

土性对浅埋盾构隧道施工地层响应影响研究

宋伟涛¹, 张佩², 杜修力³, 林庆涛³

(1. 南阳理工学院 土木工程学院, 河南 南阳 473000; 2. 北京建筑大学 土木与交通工程学院, 北京 102616;

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: 隧道工程是一种长线型工程。盾构掘进过程中先后穿越砂卵石地层和砂土地层是一种常见工况。为明确地层土性对浅埋盾构隧道施工地层响应的影响, 依次开展砂卵石地层和砂土地层盾构掘进模型试验, 并从盾构掘进力学参数、地表沉降曲线以及开挖面稳定性等角度, 分析两种地层中隧道施工地层响应的异同点。结果表明: 土性对浅埋盾构隧道施工地层响应具有显著影响。砂卵石地层中盾构掘进力学参数均大于砂土地层, 且刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩随螺旋出土器转速均呈负相关变化。两种地层中地表沉降曲线对称轴均偏离隧道中线, 当刀盘顺时针旋转时, 对称轴位于隧道中线左侧, 且砂卵石地层中的偏移量显著大于砂土地层。砂卵石地层中开挖面出土量随时间呈“线性增加-保持不变”两阶段变化规律, 地层土体呈局部失稳破坏模式; 砂土地层开挖面出土量随时间始终呈线性增加趋势, 地层土体呈整体失稳破坏模式, 且地表塌坑中心位于盾构刀盘左前方。

关键词: 盾构隧道; 地层施工响应; 模型试验; 砂卵石地层; 砂土地层

中图分类号: U 455

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2025)07-2179-10

Influence of soil property on ground response during construction of shallow shield tunnel

SONG Wei-tao¹, ZHANG Pei², DU Xiu-li³, LIN Qing-tao³

(1. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang, Henan 473000, China;

2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China;

3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: Tunnel engineering is a linear-type project. It is a common working condition for shield tunneling to successively penetrate sandy cobble strata and sandy strata. To clarify the influence of soil properties on the ground response during the construction of shallow-buried shield tunnels, shield tunneling model tests were sequentially conducted in sandy cobble strata and sandy strata. Then, from the perspectives of shield tunneling mechanical parameters, ground settlement curves, and face stability, the similarities and differences in the ground response during tunneling in these two types of strata were analyzed. The results show that soil properties have a significant impact on the ground response during the construction of shallow-buried shield tunnels. The shield tunneling mechanical parameters in sandy cobble strata are all greater than those in sandy strata. Moreover, both the cutterhead torque and the screw conveyor torque are negatively correlated with the rotation speed of the screw conveyor. The symmetry axes of the ground surface settlement curves in both strata deviate from the tunnel centerline. When the shield cutterhead rotates clockwise, the symmetry axis is located on the left side of the tunnel centerline, and the deviation in sandy cobble strata is significantly larger than that in sandy strata. In sandy cobble strata, the amount of excavated soil from the tunnel face shows a two-stage change pattern of "linear increase - constant" over time, and the soil in the stratum exhibits a local instability failure mode. In sandy strata, the amount of excavated soil from the tunnel face shows a continuous linear increase over time, and the soil in the stratum presents an overall instability failure mode. Additionally, the center of the ground surface collapse is located in the left-front area of the shield cutterhead.

Keywords: shield tunnel; ground construction response; model test; sandy cobble strata; sandy ground

收稿日期: 2024-10-14

录用日期: 2025-02-05

基金项目: 国家自然科学基金(No.51908023, No.52025084); 北京市自然科学基金项目(No.8232007); 北京市教委科研项目(No.KM202310016013); 河南省高等学校重点科研项目(No.24A560015); 南阳市科技发展规划项目(No.23KJGG246)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51908023, 52025084), the Natural Science Foundation of Beijing (8232007), the Research Project of Beijing Municipal Commission of Education (KM202310016013), the Key Scientific Research Projects for Higher Education of Henan Province (24A560015) and the Scientific and Technological Project of Nanyang City (23KJGG246).

第一作者简介: 宋伟涛, 男, 1990年生, 博士, 讲师, 主要从事隧道工程等方面的工作。E-mail: songweitao720@126.com

通讯作者: 张佩, 女, 1988年生, 博士, 副教授, 主要从事隧道与地下工程领域研究。E-mail: zhangpei@bucea.edu.cn

1 引言

隧道工程是长线型工程,具有区域跨度大、穿越地层复杂等特点。在城市地下空间建设过程中,盾构机前后穿越不同地层不可避免。以北京地铁 6 号线为例,南锣鼓巷站—东四站区间盾构隧道穿越地层主要为砂卵石地层,而郝家府站—东部新城站区间盾构隧道穿越地层主要为粉细砂地层^[1-2]。地层土体不同,施工过程中盾构机的掘进参数以及围岩土体的灾变演化规律也将不同^[3]。开展地层土性对盾构隧道施工地层响应的影响分析具有重要的科学意义和工程价值。

砂卵石土和砂土是隧道施工过程中两种较为常见的工程地质材料,它们均为散粒体介质,具有黏聚力低、内摩擦角大等特点^[4-5]。目前,关于两种地层中的隧道施工围岩稳定性问题,主要存在两种观点。第 1 种观点认为,相对于砂土材料,砂卵石土的颗粒较大,颗粒之间为点对点接触,外荷载作用下易形成大颗粒骨架结构。在进行隧道施工时,大颗粒骨架结构易遭到破坏,因而砂卵石土更易处于不稳定状态^[6-8]。第 2 种观点认为,相对于砂土材料,砂卵石土的粒度范围较广,颗粒之间具有较强的自锁效应,因而砂卵石土具有更大的内摩擦角,砂卵石地层也将具有更高的强度以及更好的稳定性^[9-11]。

国内外学者通常采用理论分析、数值模拟和模型试验等方法开展关于地层土性对盾构隧道施工地层响应的影响的研究。当采用理论分析法时,学者们大都将砂土和砂卵石土视作均质材料,通过采用不同内摩擦角的方式,来反映地层变形、地层应力以及围岩破坏模式的差异^[12-15]。数值方法主要包含基于非连续介质力学的离散单元法和基于连续介质力学的有限元法。离散元法将砂卵石地层或砂土地层均离散为圆形或球形颗粒集合体,可较好地反映两种材料的松散性特点^[16-18],但该方式需将实际土体颗粒放大数倍,且将其土性差异主要归于颗粒接触关系的不同,在表征地层施工响应方面具有一定局限性。细观有限元法将砂卵石土视为由砂土和块石组成的非均质材料,可在一定程度上反映出大块石对地层施工响应的影响^[19-21]。

模型试验法利用缩尺装置开展地层开挖试验,能够直观地反映出地层土体的差异。国内外学者通过开展砂卵石地层和砂土地层隧道开挖模型试验,并从地层位移特征、开挖面失稳破坏模式、应力扰动特征等角度,分别探讨了两种地层的施工力学响应^[22-24]。在开展盾构掘进模型试验中,相似地层材

料和模型试验装置是决定试验结果能否合理反映实际地层施工响应的两个关键点。根据配置方式的不同,相似材料可以分为两类:第 1 类是以实际地层砂卵石土或砂土作为试验地层材料,该方式并不严格满足相似比定律,但可视为小型盾构掘进工程;第 2 类是以材料物理力学参数等为相似指标,制作相似材料来模拟砂土地层或砂卵石地层,为满足相似比条件的常重力试验。根据隧道开挖实现方式,模型试验装置可分为传统模型装置和模型盾构机装置两大类。传统模型装置以形成地层损失来模拟开挖,并采用水囊^[25]、活动门^[26]等方式实现。该类装置具有成本低、易于实现等优点,其可以抓住开挖卸荷的主要特征,但只能研究盾构施工扰动的特定问题,不能反映盾构机与地层的动态相互作用。模型盾构机装置旨在模拟真实的盾构掘进过程,实现刀盘旋转、螺旋出土等功能^[27-29],可较为真实地反映地层的围岩变形规律。王俊^[30]、Hu^[31]等采用直径为 800 mm 的模型盾构机,分别开展了砂卵石与砂土地层掘进试验,结果表明:两种地层开挖面破坏形态均为烟囱状,但砂卵石地层的开挖影响范围小于砂土地层。

为明确土性对盾构隧道施工地层响应的影响,本文依托典型盾构隧道工程,基于课题组研制的土压平衡盾构掘进试验平台,依次开展砂卵石地层和砂土地层浅埋隧道开挖模型试验,通过分析盾构掘进力学参数、地表沉降及开挖面破坏模式等,探究两种地层中隧道施工力学响应的异同点。

2 浅埋隧道盾构掘进模型试验设计

为明确砂土和砂卵石土两种地层材料对盾构隧道施工地层响应的影响,依托清华园隧道盾构段工程,基于课题组研制的土压平衡盾构掘进模型试验平台,开展砂土和砂卵石地层浅埋隧道盾构掘进模型试验。

2.1 工程背景

清华园隧道盾构段位于北京市海淀区,全长为 3 769 m,如图 1 所示。采用两台直径为 12.61 m 的盾构机同时施工,隧道管片为预制钢筋混凝土管片,外径为 12.2 m、内径为 11.1 m。

清华园隧道盾构段穿越地层主要包含砂卵石土、中砂、细砂和粉砂等。其中,砂卵石土处于稍密或中密状态,最大粒径为 150 mm,大于 60 mm 的颗粒含量约为 55%,粒径为 20~60 mm 的颗粒含量约为 15%。隧道埋深在 $0.5D \sim 2.0D$ 之间,其中, D 为衬砌外径。

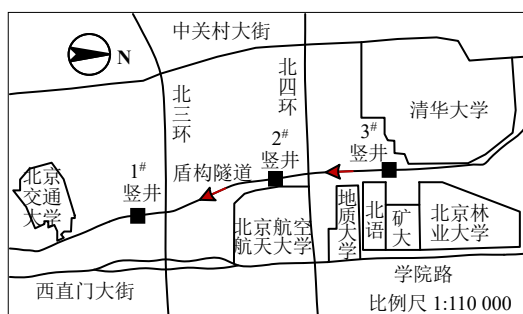


图1 清华园隧道位置

Fig.1 Location of Qinghuayuan tunnel

2.2 土压平衡盾构掘进模型试验平台

模型试验平台由模型箱、模型盾构机和控制系统3部分组成,如图2所示。

模型箱为长方体结构,其内部尺寸为 $2.0\text{ m} \times 2.0\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高),整体上采用厚度为 20 mm 的钢板加工制作。在模型箱前、后壁上开有直径为 28.5 cm 的洞口作为盾构机的入口和出口。在模型箱中部可安装中隔板卡槽,将模型箱分隔为两个独立空间,实现一次开挖两个工况的目的。

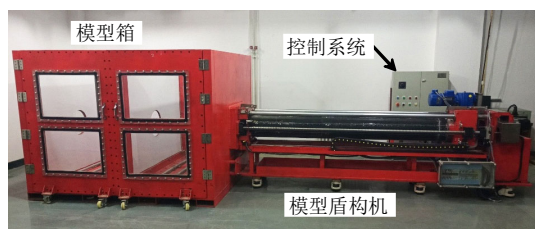


图2 土压平衡盾构掘进模型试验平台

Fig.2 Model test platform for earth pressure balance shield tunneling

模型盾构机为一顶推式盾构装置,盾壳与衬砌连接在一起,随着刀盘掘进进入模型箱内部。该盾构机具有刀盘旋转切削、向前掘进、螺旋出土及渣土改良等功能。衬砌外径为 280 mm 。刀盘开口率为 45% ,类型为辐板式,螺旋出土器排出颗粒最大尺寸为 10 mm 。由于盾构机直径较小,未实现衬砌拼装和盾构壁后注浆过程模拟。

盾构刀盘旋转、螺旋出土器转动和盾构前进分别由3台电机独立控制。控制系统设有可视化操作窗口,可分别调节刀盘转速、螺旋出土器转速以及盾构机掘进速度等。此外,控制系统可以实时记录盾构机掘进参数。

2.3 模型试验相似地层

综合考虑螺旋出土器排出颗粒尺寸范围、模型试验几何相似比等条件,针对浅埋盾构隧道,开展两组土压平衡盾构掘进模型试验,洞顶埋深均设置为 $1.0D$,如图3所示,模拟地层分别为砂卵石地层

和砂土地层。

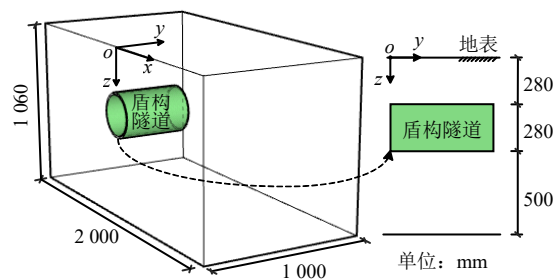


图3 盾构掘进模型试验示意图(单位: mm)

Fig.3 Schematic diagram of shield tunnelling model test (unit: mm)

对于砂卵石地层,采用粒径范围为 $2.0\sim 3.0\text{ mm}$ 的角砾土填充而成;对于砂土地层,采用粒径范围为 $0.15\sim 0.25\text{ mm}$ 的细砂填充而成。图4为模型试验中采用的地层材料。对于两种材料,分别开展直剪试验,采用的法向应力分别为 50 、 100 、 150 、 200 kPa ,试验结果如图5所示。从图中可以看出,角砾土内摩擦角 φ 为 48° ,细砂内摩擦角 φ 为 36° 。为避免密实度对试验结果的影响,将两种地层材料的相对密实度 D_r 均设置为 55% 。角砾土和细砂的最大、最小干密度以及对应的填土密度如表1所示。

(a) 粒径为 $2.0\sim 3.0\text{ mm}$ 的角砾土 (b) 粒径为 $0.15\sim 0.25\text{ mm}$ 的细砂

图4 模型试验采用的地层材料

Fig.4 Ground materials used in the model tests

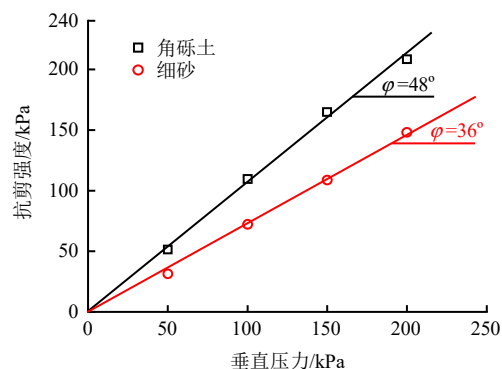


图5 模型试验地层材料直剪试验结果

Fig.5 Direct shear test results on ground materials

表 1 角砾土和细砂的干密度
Table 1 Dry density of gravel soil and fine sand

地层条件	最小干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最大干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	$D_r=55\%$ 时的干密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
角砾土	1 335	1 726	1 525
细砂	1 334	1 728	1 525

模型盾构机直径为 280 mm，清华园隧道工程盾构机直径为 12.61 m，几何相似比确定为 1:45。

表 2 模型试验与实际工程土体相似比
Table 2 Soil similarity ratios between model test and actual engineering

基本物理量	量纲	理想相似比	实际相似比	导出物理量	量纲	理想相似比	实际相似比
长度 L	L	1:45	1:45	弹性模量 E	FL^{-2}	1:45	—
材料重度 γ	FL^{-3}	1:1	1:1	泊松比 μ	1	1:1	—
重力加速度 g	LT^{-2}	1:1	1:1	内摩擦角 φ	1	1:1	1:1
—	—	—	—	应力 σ	FL^{-2}	1:45	1:45

在进行填土时，模型箱前半箱采用角砾土填筑，后半箱采用细砂填筑。试验地层采用人工夯实法形成，每层填土的控制标高为 10 cm。以砂土地层为例，结合相对密实度，计算得到每层细砂质量为 305 kg。填土步骤（见图 6）如下：①在模型箱内壁粘贴光滑的塑料卷材，沿高度方向每间隔 10 cm 划水平线，绘制各监测断面的竖直线；②将 305 kg 细砂分区域倒入模型箱，用平砂耙将虚土扒平，并采用夯锤将地层压实至相应标高；③用红外线扫描仪检验每层填土的标高及平整度，重复以上步骤达到设计标高，待地层静止 24 h 后安装地表位移计。

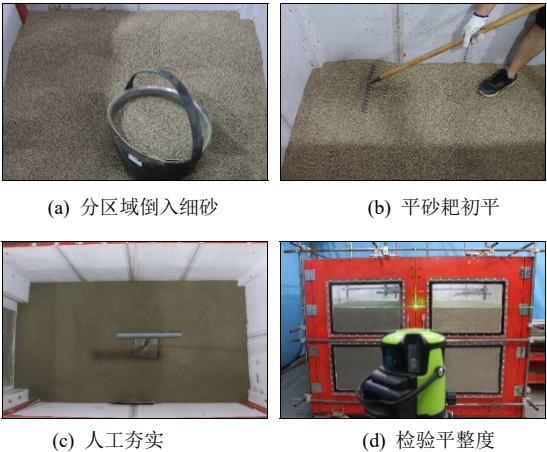


图 6 模型箱填土过程
Fig.6 Filling process of model box

2.4 模型试验监测方案

图 7 所示两种地层中的地表位移监测点。每种地层中均布置一条地层沉降监测路径，位于 $y=470\text{ mm}$ 处。地表位移采用顶杆位移计进行测量，如图 8 所示。顶杆位移计量程为 50 mm，测量精度为 0.01 mm。

试验土体重度与实际地层土体差别不大，相似比近似为 1:1。土体力学参数受多种因素的耦合作用影响，较难控制，很难实现土体力学参数相似比和模型几何相似比的匹配。因此，在进行模型试验设计时，土体材料通常只满足几何、重度和初始应力状态的相似。模型试验与实际工程地层土体相似比如表 2 所示。

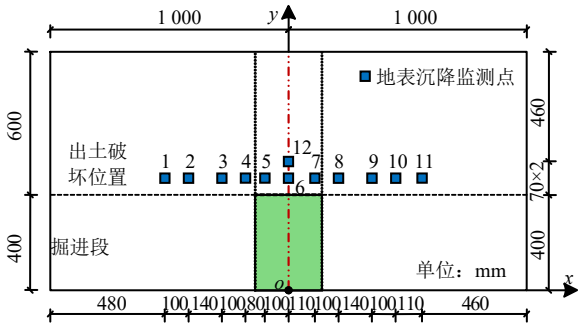


图 7 地表位移监测点布置及试验段（单位：mm）
Fig.7 Layout of monitoring points of surface settlement and test sections (unit: mm)

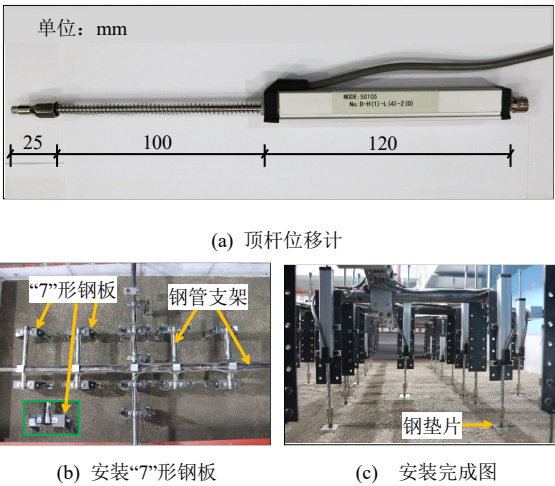


图 8 顶杆位移计及安装图
Fig.8 Rod displacement gauge and its installation

盾构掘进试验过程包含正常掘进阶段和出土破坏阶段两部分，如图 7 所示。以刀盘中心初始位置为原点 o ，以盾掘掘进方向为 y 轴正方向。在正常掘进段，刀盘正向旋转、螺旋出土并逐渐顶进，

从原点 o 开挖至 400 mm 处；在该阶段，刀盘顺时针转速设置为 1.0 r/min，顶进速度设置为 5.0 mm/min，待螺旋出土器转速达到动态稳定后保持不变。对于出土破坏阶段，盾构机停止在 400 mm 位置，采用刀盘空转、螺旋出土的方式模拟开挖面主动破坏过程；在该阶段，刀盘顺时针转速设置为 0.2 r/min，螺旋出土器转速设置为 1.0 r/min，并每隔 15 s 称一次出土质量，直至试验结束。

3 正常掘进阶段试验结果分析

模型盾构机从 $y=0$ mm (y_0) 掘进至 $y=400$ mm (y_{400}) 的过程中，记录 y_{470} 横断面各测点的地表沉降值，分析横断面地表沉降时程变化规律。

3.1 模型盾构机掘进参数变化规律

图 9 为砂卵石地层和砂土地层中盾构掘进速度参数随掘进距离的变化图。从图中可以看出，在两种地层中，盾构机顶进速度恒为 5.0 mm/min，刀盘转速恒为 1.0 r/min，但螺旋出土器转速有所差异，其需结合地层掘进情况调整至稳定状态。在砂卵石地层中，螺旋出土器的初始转速为 4.0 r/min，考虑到刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩的变化，将其先调为 3.0 r/min，后逐步增加至 4.0 r/min 和 5.0 r/min。在砂土地层中，螺旋出土器的初始转速为 5.0 r/min，后减小至 3.0 r/min，当掘进至 130 mm 后恢复为 5.0 r/min。

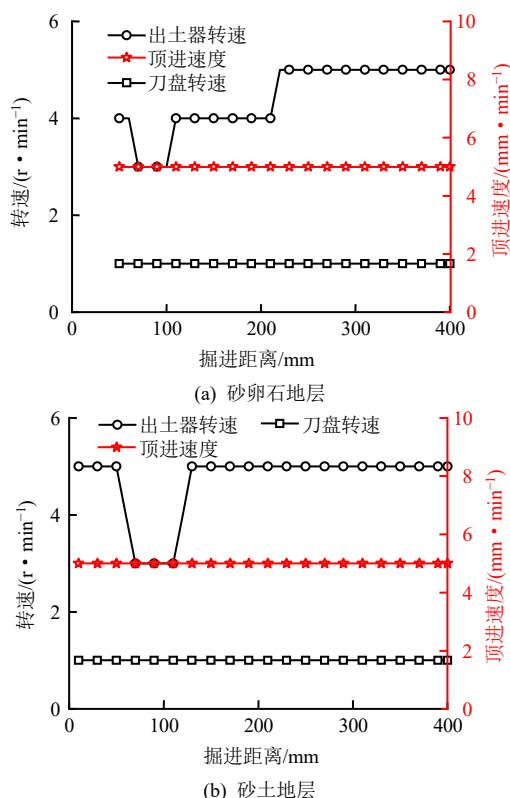


图 9 模型盾构机掘进速度参数

Fig.9 Speed parameters of model shield tunneling machine

图 10 为砂卵石地层和砂土地层中盾构掘进力学参数随掘进距离的变化图。从图中可以看出，一方面，在两种地层中，刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩表现出相同的变化规律，其变化与螺旋出土器转速呈负相关关系。当螺旋出土器转速减小时，刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩有明显增大；当螺旋出土器转速增大时，刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩明显减小。以砂土地层为例，当螺旋出土器转速由 5.0 r/min 减小至 3.0 r/min 时，刀盘扭矩由 892 N·m 急剧增大至 1 126 N·m，出土器扭矩由 34 N·m 增大至 40 N·m；当螺旋出土器转速由 3.0 r/min 增加至 5.0 r/min 时，刀盘扭矩由 1 559 N·m 急剧减小至 1 141 N·m，出土器扭矩由 41 N·m 减小至 33 N·m。

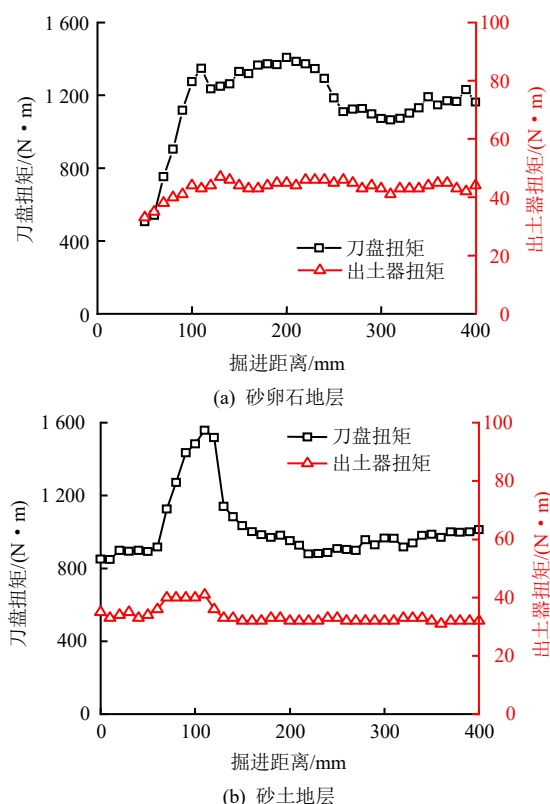


图 10 模型盾构机掘进力学参数

Fig.10 Mechanical parameters of model shield tunneling machine

另一方面，从图中可以看出，当螺旋出土器处于相同的稳定转速时，砂卵石地层中刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩显著大于砂土地层。当盾构掘进距离大于 240 mm 后，两种地层中螺旋出土器转速均稳定在 5.0 r/min，此时砂卵石地层刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩分别稳定在 1 150 N·m 和 43 N·m，而砂土地层刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩分别稳定在 950 N·m 和 32 N·m。在相同的掘进参数下，对于 1.0D 埋深的隧道，砂卵石地层刀盘扭矩和螺旋

出土器扭矩稳定值均大于砂土地层,增幅分别为 21.1%和 34.4%。

3.2 y470 监测路径横断面隆起曲线

盾构机在掘进过程中对周围岩土体会造成扰动,引起地表变形。图 11 为模型盾构机掘进至不同位置时,砂卵石地层和砂土地层 y470 监测路径的地表变形曲线。从图中可以看出,在采用的盾构掘进速度参数下,砂卵石地层和砂土地层地表变形均表现为隆起,且砂卵石地层隆起值显著小于砂土地层。同时,从图中可以看出,地表沉降曲线关于隧道中心线 x 轴是非对称的,与清华园隧道盾构工程部分监测数据分布特征是吻合的^[32-33]。采用修正的 Peck 公式对图中曲线进行拟合,拟合公式为

$$S(x) = S_{\max} \cdot \exp\left[\frac{-(x+m)^2}{2 \cdot i^2}\right] \quad (1)$$

式中: $S(x)$ 为与隧道中线水平距离为 x 处的地表沉降值; $S_{\max}$ 为地表竖向变形最大值; x 为测点与隧道中线的水平距离; m 为拟合曲线对称轴与隧道中线的水平距离; i 为沉降槽宽度系数,即曲线反弯点与对称轴的水平距离。

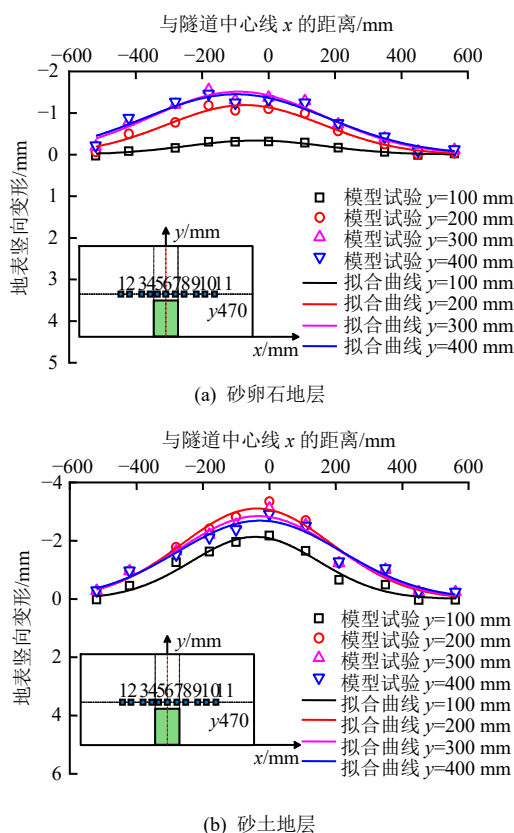


图 11 y470 监测路径地表隆起曲线

Fig.11 Surface uplift curves in monitoring path y470

两种地层中所有拟合曲线的相关系数均大于 0.96,表明公式(1)给出的曲线与模型试验结果吻

合较好。表 3 为 m 和 i 的大小。从表中可以看出,在两种地层中,随着盾构刀盘逐渐接近监测路径,偏移量 m 逐渐增大,表明地表竖向变形曲线对称轴逐渐偏离隧道中心线;砂卵石地层中的偏移量显著大于砂土地层,以刀盘掘进至 $y=400$ mm 为例,两种地层中的 m 分别为 97.4 mm (0.35 D) 和 18.9 mm (0.07 D)。在两种地层中,随着盾构刀盘逐渐接近监测路径,地表 i 值近似线性增大,表明隧道开挖横断面影响范围不断增大,且砂卵石地层中沉降槽宽度系数大于砂土地层。

表 3 拟合 m 及 i (单位: mm)

Table 3 Offsets m and i (unit: mm)

y/mm	m 值		i 值	
	砂卵石	砂土	砂卵石	砂土
100	38.4	13.7	208.0	191.2
200	71.2	17.4	234.5	226.2
300	91.0	18.6	260.5	236.0
400	97.4	18.9	275.5	246.1

3.3 地表监测点沉降时程曲线

图 12 所示模型盾构机从 $y=0$ mm 掘进至 $y=400$ mm 时,各监测点地表沉降随掘进距离的变化。从图中可以看出,当盾构机掘进至 $y=400$ mm 位置时,砂卵石地层地表监测点隆起最大值约为 1.5 mm,

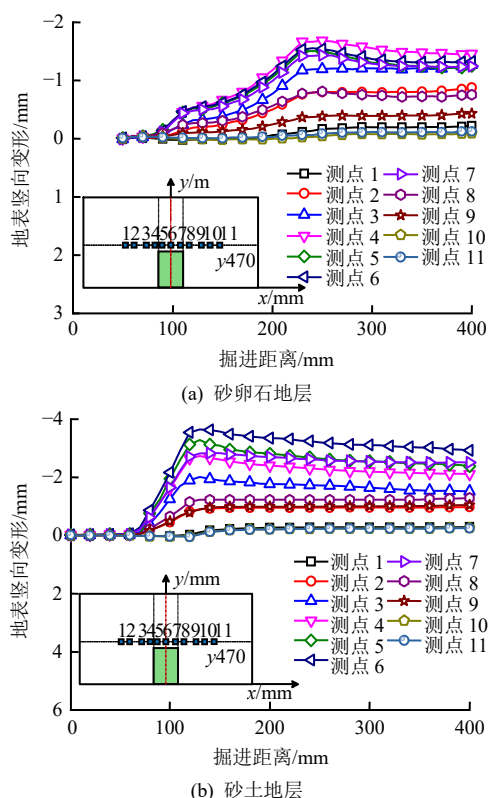


图 12 监测点地表沉降随掘进距离的变化

Fig.12 Variations in surface settlement of monitoring points with tunneling distance

砂土地层地表监测点隆起最大值约为 3.0 mm。对于砂卵石地层,当盾构机掘进至 110 mm 时,也就是离监测路径 360 mm ($1.25D$) 时,各地表监测点的变形开始显著增加,特别是监测点 4、5、6、7。因此,对于砂卵石地层,盾构机刀盘前方的影响范围是 $1.25D$ 。对于砂土地层,当盾构机掘进至 60 mm 时,也就是离监测路径 410 mm 时,各监测点的地表变形开始显著增加,特别是监测点 4、5、6、7。因此,对于砂土地层,盾构机刀盘的前方影响范围约为 $1.5D$ 。

4 出土破坏阶段试验结果分析

当模型盾构机掘进至 $y=400$ mm 时,关闭盾构机顶进系统、刀盘以及螺旋出土器电机,静置 6 h。继而,采用刀盘原位空转、螺旋出土器旋转出土的方式模拟盾构开挖面主动破坏过程。在该阶段,刀盘转速设置为 0.2 r/min,螺旋出土器出土转速设置为 1.0 r/min,整个出土过程持续 48 min。

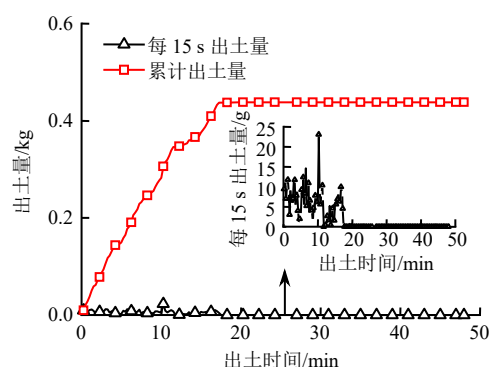
4.1 开挖面出土量-时间变化曲线

在出土破坏阶段,随着螺旋出土器转动,盾构机土舱内土体减少,导致开挖面前方土体流入土舱,引起开挖面前方和上方土体产生过大变形,甚至引发地表塌陷现象。

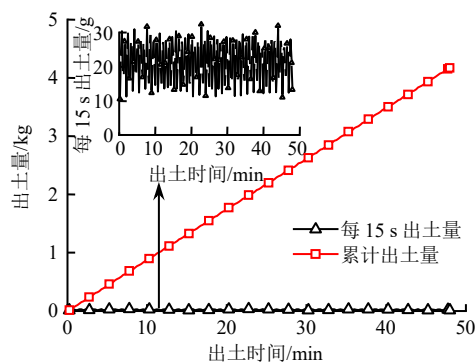
图 13 为砂卵石地层和砂土地层开挖面出土量随时间的变化曲线。从图中可以看出,在两类地层中,出土量随时间的变化曲线显著不同,主要体现在累计出土量和单位时间出土量两个方面。对于砂卵石地层中,累计出土量-时间曲线呈两阶段变化特征,当出土时间小于 18 min 时,累计出土量随时间近似线性增大,每 15 s 出土量在 0~15 g 范围内变化;当出土时间大于 18 min 时,出土量为 0,累计出土量保持不变,总出土量仅为 0.44 kg。对于砂土地层,在整个试验过程中 (0~48 min),累计出土量与时间始终为一恒定斜率的直线,每 15 s 出土量在 10~30 g 范围内变化,总出土量达 4.17 kg。

模型试验地层材料分别采用粒径为 0.15~0.25 mm 的细砂和粒径为 2.0~3.0 mm 的角砾,颗粒粒径之比为 12 倍左右,材料力学性质存在明显差别。对于砂土地层,材料内摩擦角小,颗粒间的咬合力较小,地层成拱能力较弱,易扰动性强。随着刀盘的转动,刀盘前方和上方土体将会源源不断地流入土压舱内,因此出土量持续增加。对于砂卵石地层,角砾颗粒间的咬合力较大,随着出土量的增加,刀盘前方和上方土体地层将出现较强的土拱效应;当刀盘上方地层形成稳定的土拱后,刀盘前

方将形成一定区域的空洞,土压舱内土体也逐渐被排空,故总出土量保持不变。



(a) 砂卵石地层



(b) 砂土地层

图 13 出土量随时间的变化

Fig.13 Variation of the amount of excavated soil with time

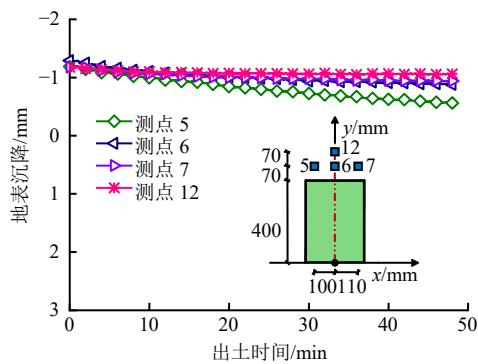
4.2 地表关键监测点沉降时程曲线

图 14 为出土破坏阶段,砂卵石地层和砂土地层中关键监测点的地表沉降时程曲线。从图中可以看出,在两类地层中,地表沉降随时间变化存在显著不同,主要体现在监测点 6 上。对于砂卵石地层,在整个出土过程中,4 个地表监测点的变形都很小。由此可以得出,砂卵石地层隧道开挖面主动破坏尚未发展至地表,属于局部失稳破坏。这是因为砂卵石地层中土颗粒粒径较大,相互之间咬合能够形成稳定的土拱,从而局部地层保持稳定。对于砂土地层,当出土时间小于 30 min 时,4 个监测点的变形量都极小;当出土时间大于 30 min 时,监测点 6 沉降迅速增大,试验结束时沉降量达到 70 mm,而其他测点地表沉降几乎未发生变化。监测点 6 与开挖面的水平距离为 70 mm,由以上分析可以得出,砂土地层中隧道开挖面主动破坏已发展至地表,属于整体失稳破坏,产生地表坍塌现象。

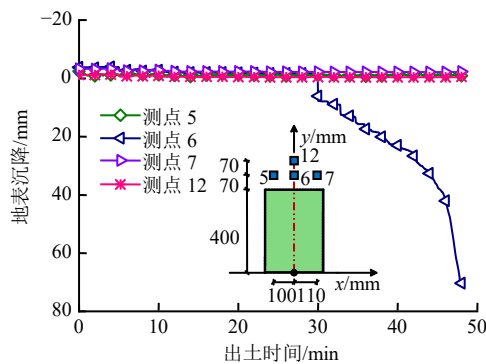
4.3 砂土地层坍塌形态

图 15 所示为砂土地层在出土破坏段结束后的

地表塌陷图。对于砂土地层,在出土 48 min 后,地表出现明显的塌陷坑。塌陷区域在水平面上近似为椭圆形,且椭圆长轴与隧道开挖方向平行。塌陷中心位于隧道中轴线的左侧,这是由于刀盘的顺时针(正向)旋转作用引起的,该现象与已开展模型试验结果相同。观察塌陷坑的形成过程发现,在螺旋出土器开始出土时,地表没有变化;当出土 30 min 后,地表开始出现沙漏状塌陷坑;随着出土量的不断增加,沙漏状塌陷坑的直径和深度不断增大。对于砂卵石地层,在出土 48 min 后,地表未出现明显的沉降区域,且在螺旋出土器关闭静止足够长时间后,也未观察到明显的地表塌陷现象。



(a) 砂卵石地层



(b) 砂土地层

图 14 地表关键监测点沉降时程曲线

Fig.14 Variations in surface settlement of key monitoring points with time

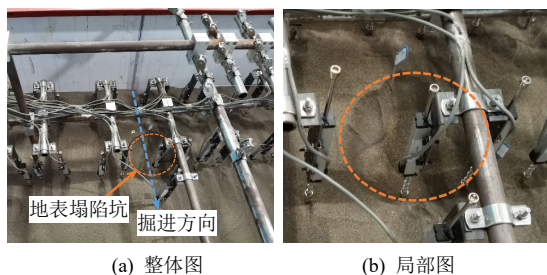


图 15 砂土地层地表塌陷图

Fig.15 Ground surface collapse pit in sand ground

结合地表塌陷图,绘制砂土地层开挖面破坏模式平面图和纵断面示意图,如图 16 所示。从图 16(a)中可以看出,地表塌陷中心位于盾构刀盘前方 10 mm,且位于隧道中线左侧 30 mm。从图 16(b)可以看出,地中塌陷区域包含刀盘前方土体和后方土体,反馈在地表处时,刀盘前方区域与刀盘后方区域的比值为 1.25:1.00。在以往建立开挖面失稳破坏理论分析模型时,通常仅考虑刀盘前方区域的失稳区域,鲜有关关注刀盘后方失稳区域。该结论为开挖面失稳破坏模式理论分析模型的发展提供参考。

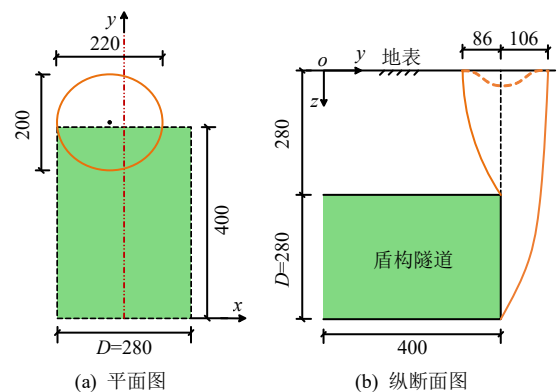


图 16 砂土地层失稳破坏模式示意图(单位: mm)

Fig.16 Schematic diagrams of face failure mode in sand (unit: mm)

5 结 论

本文通过开展浅埋隧道盾构掘进模型试验,从盾构掘进力学参数、地表沉降曲线以及开挖面出土量等角度,分析了土性对浅埋盾构隧道施工地层响应的异同点。主要结论如下:

(1) 在砂卵石地层和砂土地层中,刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩随掘进距离增加呈现出相同的变化规律,其增减情况与螺旋出土器转速呈负相关关系。在相同的掘进参数下,对于 1.0D 埋深的隧道,砂卵石地层刀盘扭矩和螺旋出土器扭矩稳定值均大于砂土地层,增幅分别为 21.1%和 34.4%。

(2) 在砂土地层和砂卵石地层中,浅埋隧道地表沉降曲线对称轴均偏离隧道中线,偏离方向与刀盘旋转方向相关;当刀盘顺时针旋转时,对称轴位于隧道中线左侧。在 1.0D 隧道埋深下,当盾构掘进距离相同时,砂卵石地层地表沉降曲线对称轴偏移量均大于砂土地层。当刀盘距离监测路径 70 mm 时,两种地层的对称轴偏移量分别为 0.35D 和 0.07D。

(3) 在 1.0D 隧道埋深下,砂卵石地层和砂土地层盾构掘进前方影响范围分别为 1.25D 和 1.50D。

(4) 地层土性对浅埋盾构隧道地层稳定性具有显著影响。在砂卵石地层中, 开挖面出土量随时间呈“线性增加-保持不变”两阶段变化规律, 地层土体呈局部失稳破坏状态。在砂土地层中, 开挖面出土量随时间始终呈线性增加趋势, 地层土体呈整体失稳破坏模式。地层塌陷区域包含刀盘前方和后方土体, 前方区域与后方区域在地表处比值为 1.25:1.00。

参考文献

- [1] 宋浩然, 张顶立. 叠落盾构隧道施工影响下地层变形及结构受力分析[J]. 土木工程学报, 2015, 48(增刊 1): 279-282.
- SONG Hao-ran, ZHANG Ding-li. Analysis on the law of ground deformation and structural force caused by overlapping shield tunnel construction[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2015, 48(Suppl.1): 279-282.
- [2] 张箭, 王树英, 阳军生, 等. 北京地铁敞口式盾构掘进对砂层土体扰动规律研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 572-577.
- ZHANG Jian, WANG Shu-ying, YANG Jun-sheng, et al. Soil disturbance of Beijing subway constructed by open-face shield tunneling method in sandy stratum[J]. **Journal of Northeastern University (Natural Science)**, 2016, 37(4): 572-577.
- [3] ZHANG P, DU X L, LU D C, 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] 王俊, 聂亮, 向龙, 等. 散粒体地层土压盾构掘进掌子面稳定性研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(7): 128-135.
- WANG Jun, NIE Liang, XIANG Long, et al. Study on face stability of EPB shield tunnel in granular materials[J]. **Journal of China Railway Society**, 2018, 40(7): 128-135.
- [5] XU Q W, ZHANG L Y, ZHU H H, et al. Laboratory tests on conditioning the sandy cobble soil for EPB shield tunnelling and its field application[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 105: 103512.
- [6] WANG J, TIAN N, LIN G J, et al. Face failure of deep EPB shield tunnels in dry graded cobble-rich soil: a DEM study[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2024, 147: 105622.
- [7] LIN Q T, LU D C, GUO C X, et al. Collapse behavior and mechanical response of the cobble stratum during the shield driving[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2024, 144: 105507.
- [8] XU Q W, XIE J L, ZHANG L Y, et al. Failure analysis of progressive instability and deformation law of excavation face in sand cobble stratum under cutting disturbance by shield cutter[J]. **Engineering Failure Analysis**, 2023, 154: 107711.
- [9] 李伟平, 李兴, 薛亚东, 等. 砂卵石地层浅埋盾构隧道开挖面稳定模型试验[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(S2): 199-203.
- LI Wei-ping, LI Xing, XUE Ya-dong, et al. Model tests on face stability of shallow shield tunnels in sandy cobble strata[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2018, 40(S2): 199-203.
- [10] 唐建一, 徐东升, 刘华北. 含石量对土石混合体剪切特性的影响[J]. 岩土力学, 2018, 39(1): 93-102.
- TANG Jian-yi, XU Dong-sheng, LIU Hua-bei. Effect of gravel content on shear behavior of sand-gravel mixture[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(1): 93-102.
- [11] LI Q Q, ZHANG P, DU X L, et al. Estimating tunnelling induced ground deformation in sandy cobble stratum considering rock content variation[J]. **Geotechnical and Geological Engineering**, 2024, 42: 4563-4580.
- [12] CHEN R P, TANG L J, YIN X M, et al. An improved 3D wedge-prism model for the face stability analysis of the shield tunnel in cohesionless soils[J]. **Acta Geotechnica**, 2015, 10(5): 683-692.
- [13] ZHANG M J, DI Q G, LI P F, et al. Influence of non-associated flow rule on face stability for tunnels in cohesive-frictional soils[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2022, 121: 104320.
- [14] CHENG C, JIA P J, NI P P, et al. Upper bound analysis of longitudinally inclined EPB shield tunnel face stability in dense sand strata[J]. **Transportation Geotechnics**, 2023, 41: 101031.
- [15] 张治国, 罗杰, 朱正国, 等. 强降雨影响下盾构隧道开挖面稳定性的三维对数螺旋模型上限解[J]. 岩土力学, 2023, 44(12): 3587-3601, 3616.
- ZHANG Zhi-guo, LUO Jie, ZHU Zheng-guo, et al. Upper limit solution for 3D logarithmic spiral model of stability on shield tunnel face under influence of heavy rainfall[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(12): 3587-3601, 3616.
- [16] 徐文杰, 王识. 基于真实块石形态的土石混合体细观力学三维数值直剪试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(10): 2152-2160.

- XU Wen-jie, WANG Shi. Meso-mechanics of soil-rock mixture with real shape of rock blocks based on 3D numerical direct shear test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2016, 35(10): 2152-2160.
- [17] HU X Y, HE C, LAI X H, et al. A DEM-based study of the disturbance in dry sandy ground caused by EPB shield tunneling[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2020, 101: 103410.
- [18] TU S Q, LI W, ZHANG C P, et al. Model test and discrete element method simulation of tunnel face stability in sand-gravel inclined layered stratum[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2024, 172: 106456.
- [19] 薛亚东, 张森, 李兴, 等. 基于 CDEM 的砂卵石地层盾构开挖面稳定性分析[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(3): 499-506, 586.
- XUE Ya-dong, ZHANG Sen, LI Xing, et al. Face stability of shield tunnel in sandy cobble stratum with continuum-based discrete element method[J]. **Journal of Southwest Jiaotong University**, 2019, 54(3): 499-506, 586.
- [20] DU X L, ZHANG P, JIN L, 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.
- [21] WANG F, DU X L, LI P F, et al. A meso-scale numerical modelling method for the stability analysis of tunnels in sandy cobble stratum[J]. **Transportation Geotechnics**, 2023, 38: 100921.
- [22] LIN Q T, LU D C, LEI C M, et al. Model test study on the stability of cobble strata during shield under-crossing[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2021, 110: 103807.
- [23] LIN Q T, LU D C, LEI C M, et al. Mechanical response of existing tunnels for shield under-crossing in cobble strata based on the model test[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2022, 125: 104505.
- [24] 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.
- JIANG Ying-chao. Study on the soil disturbance mechanism of shield tunnelling in sandy cobble stratum[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [25] ZHANG P, LU D C, DU X L, et al. A division method for shallow tunnels and deep tunnels considering soil stress path dependency[J]. **Computers and Geotechnics**, 2021, 135: 104012.
- [26] LIANG L J, XU C J, CHEN Q Z, et al. Experimental and theoretical investigations on evolution of soil-arching effect in 2D trapdoor problem[J]. **International Journal of Geomechanics**, 2020, 20(6): 06020007.
- [27] 齐春, 何川, 封坤, 等. 泥水平衡式盾构模拟试验系统的研制与应用[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(11): 1999-2008.
- QI Chun, HE Chuan, FENG Kun, et al. Development and application of simulation test system for slurry balance shield[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2016, 38(11): 1999-2008.
- [28] HU X Y, HE C, WALTON G, et al. Laboratory model test of EPB shield tunneling in a cobble-rich soil[J]. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 2020(10): 146.
- [29] 雷华阳, 杨洋, 许英刚. 不同埋深条件下盾构施工扰动试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(增刊 1): 1-12.
- LEI Hua-yang, YANG Yang, XU Ying-gang. Experimental study on stratum disturbance of shield construction under different tunnel depth conditions[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2024, 45(Suppl.1): 1-12.
- [30] 王俊, 王闯, 何川, 等. 砂卵石地层土压盾构掘进掌子面稳定性室内试验与三维离散元仿真研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 3038-3046, 3054.
- WANG Jun, WANG Chuang, HE Chuan, et al. Heading stability analysis of EPB shield tunnel in sandy cobble ground using laboratory test and 3D DEM simulation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(8): 3038-3046, 3054.
- [31] HU X Y, HE C, WALTON G, et al. Face failure in cobble-rich soil: numerical and experimental approaches on 1g EPB reduced scale model[J]. **Soils and Foundation**, 2021, 61(6): 1500-1528.
- [32] 刘辉. 城市密集区大直径盾构隧道施工地层响应分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2019.
- LIU Hui. Stratum response analysis of large diameter shield tunnel construction in urban dense area[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.
- [33] 崔建. 考虑土体非共轴各向异性盾构施工诱发地层变形研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- CUI Jian. Study on soil deformation induced by shield construction considering non-coaxiality and anisotropy of soil[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022.