1$,无法保障安全施工。考虑到施工过程中存在不确定安全因素,建议掌子面开挖坡度不超过 60.0° 为宜。

5 结 论

(1) 在假设破裂角的计算时,千枚岩地层隧道开挖掌子面坡度可达到 $58.5^\circ \sim 60.5^\circ$;对于断层破碎带段隧道掌子面开挖,该坡度值会适当降低。

(2) 当掌子面开挖坡度在 $55^\circ \sim 60^\circ$ 内取值并进行数值模拟时,前期计算结果可满足新隧道实例中Ⅳ级围岩的支护要求。对于Ⅴ级围岩,需通过机械加力维持掌子面稳定。将坡度控制在 $55^\circ \sim 60^\circ$ 时,所需支护压力较小;当坡度增至 63° 时,上下台阶所需支护力均为 25 kPa,为保障工程施工安全,可结合实际情况适当增大支护力。

(3) 对于隧道Ⅴ级围岩,当安全系数不小于 1 时,开挖坡度应不大于 35.2° 。从施工安全性和

便捷性考虑,需额外施加机械支护力辅助稳定掌子面。隧道Ⅳ级围岩在开挖坡度不大于 69° 时,掌子面极限平衡状态即可满足要求。

参考文献:

- [1] 徐前卫,程盼盼,朱合华,等. 软弱围岩隧道开挖应力扰动特征试验及数值模拟[J]. 现代隧道技术,2016,53(6):154-164.
- [2] 臧延伟,孙华俊,严佳佳,等. 矩形顶管上坡掘进开挖面稳定及支护压力研究[J]. 隧道建设(中英文),2023,43(6):959-967.
- [3] 王恺,邓可,李湘. 山岭公路隧道不同坡角下仰坡稳定性分析[J]. 湖南交通科技,2018,44(4):142-146;172.
- [4] 莫佩浦,尹鑫晟,丁智,等. 倾斜盾构隧道掌子面稳定性研究综述[J]. 低温建筑技术,2025,47(2):62-67.
- [5] 赵智涛,曹伍富,王霆. 隧道爬坡开挖与水平开挖掌子面稳定性对比分析[J]. 现代隧道技术,2018,55(6):94-100.
- [6] 王志杰,吴凡,王如磊,等. 深埋风积沙地层隧道掌子面失稳特征研究[J]. 铁道工程学报,2020,37(1):85-92.
- [7] 程诚,赵文,王迎超,等. 密砂地层盾构隧道纵坡开挖面稳定性理论分析[J]. 中国公路学报,2023,36(4):157-168.
- [8] 谭子安. 倾斜隧道掌子面三维稳定性极限上限分析[D]. 长沙:中南大学,2022.
- [9] 王俊,何川,王闯,等. 砂土地层土压盾构隧道施工掌子面稳定性研究[J]. 岩土工程学报,2018,40(1):177-185.