

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2025.058



开放科学(资源服务)标识码OSID:



高卵石含量地层盾构隧道施工围岩扰动特征 试验研究

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 473004; 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:与低卵石含量地层相比,高卵石含量地层具有颗粒孔隙大、颗粒间点对点接触等特点,隧道施工扰动时地层中大颗粒骨架结构更易遭到破坏,从而处于不稳定状态。依托典型盾构隧道工程,采用可实现刀盘旋转、螺旋出土等功能的模型盾构机,开展高卵石含量地层(70%)浅埋隧道(1.0D)和深埋隧道(2.0D)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,探究高卵石含量地层盾构隧道施工围岩扰动特征。结果表明:对于高卵石含量地层,在相同的盾构掘进参数下,浅埋隧道和深埋隧道螺旋出土器扭矩相差不大,但浅埋隧道刀盘扭矩稳定值小于深埋隧道;在两种埋深条件下,地表沉降曲线均关于隧道中心线呈非对称分布,其偏心位置与刀盘旋转方向相关;当刀盘顺时针旋转时,沉降曲线对称轴位于掘进方向左侧;浅埋隧道和深埋隧道开挖面均呈整体失稳破坏模式,且地层塌陷区域均包含刀盘前方土体和后方土体;在两种埋深条件下,采用螺旋出土和刀盘后退方式得到的地表塌陷形态均为椭圆状,且椭圆长轴方向与盾构掘进方向垂直;出土破坏得到的地表塌陷范围大于后退破坏方式,且与产生的地层损失密切相关。

关键词:砂卵石地层;高含石量;盾构隧道;隧道埋深;围岩扰动特征

中图分类号:TU411 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(XXXX)XX-0001-11

Experimental study on the ground disturbance characteristics during shield tunneling in high cobble content strata

SONG Weitao¹, ZHANG Pei², DU Xiuli³, LIN Qingtao³

(1. School of Civil Engineering, Nanyang Institute of Technology, Nanyang 473004, Henan, P. R. China; 2. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, P. R. China; 3. Key Laboratory of Urban Security and Disaster Engineering of Ministry of Education, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

收稿日期:2025-01-14

基金项目:国家自然科学基金(51908023, 52025084);北京市自然科学基金(8232007);北京市教委科研项目(KM202310016013);河南省高等学校重点科研项目(24A560015);南阳市科技发展计划(23KJGG246)

作者简介:宋伟涛(1990-),男,博士,主要从事隧道工程研究,E-mail:songweitao720@126.com。

张佩(通信作者),女,副教授,E-mail:zhangpei@bucea.edu.cn。

Received: 2025-01-14

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 51908023, 52025084); Natural Science Foundation of Beijing (No. 8232007); Research Project of Beijing Municipal Commission of Education (No. KM202310016013); Key Scientific Research Projects for Higher Education of Henan Province (No. 24A560015); Scientific and Technological Project of Nanyang City (No. 23KJGG246)

Author brief: SONG Weitao (1990-), PhD, main research interest: tunnel engineering, E-mail: songweitao720@126.com.

ZHANG Pei (corresponding author), associate professor, E-mail: zhangpei@bucea.edu.cn.

Abstract: Compared with ground with low cobble content, a high cobble content strata has characteristics such as large particle pores and point-to-point contact between particles, etc. During shield tunnelling, the large-grained skeleton structure in such strata is more prone to damage, leading to an unstable state. Based on a typical shield tunnel project, a model shield machine that can achieve functions such as cutterhead rotation and spiral discharging soil is used to conduct model test. Shield model tests all were achieved for both shallow tunnel ($1.0D$) and deep tunnel ($2.0D$) in high cobble content strata (rock content of 70%). Then, from the aspects of shield tunneling mechanical parameters, ground surface settlement curves and excavation face stability, the ground disturbance characteristics of shield tunnelling in high cobble content strata are analyzed. Test results show that for the high cobble content strata, under the same shield advancement parameters, the screw excavator torque shows little difference between shallow and deep tunnels. However, the stable value of cutterhead torque in shallow tunnel is less than that in deep tunnel. Under these two ground conditions, the ground surface settlement curves all show an asymmetric distribution about the tunnel centerline, and the eccentric position is related to the rotation direction of the cutterhead. When the cutterhead rotates clockwise, the symmetry axis of the settlement curve is located on the left side of the advancing direction. The failure modes of excavation face in both shallow and deep tunnels all present to be global instability, with collapse zones encompassing soil both ahead of and behind the cutterhead. Besides, the ground collapse morphologies induced by discharging soil or cutterhead retraction are all elliptical, with the major axis perpendicular to the shield advancement direction. However, the extent of ground collapse caused by discharging soil is larger than that induced by retraction failure, which is closely related to the corresponding ground loss.

Keywords: sandy cobble stratum; high rock content; shield tunnel; tunnel buried depth; ground disturbance characteristics

在城市地下工程建设过程中,砂卵石地层是一种常见的工程地质体。当地层中卵石含量大于70%时,可认定为高卵石含量地层^[1-3]。据统计,成都市地铁7号线盾构隧道工程,所穿越砂卵石地层中粒径大于20 mm的卵石含量约为76%,粒径大于60 mm的卵石含量约为40%^[4];兰州市地铁1号线盾构隧道工程,所穿越砂卵石地层粒径大于20 mm的卵石含量达70%^[5]。

砂卵石地层材料为散粒体介质,具有内摩擦角大、黏聚力低等特点。因自然因素不同,砂卵石地层具有复杂多变性,颗粒级配、卵石含量等是表征地层特性的关键指标。已有研究表明^[6-8],当卵石含量大于70%时,砂卵石土的内摩擦角随含石量的增加或保持不变、或逐渐减小,而黏聚力随含石量的增加多呈逐渐减小的趋势。相对于中低卵石含量地层,高卵石含量地层具有颗粒孔隙大、颗粒之间点对点接触等特点,外荷载作用下易形成大颗粒骨架结构^[9-11]。在进行隧道施工时,大颗粒骨架结构易遭到破坏,致使高卵石含量地层更易处于不稳定状态,引起较大的地层损失甚至地表塌陷事故。因此,明确高卵石含量地层盾构隧道施工围岩扰动特征是保证盾构隧道安全施工的关键。

目前,关于盾构隧道施工围岩扰动特征的研究多集中于中低卵石含量地层,而在高卵石地层中的

研究比较薄弱。Du等^[12]、Li等^[13]和Wang等^[14]提出了砂卵石地层隧道开挖细观数值模拟方法,分析了地层变形随卵石含量(0%~50%)的变化规律。Lin等^[15-16]通过开展盾构掘进模型试验,分析了高卵石含量地层中(含石量80%)新建隧道施工对既有隧道的影响,明确了既有隧道的变形规律和地层的坍塌模式。Wang等^[17-18]采用离散元法模拟土压平衡盾构刀盘动态开挖过程,研究了高卵石含量地层(含石量95%)浅埋隧道掌子面稳定性问题,结果表明,若不考虑动态开挖过程,开挖面稳定性将被高估。通过开展盾构掘进模型试验,胡雄玉等^[19-20]分析了地层土性对围岩扰动及开挖面破坏特征的影响,结果表明,砂卵石地层中(含石量100%)盾构开挖面失稳发展到地表后,沉降曲面呈上大下小且逐渐收缩的沙漏状,地表沉降范围小于砂土地层。张学铭^[21]通过现场监测发现,砂卵石地层(含石量50%~60%)地表沉降曲线基本符合Peck曲线描述的高斯形态。张建全等^[22]观察到砂卵石地层(含石量大于50%)地表沉降槽形态近似为“V”型,而徐前卫等^[23]发现砂卵石地层(含石量大于50%)地表沉降曲线关于隧道中轴线呈非对称分布。

对于砂卵石地层隧道开挖的地层扰动特征,学者们已开展了大量研究,但相关结论难以统一,其主要原因是忽视了砂卵石地层本身的复杂多变性

以及实现盾构机主要功能的挑战性。因此,有必要从砂卵石地层的组成出发,以实现盾构机动态开挖过程的数值或物理模拟为导向,开展砂卵石地层隧道施工围岩扰动特征研究。笔者依托清华园隧道盾构段工程,采用可实现刀盘旋转、螺旋出土等功能的模型盾构机,在高卵石含量地层开展两组埋深的土压平衡盾构掘进模型试验,并从盾构掘进力学参数、地表沉降特征及开挖面稳定状态等角度,探讨高卵石含量地层盾构隧道施工围岩扰动特征。

1 盾构掘进模型试验设计

依托北京市清华园隧道盾构段工程,采用自主设计的土压平衡盾构掘进模型试验平台,开展高卵石含量地层隧道开挖模型试验。

1.1 工程背景

清华园隧道工程位于北京市海淀区,为新京张铁路的重要组成部分。隧道两端采用明挖法施工,中间段采用盾构法施工。清华园隧道工程全长 5 330 m,其中盾构段长 3 769 m,采用两台直径 12.61 m 的盾构机掘进。盾构隧道采用管片拼装式衬砌,管片外径为 12.20 m,管片厚 0.55 m,环宽 2.0 m。隧道埋深为 0.5D~2.0D,其中,D 为隧道管片外径。

盾构隧道穿越地层主要为砂卵石土地层,其中全断面砂卵石地层掘进超 1 800 m、砂卵石土-粉质黏土复合地层超 1 200 m。砂卵石地层中卵石含量较高,粒径 20~60 mm 的颗粒含量约为 15%,大于 60 mm 的颗粒含量约为 55%。

1.2 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 1 所示。

模型箱为一长方体刚性箱,其内部尺寸为 2.0 m×2.0 m×1.5 m(长×宽×高),箱体采用厚度为 20 mm 的钢板制作。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。模型箱的侧壁上嵌有观察窗,材质为透明的亚克力板,便于观察试验填土过程与试验过程中的地层变形。在模型箱内沿掘进方向中部设有中隔板卡槽,插入中隔板后可将模型箱分隔为两个独立空间,可进行连续开挖两个独立工况的试验。



图 1 土压平衡盾构掘进模型试验平台
Fig.1 Earth pressure balance shield tunnel model test platform

模型盾构机为顶管式隧道开挖装置,由刀盘、盾壳、衬砌、土压舱与螺旋出土器等组成,能实现盾构机的主要功能,如:刀盘旋转切削、向前掘进、螺旋出土及渣土改良等功能。由于模型盾构尺寸限制,无法实现盾构管片拼装和壁后注浆等过程。盾构刀盘开口率为 45%,类型为辐板式,螺旋出土器排出颗粒尺寸最大为 10 mm。衬砌外径为 280 mm。

控制系统设有可视化操作窗口,通过控制 3 台电机分别调节刀盘转速、螺旋出土器转速以及盾构机掘进速度等。此外,控制系统还能实时显示并记录盾构掘进力学参数,如:刀盘扭矩、出土器扭矩和顶推力等。

1.3 模型试验相似地层材料

根据清华园隧道盾构机直径 12.61 m 以及模型盾构机直径 0.28 m 可知,试验几何相似比为 45:1。结合实际地层材料的颗粒级配,计算得到试验土体颗粒粒度组成。综合考虑螺旋出土器排出颗粒尺寸,试验中采用 0.15~0.25 mm 的细砂模拟工程中小于 20 mm 的颗粒,采用 2.0~3.0 mm 的角砾土模拟大于 20 mm 的颗粒,两者的质量分数分别为 30% 和 70%。工程现场及模型试验中地层土体颗粒级配,如表 1 所示。试验中用到的相似地层材料,如图 2 所示。

根据清华园隧道盾构段地勘报告,砂卵石地层为中密状态,故试验相似地层密实度取为 $D_r=55\%$ 。开展试验材料最大和最小干密度实验,得到相似材料最大干密度为 2 100 kg/m³,最小干密度为 1 495 kg/m³,从而计算出填土密度为 1 776 kg/m³。

开展两组盾构掘进模型试验,洞顶埋深分别为 1.0D 和 2.0D,分别模拟浅埋隧道和深埋隧道,如图

表 1 工程现场及模型试验中地层土体颗粒级配

Table 1 Particle size distribution of ground soil in practical engineering and model test

实际工程			模型试验	
粒径范围/mm	相似比 45:1 计算粒径/mm	质量比/%	粒径范围/mm	质量比/%
<20	<0.44	30	0.15~0.25	30
20~60	0.44~1.33	15	2.0~3.0	70
60~150	1.33~3.33	55	2.0~3.0	70

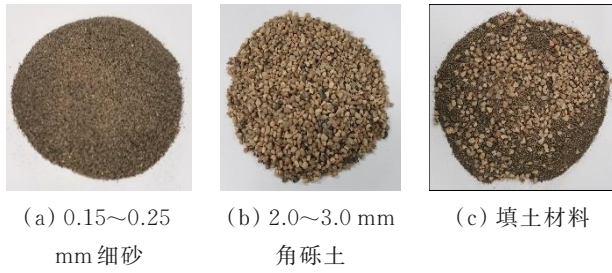


图2 模型试验相似地层材料

Fig.2 Ground materials used in the model test

3所示。模型试验盾构隧道直径为280 mm,故1.0D和2.0D工况覆土深度分别为280 mm和560 mm,隧道下方地层厚度均为500 mm。

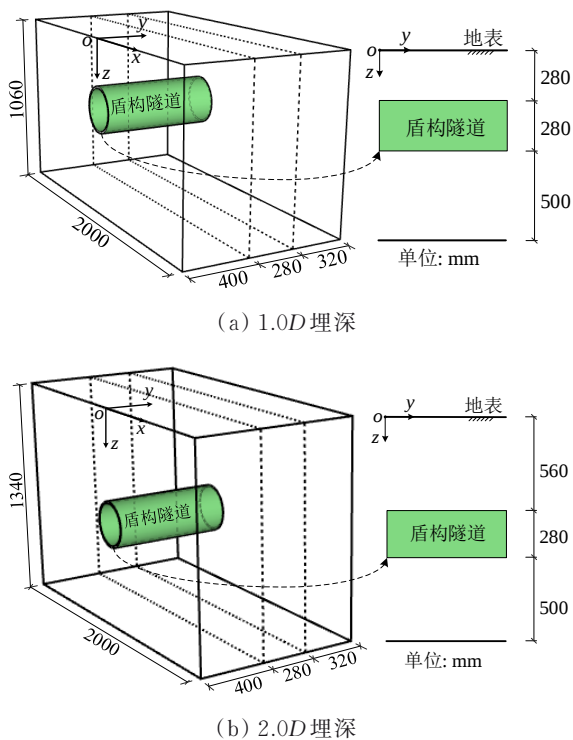


图3 埋深1.0D和2.0D试验工况

Fig.3 Test conditions for buried depth 1.0D and 2.0D

试验地层采用人工夯实法填土,每层填土的控制标高为10 cm。结合填土密度,计算得到每层填土质量为355 kg。图4所示为1.0D埋深工况模型箱填土过程。填土步骤为:1)在模型箱内壁粘贴光滑的塑料卷材,沿高度方向每隔10 cm划水平线,绘制各监测断面的竖直线;2)将355 kg相似地层材料分区域倒入模型箱,用刮平器将虚土整平,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;4)重复以上步骤直至达到设计标高,待地层静止24 h后安装地表位移计^[24-27]。

1.4 模型试验阶段及监测方案

盾构掘进试验过程包含正常掘进阶段、出土破

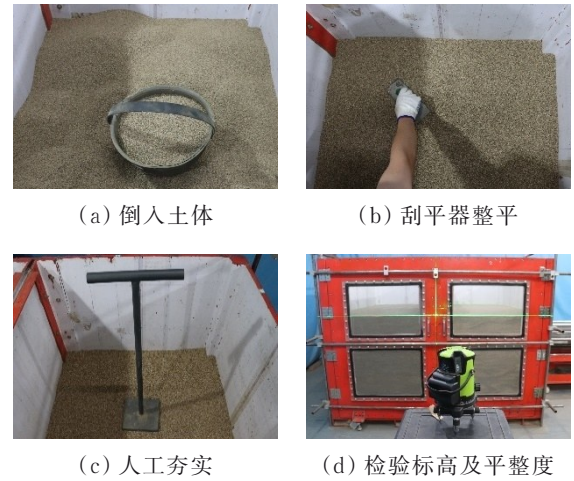


图4 1.0D埋深工况填土过程

Fig.4 Filling soil process for 1.0D condition

坏阶段和后退破坏阶段3部分,如图5所示。以刀盘中心初始位置在地表的投影为原点 o ,以盾掘掘进方向为 y 轴正方向。在正常掘进阶段,盾构机从原点 o 沿 y 轴开挖至400 mm处,刀盘正向(顺时针)旋转并逐渐顶进。在出土破坏阶段,盾构机停止在 y 轴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,其对应于实际盾构过程中的管片拼装环节。此后,盾构机向前掘进280 mm至680 mm位置,静置1.0 h后开始后退破坏阶段试验。在后退破坏阶段,采用刀盘反向(逆时针)旋转、盾构匀速后退的方式实现盾构开挖面失稳破坏,后退距离为20.0 mm,其参考了开挖面稳定性模型试验中挡板结构后移的方式。

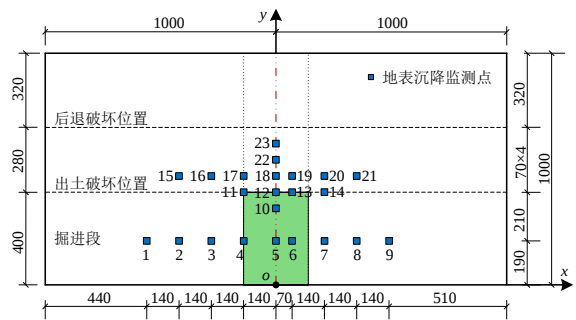


图5 地表沉降监测点(单位:mm)

Fig.5 Ground surface settlement monitoring points

试验过程中主要监测3个试验阶段的地表沉降,监测点位置如图5所示。在掘进段(0~400 mm) $y=190$ mm处布置一条横向监测路径,用以分析掘进过程中横断面地表沉降规律;在出土破坏段布置三条监测路径($y=400$ mm、 $y=470$ mm及 $x=0$ mm),用于监测开挖面失稳破坏引起的地表沉降全过程。地表位移采用顶杆位移计进行测量,其量程为100 mm,测量精度为0.01 mm。此外,为方便观测地表塌陷形态及范围,在地表用色砂绘制网格

线,网格尺寸为 70 mm,如图 6 所示。

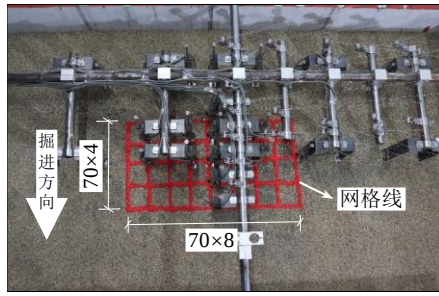


图 6 地表色砂网格线

Fig. 6 Grid lines with colored sand in ground surface

2 正常掘进段试验结果

在盾构机从 $y=0$ mm 掘进至 $y=400$ mm 的过程中,记录 $y=190$ mm 监测路径上各测点的地表沉降值,分析横断面地表沉降变化特征。在正常掘进段,刀盘顺时针旋转,盾构机整体向前掘进。

2.1 模型盾构机掘进参数变化规律

根据模型盾构机的额定扭矩,刀盘扭矩不能超过 $1\ 800\ \text{N}\cdot\text{m}$,螺旋出土器扭矩不能超过 $50\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。根据已开展模型试验^[15, 28-31],将螺旋出土器转速设定为 $4.0\sim 5.0\ \text{r/min}$ 时,能保证模型盾构机正常掘进。图 7 为两种隧道埋深时,盾构掘进速度参数随

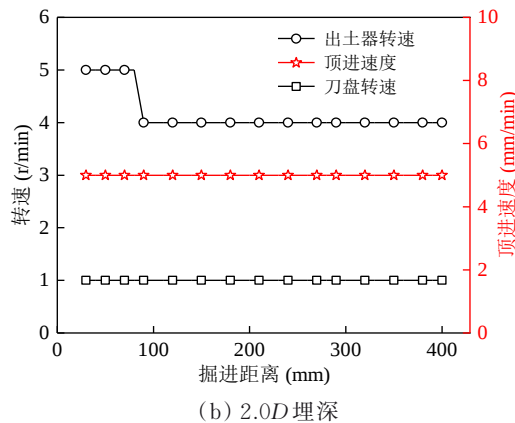
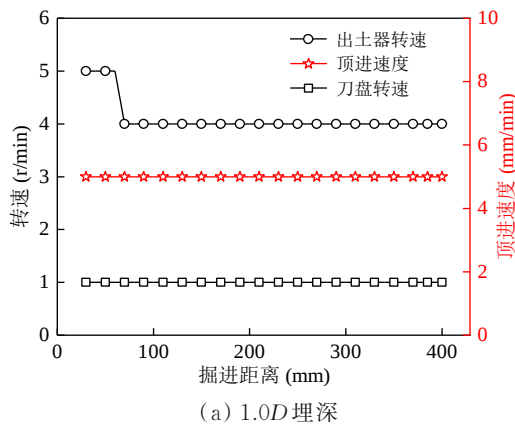


图 7 盾构机掘进速度参数

Fig. 7 Speed parameters of shield tunnel

掘进距离的变化图。从图中可以看出,在整个掘进过程中,两种埋深的盾构机掘进参数基本相同,顶进速度和刀盘转速分别为 $5.0\ \text{mm/min}$ 和 $1.0\ \text{r/min}$ 。

图 8 为盾构掘进力学参数随掘进距离的变化图。从图 8 可以看出,对于两种埋深工况,螺旋出土器扭矩和刀盘扭矩表现出相同的变化规律。关于螺旋出土器扭矩,两种埋深条件下,其值均在 $40\ \text{N}\cdot\text{m}$ 上下浮动。由于受到盾壳和土压舱保护,螺旋出土器扭矩主要与顶进速度和刀盘转速相关,而与隧道埋深关系不大。关于刀盘扭矩,两种埋深下,初始值和稳定值均存在一定差异,浅埋隧道从 $500\ \text{N}\cdot\text{m}$ 开始增加,当掘进至 $120\ \text{mm}$ 后,其值稳定于 $900\sim 1\ 100\ \text{N}\cdot\text{m}$;深埋隧道从 $400\ \text{N}\cdot\text{m}$ 开始增加,当掘进至 $150\ \text{mm}$ 后,其值稳定于 $1\ 200\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。砂卵石地层的离散性及其对盾构机启动时刻的卡滞效应会导致刀盘初始扭矩比正常施工时高 $20\%\sim 30\%$ 。故而造成浅埋隧道刀盘扭矩初始值稍大于深埋隧道。在相同出土转速条件下,随着埋深的增大,刀盘切削土体时需克服的土压力增大,故而浅埋隧道刀盘扭矩稳定值小于深埋隧道。

2.2 $y=190$ mm 路径横断面地表沉降曲线

盾构机在掘进过程中对周围土体会造成扰动,

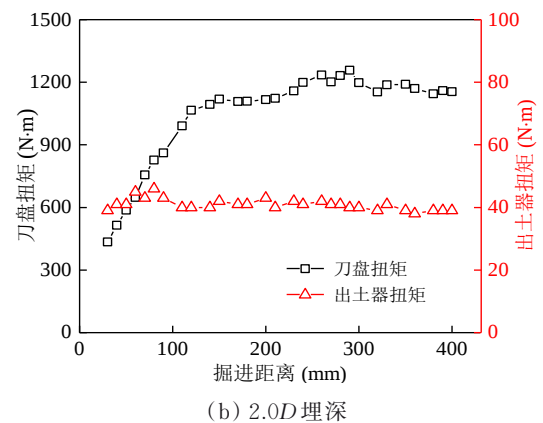
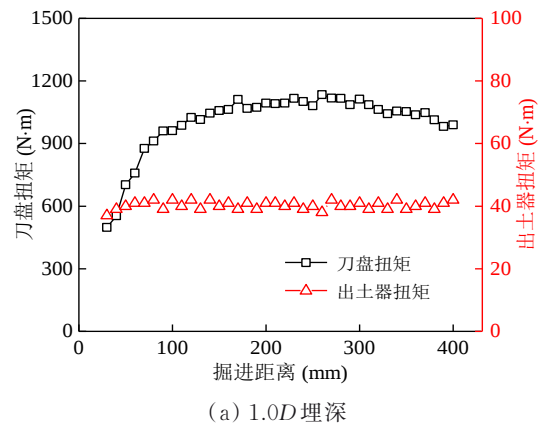


图 8 盾构机掘进力学参数

Fig. 8 Mechanical parameters of shield tunnel

引起地表变形。图9为模型盾构机掘进至不同位置时,两种埋深条件下, $y=190\text{ mm}$ 路径的地表沉降试验监测值及其拟合曲线。从图9可以看出,在采用的盾构掘进速度参数下,浅埋隧道地表变形同时存在沉降和隆起的现象。这是由于地表变形除受地层损失影响外,还受到刀盘面板的挤压作用,该挤压作用会引起地表隆起。对于深埋隧道,地表变形表现为整体沉降,未观察到明显的隆起现象。随着隧道埋深的增加,刀盘面板的挤压作用传递至地表时逐渐减弱。从不同位置监测点的沉降值可以看出,对于浅埋隧道,其横向影响范围约为隧道中线两侧 $-2.0D\sim 1.75D$;对于深埋隧道,其横向影响范围约为隧道中线两侧 $-1.50D\sim 1.25D$ 。在两种埋深情况下,地表沉降曲线关于隧道中线均呈非对称分布,与清华园隧道盾构工程部分地表沉降监测数据分布特征一致^[32-33]。

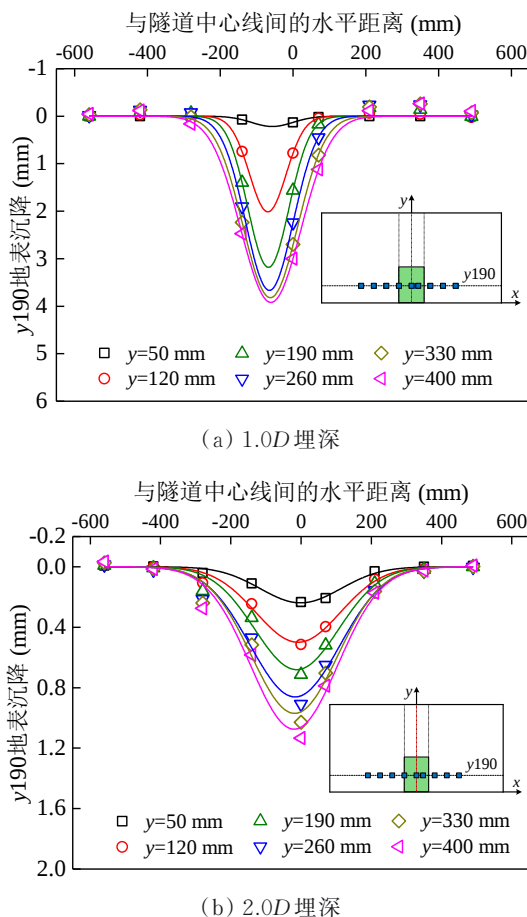


图9 $y=190\text{ mm}$ 断面地表沉降曲线

Fig. 9 Ground surface settlement curves of $y=190\text{ mm}$ path

表2为地表沉降拟合曲线偏移量 m 的大小。从表2可以看出,1.0D工况中偏移量 m 远大于2.0D工况。以盾构掘进至 $y=190\text{ mm}$ 位置为例,浅埋隧道地表沉降曲线中心位置偏移量为 67.5 mm ($0.25D$),深埋隧道偏移量为 12.5 mm ($0.05D$)。

表2 地表沉降曲线对称轴偏移量 m

Table 2 Offset m of ground settlement curve centerline

y/mm	m/mm	
	1.0D埋深	2.0D埋深
50	57.2	1.4
120	69.1	8.4
190	67.5	12.5
260	64.9	17.0
330	62.2	18.5
400	60.7	19.8

由此说明,隧道埋深越浅,刀盘旋转对地表变形的影响越大,相应沉降曲线中心的偏移量越大。此外,对于浅埋隧道,随着盾构刀盘掘进距离的增加, m 值增大后逐渐减小,即偏离隧道中心线 y 轴后又有所靠近;对于深埋隧道, m 值不断增大,即逐渐偏离隧道中心线 y 轴。

2.3 监测点沉降时程曲线

图10所示模型盾构机从 $y=0\text{ mm}$ 掘进至 $y=400\text{ mm}$ 时, $y=190\text{ mm}$ 监测路径各监测点沉降随掘进距离的变化。从图10可以看出,当盾构机掘进至 $y=400\text{ mm}$ 位置时,浅埋隧道地表监测点沉降最大

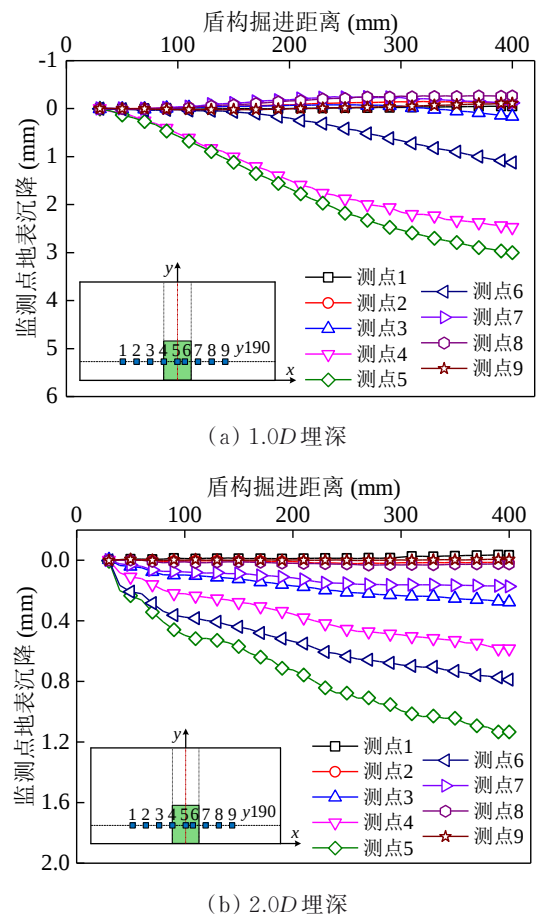


图10 $y=190\text{ mm}$ 路径地表沉降随掘进距离的变化曲线

Fig. 10 Ground surface settlement variation of $y=190\text{ mm}$ with tunneling distance

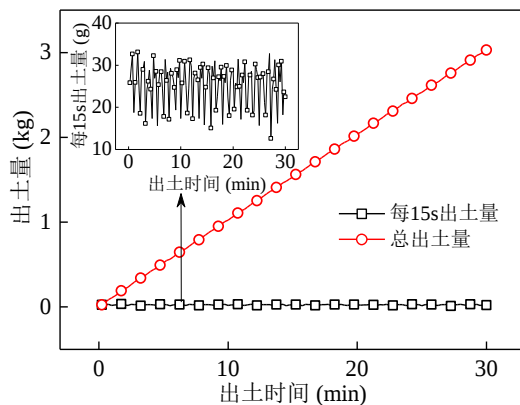
值约为 3.0 mm,深埋隧道最大值约为 1.2 mm。对于浅埋隧道,当盾构机掘进至 40 mm 时,各监测点的地表变形开始增加,特别是监测点 4、5、6。对于深埋隧道,当盾构机开始掘进时,各监测点的地表变形均开始增加,特别是监测点 3、4、5、6 和 7。

3 出土破坏阶段试验结果

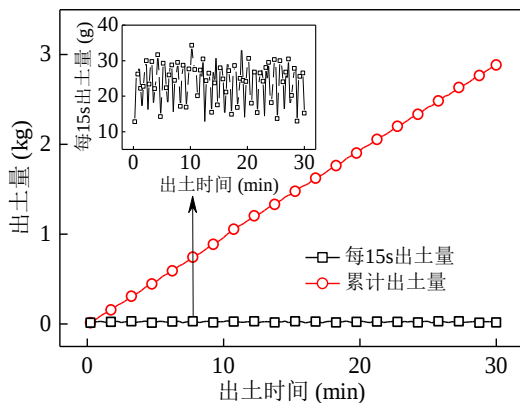
当模型盾构机掘进至 $y=400$ mm 时,关闭刀盘、螺旋出土器和顶进电机,静置 6.0 h。继而,采用刀盘空转、螺旋出土的方式实现开挖面主动破坏,整个出土过程持续 30 min。在该阶段,设置刀盘转速为 0.2 r/min,螺旋出土器转速为 1.0 r/min。

3.1 出土量-时间变化曲线

在出土破坏阶段,随着螺旋出土器出土量不断增加,盾构土舱内土体减少,引起开挖面前方土体流入土舱。在该阶段,每隔 15 s 称取一次出土质量,并进行记录。图 11 所示两种埋深情况下,出土量随时间的变化曲线。从图 11 可以看出,在两种埋深条件下,出土量随时间的变化曲线基本相同,主要体现在累计出土量和单位时间出土量两个方面。在累计出土量方面,其随时间近似直线增加,浅埋隧



(a) 1.0D 埋深



(b) 2.0D 埋深

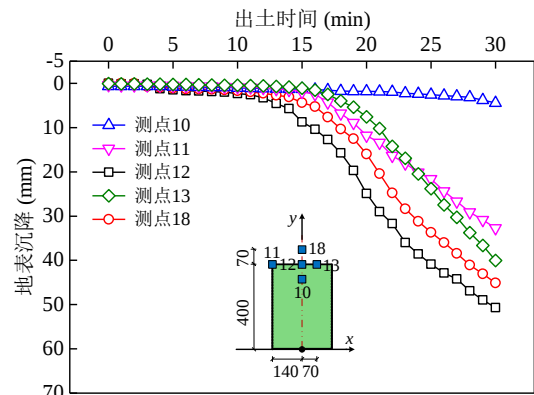
图 11 出土量随时间的变化

Fig. 11 Variation of discharged soil weight with time

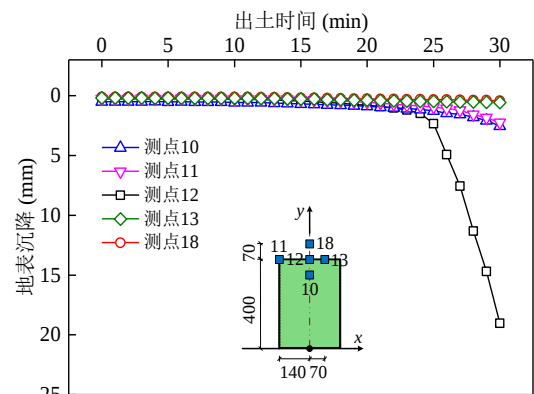
道和深埋隧道的总出土量分别为 3.03、2.88 kg。在单位时间出土量方面,每 15 s 的出土量基本恒定,变化范围均为 10~35 g。

3.2 地表关键监测点时程曲线

图 12 为出土破坏阶段,两种隧道埋深条件下,关键监测点的地表沉降时程曲线。从图 12 可以看出,两种埋深条件下,关键监测点地表沉降随时间变化存在显著不同。对于浅埋隧道,监测点 10 试验过程中未发生明显变化,而监测点 12、18、11 和 13 先后在第 11、14、15、16 min 后沉降开始迅速增加,沉降值随出土时间均呈线性增长;试验结束时,相应沉降量分别达 50、45、33、40 mm。对于深埋隧道,监测点 10、11、13 和 18 在试验过程中均未发生明显变化,而监测点 12 在第 23 min 后开始迅速增大,在试验结束时沉降量约为 20 mm。以地表出现明显沉降的监测点作为地表塌陷范围的参考,浅埋隧道地表发生明显沉降的位置为监测点 11、12、13 和 18,深埋隧道地表发生明显沉降的位置为监测点 12。试验结果表明,对于含石量为 70% 的地层,浅埋隧道地表塌陷起始时刻比深埋隧道早 12 min,且



(a) 1.0D 埋深



(b) 2.0D 埋深

图 12 关键监测点地表沉降时程曲线

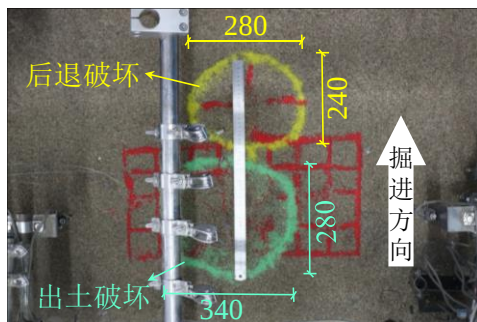
Fig. 12 Ground surface settlement variations of key monitoring points with time

浅埋隧道地表塌陷范围显著大于深埋隧道。

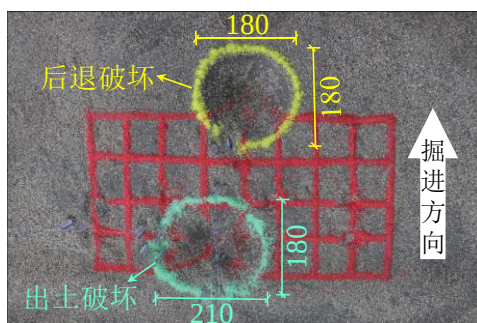
4 后退破坏阶段试验结果

模型试验的第3个阶段为后退破坏段。当盾构机掘进至 $y=680\text{ mm}$ 位置时,静置 1.0 h 后开始后退破坏试验。在这个阶段,模型盾构机不出土,刀盘以 0.2 r/min 逆时针旋转、以 1.0 mm/min 的速度向后退,后退距离为 20 mm 。

图13为不同隧道埋深的地表塌陷图,图中,绿色彩砂和黄色彩砂分别为出土方式和刀盘后退方式得到的结果。从图13可以看出,采用两种方式得到的地表塌陷形态均为椭圆形,且椭圆长轴方向与盾构掘进方向垂直。此外,从图中可以看出,塌陷坑中心与刀盘旋转方向相关。采用螺旋出土方式(顺时针旋转)得到的塌陷坑中心位于掘进方向的左侧,采用后退方式(逆时针旋转)得到的塌陷坑中心位于掘进方向的右侧。这是由刀盘旋转对地层不均匀扰动引起的。



(a) $1.0D$ 埋深



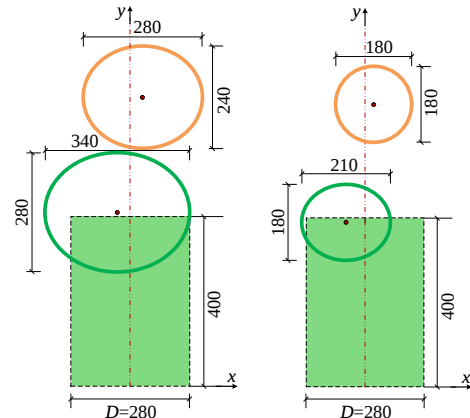
(b) $2.0D$ 埋深

图13 地表塌陷坑图

Fig. 13 The ground surface collapse diagram

图14为不同隧道埋深的地表塌陷平面示意图。从图14可以看出,在相同的破坏方式下,浅埋隧道地表塌陷范围大于深埋隧道。以螺旋出土方式为例,浅埋隧道地表塌陷坑长轴为 $1.2D$ 、短轴约为 $1.0D$,深埋隧道塌陷坑长轴约为 $0.75D$ 、短轴约为 $0.65D$ 。此外,从图中可以看出,在相同的埋深条件下,出土破坏得到的地表塌陷范围大于后退破坏方

式。以浅埋隧道为例,后退破坏塌陷坑长轴为 $1.0D$ 、短轴约为 $0.85D$ 。地表坍塌范围与地层损失(排出土体质量)密切相关。在两种埋深条件下,采用出土破坏方式排出的土体质量均大于后退破坏方式,故前者塌陷范围大于后者。



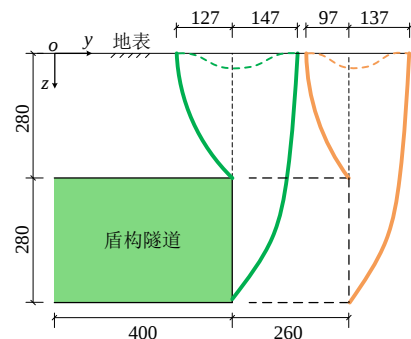
(a) $1.0D$ 埋深

(b) $2.0D$ 埋深

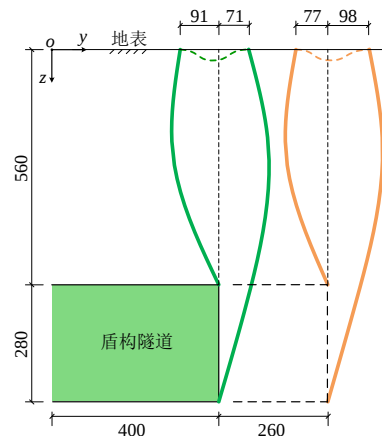
图14 地表塌陷位置平面图(单位:mm)

Fig. 14 Location of ground collapse in horizontal section

图15为不同隧道埋深的开挖面破坏模式纵断面示意图。从图中可以看出,地层塌陷区域同时包



(a) $1.0D$ 埋深



(b) $2.0D$ 埋深

图15 开挖面破坏模式纵断面示意图(单位:mm)

Fig. 15 Failure mode of excavation face in longitudinal section

含刀盘前方土体和后方土体。对于浅埋隧道,在地表区域,螺旋出土和刀盘后退方式得到的前方土体和后方土体比例分别为 1.2:1.0 和 1.4:1.0。对于深埋隧道,在地表区域,螺旋出土和刀盘后退方式得到的前方土体和后方土体比例分别为 1.0:1.3 和 1.3:1.0。在建立开挖面失稳理论模型时,已有研究通常仅考虑刀盘前方失稳区域,鲜有关刀盘后方失稳区域。

5 结论

为明确高卵石含量地层(含石量 70%)盾构隧道施工围岩扰动特征,依托清华园隧道盾构工程,设计相似地层条件,分别开展浅埋隧道(1.0D)和深埋隧道(2.0D)土压平衡盾构掘进模型试验。得到以下主要结论:

1)在正常掘进阶段,由于受到盾壳和土压舱保护,在相同的盾构掘进参数下,两种埋深的螺旋出土器扭矩相差不大,均在 40 N·m 上下浮动。由于刀盘切削土体需克服的土压力随隧道埋深增加而增大,浅埋隧道刀盘扭矩稳定值小于深埋隧道,1.0D 和 2.0D 埋深时分别为 1 000 N·m 和 1 200 N·m。

2)在正常掘进阶段,刀盘旋转将引起地层应力不均匀分布,因此,地表沉降曲线关于隧道中心线均呈非对称分布。当刀盘顺时针旋转时,沉降曲线对称轴位于掘进方向的左侧;当刀盘逆时针旋转时,对称轴位于掘进方向的右侧。浅埋隧道地表沉降曲线对称轴偏移量大于深埋隧道。当盾构掘进至监测路径时,浅埋隧道偏移量为 0.25D,深埋隧道为 0.05D。

3)在出土破坏阶段,在相同的刀盘转速和螺旋出土器转速下,1.0D 埋深和 2.0D 埋深隧道开挖面出土量随时间均近似呈线性增加,且总出土量差别不大。浅埋隧道地表坍塌起始时间比深埋隧道早 12 min,且浅埋隧道地表坍塌范围大于深埋隧道。沿隧道掘进方向,浅埋隧道坍塌长度为 1.0D,深埋隧道为 0.64D。

4)对于含石量为 70% 的砂卵石地层,1.0D 埋深和 2.0D 埋深隧道开挖面均呈整体失稳破坏模式,且地层塌陷区域包含刀盘前方土体和后方土体。在两种埋深条件下,采用螺旋出土和刀盘后退方式得到的地表塌陷形态均为椭圆状,且椭圆长轴方向与盾构掘进方向垂直。由于出土破坏地层损失大于后退破坏,故前者得到的地表塌陷范围大于后者。

由于开展模型试验时未布置地中位移和地层应力监测点,导致对出土破坏阶段和后退破坏阶段

的地层渐进破坏过程分析不足。因此,需在后续开展的模型试验中增加相应的监测方案,并结合相关模型试验开展数值模拟,明确地中变形和地中应力重分布特征。

参考文献

- [1] CHANG W J, PHANTACHANG T. Effects of gravel content on shear resistance of gravelly soils [J]. *Engineering Geology*, 2016, 207: 78-90.
- [2] 刘飞禹,孔剑捷,姚嘉敏.含石量和压实度对格栅-土石混合体界面剪切特性的影响[J].*岩土工程学报*, 2023, 45(5): 903-911.
LIU F Y, KONG J J, YAO J M. Effects of rock content and degree of compaction on interface shear characteristics of geogrid-soil-rock mixture [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2023, 45(5): 903-911. (in Chinese)
- [3] 李水江,姚嘉敏,刘飞禹,等.法向循环荷载下土石混合料-织物界面剪切特性研究[J].*岩土力学*, 2023, 44(11): 3082-3090.
LI S J, YAO J M, LIU F Y, et al. Analysis of shear characteristics of soil-rock mixture - geotextile interface under normal cyclic loading [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(11): 3082-3090. (in Chinese)
- [4] 张延杰,何萌,宋萌,等.富水砂卵石地层力学特性研究[J].*岩土力学*, 2023, 44(6): 1739-1747.
ZHANG Y J, HE M, SONG M, et al. Study on mechanical properties of water-rich sandy pebble soil [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(6): 1739-1747. (in Chinese)
- [5] HE S H, LI C H, WANG D H, et al. Surface settlement induced by slurry shield tunnelling in sandy cobble strata: A case study [J]. *Indian Geotechnical Journal*, 2021, 51(6): 1349-1363.
- [6] 王江营,曹文贵,蒋中明,等.不同应力路径下土石混填体变形力学特性大型三轴试验研究[J].*岩土力学*, 2016, 37(2): 424-430.
WANG J Y, CAO W G, JIANG Z M, et al. Large-scale triaxial tests on deformation and mechanical behavior of soil-rock aggregate mixture under different stress paths [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(2): 424-430. (in Chinese)
- [7] COLIN, BERRY P, BOLDINI D. In situ non-conventional shear tests for the mechanical characterisation of a bimrock [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2011, 48(1): 95-102.
- [8] XU W J, ZHANG H Y. Research on the effect of rock content and sample size on the strength behavior of soil-rock mixture [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2021, 80(3): 2715-2726.

- [9] 何珺, 张成平, 杨公标, 等. 砂卵石地层非对称连拱隧道结构受力模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(4): 116-124.
- HE J, ZHANG C P, YANG G B, et al. Experimental study on mechanical behavior of nonsymmetric multi-arch tunnel in sand-cobble ground [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(4): 116-124. (in Chinese)
- [10] HU X Y, HE C, FANG Y, 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] LI Q Q, ZHANG P, DU X L, et al. Estimating tunneling-induced ground deformation in sandy cobble stratum considering rock content variation [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2024, 42(6): 4563-4580.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] WANG J, HE C, XU G W. Face stability analysis of EPB shield tunnels in dry granular soils considering dynamic excavation process [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2019, 145(11): 04019092.
- [18] WANG J, LIN G J, TANG R, et al. A particle-scale insight into the face stability of shallow EPB shield tunnels in dry cobble-rich soil [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2024, 144: 105516.
- [19] 胡雄玉, 晏启祥, 何川, 等. 土压平衡盾构掘进对散粒体地层扰动和开挖面破坏特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(8): 1618-1627.
- HU X Y, YAN Q X, HE C, et al. Study on the disturbance and excavation face failure feature of granular mixtures stratum due to EPB shield tunneling [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(8): 1618-1627. (in Chinese)
- [20] 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, 146(10): 04020112.
- [21] 张学铭. 砂卵石地层土压平衡盾构掘进地层扰动及开挖面支护力计算方法研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2022.
- ZHANG X M. Research on the disturbance of EPB shield tunneling in sand and cobble strata and the calculation method of excavation surface support force [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022. (in Chinese)
- [22] 张建全, 张克利, 姚爱敏, 等. 基于实测数据的隧道地表沉降Peck经验参数研究[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(3): 89-95.
- ZHANG J Q, ZHANG K L, YAO A M, et al. Peck empirical parameters of tunnel surface settlement based on measured data [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(3): 89-95. (in Chinese)
- [23] 徐前卫, 贺翔, 龚振宇, 等. 砂卵石地层盾构微扰动施工及掘进控制研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(9): 72-77.
- XU Q W, HE X, GONG Z Y, et al. Research on the micro-disturbance construction and tunneling parameters control of earth pressure balance shield machine in sandy cobble stratum [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(9): 72-77. (in Chinese)
- [24] 范祚文, 张子新. 砂卵石地层土压力平衡盾构施工开挖面稳定及邻近建筑物影响模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(12): 2506-2512.
- FAN Z W, ZHANG Z X. Model test of excavation face stability of EPB shield in sandy cobble ground and adjacent building effect [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(12): 2506-2512. (in Chinese)
- [25] 房倩, 杜建明, 王中举, 等. 盾构施工影响下砂土地层变形规律模型试验研究[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 135-143, 214.
- FANG Q, DU J M, WANG Z J, et al. Model experimental study on stratum deformation of shield tunnelling in sand [J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 135-143, 214. (in Chinese)
- [26] LÜ X L, ZHOU Y C, HUANG M S, et al. Experimental study of the face stability of shield tunnel in sands under seepage condition [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 195-205.
- [27] 马少坤, 韦榕宽, 邵羽, 等. 基于透明土的隧道开挖面稳定性三维可视化模型试验研究及应用[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1798-1806, 1958.

MA S K, WEI R K, SHAO Y, et al. 3D visual model tests on stability of tunnel excavation surface based on transparent soil [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(10): 1798-1806, 1958. (in Chinese)

[28] 林庆涛,路德春,雷春明,等.下穿施工时盾构-卵石地层-既有隧道相互作用模型试验研究[J].北京工业大学学报,2021,47(4):328-337.

LIN Q T, LU D C, LEI C M, et al. Model test study on interaction between shield-cobble strata-existing tunnels during under-crossing process [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2021, 47(4): 328-337. (in Chinese)

[29] DI Q G, LI P F, ZHANG M J, et al. Experimental investigation of face instability for tunnels in sandy cobble strata [J]. Underground Space, 2023, 10: 199-216.

[30] DI Q G, LI P F, ZHANG M J, et al. Experimental study of face stability for shield tunnels in sandy cobble strata of different densities [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 135: 105029.

[31] 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.

[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 H. Stratum response analysis of large diameter shield tunnel construction in urban dense area [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019. (in Chinese)

[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 J. Study on soil deformation induced by shield construction considering non-coaxiality and anisotropy of soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2022. (in Chinese)

(编辑 XXX)