

TBM掘进硬岩隧道最小安全覆岩厚度数值模拟研究

——以穗莞深城际铁路西宝区间隧道掘进为例

梁晓亮¹, 杨宇¹, 刘伟¹, 鄢海涛²

(1. 中国水利水电第八工程局有限公司, 长沙 410004; 2. 中南大学土木工程学院, 长沙 410075)

摘要: 采用TBM(隧道掘进机)在硬岩中掘进需要一定的安全覆岩厚度以保持围岩自稳,但安全覆岩厚度过大会增加隧道设计总长度,造成造价上升。因此,研究TBM掘进硬岩隧道最小安全覆岩厚度具有重大工程意义。依托穗莞深城际铁路西乡站—宝安站双模盾构隧道工程案例,通过数值模拟研究不同围岩等级参数下最小安全覆岩厚度的变化规律。结果表明:当采用拱顶位移法模拟时,如果隧道围岩等级为Ⅱ级或Ⅲ级,软土厚度为隧道直径的0~3倍,那么最小安全覆岩厚度则为隧道直径的0.2~1.2倍。当采用压力拱法模拟时,如果覆岩等级为Ⅱ级或Ⅲ级,软土厚度为隧道直径的1~3倍,最小覆岩厚度与埋深的比值随着硬岩厚度增加呈现先增大后减小趋势,比值最大为0.39;覆岩等级为Ⅳ级,软土厚度为隧道直径的1~3倍时,最小覆岩厚度与埋深比值始终随着硬岩厚度增加而减小,比值最大为0.42。研究结论可为TBM安全掘进硬岩隧道提供工程指导。

关键词: 最小安全覆岩厚度; TBM(隧道掘进机); 压力拱; 数值模拟

中图分类号: U451⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)11-0040-07

由于TBM(tunnel boring machine, 隧道掘进机)具有施工速度快、围岩扰动小、人员操作强度低以及施工安全等特点^[1],广泛应用于硬岩地层隧道掘进^[2]。当TBM在硬岩地层中掘进时,由于支护具有滞后性,所以要求地层能够自稳,即所需安全覆岩厚度以形成自承拱,但安全覆岩层厚度过大,会增加隧道设计总长度进而增加工程造价^[3]。因此研究最小安全覆岩厚度在平衡施工安全和隧道造价上具有重大工程意义。

目前国内外相关学者对TBM掘进硬岩地层最小安全覆岩厚度研究很少,基本上以研究钻爆法最小安全覆岩厚度和TBM掘进岩石损伤厚度为主。Ma等^[4]通过ABACUS研究了覆岩层厚度对地表沉降的影响,证明了地表沉降随开挖宽度增加而增加;王汉鹏等^[5]采用FLAC3D模拟了宁波海底隧道钻爆法施工对隧道周围的动力学影响,得到了最小覆岩厚度;徐帮树等^[6]采用FLAC3D计算隧道涌水量来得到最小覆岩厚度;Pang等^[7]根据弹性力学半平面理论建立覆盖层破坏力学模型,并利用

FLAC3D对破坏过程进行数值模拟,揭示了不同控制因素对上覆岩石破坏的敏感性;姚曦和等^[8]利用TBM的单个滚刀对北山花岗岩岩体侵入过程进行分析,并得到了不同侵入工况下的岩体损伤范围;Backblom^[9]对某实验室的两条分别采用TBM以及钻爆法开挖的隧道进行损伤区域研究发现,TBM隧道顶部损伤范围为30 mm,而钻爆法隧道顶部损伤范围达到300 mm;刘邦^[10]利用MIDAS对TBM穿越中风化花岗岩的最小覆岩厚度进行分析,得到最小安全覆岩厚度可取0.055倍隧道直径的结论。

将隧道拱顶上方岩土体分为软硬岩,中风化及微风化以上岩体为硬岩,其余为软岩,钻爆法中确定最小安全覆岩厚度即确定隧道上部的硬岩厚度,但由于钻爆法对岩体的损伤远大于TBM掘进对岩体的损伤,所以目前以钻爆法为主得到的最小安全覆岩厚度不适用于TBM掘进的硬岩隧道,而最小安全覆岩厚度影响隧道最小埋深的确定,进而影响隧道的安全性与经济性。因此,本文依托穗莞深城际铁路西乡站—宝安站双模盾构掘进隧道项目,采

收稿日期: 2024-07-01

基金项目: 长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心开放课题基金(kfj220101)

作者简介: 梁晓亮(1975—),男,广东罗定人,高级工程师,研究方向为地下结构与施工;杨宇(1982—),男,彝族,贵州凯里人,高级工程师,研究方向为城市轨道交通工程;刘伟(1990—),男,湖南常德人,高级工程师,研究方向为城市轨道交通工程;通信作者鄢海涛(2000—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为地下结构设计。

用数值模拟对 TBM 掘进硬岩隧道进行最小安全覆岩厚度研究具有确定隧道开挖最小埋深的重大工程意义,可为后续类似工程提供参考。

1 拱顶位移法与压力拱法

为确定最小覆岩厚度,利用拱顶主应力变化以及拱顶上方围岩位移变化进行分析。隧道采用 TBM 模式开挖后围岩会进行应力状态调整,因此需要维持围岩开挖后上覆地层稳定。

对于围岩是否能够自稳,数值模拟中存在两种判定围岩稳定的方法。一种是拱顶位移法,一种是压力拱法。拱顶位移法计算较为简单,工程实践中运用较多,但该方法没有涉及围岩自稳的本质,岩层自稳的本质是压力拱效应,因此采用压力拱法计算显然更为合理。

XU 等^[11]通过大量弹塑性模型计算,发现任意隧道断面处拱顶位移随着覆岩厚度增加先减小再增大,存在一个最小值,这种根据拱顶位移收敛性来判断最小覆岩层厚度的方法为拱顶位移法。

如果隧道开挖后围岩形成压力拱,那么围岩可以自稳。将隧道拱顶正上方至地表路径称为路径 A,吕燕等^[12]通过分析认为水平应力与竖直应力相交点的压力拱外边界过于保守,忽略了最大主应力转变点以上有很大的卸载范围,考虑到压力拱形成后径向应力主要转化为切向应力,因此把最大竖向应力开始减少的位置认为是压力拱外边界。压力拱的内边界通常出现在隧道洞身附近,由于压力拱内边界不影响压力拱形成的判断,为了方便计算压力拱高度,将压力拱内边界设在路径 A 拱顶处,压力拱高度为压力拱外边界与内边界的高度差值。这种利用压力拱高度求隧道最小覆岩厚度的方法为压力拱法^[13-15]。压力拱高度示意图如图 1 所示。

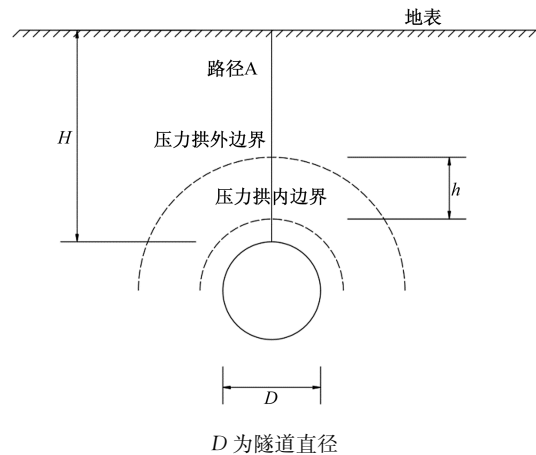


图 1 压力拱高度示意图

2 工程概况

依托工程为穗莞深城际机场至前海段 II 标一工区西乡站—宝安站区间,原工程区间采用土压平衡盾构施工,要求贯通时间为 2023 年 10 月底,但由于项目整体工期滞后 10 个月,为加快工期,进行调坡调线,采用双模盾构进行掘进,其中采用 TBM 模式在硬岩地层中掘进,预计掘进指标将由 150 m/月提升至 250 m/月,显著节省硬岩掘进工期。隧道埋深为 21~57 m,隧道主要穿越地质为全风化花岗岩、碎块状强风化花岗岩、中风化花岗岩、中风化闪长岩、微风化花岗岩,其中左线盾构掘进上软下硬地层 2 626.6 m(占比 75%),右线盾构掘进上软下硬地层 2 583 m(占比 74%),洞身范围岩石最大饱和单轴抗压强度为 136.7 MPa(花岗岩)、138.4 MPa(闪长岩)。西宝区间平面位置关系如图 2 所示。西宝区间左右线隧道剖面图如图 3 所示。

3 数值模拟

在双模盾构穿越硬岩时,采用 TBM 模式进行



图 2 西宝区间穿越沿线建筑相对位置关系

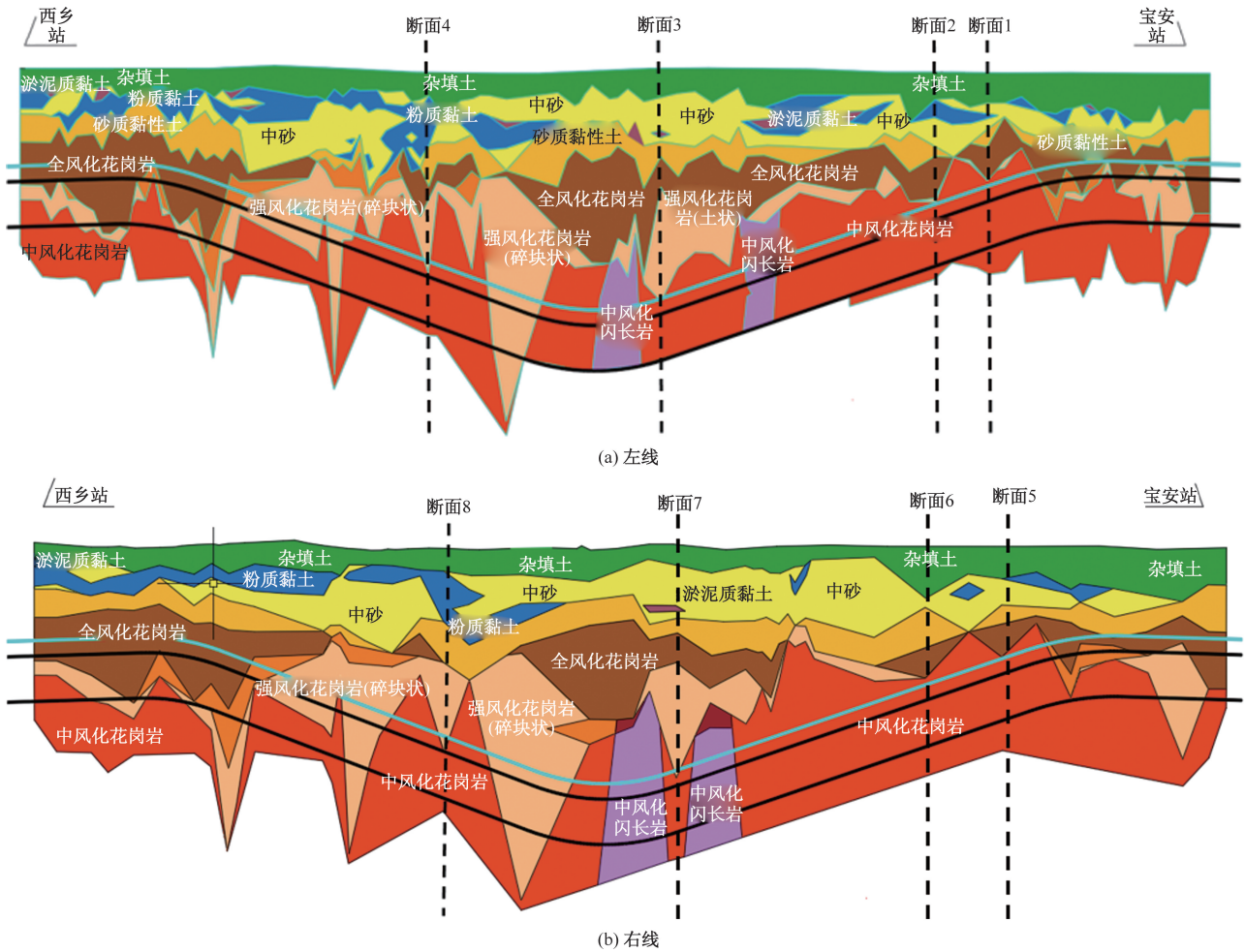


图 3 西宝区间左线、右线隧道 4 个断面位置示意图

掘进,为了得到 TBM 模式下隧道的最小覆岩厚度,从而得到合理的覆盖层厚度以降低隧道总里程,通过判定围岩位移与竖直应力的方式来确定隧道最小覆岩厚度,根据这一特点建立二维模型,模型尺寸为 $80\text{ m} \times (\text{土厚度} + \text{硬岩厚度} + 5D)$,其中 D 为隧道直径,在数值模拟中隧道直径取 10 m 。整体模型如图 4 所示。数值模拟施工步骤为两个部分,阶段 1 为位移清零阶段,阶段 2 为开挖阶段,如图 5 所示。

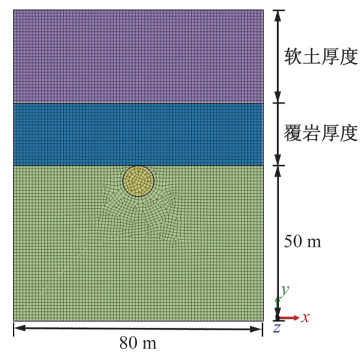


图 4 整体模型

将中风化、弱风化等岩层视为硬岩,其他均视作软土。双模盾构 TBM 模式开挖模型为二维模型,四周约束和荷载施加均满足要求。模型侧面施加侧向约束,限制水平移动,模型地面施加底部约束,限制水平和竖向约束,顶部不施加约束,模型中单元类型为 $2D$ 单元,模型中土与硬岩满足摩尔-库仑屈服准则。岩土体的相关参数见表 1。通过设置 3 个围岩等级,4 个土厚度梯度和 12 个覆岩厚度梯度建立了 144 个模型进行均匀试验,得到不同硬岩

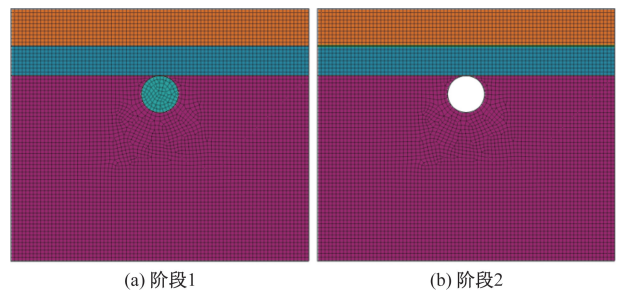


图 5 双模盾构 TBM 模式下开挖示意图

表 1 岩土体参数

围岩条件		重度/ ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	内摩擦 角 $f/(\text{°})$	黏聚力 c/MPa
覆岩层	II	27	6.7	0.25	50	1.50
	III	25	2.0	0.30	39	0.70
	IV	23	0.4	0.35	27	0.20
土层	V	20	0.3	0.45	20	0.05

岩性下的压力拱高度,其中 3 个围岩等级为 II~IV 级,软土的围岩等级设置为 V 级,软土层厚度分别为 $0D$ 、 $1D$ 、 $2D$ 、 $3D$,覆岩厚度梯度分别为 $0.2D$ 、 $0.4D$ 、 $0.6D$ 、 $0.8D$ 、 $1.0D$ 、 $1.2D$ 、 $1.4D$ 、 $1.6D$ 、 $1.8D$ 、 $2.0D$ 、 $2.2D$ 、 $2.4D$ 。

4 结果分析

4.1 拱顶位移法最小安全覆岩厚度分析

将隧道拱顶的沉降随不同覆岩厚度、不同围岩、不同软土厚度的关系作图,如图 6 所示。

从图 6 可知,在相同围岩级别下随着覆岩厚度和软土厚度的增加,拱顶位移先减小后增大;在相同覆岩厚度、软土厚度条件下,拱顶位移随着围岩

级别的增加而减小,III 级围岩的拱顶沉降是 II 级围岩的 3~4 倍;在 II 级、III 级围岩中,达到拱顶位移最小值时,如果软土厚度越厚,则后续的拱顶位移值增长越平缓;在覆岩层厚度达到 $0.4D\sim 1.2D$ 时,软土厚度在 $1D\sim 3D$ 时,拱顶位移存在最小值;由于 IV 级围岩隧道拱顶位移在软土厚度为 $0\sim 3D$ 条件下均无最小位移值,因此无法通过拱顶位移法确定 IV 级围岩在不同软土厚度下的最小覆岩值。将 II 级、III 级围岩在不同软土厚度下的拱顶位移最小值作图,如图 7 所示。

4.2 压力拱法最小安全覆岩厚度分析

将隧道最小覆岩厚度随不同覆岩厚度、不同围岩、不同软土厚度的关系作图,如图 8 所示。

从图 8 可知,在相同的覆岩围岩级别下,当隧道拱顶上方硬岩厚度一致时,软土厚度越大,压力拱高度越大;在相同的覆岩围岩级别下,当隧道拱顶上方软土厚度一致时,硬岩厚度越大,压力拱高度越大;当围岩等级从 II 级减小到 IV 级时,如果软土

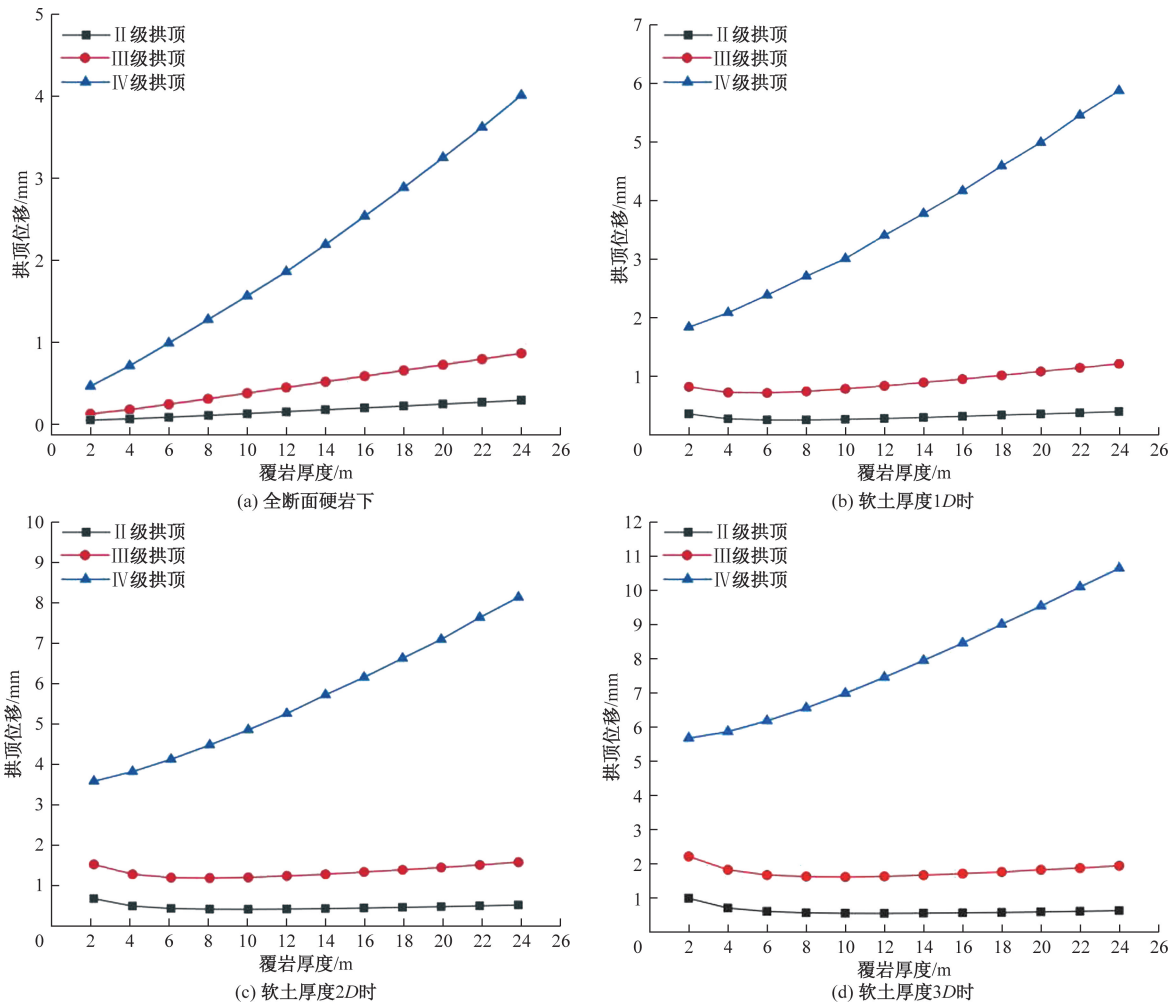


图 6 拱顶位移与覆岩厚度、围岩、软土厚度的关系

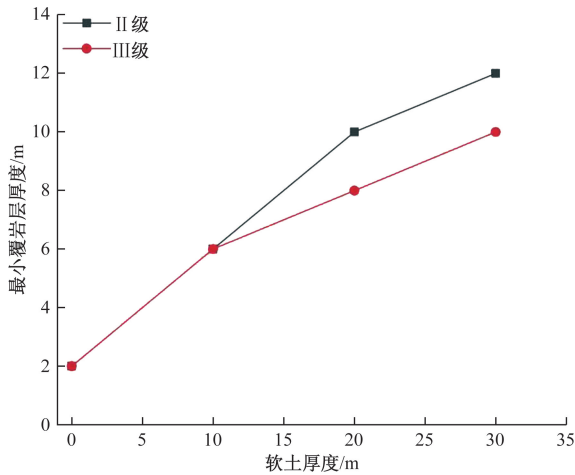


图 7 II 级、III 级围岩的最小安全覆岩层厚度

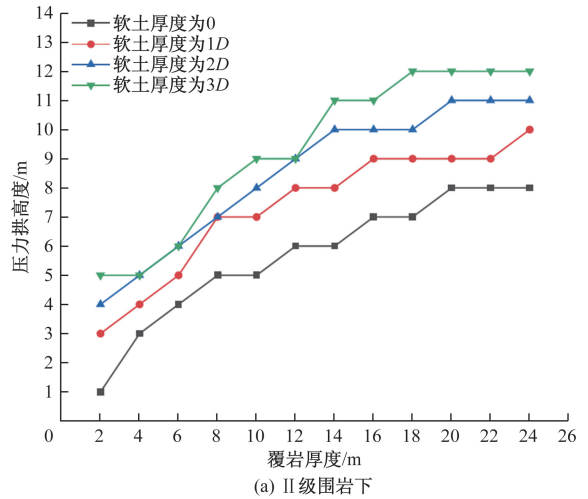
厚度越大,硬岩厚度越小,那么压力拱高度越大,但软土厚度与硬岩厚度均较大时,此时压力拱高度与围岩等级关系较小,这表明压力拱高度与埋深有关。

将隧道压力拱高度与埋深比值随不同覆岩厚度、不同围岩、不同软土厚度下的关系作图,如图 9 所示。

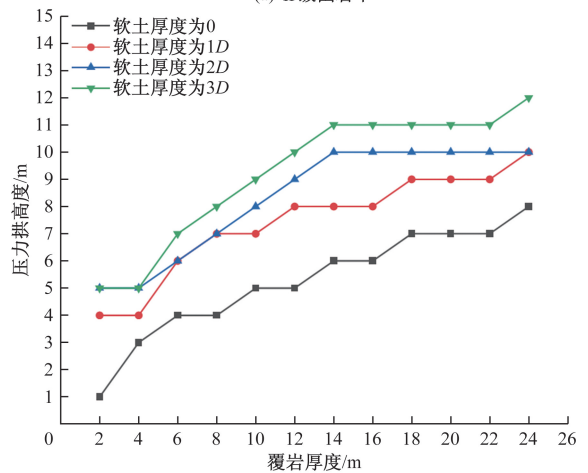
从图 9 可知,围岩覆岩等级在 II~IV 级时,相同覆岩厚度下,软土厚度越小,压力拱高度与埋深比值越大;围岩覆岩等级在 II~IV 级、软土厚度为 0 时,压力拱高度与埋深比值最大值均在覆岩厚度为 0.4D 处出现;围岩覆岩等级在 II~III 级、软土厚度为 1D 时,压力拱外边界离拱顶距离处于 0.29~0.39 倍埋深,覆岩厚度为 0.8D 时压力拱高度与埋深比值最大,当软土厚度为 2D 时,压力拱外边界离拱顶距离处于 0.29~0.39 倍埋深,覆岩厚度为 1.4D 时压力拱高度与埋深比值最大,当软土厚度为 3D 时,压力拱外边界离拱顶距离处于 0.15~0.24 倍埋深,覆岩厚度为 1.4D 时压力拱高度与埋深比值最大;在围岩覆岩等级为 IV 级,软土厚度为 1D、2D 与 3D 时,覆岩厚度越小,压力拱高度与埋深比值越大,压力拱外边界离拱顶距离分别处于 0.42~0.26 倍、0.32~0.25 倍与 0.28~0.24 倍埋深。

为了对比实际最小安全覆岩值与数值模拟值,选取图 3 中 8 个断面进行对比,对比值如图 10 所示。

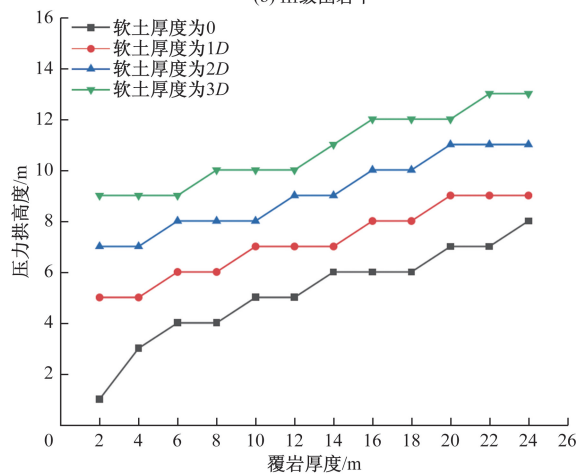
从图 10 可知,拱顶位移法计算得到的最小安全覆岩值最大,且与压力拱法的最小安全覆岩值存在变化同步性关系,压力拱法计算最小安全覆岩值明显与实际值更为接近,表明采用压力拱计算最小安



(a) II 级围岩下



(b) III 级围岩下



(c) IV 级围岩下

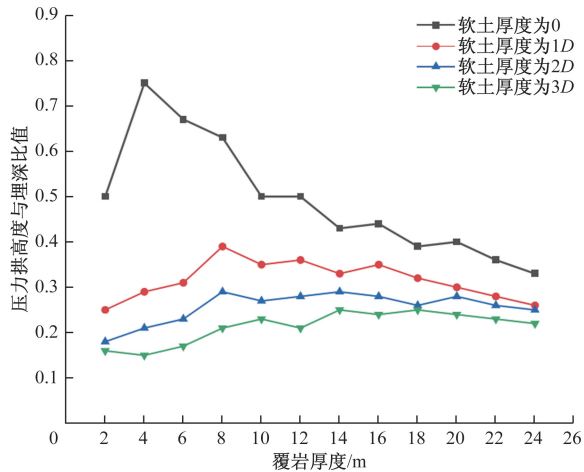
图 8 压力拱高度与覆岩厚度、围岩、软土厚度的关系

全覆岩值可行性较高。

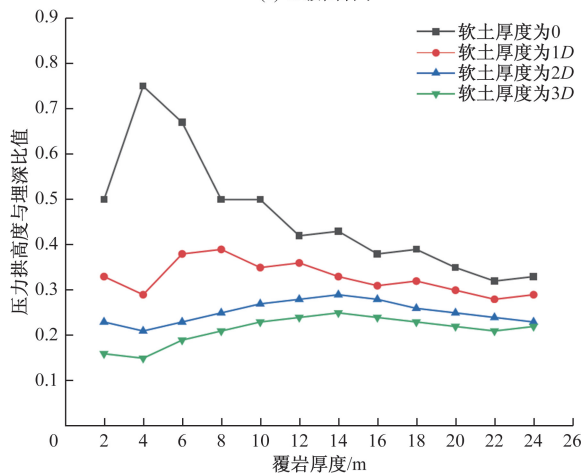
5 结论

通过数值模拟分别采用拱顶位移法与压力拱法计算 TBM 掘进硬岩隧道的最小安全覆岩值,并与实际值进行对比,得到如下结论。

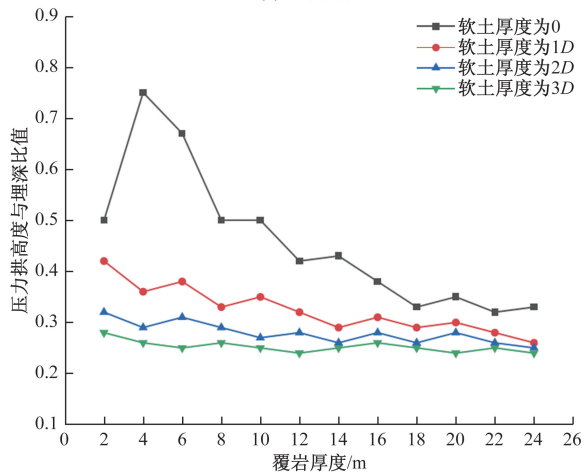
(1)隧道直径为 D 时,采用拱顶位移法时,如果覆岩等级为 IV 级,由于隧道拱顶沉降随着硬岩厚度



(a) II级围岩下



(b) III级围岩下



(c) IV级围岩下

图9 隧道压力拱高度与埋深比值与覆岩厚度、围岩、软土厚度的关系

持续增大,不存在极小值所以无法得出最小安全覆岩厚度;而对于II级、III级围岩,随着硬岩厚度的增大隧道拱顶沉降存在极小值,因此可以得出最小安全覆岩厚度,安全覆岩厚度随着软土厚度的增大而增大,软土厚度为 $0\sim 3D$ 时,最小安全覆岩厚度取

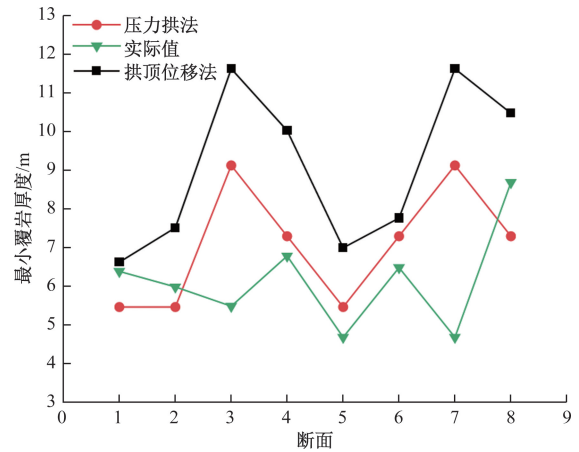


图10 不同方法最小覆岩厚度对比

值范围为 $0.2D\sim 1.2D$ 。

(2)隧道直径为 D 时,采用压力拱法时,相同的覆岩围岩级别下,软土厚度与覆岩厚度越大,最小安全覆岩值越大;最小安全覆岩值随着围岩级别的减小而增大,且增大值在硬岩厚度越小时越明显;覆岩等级在II~III级,软土厚度为 $1D\sim 3D$ 时,最小安全覆岩厚度与埋深比值随着硬岩厚度增加呈现先增大后减小趋势;覆岩等级在IV级,软土厚度为 $1D\sim 3D$ 时,最小安全覆岩厚度与埋深比值始终随着硬岩厚度增加而减小;覆岩等级为IV级时,软土厚度为 $0D$ 时,最小安全覆岩厚度与埋深比值随着硬岩厚度增加呈现先增大后减小趋势,比值最大值在覆岩厚度为 $0.4D$ 处。

(3)拱顶位移法计算的安全覆岩最小值比压力拱法得到的安全覆岩最小值和实际值大,可以作为最小覆岩值上限考虑,而压力拱法得到的模拟值比较接近实际值,说明考虑围岩稳定本质的压力拱法用于实际工程具有一定可行性。

参考文献

- [1] 杨延栋, 赵建兵, 周建军, 等. 不同岩体质量隧道TBM施工性能评价方法[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(19): 8502-8508.
- [2] 王振华, 彭勇, 王忠钊, 等. 复杂环境下城际铁路大直径双模盾构选型技术及应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8699-8706.
- [3] 袁枫斌, 陈文智, 何东芝. 大断面砂质板岩隧道围岩动态设计分析: 以道吾山特长隧道为例[J]. 科技和产业, 2023, 23(20): 157-161.
- [4] MA S, LI M, JIN J, et al. The influence of shallow buried double-line parallel rectangular pipe jacking construction on ground settlement deformation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 1911-1916.

- [5] 王汉鹏, 李术才, 乔玲. 施工爆破对确定海底隧道最小岩石覆盖厚度的影响研究[J]. 岩土力学, 2006, 27(S1): 290-295.
- [6] 徐帮树, 张宪堂, 张芹. 海底隧道涌水量预测及应用研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2007(4): 599-602.
- [7] PANG L, LIU W, QIN Y. Analysis of main controlling factors of overburden failure in coal mining under thick coal seam geological conditions[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2021, 39: 883-896.
- [8] 姚羲和, 赵晓豹, 龚秋明, 等. 滚刀线性侵入试验中岩石破裂模式研究[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(9): 1705-1713.
- [9] BÄCKBLÖM G. Excavation damage and disturbance in crystalline rock: results from experiments and analyses [R]. Stockholm: Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., 2008.
- [10] 刘邦. TBM穿越中风化花岗岩最小覆岩厚度研究[J]. 交通科技, 2023(4): 87-92.
- [11] XU B S, LI S C, LIU R C, et al. Study on the reasonable cover thickness of a subsea tunnel with the numerical calculation criterion method [C]//Geo-China 2016. New York: American Society of Civil Engineers, 2016: 81-91.
- [12] 吕燕, 梁观山, 陆莉娜, 等. 圆形隧道围岩压力拱拱体范围的解析研究[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(10): 165-169.
- [13] 彭祖昭, 封坤, 肖明清, 等. 基于压力拱理论的水下隧道合理覆岩厚度研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(7): 2609-2616.
- [14] 吴铭芳, 章慧健, 仇文革. 大断面隧道深浅埋划分方法研究[J]. 现代隧道技术, 2010, 47(4): 1-5, 26.
- [15] ZHOU X, WANG J, LIN B. Study on calculation of rock pressure for ultra-shallow tunnel in poor surrounding rock and its tunneling procedure[J]. Journal of Modern Transportation, 2014, 22: 1-11.

Numerical Simulation of Minimum Safe Cover Thickness for TBM Tunneling in Hard Rock: Taking Xixiang-Bao'an Tunnel, Guangzhou-Dongguan-Shenzhen Intercity Railway as an Example

LIANG Xiaoliang¹, YANG Yu¹, LIU Wei¹, YAN Haitao²

(1. Sinohydro Bureau 8 Co. Ltd., Changsha 410004, China;

2. School of Civil Engineering, Central South University, Changsha 410075, China)

Abstract: The safety cover thickness required for TBM (tunnel boring machine) tunneling in hard rock is such that it is too large to increase the total length of the tunnel design without increasing the cost. Therefore, the study of the minimum safety cover thickness for TBM tunneling in hard rock is of great engineering significance. In light of the aforementioned considerations, the Guangzhou-Dongguan-Shenzhen Intercity Railway Xixiang Station-Bao'an Station double-mode shield tunnel project case was drawn upon to investigate the minimum safe overburden thickness of varying parameters under the condition of changing rock grades. The results indicate that when the arch displacement method is employed, if the tunnel perimeter rock class is II or III, and the thickness of soft soil is between 0 and 3 times the diameter of the tunnel, then the minimum safe rock cover thickness is between 0.2 and 1.2 times the diameter of the tunnel. When the pressure arch method is employed for simulation, if the rock cover class is II or III, and the soft soil thickness is between 1 and 3 times the tunnel diameter, the ratio of the minimum rock cover thickness to the depth of burial exhibits a tendency to increase and then decrease with the increase of the hard rock thickness, reaching a maximum value of 0.39. When the overburden grade is grade IV and the thickness of the soft soil is 1 to 3 times the diameter of the tunnel, the ratio of the minimum rock cover thickness to the depth of burial is observed to decrease with the increase of the hard rock thickness, reaching a maximum value of 0.42. The conclusions can provide engineering guidance for TBMs to safely tunnel through hard rock.

Keywords: minimum safe overburden thickness; TBM(tunnel boring machine); pressure arch; numerical simulation