

判定准则对砂卵石地层隧道开挖扰动区确定的影响研究

张佩¹, 刘宇飞¹, 侯世伟², 杜修力³

(1. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616; 2. 沈阳建筑大学 土木工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
3. 北京工业大学 城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124)

摘要: 开挖扰动区是评价隧道开挖对围岩扰动程度的重要指标, 判定准则的选取对开挖扰动区范围及形态的确定具有重要意义。针对砂卵石地层的隧道开挖扰动区问题, 考虑材料的非均质性, 将地层视为由块石和土体基质组成的两相介质, 建立非均质地层隧道开挖细观分析模型。开展隧道开挖细观数值计算, 并对非均质地层的围岩应力扰动特征与围岩变形分布规律进行分析。在此基础上, 分别选取围岩塑性区、围岩应力扰动度 15%、围岩位移-距离曲线显著变化位置为判定准则, 对不同块石含量的砂卵石地层隧道围岩扰动区进行分析。结果表明: 判定准则对围岩扰动区的范围和形态均具有显著影响, 围岩塑性区主要集中在隧洞拱肩、拱腰及拱脚部位, 以应力扰动度 15% 确定的开挖扰动区呈柚子状, 以位移-距离突变位置确定的开挖扰动区呈直立鸡蛋状。在本文给定条件下, 三种判定准则确定的开挖扰动区均随含石量的增加而减小。

关键词: 砂卵石地层; 开挖扰动区; 判定准则; 地层细观结构; 非均质性

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2026)02-0017-08

Influence of Judging Criteria on the Excavation Disturbance Zone During Tunneling in Sandy Cobble Stratum

ZHANG Pei¹, LIU Yufei¹, HOU Shiwei², DU Xiuli³

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;
2. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, Liaoning 110168, China;
3. Key Laboratory of Urban and Engineering Safety and Disaster Reduction, Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Excavation disturbance zone (EDZ) plays an important role in evaluating the disturbance degree caused by tunneling, and the judging criteria is of great significance in identifying the range and shape of EDZ. Considering the meso-structure of material, the meso-scale numerical models were used to simulate tunnel excavation in sandy cobble strata, in which the large-sized rock blocks and fine-grained soil matrix were treated as separate constituents. Then, the stress redistribution and deformation performance in ground during tunneling were explored in detail. On the basis of this, three judging criteria, i. e. the plastic zone, the stress disturbance degree of 15%, the displacement-distance mutation position, were used to identify the EDZ. A parametric study was carried out to understand the influence of rock content on the EDZ. The simulation results indicate that the judging criteria has a significant effect on the range and shape of EDZ. The plastic zone mainly concentrates on the tunnel spandrel, arch waist and arch foots. The EDZ determined by the stress disturbance degree of 15% is in a shape of a pomelo, while the EDZ determined by the displacement-distance mutation position presents to be an erect ellipse. The EDZ decreases with the increase of rock content.

Keywords: sandy cobble stratum; excavation disturbance zone; judging criteria; ground meso-structure; heterogeneity

收稿日期: 2026-01-21

修稿日期: 2026-02-22

基金项目: 北京市自然科学基金项目(8232007); 北京市教委科研项目-科技计划一般项目(KM202310016013); 北京建筑大学金字塔人才培养工程项目(JDYC20200312)

作者简介: 张佩(1988—), 女, 副教授, 主要从事隧道与地下工程领域研究。E-mail: zhangpei@bucea.edu.cn

通讯作者: 侯世伟(1982—), 女, 副教授, 研究方向为岩土工程防灾减灾等方面研究。E-mail: houshiwei@sjzu.edu.cn

隧道开挖扰动区,是隧道开挖引起的围岩影响范围,主要由开挖围岩应力释放及应力重分布形成^[1-3]。在进行隧道工程建设时,围岩扰动区是评价开挖活动对环境的影响的主要指标^[4],也是隧道结构设计的重要依据。正确认识与合理评价开挖扰动区的形成机理和范围,对于隧道工程的设计、施工以及稳定性控制具有重要意义。

国内外学者采用现场监测、模型试验、理论分析以及数值分析等手段,对隧道开挖扰动区开展了研究。其中,关于开挖扰动区范围的确定,主要从围岩应力和围岩变形两个角度开展。围岩应力变化是围岩土体受扰动时最直接的体现。因此,基于应力变化确定开挖扰动区是常见方法之一。应力指标包括单向应力指标和综合应力指标。常见的单向应力指标有竖向应力^[5]、径向应力^[6]等。单向应力指标具有应用简单的特点,但其难以反映围岩复杂的三维应力状态变化。因此,研究者提出了土体应力比^[7]、屈服接近度^[8]、破坏接近度^[9]、应力扰动指标^[10]等综合应力指标。根据围岩土体应力状态是否达到屈服状态而得到的围岩塑性区^[11],也被广泛地用来评定隧道开挖影响范围。

围岩变形是地层受到扰动的另一主要表现。隧道开挖时,围岩变形始于开挖断面,在靠近开挖断面的一定区域内,围岩的变形会发生显著变化,并出现不同程度的松动与破裂现象。在分析开挖扰动区时,常见的围岩变形判断指标有围岩位移变化特征、围岩弹性模量以及围岩损伤因子。结合位移在地层中的变化规律,Kwon 等^[12]常将围岩位移显著变化的区域视为开挖扰动区,并根据围岩径向位移急剧变化位置^[13]或围岩位移零处^[14]确定其边界。采用无损测试技术,Fattahi 等^[15]测得隧洞周围地层的弹性模量会显著减小,并将弹性模量减小的区域视为开挖扰动区。同时,部分研究者^[16-17]认为隧道开挖导致围岩产生不同程度的损伤,并根据损伤因子的分布规律确定开挖扰动区。

分析指标及判定准则的选取,对开挖扰动区范围及形态的确定具有重要意义。采用不同的分析指标及判定准则,得到的开挖扰动区存在一定差异。研究表明,开挖扰动区主要集中于开挖断面周围 0.20~3.20 倍隧道半径范围内^[5,16],分布形状多呈圆形、椭圆形及蝴蝶状。因此,明确不同分析指标或判定准则下开挖扰动区的差异,对于正确认识与合理评价开挖扰动区具有重要的意义。另一方面,需要注意的是,目前关于开挖扰动区的研究,多是针对

岩石地层、砂土地层和黏土地层开展的,而在砂卵石地层的成果相对薄弱。砂卵石地层是由具有一定尺寸、强度较高的岩块和强度较低的土体构成的不均匀松散岩土介质系统^[18-20],为典型的土石混合物。由于组成成分的物理力学性质差异很大,其表现出显著的非均质性,隧道施工场地力学行为会受到地层内部细观结构的显著影响。

针对砂卵石地层隧道开挖围岩扰动区问题,本文从细观角度出发,将砂卵石地层材料视为由块石和土体基质组成的两相材料,开展非均质地层隧道开挖细观数值模拟,并对围岩应力扰动特征和变形规律进行了分析。在此基础上,基于不同的分析指标与判定准则,探讨了不同含石量砂卵石地层中围岩扰动区的变化。

1 砂卵石地层隧道开挖细观分析模型

砂卵石地层二维细观分析模型如图 1 所示,计算区域长度为 60 m,高度为 40 m。开挖断面为圆形,隧道直径 6.0 m,隧洞顶点埋深为 15 m。采用全断面开挖方式,不加衬砌支护。在全部计算区域内,均考虑地层材料的细观结构特征,将材料视为由块石与土体组成的两相介质。其中,块石面积含量 $C_v = 45\%$,粒径 $D_p = 0.30$ m。块石均匀地分布在地层中,采用圆形形状表征。鉴于计算量的限制,暂不考虑块石与土体之间界面过渡区的影响。

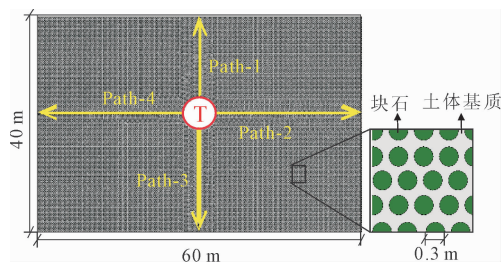


图 1 砂卵石地层隧道开挖细观分析模型

由于块石拉/压强度较大,可视为弹性材料。土体基质采用经典的 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型描述其变形行为。砂卵石地层细观组分材料参数与文献^[18-19]相同,如表 1 所示。

细观有限元模型边界条件为上表面自由,底部设置水平与竖向位移约束,侧面设置法向位移约束。通过给定数值模型顶部和底部的竖向应力值及其对应的坐标值,形成初始应力场。模型中其它部位的竖向应力值则根据地表和底部应力线性差值得到,水平应力通过竖向应力乘以水平侧压力系数获取,

本文水平侧压力系数 $K_0 = 0.5$ 。设置 4 条监测路径,如图 1 中 Path-1 至 Path-4 所示。路径 Path-1 和

Path-3 沿模型竖直方向分布,位于隧道对称线上; Path-2 和 Path-4 位于通过隧道中心的水平线上。

表 1 砂卵石地层细观组分材料参数

块石			土体					
密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比	密度 /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /($^\circ$)	剪胀角 /($^\circ$)	弹性模量 E/MPa ($\sigma_3 = 400 \text{ kPa}$)	泊松比
2700	50	0.20	1900	17.5	20	5	10	0.30

2 砂卵石地层隧道开挖场地力学行为

2.1 围岩塑性区

围岩塑性区是指地层中应力状态达到屈服状态的区域。对于含石量为 45% 的地层,隧道开挖前后,围岩塑性区分布如图 2 所示。其中,红色部分代表地层中应力状态达到屈服状态的区域,蓝色部分代表应力未达到屈服状态的区域。从图 2 可以看出,隧道开挖后,围岩塑性区主要分布在隧洞拱肩、拱腰及拱脚处,在拱肩处的分布范围约为 $3.0R$ (R 为隧道半径),在拱腰处约为 $2.0R$,在拱脚处约为 $2.0R$ 。

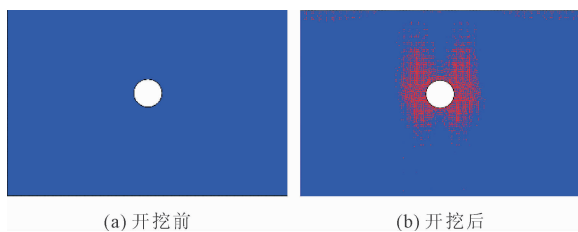


图 2 围岩塑性区

2.2 围岩应力扰动特征

对于含石量为 45% 的地层,隧道开挖前后,围岩竖向应力 (S_{22}) 分布如图 3 所示。从图 3 可以看出,相对于初始状态,隧道开挖后洞周围岩应力发生了显著变化。不同监测路径的围岩水平应力和竖向应力如图 4 所示。从图 4 可以看出,隧道开挖前,不同位置处围岩水平应力与竖向应力间的关系均为 $S_{11} = K_0 \times S_{22}$ 。路径 Path-1 和 Path-3 沿模型竖直方向分布,因而竖向应力与其深度呈线性关系; Path-2 和 Path-4 沿模型水平方向分布,故监测路径上围岩竖向应力保持不变。隧道开挖后,监测路径上的围岩应力将发生显著变化,由于块石的存在,应力呈现出明显的波动性;且围岩受扰动程度越大,应力的波动幅度越大。

图 4(a) 为隧道上方路径 Path-1 竖向应力 S_{22} 和水平应力 S_{11} 变化图。从图 4(a) 可以看出,从开挖

断面到地表处,围岩竖向应力呈现出先减小后保持不变的变化趋势,且与开挖断面距离越近,竖向应力减小的幅度越大。当距离开挖断面 8.0 m 位置处,围岩水平应力与初始应力保持一致。水平应力整体表现为增加的特点。图 4(c) 为隧道下方路径 Path-3 竖向应力和水平应力变化图, Path-3 上的应力变化与 Path-1 表现出相似的特点,即竖向应力减小而水平应力增大。

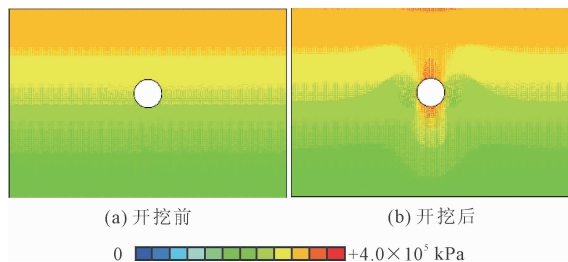


图 3 围岩竖向应力 (S_{22}) 分布图

图 4(b) 和图 4(d) 分别为隧道右侧路径 Path-2 和左侧路径 Path-4 应力变化图。从图中可以看出,隧道开挖后, Path-2 路径竖向应力呈现出“减小-增加-保持不变”的变化规律,水平应力呈现出“减小-保持不变”的变化趋势。当距离开挖断面 9.0 m 位置处,围岩应力与初始应力保持一致。 Path-4 路径上水平应力和竖向应力表现出与 Path-2 路径相同的变化特征,当距离开挖断面 8.0 m 位置处,围岩应力恢复至初始应力状态。

2.3 围岩变形扰动特征

隧道开挖后,围岩位移等值线分布如图 5 所示。从图 5 可以看出,由于块石的存在,开挖断面周围的围岩变形呈绕石发展的形式,水平位移和竖向位移均在一定程度上呈现出非光滑的现象;且与隧道断面距离越近,非光滑、非对称的现象越明显。

图 6 为不同时刻时,四条监测路径的围岩水平位移和竖向位移。路径 Path-1 和 Path-3 位于模型对称线上,围岩变形以竖向位移为主,水平位移较小。图 6(a) 为隧道上方路径 Path-1 竖向位移 U_2 变化图。从图 6(a) 可以看出,围岩竖向位移随与隧道

断面距离的增加呈两阶段变化特征。从开挖断面到隧道上方某一位置,竖向位移显著减小,而从该位置到地表,竖向位移变化不大。图 6(c) 为隧道下方路

径 Path-3 竖向位移变化图。从图 6(c) 可以看出,竖向位移在 Path-3 上的变化规律与 Path-1 类似,也呈现出两阶段变化特征,但变化速率存在一定差异。

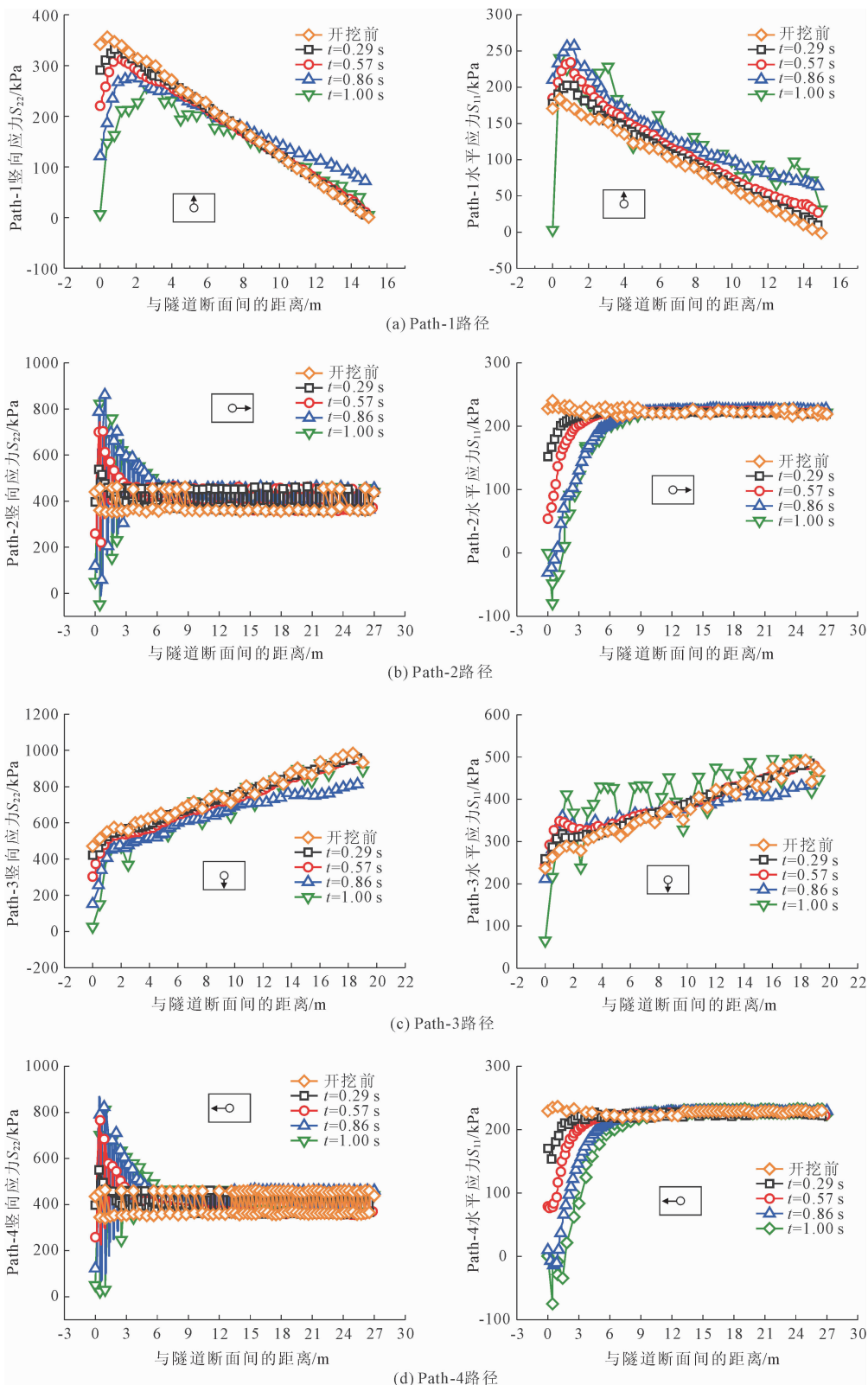


图 4 监测路径围岩应力变化图

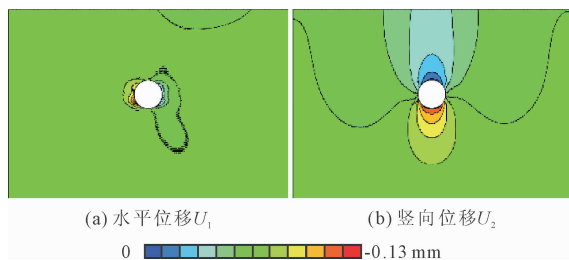
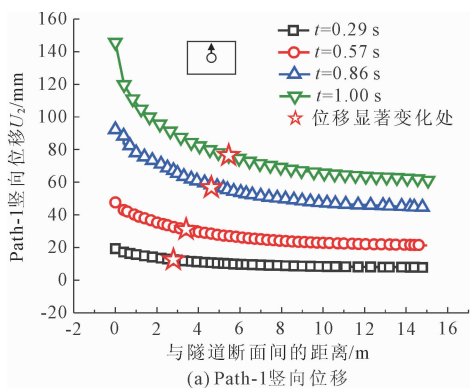
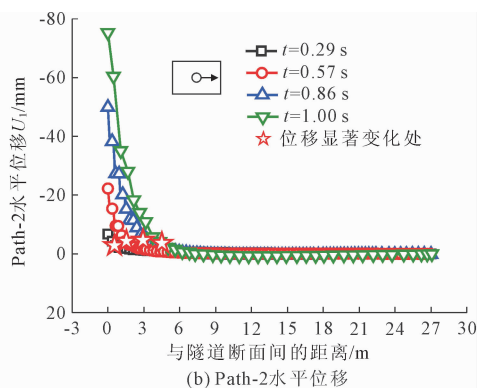


图 5 围岩位移等值线图

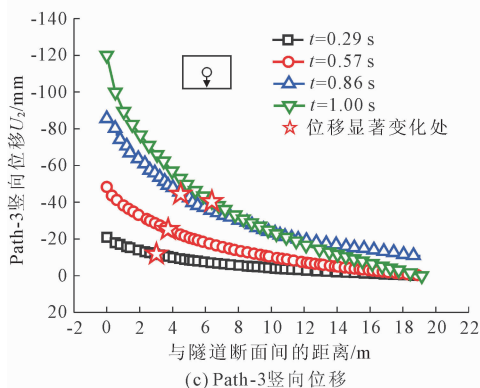
Path-2 和 Path-4 位于通过隧道中心的水平线上,其变形以水平位移为主,竖向位移较小。图 6(b)为隧道右侧路径 Path-2 水平位移变化图。



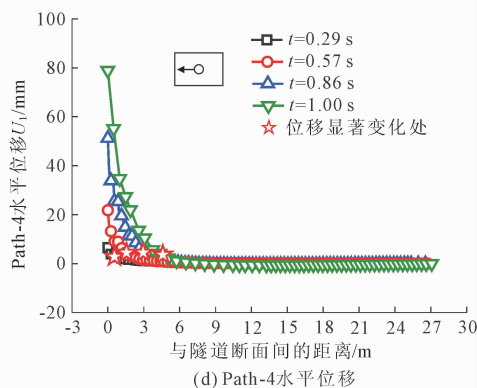
(a) Path-1 竖向位移



(b) Path-2 水平位移



(c) Path-3 竖向位移



(d) Path-4 水平位移

图 6 监测路径围岩位移

3 开挖扰动区对比分析

判定准则的选取对开挖扰动区的确定具有重要意义。考虑块石细观结构的变化,选择三种判定准则,对非均质地层隧道开挖扰动区进行分析。

3.1 判定准则

基于对非均质地层施工力学行为的认识,结合前人的研究工作,本文选取以下三种常用的判定准则进行砂卵石地层开挖扰动区的对比分析。①围岩塑性区,是围岩应力状态达到屈服的区域,常被视为开挖扰动区。②基于围岩应力的判定准则,以围岩径向应力扰动度为 15% 确定开挖扰动区边界。隧

从图 6(b)可以看出,从开挖断面到围岩深处某一位置,水平位移急剧减小,而从该位置到模型右侧边界,水平位移变化不大。在 Path-2 路径上,围岩水平位移存在一急剧变化点。在本文计算条件下,急剧变化点距开挖断面距离为 4.50 m,即 1.50R 处。图 6(d)为隧道左侧路径 Path-4 水平位移变化图,从图 6(d)可以看出,水平位移值在 Path-4 与 Path-2 存在一定差异,体现出块石对围岩位移的影响;但其变化规律与 Path-2 类似,也呈现出两阶段变化特征。在 Path-4 中,斜率显著变化位置距离隧道开挖断面 4.59 m 处,即 1.53R 距离处。

道开挖后,当围岩应力相对于初始状态的相对变化大于 15%,认为围岩受到显著扰动。③基于围岩变形的判定准则,以围岩位移-距离曲线上的突变位置或斜率显著变化位置确定开挖扰动区边界。

3.2 工况设计

地质调查表明,因地质作用不同,不同工程线路的砂卵石地层之间存在显著差别。对于北京市砂卵石地层,卵石颗粒由西部山前向东逐渐变小^[21],其中地铁 7 号线地层超过 200 mm 的颗粒含量约为 15%~45%,局部含有超过 500 mm 的块石^[22];地铁 10 号线西南段,粒径大于 200 mm 的含量为 10%~20%,最大粒径达 1 630 mm^[23]。对于成都市砂卵石

地层,地铁 4 号线超过 200 mm 的含量为 4%~20%,局部含有超过 600 mm 的漂石^[24]。对于兰州市砂卵石地层,地铁 1 号线地层中大粒径集中在 150 mm~400 mm,局部含量达 20%~35%,最大粒径为 720 mm^[23]。鉴于此,本文考虑块石含量的变化,具体工况如表 2 所示。

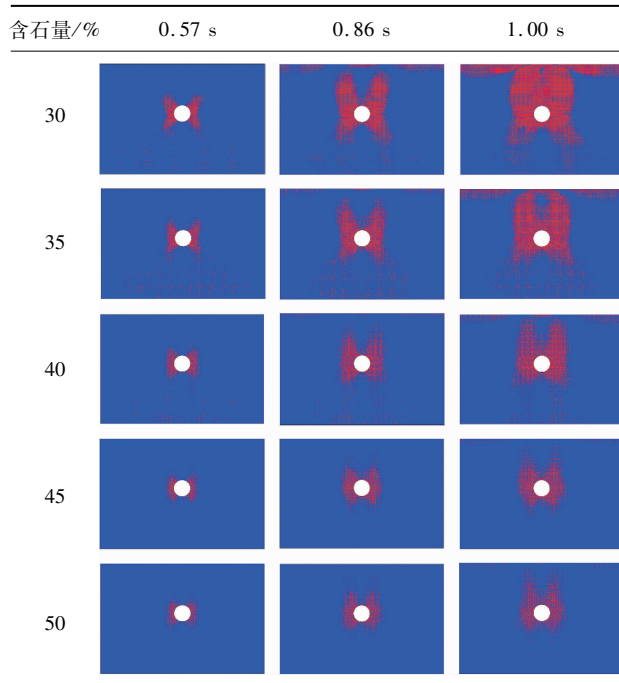
表 2 工况设计

工况	块石含量/%	块石粒径/m
I	30, 35, 40, 45, 50	0.30

3.3 围岩塑性区

表 3 为不同含石量时,围岩塑性区随开挖过程的变化图。其中,块石尺寸保持不变, $D_r = 0.30$ m。

表 3 不同含石量时围岩塑性区随开挖过程的变化图



从表 3 可以看出,围岩塑性区的变化主要呈以下两个特点。首先,在相同的计算时刻,当含石量从 30% 增加到 50% 时,围岩塑性区逐渐减小。以计算时刻 1.00 s 为例,围岩塑性区主要分布在拱肩、拱腰及拱脚处。当含石量从 30% 增加到 50% 时,围岩塑性区在拱肩处由 5.0R 减小至 2.70R,在拱腰处由 2.50R 减小至 1.70R,在拱脚处由 4.10R 减小至 1.80R。研究表明,当含石量大于 30% 时,土石混合体的抗剪强度和弹性模量均随含石量的增加而提高^[25-27]。因而,地层抵抗变形和破坏的能力逐渐增强,围岩扰动区不断减小。其次,在相同的卵石含量下,随着开挖过程的发展,围岩塑性区逐渐扩大。以

卵石含量 40% 为例,当计算时刻为 0.57 s、0.86 s 和 1.00 s 时,塑性区在拱肩处分别为 1.18R、1.87R 和 2.56R,在拱腰处分别为 1.10R、1.69R 和 2.23R,在拱脚处分别为 1.25R、2.35R 和 2.70R。

3.4 基于围岩应力的判定准则

将开挖扰动区在监测路径方向的长度定义为特征长度,依据 Path-1 至 Path-4 的顺序,特征长度依次为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 。图 7 所示以围岩径向应力扰动度 15% 确定的开挖扰动区。从图 7 可以看出,围岩扰动区的变化主要呈以下三个特点。首先,以应力扰动度 15% 确定的开挖扰动区形状呈柚子状,且隧道上部的影响高度要大于下部。其次,在相同的含石量下,随着开挖过程的发展,开挖扰动区范围不断增大。最后,在相同的计算时刻,当含石量从 30% 增加到 50% 时,开挖扰动区的范围逐渐减小,但在各个方向的减小速率有所差异。

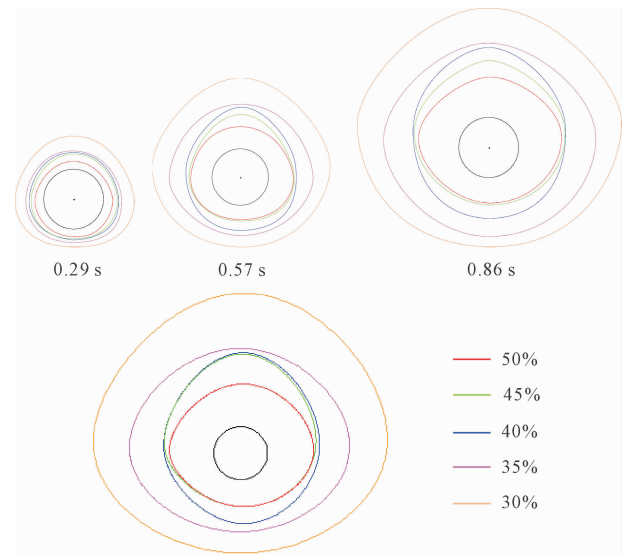


图 7 开挖扰动区形状随含石量及开挖过程的变化(应力角度)

图 8 为计算完成时刻,采用围岩应力显著变化准则确定的开挖扰动区特征长度随含石量的变化规律。从图 8 可以看出,当含石量增加时,特征长度在各个方向均呈减小的变化规律。然而,由于地层中块石空间分布的影响,特征长度在不同路径上会出现变化不同步的现象。在本文给定的地层条件下,当含石量从 30% 增大至 50% 时, L_1 从 5.0R 减小至 1.60R、 L_2 从 4.47R 减小至 1.73R、 L_3 从 2.75R 减小至 1.0R、 L_4 从 4.50R 减小至 1.67R。

3.5 基于围岩变形的判定准则

图 9 所示以围岩位移-距离曲线上斜率显著变

化位置确定的开挖扰动区。从图 9 可以看出,围岩扰动区的变化主要呈以下三个特点。首先,以围岩变形显著变化位置确定的开挖扰动区形状呈直立的鸡蛋状。其次,在相同的含石量下,随着开挖过程的发展,开挖扰动区范围不断增大,且形态逐渐由“瘦长型”向“矮胖型”发展。最后,在相同的计算时刻,当含石量从 30% 增加到 50% 时,开挖扰动区的范围逐渐减小,其中水平方向的减小速率稍大于竖直方向。

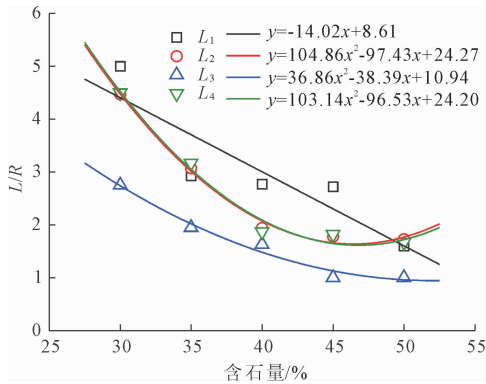


图 8 开挖扰动区特征长度随含石量的变化规律(应力角度)

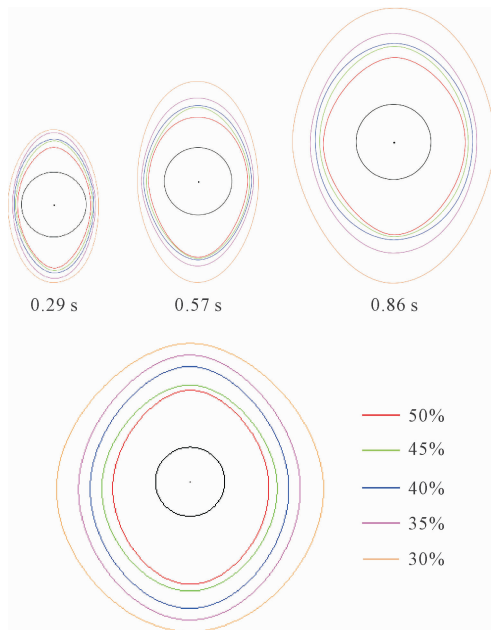


图 9 开挖扰动区形状随含石量及开挖过程的变化(变形角度)

图 10 所示计算完成时刻,采用围岩变形显著变化准则确定的开挖扰动区特征长度随含石量的变化规律。从图 10 可以看出,当含石量增加时,特征长度在各个方向均呈线性减小的变化规律,其中水平方向的减小速度稍大于竖直方向。在给定的地层条

件下,当含石量从 30% 增大至 50% 时, L_1 从 3.0R 减小至 1.65R、 L_2 从 3.33R 减小至 1.97R、 L_3 从 2.83R 减小至 1.22R、 L_4 从 2.83R 减小至 1.27R。

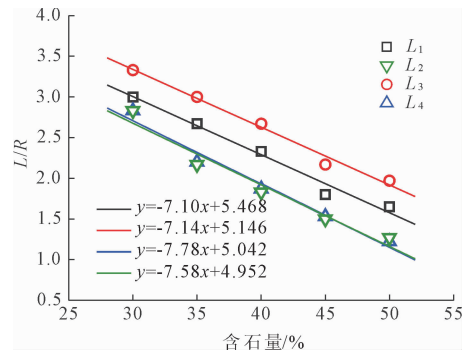


图 10 开挖扰动区特征长度随含石量的变化规律(变形角度)

4 结 论

针对砂卵石地层的隧道开挖问题,考虑材料的非均质特性,建立地层细观分析模型,对非均质地层围岩应力扰动特征和变形特征进行分析。在此基础上,选取三种判别准则,对不同含石量的隧道开挖扰动区开展分析。得到以下结论:

(1) 由于块石的存在,围岩应力呈现出波动性。在开挖断面周围,波动程度显著增大,即围岩受扰动程度越大,应力波动幅度越大。

(2) 判定准则对开挖扰动区范围和形态均具有显著影响。围岩塑性区主要集中在隧洞拱肩、拱腰及拱脚部位,以应力扰动度 15% 确定的开挖扰动区范围大于以位移-距离突变位置确定的范围。

(3) 地层细观结构对隧道开挖扰动区具有显著的影响。在本文给定条件下,三种判别准则确定的开挖扰动区均随含石量的增加而减小。

参考文献:

[1] 郑颖人,朱合华,方正昌,等. 地下工程围岩稳定分析与设计理论[M]. 北京:人民交通出版社,2012.

[2] Zhu Wancheng, Wei Jiong, Zhao Jian, et al. 2D numerical simulation on excavation damaged zone induced by dynamic stress redistribution[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014,43(7):315-326.

[3] Zhang Pei, Du Xiuli, Lu Dechun, et al. Study on the excavation disturbed zone during tunneling in sandy cobble stratum considering the material meso-structure[J]. Transportation Geotechnics, 2021,29:100590.

[4] Zhang Jie, Fu Xudong, Tan Chengxuan, et al. Study on the division method of the excavation disturbed zone in

- tunnels based on continuous-discontinuous theory [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2025, 84(6):312.
- [5] 袁大军, 尹凡, 王华伟, 等. 超大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(10):2074-2080.
- [6] Li Jinwang, Shen Caihua, He Xiufeng, et al. Numerical solution for circular tunnel excavated in strain-softening rock masses considering damaged zone[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12:4465.
- [7] 黎春林, 缪林昌. 盾构隧道施工土体扰动范围研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(3):759-766.
- [8] 周辉, 张传庆, 冯夏庭, 等. 隧道及地下工程围岩的屈服接近度分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(17):3083-3087.
- [9] 张传庆, 周辉, 冯夏庭. 基于破坏接近度的岩土工程稳定性分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(5):888-894.
- [10] 李建贺, 盛谦, 朱泽奇, 等. 地下洞室分期开挖应力扰动特征与规律研究[J]. *岩土力学*, 2017, 38(2):549-556.
- [11] Chen Rui, Jiang Yongle, Shi Wei. Analysis of stress evolution characteristics of surrounding rock in deep-buried tunnels crossing fault zone[J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2024, 28:4100-4115.
- [12] Kwon S, Cho W J. The influence of an excavation damaged zone on the thermal-mechanical and hydro-mechanical behaviors of an underground excavation[J]. *Engineering Geology*, 2008, 101(3-4):110-123.
- [13] 董方庭, 宋宏伟, 郭志宏, 等. 巷道围岩松动圈支护理论[J]. *煤炭学报*, 1994, 19(1):21-32.
- [14] 严宗雪. 大断面隧道施工的应力路径与空间效应研究[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [15] Fattahi H, Shojaee S, Farsangi M A E, et al. Hybrid Monte Carlo simulation and ANFIS-subtractive clustering method for reliability analysis of the excavation damaged zone in underground spaces[J]. *Computers & Geotechnics*, 2013, 54:210-221.
- [16] Wei Chenhui, Zhu Wancheng, Yu Qinglei, et al. Numerical simulation of excavation damaged zone under coupled thermal-mechanical conditions with varying mechanical parameters[J]. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2015, 75:169-181.
- [17] Shadabfar M, Huang Hongwei, Kordestani H, et al. Probabilistic modeling of excavation-induced damage depth around rock-excavated tunnels [J]. *Results in Engineering*, 2020, 5:100075.
- [18] Zhang Pei, Jin Liu, Du Xiuli, et al. Computational homogenization for mechanical properties of sand cobble stratum based on fractal theory[J]. *Engineering Geology*, 2018, 232:82-93.
- [19] Du Xiuli, Zhang Pei, Jin Liu, et al. A multi-scale analysis method for the simulation of tunnel excavation in sandy cobble stratum[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 83:220-230.
- [20] Jiang Hua, Liu Chongyang, Zhang Ao, et al. Study on the failure mechanism of the shield excavation face in the sandy cobble stratum under different buried depths [J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2025, 4(2):70012.
- [21] 金淮. 中国城市轨道交通工程地质[M]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [22] 廖秋林, 马敬东, 张鹏飞, 等. 富水砂卵石地层暗挖车站洞桩法施工关键技术[J]. *施工技术*, 2015, 44(23):49-53.
- [23] 张淑朝. 兰州地铁低含砂率强渗透性砂卵石降低土压平衡盾构扭矩及防喷涌研究[D]. 北京:北京交通大学, 2018.
- [24] 牟迪. 成都地铁四号线砂卵石层分布规律及工程特性研究[D]. 成都:西南交通大学, 2015.
- [25] Simoni A, Houlsby G T. The direct shear strength and dilatancy of sand-gravel mixtures[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2006, 24(3):523-549.
- [26] Gao Wei, Hu Ruilin, Oyediran I A, et al. Geomechanical characterization of Zhangmu soil-rock mixture deposit [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2014, 32(5):1329-1338.
- [27] Zhang Yu, Lu Junyuan, Han Wei, et al. Effects of moisture and stone content on the shear strength characteristics of soil-rock mixture [J]. *Materials*, 2023, 16(2):567.