第 39 卷 第 2 期

2025 年 4月

Ϋ́Ξ

砂土地区盾构下穿铁路股道变形影响分析

Analysis of the Effect of Deformation of Shield Tunnel under Railway Strand in Sandy Soil Area

孙国茹1,孟卫杰2,孙津津1,丰土根2,3,王 威4,张 箭2

 (1. 中电建铁路建设投资集团有限公司,北京 100070; 2. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部 重点实验室,南京 210098; 3. 江西理工大学 土木与测绘工程学院,赣州 341000;
 4. 北京城建中南土木工程集团有限公司,北京 100023)

摘 要: 盾构下穿铁路施工时,会对土体产生一定扰动,造成铁路路基沉降,影响列车的安全运行。为探 究砂土地层双线隧道开挖对铁路股道的变形沉降规律,以南京地铁11号线工程为例,基于 Abaqus 有限元软件, 建立了隧道股道群一体化三维模型,分析施工过程中股道路基沉降影响规律,开展掘进参数敏感性分析,并对 加固方案进行对比分析。结果表明:股道群典型股道交 5#路基中心最大沉降位于双线隧道中心,最大沉降值为 6.1 mm,大于控制值;对隧道进行深孔加固,当径向加固范围为 2 m 左右时,路基最大沉降值符合控制标准; 掌子面压力和注浆压力是影响路基沉降的关键因素,适当的掌子面压力和注浆压力能够有效控制路基沉降变形。 关键词: 盾构施工;下穿铁路;路基沉降;数值模拟

中图分类号: U455.43 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2025) 02-0124-07 **DOI**:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.02.021

SUN Guoru¹, MENG Weijie², SUN Jinjin¹, FENG Tugen^{2,3}, WANG Wei⁴, ZHANG Jian²

(1. China Power Construction Railway Construction Investment Group Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. School of Civil Engineering and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 4. Beijing Urban Construction Zhongnan Civil Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100023, China)

Abstract: When the shield tunnel is constructed under the railway, it will cause certain disturbance to the soil, resulting in the settlement of the railway roadbed and affecting the safe operation of trains. In order to investigate the deformation and settlement law of railway strand in sandy soil stratum double line tunnel excavation, this paper takes Nanjing Metro Line 11 project as an example, based on Abaqus finite element software, establishes an integrated three – dimensional model of tunnel strand group, analyses the settlement influence law of the strand roadbed in the process of construction, carries out the sensitivity analysis of the excavation parameters and conducts a comparative analysis of the reinforcement scheme. The research results show that: the maximum settlement of the roadbed of typical strand crossing 5# is located in the centre of the two – lane tunnel, and the

基金项目:国家自然科学基金(52378336)。 作者简介:孙国茹(1983—),男,本科,高级工程师,研究方向:交通工程。 通信作者:张 箭(1989—),男,博士,教授,研究方向:岩土与地下工程稳定及低碳智能开发。 收稿日期:2024-10-12

道桥技术

maximum settlement value is 6.1 mm greater than the control value. The tunnel is reinforced with deep holes, and the maximum settlement value of the roadbed meets the control standard after calculation when the radial reinforcement range is about 2 m. Palm surface pressure and grouting pressure are the key factors affecting the settlement of the roadbed, and the appropriate palm surface pressure and grouting pressure can effectively control the settlement and deformation of the roadbed. **Key words**: shield construction; underpassing railroad; roadbed settlement; numerical simulation

0 引言

随着地铁网络的快速发展,新建地铁穿越既有 构(建)筑物的情况常有发生,盾构施工时下穿既 有铁路路基就是其中一种。因其不间断运营,速度 快,列车荷载大,对轨道路基变形控制要求严格, 稍有不慎可能引起重大安全事故等原因,使得地铁 下穿既有运营铁路施工被列入高风险防控范围。盾 构隧道在下穿铁路施工掘进中,会扰动土体引起地 层损失,从而导致铁路路基产生沉降变形,使轨道 线路的平顺性超过安全限值,影响列车的安全运 行^[1]。例如,2017年德国莱茵河谷地区 Rastatt 盾构 隧道穿越铁路施工时,铁路发生坍塌事故,导致铁 路运营中断,盾构机困于地下。因此,在盾构施工 选择合适的掘进参数保持既有铁路路基沉降变形在 安全范围内,保证铁路的正常运营,已成为一个亟 需解决的问题^[2]。

针对上述问题,不少学者已开展关于盾构穿越 既有铁路相关的研究,研究方法包括:理论解析、 数值模拟、模型试验等。邹浩等^[3]通过分析在盾构 下穿施工过程中列车轨道、路基坡脚及路肩的位移 变化规律,发现沉降规律与盾构到达位置有关;朱 东东^[4]通过修正土体摩尔 - 库仑本构模型来模拟盾 构下穿铁路,并与监测数据进行对比,验证了其在 大粒径卵石地层的实用性;马相峰等^[5]针对砂卵石 地层盾构下穿铁路路基工程,将数值模拟与现场监 测相结合,验证了地层注浆加固在控制路基沉降方 面的有效性;赵文才^[6]对郑州某地铁出入段线大纵 坡小曲径盾构隧道下穿不同路基形式的铁路进行研 究,发现盾构隧道下穿引发土体和轨道位移差异的 主要原因在于土体荷载的不均匀分布,而这种分布 主要受到路基形态的影响;石舒^[7]对杭州地铁一号 线下穿铁路艮山门辅助编组站盾构隧道工程的风险 进行了研究,提出对盾构穿越区分段加固的方法来 控制轨道变形;霍军帅等^[8]以苏州某地铁盾构隧道

下穿沪宁城际铁路工程项目为依托,研究发现采用 板+桩组合结构的形式对地基进行加固能保证安全; 卢礼顺^[9]通过现场试验及数值模拟的手段,对软土 地区盾构施工引起地表变形及盾构下穿有砟轨道铁 路的过程进行研究,通过采用"盾构精细化施工控 制方法",实现了每环施工参数的动态调整与地表沉 降量的有效控制;杨琳杰等^[10]采用数值模拟的方法 对盾构隧道下穿铁路旅客地下通道和客站轨道进行 研究,确定轨道变形的主要分析指标;孙铁成等^[11] 基于数值模拟探究了囊袋式注浆作为高铁路基沉降 主动控制措施的有效性,研究发现注浆囊袋对其周 围土体的影响具有局部性, 地层等效塑性应变随注 浆体埋深的增加而增大,且塑性区厚度通常小于注 浆囊袋膨胀厚度的 3.0 倍; 娄洪峻等^[12]建立了铁路 路基-土体-隧道的三维精细化数值模型, 探讨盾 构掘进过程中地层损失率、开挖面支护压力、盾尾 注浆压力对隧道上方城际铁路路基沉降的影响; 李 斯^[13]针对西安地铁一号线盾构隧道下穿徐兰高速铁 路路基工程,对不同穿越阶段轨道沉降和路基不同 层位土体沉降进行了分析;刘勇等^[14]基于几何相似 比配制了地层和结构模型试验材料设计了试验监测 系统, 探究盾构下穿施工对高铁路基 U 型槽结构和 地层的变形影响规律。

从研究现状来看,在盾构下穿铁路的研究中, 路基加固的研究相对盾构施工参数控制的研究起步 较晚,且目前路基加固大多凭借经验施工设计,无 需加固仍然加固、加固措施过强或欠缺、加固方式 或位置不当是目前的主要问题,且目前研究涉及砂 土地层工况较少。基于此,以南京地铁11号线砂土 地层区间工程为背景,对盾构双线隧道穿越铁路股 道群进行数值模拟计算,研究其不同施工阶段对铁 路路基沉降变形的规律,并对施工过程中掘进参数 和加固方案进行敏感性分析,提出合适的施工范围 和加固方式,为后续类似工程提供一定参考。

道桥技术

工程概况 1

1.1 盾构穿越情况

南京地铁11号线南京铁道学院站~新马路站区 间在里程上DK28+950~上DK29+080范围内下穿 南京北站有砟路基,与铁路中心线交角约80°。采用 加泥式土压平衡盾构施工,区间隧道采用预制单层 衬砌管片,管片外径6.6 m、内径5.8 m、厚400 mm, 环宽1200 mm,采用C50钢筋混凝土,下穿铁路位置 盾构埋深约为17.5 m, 左右线中心距为13 m。盾构 穿越区间隧道与股道群相对平面位置如图1所示。地 铁11号线穿越处共19根股道,由南向北依次为南京 铁道学院实训线,林浦支线上行线、下行线,南京 北站交2#~交7#, 南京北站峰1#~峰11#。



图1 盾构隧道与南京北站铁路股道平面位置关系示意图 Fig. 1 Diagram illustrating shield tunnel alignment with railway tracks at Nanjing North Station

1.2 工程地质条件

盾构主要穿越粉砂与粉细砂土层, 隊顶上覆土 层主要为杂填土、素填土、淤泥质粉质黏土、粉质 黏土与粉土互层以及粉砂,土层性质较差。土层主 要物理力学性质见表1、土层分布与盾构掘进位置关 系如图2所示。

> 表1 主要土层物理力学性质指标 Table 1 Indicators of physical and mechanical properties of the main soil layers

properties of the main son layers				
土层	重度 / (kN/m ³)	弹性模量 /MPa	泊松比	内摩擦角 / (°)
杂填土	17.5	8	0.39	12
素填土	17.5	10	0.30	8
淤泥质粉质黏土	17.7	12	0.42	12
粉质黏土与粉土互层	18.0	15	0.40	12
粉砂	18.7	36	0.29	31
粉细砂	18.6	42	0.28	31
细砂	18.8	45	0.25	32



and shield tunneling position

2 三维数值模拟

2.1 计算模型及模拟过程

采用有限元软件 Abaqus 进行模拟, 建立盾构隧 道、土体和股道群一体化模型。假设地层为连续均 匀体, 土体为理想弹塑性材料, 采用摩尔- 库仑本构 弹塑性模型, 盾壳、衬砌等材料按照弹性模型计算。 为减小边界效应,模型整体尺寸选取为90 m×120 m× 60 m。模型侧面采用法向约束,底部为固定约束。 盾构隧道下穿铁路股道群模型如图3所示。



图 3 隧道 - 股道群整体有限元模型 Fig. 3 Integral finite element modeling of tunnel – stockway cluster

路基上部列车轨道荷载参照 TB 10001-2016 《铁路路基设计规范》^[15],线路荷载换算 66.87 kPa 均布荷载,分布宽度为3.7 m。

盾构隧道模拟研究采用生死单元法进行,通过 逐环杀死土体开挖单元、激活盾壳衬砌单元达到模 拟真实开挖效果,具体模拟步骤为:①杀死开挖土 体,激活盾壳,在掌子面施加压力;②杀死下一环 土体,后一环盾尾激活衬砌及注浆层,添加注浆压 力,后续继续硬化注浆层;③循环开挖过程,先开 挖左线,再开挖右线。

2.2 掌子面压力与注浆压力

盾构模拟中通过施加掌子面压力来维持开挖面 稳定,从而可以平衡一部分盾构推到该位置所引起 的沉降以及后期的沉降。在实际施工过程中,掌子 面压力一般取1.1~1.2倍的静止土压力^[12]。模拟选 取0.25、0.27、0.29、0.31 MPa 四种不同掌子面压 力工况,以此来探究不同掌子面压力对股道路基沉 降的影响。

在模拟中对盾尾的衬砌及四周土体施加环向压力, 以此维持土体稳定减小沉降变形,达到模拟实际施工 中注浆压力的效果。当地铁埋深较大时,一般采取太 沙基土压力计算方法,结合工程实际情况,选取0.15、 0.2、0.3、0.4 MPa 四种不同注浆压力工况。

2.3 加固方案

盾构穿越区间站场股道群密集,较长时间有列 车停靠,地面注浆加固实施较为困难,为保证列车 正常运行,采取洞内深孔注浆加固,穿越段管片增 设注浆孔,对隧道断面1~3 m范围内的地层进行注 浆加固,注浆结束后采用微膨胀水泥封堵注浆孔。 在深孔注浆加固模拟中,选取1、1.5、2、2.5、3 m 五种径向加固范围,研究不同加固范围效果。

3 计算结果分析

3.1 股道路基沉降变形分析

盾构穿越股道涉及19条线路,股道群众多,且 股道路基变形基本一致。为研究不同盾构进度时路 基沉降变化及分布状态,选取交5#股道在盾构穿越 前、穿越路基中心时、穿越后和盾构贯通时四种穿 越状态作为研究对象,左右线开挖共计8种工况,图 4为交5#股道路基中心线在不同工况下的沉降曲线, 路基最大沉降值随开挖步的变化曲线如图5所示。





道桥技术

从图4可以看出,随着先行隧道左线的开挖,路 基的最大沉降出现在左线隧道的正上方,沉降基本 上服从正态分布,最大沉降量随着隧道的开挖不断变 大;当左线完全贯通时,路基最大沉降量为3.5 mm。 当后行隧道右线开始开挖时,两隧道形成贯通的沉 降槽,沉降影响区域形成叠加,路基最大沉降的位 置不断向右线方向开始偏移,沉降量继续不断增大; 当右线隧道开挖完毕后,路基最大沉降位置停留在 两隧道中线处,最大沉降值为6.1 mm。从计算结果 来看,后行开挖的路基沉降量增幅约占整个过程沉 降量的43%,位移明显增加,后行隧道开挖使先行 隧道沉降区域发生二次沉降,因此在实际施工中, 后行隧道引起的路基沉降不容小觑,相比先行隧道 仍会引起较大的沉降值,需要在施工中密切监测。





由图 5 可知:路基最大沉降值变化分为四个阶段,分别为左线开挖至路基中心、左线贯通、右线 开挖至路基中心,右线贯通。当先行隧道左线开始 开挖时,路基发生急剧沉降;随着开挖面不断接近 路基中心,沉降越来越快;当开挖至路基中心处时, 最大沉降量达到最大值 2.5 mm。当开挖面通过路基 后,最大沉降量变化开始缓慢增长,这是因为开挖 通过后土体发生固结蠕变,沉降值会缓慢地增加, 说明此时土体趋于稳定状态。当左线开挖完毕,最 大沉降值为 3.5 mm,最大沉降量增幅约占总的沉降 量的 28%。当后行隧道右线开挖时,路基进一步开 始沉降,对沉降区域的土体形成扰动,最大沉降值 变化较为明显。当右线隧道开挖至路基中心时,最 大沉降值达到 5.2 mm,相比先行隧道开挖时最大沉 降量较小,这是因为先行隧道开挖完后,其衬砌和盾

道桥技术

尾注浆已对土体形成一定的加固。当右线隧道开挖面 通过路基中心后,最大沉降量变化又趋于缓慢,最后 贯通时最大沉降量稳定在6.1 mm。由上述分析可知, 路基最大沉降量增加最大是在先行隧道下穿通过路 基中心时,这是因为盾尾与土体之间会形成一定的 空隙,造成土体损失,因此要及时注浆以及选取合 适的注浆压力来控制地表沉降。

3.2 掘进参数影响分析

掘进参数对地表沉降有着重要的影响,其中较 为重要的参数是掌子面压力与注浆压力。掌子面压 力是维持开挖面稳定的关键,过小的掌子面压力会 导致土体失稳地表沉降,过大的压力则会导致土体 发生隆起;同样的注浆压力的大小也是影响地表沉 降的重要因素。为探究掌子面压力与注浆压力对路 基沉降的影响规律,同样选取交5#股道作为研究对 象,分别施加不同的掌子面压力与注浆压力,并对 其进行敏感性分析。

敏感性分析是系统在各个因素影响下的稳定性 分析,即逐一分析各个影响参数对系统影响程度^[16]。 设系统 $P \oslash n$ 个影响因素 a_n 的影响, $a_n = a_1$, a_2 , a_3 , $\cdots a_n$ 。建立特性系统 P 与影响参数 a_n 之间的关 系,即系统特性 P 与影响因素 a 之间的关系 P = $f(a_1, a_2, a_3, \cdots a_n)$ 。若某一影响参数 a_k 的微小变 化引起系统 P 发生较大的变化,则说明影响参数 a_k 为特性系统 P 的敏感因素。在分析多因素的敏感性 行为时,由于不同参数的物理量单位不尽相同,在 进行参数性敏感分析时采用了无量纲分析,敏感度 函数的表达式定义为:

$$S_k(a_k) = \left| \frac{\mathrm{d}\varphi_k(a_k)}{\mathrm{d}a_k} \right| \cdot \frac{a_k}{P} \qquad k = 1, \ 2 \cdots n \quad (1)$$

其中, *S*_{*k*}是一组无量纲的非负实数, 且 *S*_{*k*}的值 越大, 说明在基准状态下, 系统特性 *P* 对参数 *a*_{*k*}越 敏感。当分别对多个参数进行敏感性分析时, 通过 比较 *S*_{*k*}的值, 就能实现系统特性对各个因素的敏感 度评价。

对于掌子面压力,选取 0.25、0.27、0.29、 0.31 MPa 四种不同掌子面压力工况,研究不同工况 下路基最大沉降量的变化规律,图6(a)为不同掌 子面压力下路基最大沉降值的变化曲线。将不同参数与路基最大沉降 S_{max} 进行回归分析,得到函数关系式为 S_{max} = 19.55x – 11.3215x (x 表示掌子面压力),将该式代入式(1)中得到该参数下的敏感度函数 $S = \left| \frac{19.55x}{19.55x - 11.3215} \right|$,将各掌子面压力基准参数带入其中得到影响因子,如图6(b)所示。路基的最大沉降值随着掌子面的压力增大而不断减小,当

最大沉降值随着掌子面的压力增大而不断减小,当 掌子面压力由 0.25 MPa 提高到 0.31 MPa 时,路基最 大沉降值由 6.45 mm 减小到 5.29 mm,从拟合结果 可以发现掌子面压力大小与路基最大沉降值呈线性 关系。随着掌子面压力的增大,影响因子逐渐增大, 在4种不用掌子面压力下,影响因子分别为 0.75、 0.87、1.01、1.15,说明较大的掌子面压力对路基最 大沉降值影响越敏感。





同样,对注浆压力选取0.15、0.2、0.3、0.4 MPa 四种不同注浆压力工况,研究不同工况下路基最大 沉降量的变化规律。将不同参数与路基最大沉降 S_{max} 进行回归分析,同样得到该参数下的敏感度函数, 将各注浆压力基准参数带入其中得到影响因子如图 7 所示。



图 7 注浆压力与路基最大沉降值的关系拟合及敏感因子 Fig. 7 Fitting the relationship between grouting pressure and maximum settlement value of road base and sensitivity factors

随着注浆压力的不断增大,路基最大沉降不断 减小,注浆压力为 0.15 MPa 时,路基最大沉降为 6.76 mm;注浆压力为 0.4 MPa 时,最大沉降减小到 4.13 mm,减小趋势先快后慢。通过对不同注浆压力 进行敏感性分析,可知,当注浆压力逐渐增大时, 敏感因子越小,对路基最大沉降值影响越小;而当 注浆压力大于 0.3 MPa 时,影响因子开始增大,对 路基最大沉降有着明显影响,这是因为当注浆压力 大到一定程度时,土体抗变形能力急剧提高,对路 基沉降有着显著的影响。

3.3 深孔加固方案分析

当铁路列车运营速度小于 160 km/h 时,铁路路 基的沉降控制值为 6 mm。从上述模拟可以看出,当 铁路路基未采取任何加固措施时,路基的最大沉降 值为 6.1 mm,因为施工条件的复杂不确定性,实际 路基最大沉降会大于控制值,所以必须采取一定的 加固措施来保障列车的安全运行。

模拟采取深孔注浆加固,径向注浆加固范围为 1、1.5、2、2.5、3 m,同样的选取交5#股道作为研 究对象,研究不同注浆范围下路基中心沉降规律, 路基中心沉降随着注浆范围变化曲线如图8 所示,其



图 9 路基最大沉降随加固范围变化曲线 Fig. 9 Variation curve of maximum settlement of roadbed with reinforcement range

由图8可知,加固后路基沉降曲线基本一致。在 不加固情况下路基最大沉降为6.1 mm,大于控制标 准;随着径向加固范围的不断扩大,路基沉降不断 减小,最大沉降值分别为5.48、4.86、3.94、3.63、 3.47 mm。加固范围越深,沉降槽的宽度也在随之减 小,地层扰动范围不断缩小。深孔注浆会提高围岩 强度,开挖隧道上方的地层由坍塌破坏转为安全状 态,地表沉降相应的就会减小。由图9可知,随着加 固范围的不断扩大,路基最大沉降值在逐渐减小, 其变化趋势是先快后慢最后趋于平缓,当路基加固 厚度大于2 m时,减小趋势明显放慢。由此可以认 为,深孔注浆范围选取2 m 左右较为合适。

4 结论

以南京11号线工程为例,基于 Abaqus 有限元软件,模拟分析了双线盾构隧道施工对铁路股道路基的变形影响规律,对掘进参数进行敏感性分析,研究了不同加固方案的加固效果,得到以下主要结论:

(1) 盾构下穿砂土地层铁路股道时,在股道线

路方向会造成一定路基沉降,沉降曲线基本呈正态 分布,随着后行线路的开挖,最大沉降处向双线隧 道中心移动,且路基沉降变化快慢可分为四个阶段: 先行隧道下穿路基时,先行隧道贯穿,后行隧道下 穿路基时,后行隧道贯穿。

(2) 在掌子面压力逐渐增大的情况下,路基最 大沉降值明显减小,其二者之间符合线性关系,较 大的掌子面压力对路基最大沉降值影响越敏感,掌 子面压力控制在 0.3 MPa 左右较为合适。

(3) 注浆压力对路基沉降影响明显, 注浆压力 的增加会减小路基沉降, 当注浆压力大于 0.3 MPa 时, 敏感因子开始增大, 考虑到一定经济性, 设置 0.25~0.3 MPa 范围内的注浆压力较为合理, 因此盾 构施工期间应加强盾构掘进参数的控制。

(4) 在未加固情况下,典型线路交 5#股道路基 最大沉降值为 6.1 mm,不满足沉降控制要求,当穿 越区域采用深孔加固措施时,路基沉降值随之减小, 满足控制标准,径向加固范围 2 m 左右较为合适。

参考文献

- [1] 杨兵明.宁波软土地层盾构隧道下穿铁路施工引起地层变形规 律及控制技术研究 [D].北京:北京交通大学,2016.
- [2] 李文乾,吴云桓,吴兢业,等.基于多层感知机技术的地铁盾 构施工参数预测 [J]. 深圳大学学报(理工版),2024,41
 (1):50-57.
- [3] 邹浩,陈金国. 软土地区盾构下穿施工对铁路路基影响分析 ——以杭州地铁2号线某区间现场监测为例[J]. 隧道建设

(中英文), 2018, 38 (2): 199-206.

- [4] 朱东东. 大粒径卵石地层中盾构下穿施工对既有铁路的影响研 究[D]. 郑州:河南工业大学, 2021.
- [5] 马相峰,王立川,龚伦,等. 砂卵石地层双线地铁盾构下穿铁路路基变形及地层注浆加固研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2021,41 (增刊1):181-189.
- [6] 赵文才.大纵坡小曲线半径盾构隧道下穿对铁路变形的影响研究[D].郑州:河南工业大学,2020.
- [7] 石舒. 盾构隧道下穿铁路工程风险及对策 [J]. 现代隧道技术, 2012, 49 (1): 138-142, 147.
- [8] 霍军帅,王炳龙,周顺华.地铁盾构隧道下穿城际铁路地基加固 方案安全性分析 [J].中国铁道科学,2011,32 (5):71-77.
- [9] 卢礼顺.软土地铁盾构下穿有砟轨道铁路变形影响研究 [J].
 建筑施工,2024,46 (10):1654-1659.
- [10] 杨琳杰, 部亮亮, 汤劲松, 等. 考虑地下通道的盾构隧道下穿 轨道群施工影响 [J/OL]. 甘肃科学学报, 2024 (5): 9-15.
- [11] 孙铁成,王爱玉,张岩俊,等.囊袋式注浆对盾构下穿高速铁路路基沉降的控制效果 [J].铁道建筑,2024,64 (9):120-126.
- [12] 娄洪峻,苏栋,林星涛,等.超大直径盾构下穿高铁路基的沉 降数值分析 [J]. 深圳大学学报(理工版),2024,41 (3): 377-386.
- [13] 李斯. 盾构隧道下穿高铁路基沉降监测与预警 [J]. 铁道建筑, 2023, 63 (11): 127-130.
- [14] 刘勇,周怡晟,索晓明,等.盾构下穿高铁路基变形规律模型 试验研究 [J].岩土力学,2023,44 (4):941-951.
- [15] 国家铁路局. 铁路设计规范: TB 10001—2016 [S]. 中国铁道 出版社, 2016.
- [16] 章光,朱维申.参数敏感性分析与试验方案优化 [J]. 岩土 力学,1993 (1):51-58.

endre a contraction and the contraction of the cont

http://www.fmhzhly.com