

DOI: 10.7672/sjgs2026040080

上覆堆积体复合地层隧道开挖稳定性研究*

李翱¹,周璞¹,吴沧桑¹,王亮²,贾朝军²,雷明锋²

(1. 湖南路桥建设集团有限责任公司,湖南长沙 410018;

2. 中南大学,湖南长沙 410075)

[摘要] 娄醴高速仙岳山隧道工程进口段穿越复杂松散堆积体地层,给施工安全带来极大挑战。基于光线投射算法与颗粒离散元法,对块石进行随机模拟投放,建立仙岳山堆积体隧道开挖计算模型,并提出有效的加固措施。结果表明,相较于下层岩体,堆积体地层的围岩稳定性较差,开挖比增大,围岩变形区也增大,且左、右边墙的水平位移不对称,塑性区域分布也不对称。特别是在穿越地层交界带时,应力集中现象导致边墙应力增大,同时拱顶和底部应力降低。随着开挖比的增加,拱顶沉降和底板隆起现象有所减缓,左右边墙位移随开挖比的增大而先增大后减少。针对堆积体地层破坏特征,提出了地表注浆加固措施,地层加固后,土石颗粒间胶结良好,支护结构稳定,效果良好。

[关键词] 隧道;堆积体地层;颗粒离散元法;注浆;加固

[中图分类号] U455

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)04-0080-06

Study on Stability of Tunnel Excavation in Composite Strata with Overlying Accumulation Body

LI Ao¹, ZHOU Pu¹, WU Cangsang¹, WANG Liang², JIA Chaojun², LEI Mingfeng²

(1. Hunan Road & Bridge Construction Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410018, China;

2. Central South University, Changsha, Hunan 410075, China)

Abstract: The entrance section of the Xianyueshan Tunnel project on the Louli Expressway passes through complex and loose accumulation strata, posing significant challenges to construction safety. This paper, based on ray casting algorithm and particle discrete element method, randomly simulates the placement of boulders to construct a computational model for the excavation of the Xianyueshan accumulation strata tunnel and proposes effective reinforcement measures. The results show that, compared to the lower rock mass, the surrounding rock stability of the accumulation strata is poorer. As the excavation ratio increases, the deformation zone of the surrounding rock expands, and asymmetric horizontal displacements occur in the left and right sidewalls, with an asymmetric distribution of the plastic zones as well. Particularly, when crossing the interface of different strata, stress concentration causes an increase in sidewall stress, while the stress at the crown and bottom decreases. With an increase in the excavation ratio, the settlement of the crown and the heave of the bottom plate are mitigated, and the sidewall displacement increases before decreasing with the increase of the excavation ratio. In response to the failure characteristics of the accumulation strata, surface grouting reinforcement measures are proposed. After reinforcement of the strata, the cohesion between soil and rock particles is good, and the support is stable, producing favorable results.

Keywords: tunnels; accumulative strata; particle discrete element method; grouting; reinforcement

0 引言

松散堆积体是由地质构造运动形成的不良地质体,其结构复杂,各相物理与力学性质差异显著,广泛分布于云南、贵州、四川等地^[1-2]。隧道穿越此类地层时,易发生失稳、大变形和坍塌等灾害,严重

* 湖南省交通运输厅科技项目(202207)

[作者简介] 李翱,高级工程师,E-mail: 2419390456@qq.com

[收稿日期] 2025-09-22

威胁工程安全,并可能引发重大经济损失。随着我国西南地区交通基础设施建设不断推进,隧道工程不可避免地穿越松散堆积地层。因此保障该类地层隧道开挖安全已成为迫切需求。目前,国内外学者在模拟隧道开挖和支护工程时,多将地层视为宏观均质材料^[3-4]。然而,此种方法应用于堆积体地层时具有明显局限性:由于其内部非均质性及组成相之间的物性差异,隧道开挖过程中的力学行为与均质地层存在显著区别。等效均质模型往往忽略了堆积体的微观结构特征(如形态、分布等),导致难以准确反映隧道及周边地层的真实力学响应。因此,开展基于细观结构的松散堆积体隧道围岩破坏与失稳机制的研究十分必要。现有研究多集中于全断面均为堆积体地层的隧道开挖^[5-7],未考虑在穿越不同地层类型时,因开挖进尺不同导致隧道断面内堆积体占比发生变化,进而影响开挖稳定性的问题。

鉴于此,以仙岳山堆积体隧道工程为背景,采用模拟岩石块体形态特征的岩石模板库和“落雨法”建立堆积体地层模型^[8-9]。通过数值模拟分析探讨开挖比对上软下硬堆积体复合地层隧道开挖稳定性的影响。

1 堆积体地层结构随机生成方法

1.1 岩石块体形态随机生成方法

采用随机集合结构生成岩块^[10]。二维平面上,堆积体中的岩块边界轮廓可被视为封闭的多边形,如图 1 所示,其顶点由极半径向量 $\{r_1 \cdots, r_i, \cdots, r_n\}$ 和极角度向量 $\{\theta_1 \cdots, \theta_i, \cdots, \theta_n\}$ 表示。 $\{r_1 \cdots, r_i, \cdots, r_n\}$ 可以通过 $r_i = r_0 + (2\mu - 1)$ 计算得到,其中 μ 是位于 $(0, 1)$ 之间的伪随机数, r_0 是极半径的平均数, ω_r 是极半径的振幅。为了便于运算,极角向量 $\{\theta_1 \cdots, \theta_i, \cdots, \theta_n\}$ 被转化为极角增量向量 $\{\Delta\theta_1 \cdots, \Delta\theta_i, \cdots, \Delta\theta_n\}$:

$$\Delta\theta_i = \frac{2\pi}{n} + (2\mu - 1) \cdot \vartheta \cdot \frac{2\pi}{n} \quad (1)$$

式中: ϑ 为位于 $(0, 1)$ 之间的数, ϑ 越小,极角增量越均匀; n 为顶点数量。为确保所有极角增量 $\Delta\theta_i$ 总和为 360° , 应使用以下公式处理。

$$\bar{\Delta\theta}_i = \Delta\theta_i \cdot \frac{2\pi}{\sum \Delta\theta_i} \quad (2)$$

最后,多边形的极角可通过以下公式确定:

$$\theta_i = \sum_{j=1}^i \bar{\Delta\theta}_j \quad (3)$$

通过极半径向量 $\{r_1 \cdots, r_i, \cdots, r_n\}$ 和极角向量 $\{\theta_1 \cdots, \theta_i, \cdots, \theta_n\}$ 在极坐标系中生成块石。通过设定

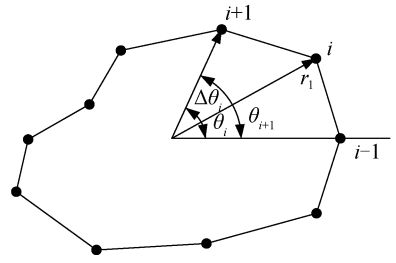


图 1 岩块形状

Fig. 1 Rock block shapes

不同的 r_0 , ϑ 和 n , 可以生成不同形状的多边形作为块石的边界轮廓。

为方便后续建模,需要将极坐标系中多边形顶点的坐标转换为笛卡尔坐标系。

采用上述方法获取大量二维块石轮廓,并将轮廓顶点坐标存储起来,形成块石模板库,便于构建堆积体地层。

1.2 块体的随机投放与重叠检测

将块石模板库中的岩石块随机放置到模型生成域中。由于堆积体中岩块的分布是随机的,因此在建立模型时,可假设岩块的中心位置在模型生成域中服从均匀的随机分布。每个岩石块的中心位置 (x_0, y_0) 通过以下等式确定:

$$\begin{cases} x_0 = x_{\min} + \delta_x(x_{\max} - x_{\min}) \\ y_0 = y_{\min} + \delta_y(y_{\max} - y_{\min}) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}$ 为模型生成域在 x 和 y 轴方向上的最大和最小坐标。 δ_x 和 δ_y 为独立的随机变量,为 $(0, 1)$ 之间的随机值。

当岩石块放置在模型生成域中时,需判断岩石块的相交情况,以确保岩石块完全放置在模型生成域中,且彼此没有重叠。

判断 1 个岩石块是否放置在模型生成域中相对容易,只需判断岩石块的所有顶点是否都在域的边界内即可。如果任何顶点位于域边界之外,则岩石块将超出模型生成域的边界。相反,岩石块完全位于域内。

岩块之间 2 种类型的重叠如图 2 所示。对于 A 型, 1 个岩块的一些顶点位于其他岩块内部,可以使用光线投射算法判断岩块 1 的顶点与岩块 2 的边之间的交点数。如果交叉点数为奇数,则 2 个岩块重叠,如果交叉点数为偶数,则不存在 A 型重叠,需进行下一步判断。对于 B 型, 2 个岩石块的边缘相互相交。有必要确定边的 2 条线段是否相交。判断过程中采用两步法:快速拒绝测试和跨式测试,如果 2 个测试都成功,则 2 条线段不相交。如果 2 个岩石块中的所有边都不相交,则没有 B 型重叠。最终可

以确定 2 个岩石块之间没有重叠。

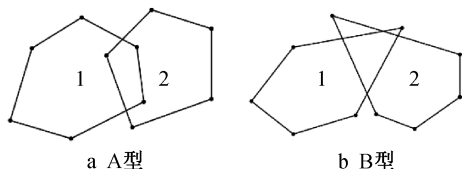


图 2 岩块间重叠类型

Fig. 2 Type of overlap between blocks

2 隧道开挖数值模型构建

仙岳山隧道进口段 210m 范围,浅覆盖穿越厚层(5~6m)堆积体,稳定性差、穿越距离长,施工过程中极易出现塌方冒顶,安全隐患大。传统的基于连续体的软件很难模拟这种非连续性岩土介质,因此,选用 PFC2D 软件模拟隧道开挖。

2.1 模型建立

依托仙岳山隧道进口段工程,建立上覆堆积体地层模型,如图 3 所示。根据研究需求确定模型水平、竖直方向的尺寸为 $75\text{m} \times 75\text{m}$,上半部分和下半部分分别为 35m 的堆积体地层和 40m 的页岩地层。堆积体地层中的块石采用内置 rblock 模型,其他土粒采用 ball 模型。隧道断面形状与现场一致,断面中堆积体地层的占比依次设为 100%, 75%, 50%, 25%, 0,如图 4 所示,其中开挖比即为开挖断面中堆积体地层高度与开挖面高度的比值。堆积体中含石量分别设为 80%, 60%, 40%, 20%,设置 4 种含石量以分析其对隧道开挖稳定性的影响。接触模型采用平行黏结模型,模型共包含 235 198 个颗粒,其中球颗粒 215 697 个,块体颗粒 19 501 个。考虑计算效率和求解精度,颗粒半径取 $0.07 \sim 0.08\text{m}$ 。模型底部和四周均固定,顶面为自由表面。

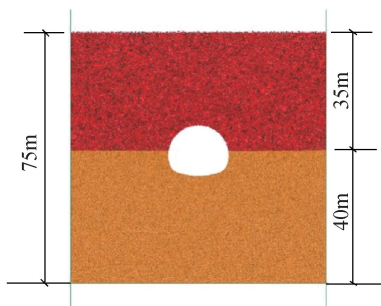


图 3 隧道开挖数值模型

Fig. 3 Numerical model of tunnel excavation

为了模拟块石的离散元模型,通过 generate 命令生成模型,可生成非重叠的块石,但含石量较高时,由于模型范围小,可能无法正常生成所需的块石。此外,这种方法生成的块石在分布上有所不均,这与实际土石混合体的空间分布特征不相符。

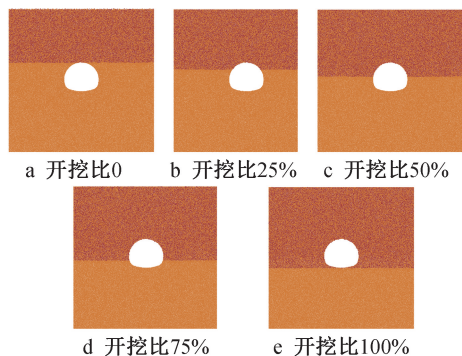


图 4 不同开挖面堆积体占比的隧道模型

Fig. 4 The tunnel model with different accumulation ratio of excavation face

为了解决上述问题并保证块石的正常生成与均匀分布,采取如下步骤:①先将模型高度扩大数倍,这样做可以为生成大量块石提供足够的空间;②在扩大的模型内部生成相匹配的级配曲线的土石混合体;③施加重力,运用“落雨法”让块石下落形成样品^[6];④对模型上方的墙体施加向下的速度,通过这种压缩方式生成规定大小的模型。这个过程不仅模拟了块石的生成,还模拟了它们的自然沉积过程,从而更好地反映了块石在实际土石混合体中的分布特性,如图 5 所示。

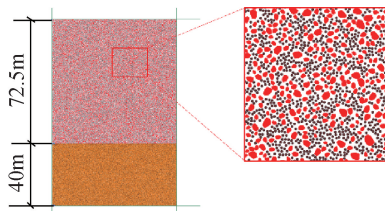


图 5 下落前模型

Fig. 5 Pre-fall model

2.2 参数选择

根据地质勘察报告,围岩参数取值如表 1 所示。

表 1 围岩参数

Table 1 Surrounding rock parameter

类型	重度 $\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 μ	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
土粒	20	0.048 3	0.30	48	25
块石	27	22.0	0.20	185	45
中风化页岩	23	2.5	0.35	200	27

以围岩宏观力学参数为目标,通过数值试验反演该隧洞工程区域细观参数。对数值模型赋予不同的细观参数,进行单轴压缩试验、双轴压缩试验的模拟。地层细观参数如表 2 所示。

3 数值计算结果分析与探讨

3.1 含石量对围岩位移的影响

设定含石量为 20%, 40%, 60% 和 80%,开挖后

表 2 地层细观参数

Table 2 Formation mesoscopic parameters

参数名称	土粒	块石	中风化页岩
密度/(kg·m ⁻³)	2 000	2 700	2 300
摩擦系数	0.25	0.59	0.40
法向刚度/Pa	3.0×10 ⁸	1.4×10 ¹⁰	1.7×10 ⁹
切向刚度/Pa	2.0×10 ⁸	1.2×10 ¹⁰	0.8×10 ⁹
平行黏结法向刚度/(Pa·m ⁻¹)	0.5×10 ⁵	0.4×10 ⁶	0.5×10 ⁶
平行黏结切向刚度/(Pa·m ⁻¹)	0.5×10 ⁵	0.13×10 ⁶	0.19×10 ⁶
内摩擦角/(°)	27.5	45.0	35.0

运算 24 000 时步。不同含石量位移云图如图 6 所示(图 6 中只显示位移部分颗粒,颜色越深表示位移量越大),位移>1m 的部分均设置为纯黑色。随着含石量的增加,大位移颗粒数量减少,受开挖影响区域先变小后变大,含石量为 60% 时受影响区最小。

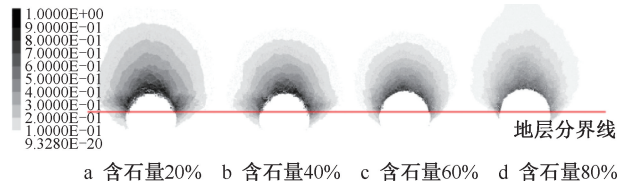


图 6 不同含石量位移云图(单位:m)

Fig. 6 Displacement cloud map with different stone content (unit: m)

记录对比不同含石量下左右边墙、拱顶底板位移,运算 24 000 步时不同含石量下各测点位移如图 7 所示。底板隆起量受含石量影响较小,其他 3 个测点的位移大致随含石量的增加而先减小后增大,在含石量为 60% 时围岩相对稳定。

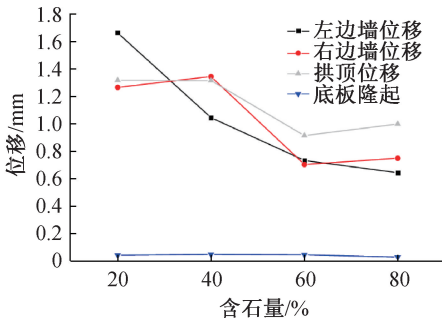


图 7 不同含石量下的测点位移

Fig. 7 Displacement of measuring points with different stone content

3.2 开挖比对围岩变形的影响

不同开挖比下,含石量 60% 时的围岩运算 24 000 步的总位移云图如图 8 所示。由图 8 可知,随着开挖比的增大,堆积体地层围岩中受影响区域变大,围岩稳定性变差,开挖比为 0% 时,围岩破坏范围小,只有顶部围岩破坏较大;开挖比为 25% 时,

围岩破坏范围从拱顶延伸至拱腰,破坏范围变大;随着开挖比的增加,围岩破坏范围进一步增加,隧道破坏情况更严重,这时因为开挖面中堆积体地层占比较小时,由于页岩弹性模量远大于堆积体地层,隧道开挖后围岩变形量小;占比变大后,围岩中堆积体占比增加,稳定性下降,进而造成隧道破坏情况加剧。

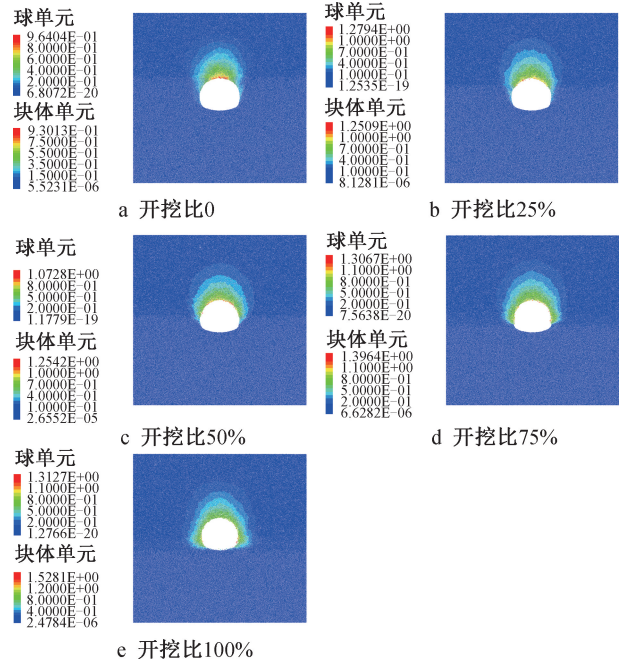


图 8 运算 24 000 步时位移云图(单位:m)

Fig. 8 Displacement cloud map at calculating 24 000 steps (unit: m)

不同开挖比隧道开挖围岩收敛情况如图 9 所示。由图 9 可知,隧道开挖后,隧道围岩变形增加,其中底板隆起量趋于稳定。当开挖比为 100% 时,运算到 3 000 步后保持恒定,说明隧道底部出现块体崩离。随着开挖比的增加,左、右边墙位移量增大,且左边墙与右边墙水平位移不对称。为精细化研究开挖面中堆积体地层占比对左、右边墙位移的影响,增加了 60% 和 90% 工况,细化了 50%~100% 区间。

由于土石混合体是散体材料,其抗拉和抗剪强度低,拱顶处的围岩主要为局部变形和破坏,围岩应力传递特性弱,高应力加剧了块石的转动,使围岩发生破坏,进而增加了围岩变形,导致左边墙水平位移与右边墙水平位移不对称。其中,由于交界处强度不连续变化,引起应力集中,导致左、右边墙应力增大,拱顶、拱底应力减小,所以开挖比 75% 穿越交界带时的左、右边墙位移量大于开挖比 100% 未穿越交界带时的左右边墙位移量,开挖比 75% 穿

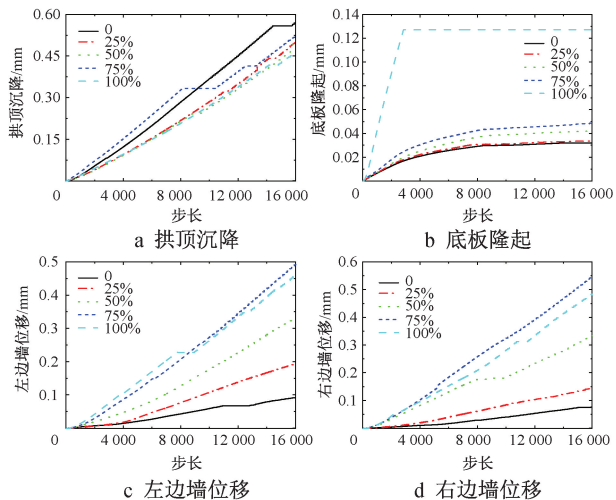


图 9 不同开挖比隧道开挖围岩收敛情况

Fig. 9 Convergence of surrounding rock in tunnel excavation with different excavation ratio

越交界带时的拱顶沉降量和底板隆起量小于开挖比 100%未穿越交界带时的拱顶沉降量和底板隆起量。

运算 24 000 步的时力链图如图 10 所示。由图 10 可知,随着开挖比的增加,拱顶的时力链逐渐减少,底板下部逐渐增多,这是由于上覆堆积体稳定性较弱,随着开挖比的增大,隧道围岩中堆积体地层占比增加,拱顶上部形变范围变大,颗粒接触力链断开区增大,而下部岩体稳定性较强,随着开挖比的增大,底板下部颗粒接触力链情况无明显变化。

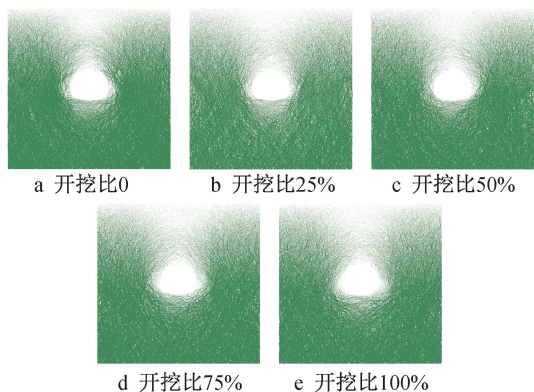


图 10 运算 24 000 步时力链

Fig. 10 Force chain at calculating 24 000 steps

运算 24 000 步时位移破坏情况如图 11 所示。由图 11 可知,随着开挖比的增大,上部塑性区显著扩大,下部塑性区始终较小,在开挖比为 100%时,下部塑性区几乎消失。这是由于下部岩层黏结力较大,稳定性好,隧道开挖对其影响较小,而上部堆积体地层稳定性差,颗粒与块石之间的黏结力弱,抗变形能力弱,形变量大,随着开挖比的增大,隧道

开挖面中堆积体地层占比增大,塑性区显著扩大。

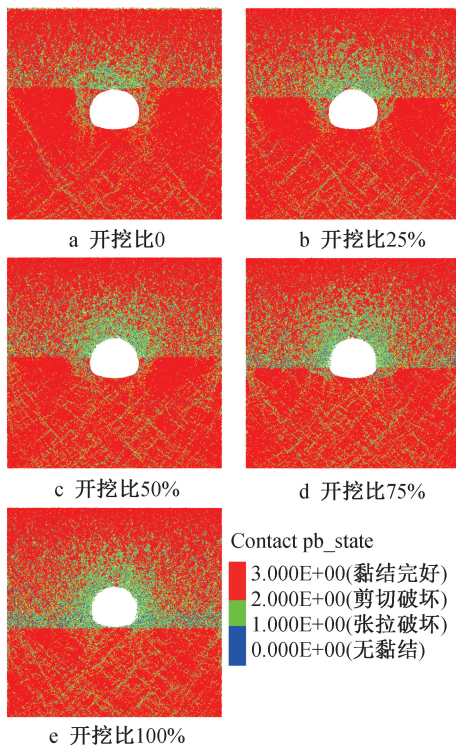


图 11 运算 24 000 步时位移破坏情况

Fig. 11 Displacement failure at calculating 24 000 steps

4 地表注浆加固与应用

4.1 工程概况

仙岳山隧道位于醴陵市袁木岭村。隧道区域内表层覆盖层主要为粉质黏土、碎石,厚度分布不均,厚 3.2~12.5m,局部见基岩裸露。隧址区分布的岩性主要为三叠系上统,煤系地层,岩性为灰色砂质页岩、砂岩,夹薄层烟煤,砂质页岩、砂岩多呈互层状分布。隧道出口端左、右洞门均位于厚度较大的坡积及冲积物处,下伏基岩全-强风化岩厚度较大,隧道洞门不易成洞,且仰坡失稳可能性大。

4.2 地表注浆设计与施工工艺

洞口地表覆盖层厚 5~8m,地表注浆钻孔深度最高在 16m 以上,采用潜孔钻在注浆点位钻孔。为保证注浆效果,地表注浆采用 2 次扫孔分段注浆的方式。钻孔完毕后,采用后退式方式扫孔 1 遍,清孔完毕后,再将钻杆插入孔底,重复扫孔 1 次即可。注浆管采用 $\phi 42 \times 3.5$ 热轧无缝钢管加工制成。钢管尾部焊上 $\phi 6$ 钢筋劲箍,前端加工成锥形。加固范围内注浆管四周钻 4 排 $\phi 8$ 的注浆孔,加固范围外管段不钻孔,作为注浆用导浆管。注浆采用水泥浆液,注浆参数为水灰比 0.8 : 1~1 : 1,注浆压力 0.5~1.0MPa。小导管每孔注浆量达到设计注浆量时可结束注浆。采用分段注浆,开泵前旋转压力,调节

旋钮将油压调在要求的油压刻度上,随注浆阻力的增大,泵压随之升高,当达到调定值时,会自动停机,不致产生超压注浆的危险。注浆泵流量大小由注浆泵的排量调节控制钮和排量记录仪加以控制。注浆按从低至高的顺序进行注浆。

5 结语

1) 含石量对堆积体地层稳定性的影响较大,大致在含石量为 60% 时最优,过大或过小均对堆积体地层的稳定性有害。

2) 堆积体地层围岩稳定性较下层岩体相比较差,随开挖比增大围岩形变区增大。

3) 堆积体是散体材料,具有不连续性,其抗拉和抗剪强度低,左右边墙水平位移不对称,塑性区分布也不对称。

4) 依托仙岳山堆积体隧道工程,基于光线投射算法与颗粒离散元法,并结合 PFC2D 软件,实现了对块石的随机投放,并最终构建了仙岳山堆积体隧道开挖计算模型。经现场施工实践验证,现场注浆试验表明,注浆压力 0.5~1.0 MPa,注浆效果较好。

参考文献:

- [1] 徐文杰,胡瑞林. 土石混合体概念、分类及意义[J]. 水文地质工程地质,2009,36(4):50-56,70.
- XU W J, HU R L. Conception, classification and significations of soil-rock mixture [J]. Hydrogeology and engineering geology, 2009, 36(4): 50-56, 70.
- [2] DEEV E V, ZOLNIKOV I D, GOLTSOVA S V, et al. Traces of paleoearthquakes in the Quaternary deposits of intermontane basins in central Gorny Altai [J]. Russian geology and geophysics, 2013, 54(3): 312-323.
- [3] XIAO J Z, DAI F C, WEI Y Q, et al. Comparative analysis of excavation schemes for a tunnel constructed through loose deposits [J]. Journal of performance of constructed facilities, 2016, 30(4): 04015061.
- [4] 余涛,廖杭,朱宁波,等. 粉煤灰堆积体大断面连拱隧道失稳破坏模式及施工力学研究[J]. 岩土工程学报,2024,46(9): 1909-1918.

YU T, LIAO H, ZHU N B, et al. Instability failure modes and construction mechanics of large-section multi-arch tunnels in fly ash deposits [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2024, 46(9): 1909-1918.

- [5] 杨波,谭勇. 土石混合体地层中基坑开挖对邻近既有隧道影响[J]. 哈尔滨工业大学学报,2021,53(11):46-58.
- YANG B, TAN Y. Influence of deep excavation on adjacent tunnel in soil-rock mixtures [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2021, 53(11): 46-58.
- [6] 谢亦朋,张聪,阳军生,等. 基于局部粗粒化离散元的冰水堆积体隧道围岩破坏特征与加固措施研究[J]. 岩石力学与工程学报,2021,40(3):576-589.
- XIE Y P, ZHANG C, YANG J S, et al. Study on failure characteristics and reinforcement measures of surrounding rock of glacial deposit tunnels based on coarse-grained DEM [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2021, 40(3): 576-589.
- [7] LU L F, LIANG S S, LUO S Y, et al. Optimization of the construction technology of shallow-buried tunnel entrance constructed in residual slope accumulation of gravelly soil [J]. Geotechnical and geological engineering, 2018, 36(4): 2391-2401.
- [8] 华文俊,肖源杰,王萌,等. 级配与颗粒形状对复杂堆积体路基填料剪切性能影响的离散元模拟研究[J]. 中南大学学报(自然科学版),2021,52(7):2332-2348.
- HUA W J, XIAO Y J, WANG M, et al. Discrete element modeling (DEM) study on effect of gradation and morphology on shear strength behavior of rock debris as embankment fill materials [J]. Journal of Central South University (science and technology), 2021, 52(7): 2332-2348.
- [9] 陆勇,周国庆,顾欢达. 常压至高压下砂土强度、变形特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2016,35(11):2369-2376.
- LU Y, ZHOU G Q, GU H D. Experimental study of strength and deformation characteristics of sand under different pressures [J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2016, 35(11): 2369-2376.
- [10] WANG Z M, KWAN A K H, CHAN H C. Mesoscopic study of concrete I: Generation of random aggregate structure and finite element mesh [J]. Computers & structures, 1999, 70(5): 533-544.