

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2026.01.008

块石尺寸对砂卵石地层深埋隧道施工响应影响研究

邹长胜¹, 张佩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: 砂卵石地层是由强度较高的岩块和强度较低的土体构成的不均匀岩土介质, 其场地力学行为受到材料内部细观结构的影响。考虑砂卵石地层的非均质特性, 将地层材料视为由圆形块石和土体基质组成的复合材料, 建立砂卵石地层细观分析模型; 重点关注块石尺寸这一因素, 开展不同块石尺寸的砂卵石地层隧道开挖细观数值计算。进而, 从地层应力、地层变形和围岩扰动区三个角度, 对不同块石尺寸地层的施工响应进行了分析。结果表明: 随着块石尺寸的增大, 围岩应力变化区逐渐扩大, 应力变化幅度与其位置相关; 地中沉降最大值和地中沉降槽宽度系数随地层深度的变化均可采用幂函数进行描述; 随着块石尺寸的增大, 地表沉降最大值线性增加, 而沉降槽宽度系数线性减小; 开挖扰动区随块石尺寸增大而增大, 且此变化规律不受判定准则的影响。

关键词: 砂卵石地层; 隧道开挖; 块石尺寸; 细观数值方法; 地层变形

中图分类号: TU43

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2026)01—0065—09

Influence of Rock Size on the Ground Construction Response for Deep Shield Tunnelling in Sandy Cobble Stratum

ZOU Changsheng¹, ZHANG Pei¹, 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: Sandy cobble strata is a kind of heterogeneous ground, which consists of large-sized rocks and a fine-grained soil matrix. The ground construction mechanical behavior is significantly affected by the internal meso-structure of material. Considering the material heterogeneity, by treating the ground material as a two-phase material composed of rocks and soil, the mesoscale numerical models of sandy cobble soil were established. The mesoscopic simulation on tunnel excavation in sandy cobble strata with different rock size are carried out. Then, from the view of stress redistribution, deformation performance and excavation disturbed zone, the ground response during tunnelling was analyzed. The simulation results showed that with the increase of rock size, the stress variation zone in ground gradually expands, and the stress variation magnitude depends largely on its position. The distribution of the maximum subsurface settlements with depths and the relationship between the width coefficient of subsurface settlement trough and depths all can be described by a power function, respectively. With the increase of rock size, the maximum ground settlement increases linearly while the width coefficient of ground settlement trough decreases linearly. The excavation disturbed zone also expands with the increase of rock size, and this phenomenon is not affected by the judging criteria.

Keywords: sandy cobble strata; tunnel excavation; rock size; mesoscale numerical method; ground deformation

收稿日期: 2025-10-07

修稿日期: 2025-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908023); 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); 市属高校基本科研业务费项目(X20035)

作者简介: 邹长胜(2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事地下与隧道工程等方面研究。E-mail: melody200008@163.com

通讯作者: 侯世伟(1982—), 女, 副教授, 主要从事岩土工程防灾减灾等方面研究工作。E-mail: houshiwei@sjzu.edu.cn

国内外地铁建设的安全事故调查结果表明,地下工程约每 6.5 km 发生一起事故,且每起事故均与其特殊的地质条件相关^[1]。砂卵石地层是一种常见的工程地质体,在我国城镇地区广泛分布。据统计,在我国已批复开展地铁建设的城市中,有 20 多座城市的拟(已)建线路穿越砂卵石地层,如北京、成都、兰州等。因此,开展砂卵石地层隧道施工力学行为的研究具有重要意义。

不同于软土地层、岩质地层等均质地层,砂卵石地层是由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,为典型的土石混合体地层^[2-4]。由于组成成分的物理力学性质差异很大,其材料力学行为和场地质力学行为将显著地受到材料内部细观结构的影响。工程地质勘察结果表明,砂卵石地层中的卵石颗粒尺寸变化较大。对于北京市砂卵石地层,卵石粒径由北向南逐渐增大,卵石最大粒径集中在 400~600 mm 区间,最大达 1 630 mm,超过 200 mm 的颗粒含量约为 15%~45%^[5]。对于成都市砂卵石地层,卵石最大粒径集中在 200~300 mm,粒径大于 200 mm 的颗粒含量约为 0%~22.3%^[6]。对于兰州市砂卵石地层,卵石最大粒径集中在 150~400 mm,最大达 720 mm,局部含量约为 20%~35%^[7]。

对于土石混合体,研究表明,块石尺寸对其宏观力学行为会产生一定影响,试样的抗剪强度、弹性模量以及破坏模式均随块石尺寸的变化而变化^[8-12]。然而,目前关于块石尺寸对砂卵石地层场地施工力学行为的影响研究并不丰富。江英超等^[13]采用直径 800 mm 模型盾构机开展砂卵石地层掘进试验,分析了卵石颗粒级配(颗粒尺寸分别为 0~10 mm、0~18 mm、10~18 mm)对地层变形的影响,结果表明,三种颗粒级配地层中,地表与地中沉降槽均呈“V 型”;且颗粒尺寸越大、地层沉降越大。Hu 等^[14-15]分别在砂卵石地层和砂土地层开展了盾构掘进模型试验,结果表明,相对于小颗粒的砂土地层,砂卵石地层中隧道开挖引起的地表沉降较大,且沉降槽宽度系数相对较小。基于砂卵石地层隧道开挖细观数值模拟,Zhang 等^[16]得到,随着块石尺寸的增大,地表和拱顶沉降呈非线性减小趋势。综上所述可知,目前关于块石尺寸对砂卵石地层隧道施工力学行为的影响研究,主要集中于地表和地中沉降曲线形态的定性描述,鲜有分析块石尺寸对地层沉降大小和沉降槽宽度系数等的定量影响。

本文从细观角度出发,考虑地层材料的非均质

性,建立砂卵石地层细观有限元分析模型,开展不同块石尺寸的隧道开挖模拟。通过对比围岩应力计算值与理论值,验证细观分析模型的适用性。基于 Peck 经验公式,验证高斯分布函数在描述砂卵石地层地表和地中沉降曲线的适用性,进而分析地层沉降最大值和沉降槽宽度系数随块石尺寸的变化规律;最后,结合围岩应力和围岩变形分布特征,对不同块石尺寸下的围岩扰动区进行了探讨。

1 砂卵石地层隧道开挖细观分析模型

1.1 细观数值模型

砂卵石地层隧道开挖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。隧道埋深 $H=15.0$ m,其为地表至隧洞顶点的距离。开挖断面为圆形,隧道直径 $D=6.0$ m。采用全断面一步开挖方式,不加衬砌支护。

在计算区域内,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,暂不考虑块石与土体间界面过渡区的影响。为方便模型的建立,块石均采用圆形描述,含量为 45%,并将块石均匀地放置在细观分析模型中。为避免块石细观因素间的耦合影响,在同一模型中,所有的块石均采用相同的尺寸。

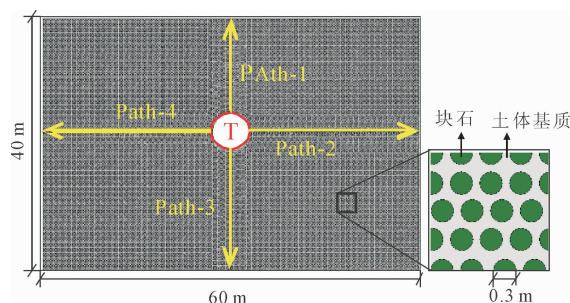


图 1 砂卵石地层隧道开挖细观分析模型

对于隧道工程,当地层中的块石尺寸小于 0.05 倍隧道直径时,可将地层材料视为均匀介质;当块石尺寸大于 0.05 倍隧道直径时,需考虑块石的细观结构特征,将其视为非均质介质^[17-18]。鉴于隧道直径为 6.0 m,本文选取的块石粒径 C_d 分别为 0.30、0.40、0.50、0.60、0.70 m。

1.2 细观组分材料参数

在隧道开挖荷载作用下,块石通常不发生破碎,可视作弹性材料。对于土体基质,采用经典的摩尔-库伦弹塑性本构模型描述其力学特性和变形行为。砂卵石地层细观组分材料参数与文献[2-3,16]相

同,其值由室内三轴试验标定给出,如表 1 所示。

表 1 砂卵石地层细观组分材料参数 ^[2-3,13]						
组分	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E/GPa	泊松 比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦 角 $\varphi/(\text{^\circ})$	剪胀角 $\psi/(\text{^\circ})$
卵石	2700	50	0.2	—	—	—
土体	1900	10	0.3	17.5	20	5

1.3 初始和边界条件

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,侧面设置水平位移约束。通过围岩土体的自重荷载,形成初始竖向应力。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。

2 地层应力分布特征

2.1 计算值与设定值的对比

初始应力场是隧道开挖计算的初始条件。对于

地层中的竖向应力和水平应力,将细观分析模型计算值与理论值进行对比,对细观分析模型的可靠性进行判断。在本文研究中,隧道开挖前,竖向应力 S_{22} 通过土体自重荷载确定,水平应力 S_{11} 通过竖向应力 S_{22} 乘以水平侧压力系数 K_0 确定。水平应力和竖向应力的计算公式为:

$$S_{22} = \rho_{\text{等效}} \times g \times z \tag{1}$$

$$S_{11} = K_0 \times S_{22} \tag{2}$$

式中: $\rho_{\text{等效}}$ 为砂卵石地层材料的等效密度, $\rho_{\text{等效}} = \rho_{\text{石}} c_{\text{石}} + \rho + (1 - c_{\text{石}})$; g 为重力加速度,通常取为 9.8 m/s^2 ; z 为地表到地中某位置处竖向距离; K_0 取值为 0.50。

图 2 为不同块石尺寸下,围岩竖向应力 S_{22} 和水平应力 S_{11} 计算值与理论值的对比。从图 2 可以得出,不同块石粒径下,地层竖向应力计算值与理论值均拟合较好,其值随地层深度线性增加。对于围岩水平应力,计算值与理论值也吻合较好,且其值等于竖向应力的 0.50 倍。结果表明,细观分析模型能准确地描述地层中的围岩应力分布。

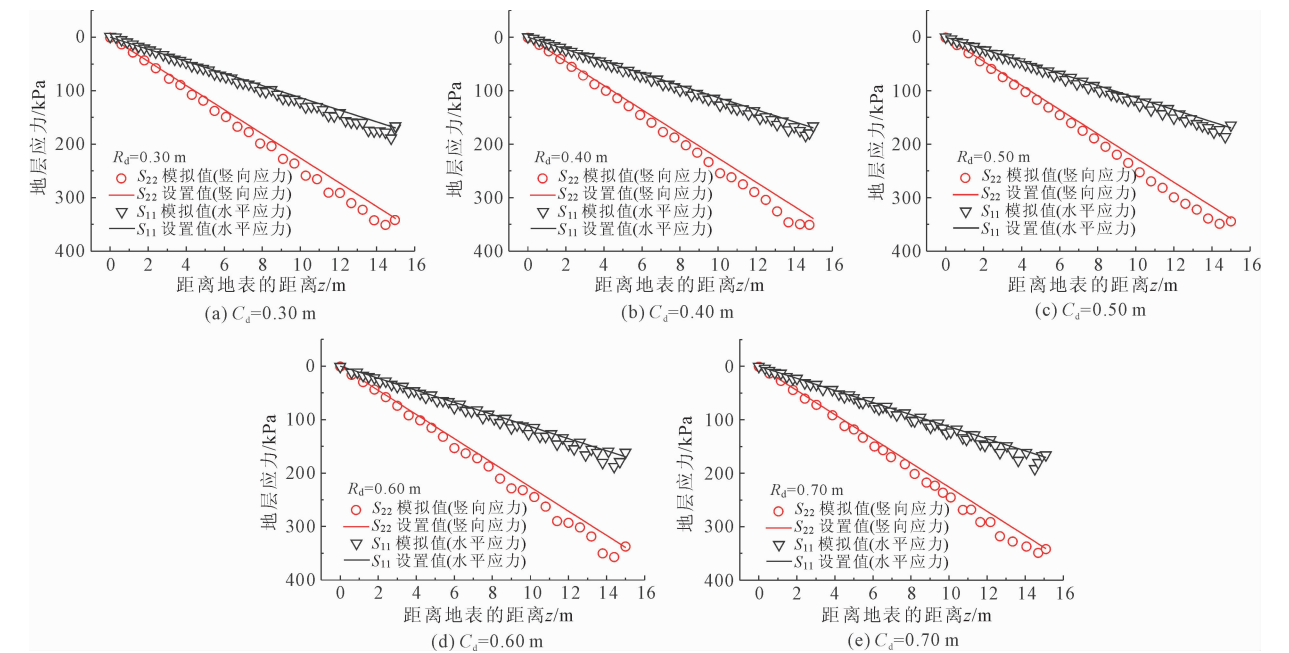


图 2 地层应力计算值与理论值的对比 (含石量 45%)

2.2 地层竖向应力结果

图 3 为隧道开挖后围岩竖向应力云图。从图 3 可以看出,竖向应力在开挖断面周围发生显著变化,其值在隧道上方和下方显著减小。将不同块石尺寸的围岩竖向应力云图进行对比,可以发现,块石粒径变化对其分布具有影响,应力变化区域随块石尺寸

增加而逐渐扩大。

对于由块石和土体基质两相材料组成的砂卵石地层,荷载由块石和土体基质共同承担。在相同的含石量下,随着块石尺寸的增大,在水平方向和竖直方向上,块石的荷载传递面积将逐渐减小,而土体基质的荷载传递面积逐渐增加。因而,根据“高刚多

载”的原则,在相同的开挖荷载作用下,围岩应力变化区域将会逐渐扩大。

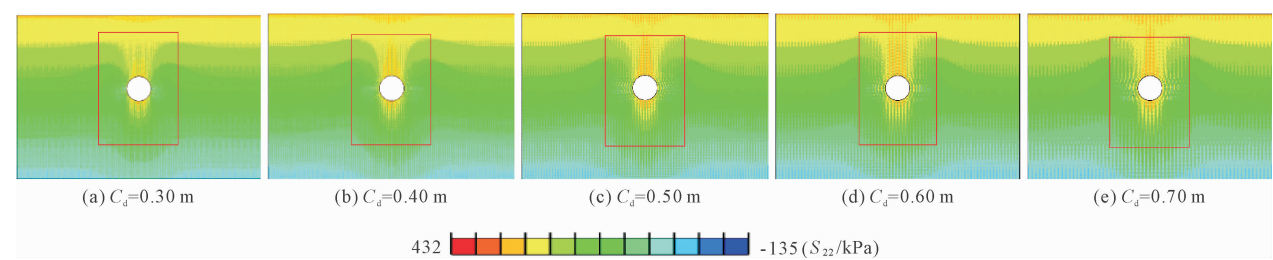


图 3 不同块石粒径的竖向应力云图 (含石量 45%)

2.3 监测路径应力变化

隧道开挖前后,不同监测路径的竖向应力值 S_{22} 如图 4 所示。

隧道开挖前,竖向应力与深度呈线性关系。隧道开挖后,竖向应力沿路径 Path-1 可划分为应力降低区和应力不变区。隧洞周围竖向应力显著降低,并呈波动变化的现象;随着与开挖面距离的增加,围岩竖向应力逐渐趋于初始状态。块石粒径对应力降

低区范围及应力降低幅度均存在影响。计算结果表明,随着块石尺寸增大,应力降低区范围增大,且应力降低幅度增加。以距隧道断面 5.80 m 位置为例,当块石粒径由 0.30 m 增大至 0.70 m 时,相对于初始应力状态,竖向应力降低幅度分别为 14、49、58、53、109 kPa。竖向应力在路径 Path-3 上的分布,与路径 Path-1 表现出类似的变化规律。

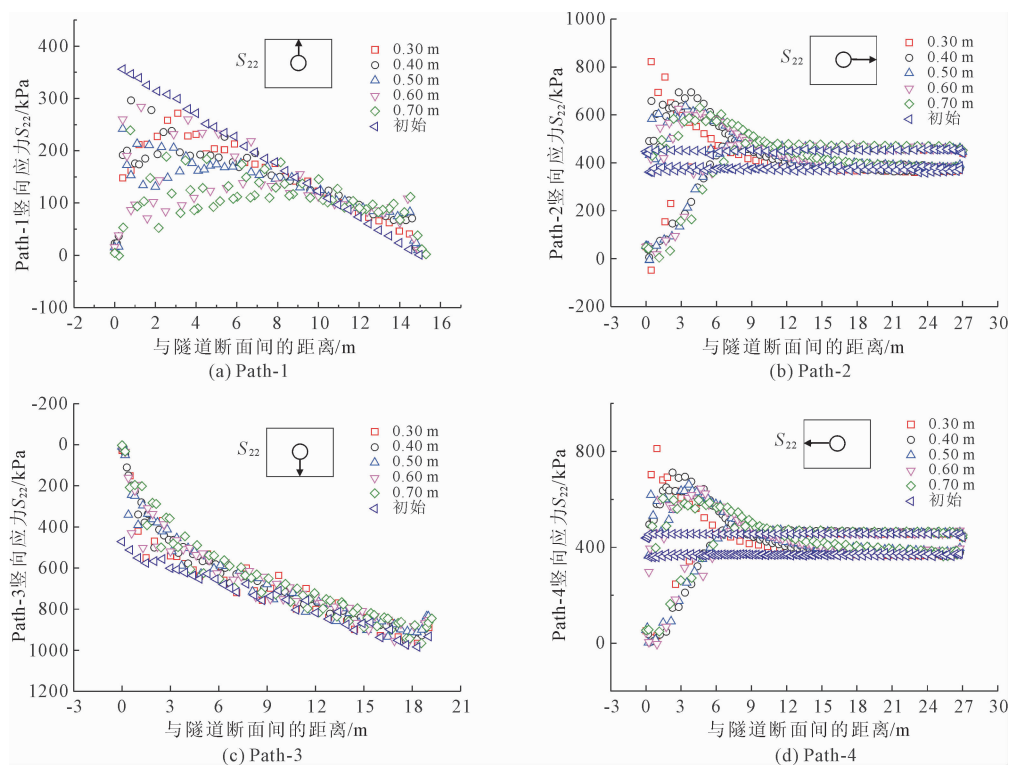


图 4 不同块石粒径时的监测路径竖向应力 S_{22}

隧道开挖前,地层竖向应力在该路径上呈双相分布,块石中的竖向应力小于土体基质中的竖向应力值。在地应力平衡后,地层中围岩变形均为零;由于块石变形模量大于土体基质,根据变形协调原则,土体基质中的应力将大于块石中的应力。隧道开挖后,竖向应力沿路径 Path-2 可划分为应力变化区和

应力不变区。隧洞周围块石和土体基质中的应力发生变化,块石中的竖向应力显著增大,而土体基质中的竖向应力显著降低。随着与开挖断面距离的增加,块石和土体基质中的竖向应力均逐渐趋于初始状态。块石粒径对应力变化区范围和应力变化幅度均存在影响。计算结果表明,随着块石粒径增大,应

力变化区范围逐渐增加,但应力变化幅度逐渐降低。竖向应力在路径 Path-4 上的分布,与路径 Path-2 表现出类似的变化规律。

3 地层变形分布特征

3.1 地层竖向位移云图

图 5 为不同块石尺寸的竖向位移等值线图。从图 5 可以看出,隧道开挖后,洞顶围岩表现为沉降变

形,底部围岩表现为回弹变形。将不同块石尺寸的围岩位移对比,可以看出块石尺寸对围岩变形产生显著影响。随着块石尺寸的增加,洞顶竖向沉降和洞底回弹变形均增大。在本文计算条件下,当块石粒径由 0.30 m 增大至 0.70 m 时,洞顶沉降值由 145.7 mm 增加至 537.5 mm,洞底回弹变形由 120.1 mm 增加至 150.5 mm。

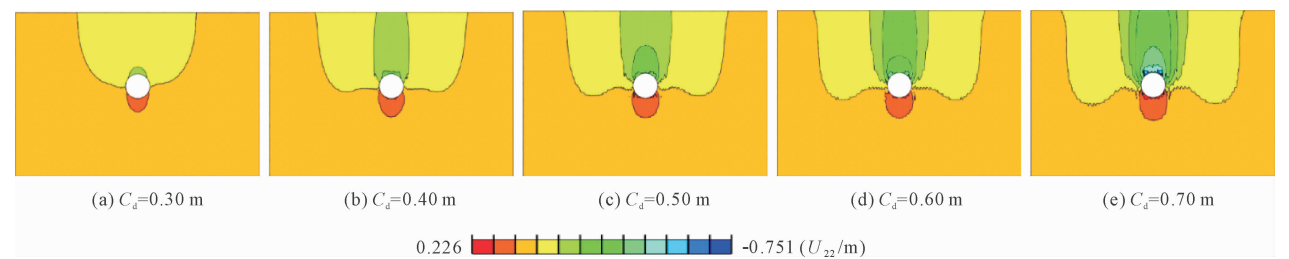


图 5 不同块石粒径的地层竖向位移云图 (含石量 45%)

3.2 监测路径位移变化

隧道开挖后,不同监测路径的围岩位移分布如图 6 所示。路径 Path-1 和 Path-3 位于模型的竖向对称线上,其变形以竖向沉降为主,水平位移较小。从图 6 可以看出,对于 Path-1,从开挖断面到上部某一位置,竖向位移显著减小,呈非线性变化;而从该位

置到地表,竖向位移缓慢减小。围岩变形受到块石尺寸的影响,其随着块石尺寸的增大而增加。竖向位移在 Path-3 上的分布规律与 Path-1 类似,也呈现出“显著变化-缓慢变化”的两阶段变化特征,但变化速率与 Path-1 存在一定差异。

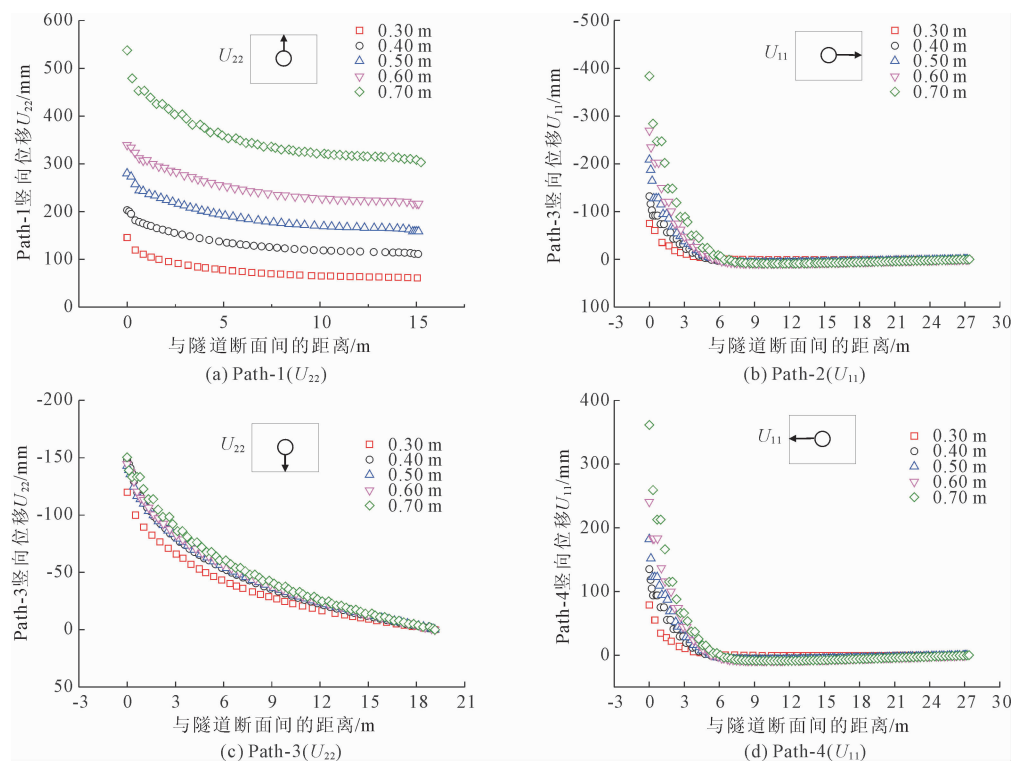


图 6 不同块石粒径时监测路径位移

路径 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。从图 6 可以看出,

在 Path-2 存在一个位移急剧变化点,从开挖断面到急剧变化点,水平位移急剧减小,而从该位置到模型侧边界,水平位移变化不大。位移急剧变化点与开挖断面间的距离会受到块石尺寸的影响,其随着块石尺寸的增大而增加。在本文计算条件下,当块石粒径由 0.30 m 增大至 0.70 m 时,急剧变化点至开挖断面间的距离依次为 3.81、4.35、4.74、5.25、6.09 m。块石粒径每增加 0.10 m,距离约增加 0.55 m。竖向位移在 Path-4 上的分布规律与 Path-2 类似,也呈现出“急剧变化-几乎不变”的两阶段变化特征,但变化速率与 Path-2 存在一定差异。

3.3 地表沉降曲线

对于单洞隧道,Peck^[19]指出开挖引起的地表沉降曲线可采用高斯公式描述。Mair 等^[20]结合现场监测数据和离心机模型试验,认为地中沉降曲线也可采用高斯函数进行描述,其可表述为:

$$S(x,z) = S_{\max}(z) \exp\left[-\frac{x^2}{2i(z)^2}\right] \quad (3)$$

式中: $S_{\max}(z)$ 是 z 深度处的沉降最大值, $i(z)$ 是 z 深度处的沉降槽宽度系数。

当 $z = 0$ 时,式(3)即为经典的 Peck 公式。

采用 Peck 高斯公式对地表沉降曲线进行拟合,如图 7 所示。从图 7 可以看出,当地层中的块石尺寸变化时,地表沉降值呈现出显著差异,沉降最大值和沉降槽宽度均有所不同。不同块石尺寸的地表沉降值和公式预测值均吻合较好,相关系数均达到 0.99。结果表明,当块石含量为 45% 时,Peck 公式可以很好地描述不同块石尺寸的砂卵石地层隧道开挖地表沉降特征。

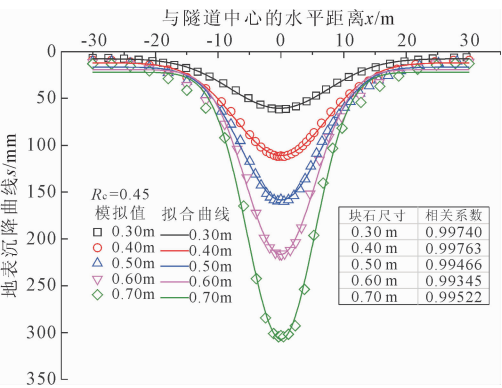


图 7 地表沉降曲线随块石粒径的变化

图 8 为不同块石粒径的地表沉降最大值和沉降槽宽度系数。从图 8 可以看出,当块石粒径从 0.30 m 增加至 0.70 m 时,地表沉降最大值呈现出线性增

长的规律;块石粒径每增加 0.10 m, $S_{\max}(0)$ 约增大 59 mm。在本文计算条件下,地表沉降槽宽度系数随块石粒径增大而线性减小,块石粒径每增加 0.10 m, $i(0)$ 约减小 0.66 m。

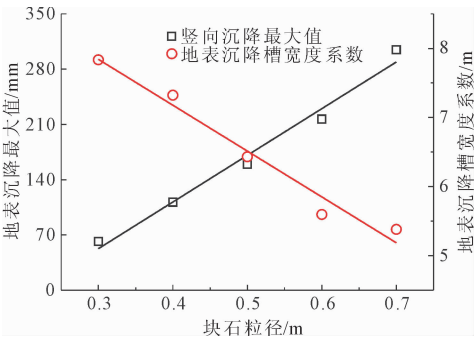


图 8 地表沉降最大值和沉降槽宽度系数随块石粒径的变化

3.4 地中沉降曲线

图 9 所示卵石含量 45%、卵石粒径 0.30 m 时的地中沉降曲线,地层深度 z 分别为 0.0、3.0、6.0、9.0、12.0 m。从图 9 可以看出,随着地层深度的变化,地中沉降值和沉降槽宽度均发生显著变化。采用式(3)对不同深度处的地中沉降值进行拟合,可以看出,地层沉降曲线和公式预测值均吻合较好,相关系数在 0.98 以上。分析结果表明,当块石含量为 45% 时,高斯公式可以很好地描述砂卵石地层不同深度处的地层沉降特征。

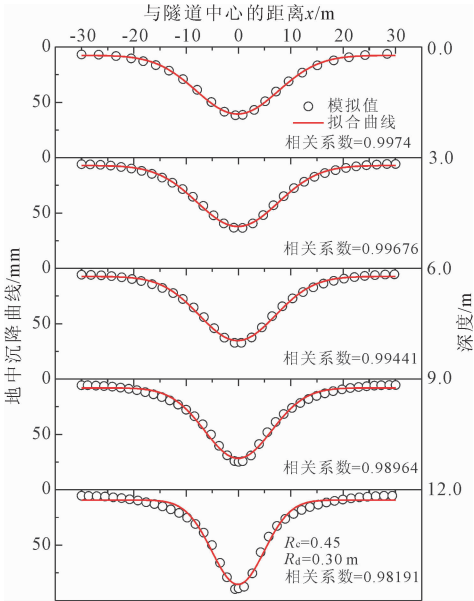


图 9 块石粒径为 0.30 m 时的地中沉降曲线

3.4.1 $S_{\max}(z)$ 的变化规律及数学描述方法

对于地中沉降变形,地中沉降最大值 $S_{\max}(z)$ 和

地中沉降槽宽度系数 $i(z)$ 是两个重要的参数。提取 Path-1 上的竖向沉降值,并将其在 $(z/z_0)-(S_{\max}(z)/S_{\max}(z_0))$ 坐标系中进行整理。图 10 为不同块石尺寸时,地中沉降最大值随地层深度的变化规律。从图 10 可以看出,在洞顶处, $S_{\max}(z)/S_{\max}(z_0)$ 等于 1.0;当地层深度 z 从 0 增加至 z_0 时, $S_{\max}(z)/S_{\max}(z_0)$ 呈现出非线性增加的规律;在不同卵石尺寸下, $S_{\max}(z)/S_{\max}(z_0)$ 与深度 z 均表现出以上的变化特征。

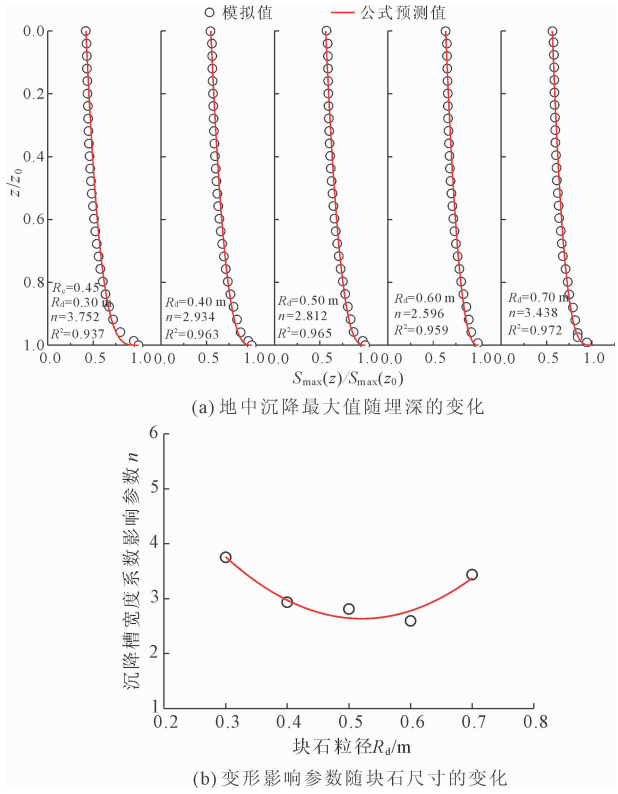


图 10 地中沉降最大值随块石粒径的变化

基于地中沉降最大值的变化规律, Lin 等^[21] 提出以下幂函数描述地中沉降最大值 $S_{\max}(z)$ 随深度的变化规律:

$$\frac{S_{\max}(z)}{S_{\max}(z_0)} = \left[\frac{S_{\max}(0)}{S_{\max}(z_0)} - 1 \right] \left(1 - \left(\frac{z}{z_0} \right) \right)^{\frac{1}{n}} + 1 \quad (4)$$

式中: n 为变形影响因子。

采用式(4)对地中沉降最大值 $S_{\max}(z)$ 进行拟合,并得到沉降槽宽度系数影响因子 n 。从图 10(a)中可以看出,当卵石含量为 45% 时,不同块石尺寸的地中沉降最大值 $S_{\max}(z)$ 均与式(4)预测值吻合较好,相关系数均大于 0.93。随着块石尺寸的增大,因子 n 呈现出先减小后增加的变化趋势。在本文给定条件下, n 值在 2.60 ~ 3.75 区间变化。

3.4.2 $i(z)$ 的变化规律及数学描述方法

根据地中沉降槽拟合曲线,得到不同深度处沉降槽宽度系数,并将其整理在 $(z/(z_0 + R))-(i(z)/i(0))$ 的坐标系中。图 11 为不同块石尺寸时, $i(z)$ 随深度的变化规律。从图 11 可以看出,在地表处, $i(z)/i(0)$ 等于 1.0;当地层深度 z 从 0 增加至 z_0 时, $i(z)/i(0)$ 呈现出非线性减小的趋势;在不同块石尺寸下, $i(z)$ 随深度 z 均呈现出以上的变化规律。基于地中沉降槽宽度系数随深度的分布规律,本文提出以下幂函数公式来描述 $i(z)/i(0)$ 与 $z/(z_0 + R)$ 间的变化规律:

$$\frac{i(z)}{i(0)} = 1 - \left(\frac{z}{z_0 + R} \right)^f \quad (5)$$

式中: f 为沉降槽宽度系数影响参数。

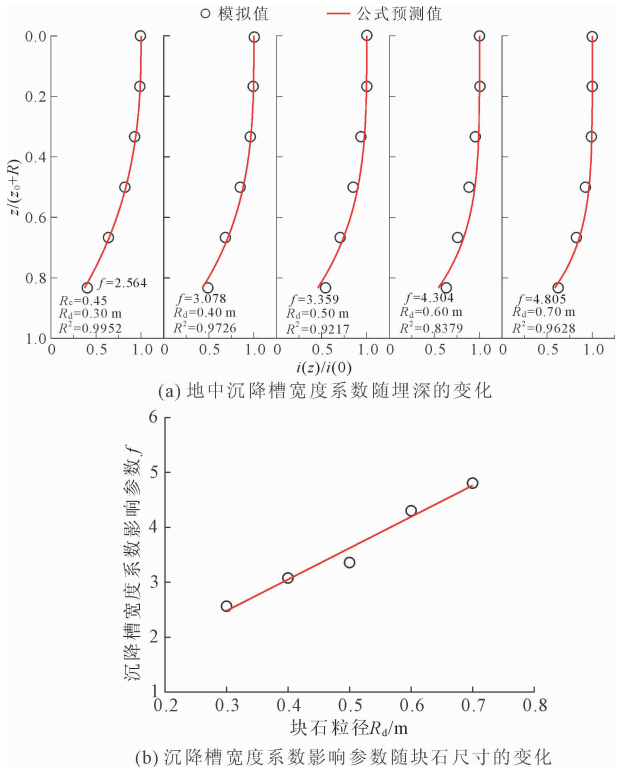


图 11 地中沉降槽宽度系数随块石粒径的变化

采用式(5)对地中沉降槽宽度系数 $i(z)$ 进行拟合,并得到沉降槽宽度系数影响参数 f 。从图 11(a)可以看出,不同块石尺寸的沉降槽宽度系数 $i(z)$ 均与式(5)预测值吻合较好。影响参数 f 随块石粒径增大而线性增长。在本文给定条件下,当块石粒径由 0.30 m 增大至 0.70 m 时, f 值由 2.56 增长至 4.81;块石粒径每增加 0.10 m, f 值约增加 0.57。

3.5 隧道断面变形模式

图 12 为不同块石尺寸的隧道开挖断面变形图,变形系数取为 1.0。图中黑色线框代表开挖前隧道

断面形状,红色线框代表开挖后隧道断面形状。从图 12 可以看出,在无支护状态下,开挖后隧道断面向隧道中心收敛。不同于均质地层,非均质地层中断面变形模式呈非光滑的锯齿状。块石尺寸的变化对开挖断面变形模式具有影响。随着块石尺寸的增大,隧道断面变形由均匀收敛向非均匀收敛发展。

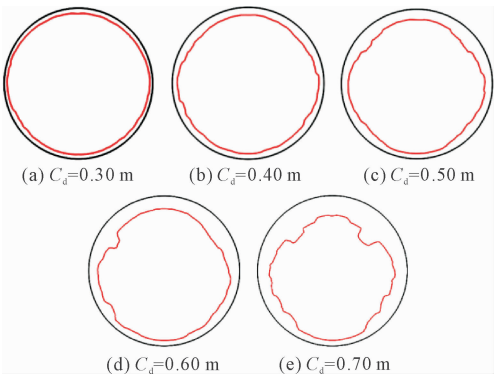


图 12 不同块石尺寸的隧道断面变形模式

4 隧道开挖扰动区

4.1 判定准则的选取

开挖扰动区是明确隧道开挖对围岩扰动的重要

依据,判定准则的选取对开挖扰动区的确定具有重要意义。基于对非均质地层施工力学行为的认识,本文选取以下三种判定准则确定隧道开挖扰动区。①基于围岩塑性区的判定准则,其将围岩应力状态达到屈服的区域视为开挖扰动区。②基于围岩应力的判定准则,其通常将围岩应力扰动度大于 15% 的区域视为开挖扰动区。③基于围岩变形的判定准则,其通常以围岩位移-距离曲线上的突变位置或斜率显著变化位置来确定开挖扰动区边界。

4.2 围岩塑性区

当卵石含量不变,围岩塑性区随卵石尺寸的变化如图 13 所示。从图 13 可以看出,随着卵石粒径的增大,围岩塑性区呈扩大的趋势。研究表明,当含石量不变时,土石混合体的抗剪强度和弹性模量均随块石尺寸的增加而减小。因而,地层抵抗变形和破坏的能力降低,围岩的扰动范围逐渐增大。当块石粒径从 0.30 m 增加到 0.70 m 时,围岩塑性区在拱肩处的范围由 3.0R (R 为隧道半径) 增大至 5.0R,在拱腰处由 2.0R 增大至 2.50R,在拱脚处由 2.0R 增大至 2.80R。

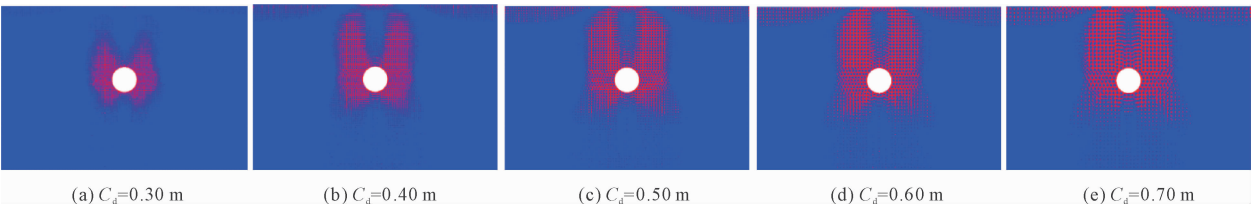


图 13 围岩塑性区随卵石粒径的变化 (含石量 45%)

4.3 围岩扰动区(应力角度)

图 14 所示以围岩径向应力扰动度 15% 确定的开挖扰动区边界。从图 14 可以看出,当块石粒径从 0.30 m 增加到 0.70 m 时,开挖扰动区的范围不断增大,在各个方向均呈现出线性增加的变化规律。在本文给定条件下,当块石粒径从 0.30 m 增大至 0.70 m 时,径向距离 l_1 从 1.72R 增大至 3.20R、 l_2 从 1.78R 增大至 2.02R、 l_3 从 1.0R 增大至 2.0R、 l_4 从 1.82R 增大至 2.05R。其中, l_1 、 l_2 、 l_3 和 l_4 分别为 Path-1、Path-2、Path-3 和 Path-4 上应力扰动度 15% 的位置与开挖断面的径向距离。

4.4 围岩扰动区(变形角度)

图 15 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边界。从图 15 可以看出,当块石粒径从 0.30 m 增加到 0.70 m 时,开挖扰动区不断增大,在各个方向均呈现出线性增加的变

化规律。在本文给定条件下,当块石粒径从 0.30 m 增大至 0.70 m 时,径向距离 s_1 从 1.65R 增大至 2.34R、 s_2 从 1.27R 增大至 2.03R、 s_3 从 1.97R 增大至 2.10R、 s_4 从 1.22R 增大至 1.83R。 s_1 、 s_2 、 s_3 和 s_4 分别为 Path-1、Path-2、Path-3 和 Path-4 上位移显著变化位置与开挖断面的径向距离。

5 结 论

考虑地层的细观结构特征,本文开展了不同块石尺寸的砂卵石地层隧道开挖细观数值模拟,从围岩应力重分布、围岩变形和围岩扰动区三个角度,分析了块石尺寸对非均质地层施工响应的影响,主要结论如下:

(1) 隧道开挖后,围岩内部存在应力变化区和应力不变区。随着块石尺寸增大,应力变化区范围逐渐扩大,而应力变化幅度与其所在位置相关。

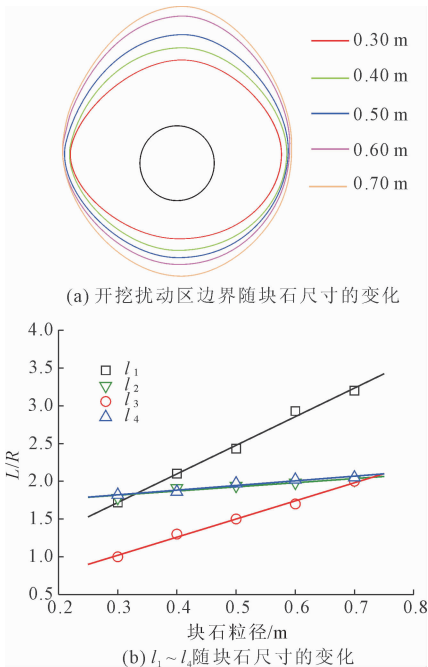


图 14 块石尺寸对开挖扰动区的影响(应力角度)

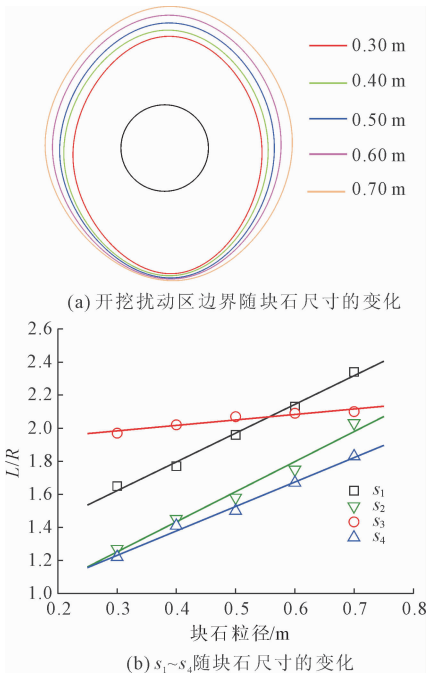


图 15 块石尺寸对开挖扰动区的影响(变形角度)

(2) 地表和地中沉降曲线均可采用高斯公式进行描述,地中沉降最大值和地中沉降槽宽度系数随地层深度的变化规律均可采用幂函数公式进行描述。随着块石尺寸的增大,地表沉降最大值线性增加,地表沉降槽宽度系数线性减小;变形影响因子呈现先减小后增加的趋势,而沉降槽宽度系数影响参数表现出线性减小的变化规律。

(3) 在相同的开挖荷载作用下,块石尺寸增大 会引起开挖扰动区的增大,且该变化趋势不受判定 准则的影响。

参考文献:

[1] 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.

[2] Du Xiuli, Zhang Pei, Jin Liu, et al. A multi-scale analy- sis method for the simulation of tunnel excavation in sandy cobble stratum[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,83:220-230.

[3] Zhang Pei, Du Xiuli, Lu Dechun, et al. Study on the ex- cavation disturbed zone during tunneling in sandy cobble stratum considering the material meso-structure [J]. Transportation Geotechnics, 2021;29(4):100590.

[4] Lin Qingtao, Lu Dechun, Lei Chunming, et al. Model test study on the stability of cobble strata during shield under-crossing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021,110(9):103807.

[5] 王南昌. 基于砂卵石地层的盾构穿越风险管理与研究 [D]. 北京:北京交通大学,2020.

[6] 周鹏远. 砂卵石地层盾构下穿铁路框架桥施工影响及 对策研究[D]. 西安:西安建筑科技大学,2020.

[7] 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,2020.

[8] Xu Wenjie, Zhang Haiyang. Meso and macroscale me- chanical behaviors of soil-rock mixtures [J]. Acta Geotechnica, 2022,17:3765-3782.

[9] Wang Pei, Yin Zhenyu, Wang Ziyi. Micromechanical in- vestigation of particle-size effect of granular materials in biaxial test with the role of particle breakage[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2022,148(1):04021133.

[10] Cheng Zhuang, Wang Junjie, Xu Dongsheng, et al. DEM study on the micromechanical behaviour of sand- clay mixtures [J]. Power Technology, 2024, 435: 119400.

[11] Ning Fanwei, Liu Jingmao, Zou Degao, et al. Super- large-scale triaxial tests to study the effects of particle size on the monotonic stress-strain response of rockfill materials[J]. Acta Geotechnica, 2025,20:1847-1858.

[12] 杨忠平,李 进,刘浩宇,等. 土石混合体-基岩界面 剪切力学特性块石尺寸效应[J]. 岩土力学,2023,44 (4):965-974.

[13] 江英超. 盾构掘进对砂卵石地层的扰动机理研究 [D]. 成都:西南交通大学,2014.

(4) 自浮式浮筒分层取水出流水温 $T_{\text{分层}}$ 比未设置分层取水设施的单层出流水温 $T_{\text{单层}}$ 提高 $0.64 \sim 5.59^{\circ}\text{C}$,表明浮筒分层取水口在很大程度上起到了取用表层高温水的显著作用。流动分界面以下区域垂向温分层特征越显著,浮筒分层取水出流水温温升越大。

参考文献:

[1] 黄永坚. 水库分层取水[M]. 北京:水利电力出版社, 1986.

[2] 叶舟,龚梦园. 基于下游生境水温需求的水库分层取水调度研究[J]. 人民长江,2022,53(6):105-110.

[3] 高学平,董绍尧,宋慧芳,等. 水电站进水口分层取水水力特性模型试验研究[C]//国际水利工程与研究协会中国分会,中国水利学会水力学专业委员会,第三届全国水力学与水利信息学大会论文集,2007:308-314.

[4] 林泉,梁瑞峰,刘清园,等. 向家坝灌区水温改善措施效果研究[J]. 长江流域资源与环境,2020,29(3):715-724.

[5] 严忠鑫,卢晶莹,王小明,等. 叠梁门分层取水对下泄水温影响的分析方法研究[J]. 水力发电,2023,49(1):7-9,57.

[6] 范志国,郑向晖,刘国军,等. 新型分层取水结构的研究与应用[J]. 水利水电技术,2017,48(10):103-108,128.

[7] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等. 大型分层型水库下泄水

温对取水高程敏感性分析研究[J]. 水利学报,2015,46(6):714-722,731.

[8] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等. 叠梁门分层取水水温-水动力动态过程模拟及分析[J]. 水利学报,2020,51(3):305-314.

[9] 郑铁刚,刘志国,孙双科,等. 叠梁门分层取水水力特性试验研究[J]. 水电能源科学,2021,39(10):122-126.

[10] 王岑,柳海涛,王继保,等. 分层取水结构型式对取水水温影响的试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2021,19(2):262-268.

[11] 张文远,杨帆,章晋雄,等. 大石峡水电站进水口叠梁门分层取水试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文),2022,20(6):516-522.

[12] 尹辉,蔡宝柱,郑铁刚. 典型工程叠梁门分层取水方案优化分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文),2022,20(4):369-376.

[13] 柳海涛,李广宁,孙双科,等. 进水口叠梁门顶水平帷幕取水温升影响的研究[C]//2023 中国水利学术大会论文集(第四分册). 郑州,2023:391-400.

[14] 高学平,张少雄,刘际军,等. 浮式管型取水口下泄水温试验研究[J]. 水力发电学报,2013,32(2):163-167.

[15] 高学平,刘俊,孙博闻,等. 水库水温分层对浮式取水口前流速分布的影响[J]. 水利水电技术,2017,48(9):132-137,142.



(上接第 73 页)

[14] Hu Xiongyu, He Chuan, Walton G, et al. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2020,146(10):04020112.

[15] Hu Xiongyu, He Chuan, Fang Yong, et al. Laboratory experiments and discrete element modeling on the surface failure induced by EPB tunneling; the effects of cutterhead open ratio and relative tunneling depth[J]. Engineering Failure Analysis, 2022,142:106731.

[16] 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.

[17] Lindquist E S. The strength and deformation properties of mélange [D]. Berkley: University of California, 1994.

[18] Medley E W. The engineering characterization of mélanges and similar block-in-matrix rocks (Bimrocks) [D]. Berkley: University of California, 1994.

[19] Peck R B. Deep excavation and tunneling in soft ground [C]//Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, State of the Art Volume, Mexico. 1969:225-290.

[20] Mair R J, Taylor R N, Bracegirdle A. Subsurface settlement profiles above tunnels in clays [J]. Geotechnique, 1993,43(2):315-320.

[21] Lin Qingtao, Song Tao, Lu Dechun, et al. A novel analytical method for describing ground motion behaviour caused by tunnel excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2025,161:106546.