

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2026.01.018

盾构隧道穿越上软下硬地层地表变形数值模拟研究

张红彬¹, 王跃翔², 夏琴¹, 熊峰², 王朋朋¹, 匡星晨²

(1. 芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站, 安徽 芜湖 241060; 2. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要:盾构隧道在上软下硬地层掘进时,由于掌子面地层物理力学性质复杂,易引起地面沉降或隆起。文章以芜湖城南过江隧道为工程背景,探讨隧道穿越上软下硬地层时地表变形规律。运用FLAC3D软件对典型上软下硬地层区间施工过程进行数值模拟,结合现场监测数据,分析隧道埋深、掌子面砂层与岩层厚度比、掌子面附加压力对地表变形影响。结果表明:砂层中地表沉降与隧道埋深呈正相关;复合地层中地表沉降与开挖面砂层厚度占比呈正相关;开挖面附加压力存在最适区间,超过最适区间都会引起地层变形增大。该研究结果可为上软下硬地层中隧道施工提供指导。

关键词:盾构隧道;上软下硬地层;地表沉降;数值模拟;掌子面附加压力

中图分类号:U455.43 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2026)01-0127-06

Numerical simulation study on ground surface deformation of shield tunnel crossing upper soft and lower hard strata

ZHANG Hongbin¹, WANG Yuexiang², XIA Qin¹,
XIONG Feng², WANG Pengpeng¹, KUANG Xingchen²

(1. Wuhu Railway(Tunnel) Traffic Engineering Quality and Safety Supervision Station, Wuhu 241060, China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract:When the shield tunnel passes through the upper soft and lower hard strata, it is easier to cause the ground subsidence or uplift because of the complex physical and mechanical properties of the strata on the palm face. In this paper, the Wuhu Chengnan River Crossing Tunnel is taken as the engineering background to explore the law of the ground surface deformation when the tunnel crosses the upper soft and lower hard strata. The FLAC3D is used to simulate the construction process of typical upper soft and lower hard strata, and the influence of tunnel burial depth, thickness ratio of sand layer to rock layer and additional pressure at the palm face on the ground surface deformation is analyzed. The conclusions are as follows: the ground surface settlement in the sand layer is positively correlated with the tunnel burial depth, the ground surface settlement in the composite strata is positively correlated with the proportion of sand layer thickness at the palm face, and there is an optimum interval of the additional pressure at the palm face, exceeding the optimum interval will cause increased strata deformation. This research has guiding significance for the construction of tunnels in upper soft and lower hard strata.

Key words: shield tunnel; upper soft and lower hard strata; ground surface settlement; numerical simulation; additional pressure at palm face

收稿日期:2023-08-08; **修回日期:**2023-09-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(42107173);安徽省自然科学基金资助项目(2108085ME190)和中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(JZ2023HG TB0234)

作者简介:张红彬(1983—),男,安徽砀山人,芜湖市轨道(隧道)交通工程质量安全监督站高级工程师;

熊峰(1986—),男,河南驻马店人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者, E-mail: cvexf@hfut.edu.cn.

0 引言

随着我国城市建设的进行,城市地下交通也大量兴建,盾构法以其安全、高效、环境影响小等特点逐渐成为城市隧道建设的首选方案^[1]。由于盾构穿越地层地质条件的复杂性,盾构施工引起周围土体或岩体的变形规律也不尽相同,盾构机穿越地层类型总体上可以分为 2 类:一类是单一地层,可以是软土地层,也可以是硬岩地层;另一类是复合地层。复合地层是指在开挖断面范围内和隧道轴线方向上,地层由岩土力学、工程地质和水文地质等特征相差较大的 2 种或 2 种以上的岩(土)层组成,可以是上软下硬地层或上硬下软地层^[2]。在盾构穿越上软下硬地层时,由于下部硬岩对盾构刀片的阻碍和磨损作用,会延缓掘进进程,如果不能正确掌控施工参数(如掌子面压力、注浆压力等),就可能会造成开挖面的破坏以及地表的塌陷,不仅影响施工安全,而且威胁到建(构)筑物的安全^[3]。因此,上软下硬地层是隧道施工的难点之一。

目前,有不少学者通过不同研究手段,研究盾构机在不同地质条件下对地层的扰动规律。文献^[3]使用 $\phi 800$ mm 模型盾构进行室内试验,研究土压盾构在上软下硬地层的掘进效果以及对周围土体的扰动影响,发现上软下硬地层地表沉降小于均质砂层;文献^[4]使用 ABAQUS 模拟软件对盾构施工过程进行模拟,揭示盾构施工对地表沉降的影响,并基于 Peck 理论公式推导出北京轨道交通新机场线某盾构区间施工地表沉降预测公式;文献^[5]利用现场实测数据和 FLAC3D 有限差分软件分析盾构隧道穿堤过程中大堤段沉降的规律,发现大堤顶部对深层土体的扰动较为敏感,并对盾构施工过程提出建议;文献^[6]利用 Plaxis3D 分析在不同支护压力条件下,掘进过程对周围围岩的变形和破坏的影响,发现大直径盾构施工影响范围为 3 倍洞径,地表沉降主要受开挖面附加压力和盾尾注浆压力影响;文献^[7]考虑土拱效应,基于上限分析法,采用数值模拟和工程实例对开挖面稳定性进行分析,并进行验证,发现开挖面极限支护力与隧道直径呈正相关,与土体黏聚力、内摩擦角呈负相关;文献^[8]利用理论分析、现场试验等手段,揭示大直径泥水盾构掘进对周围土体的扰动规律,得到了盾构推进对岩土体的应力扰动范围约为 1 倍洞径。

本文采用了 FLAC3D 数值模拟软件,结合芜湖城南过江隧道工程背景,建立三维数值计算模

型,模拟多种盾构施工中所遇到的地层类型(如全断面砂层、全断面岩层、砂-岩复合地层),并通过设置不同种类的施工参数(如隧道埋深、掌子面附加压力、砂-岩厚度比等),分析并总结不同工况、不同施工参数下地表沉降规律。

1 工程概况

芜湖城南过江隧道起于江北规划新民路,沿滨江大道南线位布线,在长江大堤内拐向东南方向,穿越长江后,江南接大工山路,路线终点位于中山南路交口前 190 m 处,如图 1 所示(该图来源于高德地图,网址为 <https://www.amap.com/>,底图边界无修改)。采用直径 15.05 m 盾构施工工艺,盾构隧道外径 14.5 m(内径 13.3 m)。本工程盾构段左线起于 ZK2+423.72,终至 ZK6+372.79,合计总长 3 949.07 m;右线起于 YK2+422.60,终至 YK6+381.20,总长 3 958.6 m。盾构段掘进采用 2 台泥水平衡盾构从江北工作井始发,向南掘进下穿长江后,到达江南工作井拆卸吊出。



图 1 芜湖过江隧道位置图

盾构穿越的地层由北至南主要为粉砂(稍密)、粉砂(中密)、粉土(稍密)、细砂(密实)、强风化粉砂岩、中风化粉砂岩、中风化石英砂岩、强风化泥质粉砂岩、中风化泥质粉砂岩、中风化凝灰角砾岩、强风化凝灰角砾岩、粉质黏土(硬塑)、粉质黏土(可塑)、粉质黏土(软塑)、淤泥质粉质黏土(流塑)、粉土(稍密),淤泥质土呈易蠕动的松软结构,砂性土呈潮湿的松散结构。本文研究区域主要为江北靠近长江的一段右线盾构区间(YK3+480~YK4+380),如图 2 所示。

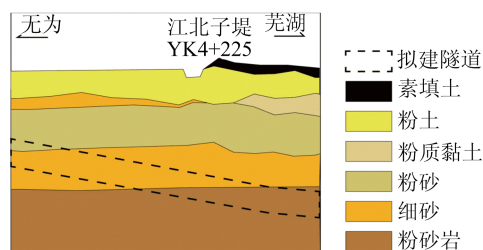


图 2 研究区域地层纵剖面图

该段盾构穿过的细砂和粉砂岩地层为典型的上软下硬复合地层。

2 地表变形数值模拟

2.1 模型建立及监测点设置

本文选取芜湖城南过江隧道中 YK3+480~YK4+380 的盾构区间,为能够覆盖隧道施工对地层的影响范围,建立的整个模型尺寸(长×宽×高)为 120 m×60 m×100 m,开挖时只挖东线,不挖西线,即只开挖模型中右边隧道,掘进方向为 y 正方向。

由于施工区域地层近水平分布,隧道也近水平穿越地层,为了方便建立数值模型,本文假定建立的模型中地层为严格的水平分布,盾构在开挖过程中也是呈水平方向前进,通过改变隧道轴线的埋深来模拟盾构穿越不同类型的地层,该模型的地层组成由上而下依次为粉质黏土、淤泥质粉质黏土、粉砂、细砂和中风化粉砂岩。

地层岩土体本构模型采用 M-C(Mohr-Coulomb)模型,该模型适合于多种岩土类的破坏和变形行为的描述。

为了解隧道开挖过程对地表的扰动情况,本文建立双隧道模型,并模拟设置监测点分布情况,如图 3 所示。地表横向沉降监测点纵坐标 $y=32$ m,连线垂直于隧道轴线,从隧道中心开始每间隔 5 m 添加 1 个监测点,共 10 个地表纵向监测点平行于隧道轴线,每隔 6 m 取 1 个,共取 11 个,以下各工况均记录开挖 2 至 15 环的监测数据。

开挖面附加压力和盾尾注浆压力通过 apply 命令在盾尾圆柱面和掌子面施加面荷载。其中,开挖面附加压力从隧道拱顶到底部线性增加,盾尾注浆压力由上部、中部、下部注浆孔依次增加。荷载分布如图 4 所示。

根据芜湖城南过江隧道工程背景,本文确定的模拟施工方式为:首先将整个模型的本构模型设为 M-C 模型,分别对岩土体、开挖部分岩土体、衬砌管片部分进行分组;然后将 0~4 m 处要开

挖的岩土体设置为空模型(以此方式来模拟土体开挖),在开挖部分安置盾构机,其中 0~2 m 为盾尾,2~4 m 为盾壳,盾尾处将衬砌部分设置为相应的弹性模型;4 m 处开挖断面施加附加推力,0~2 m 处圆柱面施加环向注浆压力,之后每步去掉之前施加的开挖面附加推力和盾尾注浆压力,挖掉前方 2 m 的土体;再新开挖部分设置盾壳,新开挖部分后 2 m 处激活衬砌管片并施加盾尾注浆压力,新开挖面处施加附加推力,如此循环直至完成盾构施工过程。

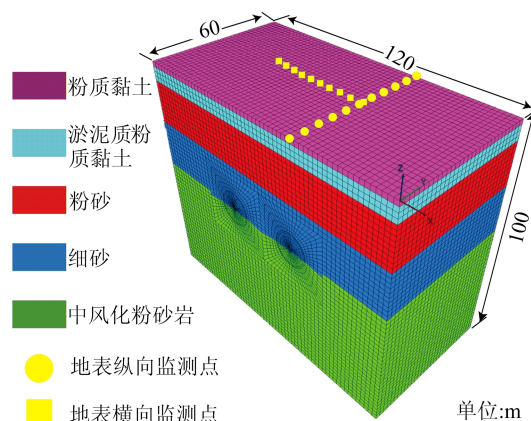


图 3 双隧道模型及监测点分布图

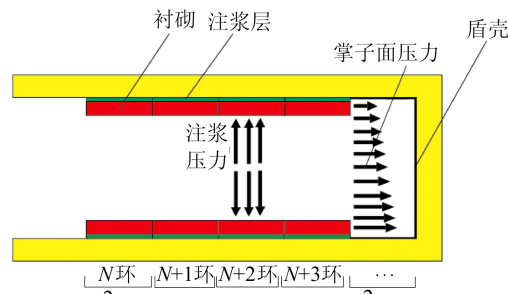


图 4 隧道掘进荷载分布图

2.2 模型参数选择

本文选取了 FLAC3D 数值模拟软件中内置的 M-C 模型,该本构模型需要输入内摩擦角 φ ,黏聚力 c ,弹性模量 E ,泊松比 ν 等参数。各层土体参数见表 1 所列。

表 1 土体分层及土体参数

土层/岩层	厚度/m	容重/(kN/m ³)	E /MPa	c /kPa	φ /(°)	ν
粉质黏土	1.5	17.1	24	12	6.0	0.32
淤泥质粉质黏土	7.0	18.4	48	15	22.0	0.30
粉砂	15.0	19.5	60	2	27.0	0.29
细砂	23.5	20.0	90	3	30.0	0.28
中风化粉砂岩	53.0	21.9	21 000	15 000	38.0	0.23

结合芜湖城南过江隧道工程实际背景,模拟将隧道外径设置为 15.1 m,内径设置为 12.9 m,隧道中心埋深设置为 46 m,衬砌厚度为 1.2 m,注浆层厚度为 0.6 m,盾壳厚度设置为 0.3 m,主要参数见表 2 所列。

整个研究过程中的注浆压力设置约为 300 kPa,在不研究开挖面附加压力影响时,将其固定在 300 kPa,这 2 种荷载都随深度的增加线性增大,梯度均为 20 kPa/m。

本文选取 FLAC3D 中接触面单元来模拟盾构与土体间的相互作用。接触面单元由一系列三节点的三角形单元构成,三角形面积分配到各个节点中,每个接触面节点都有 1 个相关的表示面积^[9]。将接触面位置设置于衬砌与土体的界面处,其法向刚度与切向刚度均设置为 30 MPa, φ 设置为 16° , c 设置为 0.1 MPa。

表 2 盾构、衬砌和注浆层参数

参数	E/GPa	厚度/m	容重/(kN/m ³)	ν
盾壳(壳单元)	270	0.3	25	0.25
衬砌(实体)	35	1.2	25	0.15
注浆层(实体)	1	0.6	15	0.48

2.3 模型验证

模型验证选取芜湖城南过江隧道盾构段第三方监测中 911DC 断面,该断面正处于盾构穿越上软下硬地层的区域,其分布位置如图 5 所示。

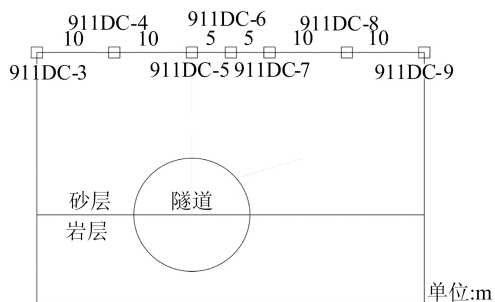


图 5 地层横剖面监测点分布图

所取验证模型为埋深 46 m、盾构穿越砂层与岩层厚度比为 1:1 的工况,监测断面为 $y=0$ 处地表上的监测点,监测点与第三方中的 911DC 监测断面上的点逐一对应。得到的模拟值与实际监测值对比结果如图 6 所示。由图 6 可知,各监测点的模拟值相对于实际监测值的误差分别为 29.0%、13.0%、5.0%、0.2%、2.0%、24.0%,曲线趋势基本一致,验证该模型的合理性。

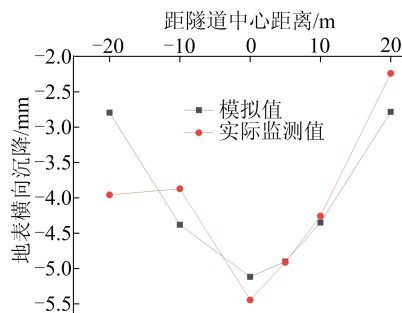


图 6 模拟值与实际监测值对比

3 模拟结果与分析

按照文献[6,10-11]中对盾构施工参数敏感性的数值模拟研究方法,分别对不同施工参数下的地表横向沉降和掌子面变形进行分析,为了更好地模拟盾构施工中遭遇的地层类型,设置主要施工参数隧道中心埋深(后文的隧道埋深均指隧道中心和地表的距离)、隧道穿过砂层与岩层的厚度比、盾构开挖面附加压力,具体数值模拟参数取值及工况见表 3 所列。

表 3 数值模拟工况

工况	地层	隧道埋深/m	厚度比	附加压力/kPa
1	砂层	33.5		300
2	砂层	38.5		300
3	砂层	43.5		300
4	砂层	43.5		200
5	砂层	43.5		500
6	砂层	43.5		700
7	复合地层	46.0	1:1	150
8	复合地层	46.0	1:1	200
9	复合地层	46.0	1:1	250
10	复合地层	46.0	1:1	300
11	复合地层	46.0	1:1	350
12	复合地层	46.0	2:1	300
13	复合地层	46.0	1:2	300

3.1 隧道埋深对地表变形的影响

选取开挖面附加压力 300 kPa、全断面砂层的工况,隧道埋深对于地表沉降的影响如图 7 所示。从图 7 可以看出:砂层中隧道埋深越大,地表沉降越小,埋深从 33.5 m 增加至 38.5 m 隧道中心地表位移变化显著,而埋深从 38.5 m 增加至 43.5 m 隧道中心地表位移变化较小;在距隧道中心 -45.0 m 处 3 种埋深的地表竖向位移差异很小,埋深 33.5 m 时地表出现了微小隆起。

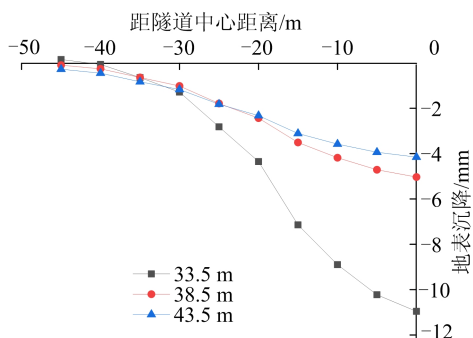


图 7 砂层中地表沉降随隧道埋深的变化

3.2 砂层与岩层厚度比对地表变形的影响

在固定埋深为 46.0 m,开挖半径为 7.55 m 的情况下,通过改变砂层与岩层的厚度比,得到表面沉降曲线如图 8 所示。由图 8 可知,随着砂层厚度的增加,表面沉降也随之增加。主要原因是当砂层厚度较大时,砂层的刚度较小,容易对土体造成较大的扰动,地表沉降较大;当砂层厚度较小时,主要对岩层造成扰动,而岩层的弹性模量较大,

对岩层的扰动较小,地表沉降也较小。

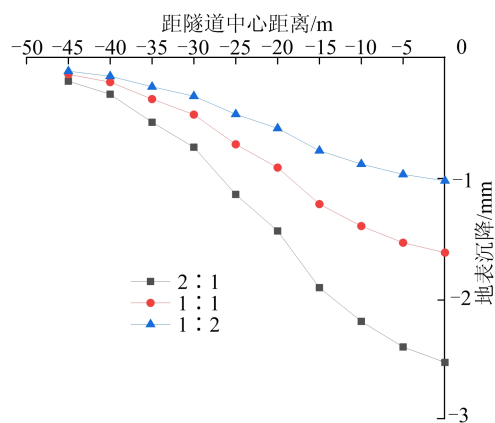


图 8 穿越砂层和岩层厚度比对地表沉降的影响

3.3 开挖面附加压力对地表变形的影响

选取隧道埋深为 43.5 m、全断面砂层的工况,分别在 200、300、500、700 kPa 的开挖面附加压力下进行模拟施工,得到地表纵向沉降曲线如图 9 所示。

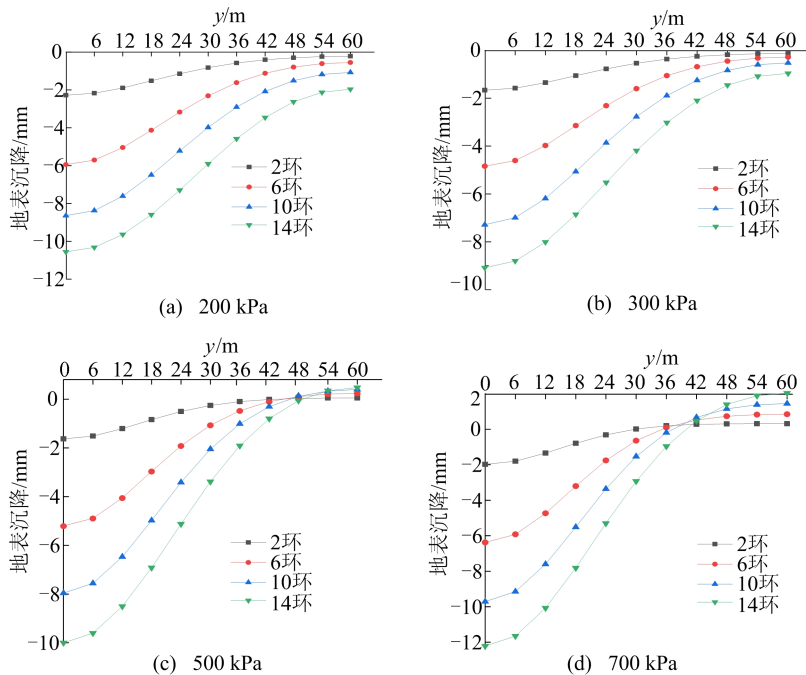


图 9 不同附加压力掘进下地表纵向沉降的变化曲线

由图 9 可知,相同掘进进度下,附加压力为 200 kPa 时的地表沉降大于 300 kPa 时的地表沉降,当附加压力增大至 500、700 kPa 时,隧道轴线纵向地表出现隆起区,且在相同的掘进进度下,附加压力的增大使得隧道轴线上方地表隆起区的位移增大,500 kPa 时沉降区与隆起区的界线大约在 $y=48$ m 处,在 700 kPa 时界限向 y 轴负方向移动至 $y=40$ m 处,说明附加压力的增大会导致

地表隆起区范围的增加。

选取埋深为 46.0 m,穿过砂层与岩层厚度比为 1 : 1 的工况下,研究在不同开挖面附加压力时,地表沉降和开挖面的变形情况如图 10 所示。由图 10 可知,随着开挖面附加压力的减小,开挖面前方地层最小主应力相应减小,导致围压减小,土体在最大主应力方向(竖直方向)形变增大,导致地表沉降变大。当附加压力由 200 kPa 减小至

150 kPa 时沉降值突增,说明 200~150 kPa 之间存在极限值,当小于极限值时,地表沉降速率会增大。

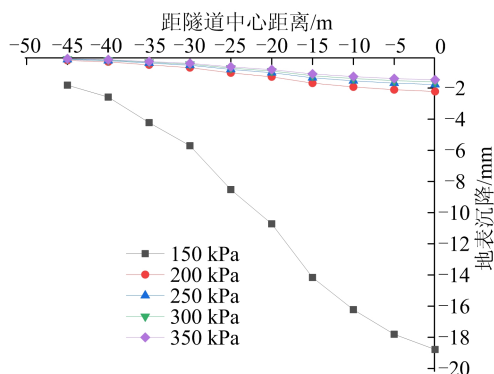


图 10 不同开挖面附加压力下地表沉降

4 结 论

1) 盾构机穿越全断面砂层时,地表沉降隧道埋深呈负相关;开挖面附加压力存在一个最适区间,附加压力小于和大于最适区间时地表沉降都会增大,且附加压力大于最适区间时,盾构前方地表会出现隆起,附加压力越大,隆起范围越广,隆起值也越大。

2) 盾构机穿越砂-岩复合地层时,在一定的开挖面附加压力下,由于砂层相对于岩层弹性模量小,地表沉降与开挖面砂层厚度占比呈正相关;地表沉降与开挖面附加压力呈负相关,且开挖面附加压力存在极限值,当低于极限值时,地表沉降

增长速率会增大,开挖面附加压力应介于 150~200 kPa 之间。

[参 考 文 献]

- [1] 秦佳佳. 合肥地区复合地层盾构掘进参数控制研究[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(3): 435-443
- [2] 刘栋. 复合地层中土压盾构隧道开挖面稳定性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [3] 王俊, 何川, 胡瑞青, 等. 土压平衡盾构掘进对上软下硬地层扰动研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(4): 953-963.
- [4] 胡茂兴. 大直径盾构施工引起地表沉降研究[D]. 北京: 中国地质大学, 2019.
- [5] 朱牧原, 魏力峰, 方勇, 等. 超大直径盾构隧道下穿黄河大堤沉降分析与控制研究[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(3): 211-219.
- [6] 吴昌胜. 大直径盾构隧道施工引起的地层变形研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [7] 霍晓科. 考虑土拱效应的盾构隧道开挖面稳定性分析[D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [8] 肖衡. 大直径泥水盾构掘进对土体的扰动研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2009.
- [9] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [10] 邵迅, 姚华彦, 张振华, 等. 合肥地铁盾构隧道下穿河道施工数值模拟分析[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(1): 95-100.
- [11] 徐良, 王建国. 隧道开挖对地表沉降影响的数值分析与沉降预测[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(10): 1370-1375.

(责任编辑 吴 亮)

(上接第 126 页)

- [8] 寇展华. 铝合金模板静力试验、数值模拟及优化设计研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2019.
- [9] 潘钦锋, 崔洪亨, 蔡雪峰, 等. 铝合金模板抗弯性能试验研究及参数分析[J]. 工业建筑, 2017, 47(11): 142-147.
- [10] 庄金平, 邱豪, 崔洪亨, 等. 铝合金模板销钉半刚性连接性能研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(12): 152-156.
- [11] 段迪. 新型铝合金模板的受力机理与板肋形式优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2020.
- [12] 魏佳, 杨佩荣, 王晨, 等. 基于有限元方法的铝合金模板受力分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(增刊 2): 1192-1196.
- [13] CHEN Y J, QIAN Z X, KANG C F. Optimization of aluminum alloy formwork geometry parameters based on a PSO-BP neural network[J]. Buildings, 2023, 13(5): 1283.

- [14] 国家市场监督管理总局. 金属材料 拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法: GB/T 228. 1—2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 14-17.
- [15] 李成玉, 郭耀杰, 李美东. 钢框架节点刚度测试方法研究[J]. 工业建筑, 2005, 35(5): 98-100.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑结构可靠性设计统一标准: GB 50068—2018[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 29.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程结构通用规范: GB 55001—2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 10-11.

(责任编辑 吴 亮)