

DOI: 10.7672/sgjs2026010043

复合地层盾构掘进支护压力对掌子面稳定性的影响研究*

赵志坚¹, 杨剑¹, 张军², 付一鸣³

(1. 中铁南方投资集团有限公司, 广东 深圳 518000; 2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031; 3. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

[摘要] 复合地层中盾构掘进风险大, 时常诱发掌子面的过大变形或塌方事故。以深圳上软下硬复合地层为例, 依托深圳11号线二期某区间, 通过精细化数值模拟探究了盾构掘进支护压力对掌子面稳定性的影响规律, 分析了上软下硬和全软两种典型地层的差异。首先, 基于土体极限主拉应变理论, 编制了Python程序, 实现了ABAQUS数值模拟结果中掌子面前塑性区形状和体积大小的自动提取, 并与理论解对比验证。掌子面前塑性区体积比随支护压力比呈现先减小后增大的趋势, 对于全软地层, 支护压力比为0.62~1.42时, 掌子面前较为稳定。而对于上软下硬地层, 支护压力比为0.64~1.76时, 掌子面前较为稳定。

[关键词] 隧道; 盾构; 复合地层; 掌子面; 支护; 压力

[中图分类号] U459

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)01-0043-06

Research on Influence of Shield Tunneling Support Pressure on Stability of Tunnel Face in Composite Strata

ZHAO Zhijian¹, YANG Jian¹, ZHANG Jun², FU Yiming³

(1. China Railway Southern Investment Group Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610031, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The risk of shield tunneling in composite strata is high, which often induces excessive deformation or collapse of the tunnel face. Taking the upper-soft and lower-hard composite strata in Shenzhen as an example, based on an interval of Shenzhen Metro Line 11, Phase II, the influence of shield tunneling support pressure on the stability of the tunnel face was explored through fine numerical simulation, and the differences between the two typical strata of upper-soft and lower-hard and full-soft were analyzed. Firstly, based on the limit principal tensile strain theory of soil, the Python program was compiled to realize the automatic extraction of the shape and volume of the plastic zone in front of the tunnel face in the ABAQUS numerical simulation results and compared with the theoretical solution. The volume ratio of the plastic zone in front of the tunnel face decreases first and then increases with the support reaction ratio. For the fully soft strata, when the support pressure ratio is 0.62~1.42, the front of the tunnel face is more stable. When the support pressure ratio of the upper soft and lower hard strata is 0.64~1.76, the face of the tunnel is relatively stable.

Keywords: tunnels; shields; composite strata; tunnel face; supports; pressure

0 引言

21世纪,我国城市地下交通网快速发展^[1]。因

盾构隧道施工技术具有独特优势,我国城市地铁常采用盾构法进行施工。掌子面稳定一直是隧道安全开挖的重要前提^[2]。然而施工过程中,常常出现因为掌子面支护力不足引起的掌子面失稳,从而引起一系列的伴生病害^[3],给隧道带来了极大危害。

* 国家自然科学基金(52090083); 中铁南方投资集团有限公司技术开发项目

[作者简介] 赵志坚, 工程师, E-mail: 460517856@qq.com

[收稿日期] 2025-06-15

因此,从 20 世纪 60 年代开始,研究者从计算理论、数值模拟、模型试验等方面针对掌子面稳定问题进行了大量的研究与分析。

Broms 等^[4]开展了一系列掌子面变形的模拟试验并最早提出了提升黏土地层开挖面稳定系数的方法,提出了可靠预测纯黏土挤出变形的准则,并且提出了掌子面稳定性的概念。Leca 等^[5]对砂土地层条件下浅埋隧道掌子面的三维破坏模式进行了研究,并确定掌子面稳定的最大和最小支护力。Lunardi^[6]率先提出一种不同于新奥法的隧道修建理论,认为隧道掌子面核心土的失稳才是隧道塌方、失稳的真正诱因,强调加强掌子面以及超前核心土才能维持隧道稳定。综上可知,既有研究较为全面地总结了均质地层开挖掌子面的位移规律和挤出变形。

De 等^[7]建立了土压平衡盾构隧道开挖面的三维有限元计算模型,考虑了渗透力作用在开挖面上的工况。朱伟等^[8-9],黄正荣等^[10]和秦建设^[11]分别针对砂土和黏土中的盾构开挖面变形破坏问题进行了数值模拟研究。计算发现,砂土开挖面破坏形式为开挖面前方楔形土体滑动破坏,而黏土的开挖面破坏形式为鼓出型破坏。张孟喜等^[12]依托上海市 11 号线下穿 4 号线工程,通过离散元计算分析了开挖面的稳定性,当新建隧道和既有隧道的距离较小时,既有隧道对新建隧道的掌子面失稳模式产生了显著影响。但上述研究中对掌子面前塑性区的真实三维形状以及三维形状随支护反力变化的改变分析较少。

综上所述,依托深圳市轨道交通 11 号线二期某盾构区间,本文将采用三维有限元精细模拟分析探究上软下硬、全软地层的掌子面塑性区发展规律,并给出支护力的控制建议。使用 ABAQUS 与 Python 的交互接口通过极限主拉应变理论将掌子面前塑性区的形状以及体积大小提取,以实现量化分析。并通过分析塑性区体积比随支护压力比的变化趋势,选择使塑性区体积比稳定的支护压力比范围,为相关工程实践提供参考。

1 工程概况

深圳轨道交通 11 号线二期某区间采用土压平衡盾构施工,盾构外径 6.48m,混凝土管片外径为 6.20m,注浆层厚度为 0.14m,混凝土管片壁厚 0.35m,标准环宽 1.50m,采用错缝拼装。新建隧道左、右线先后掘进,本文选取上软下硬和全软两种典型地层进行隧道掘进支护压力比对掌子面稳定性影响的研究。

在 2 个分析断面中,隧道埋深均为 24.80m,左、右线隧道轴线间距 11.56m。自地表至隧道拱顶共 7 个土层,依次为素填土、淤泥质砂、粗砂、砾质黏性土、全风化花岗岩、强风化花岗岩、中风化花岗岩。在上软下硬节点,新建隧道位于全风化花岗岩地层中,如图 1a 所示;在全软地层节点,新建隧道位于砾质黏性土地层中,如图 1b 所示。

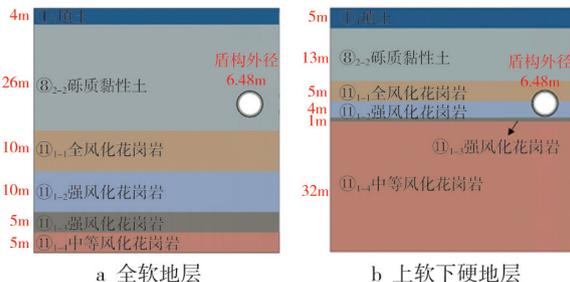


图 1 典型地层剖面

Fig. 1 Typical stratigraphic section

2 三维有限元模型

2.1 模型概况

本文选取 2 个节点处长 120m,宽 75m,深 60m 范围内的地层及新建隧道作为建模对象,建立三维有限元数值模型,如图 2 所示。在三维有限元模型中,土体、注浆层、衬砌均采用三维实体单元按照实际尺寸进行建模,注浆层厚 0.14m。参考盾构的外部结构对盾构进行简化建模,采用三维壳单元按照实际尺寸进行盾构建模。

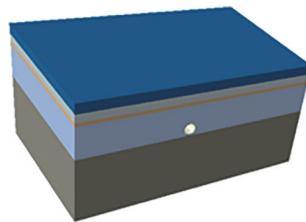


图 2 三维有限元模型

Fig. 2 3D FEM

为了充分研究盾构掘进支护压力比对掌子面稳定性的影响,模型计算了 32 步土体开挖。前 31 步土体开挖均采用掌子面支护压力标准值 P 进行支护,第 32 步改变掌子面支护压力,从而观察掌子面前塑性区体积的大小,如图 3 所示。第 32 步掌子面支护压力为 βP ,其中 β 为掌子面支护压力比。

模型左右、前后、底部均约束法向位移,上表面为自由边界。结合盾构实际施工参数设置情况,掌子面支护力在静止土压力的基础上提高 20kPa,注浆压力在开挖断面顶部静止土压力的基础上提高 10kPa,注浆压力荷载沿重力方向。

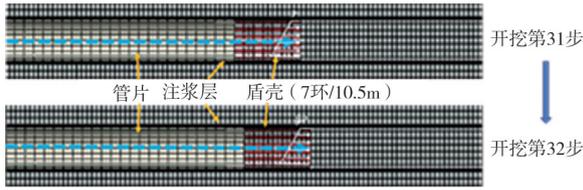


图3 第31,32步掌子面支护压力

Fig. 3 Support pressure on tunnel face at steps 31 and 32

2.2 参数取值

在上软下硬和全软地层2个模型中,土体均采用莫尔-库伦模型^[13],力学参数根据地勘报告中土的三轴试验、直剪试验等结果计算获取,如表1所示。

表1 地层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of formation

地层代号	地层名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	黏聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\circ)$	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
① ₁	素填土	10	0.30	12	8	17.1
⑧ _{2,2}	砾质黏性土	20	0.29	27	22	18.9
⑩ _{1,1}	全风化花岗岩	50	0.27	26	24	19.1
⑩ _{1,2}	强风化花岗岩	100	0.26	18	27	19.5
⑩ _{1,3}	强风化花岗岩	140	0.30	20	38	24.0
⑩ _{1,4}	中风化花岗岩	18 400	0.24	1 500	40	25.5

注浆层采用半固态浆液参数。管片衬砌考虑接头影响,需对接头管片衬砌进行强度折减,王秋实等^[14]对管片衬砌的模量进行折减,折减系数为75%,故本文接头的强度折减系数为75%。盾壳质量依据盾构整体质量计算。模型结构材料参数取值如表2所示。

表2 结构参数

Table 2 Structure parameters

构件	单元类型	材料	重度 $\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	弹性模量 E/MPa
注浆层	实体	水泥浆	12.00	100
管片衬砌	实体	混凝土	24.50	33 600
盾壳	实体	—	109.73	210 000

掌子面支护压力标准值通过掌子面处土体的静止土压力计算。掌子面支护压力标准值计算公式如下:

$$K_0 = \frac{\nu}{1 - \nu} \quad (1)$$

式中: K_0 为静止土压力系数; ν 为泊松比。

$$P = \sum_{i=1}^n h_i \gamma_i \frac{\nu_i}{1 - \nu_i} \quad (2)$$

式中: P 为静止土压力; h_i 为土层厚度; γ 为土层重度。

掌子面土压力解析式:

$$P = aZ + b \quad (3)$$

$$a = -\frac{\bar{\nu}}{1 - \bar{\nu}} \bar{\gamma} \quad (4)$$

$$b = b_0 + 20\text{kPa} \quad (5)$$

式中: $\bar{\gamma}$ 为加权平均重度; Z 为掌子面中心处深度; b_0 为当 Z 为掌子面中心处深度,且静止土压力为顶部与底部加和的一半时求得。

2.3 掘进过程模拟

该模型顶推长度为75m(50环),每次开挖1环,施工模拟流程如下:①杀死对应分析步对应环的土,激活对应盾壳,同时激活掌子面前的开挖支护力;②顶推6环后,盾尾脱出,注销6步前的盾壳,即盾构长度为 $6 \times 1.5\text{m}$,激活注浆层和管片;③注浆压力伴随注浆层同时激活;④再次顶推2步后,注浆压力消散。因本文研究盾构掘进支护压力比对掌子面稳定性影响,故本模型仅顶推32步,前31步掌子面支护力为标准值,第32步考虑采用折减系数。

3 掌子面前塑性区提取与体积计算

在Abaqus中可通过Python对odb文件进行二次处理。相关研究^[15-19]对二次开发实现原理进行了探讨,并使用Python语言对1个实例进行ABAQUS后处理二次开发。本文将通过python进行ABAQUS中odb文件的二次处理从而导出掌子面前塑性区单元的编号、体积,从而在ABAQUS的可视化区域重新显示。ABAQUS和Python的交互流程如图4所示。Python程序通过odbAccess模块访问odb文件中的数据。Python程序通过session.viewports和odbDisplay接口与ABAQUS/Viewer交互,并将筛选出的单元在视口中显示。本文程序包括以下几个主要部分。

1) 导入模块:导入了ABAQUS模块以及Python标准库用于访问odb文件、处理数据以及进行数值计算。

2) 定义工具函数:定义了应变张量转变矩阵的函数和计算单元形心坐标函数。

3) 访问odb文件并提取应变和体积数据:从odb文件的最后一个分析步最后一帧中提取应变场和单元体积场;遍历单元集,计算每个单元的应变张量,并提取最大主拉应变值。

4) 筛选单元并计算体积:根据最大主应变值筛选出符合条件的单元。计算这些单元的形心坐标,并根据形心坐标进一步筛选单元,累加符合条件的单元体积。

5) 显示结果:使用ABAQUS/Viewer的API将

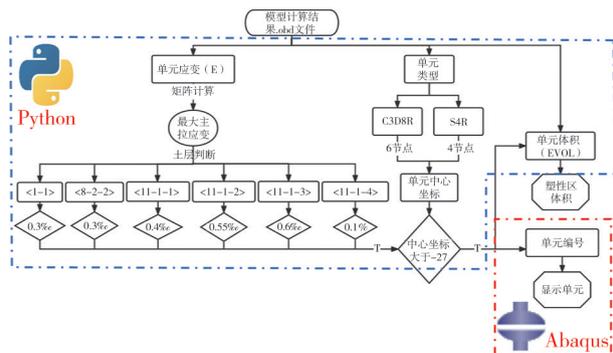


图4 ABAQUS 和 Python 的交互流程

Fig. 4 Interaction flow between ABAQUS and Python

筛选出的单元在视口中可视化。

对于塑性区提取的判别指标是分析的关键。朱星宇^[20]通过试验和三维有限元模拟计算了不同等级围岩的极限主拉应变,且软土地层的极限主拉应变小于岩石地层。故本模型中土体的极限主拉应变参数如表3所示。

表3 土层极限主拉应变参数

Table 3 Limit principal tensile strain parameters of soil layer

地层代号	地层名称	极限主拉应变/ $\%$
① ₁	素填土	0.30
⑧ _{2,2}	砾质黏性土	0.30
⑩ _{1,1}	全风化花岗岩	0.40
⑩ _{1,2}	强风化花岗岩	0.55
⑩ _{1,3}	强风化花岗岩	0.60
⑩ _{1,4}	中等风化花岗岩	1.00

3.1 全软地层

在全软地层进行了缩减系数从0.2到4.1的共9组数值试验,通过ABAQUS与Python的交互,将第32步开挖后掌子面前塑性区进行重显示。全软地层塑性区体积比随支护压力比增大的变化曲线如图5所示。图5中y轴为不同支护压力比下的塑性区体积与最小塑性区体积的比值。当支护压力比小于0.9时,掌子面前塑性区体积大小随着支护压力比的增大而减小,减小速率逐渐降低。当支护压力比大于1.1时,掌子面前塑性区体积随着支护压力比的增大而增大,增大速率逐渐增加。当支护压力比在0.9~1.1时,掌子面前塑性区体积变化不明显。

Murayama等^[21]提出了一种接近工程实践的对数螺旋线破坏面。当支护压力比小于0.9时,该破坏形式和软土中提取的塑性区形状相同,证明了本文提取塑性区标准和方法的正确性。对数螺旋线破坏面的水平距离随支护压力比的增大而减小,在0.9时掌子面前塑性破坏区域最小。当支护压力比

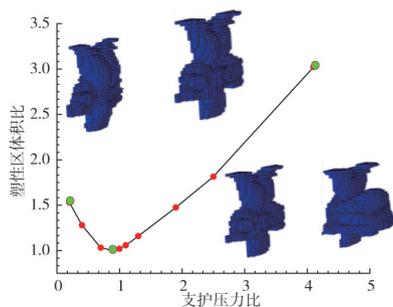


图5 全软塑性区体积比与支护压力比关系

Fig. 5 Relation between volume ratio and support pressure ratio in all soft plastic area

大于1.1时,破坏形式不再满足对数螺旋线破坏,而是发生剪切破坏,剪切破坏的深度随着支护压力比的增大而增大。剪切破坏上表面与水平面存在一定夹角,下表面平行于水平面破坏。

在图5的基础上,通过牛顿法确定掌子面在支护压力比为0.62~1.42时塑性区较为稳定,如图6所示。当支护压力比小于0.62或者大于1.42时,塑性区体积增长速率陡增,说明掌子面在该范围内无法维持稳定状态。

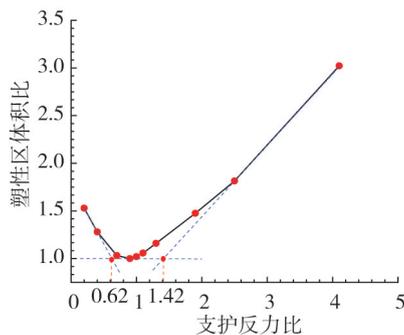


图6 全软节点掌子面稳定区间

Fig. 6 Stability interval of tunnel face of all soft nodes

3.2 上软下硬地层

在上软下硬地层进行了缩减系数从0.2~4.1的共9组数值试验。上软下硬塑性区体积比随支护压力比增大的变化曲线如图7所示。图7中y轴为不同支护压力比下的塑性区体积与最小塑性区体积的比值。当支护压力比小于1时,掌子面前塑性区体积大小随着支护压力比的增大而减小,减小速率逐渐降低。当支护压力比大于1时,掌子面前塑性区体积随着支护压力比的增大而增大,增大速率逐渐增加。

当支护压力比小于1时,对数螺旋线破坏面破坏形式和上软下硬地层中提取的塑性区的形状相同。当支护压力比大于1.1时,破坏形式不再满足对数螺旋线破坏,而是发生剪切破坏,剪切破坏的深度随着

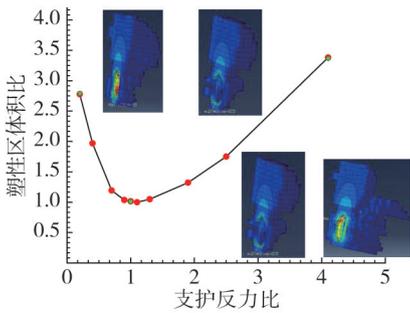


图7 上软下硬软塑性区体积比与支护压力比关系

Fig. 7 Relation between the volume ratio of upper soft and lower hard soft plastic zone and support pressure ratio

支护压力比的增大而增大。剪切破坏上表面与水平面存在一定夹角,下表面平行于水平面破坏。

通过牛顿法确定掌子面在支护压力比为 0.64~1.76 时塑性区较为稳定(见图 8)。当支护压力比小于 0.64 或者大于 1.76 时,塑性区体积增长速率陡增,说明掌子面在该范围内无法维持稳定状态。

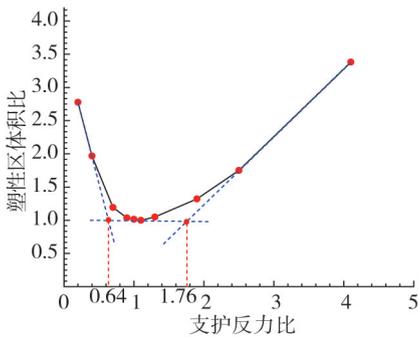


图8 上软下硬节点掌子面稳定区间

Fig. 8 Stable interval of tunnel face of soft upper and hard lower node

4 工程应用

本文将得到的掌子面支护压力比控制方案应用于深圳地铁 11 号线福田路以及福田河段,通过监测福田路、福田河段的地表沉降验证控制方案是否有效。福田路、福田河段的地表沉降通过应用本文掌子面支护压力比控制方案后可控制在每周变化值小于 5mm。福田路、福田河段穿越后的现场情况显示,地表沉降并不明显,不影响地表建筑物的正常使用,证明了文中掌子面支护压力比控制方案的有效性。

5 结语

依托深圳地铁 11 号线二期某盾构区间穿越全软和上软下硬地层节点,建立了不同支护压力比的三维数值模型,分析了改变开挖支护力的掌子面稳定性。总结分析了全软以及上软下硬地层掌子面塑性区体积比、塑性区形状随支护压力比的变化规律。

1)在支护反力较小时,掌子面前方的塑性区形状与 Marayama S 对数螺旋线破坏面吻合较好;在支护力较大时,剪切破坏上表面与水平面存在一定夹角,下表面平行于水平面破坏。

2)在全软和上软下硬地层,掌子面前塑性区体积比随支护压力比的变化可分为 3 个阶段:①第 1 阶段,破坏面为对数螺旋线破坏面,且随着支护压力比增大对掌子面前塑性破坏区域体积增大;②第 2 阶段,掌子面前塑性区体积比变化较小,掌子面前较为稳定;③第 3 阶段,破坏面为掌子面前剪切破坏,剪切破坏范围随支护压力比的增大而增大。

3)在全软地层中,支护压力比为 0.62~1.42 时,掌子面前较为稳定、塑性区体积大小变化速率较缓。在上软下硬地层中,支护压力比为 0.64~1.76 时,掌子面前较为稳定、塑性区体积大小变化速率较缓。

参考文献:

- [1] 师晓权. 软弱岩层隧道掌子面稳定性控制及预加固技术研究[D]. 成都:西南交通大学,2012.
SHI X Q. Research on tunnel face stability control and pre-reinforcement technology in soft surrounding rockmass [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2012.
- [2] 王立新,胡瑞青,任超,等. 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),2023,51(9):1362-1371.
WANG L X, HU R Q, REN C, et al. Study on face stability of shield tunnel in sandy cobble stratum [J]. Journal of Tongji University (natural science), 2023,51(9):1362-1371.
- [3] 关宝树. 隧道施工的技术特性、理念及其发展(上)[J]. 铁道建筑技术,2003(3):1-6.
GUAN B S. Technical characteristics, concepts and development of tunnel construction (1) [J]. Railway construction technology, 2003(3):1-6.
- [4] BROMS B B, BENNERMARK H. Stability of clay at vertical opening [J]. Journal of the soil mechanics and foundations division, 1967,93(1):71-94.
- [5] LECA E, DORMIEUX L. Upper and lower bound solutions for the face stability of shallow circular tunnels in frictional material [J]. Géotechnique, 1990,40(4):581-606.
- [6] LUNARDI P. Design and construction of tunnels; analysis of controlled deformations in rock and soils (ADECO-RS) [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
- [7] DE BUHAN P, CUVILLIER A, DORMIEUX L, et al. Face stability of shallow circular tunnels driven under the water table; a numerical analysis [J]. International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, 1999,23(1):79-95.
- [8] 朱伟,秦建设,卢廷浩. 砂土中盾构开挖面变形与破坏数值模拟研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):897-902.
ZHU W, QIN J S, LU T H. Numerical study on face movement and collapse around shield tunnels in sand [J]. Chinese journal of

- geotechnical engineering, 2005, 27(8):897-902.
- [9] 朱伟, 钟小春, 加瑞. 盾构隧道垂直土压力松动效应的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5):750-754.
ZHU W, ZHONG X C, JIA R. Simulation on relaxation effect of vertical earth pressure for shield tunnels by particle flow code [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2008, 30(5):750-754.
- [10] 黄正荣, 朱伟, 梁精华, 等. 盾构法隧道开挖面极限支护压力研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(10):112-116.
HUANG Z R, ZHU W, LIANG J H, et al. A study on the limit support pressure at excavation face of shield tunneling[J]. China civil engineering journal, 2006, 39(10):112-116.
- [11] 秦建设. 盾构施工开挖面变形与破坏机理研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
QIN J S. Study on face deformation and collapse of earth pressure shield tunnel[D]. Nanjing: Hohai University, 2005.
- [12] 张孟喜, 张梓升, 王维, 等. 正交下穿盾构开挖面失稳的离散元分析[J]. 上海交通大学学报, 2018, 52(12):1594-1602.
ZHANG M X, ZHANG Z S, WANG W, et al. Discrete element analysis for instability of undercrossing shield tunnel face[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2018, 52(12):1594-1602.
- [13] 何祥凡. 盾构隧道穿越上软下硬地层扰动机理及应对措施研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
HE X F. Research on the disturbance mechanism and counter measures of shield tunnel crossing upper-soft lower-hard stratum [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [14] 王秋实, 丁文其, 乔亚飞, 等. 复合地层盾构穿越构筑物群扰动规律及桩基隔断效应分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(8):1240-1250.
WANG Q S, DING W Q, QIAO Y F, et al. Analysis on disturbance law and pile barrier effect of shield crossing underground structures in composite strata[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2023, 51(8):1240-1250.
- [15] 连昌伟, 王兆远, 杜传军, 等. ABAQUS 后处理二次开发在塑性成形模拟中的应用[J]. 锻压技术, 2006, 31(4):111-114.
LIAN C W, WANG Z Y, DU C J, et al. Application of second-developed ABAQUS post-process on numerical simulation of plastic forming [J]. Forging & stamping technology, 2006, 31(4):111-114.
- [16] 常康康, 周储伟, 杨宇, 等. 基于 ABAQUS 的金属结构损伤导波监测参数化建模的二次开发[J]. 机械制造与自动化, 2024, 53(5):163-166.
CHANG K K, ZHOU C W, YANG Y, et al. Secondary development of parametric modeling for metal structure damage guided wave monitoring based on ABAQUS[J]. Machine building & automation, 2024, 53(5):163-166.
- [17] 王永岩, 侯顺正. 基于 ABAQUS 的白砂岩损伤的本构模型的二次开发[J]. 计算机与数字工程, 2024, 52(9):2837-2841.
WANG Y Y, HOU S Z. Secondary development of a constitutive model of white sandstone damage based on ABAQUS [J]. Computer & digital engineering, 2024, 52(9):2837-2841.
- [18] 钟同圣, 卫丰, 王鸞, 等. Python 语言和 ABAQUS 前处理二次开发[J]. 郑州大学学报(理学版), 2006, 38(1):60-64.
ZHONG T S, WEI F, WANG Z, et al. Second development for fore treatment of ABAQUS using Python language [J]. Journal of Zhengzhou University (natural science edition), 2006, 38(1):60-64.
- [19] 苏景鹤, 江丙云. ABAQUS Python 二次开发攻略[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2016.
SU J H, JIANG B Y. ABAQUS Python secondary development strategy[M]. Beijing: Posts & Telecom Press, 2016.
- [20] 朱星宇. 单洞四车道隧道施工变形特性及预警标准探讨[D]. 广州: 华南理工大学, 2022.
ZHU X Y. Discussion on deformation characteristics and early ategy [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.
- [21] MURAYAMA S, ENDO M, HASHIBA T, et al. Geotechnical aspects for the excavating performance of the shield machines [C]//The 21st Annual Lecture in Meeting of Japan Society of Civil Engineers, 1966.
- [22] 孙钧. 岩石流变力学及其工程应用研究的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(6):1081-1106.
SUN J. Rock rheological mechanics and its advance in engineering applications[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2007, 26(6):1081-1106.

(上接第12页)

- [58] SONG K, POLLALIS S N, PENA-MORA F. Project dashboard: concurrent visual representation method of project metrics on 3D building models[C]//Computing in Civil Engineering, 2005.
- [59] ERGEN E, AKINCI B, EAST B, et al. Tracking components and maintenance history within a facility utilizing radio frequency identification technology [J]. Journal of computing in civil engineering, 2007, 21(1):11-20.
- [60] KIM C, KIM H, RYU J, et al. Ubiquitous sensor network for construction material monitoring [J]. Journal of construction engineering and management, 2011, 137(2):158-165.
- [61] KAVALIAUSKAS P, FERNANDEZ J B, MCGUINNESS K, et al. Automation of construction progress monitoring by integrating 3D point cloud data with an IFC-based BIM model[J]. Buildings, 2022, 12(10):1754.
- [62] OMAR H, MAHDJOUBI L, KHEDER G. Towards an automated photogrammetry-based approach for monitoring and controlling construction site activities[J]. Computers in industry, 2018, 98:172-182.
- [63] SON H, KIM C, KWON CHO Y. Automated schedule updates using As-built data and a 4D building information model[J]. Journal of management in engineering, 2017, 33(4):04017012.
- [64] BRAUN A, TUTTAS S, BORRMANN A, et al. Improving progress monitoring by fusing point clouds, semantic data and computer vision[J]. Automation in construction, 2020, 116:103210.