

山岭隧道近接开挖围岩稳定性分析与加固对策

来 磊

(中铁第一勘察设计院集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘 要 本研究基于强度折减法计算了不同工况下狭窄空间双洞隧道的围岩安全系数, 分析了跨度和中央岩宽度对狭窄空间双洞隧道安全系数的影响, 并以此提出了小净距隧道的设计应对措施比选。狭窄空间双洞隧道破坏模式受净距显著影响, 不同跨度下破坏模式相似。在隧道开挖中, 上方围岩易形成弧形破裂面, 需加强围岩稳定性控制。净距小于 0.1 B 时, 中央岩易失稳形成联合塌落拱; 净距大于 0.1 B 时, 破裂面转为“X”形。此外, 本研究还提供了不同净距设计案例, 旨在为后续工程提供参考。

关键词 狭窄空间双洞隧道; 近接施工影响; 施工力学特性

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 2097-3365(2024)06-0001-03

1 研究背景

重庆地处我国云贵高原腹地, 境内山区峡谷地貌纵多, 空间狭窄, 受峡谷陡峻地形影响, 为了满足线路形标准, 隧道结构多采用双洞型式。双洞隧道的设计意味着有两个并行的隧道洞身, 每个洞身分别供不同方向的交通流使用, 一般有分离式隧道、小净距隧道或连拱隧道等多种型式。然而, 由于地形限制和地质条件的影响, 隧道的施工难度和安全风险都会增加。

目前, 国内外学者在狭窄空间双洞隧道安全性分析方面已取得了一定的研究成果: Feng 等^[1] 强调了选择合适的小净距隧道开挖方法的重要性, 对不同的开挖方法进行了分析, 以确定最适合隧道施工的方法; 同样, Wang 等^[2] 讨论了大跨度、小净距隧道的施工控制技术, 强调采用多种开挖爆破方法, 最大限度地减少对周围结构的影响; He^[3] 和 Wang^[4] 研究强调了优化净距和开挖方法的重要性, 以提高城市环境中隧道施工的安全性和效率; 肖明清等^[5] 针对深圳机荷高速公路荷坳隧道四洞小净距段的设计, 采用总安全系数法对四洞的开挖与支护模式、各洞的开挖顺序及支护参数进行了研究比较, 并采用隧规荷载—结构法、增量法、地层—结构法对支护结构的安全系数进行了对比计算, 针对多洞空间小净距隧道支护结构参数量化设计与安全性开展了分析。

总体而言, 对小净距隧道的研究主要集中在开挖优化、施工控制技术以及钻孔和爆破方法对现有结构的影响等方面, 结构稳定性分析是狭窄空间双洞隧道安全性研究的核心。本文着重探讨隧道结构的承载能

力、变形特性及支护稳定性。研究人员运用数值模拟和现场监测等方法, 深入分析隧道力学行为, 从而全面评估其结构安全性, 从设计角度加以探讨, 十分有必要。

2 围岩稳定性分析

2.1 分析方法

郑颖人院士将有限元强度折减法引入隧道围岩稳定性分析中, 通过折减岩土体黏聚力 c 和摩擦角 φ 使其达到极限破坏状态, 计算围岩安全系数, 将其作为围岩稳定性判据。该判据是具有严格力学依据的科学、合理的定量判据, 得到了广泛的应用。稳定安全系数定义为沿滑动面的抗剪强度与滑动面上的实际剪力的比值, 公式如下:

$$w_1 = \frac{s}{\tau} = \frac{\int_0^l (c + \sigma \tan \varphi) dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (1)$$

将公式 (1) 两边同时除以 w_1 :

$$w_1 = \frac{s}{\tau} = \frac{\int_0^l (\frac{c}{w_1} + \frac{\sigma \tan \varphi}{w_1}) dl}{\int_0^l \tau dl} = \frac{\int_0^l (c' + \sigma \tan \varphi') dl}{\int_0^l \tau dl} \quad (2)$$

式中:

$$c' = \frac{c}{w_1} \quad (3)$$

$$\varphi' = \arctan\left(\frac{\tan \varphi}{w_1}\right) \quad (4)$$

表明将岩土体抗剪强度参数 c 和 φ 折减后, 岩体达到极限破坏状态。此时, 在判定折减后的隧道失稳判据主要有三种^[6]: 首先, 当静力平衡计算无法收敛时, 表明隧道结构可能已失去稳定性; 其次, 塑性区的完全贯通也预示着隧道结构的失稳; 最后, 隧道洞周关键点位移的突然变化, 是判断隧道失稳破坏的直接指标。在本文的研究中, 我们选取了关键点位移突变作为判定隧道失稳破坏的主要依据。在毛洞不支护情况下不能自稳的工况, 可先将其强度参数增大 N 倍后进行折减, 洞周关键点位移突变时的折减系数除以 N 得到的值即为安全系数。

2.2 双车道与三车道隧道的跨度影响

通过观察分析狭窄空间双洞隧道在不同跨度下达到极限破坏状态时的最大剪应变增量分布情况, 得出在相同的围岩等级、埋深和净距条件下, 不同跨度的狭窄空间双洞隧道展现出相似的破坏模式。

双洞隧道在分别进行开挖的过程中, 上方围岩出现岩石破裂面, 更为严重的是, 双洞隧道上方的岩石破裂面会逐渐贯通, 形成一个连接两个拱顶的弧形破裂面, 这一现象无疑加剧了隧道的安全风险, 而最为关键的是, 中夹岩作为双洞隧道开挖过程中的薄弱位置, 其稳定性极易受到影响, 一旦发生失稳, 将对整个隧道结构的安全构成严重威胁。因此, 在双洞隧道的施工过程中, 必须高度重视中夹岩的稳定性问题, 采取有效的措施加以防范和应对。

2.3 双洞隧道的中夹岩宽度影响

图1详细展示了狭窄空间双洞隧道破坏模式随净距增大而发生的显著变化, 这些变化大致可归纳为两种类型。以 $0.1B$ 净距作为关键分界点, 当净距小于 $0.1B$ 时, 中夹岩出现水平分布的潜在破裂面, 这导致中夹岩成为首先失稳的区域。由于净距较窄, 双洞之间形成联合塌落拱, 最终沿此联合塌落拱发生破坏失稳。值得注意的是, 联合塌落拱的形态也受净距影响: 在净距为 $0.01B$ 时, 联合塌落拱的起始位置并非完全位于拱顶, 而是倾向于中夹岩附近, 塌落拱的高度也较小; 随着净距的逐渐增大, 联合塌落拱的起始位置逐渐向拱顶靠拢, 同时塌落拱的跨度和高度也在不断增加, 而当净距超过 $0.1B$ 时, 中夹岩的潜在破裂面转变为“X”形分布。由于净距的增大, 先行洞与后行洞之间不再形成联合塌落拱, 而是在远离中夹岩的侧拱肩处出现潜在破裂面, 这些破裂面以一定角度向地表发展, 进一步揭示了净距对隧道破坏模式的重要影响。

3 小净距隧道设计应对措施

根据双洞之间中夹岩柱的宽度, 双洞隧道被划分为“分离式隧道”和“小净距隧道”两大类。其中, 分离式隧道主要适用于中夹岩较宽, 双洞之间相互作用几乎可以忽略不计的情况, 因此在设计及施工过程中, 均按照正常衬砌结构进行设计及施工, 无需采取特殊加强措施。

小净距隧道则根据中夹岩宽度的不同, 进一步细

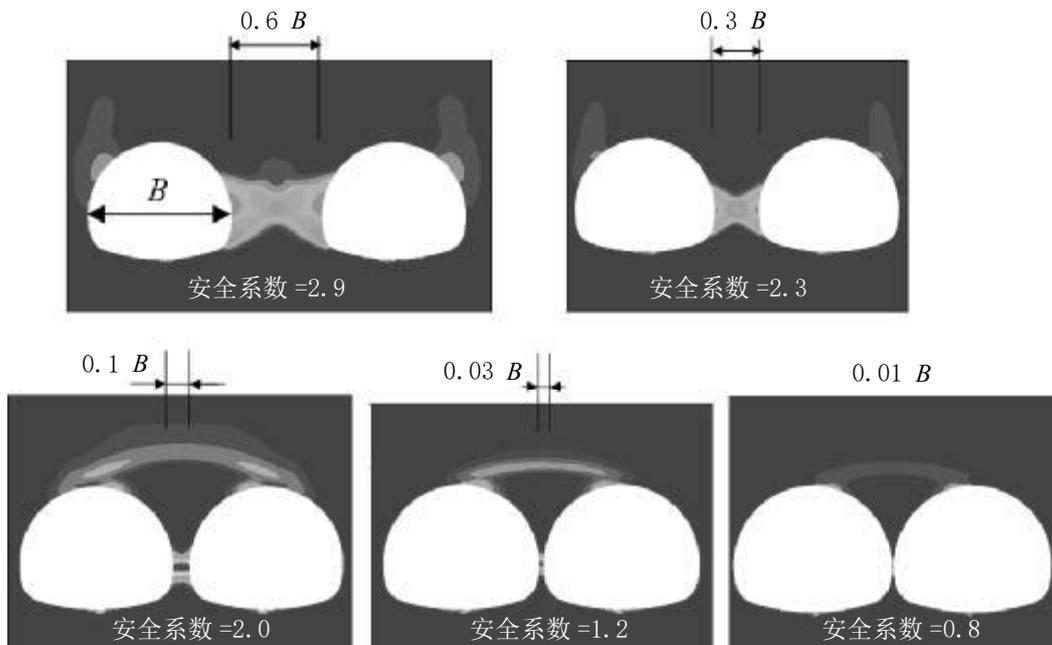


图1 双洞隧道中夹岩宽度变化条件下最大剪应变增量云图

化为“一般小净距隧道”“极小净距隧道”“超小净距隧道”以及“连拱隧道”等多种类型。每一种类型都有其独特的设计特点和应用场景。

3.1 一般小净距隧道

一般小净距隧道指的是在隧道施工中，双洞之间的距离虽然会对彼此的施工产生影响，但这种影响相对较小，因此在设计阶段通常无需特别加强衬砌结构。为减少这种影响，施工时会采用先后开挖的方式。具体来说，双洞施工往往分为先行洞和后行洞，当地层差异较大或洞口存在严重偏压时，会优先施工先行洞，其施工方法可采用正常爆破与支护。而后行洞作为近接施工，需采取更为谨慎的开挖工法，如先行洞可能采用两台阶法，而后行洞则可能选择三台阶法或控制爆破、机械开挖等方式。同时，施工过程中还需加强对先行洞的监控量测工作，确保施工安全和工程质量。

3.2 极小净距隧道

极小净距隧道指的是在隧道施工中，双洞同时施工将产生显著影响，并且这种施工活动会对中夹岩带来较大扰动，因此需要进行更为严格的工程措施来保障施工安全和隧道稳定性。在设计阶段，需特别关注中夹岩处的锚杆加固工作，一般采取加长锚杆长度、加密锚杆布置间距的措施，同时可选用中空注浆锚杆或注浆小导管等方式，以提高中夹岩的承载能力和稳定性。在后行洞施工过程中，必须严格按照“一般小净距隧道”的施工要求执行，采取谨慎的开挖工法，并加强对先行洞的监控量测工作，确保整个隧道施工的安全顺利进行。

3.3 超小净距隧道

超小净距隧道是指在隧道施工中，双洞施工存在极大的相互影响，且施工活动对中夹岩的扰动极为显著的情况。在设计阶段，为确保隧道结构的稳定与安全，必须在中夹岩处设置中预应力对拉锚杆，以有效约束中夹岩的变形。锚杆的选型至少应采用 $\phi 25$ 中空注浆锚杆的型式，其注浆参数必须严格满足设计要求，以确保锚杆的锚固效果。在后行洞施工过程中，应严格按照“一般小净距隧道”的施工规范执行，采取谨慎的开挖工法，并加强对先行洞的监控量测工作，以最大程度地减小施工对中夹岩的扰动，确保隧道施工的安全与顺利进行。

3.4 连拱隧道

连拱隧道是指共用一个中间立墙的双洞并行隧道，一般位于洞口段，因此存在地层条件较差、埋深较浅、受地表水影响较大等不利因素，双洞开挖过程中影响极大，严禁同时开挖。一般要求先对中间小导洞进行

开挖，宜采用台阶法掘进，而后浇筑中隔墙，两侧隧道正洞开挖前应首先施作洞口大管棚超前支护，采用 CD 法、双侧壁法或 CRD 等工法分步开挖并及时支护，正洞掘进一定长度后，拆除临时支撑及小导洞内侧支撑结构，施作仰拱及二次衬砌。待一侧正洞开挖且二衬施作一段距离后，再对另一侧正洞进行开挖掘进，并及时施作超前支护。开挖过程中严禁采用爆破作业，直至连拱及超小净距段完全施作完毕。

4 结论

1. 在相同的围岩等级、埋深和净距条件下，不同跨度的狭窄空间双洞隧道破坏模式相似。双洞隧道开挖过程中，上方围岩岩石破裂面的出现及其逐渐贯通形成连接两个拱顶的弧形破裂面。在隧道设计和施工过程中，应充分考虑并加强围岩稳定性控制，防止岩石破裂面的形成和贯通。

2. 净距对狭窄空间双洞隧道的破坏模式影响显著。以 $0.1B$ 净距为界，小于此值时，中夹岩因水平潜在破裂面易失稳，形成联合塌落拱导致破坏。随着净距减小，塌落拱起始位置更靠近中夹岩，高度也较小。净距超过 $0.1B$ 时，中夹岩破裂面呈“X”形，不再形成联合塌落拱，而是在侧拱肩处出现潜在破裂面。

3. 针对不同中夹岩的受力特征，提供了双车道连拱、超小净距、极小净距、一般小净距的设计思路，为后续工程提供参考。

参考文献:

- [1] Feng H, Zhang B, Zhang H. Study on Optimization of Excavation Scheme of the Entrance Section of Hongjiaban Tunnel[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(03): 3293.
- [2] Wang K, Wang L, Wang D. Research on Construction Control Technology of Large-Span and Small Clear Distance Underpass High-Voltage Line Tunnel[J]. Journal of World Architecture, 2021, 05(01): 11-16.
- [3] He J, Liu M, Shi Y, et al. Study on the optimization of the clear distance of the reconstruction and extension of the super-large cross-section and small clear-distance tunnel[C]// International Conference on Smart Transportation and City Engineering (STCE 2022). SPIE, 2022(12460): 341-348.
- [4] Wang J, Cao A, Li Z, et al. Mechanical behavior and excavation optimization of a small clear-distance tunnel in an urban super large and complex underground interchange hub[J]. Applied Sciences, 2022, 13(01): 254.
- [5] 肖明清, 徐晨, 郑强, 等. 荷坳隧道四洞小净距段支护结构设计研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(02): 1-10.
- [6] 同 [5].