

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2022033023121981

文章编号:1674-599X(2023)06-0101-10

引用格式:李辉,王怀东,王洋,等.紧邻围护结构超小净距盾构施工数值分析[J].交通科学与工程,2023,39(6):101-110.

Citation: LI Hui, WANG Huaidong, WANG Yang, et al. Numerical analysis of ultra-small interval shield receiving construction near envelope structure[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(6): 101-110.

## 紧邻围护结构超小净距盾构施工数值分析

李辉<sup>1</sup>,王怀东<sup>2</sup>,王洋<sup>1</sup>,崔广宇<sup>1</sup>,宋帅<sup>1</sup>,孙健平<sup>1</sup>

(1. 中铁九局集团第四工程有限公司, 辽宁 沈阳, 110032; 2. 中铁九局集团有限公司, 辽宁 沈阳, 110051)

**摘 要:**为研究紧邻围护结构超小净距盾构施工过程中对围岩及结构的影响,以深圳市地铁14号线的宝荷站—宝龙站区间段工程为研究背景,分析在紧邻围护结构超小净距盾构施工过程中盾构-围岩-围护结构相互作用体系的受力和地表沉降规律。采用Midas GTS有限元软件对该工程盾构施工的全过程进行数值动态仿真,得到该工程盾构掘进过程中盾构-围岩-围护结构相互作用体系的变形及受力规律,并将数值模拟结果与监测结果进行对比,验证了数值模拟的准确性;在此基础上分析了土仓压力、同步注浆压力、刀盘扭矩等参数对土层及既有结构稳定性的影响,给出了施工参数建议值。研究表明:若依照参数建议值进行施工,产生的地表沉降等参数均在容许范围内。该研究可为类似工程提供参考。

**关键词:**小净距;盾构施工;数值分析;围护结构;盾构参数

中图分类号:U491.9

文献标志码:A

## Numerical analysis of ultra-small interval shield receiving construction near envelope structure

LI Hui<sup>1</sup>, WANG Huaidong<sup>2</sup>, WANG Yang<sup>1</sup>, CUI Guangyu<sup>1</sup>, SONG Shuai<sup>1</sup>, SUN Jianping<sup>1</sup>

(1. China Railway No.9 Group Fourth Engineering Co., Ltd., Shenyang 110032, China;

2. China Railway No.9 Group Co., Ltd., Shenyang 110051, China)

**Abstract:** In order to study the influence of the construction process of the ultra-small spacing shield adjacent to the envelope structure on the surrounding rock and structure. Taking the construction of Shenzhen metro line 14 from Baohe station to Baolong station as the background, the stress law and surface settlement law of shield - surrounding rock-envelope structure interaction system were analyzed during the construction of ultra-small clear distance shield adjacent to the envelope structure. The finite element software was used to simulate the whole process of shield construction. The deformation and stress law of the interaction system were obtained during the process of shield tunneling. Compared with the monitoring results, the accuracy of numerical simulation was proved. Furthermore, the influence of parameters such as soil chamber pressure, synchronous grouting pressure and cutterhead torque on the stability of soil layer and existing structure was analyzed. And the appropriate construction parameters were proposed. The results show that, when the proposed parameters are used in construction, that the displacement parameters such as surface settlement are within the allowable range. The correctness of the research method and conclusion in this paper is verified.

**Key words:** small interval; shield construction; numerical analysis; envelope structure; shield parameter

收稿日期:2022-03-30

作者简介:李辉(1981—),女,中铁九局集团第四工程有限公司高级工程师。E-mail:447608207@qq.com

随着中国城市轨道交通的发展,新轨道建设经常会不可避免地经过甚至跨越既有轨道及建筑物。即使采用在临近围护结构周围进行盾构施工的方法亦会对既有围护结构及地面建筑物造成影响。因此,分析在紧邻围护结构盾构施工过程中的结构受力、变形规律和选取合适的盾构施工参数就显得十分必要。孙凤明<sup>[1]</sup>利用有限元软件分析了在盾构过程中注浆压力和附加推力对既有线路的影响。董云鹏等<sup>[2]</sup>利用有限元软件分析了盾构隧道近距离侧穿建筑物对其产生的影响,并分析了左、右两线施工顺序不同所产生的差异。葛取平<sup>[3]</sup>依托南宁市轨道交通工程,讨论了小间距并行暗挖隧道在施工中应当采取的施工措施。朱文民<sup>[4]</sup>利用有限差分程序分析了小间距穿越既有隧道产生的沉降变形并优化了施工参数。NGOC-ANH等<sup>[5]</sup>分析了小间距双线隧道在建设过程中的相互影响,并分析了隧道面滞后距离的影响。陈凯<sup>[6]</sup>依托呼和浩特市隧道建设工程,采用神经网络模型对地铁盾构隧道下穿矩形顶管隧道施工进行了参数分析,并探讨了其变形机制。杨德春等<sup>[7-10]</sup>针对既有铁路线周边新建隧道引起的结构应力及变形做了分析,并给出了相应的施工措施。姜克寒等<sup>[11-14]</sup>针对断层破碎带中盾构掘进施工给出了参数优化建议。目前的研究主要集中在轨道施工对临近隧道或地上建筑物的影响分析,而施工过程中对地下紧邻围护结构的影响分析较少。甘鹏路<sup>[15]</sup>对富水软弱地层浅埋暗挖隧道地层的变形规律及预测进行了研究,提出了一种基于有限元分析的地层变形预测方法。该方法可以较准确地预测隧道地层的变形情况,为隧道设计和施工提供参考。杜建明等<sup>[16-19]</sup>通过数值模拟

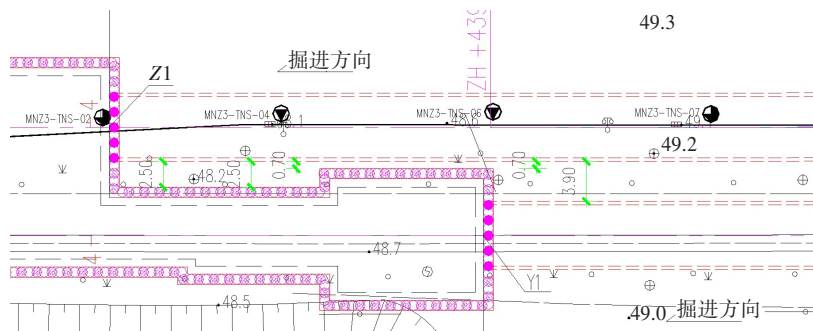
的方法,对地表变坡下浅埋偏压隧道围岩压力进行了分析。刘远鹏等<sup>[20-26]</sup>依托实际工程,采用试验研究、理论分析和数值模拟相结合的方法,研究了在各种地质条件下浅埋小净距隧道的围岩压力与变形的规律。

深圳市城市轨道交通14号线宝荷站—宝龙站区间段工程的地质情况较复杂,施工安全性要求高,盾构隧道施工距离围护桩结构仅为0.7 m,这种超小间距盾构掘进在工程实践中较为少见。本研究基于该项目工程实际工况,采用Midas GTS有限元软件,对紧邻围护结构小净距盾构的施工过程进行数值模拟,分析在该工程盾构掘进过程中盾构-围岩-围护结构间的受力情况及变形规律及土仓压力、同步注浆压力、刀盘扭矩等参数对土层及围护桩结构稳定性的影响,给出适用于紧邻围护结构盾构施工参数的建议值,该研究可为类似盾构工程提供参考。

## 1 工程概况

### 1.1 工程简介

深圳市地铁14号线工程宝荷站—宝龙站区间自宝荷站出发后,沿宝龙大道南侧绿化带方向沿东敷设,依次经过宝龙一路、二路、三路后,在宝龙四路到达宝龙站。该区间右线起点里程为DK32+438.557,终点里程为DK33+754.117,该区间右线总长为1 315.560 m。左线起点里程为ZDK32+401.851,终点里程为ZDK33+754.117,区间左线总长为1 352.447 m。该工程的局部平面图如图1所示,围护结构剖面如图2所示。



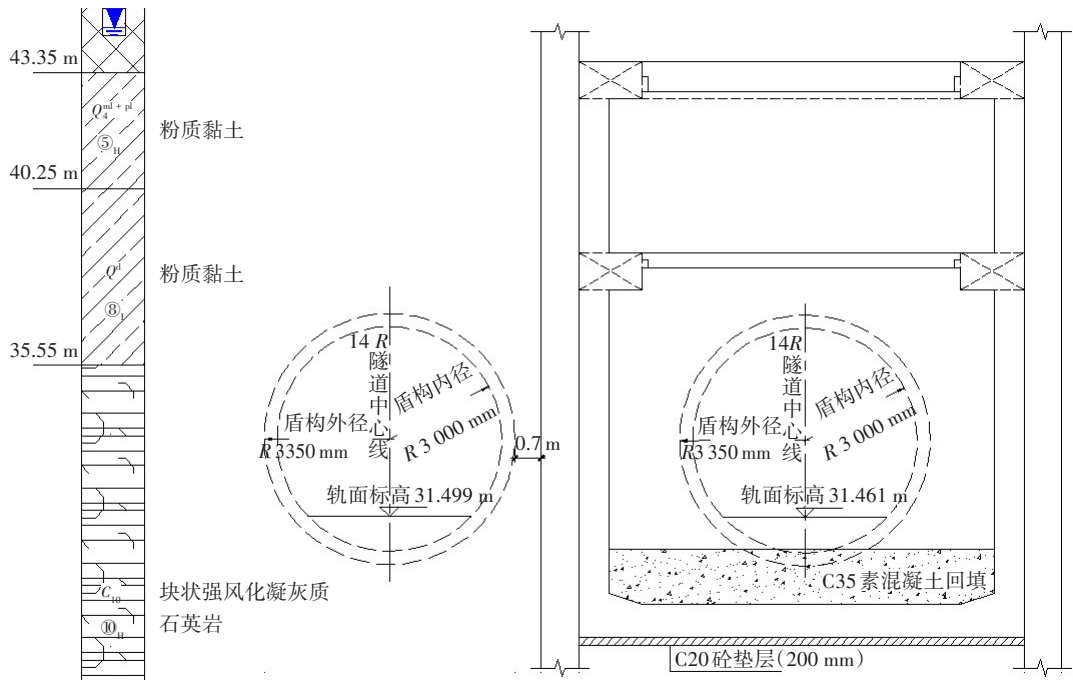


图2 围护结构剖面

Fig. 2 Envelope structure section

1.2 工程地质概况

该工程所处地层主要为素填土、粉质黏土、块状强风化凝灰质石灰岩。开挖隧道上覆粉质黏土为6.60 m,回填土为5.30 m。标高15.35 m至35.55 m间为块状强风化凝灰质石灰岩,标高35.55 m至40.25 m间为粉质黏土,标高40.25 m至43.35 m间为粉质黏土,标高43.35 m至48.65 m间为素填土,各土层参数见表1。

表1 地层参数表

Table 1 Strata parameter table

岩土层名称	重度/ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	弹性模量/ MPa	泊松比
素填土	18.2	15.0	15.0	5.42	0.30
粉质黏土	18.3	23.1	21.1	5.12	0.35
粉质黏土	19.1	24.4	19.4	5.50	0.35
块状强风化凝灰质石灰岩	20.5	42.0	32.0	15.2	0.30

2 数值模拟

采用 Midas GTS 有限元软件对深圳市地铁 14 号

线工程宝荷站—宝龙站区间段的盾构掘进过程进行仿真模拟,研究在既有车站和围护结构的条件下,在上软下硬的地层中盾构掘进对地层稳定性的影响。

2.1 模型建立

在该有限元模型中,设  $X$  轴方向为与隧道轴线方向垂直的横方向, $Y$  轴方向为隧道纵方向, $Z$  轴方向为重力方向。该模型沿  $X$ 、 $Y$  轴的计算范围为  $60\text{ m}\times 90\text{ m}$ 。采用位移边界条件,上表面为地表,采用自由边界;水平侧分别限制  $X$  方向、 $Y$  方向位移;底部为固定边界,土体本构采用莫尔-库伦模型。有限元模型构造如图3所示。

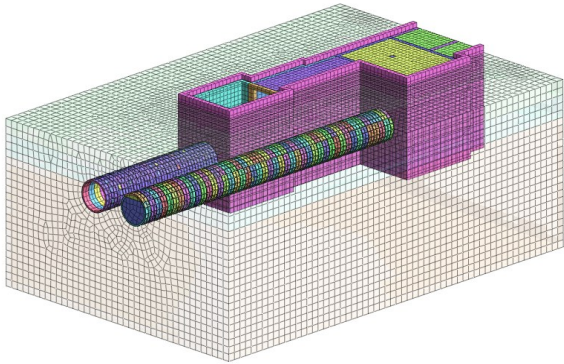


图3 计算模型内部构造

Fig. 3 The internal structure of the computational model

## 2.2 施工过程模拟

该工程的左线隧道掘进施工时间比其右线隧道掘进时间早 30 d, 为简化有限元模型, 假定该模型在左线隧道开挖结束后, 再对右线隧道进行开挖。本研究主要分析该工程右线隧道掘进对接收段的影响。

盾构开挖过程模拟主要包括盾构开挖、土仓压力、扭矩、顶推力的施加及注浆加固等过程。在实际施工过程中, 由于盾构推进的距离较长, 且盾构穿越土层的情况较复杂, 采取交替钝化隧道土体单元和激活盾壳单元、管片单元、注浆层的方法来模拟隧道开挖及注浆加固的过程。在该隧道的开挖过程中, 盾壳主要对周围土体起支撑作用, 钝化盾壳模拟盾尾离开当前位置的过程; 钝化开挖区域表示在实际掘进过程中将该区域的土体挖出; 激活管片模拟实际掘进过程中管片的拼装; 激活注浆模拟实际掘进过程中的盾尾注浆过程。注浆需要经过固化过程, 因此, 在全部开挖过程完成后对注浆层进行固化处理, 固化通过改变材料属性来模拟。在有限元模型中, 盾壳、注浆层均采用板单元模拟, 刀盘与土体间的切削作用通过在土体表面施加环向力来模拟。注浆从加固到形成强度承载需要一定时间, 故通过注浆压力和注浆层的施加来模拟该过程。在此注浆加固期间, 管片施工随着盾构机的推进仍在不断进行。该模型盾构掘进过程如图 4 所示。

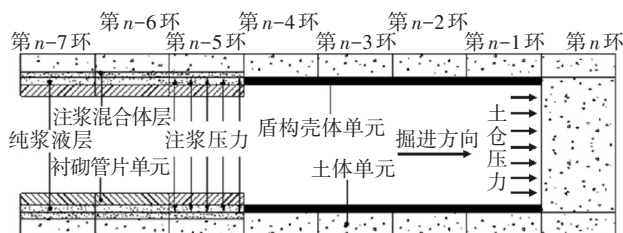


图4 盾构掘进过程模拟

Fig. 4 Shield tunneling process simulation

## 3 计算结果分析

### 3.1 计算结果对比验证

将现场实际监测得到的沉降数据与数值模拟计算结果进行对比, 选取施工现场 DBC32460 号监

测点作为对比对象。此处沉降的数值模拟值与实测数据对比如图 5 所示。在图 5 中, 横轴  $X$  为 0 m 是整个模型  $X$  方向的中点, 该工程的隧道半径为 3.35 m, 左、右线隧道的最小间距为 3.90 m,  $X$  为  $\pm 5.40$  m 这两处分别为左、右线隧道轴线的所处位置。

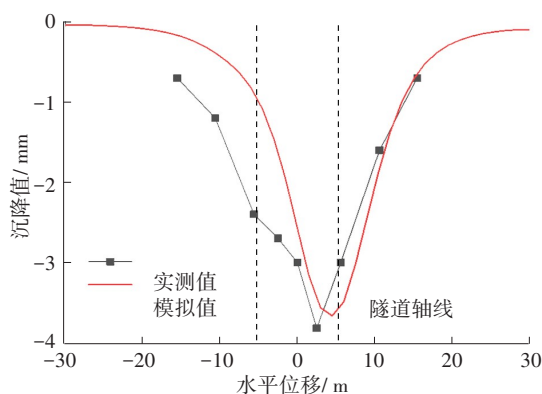


图5 沉降数值模拟与实测数据对比

Fig. 5 Comparison of settlement numerical simulation of and measured data

从图 5 可以看出, 在沉降曲线变化趋势上, 监测横截面的数值模拟结果与实际监测数据基本上一致, 曲线总体呈凹槽型。左侧隧道沉降监测数据略大于数值模拟结果, 这是因为数值模拟在计算时没有考虑左线隧道的开挖扰动, 而监测测点在实际工程中受到左线隧道的影响, 因此实测值会略大于模拟值。

数值模拟对参数进行了简化, 且监测过程中会存在一定的误差。虽然有限元模型计算结果与监测数据之间存在一些差异, 但两者在沉降曲线的变化趋势上基本一致。这表明了数值模拟方法的正确性, 为后续数值模拟计算提供了可供参考的依据。

### 3.2 结构位移分析

为研究盾构掘进对附近既有围护结构的影响, 绘制了车站-围护结构在  $X$ 、 $Z$  方向上的位移云图, 分别如图 6~7 所示, 紧邻围护结构桩在  $X$  方向上的位移变化如图 8 所示, 地表在  $Z$  方向上的位移变化如图 9 所示。

在该模型中, 每一施工步均前进 1.5 m。从图 8 可以看出, 在盾构土仓压力为 200 kPa, 顶推力为 8 000 kN, 扭矩为 1 500 kN·m, 注浆压力为 200 kPa



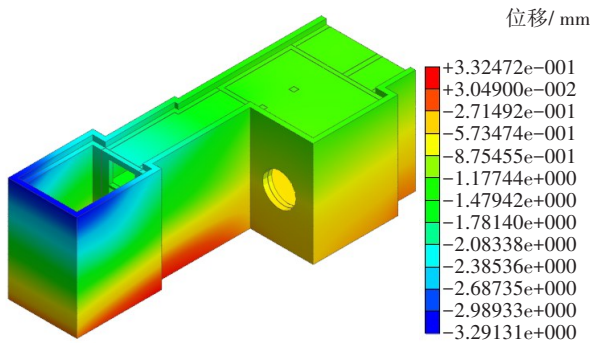


图6 车站-围护结构X方向位移云图

Fig. 6 The X-direction displacement cloud of the station - envelope structure

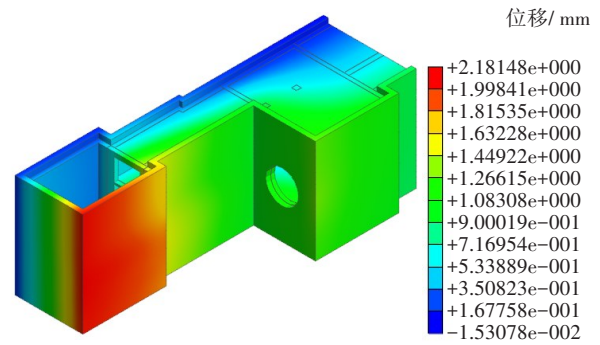


图7 车站-围护结构Z方向位移云图

Fig. 7 The Z-displacement cloud of the station - envelope structure

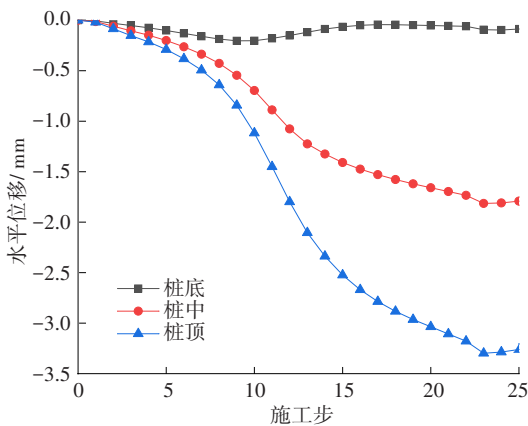


图8 紧邻围护结构桩X方向位移变化

Fig. 8 Displacement change in X direction of immediately adjacent enclosure pile

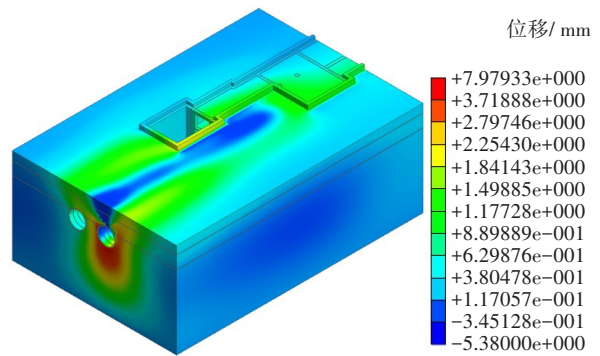


图9 地表Z方向位移变化

Fig. 9 Variation diagram of surface displacement in Z direction

的条件下,盾构开挖引起的车站结构最大水平位移为3.29 mm。当工程进展到第10个施工步时,盾构开挖接近紧邻围护结构,紧邻结构的水平位移增长较明显。当工程进展到第23个施工步时,盾构远离紧邻围护结构,紧邻结构的水平位移达到最大。盾构开挖引起的最大竖向位移为2.18 mm,该最大竖向位移出现在紧邻盾构的围护结构处。

从图9可以看出,盾构开挖引起的地表最大沉降为1.24 mm,最大隆起为1.84 mm。盾构开挖引起的管片最大沉降为5.38 mm,出现在隧道拱顶;最大值为7.98 mm,出现在隧道拱底。该最大沉降与该最大隆起均出现在管片衬砌上。

### 3.3 土仓压力影响分析

在盾构土仓压力分别为150、200、250、300 kPa,顶推力为8 000 kN,扭矩为1 500 kN·m,注浆压力为200 kPa,二次注浆为0.7 m<sup>3</sup>的条件下,研究

盾构掘进对地层稳定性和围护结构的影响。模型计算结果分别如图10~12所示。

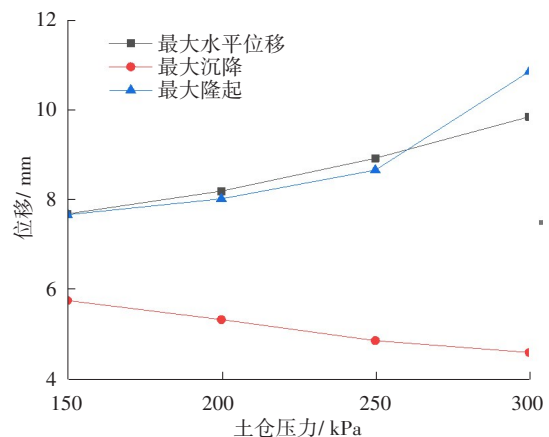


图10 不同土仓压力下先行隧洞管片的位移变化

Fig. 10 Displacement diagram of advance tunnel segment under different soil bin pressure

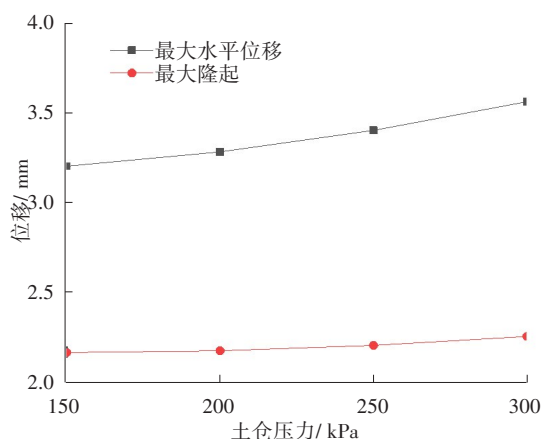


图11 不同土仓压力下围护结构位移变化

Fig. 11 Displacement diagram of retaining structure under different soil bin pressure

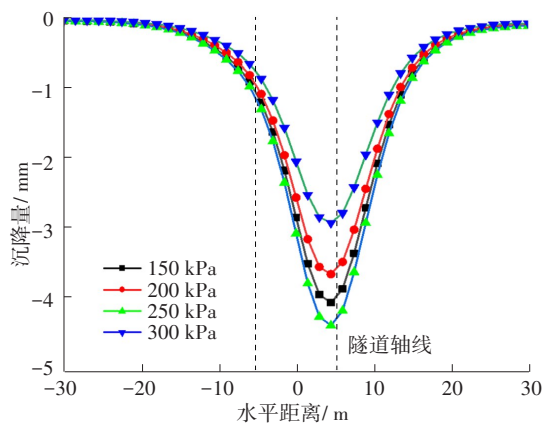


图12 不同土仓压力下地表沉降

Fig. 12 Surface settlement under different soil bin pressure

从图10可以看出,当土仓压力增大时,先行隧道拱顶的最大沉降从5.75 mm减小到4.61 mm,隧道拱底最大隆起从7.63 mm增加到10.77 mm,管片最大水平位移从7.65 mm增加到9.78 mm。

从图11可以看出,随着土仓压力增加,围护结构的水平位移和最大隆起在增加。

从图12可以看出,在掘进过程中,当盾构机土仓压力低于200 kPa时,地表最大沉降随着土仓压力的增加而减小;当盾构机土仓压力为200 kPa时,地表最大沉降达到最小;当盾构机土仓压力增大到300 kPa以上后,地层整体向上隆起。因此,当盾构机土仓压力的取值为150~200 kPa较为合适,可满足地表变形控制要求。

### 3.4 注浆压力影响分析

在土仓压力为200 kPa,顶推力为8 000 kN,扭矩为1 500 kN·m,注浆压力分别为100、150、200、

250、300 kPa,二次注浆为0.7 m<sup>3</sup>的条件下,研究盾构掘进对地层稳定性和围护结构的影响。计算结果分别如图13~15所示。

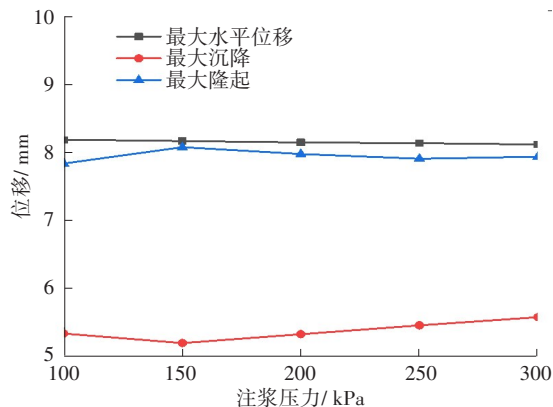


图13 不同注浆压力下先行隧洞管片位移变化

Fig. 13 Displacement diagram of the advance tunnel segment under different grouting pressure

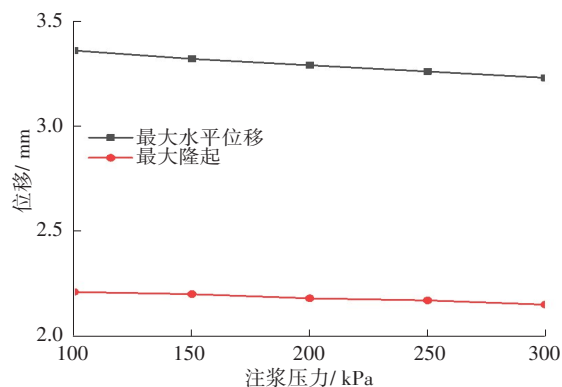


图14 不同注浆压力下围护结构位移变化

Fig. 14 Displacement diagram of retaining structure under different grouting pressure

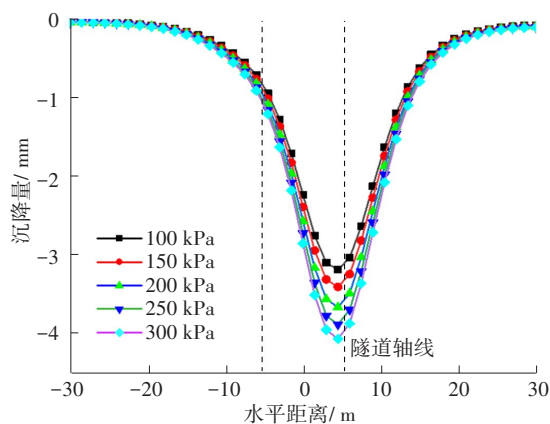


图15 不同注浆压力下地表沉降量

Fig. 15 Surface settlement value under different grouting pressure

从图13可以看出,当注浆压力增大时,先行隧道拱顶的最大沉降从5.75 mm降低到5.61 mm,隧道拱底的最大隆起从7.63 mm增加到7.77 mm,管片最大水平位移从8.19 mm减小到8.12 mm。

从图14可以看出,围护结构的水平位移和隆起随着注浆压力增加而逐渐减小。

从图15可以看出,地表最大沉降随着注浆压力的增加而增加。当注浆压力为150~200 kPa时,地表变形能被较好地控制。

### 3.5 刀盘扭矩影响分析

为分析盾构掘进时的地层稳定性,在土仓压力为200 kPa,顶推力为8 000 kN,扭矩分别为1 500、1 750、2 000、2 250和2 500 kN·m,且注浆压力为200 kPa,二次注浆0.7 m<sup>3</sup>的条件下,研究盾构掘进开挖对地层稳定性和围护结构的影响。计算结果分别如图16~18所示。

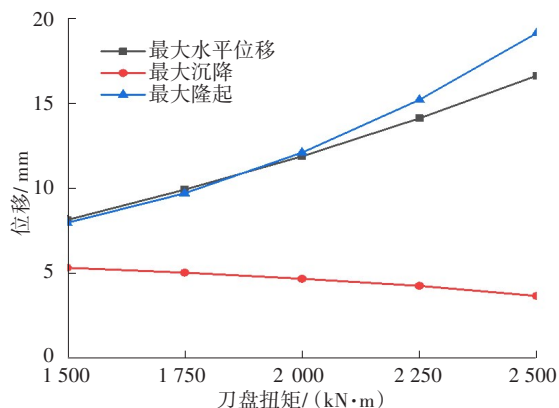


图16 不同刀盘扭矩下先行隧洞管片位移变化图

Fig. 16 Displacement diagram of advance tunnel segment under different cutter head torque

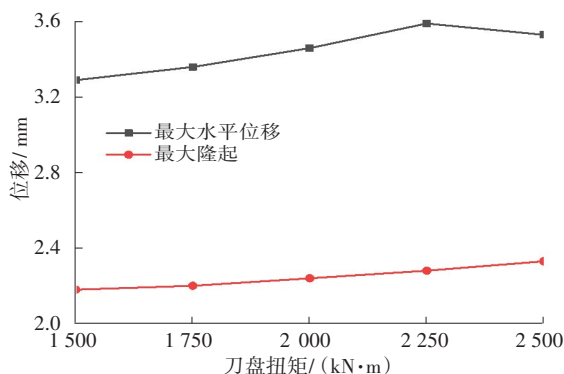


图17 不同刀盘扭矩下围护结构位移变化

Fig. 17 Displacement of enclosure structure under different cutter head torque

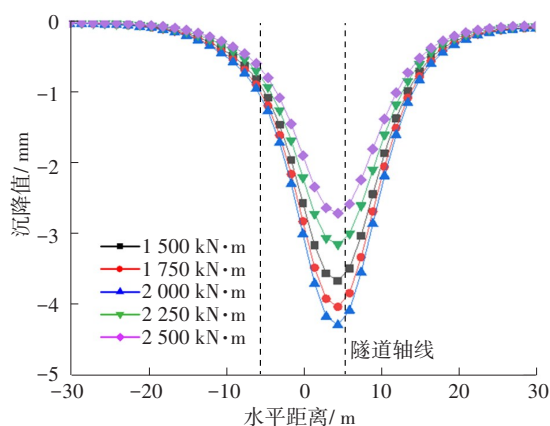


图18 不同刀盘扭矩下地表沉降值

Fig. 18 Surface settlement value under different cutter head torque

从图16可以看出,当刀盘扭矩增大时,隧道管片最大沉降从5.04 mm减小到4.06 mm,隧道拱底的最大隆起从7.94 mm增加到19.18 mm,隧道管片最大水平位移从7.94 mm增加到16.66 mm。

从图17可以看出,围护结构的最大水平位移和隆起随着刀盘扭矩的增加而逐渐增加,但当刀盘扭矩为2 250 kN·m时,维护结构的最大水平位移开始下降。

从图18可以看出,当刀盘扭矩为1 500~2 000 kN·m时,由于开挖引起地层损失,地表最大沉降随着刀盘扭矩的增加而增加,而当刀盘扭矩超过这一范围时,地表最大沉降随刀盘扭矩的增加而减小。产生这一现象的原因是当刀盘扭矩超过2 000 kN·m时,刀盘扭矩的增大造成了对土体扰动的增大,较浅的上覆土层较浅与较厚的回填土层被较大扭矩扰动,在竖直方向产生的隆起抵消了部分沉降。因此,当刀盘扭矩为1 500~1 750 kN·m时,地表变形能被较好地控制。

### 3.6 监控量测数据分析

综上所述,推荐的参数分别为:

- 1) 土仓压力值为150~200 kPa;
- 2) 注浆压力值为150~200 kPa;
- 3) 刀盘扭矩值为1 500~1 750 kN·m。

按这些参数值进行盾构施工,选取部分监测点施工过程中的地表沉降监测数据进行分析。

地表监测点布置如图19所示。在图19中,横

向共9个监测点,其均布置在盾构隧道上方,以两—道中间为原点。其中,DB-2、DB-3、DB-4这3个监测点的地表沉降曲线如图20所示。

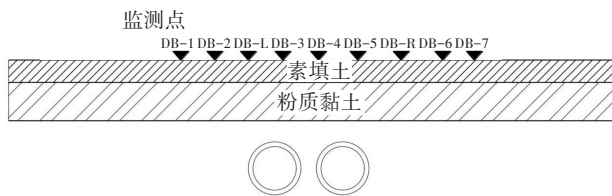


图19 地表监测点布置

Fig. 19 Layout of surface monitoring points

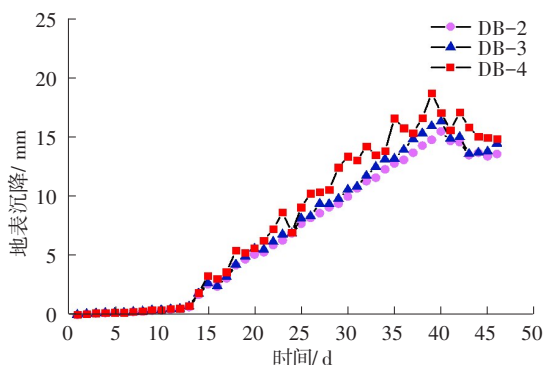


图20 监测点地表沉降曲线

Fig. 20 Surface settlement curve of monitoring points

从图20可以看出,在前10 d中,DB-2、DB-3、DB-4这3个监测点的沉降曲线整体较为平整。当盾构掘进至紧邻段时(约为13 d),地表沉降开始增加,其中,DB-2处的地表沉降增加较缓慢,在距离后行隧洞较近的DB-4号测点处的地表沉降增加相对更大一些。在盾构施工后期,各测点的地表沉降均有不同程度的减小。即左线隧道在掘进段时产生的沉降较小,右线隧道在掘进段产生的沉降较大,施工全过程的沉降均在允许范围内,验证了数值分析的准确性。

## 4 结论

本研究对深圳地铁复杂地层中紧邻围护结构小净距盾构接收施工进行全过程施工模拟,通过建立盾构-围岩-围护桩三维有限元分析模型,考虑其相互作用关系,分析盾构掘进过程中相互作用体系的变形及受力规律;分析土仓压力、同步注浆压力、刀盘扭矩等参数对土层及围护桩结构稳定性的影

响规律。结合建模计算结果分析,可以得到结论:

1) 将有限元模型计算的沉降数据与项目现场沉降监测数据进行对比,验证了使用该有限元模型进行施工过程模拟的准确性。

2) 后行隧洞的盾构开挖引起先行隧洞最大沉降为5.38 mm,该最大沉降出现在隧道拱顶;先行隧洞最大隆起为7.98 mm,该最大隆起出现在隧道拱底。最大沉降与最大隆起均出现在管片衬砌结构上。

3) 当盾构机土仓压力从150 kPa逐渐增大到200 kPa时,地表最大沉降随着土仓压力的增加,先减小后增大;当土仓压力为200 kPa时,地表最大沉降达到最小;当土仓压力增大到300 kPa以上后,地层整体向上隆起;地表最大沉降随着注浆压力的增加而增加;当刀盘扭矩低于2 000 kN·m时,地表最大沉降随着刀盘扭矩的增加而增加;当刀盘扭矩超过2 000 kN·m时,地表最大沉降随刀盘扭矩的增加而减小。

4) 基于有限元模型分析结果给出了深圳市地铁14号线宝荷站—宝龙站内盾构施工的建议施工参数,根据该施工参数进行的项目施工取得了较好的施工效果,现场监测数据也验证了建议施工参数的正确性。

## 参考文献(References):

- [1] 孙凤明. 小净距并行盾构隧道的掘进相互影响分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.  
SUN Fengming. Analysis of interaction between small-spacing parallel shield tunnel excavations [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [2] 董云鹏, 孙伯乐. 小净距地铁隧道近距离侧穿建筑物影响研究[J]. 铁道工程学报, 2018, 35(11): 87-91. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2018.11.016.  
DONG Yunpeng, SUN Bole. Research on the influence of small distance subway tunnel passing through buildings at short distance [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2018, 35(11): 87-91. DOI: 10.3969/j.issn.1006-2106.2018.11.016.
- [3] 葛取平. 城市轨道交通暗挖与盾构小净距并行隧道施工[J]. 山西建筑, 2016, 42(8): 203-204. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2016.08.104.  
GE Quping. On underground excavation and shield small



- net-span parallel tunnel construction along urban rail traffic[J]. Shanxi Architecture, 2016, 42(8): 203-204. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2016.08.104.
- [4] 朱文民. 盾构隧道小净距下穿既有隧道施工技术研究[J]. 山西建筑, 2012, 38(13): 216-217, 288. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2012.13.062.
- ZHU Wenmin. Study on the construction technology of short-distance shield tunnel under-crossing existing tunnel[J]. Shanxi Architecture, 2012, 38(13): 216-217, 288. DOI: 10.13719/j.cnki.cn14-1279/tu.2012.13.062.
- [5] NGOC-ANH DO, DANIEL DIAS, ORESTE P, et al. Three-dimensional numerical simulation of a mechanized twin tunnels in soft ground [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 40-51. DOI: 10.1016/j.tust.2014.02.001.
- [6] 陈恺. 地铁盾构隧道下穿矩形顶管隧道施工参数分析及变形机制[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021. DOI: 10.27724/d.cnki.gnmkg.2021.000407.
- CHEN Kai. Analysis of construction parameters and deformation mechanism of metro shield tunnel undergoing rectangular jacking tunnel[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021. DOI: 10.27724/d.cnki.gnmkg.2021.000407.
- [7] 杨德春, 刘建国. 对建成地铁车站结构改造设计与施工的数值模拟分析[J]. 现代隧道技术, 2012, 49(3): 94-103. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2012.03.003.
- YANG Dechun, LIU Jianguo. Numerical simulation analysis of the design and construction of a restructured metro station[J]. Modern Tunnelling Technology, 2012, 49(3): 94-103. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2012.03.003.
- [8] 朱郁文. 既有地铁车站暗挖扩建施工安全性影响研究[J]. 建筑机械化, 2018, 39(7): 40-43. DOI: 10.13311/j.cnki.conmec.2018.07.013.
- ZHU Yuwen. Study on existing subway station underground excavation and extension construction safety impact[J]. Construction Mechanization, 2018, 39(7): 40-43. DOI: 10.13311/j.cnki.conmec.2018.07.013.
- [9] 李建设, 陈慧超, 李政. 深圳地铁11号线车公庙站—红树湾站区间盾构隧道小净距上穿既有区间隧道施工关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(4): 374-379. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.04.014.
- LI Jianshe, CHEN Huichao, LI Zheng. Key construction technologies for shield-bored tunnel of Chegongmiao Station-hongshuwan Station section on No. 11 line of Shenzhen metro crossing closely above existing metro line[J]. Tunnel Construction, 2014, 34(4): 374-379. DOI: 10.3973/j.issn.1672-741X.2014.04.014.
- [10] 章慧健, 仇文革. 小净距城市浅埋隧道夹岩力学特征的数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(3): 22-26, 32. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6582.2009.03.005.
- ZHANG Huijian, QIU Wenge. Mechanical performance of the sandwiched rock between twin shallow tunnels[J]. Modern Tunnelling Technology, 2009, 46(3): 22-26, 32. DOI: 10.3969/j.issn.1009-6582.2009.03.005.
- [11] 姜克寒, 刘邦, 秦坤元, 等. 断层破碎带中泥水盾构掘进参数优化研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(3): 43-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.007.
- JIANG Kehan, LIU Bang, QIN Kunyuan, et al. Study on the optimization for mud-water shield driving parameters in fault fracture zone[J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(3): 43-49. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.03.007.
- [12] 陈红军, 刘新荣, 杜立兵, 等. 浅埋层状岩体偏压隧道滑移破坏机理及判定方法[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1733-1741.
- CHEN Hongjun, LIU Xinrong, DU Libing, et al. Sliding failure mechanism and its criterion of unsymmetrical loading shallow buried tunnel in layered rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1733-1741.
- [13] 卢光兆, 周博, 徐锋, 等. 浅埋偏压隧道进洞施工围岩稳定分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2021, 51(4): 61-70. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2020.523.
- LU Guangzhao, ZHOU Bo, XU Feng, et al. Stability analysis and construction mechanics of shallow buried bias tunnel openings[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2021, 51(4): 61-70. DOI: 10.6040/j.issn.1672-3961.0.2020.523.
- [14] 杨会. 盾构刀具的切削机理分析及多目标优化设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
- YANG Hui. Analysis of cutting mechanism and multi-objective optimization design of shield tool [D]. Changsha: Hunan University, 2015.
- [15] 甘鹏路. 富水软弱地层浅埋暗挖隧道地层变形规律及预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- GAN Penglu. Research on the rules and prediction of

- ground deformation induced by tunnelling with shallow tunnelling method under water-rich soft stratum [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [16] 杜建明, 房倩, 海路, 等. 地表变坡下浅埋偏压隧道围岩压力计算方法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4088-4098. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.029.
- DU Jianming, FANG Qian, HAI Lu, et al. Calculation method for surrounding rock pressure of shallow tunnel with asymmetrical pressure of variable slopes[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2021, 52(11): 4088-4098. DOI: 10.11817/j.issn.1672-7207.2021.11.029.
- [17] 严涛, 李坤杰, 牟智恒, 等. 变坡条件下浅埋偏压隧道围岩压力解析法[J]. 西南交通大学学报, 2020, 55(3): 531-536. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180825.
- YAN Tao, LI Kunjie, MOU Zhiheng, et al. Analytical method for calculation of surrounding rock pressure of shallow-buried and unsymmetrically loaded tunnel adjacent to variable slope [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 531-536. DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.20180825.
- [18] 孙振宇, 张顶立, 房倩, 等. 浅埋小净距公路隧道围岩压力分布规律[J]. 中国公路学报, 2018, 31(9): 84-94. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.09.010.
- SUN Zhenyu, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Distribution of surrounding rock pressure of shallow highway tunnels with small spacing[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(9): 84-94. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7372.2018.09.010.
- [19] 卢晓颖. 考虑时间效应的深埋小净距隧道围岩压力分析[J]. 公路交通科技, 2021, 38(10): 100-106, 143. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.10.013.
- LU Xiaoying. Analysis on surrounding rock pressure on deep buried neighborhood tunnel considering time-dependency effect [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2021, 38(10): 100-106, 143. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2021.10.013.
- [20] 刘远鹏, 邓荣斌, 王子茂, 等. 岩溶区特大断面小净距隧道群综合探测成果分析[J]. 武汉工程大学学报, 2020, 42(5): 546-551. DOI: 10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.201911013.
- LIU Yuanpeng, DENG Rongbin, WANG Zimao, et al. Analysis of comprehensive detection results of large section and small clear distance tunnel group in Karst area [J]. Journal of Wuhan Institute of Technology, 2020, 42(5): 546-551. DOI: 10.19843/j.cnki.CN42-1779/TQ.201911013.
- [21] 武松, 汤华, 罗红星, 等. 浅埋大断面公路隧道渐进破坏规律与安全控制[J]. 中国公路学报, 2019, 32(12): 205-216. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.021.
- WU Song, TANG Hua, LUO Hongxing, et al. Progressive failure law and control criterion for safe construction of shallow buried highway tunnel with different grades of surrounding rock[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(12): 205-216. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2019.12.021.
- [22] 赵晓勇. 地铁盾构隧道侧穿高铁桥群桩设置隔离桩影响分析[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 116-120, 126. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.05.024.
- ZHAO Xiaoyong. Influence analysis of setting separation piles for metro shield tunnel side-crossing high-speed railway bridge pile groups [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 116-120, 126. DOI: 10.16037/j.1007-869x.2021.05.024.
- [23] 陈红军, 刘新荣, 杜立兵, 等. 浅埋层状岩体偏压隧道滑移破坏机理及判定方法[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(6): 1733-1741.
- CHEN Hongjun, LIU Xinrong, DU Libing, et al. Sliding failure mechanism and its criterion of unsymmetrical loading shallow buried tunnel in layered rock mass [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(6): 1733-1741.
- [24] 李沅展, 岳健, 安永林, 等. 河底浅埋小净距隧道施工期渗流性状分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(4): 47-54. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.007.
- LI Fengzhan, YUE Jian, AN Yonglin, et al. Analysis of seepage characteristics during construction of shallow buried tunnels with small clear spacing at the bottom of river [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(4): 47-54. DOI: 10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.04.007.
- [25] 毕志刚, 李文杰, 吕文国, 等. 闽南小净距隧道中夹岩力学特性与加固措施[J]. 科学技术与工程, 2021, 21

- 程与信息, 2022, 22(1): 115-123. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.01.013.
- ZHANG Chuntian, QI Jianguo, YANG Lixing, et al. Robust train operation plan based on uncertain passenger demands for high-speed railway corridors[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(1): 115-123. DOI: 10.16097/j.cnki.1009-6744.2022.01.013.
- [28] 薛锋, 范千里, 罗建. 基于多层复杂网络的轨道交通产业链优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2021, 19(2): 65-73, 83. DOI: 10.3969/j. issn. 1672-4747.2021.02.007.
- XUE Feng, FAN Qianli, LUO Jian. Optimization of rail transit industry chain based on multi-layer complex networks[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(2): 65-73, 83. DOI: 10.3969/j. issn.1672-4747.2021.02.007.
- [29] FATHI A, KARIMI B, SAEN R F. Sustainability assessment of supply chains by a novel robust two-stage network DEA model: a case study in the transport industry [J]. Soft Computing, 2022, 26(13): 6101-6118. DOI: 10.1007/s00500-022-07013-y.
- [30] BRUNS F, GOERIGK M, KNUST S, et al. Robust load planning of trains in intermodal transportation [J]. OR Spectrum, 2014, 36(3): 631-668. DOI: 10.1007/s00291-013-0341-8.
- [31] VANKERSCHAUER K, WILLOCX F, SMOUT C, et al. Mathematical modeling of temperature and gas composition effects on visual quality changes of cut endive[J]. Journal of Food Science, 1996, 61(3): 613-620. DOI: 10.1111/j.1365-2621.1996.tb13170.x.
- [32] MA Q L, WANG W Y, PENG Y, et al. An optimization approach to the intermodal transportation network in fruit cold chain, considering cost, quality degradation and carbon dioxide footprint [J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(1): 61-69. DOI: 10.2478/pomr-2018-0007.
- [33] LELEŃ P, WASIAK M. The model of selecting multimodal technologies for the transport of perishable products [J]. Archives of Transport, 2019, 50(2): 17-33. DOI: 10.5604/01.3001.0013.5573.
- [34] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization [C]//Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks. November 27 - December 1, 1995, Perth, WA, Australia. IEEE, 1995(4): 1942-1948. DOI: 10.1109/ICNN.1995.488968.
- [35] SHI Y, EBERHART R C. Empirical study of particle swarm optimization [C]//Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406). July 6-9, 1999, Washington, DC, USA. IEEE, 1999(3): 1945-1950. DOI: 10.1109/CEC.1999.785511.
- [36] SHI Y, EBERHART R. A modified particle swarm optimizer [C]//1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No.98TH8360). May 4-9, 1998, Anchorage, AK, USA. IEEE, 1998: 69-73. DOI: 10.1109/ICEC.1998.699146.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:李岳林)

(上接第110页)

- (34): 14805-14813. DOI: 10.3969/j. issn. 1671-1815.2021.34.047.
- BI Zhigang, LI Wenjie, LYU Wenguo, et al. Mechanical characteristics and reinforcement measures of middle rock column of shallow bias small spacing tunnel in southern Fujian [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14805-14813. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2021.34.047.
- [26] 潘文韬, 吴枋胤, 何川, 等. 浅埋偏压隧道施工工法研究与非对称设计优化[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(增刊1): 352-361.
- PAN Wentao, WU Fangyin, HE Chuan, et al. Construction methods and asymmetric design optimization for shallow-buried tunnels subjected to unsymmetrical loads[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(sup 1): 352-361.
- (责任编辑:李脉;校对:罗容;英文编辑:陈璐)