

环形开挖预留核心土施工对围岩稳定性影响研究

李 佩

(中铁十六局集团路桥工程有限公司, 北京市 101500)

摘 要: 目的为解决隧道施工中围岩稳定性问题,特别是深埋、破碎围岩及高地应力条件下的施工难题,系统分析环形开挖预留核心土法中核心土长度、高度及顶面宽度等隧道围岩稳定性的影响。方法以深南铁路某隧道工程为背景,采用有限元数值模拟方法,建立三维隧道开挖模型,分别设置不同核心土长度、高度和顶面宽度的多组工况,系统计算并分析掌子面纵向位移、最大拱腰收敛值、最大拱顶沉降的变化规律,评估围岩稳定性对核心土尺寸的响应特征,并初步分析核心土自身稳定性。结论核心土尺寸参数对围岩变形具有显著影响。增大核心土长度、高度和顶面宽度均能有效减小掌子面位移、拱顶沉降与拱腰收敛,尤其对核心土高度以下区域的位移控制作用更为明显。对于依托的V级围岩条件,在保证核心土自身稳定和施工可行性的前提下,建议核心土高度取隧道断面高度的55%~65%,顶面宽度取底边宽度的55%~65%,并在设备与空间允许条件下尽量增加核心土长度,以实现安全与经济的平衡。

关键词: 环形开挖预留核心土法;隧道施工;核心土高度;核心土长度;围岩稳定性

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)06-0099-06

Study on Influence of Reserved Core Soil Construction in Circular Excavation on Stability of Surrounding Rock

LI Pei

(China Railway 16th Bureau Group Road and Bridge Engineering Co., Ltd., Beijing 101500, China)

Abstract: To address the stability issues of surrounding rock during tunnel construction, particularly the challenges under deep burial, fractured rock masses and high geostress conditions, the influence of core soil length, height and top width in the reserved core soil construction in circular excavation on the stability of surrounding rock is systematically analyzed. Taking a tunnel project in the Shenzhen - Nanning Railway as the background, a three-dimensional tunnel excavation model is established using finite element numerical simulation. Multiple sets of working conditions are configured with varying core soil lengths, heights and top widths. The variation laws of the longitudinal displacement of the tunnel face, the convergence value of the maximum arch waist and the settlement of the maximum arch top are systematically calculated and analyzed to assess the response characteristics of surrounding rock stability to core soil dimensions and preliminarily analyze the self-stability of the core soil. The conclusion shows that the dimensional parameters of the core soil significantly influence the deformation of surrounding rock. Increasing the core soil length, height and top width can effectively reduce the tunnel face displacement, arch roof settlement and arch waist convergence. Especially, the displacement control effect in the area below the core soil height is more obvious. Relying on the V-grade surrounding rock conditions, and under the premise of ensuring the stability of the core soil itself and the feasibility of construction, it is recommended that the core soil height be set at 55%~65% of the tunnel cross-section height, and the top width be at 55%~65% of the bottom width, and the core soil length be maximized within equipment and spatial constraints to achieve a balance between safety and economy.

Keywords: reserved core soil method in circular excavation; tunnel construction; core soil height; core soil length; surrounding rock stability

0 引言

随着我国基础设施建设的不断推进,地下工程

的开发规模和施工复杂性日益增加。在隧道、地铁等地下工程的施工过程中,围岩稳定性是影响工程安全和施工效率的关键因素,特别是对深埋、破碎围岩、高地应力及超长隧道施工而言,极大地增加施工风险和难度,围岩稳定性控制对施工进度、施工安全及施工进度的影响更为显著^[1-2]。当前,根据隧道的

收稿日期: 2025-09-29

作者简介: 李佩(1985-),男,本科,从事路桥工程施工管理工作。

地质条件、断面尺寸、施工设备以及工程要求等因素,隧道围岩的开挖方式主要有环形开挖预留核心土法(加强锁脚)、三台阶临时仰拱法、三台阶临时仰拱法(设临时钢架)、三台阶临时仰拱法(带纤维玻璃锚杆加固)、三台阶法(加强锁脚)、三台阶法、台阶法及全断面法等,其中环形开挖预留核心土法,具有施工灵活性高、对围岩扰动相对较小及施工风险小等优点,在复杂地质条件下的地下工程中得到了广泛应用^[3-4]。环形开挖预留核心土法通过分步开挖及逐步支护的方式,减小对围岩的集中扰动,从而可以更好的维持围岩的自稳能力^[5]。然而,对于条件较差的隧道围岩而言,核心土作为施工过程中的临时支撑,其尺寸、形状和留设方式直接决定了掌子面的稳定性,合理的尺寸、形状和留设方式可以有效提供临时支撑,减少围岩暴露面积,维持围岩的自稳能力^[6-7]。基于此,以环形开挖预留核心土法施工为例,研究了预留核心土尺寸对隧道围岩稳定性的影响,以期更准确地分析施工过程中隧道围岩的变形规律,从而为优化施工方案提供理论依据。

1 环形开挖预留核心土法施工工艺

1.1 环形开挖预留核心土法

环形开挖预留核心土法是新奥法(新奥地利隧道施工方法)的一种施工方式^[8]。在隧道施工过程中,先沿着隧道的环向开挖出一个环形的断面,同时在隧道的中心部分保留一定体积的核心土。核心土在隧道中起到类似支撑的作用,维持隧道开挖面的稳定性,防止隧道围岩在开挖过程中发生坍塌^[9]。环形开挖预留核心土法通过步开挖的方式,显著的减少了围岩的暴露时间,且核心土的存在可以降低隧道围岩支护系统的复杂性及成本,该方法在软弱破碎岩层、土层或软弱围岩中均具备较好的适用性^[10]。

1.2 环形开挖预留核心土法施工方案

环形开挖预留核心土法将隧道开挖断面分为上部弧形导坑、两侧边墙导坑、两侧下部台阶、核心土以及下部仰拱5个开挖部,两侧边墙导坑、两侧下部台阶分两次开挖^[11-12]。环形开挖预留核心土法施工顺序见图1。

隧道超前支护完成后,进行隧道断面的顶部弧形导坑①区的弱爆破开挖,循环进尺不超过1榀钢架设计间距,并立即施作初期支护。顶部弧形导坑①区提前开挖可以释放围岩应力,为后续开挖创造

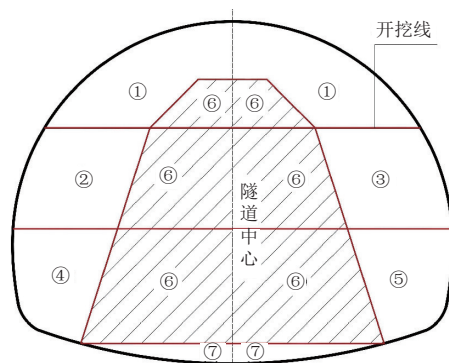


图1 环形开挖预留核心土法施工顺序

有利条件。两侧边墙导坑②区及③区位于隧道断面的两侧,紧邻上部弧形导坑的下方,在上部弧形导坑①区开挖一段长度并施作初期支护后,可分次弱爆破开挖两侧边墙导坑,同样需要及时施作初期支护,每循环进尺不超过2榀钢架设计间距。两侧边墙导坑开挖可以进一步释放围岩应力,并且可以为后续的下部开挖提供更多的操作空间^[13]。

两侧下部台阶④区及⑤区位于隧道断面的下部两侧,紧邻边墙导坑的下方。在边墙导坑开挖一段距离并施作初期支护后,采用弱爆破左右交错开挖④、⑤区,并施作初期支护。两侧下部台阶的开挖可以进一步扩大隧道的断面,为后续的核心土开挖提供更好的有利条件;同时,台阶的开挖范围较小,可以有效控制围岩的变形。

核心土⑥区为隧道断面的中心部分,分为上核心土和下核心土,通常采用分层开挖的方式。核心土⑥区是整个开挖过程中最重要的部分,起到支撑围岩、防止围岩坍塌的作用,因此核心土开挖时应遵循小范围、强支护的方式,以减少围岩的变形。

下部仰拱⑦区位于隧道断面的底部,紧贴核心土的正下方,为方便后续隧道内的机械施工,仰拱初支要及时闭合成环。

2 施工方案对围岩稳定性的模拟分析

2.1 有限元模型

以深南铁路某隧道环形开挖预留核心土施工为例,隧道围岩等级以Ⅳ、Ⅴ级为主,隧道平均埋深25.50 m,断面最大跨径14.80 m,高度12.6 m。为研究预留核心土施工方案对隧道围岩稳定性的影响,有限元模型中忽略地表坡度、隧道埋深等参数的影响,以隧道平均埋深为例,模型尺寸为130 m×20 m×65 m(长×宽×高),模型底部为固定边界,顶部为自由边界,其余为法向固定,切向自由边界^[14-15]。隧道环

形开挖预留核心土有限元模型见图 2。

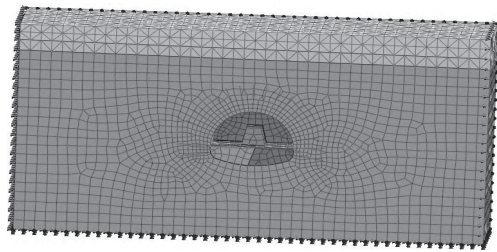


图 2 隧道环形开挖预留核心土有限元模型

V 级围岩采用摩尔-库伦模型, 锚杆、隧道初支采用弹性模型, 模型材料参数根据施工经验及地质资料取值, 并参考邻近区段类似工程经验数据与相关规范进行校核, 见表 1。

表 1 有限元模型参数

材料	容重/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^{\circ}$)	弹性模量/ kPa	泊松比
V 级围岩	18.5	100 000	23.5	120 000	0.40
锚杆	—	—	—	20 000 000	0.30
初衬	25.0	—	—	18 000 000	0.22

2.2 开挖计算步骤

隧道开挖采取小导管超前支护, 计算步骤为首先全断面开挖至 10.0 m, 超期小导管支护至 11.5 m, 预留核心土长度分别取 3.0、3.5、4.0、4.5 m, 核心土高度分别为隧道断面开挖高度的 50%、60%、70%、80%, 即 6.3、7.6、8.8、10.0 m, 核心土断面形式采用上窄下宽的梯形断面, 核心土底面宽度 10.0 m, 顶面宽度为底面宽度的 40%、50%、60%、70%, 即 4.0、5.0、6.0、7.0 m, 开挖至指定深度后施作隧道初砌支护。分别计算不同工况下掌子面各个位置处的纵向位移。计算工况见表 2。

表 2 预留核心土法施工计算方案

计算工况	核心土长度/m	核心土高度/m	核心土顶面宽度/m
工况一	3.0、3.5、4.0、4.5	7.6	5.0
工况二	3.5	6.3、7.6、8.8、10.0	5.0
工况三	3.5	7.6	4.0、5.0、6.0、7.0

3 预留核心土法数值模拟结果及分析

3.1 预留核心土长度的影响

3.1.1 隧道掌子面的纵向位移

预留核心土长度是指从隧道开挖面到核心土末端的距离。当核心土高度取 7.6 m, 顶面宽度 5.0 m, 不同预留核心土长度下掌子面的纵向位移见图 3。

掌子面的纵向位移反映了隧道开挖施工过程中对隧道围岩的扰动程度, 扰动程度越大, 掌子面的纵向位移就越大。根据图 3 的计算结果可知, 预留核

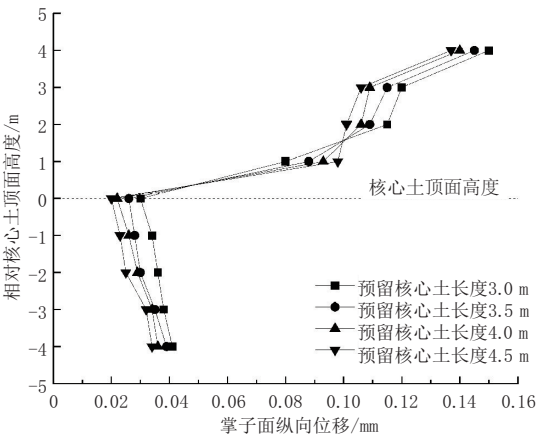


图 3 不同核心土长度下掌子面的纵向位移

心土长度对掌子面纵向位移的控制有显著影响, 核心土预留长度越大, 掌子面纵向位移越小, 且核心土顶面高度以上区域掌子面的位移量明显大于核心土顶面高度以下, 说明增加核心土长度对于掌子面纵向位移的控制作用显著。预留核心土长度由 3.0 m 增加至 4.5 m 时, 核心土顶面高度上 4.0 m 处的掌子面纵向位移分别为 0.151 mm 及 0.137 mm, 减少了 0.014 mm, 降幅达到 9.27%, 核心土顶面高度下 4.0 m 处的掌子面纵向位移分别为 0.041 mm 及 0.034 mm, 减少了 0.007 mm, 降幅为 17.07%, 说明核心土预留长度对核心土高度下掌子面纵向位移的限制作用更大。

预留核心土的存在为掌子面提供了额外的支撑, 减少了掌子面的暴露面积, 从而降低了围岩的变形和位移, 预留核心土长度越大, 可以更好地分散围岩的应力, 减少隧道围岩的应力集中现象, 从而有效控制掌子面的纵向位移。同时, 隧道施工过程中底部围岩以隆起变形为主, 核心土的存在使得底部围岩的应力分布更加均匀, 并限制底部围岩的隆起变形, 因此核心土预留长度对核心土高度下掌子面纵向位移的限制作用更为明显

3.1.2 隧道拱腰收敛值及拱顶沉降

当核心土高度取 7.6 m, 顶面宽度 5.0 m, 不同预留核心土长度下隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降变化规律见图 4。

根据图 4, 随着核心土长度的增加, 隧道拱腰收敛及拱顶沉降均呈明显下降趋势, 这与掌子面纵向位移的变化规律一致。核心土长度从 3.0 m 增至 4.5 m, 拱腰收敛减少了 24.5%, 拱顶沉降减少了 19.5%。核心土长度的增加提供了更长的纵向支撑区域, 有效抑制了开挖面前方及后方一定范围内围岩的松弛与变形, 对控制隧道整体断面收敛和拱部下沉效果显

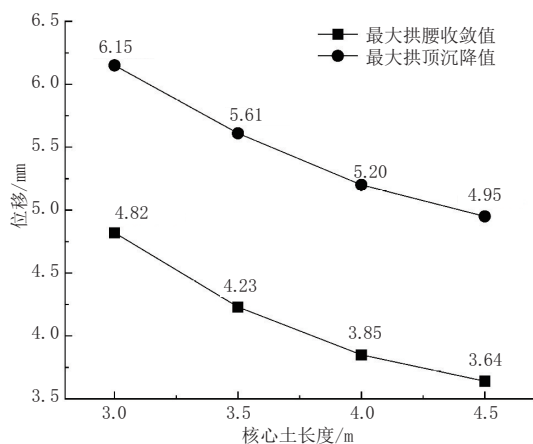


图4 预留核心土长度对隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降的影响

著。在施工空间与设备能力允许的情况下,适当增加核心土长度是控制变形的有效手段。

3.2 预留核心土高度的影响

3.2.1 隧道掌子面的纵向位移

预留核心土高度是指核心土顶部到隧道底部的垂直距离。当预留核心土长度为3.5 m,顶面宽度5.0 m,不同预留核心土高度下掌子面的纵向位移见图5。

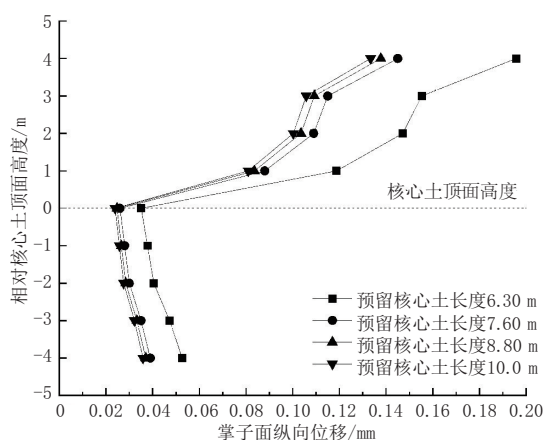


图5 不同预留核心土高度下掌子面的纵向位移

根据计算结果,预留核心土高度对掌子面的纵向位移有着显著影响,随着预留核心土高度的增加,核心土顶面高度上、下4.0 m范围内围岩的纵向位移逐步减小,核心土顶面高度以上掌子面的纵向位移显著高于核心土顶面高度以下,但降幅随着核心土高度的增加而有所减小,预留核心土高度为10.0 m时,即隧道断面高度的80%时,围岩的纵向位移最小。预留核心土高度由6.3 m增加至7.6 m时,预留核心土顶面高度上4.0 m处的掌子面纵向位移由0.196 mm降至0.145 mm,降幅为26.00%;而预留核心土高度由7.6 m增加至10.0 m时,预留核心土顶面高度上4.0 m处的掌子面纵向位移仅由0.145 mm减小

至0.133 mm,降幅仅为8.28%,降幅有所收窄。

随着预留核心土高度的增加,对掌子面的支撑作用增强,能够更有效地限制围岩的纵向位移,且较高的预留核心土高度可以更好地分散围岩的应力,减少应力集中点,从而降低围岩的变形和位移。但预留核心土高度增加至一定程度后,对围岩的改善效果逐步减低,因此在实际施工过程中,较高的核心土预留高度虽然可以进一步提高隧道围岩施工的安全性,但核心土预留高度的增加,势必会导致隧道顶部弧形导坑开挖断面过小,增加施工难度及施工周期。根据数值模拟结果,环形开挖预留核心土法核心土预留高度采用隧道断面开挖高度的60%较为经济合理。

3.2.2 隧道拱腰收敛值及拱顶沉降

当预留核心土长度为3.5 m,顶面宽度5.0 m,不同预留核心土高度下隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降变化规律见图6。

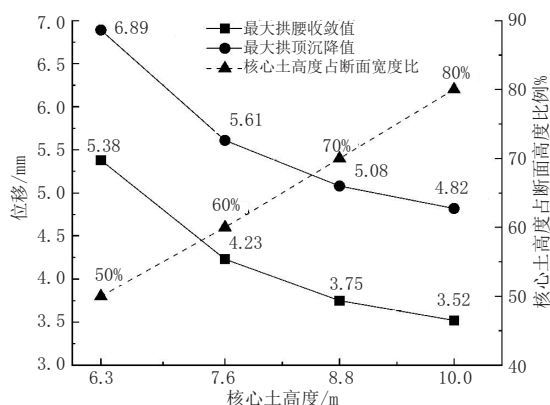


图6 预留核心土高度对隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降的影响

根据图6,增加核心土高度能显著减小拱腰收敛与拱顶沉降。核心土高度从50%增至60%断面高度时,变形控制效果最为明显,最大拱腰收敛值降幅21.4%,最大拱顶沉降降幅18.6%。继续增加高度至70%、80%,变形值虽继续降低,但降幅显著收窄,边际效益递减。这主要是因为随着核心土高度增加,增强了其对上部围岩的支撑作用,直接限制了拱部下沉和两侧收敛。然而,过高的核心土会过度压缩上部弧形导坑的作业空间,影响开挖和支护效率。因此,需在变形控制与施工效率间寻求平衡。

3.3 预留核心土宽度的影响

3.3.1 隧道掌子面的纵向位移

梯形断面是预留核心土最为常见的几何形状之一,梯形核心土的顶部较窄,而底部较宽,可以提供较强的底部支撑,而预留核心土宽度则是指梯形顶

部宽度。当预留核心土长度为 3.5 m, 核心土高度 7.6 m, 不同预留核心土顶面宽度下掌子面的纵向位移见图 7。

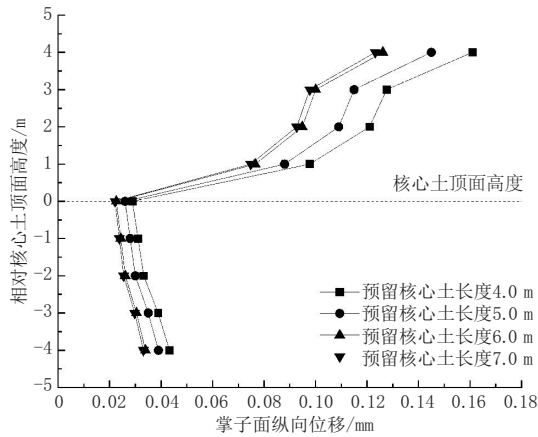


图 7 不同预留核心土顶面宽度下掌子面的纵向位移

根据计算结果, 预留核心土顶面宽度越大, 隧道围岩掌子面的纵向位移越小, 核心土顶面高度以上掌子面的纵向位移显著高于核心土顶面高度以下, 预留核心土宽度为 7.0 m, 即梯形断面顶面宽度为底边宽度的 70% 时, 掌子面的纵向位移最小, 且顶面宽度的增加对隧道围岩变形的限制作用随着宽度的增加有所减弱。以预留核心土高度以上 4.0 m 掌子面的纵向位移为例, 当预留核心土宽度由 6.0 m 增加至 7.0 m 时, 掌子面的纵向位移仅由 0.126 mm 减小至 0.123 mm, 降幅仅为 2.38%; 而当核心土宽度由 5.0 m 增加至 6.0 m 时, 掌子面的纵向位移由 0.145 mm 减小至 0.126 mm, 降幅达到 13.1%, 降幅较为明显。

核心土顶面宽度越大, 在底部宽度不变的情况下, 预留核心土的断面尺寸就越大, 从而更好的分散围岩的应力, 进而减小掌子面的纵向位移, 同时较大的断面尺寸可以更好的限制隧道底部的隆起变形, 减少应力集中点。从有限元模拟结果来看, 核心土宽度为 6.0 m 或 7.0 m 时, 对隧道围岩掌子面的限制作用相当, 且核心土顶面宽度为 6.0 m 时, 可以为两侧边墙导坑及两侧下部台阶微爆破施工提供更大的操作空间, 降低施工难度, 提高施工效率, 因此核心土顶面宽度不宜过大, 建议取梯形断面底边宽度的 60.0%。

3.3.2 隧道拱腰收敛值及拱顶沉降

当预留核心土长度为 3.5 m, 核心土高度 7.6 m, 不同预留核心土顶面宽度下隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降变化规律见图 8。

根据图 8, 增加核心土顶面宽度有利于控制隧道变形, 但其效果同样呈现显著的边际递减规律。宽

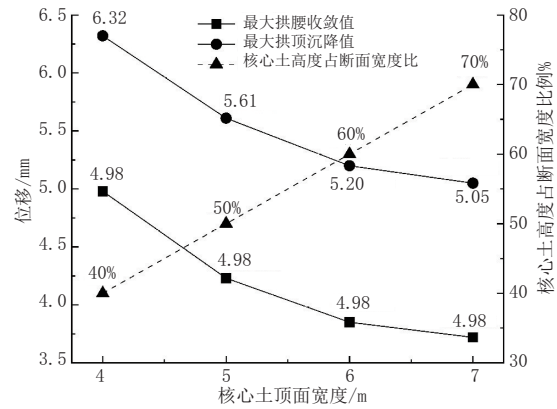


图 8 预留核心土顶面宽度对隧道最大拱腰收敛及最大拱顶沉降的影响

度从 40% 增至 50%、60% 时, 变形减小幅度较大, 从 60% 增至 70% 时, 最大拱腰收敛值仅再减小 3.4%, 沉降值减小 2.9%, 效果甚微。较宽的核心土提供了更大的横向支撑面积, 有助于改善围岩应力状态, 抑制侧向变形。然而, 顶面过宽会压缩两侧边墙导坑的作业空间, 增加开挖难度和工期。综合考虑变形控制与施工可操作, 预留核心土顶面宽度不宜过大。

3.4 软弱围岩条件下核心土自稳性初步分析

环形开挖预留核心土施工方案中核心土扮演着“临时支撑”的重要作用, 为脆弱的隧道开挖面与新施作的、尚未具备完全承载能力的支护结构之间, 提供一个关键的安全过渡, 从而显著提高在软弱、破碎、高应力围岩中隧道施工的安全性, 有效预防掌子面坍塌和过大变形。但在极软弱、破碎的围岩(如 V 级围岩)中, 核心土作为临时土柱, 其自身稳定性也至关重要。基于简化模型, 对典型尺寸核心土(高度 7.6 m、顶宽 5.0 m、底宽 10.0 m, 长度 3.5 m)在 V 级围岩参数下的稳定性进行了初步验算。参照临时工程稳定性要求, 初步设定抗滑移安全系数不小于 1.3, 抗倾覆安全系数不小于 1.5。不同核心土尺寸下的稳定性安全系数见表 3。

表 3 不同核心土尺寸下的稳定性安全系数

验算工况	核心土尺寸描述	抗滑移安全系数	抗倾覆安全系数
工况 A(基准)	7.6 m×5.0 m×10.0 m	1.42	1.68
工况 B(增高)	10.0 m×5.0 m×10.0 m	1.18	1.35
工况 C(收窄)	7.6 m×4.0 m×10.0 m	1.28	1.45

根据表 3, 在基准工况下, 核心土的抗滑移与抗倾覆安全系数均满足初步设定的安全要求。在本项目中, V 级围岩条件下, 按基准工程留设核心土, 其自身在简化模型分析中是基本稳定的, 能够为后续开挖提供有效的临时支撑。

工况 B,当核心土高度增加至断面高度的 80% 时,其高细比显著增大。计算结果显示,抗滑移安全系数及抗倾覆安全系数均出现明显下降,特别是抗倾覆安全系数已接近临界值。这表明过高的核心土更容易发生倾覆失稳,其稳定性对尺寸变化非常敏感。尽管增加高度能进一步控制围岩变形,但自稳性约束了其上限。

工况 C,当核心土顶宽收窄至底宽的 40% 时,其平均宽度减小,自重产生的抗滑移和抗倾覆力矩相应降低。虽然抗滑移安全系数仍高于工况 B 的 1.18,但已低于基准工况,且抗滑移安全系数已低于 1.3 的参考值。同理,抗倾覆安全系数也低于 1.5 的参考值。这说明过窄的核心土导致基底支撑能力减弱,滑移及倾覆风险增加。

4 结 论

以深南铁路某隧道环形开挖预留核心土施工为例,采用理论分析及数值模拟相结合的方式,研究了环形开挖预留核心土施工方案中核心土尺寸参数(长度、高度及顶面宽度)对隧道围岩稳定性的影响。主要结论如下:(1)核心土尺寸参数对隧道围岩变形(掌子面位移、拱顶沉降和拱腰收敛)具有显著控制作用;核心土长度越大、高度越高、顶面宽度越宽,掌子面纵向位移越小,且对核心土顶面以下区域掌子面纵向位移限制作用更为显著;(2)各参数对变形的控制效果均存在边际递减效应,本项目中核心土高度和顶面宽度分别增至隧道断面高度的 60% 和底边宽度的 60% 左右时,变形控制效率最高,继续增大尺寸对变形改善有限,但会显著增加施工难度;(3)在 V 级围岩条件下核心土自身稳定性随高度的增加而减小,随宽度的减小而减小;(4)综合考虑围岩变形

控制效果、核心土自稳性、施工可操作性及经济性,本工程中建议为:长度在设备与空间允许条件下尽可能增加;高度取隧道断面开挖高度的 55%~65%;顶面宽度取核心土底边宽度的 55%~65%。

参考文献:

- [1] 冯勇,李春华. 环形开挖预留核心土法隧道掌子面稳定性分析[J]. 交通科技与管理,2024,5(17):125-127.
- [2] 闫立群. 浅埋偏压隧道环形预留核心土开挖数值分析[J]. 中国公路,2021(11):156-157.
- [3] 黄邓承. IV-V 级围岩预留核心土法施工在高速公路工程中的应用[J]. 交通世界,2020(34):125-126.
- [4] 吴超,周再勇. 基于有限元法的石景山隧道开挖支护方式比选[J]. 水利技术监督,2025(2):169-174.
- [5] 万自学,徐泓焮,阳俊. 环形开挖预留核心土法在堆积体地质条件下的应用[J]. 中国公路,2025(15):112-114.
- [6] 毕洁同,皇民,王松. 基于 FLAC3D 大断面浅埋偏压隧道开挖方式数值分析[J]. 交通科技与经济,2019,21(4):58-64.
- [7] 肖先武. 丘陵山区隧道环形开挖预留核心土法单向出洞施工工艺探讨[J]. 交通科技与管理,2023,4(8):89-91.
- [8] 李逸奇. 软岩隧道开挖施工方案优化研究[D]. 湘潭:湖南科技大学,2024.
- [9] 邓思远,杨其新,蒋雅君,等. 软弱围岩大断面隧道环形开挖预留核心土法相关参数研究[J]. 城市轨道交通研究,2016,19(3):95-98;103.
- [10] 杨勇. 软弱破碎地层隧道掘进支护 CD 法及环形开挖留核心土法的对比分析[J]. 交通世界,2023(33):152-154.
- [11] 冯家鑫,郇澜. 软弱隧道环形预留核心土开挖过程数值分析[J]. 山西建筑,2011,37(29):151-153.
- [12] 周路军. 隧道预留核心土环形开挖法合理应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2011.
- [13] 孙姝婷. 北京地铁 28 号线东大桥站~京广桥站区间穿越既有地下结构的响应特征及变形控制[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2024.
- [14] 段兆林. 隧道出洞段陡倾顺层围岩变形破坏特征及其工程应用研究[D]. 贵阳:贵州民族大学,2023.
- [15] 杨建星. 基于监测信息与数值仿真相结合的地铁开挖形变预测研究[D]. 长春:吉林大学,2023.