

徐平, 黄振磊. 2024. 富水砂卵石层盾构施工影响因素及敏感性分析[J]. 工程地质学报, 32(5): 1787-1797. doi:10.13544/j.cnki.jeg.2024-0217

Xu Ping, Huang Zhenlei. 2024. Influencing factors and sensitivity analysis for shield construction in water-rich sandy cobble stratum[J]. Journal of Engineering Geology, 32(5): 1787-1797. doi:10.13544/j.cnki.jeg.2024-0217

# 富水砂卵石层盾构施工影响因素及敏感性分析\*

徐平<sup>①</sup> 黄振磊<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>郑州大学, 水利与交通学院, 郑州 450001, 中国)

(<sup>②</sup>中国建设基础设施有限公司, 北京 100037, 中国)

**摘要** 砂卵石地层具有渗透性强、孔隙率大、自稳性差和受扰反应大等特点,若盾构施工参数控制不当则会发生掌子面失稳、坍塌和涌水等安全事故。确定富水砂卵石层盾构掘进引起地表沉降和管片隧道变形的影响因素,对于安全施工具有重要的指导意义。本文以洛阳地铁区间盾构穿越洛河富水砂卵石地层为工程背景,基于流固耦合理论,运用 ABAQUS 软件构建盾构掘进的三维有限元模型,数值模拟和现场实测的地表沉降数据基本吻合,验证了模型的准确性。采用单因素分析法研究了盾构掘进压力、同步注浆压力和等代层厚度等 3 个参数对地表沉降与管片变形的影响规律,研究结果表明:增大盾构掘进压力和同步注浆压力,减小等代层厚度,均能减小地表和隧道的拱顶沉降;而增大盾构掘进压力,减小同步注浆压力和等代层厚度,可减小隧道拱腰的水平变形。采用正交试验方法确定了 3 个影响因素对地表沉降和管片拱顶沉降两个指标的敏感性,从大到小排序均为:同步注浆压力、盾构掘进压力和等代层厚度。

**关键词** 富水砂卵石层; 盾构隧道; 地表沉降; 管片变形; 影响因素; 敏感性分析

中图分类号:U231.3 文献标识码:A doi:10.13544/j.cnki.jeg.2024-0217 CSTR:32088.14.JEG.20240217

## INFLUENCING FACTORS AND SENSITIVITY ANALYSIS FOR SHIELD CONSTRUCTION IN WATER-RICH SANDY COBBLE STRATUM

XU Ping<sup>①</sup> HUANG Zhenlei<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

(<sup>②</sup>China Construction Infrastructure Co., Ltd., Beijing 100037, China)

**Abstract** The sandy cobble stratum layers have characteristics such as strong permeability, high porosity, poor self-stability, and large response after disturbance. If the parameters of shield tunneling are not properly controlled, some safety accidents would occur, such as instability of the tunnel face, collapse, and water gushing. Therefore, identifying the influencing factors of ground settlement and segment tunnel deformation during shield tunneling in the water-rich sandy cobble stratum has important guiding significance for safe construction. The shield tunneling through sandy cobble stratum under Luohe in the Luoyang metro section is taken as the engineering background in this paper. A three-dimensional finite element model of shield tunneling construction is established using ABAQUS software based on the fluid-solid coupling theory. The numerically simulated and on-site measured ground settlement data are basically consistent, and the accuracy of the finite element model is verified. The single-factor analysis

\* 收稿日期: 2023-05-31; 修回日期: 2023-09-12.

基金项目: 国家自然科学基金项目(资助号: 51278467), 中国铁道科学研究院基金项目(资助号: 2022YJ280).

This research is supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51278467) and China Academy of Railway Sciences Foundation Project (Grant No. 2022YJ280).

第一(通讯)作者简介: 徐平(1977-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事岩土动力学和盾构隧道方面研究. E-mail: plian127@163.com

method is used to study the influential parameters of ground settlement and segment deformation, which include shield tunneling pressure, synchronous grouting pressure, and equivalent layer thickness. The results indicate that increasing shield tunneling pressure and synchronous grouting pressure, while reducing equivalent layer thickness, can reduce surface settlement and segment tunnel arch crown settlement. Conversely, increasing shield tunneling pressure while reducing synchronous grouting pressure and equivalent layer thickness can reduce the horizontal displacement of the arch waist of the segment tunnel. The sensitivity of influencing factors to the two indicators of ground settlement and segment arch settlement is determined using the orthogonal experimental method. The descending orders for both are : synchronous grouting pressure, shield tunneling pressure, and equivalent layer thickness.

**Key words** Water-rich sandy cobble stratum; Shield tunnel; Ground settlement; Segment tunnel deformation; Influential factor; Sensitivity analysis

## 0 引言

砂卵石地层广泛分布于我国西南和华北等地区,具有渗透性强、孔隙率大、自稳性差和受扰反应大等特点(滕丽等, 2012),盾构在河流富水砂卵石地层掘进时,掌子面的地下水渗流会降低地层的稳定性和强度,另外,若盾构施工参数控制不当则会发生掌子面失稳、坍塌和涌水等安全事故(王立新等, 2023),因此,研究富水砂卵石层盾构施工引起的地表沉降和管片变形的影响因素并进行敏感性分析,对于安全施工具有重要的指导意义。

近年来,国内外陆续建设了一批水下盾构隧道工程,众多相关研究人员和工程技术人员已经对富水砂卵石地层盾构施工进行了研究和探索:唐少辉等(2021)从隧道地质环境、盾构施工技术和工程项目管理等多个角度出发,概述了河底和海底等长距离高水压盾构隧道的工程问题和技术难点,梳理了包含砂卵石地层在内的复杂地质条件下的水下隧道施工成套关键技术;齐春等(2015)以狮子洋跨江盾构隧道工程为背景,考虑流固耦合作用,研究了作用在管片上的水压及其变化规律,并将计算结果与隧道结构现场实测结果进行了对比分析;刘丹娜等(2022)采用 PFC<sup>2D</sup> 离散元和 ABAQUS 有限元软件,模拟分析了盾构掘进引起砂卵石地层扰动规律、以及盾构穿越建筑物时的地表沉降分布规律;Carigi et al. (2020)研究了卵石含量对盾构机掘进效率的影响,给出了盾构掘进参数的建议值;李承辉(2022)研究了土压平衡盾构和泥水平衡盾构掘进对粗粒径砂卵石地层的扰动状态以及掘进参数的合理控制措施;高洪吉等(2020)以北京新机场线 9 m 直径土压平衡盾构隧道穿越砂卵石地层为背景,对

比分析了不同覆土厚度下地表最大沉降、沉降槽宽度和地层损失率的变化规律;杨小强等(2020)选取兰州地铁盾构穿越砂卵石地层的 30 个典型断面地表沉降监测数据,利用线性回归方法,得到了地表最大沉降量的修正系数和沉降槽宽度修正系数,并修正优化了 Peck 公式;Perazzelli et al. (2014)通过“切片法”分析了渗流作用下盾构的掘进情况,并提出了评估掌子面稳定性的新计算理论;王振飞等(2013)以北京地下直径线为工程依托,通过实测地表沉降和深部土体水平位移,研究了盾构在富水砂卵石地层掘进施工引起的地层变形规律;韦生达等(2022)以成都地铁 17 号线来凤路站-凤溪站盾构区间隧道为工程实例,采用灰色理论分析了盾构富水砂卵石地层的掘进施工参数与地面沉降之间的关系。

上述研究主要集中于富水砂卵石地层盾构掘进施工引起的地表沉降变形,但未见富水砂卵石地层盾构掘进施工引起地表沉降和管片变形的影响因素及敏感性分析的研究报告。本文以洛阳某盾构隧道下穿洛河富水砂卵石地层为工程背景,基于流固耦合理论,运用 ABAQUS 软件构建三维有限元模型,研究了盾构在富水砂卵石地层掘进过程的掘进压力、同步注浆压力和等代层厚度等因素对地表与管片变形的影响规律,通过正交试验对盾构施工参数敏感性进行了分析,为国内外盾构穿越河流富水砂卵石地层的类似工程提供参考依据。

## 1 工程概况

洛阳某地铁隧道下穿洛河的区间长度约 598.0 m,采用泥水平衡盾构机施工,隧道平均覆土厚度 13.0 m,隧道轴线平均埋深 16.1 m,最大纵坡

为 27.7%,隧道采用 C50 钢筋混凝土拼装式管片(厚 0.35 m、内径 5.5 m、外径 6.2 m、宽 1.5 m),左右双线隧道的水平间距 12.0~14.8 m。

根据相关的地铁设计资料和地质勘察报告,该区间地貌单元属于河床及漫滩地貌区,盾构隧道全断面穿越卵石①( $Q_4^{al+pl}$ ),覆土由上至下依次为:杂填土( $Q_4^{ml}$ )和淤泥( $Q_4^{al+pl}$ ),典型的地层断面如图 1 所示。

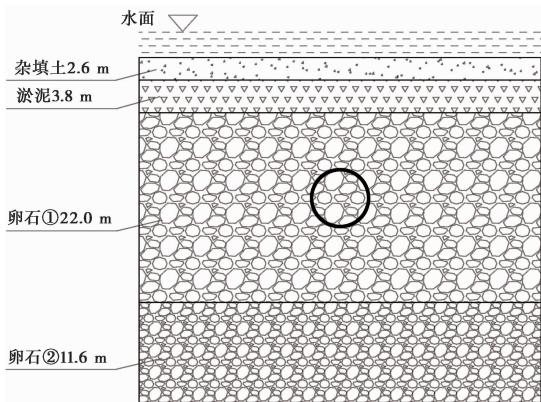


图 1 地层断面图

Fig. 1 Cross-section of stratum

卵石①的地层特性描述如下:杂色,稍密状,成分以石英岩、石英砂岩和安山岩为主,磨圆度中等,多呈亚圆形,粒径以 2~12 cm 为主,最大粒径可达 20 cm,充填物主要为细砂、中砂及砂砾石,夹少量黏性土及淤泥质土等,卵石含量 54.5%~66.5%;卵石②的地层特性描述如下:杂色,中密状,成分以石英岩、石英砂岩和安山岩为主,磨圆度中等,多呈亚圆形,粒径一般为 2~15 cm,最大粒径可达 40 cm,局部见漂石,充填物为以细砂、中砂、砂砾石及黏性土为主,卵石含量 58.5%~69.4%。河床 6.4 m 以下的勘察深度范围内均为不同粒径的卵石。现场勘探取出的卵石如图 2 所示。



图 2 现场勘探取出的卵石

Fig. 2 Pebbles extracted from on-site exploration

盾构隧道区间场地地下水为孔隙潜水,主要赋存于上更新统及全新统卵石地层中,含水层的厚度大于 50.0 m,上部河流常年蓄水,水深 1.2~3.5 m。

## 2 数值模型的构建

### 2.1 几何模型

为了避免双线隧道掘进施工的相互影响,该区间盾构隧道在实际施工时间间隔 100 环始发,因此在进行数值模拟时,仅考虑单线盾构掘进引起的地表沉降和管片变形,根据盾构隧道尺寸和埋深、以及图 1 揭示的地层特性,运用 ABAQUS 软件构建三维有限元模型,尺寸如下: $z$  轴方向(土层厚度方向) 40.0 m,其中:盾构隧道覆土厚 13.0 m,基底土层厚 20.4 m;由于盾构掘进施工对横向(垂直于隧道轴线)的地表沉降影响范围一般为 3~5 倍隧道直径(魏纲, 2009; 王士民等, 2023),同时考虑模型边界对计算精度的影响, $x$  轴方向(隧道横向)取 80.0 m;盾构在纵向(隧道掘进方向)的地表沉降影响范围约 25.0 m(王振飞等, 2013), $y$  轴方向取 36.0 m。三维有限元模型如图 3 所示。

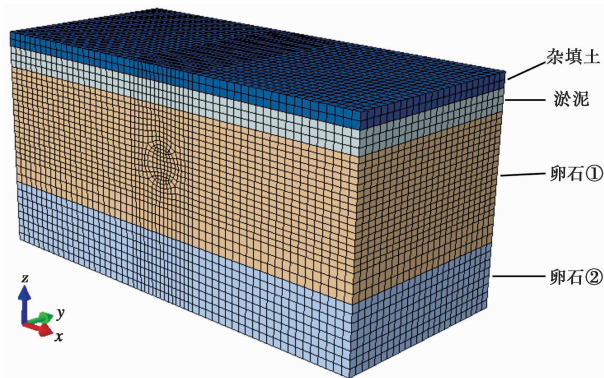


图 3 三维有限元模型

Fig. 3 3D finite element model

在盾构掘进时,脱出盾尾的管片与土体存在较大空隙,为了减小周边土体的变形,应及时对空隙进行同步注浆,由于浆液存在流动性,浆液在同步注浆压力作用下会渗透到隧道周围土层中并与其混合,但混合体的力学参数性质难以确定,在数值模拟时通常将混合体等代简化成均质等厚的弹性体,即等代层(刘纪峰等, 2009),等代层厚度  $d$  的计算公式如下:

$$d = \eta \Delta \quad (1)$$

式中:  $\Delta$  为盾尾间隙的理论计算值,即盾构开挖直

径与管片外径差值的一半;  $\eta$  为折减系数,取值范围为 0.7~2.0。

## 2.2 边界条件

盾构下穿河流,无其他建(构)筑物,施工场地开阔,设置力学边界条件如下:模型的底面和4个侧面施加法向位移约束,上表面设为自由面、并施加 3.0 m 水头产生的均布荷载来模拟河流对河底(即本文研究的地表,以下同)的压力作用。

充分考虑富水砂卵石地层盾构掘进施工引起的流固耦合作用,设置渗流边界条件如下:模型上表面设为 3.0 m 的常水头边界,底面和4个侧面设为不透水边界,隧道开挖掌子面设置为透水边界,管片内侧为不透水边界、压力水头为 0。

## 2.3 材料参数

根据相关的地铁设计资料和地质勘察报告,土层及盾构部件的物理力学参数设置,见表 1。为了更加真实地模拟盾构开挖土体的过程,准确反映开挖土体的应力释放,对掌子面土体的弹性模量按 40% 进行折减,由于管片是拼装之后再脱出盾尾,而本文采用的是整环管片模型,没有考虑螺栓连接,因此对管片模型的弹性模量按 15% 进行折减;土体假定为各向同性的弹塑性材料,服从 Mohr-Coulomb 本构准则,而盾构部件的强度远高于土体,假定为弹性体。

表 1 模型中材料的物理参数

Table 1 Physical parameters of the materials in the model

名称	密度 /kg·m <sup>-3</sup>	弹性模量 /MPa	黏聚力 /kPa	内摩擦角 /(°)	泊松比	渗透系数 /m·d <sup>-1</sup>
杂填土	1800	6.3	5.1	13.2	0.31	1.2
淤泥	1920	12.1	9.8	9.2	0.35	0.48
卵石①	2090	85.7	0	38.3	0.21	140
卵石②	2150	95.3	0	37.1	0.20	120
盾壳	7800	2.1×10 <sup>5</sup>	/	/	0.25	/
管片	2500	3.0×10 <sup>4</sup>	/	/	0.20	/
等代层	2400	10.8	/	/	0.28	/

将盾构开挖土体、拼装管片、施加同步注浆压力和施加等代层等工序统一为一个完整的开挖步骤(苏秀婷等, 2021),即盾构的单个开挖深度为单环管片宽度 1.5 m,借助 ABAQUS 软件的 Model Chang 功能(生死单元法),依此循环完成多个开挖步骤,可实现盾构在土体中的掘进过程,盾构掘进模拟如图 4 所示。

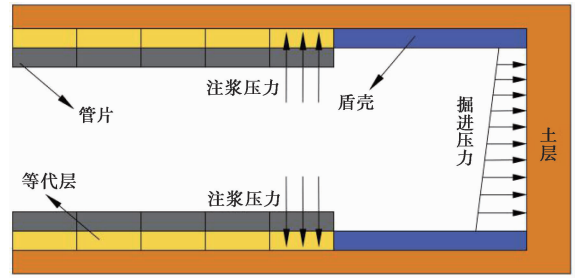


图 4 盾构掘进模拟示意图

Fig. 4 Schematic diagram of shield tunneling simulation

## 3 地表沉降的变化规律

该区间盾构外径 6.43 m,管片外径 6.2 m,取等代层厚度为 20 cm,盾构掘进压力和同步注浆压力分别取 250 kPa 和 300 kPa。

### 3.1 数值模拟与现场监测结果对比分析

选取隧道贯通后的盾构区间和数值模型的中间位置,绘制了数值模拟和现场监测的地表横向沉降曲线,如图 5 所示。

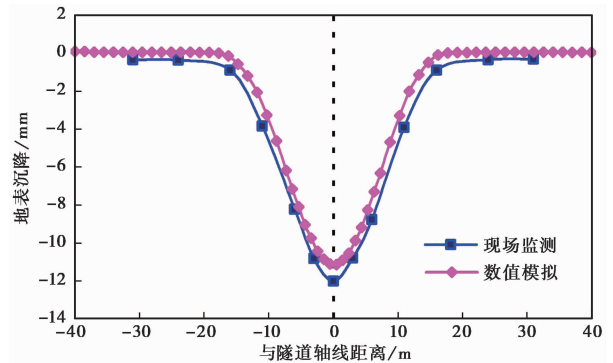


图 5 数值模拟与现场监测的地表沉降曲线

Fig. 5 Curves of simulated and measured ground settlement

从图 5 可以看出,数值模拟与现场监测的地表横向沉降曲线基本吻合,均符合 Peck 拟合曲线的变化规律(张云等, 2000),数值模拟和现场监测的地表最大沉降分别为 -11.47 mm 和 -12.1 mm,两者相差 0.63 mm,误差 5.21%,由此可知,本文几何模型的构建、边界条件的施加、材料参数的选取以及盾构开挖步骤的设置是合理的,通过数值模拟能够比较准确地研究富水砂卵石地层盾构掘进施工引起的地表沉降和管片变形规律。

### 3.2 横向地表沉降变化规律

沿盾构掘进轴线设置竖向剖面(图 3 中的  $x=0$

剖面),选取盾构掘进的4个工况:掘进9.0 m(刀盘到达前9.0 m)、18.0 m(刀盘到达)、27.0 m(刀盘超过9.0 m)和隧道贯通(刀盘超过18.0 m),给出了有限元模型的位移云图,如图6所示。

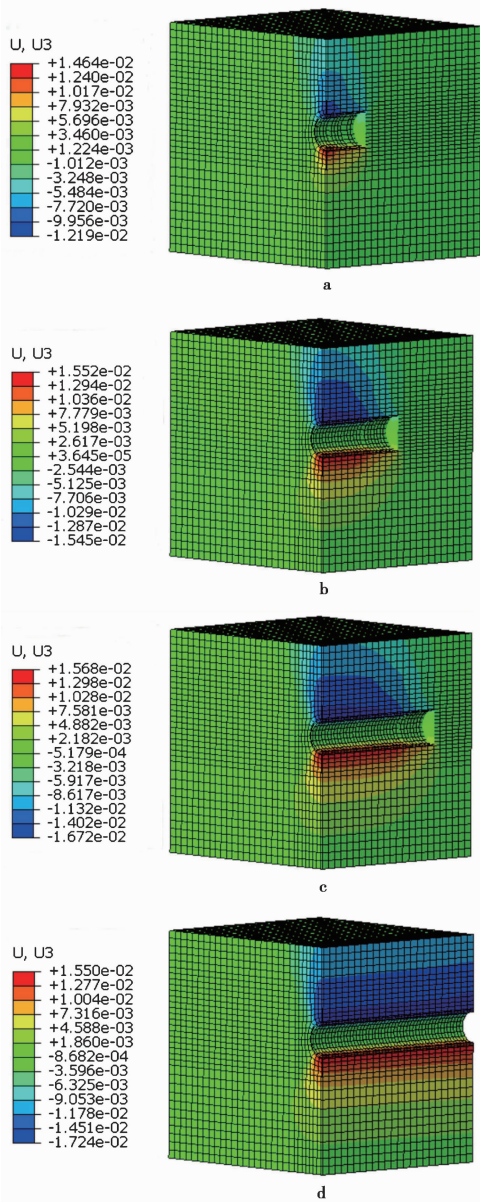


图6 不同盾构掘进工况的地层竖向位移云图:(a)盾构掘进9.0 m;(b)盾构掘进18.0 m;(c)盾构掘进27.0 m;(d)隧道贯通

Fig. 6 Vertical displacement cloud map of strata under different shield tunneling conditions: (a)Shield excavation 9.0 m; (b)Shield excavation 18.0 m; (c)Shield excavation of 27.0 m; (d)Tunneling excavation is finished

同时绘制了4个工况的地表横向沉降曲线,如图7所示。

从图6和图7可以看出,隧道轴线位置处地表

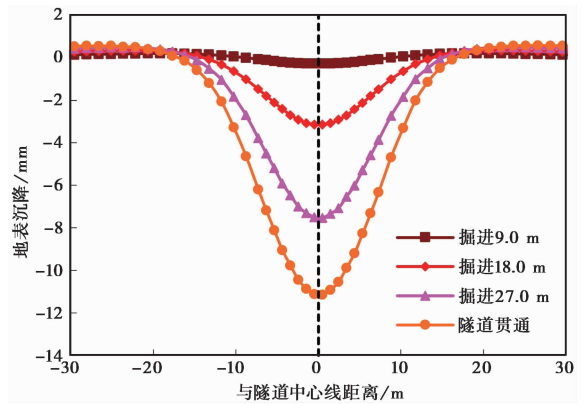


图7 不同盾构掘进深度下的地表横向沉降曲线

Fig. 7 Horizontal ground settlement curves under different shield excavation depths

沉降最大,从隧道中心线向两侧逐渐减小。盾构掘进对地表沉降的影响主要分布在沿隧道中心线两侧各18.5 m的范围内;盾构掘进9.0 m时,地表两侧出现轻微隆起现象,最大隆起为0.18 mm,主要是盾构掘进压力对刀盘前方的土体挤压产生,随着开挖进行,监测点处地表的隆起值不断减小,并最终呈现为沉降,即表现为“先隆起后沉降”的变化规律;盾构掘进9.0 m、18.0 m、27.0 m和隧道贯通时的地表最大沉降分别为0.27 mm、3.20 mm、7.85 mm和11.47 mm,盾构刀盘掘进通过后,地表仍有沉降发生,因此,在实际工程中应加强盾构通过后的地表变形监测。

### 3.3 纵向地表沉降变化规律

选取有限元模型的地表中心点( $x=0\text{ m}$ 、 $y=18.0\text{ m}$ ),绘制了该点的地表沉降随盾构掘进深度的变化曲线,如图8所示。

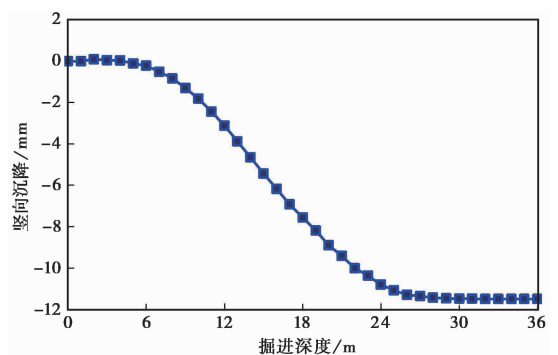


图8 地表沉降随盾构掘进深度的变化曲线

Fig. 8 Curves of ground settlement changing with shield excavation depth

从图 7 和图 8 可以看出,地表沉降随盾构掘进深度的变化曲线大致可以分为 3 段: 0~6.0 m,刀盘距离较远,盾构掘进施工引起的地表沉降较小,可以忽略不计,是盾构刀盘到达前的未扰动段; 6.0~27.0 m,刀盘逐渐接近并通过后,盾构掘进施工引起的扰动逐渐增大并最终消散,是盾构掘进近距离的沉降主要影响段; 27.0~36.0 m,刀盘远离后,地表沉降速度逐渐趋于平稳并最终达到 11.47 mm,是盾构刀盘通过后的沉降稳定段; 上述变化规律与相关文献(王振飞等, 2013)基本一致,验证了本文数值模型的准确性和合理性。

## 4 施工影响因素分析

盾构在掘进施工过程中,尤其是水下盾构隧道,掘进参数应根据周围环境的变化进行及时的调整,对于降低施工扰动、提高掘进速度、降低盾构刀盘的损耗、保证施工及人员的安全性都具有十分重要的作用(张云等, 2000; 周中等, 2022)。

盾构机在脱出盾尾时,由同步注浆生成的等代层厚度主要取决于注浆量,此外也受注浆压力、周围土体性质和孔隙比等因素的影响,本文主要考虑注浆量这一主要因素,将等代层厚度和同步注浆压力简化为两个独立因素,便于对盾构施工引起地表沉降和管片变形的影响因素分析。引入单一因素分析方法,分别研究盾构掘进压力、同步注浆压力和等代层厚度等施工因素对富水砂卵石地层盾构掘进引起地表沉降和管片变形的影响规律。有限元模型尺寸、盾构隧道尺寸和埋深、边界条件和材料参数均保持不变,各施工因素取值范围如下: 盾构掘进压力 50~450 kPa,同步注浆压力 100~500 kPa,等代层厚度 10~30 cm。

为方便对比分析,在数值模型中设置一系列位移和变形拾取点: 在  $y=18.0$  m 处的地表设置垂直于盾构隧道轴线的横向排布的位移拾取点,从管片右拱腰起沿逆时针方向间隔  $18^\circ$  布设一个变形拾取点。

### 4.1 掘进压力的影响分析

同步注浆压力取 300 kPa,等代层厚度取 20 cm,盾构掘进压力分别取 50 kPa、150 kPa、250 kPa、350 kPa 和 450 kPa。

#### 4.1.1 地表沉降分析

盾构以不同掘进压力贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的地表横向沉降曲线,如图 9 所示。

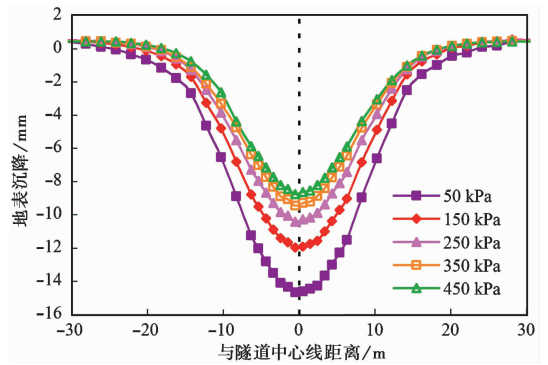


图 9 不同掘进压力下的地表横向沉降曲线

Fig. 9 Horizontal ground settlement curves under different tunnelling pressures

从图 9 可以看出,当掘进压力从 50 kPa 逐渐增大至 450 kPa 时,地表最大沉降分别为 16.04 mm、13.08 mm、11.53 mm、10.23 mm 和 9.15 mm,随着掘进压力的增大,地表沉降逐渐变小,由于在砂卵石地层中增大盾构掘进压力会增加盾构机的负荷和刀盘刀具的磨损,盾构中心位置埋深 16.1 m,该处掌子的土水压力为 335.34 kPa,因此,综合掌子面土水压力、地表沉降控制和盾构掘进负荷等因素,建议盾构掘进压力取 200~350 kPa。

#### 4.1.2 管片变形分析

盾构以不同掘进压力贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的管片竖向变形和水平变形曲线,分别如图 10 和图 11 所示。

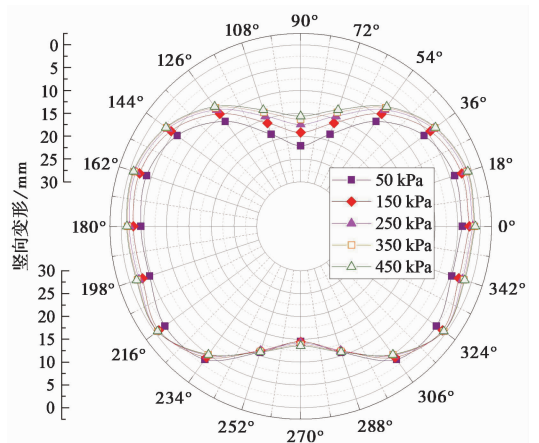


图 10 不同盾构掘进压力下管片的竖向变形曲线

Fig. 10 Vertical deformation curves of segment with different tunnelling pressures

从图 10 可以看出,在不同盾构掘进压力下管片的竖向变形曲线为左右对称图形,曲线的变化趋势基本相同,都表现为拱顶沉降和拱底隆起,且拱顶

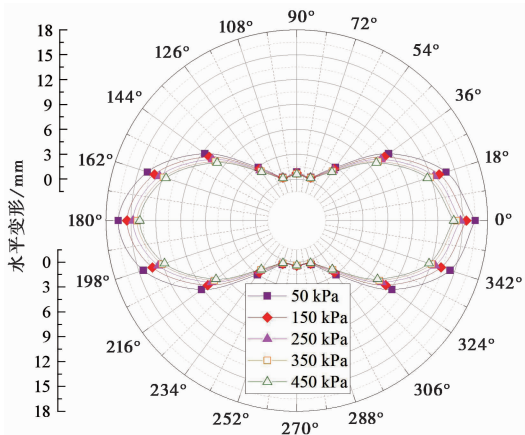


图 11 不同盾构掘进压力下管片的水平变形曲线  
Fig. 11 Horizontal deformation curves of segment with different tunneling pressures

沉降普遍要大于拱底隆起;当掘进压力从 50 kPa 逐渐增大至 450 kPa 时,拱顶沉降分别为 22.11 mm、19.21 mm、17.45 mm、16.33 mm 和 15.62 mm,相邻两工况分别减小 2.90 mm、1.76 mm、0.93 mm 与 0.71 mm,减小幅度呈降低的变化趋势;当掘进压力从 50 kPa 逐渐增大至 450 kPa 时,拱底隆起从 14.49 mm 减小到 13.55 mm,变化幅度较小。从上述分析结果可知,增大砂卵石地层盾构掘进压力可以减小管片隧道的拱顶沉降,但盾构掘进压力超过 350 kPa 后,提高盾构掘进压力对于减小拱顶沉降效果有限,而盾构掘进压力对拱底隆起的影响较小。

从图 11 可以看出,不同盾构掘进压力下管片的水平变形曲线为左右对称图形,左右拱腰处的水平变形值最大,而拱顶和拱底处的水平变形值最小,趋近于 0,随着盾构掘进压力的增大,管片拱腰处的水平变形不断减小,当掘进压力从 50 kPa 逐渐增大至 450 kPa 时,拱腰水平变形(外向收敛)分别为 16.51 mm、15.44 mm、14.73 mm、14.24 mm、13.91 mm,相邻两工况分别减小 1.07 mm、0.71 mm、0.49 mm、0.33 mm,减小幅度呈降低的变化趋势。

## 4.2 同步注浆压力的影响分析

盾构掘进压力取 250 kPa,等代层厚度取 20 cm,同步注浆压力分别取 100 kPa、200 kPa、300 kPa、400 kPa 和 500 kPa。

### 4.2.1 地表变形分析

盾构以不同同步注浆压力贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的地表横向沉降曲线如图 12 所示。

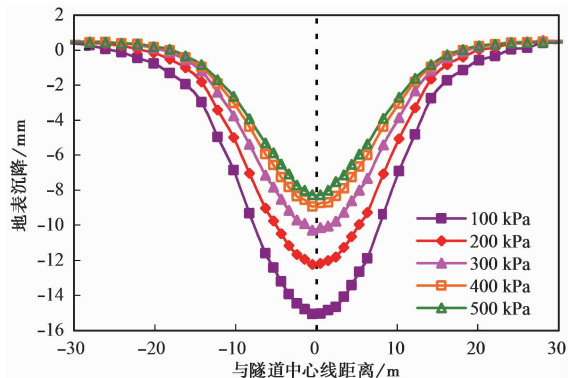


图 12 不同同步注浆压力下的地表横向沉降曲线  
Fig. 12 Horizontal ground settlement curves under different synchronous grouting pressures

从图 12 可以看出,当同步注浆压力从 100 kPa 逐渐增大至 500 kPa 时,地表最大沉降分别为 15.93 mm、12.98 mm、10.62 mm、9.30 mm 和 8.45 mm,相邻两工况分别减小 2.95 mm、2.36 mm、1.32 mm 和 0.85 mm,减小幅度呈降低的变化趋势,由于砂卵石地层孔隙大、渗透性能好、黏聚力差,过大的同步注浆压力会使浆液流失并加剧土体的扰动范围,因此,综合地表沉降控制、砂卵石的渗透性高和稳定性差等因素,建议同步注浆压力取 200 ~ 400 kPa。

### 4.2.2 管片变形分析

盾构以不同同步注浆压力贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的管片竖向变形和水平变形曲线,分别如图 13 和图 14 所示。

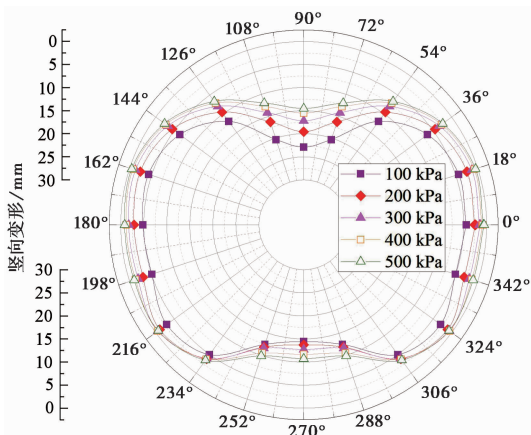


图 13 不同同步注浆压力下管片的竖向变形曲线  
Fig. 13 Vertical deformation curves of segment under different synchronous grouting pressures

从图 13 可以看出,在不同同步注浆压力下管片的竖向变形趋势是相似的,都表现为拱顶沉降和

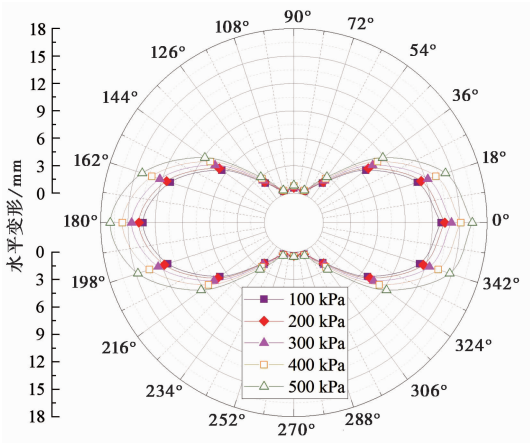


图 14 不同同步注浆压力下管片的水平变形曲线

Fig. 14 Horizontal deformation curve of the segment under different synchronous grouting pressures

拱底隆起,且拱顶沉降普遍要大于拱底隆起;当同步注浆压力由 100 kPa 增大至 500 kPa 时,管片的拱顶沉降分别为 22.92 mm、19.58 mm、17.21 mm、15.54 mm 与 14.55 mm,相邻两工况分别减小 3.34 mm、2.37 mm、1.67 mm 和 0.99 mm,减小幅度呈降低的变化趋势,而拱底隆起分别为 14.43 mm、13.73 mm、12.72 mm、11.64 mm 和 10.72 mm,相邻两工况分别减小 0.70 mm、1.01 mm、1.08 mm、0.93 mm,减小幅度比较平稳。从上述分析结果可知,增大砂卵石地层的同步注浆压力可以减小衬砌管片的拱顶沉降,但同步注浆压力超过 400 kPa 后,增大同步注浆压力对于减小拱顶沉降效果有限。

从图 14 可以看出,随着同步注浆压力的增大,管片拱腰处的水平位移呈增大变化趋势,当同步注浆压力由 100 kPa 增大至 500 kPa 时,最大水平变形值从 12.94 mm 增大到 16.38 mm,相邻两工况分别增大 0.42 mm、0.72 mm、1.02 mm 和 1.28 mm,增大幅度呈增加的变化趋势。

### 4.3 等代层厚度的影响分析

考虑到泥水盾构机盾构刀盘直径 6.45 m,而管片拼装隧道外径 6.2 m,盾构机脱出盾尾后,隧道外周的孔隙为 17.5 cm,因此,盾构等代层厚度以 20 cm 为中间值,分别取 10 cm、15 cm、20 cm、25 cm、30 cm,盾构掘进压力取 250 kPa,同步注浆压力取 300 kPa。

#### 4.3.1 地表变形分析

盾构以不同等代层厚度贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的地表横向沉降曲线,如图 15

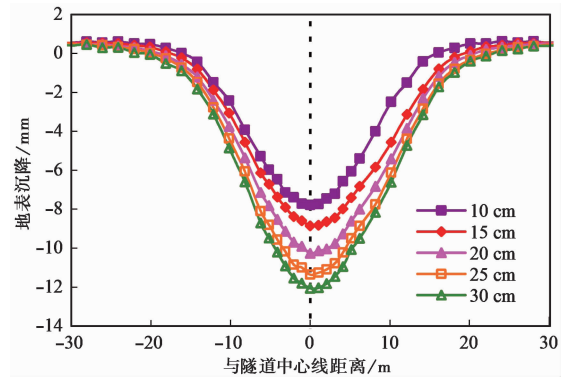


图 15 不同等代层厚度下的地表横向沉降曲线

Fig. 15 Horizontal ground settlement curves under different equivalent pressures

所示。

从图 15 可以看出,随着管片壁后等代层厚度的增大,地表最大沉降呈现增大的趋势,当等代层厚度由 10 cm 增大至 30 cm 时,地表的沉降分别为 8.24 mm、9.51 mm、10.88 mm、11.89 mm 和 12.63 mm,相邻两工况分别增大 1.27 mm、1.37 mm、1.01 mm 和 0.74 mm,增大幅度呈降低的变化趋势。等代层厚度与盾构施工过程中同步注浆的注浆量、周围土体扰动程度和范围有关,因此,在盾构隧道施工中应精确控制盾构的掘进姿态以减少刀盘的超挖,进而减小等代层厚度并减少对周围土体的扰动,有利于控制地表沉降。

#### 4.3.2 管片变形分析

盾构以不同等代层厚度贯通后,绘制了模型中间位置  $y=18.0$  m 处的管片竖向变形和水平变形曲线,分别如图 16 和图 17 所示。

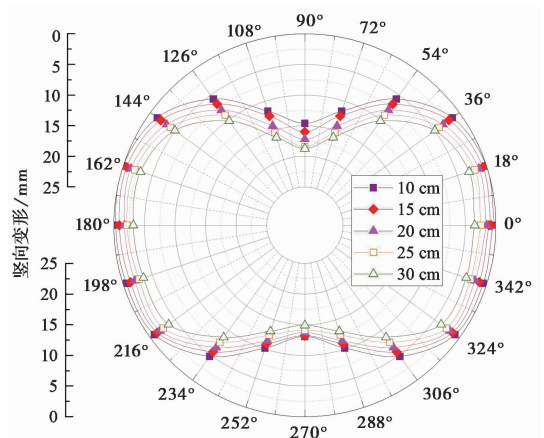


图 16 不同等代层厚度下的管片竖向变形曲线

Fig. 16 Vertical deformation curves of segment under different equivalent pressures



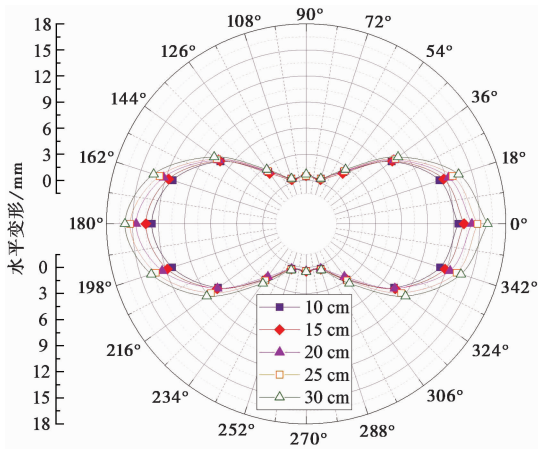


图 17 不同等代层厚度下的管片水平变形曲线

Fig. 17 Horizontal deformation curves of segment under different equivalent pressures

从图 16 可以看出,当等代层厚度由 10 cm 增大到 30 cm 时,管片的拱顶沉降逐渐变大,分别为 14.63 mm、15.99 mm、17.21 mm、18.43 mm 和 18.75 mm,相邻两工况分别增大 1.36 mm、1.22 mm、1.22 mm 和 0.29 mm,增大幅度呈减小的变化趋势,而拱底隆起由 13.09 mm 增大到 14.92 mm,增加幅度较小。由上述分析可知,增大等代层厚度会增加拱顶沉降。

从图 17 可以看出,当等代层厚度由 10 cm 增大到 30 cm 时,拱腰水平变形分别为 12.77 mm、13.46 mm、14.58 mm、15.27 mm 和 15.86 mm,相邻两工况分别增大 0.69 mm、1.12 mm、0.69 mm、0.59 mm,增大幅度比较平稳。

## 5 施工参数敏感性分析

为研究盾构隧道下穿河流砂卵石地层的稳定性,找出最显著的影响因素,采用正交试验方法,结合三维有限元数值模拟进行分析,选取同步注浆压力、盾构掘进压力和等代层厚度等 3 个影响因素,每种因素考虑 4 个水平,见表 2。

通过对各正交试验方案对应的工况进行数值模拟分析,分别以地表最大沉降、管片拱顶位移为敏感性分析指标,根据表 2 所定的因素及水平选择  $L_{16}(4^3)$  正交试验表,正交试验结果见表 3。

极差分析法是用极差值  $R_j$  来分析各因素对结果的影响程度(刘旭等, 2019),根据极差分析法原理可知,极差值越大,敏感性越大,对试验指标影响也越大(张文兵等, 2009),极差  $R_j$  的计算式如下:

表 2 正交试验因素与水平

Table 2 Orthogonal experimental factors and levels

水平	因素		
	同步注浆压力 A /kPa	盾构掘进压力 B /kPa	等代层厚度 C /cm
1	100	50	10
2	200	150	15
3	300	250	20
4	400	350	25

表 3 正交试验方案结果

Table 3 Orthogonal experimental results

试验号	试验条件			地表最大沉降 /mm	拱顶位移 /mm
	同步注浆压力 A /kPa	盾构掘进压力 B /kPa	等代层厚度 C /cm		
1	100	50	10	15.22	30.10
2	100	150	15	14.26	26.89
3	100	250	20	13.01	24.38
4	100	350	25	13.59	22.68
5	200	50	15	14.49	25.79
6	200	150	10	11.09	22.68
7	200	250	25	11.43	20.47
8	200	350	20	9.94	18.66
9	300	50	20	11.85	21.47
10	300	150	25	11.90	18.76
11	300	250	10	8.01	16.15
12	300	350	15	10.44	14.25
13	400	50	25	10.90	18.16
14	400	150	20	9.26	13.45
15	400	250	15	7.92	10.63
16	400	350	10	5.53	8.53

$$R_j = \max k_i - \min k_i \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为第  $i$  水平对应指标之和  $K_i$  的平均值,即  $k_i = K_i/r$ ,其中:  $r$  为任一列同一水平出现的次数。

将同步注浆压力、盾构掘进压力和等代层厚度作为影响因素,通过极差分析和方差分析来探究 3 个因素对模拟结果影响的显著性水平,将计算结果整理,见表 4。

当指标为地表最大沉降时,因素 A、因素 B 和因素 C 的地表沉降值极差分别为 5.61、3.24 和 1.99,各因素对于地表最大沉降值的影响性由大到小排序为:因素 A、因素 B 和因素 C;当指标为管片拱顶沉降值时,因素 A、因素 B 和因素 C 的地表沉降值极差分别为 13.32、7.85 和 0.65,各因素对于管片拱顶沉降的影响由大到小排序为:因素 A、因素 B 和因

表4 正交实验方案的极差分析

Table 4 Range analysis for orthogonal experimental scheme

指标	同步注浆压力 A	盾构掘进压力 B	等代层厚度 C		
地表最大沉降	$K_1$	56.07	52.46	39.85	
	$K_2$	46.96	46.51	47.11	
	$K_3$	42.19	40.35	44.05	
	$K_4$	33.61	39.51	47.82	
	$k_1$	14.02	13.12	9.96	
	$k_2$	11.74	11.63	11.78	
	$k_3$	10.55	10.09	11.01	
	$k_4$	8.40	9.88	11.95	
	$R_1$	5.61	3.24	1.99	
	拱顶位移	$K_1$	104.08	95.55	77.48
		$K_2$	87.62	81.80	77.58
		$K_3$	70.66	71.66	77.98
$K_4$		50.79	64.13	80.09	
$k_1$		26.02	23.89	19.37	
$k_2$		21.90	20.45	19.40	
$k_3$		17.66	17.92	19.50	
$k_4$		12.70	16.03	20.02	
$R_2$		13.32	7.85	0.65	

素 C。

通过对地表最大沉降值和管片拱顶沉降值两个指标的综合分析可知,影响盾构下穿河流砂卵石地层稳定性的 3 个施工因素的综合排序为:同步注浆压力>盾构掘进压力>等代层厚度,同步注浆压力最为显著,因此在实际的设计与施工中,应将同步注浆压力作为首先考虑的重点因素。

## 6 结论

以洛阳某地铁盾构下穿洛河为工程背景,河床 6.4 m 以下的勘察深度范围内均为不同粒径的卵石,盾构隧道中心埋深 16.1 m,运用 ABAQUS 软件构建了盾构在深层卵石层中掘进的三维有限元模型,根据单因素分析法分别研究了盾构掘进压力、同步注浆压力和等代层厚度 3 个施工参数对盾构引起地表沉降和管片变形的影响规律,然后通过正交试验的方法对 3 种施工参数进行敏感性分析,分别以地表最大沉降和管片拱顶沉降为敏感性分析指标,根据极差分析得到了各因素敏感性排序,并明确了各影响因素的显著性水平,相关成果可为盾构全部位于卵石层的施工提供技术支撑和参考依据。主要结论如下:

(1)数值模拟与现场监测的地表横向沉降曲线基本吻合,符合 Peck 拟合曲线的变化规律,隧道轴线位置处的地表沉降最大,从隧道中心线向两侧逐渐减小,盾构掘进对地表沉降的影响主要分布在沿隧道中心线两侧各 18.5 m 的范围内;地表沉降随盾构掘进深度的变化曲线大致可以分为 3 段:未扰动段、主要影响段、沉降稳定段,其中盾构沿轴线的主要影响段长度约 21.0 m。

(2)增大盾构掘进压力和同步注浆压力、减小等代层厚度,均能有效地降低地表沉降和管片隧道拱顶沉降;综合掌子面土水压力、地表沉降控制和盾构掘进负荷等因素,建议盾构掘进压力取 200~350 kPa;综合地表沉降控制、砂卵石的渗透性高和稳定性差等因素,建议同步注浆压力取 200~400 kPa;在盾构隧道施工中应精确控制盾构的掘进姿态以减少刀盘的超挖,进而减小等代层厚度并减少对周围土体的扰动。

(3)增大盾构掘进压力、减小同步注浆压力和等代层厚度,均能有效地降低管片隧道拱腰的水平变形(外向收敛)。

(4)同步注浆压力、盾构掘进压力和等代层厚度 3 个影响因素对地表最大沉降值和管片拱顶沉降值两个指标的敏感性排序相同,依次为:同步注浆压力、盾构掘进压力、等代层厚度,同步注浆压力最为显著,因此在实际的设计与施工中,应将同步注浆压力作为首先考虑的重点因素。

## 参 考 文 献

- Carigi A, Luciani A, Todaro C, et al. 2020. Influence of conditioning on the behaviour of alluvial soils with cobbles[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 96:103225.
- Gao H J, Xie W D, Sun Z Y, et al. 2020. Analysis on surface subsidence by shallow buried shield tunneling[J]. Science Technology and Engineering, 20(29): 12143-12149.
- Li C H. 2022. Study on disturbance control of sandy cobble strata induced by shield tunneling in Lanzhou subway[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University.
- Liu D N, Zhou X, Wang W, et al. 2022. Research on surface settlement variation law and parameter control between shield intervals in sandy cobble strata[J]. Highway, 67(8): 410-416.
- Liu J F, Liu B, Tao L G. 2009. Prediction and control of shallow shield tunneling-induced ground settlement with elasto-plasticity analysis[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 25(1): 28-33.
- Liu X, Xu J M, Liu S F. 2019. Exploring factors influencing deformation of retaining structure in orthogonal tests[J]. Journal of Shanghai U-

- niversity(Natural Science Edition),25(6):1003-1012.
- Perazzelli P, Leone T, Anagnostou G. 2014. Tunnel face stability under seepage flow conditions[J]. *Tunnelling & Underground Space Technology Incorporating Trenchless Technology Research*,43(7):459-469.
- Qi C, He C, Feng K. 2015. Fluid-solid interaction-based mechanical characteristics of underwater shield tunnel[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*,28(2):306-311.
- Su X T, Chen J, Li M Y, et al. 2021. Sensitivity analysis of deformation of large diameter mud-water shield through complex environment[J]. *Journal of Engineering Geology*,29(5):1587-1598.
- Tang S H, Zhang X P, Liu H, et al. 2021. Engineering difficulties and key technologies for undervater shield tunnel in complex ground[J]. *Journal of Engineering Geology*,29(5):1477-1487.
- Teng L, Zhang H. 2012. Meso-macro analysis of surface settlement characteristics during shield tunneling in sandy cobble ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*,33(4):1141-1160.
- Wang L X, Hu R Q, Ren C, et al. 2023. Study on face stability of shield tunnel in sandy cobble stratum[J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*,51(9):1362-1371.
- Wang S M, Wang Y, Peng X Y. 2023. Study on thaw-settlement effect of sandy cobble ground under freezing construction[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*,19(1):247-256.
- Wang Z F, Zhang C P, Wang J C. 2013. Deformation law of water-rich sandy gravel stratum induced by slurry shield driving[J]. *Journal of Railway Engineering Society*,30(9):78-83.
- Wei G. 2009. Study on calculation for width parameter of surface settlement trough induced by shield tunnel[J]. *Industrial Construction*,39(12):74-79.
- Wei S D, Liu D N, Peng X, et al. 2022. Influence analysis of shield construction parameters controlling on ground settlement in sandy pebble stratum based on grey theory[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science)*,41(2):84-94.
- Yang X Q, Ou E F. 2020. Parameter optimization of peck formula for shield construction in Lanzhou sand pebble ground[J]. *Journal of Liaoning Technical University(Natural Science)*,39(3):231-235.
- Zhang W B, Ren J, Yang J, et al. 2019. Sensitivity analysis of thermal-hydro coupling model parameters in earth rock dam based on orthogonal test method[J]. *Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition)*,47(1):147-154.
- Zhang Y, Yin Z Z, Xu Y F. 2002. Analysis on three-dimensional ground surface deformations due to shield tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*,21(3):388-392.
- Zhou Z, Chen Y, Liu Z Z. 2022. Study on slurry pressure control model in slurry chamber of slurry shield[J]. *Rock and Soil Mechanics*,43(S1):286-292.
- 高洪吉, 谢文达, 孙正阳, 等. 2020. 浅覆土盾构隧道施工引起地表沉降规律研究[J]. *科学与技术工程*,20(29):12143-12149.
- 李承辉. 2022. 兰州地铁隧道盾构掘进对砂卵石地层扰动的控制研究[D]. 北京: 北京交通大学.
- 刘丹娜, 周勋, 王伟, 等. 2022. 砂卵石地层盾构区间地表沉降变化规律及参数控制研究[J]. *公路*,67(8):410-416.
- 刘纪峰, 刘波, 陶龙光. 2009. 基于弹塑性分析的浅埋盾构隧道地表沉降控制[J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*,25(1):28-33.
- 刘旭, 徐金明, 刘绍峰. 2019. 基于正交试验的围护结构变形影响因素[J]. *上海大学学报(自然科学版)*,25(6):1003-1012.
- 齐春, 何川, 封坤. 2015. 考虑流固耦合效应的水下盾构隧道受力特性[J]. *西南交通大学学报*,50(2):306-311.
- 苏秀婷, 陈健, 李明宇, 等. 2021. 大直径泥水盾构隧道穿越复杂环境地层变形敏感性研究[J]. *工程地质学报*,29(5):1587-1598.
- 唐少辉, 张晓平, 刘浩, 等. 2021. 复杂地层水下盾构隧道工程难点及关键技术研究展望[J]. *工程地质学报*,29(5):1477-1487.
- 滕丽, 张桓. 2012. 盾构穿越砂卵石地层地表沉降特征细宏观分析[J]. *岩土力学*,33(4):1141-1160.
- 王立新, 胡瑞青, 任超, 等. 2023. 砂卵石地层盾构隧道掌子面稳定性理论分析[J]. *同济大学学报(自然科学版)*,51(9):1362-1371.
- 王士民, 王亚, 彭小雨, 等. 2023. 砂卵石地层冻结法施工融沉效应研究[J]. *地下空间与工程学报*,19(1):247-256.
- 王振飞, 张成平, 王剑晨. 2013. 富水砂卵石地层泥水盾构施工地层变形规律[J]. *铁道工程学报*,30(9):78-83.
- 韦生达, 刘丹娜, 彭鑫, 等. 2022. 基于灰色理论的砂卵石地层盾构施工参数控制对地表沉降影响分析[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*,41(2):84-94.
- 魏纲. 2009. 盾构法隧道地面沉降槽宽度系数取值的研究[J]. *工业建筑*,39(12):74-79.
- 杨小强, 欧尔峰. 2020. 兰州砂卵石地层盾构施工的 peck 公式参数优化[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*,39(3):231-235.
- 张文兵, 任杰, 杨杰, 等. 2019. 基于正交试验土石坝热-流耦合模型参数的敏感性分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*,47(1):147-154.
- 张云, 殷宗泽, 徐永福. 2000. 盾构法隧道引起的地表变形分析[J]. *岩石力学与工程学报*,21(3):388-392.
- 周中, 陈云, 刘撞撞. 2022. 泥水盾构泥水仓泥浆压力控制模型研究[J]. *岩土力学*,43(S1):286-292.