DOI:10.11921/j.issn.2095-8382.20220402

PBA 工法暗挖车站导洞施工应力场分布研究

黄 博¹,曾 宇²,杜怡韩¹,于 千¹,邹 煜²,周莉莉²

(1.安徽工程大学 建筑工程学院,安徽 芜湖 241000;2.中国矿业大学(北京) 力学与建筑工程学院,北京 100083)

摘 要:为研究地铁车站采用 PBA 工法施工时,导洞开挖顺序对车站范围土体竖向应力分布的影响,利用数值模拟的方法,建立了双层双向开挖的导洞群数值模型,提出 4 种导洞施工方案进行对比,给出了特征平面应力场分布图,着重分析了不同施工方案对应力场分布规律、应力集中系数及应力极值点位置等的影响。结果表明:先开挖上层或下层导洞,会使得先开挖导洞所在层周围土体的应力集中程度高于后开挖者;从应力集中程度、塑性区分布和施工便利性的角度综合考虑,方案四和方案一可在实际施工中优先选用;应力极值点基本都处于车站靠横通道进口一侧,在交叉区域形成较为明显的应力集中现象,施工中需要做好交叉口的支护作业来应对这一问题。
关键词:地铁;应力场分布;数值计算;PBA 工法;导洞施工;开挖顺序
中图分类号:TU94+1
文載标识码:A
文章编号:2095-8382(2022)04-006-08

Study on Stress Field Distribution of Subsurface Excavated Station During Heading Construction by Pile–Beam–Arch Method

HUANG Bo¹, ZENG Yu², DU Yihan¹, YU Qian¹, ZOU Yu², ZHOU Lili²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Anhui Polytechnic University, Wuhu 241000, China;2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology–Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To investigate the influences of heading excavation sequence on vertical stress distribution of soil around the subway station by PBA method, a numerical model of bi-directional, double-layer pilot tunnel groups excavation is built by numerical simulation. Four construction schemes are put forward and compared to derive stress field distribution of characteristic planes in each scheme, and different stress field distribution laws, stress concentration coefficients and locations of stress extreme points are particularly analyzed. The results show that stress concentration of the soil around the first excavated pilot tunnel is higher than that of the later excavated one. The scheme IV and I are preferable considering the stress concentration degree, plastic zone distribution and construction convenience. The stress extreme points are basically located at the inlet of the cross passage of the station, led to a higher stress concentration in the intersection area, hence a well-designed support system is necessary in the construction process.

Keywords: subway; stress field distribution; numerical calculation; pile-beam-arch method; heading construction; excavation sequence

收稿日期: 2021-09-22

基金项目:安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2018A0108, KJ2018A0118);国家级大学生创新创业训练计划项目(202010363117); 安徽工程大学国家基金预研项目(2019yyzr08);安徽工程大学校级科研项目(Xjky110201912)

作者简介:黄博(1989-),男,讲师,博士,主要从事隧道力学与工程方面的研究工作。

随着现代社会交通压力激增,地铁车站的建设 需求日益增长。PBA工法是由北京市城建设计研 究总院崔志杰等专家发明的地铁开挖工法之一^[1]。 该工法主要施工思想在于使边桩、中柱、顶底纵梁 及拱顶共同构成整体承载体系,以承担开挖过程中 所产生的荷载。整个施工过程可分为开挖导洞与 支护、桩梁结构施作、顶土开挖与扣拱、内部结构施 作这四个阶段,因其工法灵活、对周边地质条件适 应性强、安全度高,且施工时对地面交通干扰小,在 北京等地应用颇为广泛^[2-5]。

相较于其他工法,PBA 工法有着显著优点,但 开挖引起的土体扰动与沉降等问题仍旧不可避免, 亟需研究改善。开挖导洞与支护为 PBA 工法最先 施工的步骤,其施工过程产生的影响较大^[6-7],并 会在一定程度上影响后续步骤的实施,因此有必要 研究导洞在开挖过程中应力状态与位移变化情况。 目前已有诸多学者研究了 PBA 工法在导洞开挖过 程中产生的影响,主要针对位移问题^[8-12]。在应力 方面的研究对象集中在隧道工程。陈孟乔等[13]结 合南京某越江隧道工程,建立了模拟盾构隧道开挖 面失稳过程的数值模型,研究了越江盾构隧道开挖 面失稳过程中土体应力变化以及由土体应力重分 布引发的土拱效应。程邦富等[14]模拟了不同工法 开挖软弱围岩隧道,通过对比分析应力特性、变形 规律等结果,确定了最优工法。丁祖德等[15]以某 浅埋偏压土质隧道为例,开展三种开挖工法下隧道 施工过程中的应力路径及安全系数分析,研究应力 路径的浅埋偏压小净距隧道合理开挖顺序问题。

上述可知,已有研究多关注 PBA 工法地铁车 站导洞开挖过程中不同开挖顺序引起的地表沉 降规律,涉及导洞开挖过程对车站土体应力场分 布的研究相对较少。地面沉降,追根溯源是开挖 引起岩土体的扰动,进而引发应力的重分布形成 的,因此在开挖土体时了解关键土层的应力场分 布情况也至关重要。本文依托北京市地铁达官营 站工程为背景,利用数值模拟的方法模拟了 PBA 工法下横通道的双层双向小导洞的开挖过程,给 出较为直观的应力场分布图形,通过设置不同的 小导洞开挖方案,研究不同开挖方案下关键土层 的应力场分布规律,以期为类似的工程项目提供 参考。

1 数值模型建立

1.1 工程背景

同前序位移方面的研究工作^[10,12],工程背 景为北京市地铁达官营站,车站总长约为236m, 车站顶板平均覆土厚度约为9m。主体结构采用 PBA工法,中部设置了临时横通道向两侧进行导洞 施工,车站上下两层各分布有4个小导洞。车站自 上而下涉及4个土层,9m厚的人工填土层、4m厚 的卵石层①、6m厚的卵石层②及28.3m厚的强风 化砾岩、泥岩层,具体地层参数见表1。

本次数值模拟的研究对象是上下两层中部的 临时横通道及自临时横通道向两侧开挖的16个小 导洞。通过改变小导洞的开挖顺序,研究在不同的 开挖方案下,小导洞土层关键位置的应力场分布 情况。

1.2 模型建立

参照工程背景建立的数值模型如图1所示,综 合考虑模型的尺寸效应,模型沿车站的纵向长度取 96.9 m,宽度取81.3 m,自地面向下的高度取46.3 m。 为方便区分各小导洞的位置,特将每个小导洞按照 顺序编号,如图2所示。土体模拟选用摩尔 – 库伦 模型,开挖使用 null 模型模拟,小导洞的初期支护

项目	弹性模量 E/MPa	泊松比	粘聚力 c/kPa	内摩擦角/(°)	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量 /MPa	剪切模量 /MPa
人工填土层	23	0.3	10	18	1 950	19.17	8.85
卵石层①	63	0.25	0.5	40	2 070	42	25.2
卵石层②	75	0.23	0.8	32	2 000	32.5	30.5
强风化砾岩、泥岩	105	0.26	0	35	2 150	72.9	41.7
初期支护	25 000	0.3	/	/	2 300	/	/
超前小导管支护	105	0.32	60	37	1 950	97.2	39.8

表1 参数汇总表

利用 shell 单元模拟,超前小导管支护通过加强小导洞拱部土体参数模拟,具体支护参数见表1。





图 2 横通道与小导洞分布及导洞编号

1.3 监测点设置

为了记录土体中应力的变化情况,需要在模型 中布置监测点,如图 3 所示,设置了 4 个监测平面 (P1~P4),P1 位于上层导洞顶面(z=4.5 m),P2 位 于上层导洞底面(z=0 m),P3 位于下层导洞顶面 (z=-8.3 m),P4 位于下层导洞底面(z=-12.8 m)。 每个监测平面均以方形网格状的形式布置监测点, 用以研究这四个关键监测平面上的应力场分布 情况。



1.4 开挖方案设计

导洞采用以下四种方案开挖,如表2所示。

方案一先开挖完成上层导洞,再开挖下层导洞。首先开挖上层横通道至设计位置,之后开挖上层 6 和 8 号导洞至 15 m,随后开挖 1 和 3 号导洞,同样至 15 m,此时 6 和 8 号导洞已开挖至 30 m;紧接着开挖 5 和 7 号导洞至 15 m,上层最后开挖 2 和 4 号导洞,所有导洞开挖至 30 m 停止。当上层所有导洞均开挖完成后,按照相同的顺序开挖下层导洞,同样至所有导洞开挖 30 m 停止。该方案可以利用导洞编号记为 6/8-1/3-5/7-2/4-14/16-9/11-13/15-10/12,其中"/"代表着同时,"-"代表着错距 15 m。

方案二首先开挖上层横通道至设计位置,之后 开挖下层横通道至设计位置,完成两个横通道开 挖后,从横通道内向两侧开挖小导洞。先开挖上 层 6 和 8 号导洞,待其开挖至 15 m 后,同时开挖下 层 13 和 15 号导洞,同样开挖至 15 m 后,继续开挖 上层 5 和 7 号导洞至 15 m,最后开挖下层 14 和 16 号导洞至 15 m。以此类推,继续开挖 1 和 3 号导洞、 10 和 12 号导洞、2 和 4 号导洞、9 和 11 号导洞,所

方案	工况简介	方案编号
方案一	先上层后下层,同层的导洞双向交错开挖	6/8-1/3-5/7-2/4-14/16-9/11-13/15-10/12
方案二	先开挖上部,上下层之间交错开挖	6/8-13/15-5/7-14/16-1/3-10/12-2/4-9/11
方案三	一侧上层导洞与另一侧下层导洞同时交错开挖	6/8-9/11-5/7-10/12-1/3-14/16-2/4-13/15
方案四	先下层后上层,同层的导洞双向交错开挖	14/16-9/11-13/15-10/12-6/8-1/3-5/7-2/4

表 2 导洞开挖方案

有导洞开挖至 30 m 后停止开挖。该方案可以利用 导洞编号记为 6/8-13/15-5/7-14/16-1/3-10/12-2/4 -9/11。

方案三首先完成两个横通道的开挖,然后依次 同时开挖 6 和 8 号导洞、9 和 11 号导洞、5 和 7 号 导洞、10 和 12 号导洞、1 和 3 号导洞、14 和 16 号 导洞、2 和 4 号导洞、13 和 15 号导洞,两两之间错 开 15 m 开挖,所有导洞均开挖至 30 m 后停止。该 方案可以利用导洞编号记为 6/8-9/11-5/7-10/12 -1/3-14/16-2/4-13/15。

方案四在方案一基础上,改变为先开挖下层导洞,再开挖上层导洞,同层导洞开挖方案相同,两两之间错开15m开挖,所有导洞均开挖至30m后停止。该方案可以利用导洞编号记为14/16-9/11-13/15-10/12-6/8-1/3-5/7-2/4。

2 导洞开挖顺序对应力场分布的影响

按照既定的开挖方案,通过数值模拟可以得到 监测点的竖向应力值,绘制三维应力场分布图,结 果如图 4~7 所示,图中 x 坐标代表距横通道中心线 的距离, y 坐标代表横通道的开挖进深, z 坐标代表 竖向应力值。

2.1 方案一模拟结果

从图 4 可以看出,每个监测平面上的应力值分 布均呈现明显的峰值区和谷值区,只不过每个平面 上的峰、谷值区位置、应力极值等有所差别。

P1(z=4.5 m)监测平面的峰值区均分布在导洞 所在位置,同侧导洞之间呈现较为平缓的谷值区, 而边导洞外侧逐渐恢复至正常值;横通道与导洞的 交叉口位置应力值较高,横通道内沿中心线间隔出 现了几处应力峰值区;外侧无影响区域竖向应力均 值 231.3 KPa,受影响区竖向应力极值 336 KPa,应 力集中系数为1.453;极值点坐标为(-6,38.9,4.5), 位于 2 号导洞上方区域。

P2(z=0 m)监测平面的情况与 P1 相反,谷值 区均分布在导洞位置,峰值区则分布在导洞两侧, 且紧靠横通道一侧应力值较高;横通道内沿中心线 存在几处应力峰值区,但相比于导洞位置处的峰值 较小;外侧无影响区域竖向应力均值 286.3 KPa,受 影响区竖向应力极值 504.2 KPa,应力集中系数为





1.761,极值点坐标(-6,36.3,0),位于1号与2号 导洞之间区域。

P3(z=-8.3 m)监测平面的应力场分布规律类 似于P1平面,但峰值区的分布较P1而言较为杂乱, 受到导洞开挖的影响较为明显,部分导洞处出现了 不连续分布的峰值区,横通道内的峰值区也没有 P1平面显著;外侧无影响区域竖向应力均值564.5 KPa,受影响区域竖向应力极值753.3 KPa,应力集 中系数为1.334,极值点坐标(8,24,-8.3),位于13 号导洞外侧区域。

P4(z=-12.8 m)监测平面的应力场分布规律 类似于 P2 平面,区别在于峰值相比 P2 而言不显 著,峰值区的分布更加连续、均匀;外侧无影响区域 竖向应力值 598.7 KPa,受影响区域竖向应力极值 977.3 KPa,应力集中系数为 1.632,极值点坐标(6, 36.3,-12.8),位于 13 号和 14 号导洞之间区域。

2.2 方案二模拟结果

从图 5 中可以看出,每个监测平面上的应力分 布规律与方案一较为相似,具体对比应力极值和极 值点位置时有所差异。

采用方案一的方法,可以计算出 P1~P4 监测平 面上受影响区域竖向应力集中系数分别为 1.509、 1.696、1.343 和 1.663。极值点位置 P3 和 P4 平面 与方案一相比发生了变化,P3 平面极值点坐标 (-8,26,-8.3),位于 9 号导洞外侧区域,P4 平面极 值点坐标(-6,36.3,-12.8),位于 9 号和 10 号导 洞之间区域。

2.3 方案三模拟结果

从图 6 中可以看出,每个监测平面上的应力分 布规律与前两个方案较为相似;同样,具体对比应 力极值和极值点位置时有所差异。

通过计算得到,P1~P4监测平面上受影响区 域竖向应力集中系数分别为1.445、1.711、1.343和 1.711。极值点位置相比于前两个方案,P1平面依 旧没有变化;P2平面极值点坐标变为(6,36.3,0), 位于5号与6号导洞之间区域;P3平面极值点坐 标变为(8,26,-8.3),位于13号导洞外侧区域;P4 则同方案二。





图 8 方案一和方案四竖向应力等值线图(y=38.9 m)



图 9 方案一和方案四竖向应力等值线图 (y=44.6 m)

2.4 方案四模拟结果

从图 7 可以看出,与前三个方案比较,P3 和 P4 平面的应力场分布规律较为相似,P1 和 P2 平面较 之前方案略有不同,主要体现在 5 号至 8 号导洞一 侧,导洞区域出现了 2 个较显著的峰值,而之前的 方案仅在靠近横通道区域存在 1 个峰值。图 8 给 出了方案一和方案四 y=38.9 m 截面的竖向应力等 值线图,即 2、6、10、14 号导洞边缘所处的竖直面。 图中用方框指出了导洞上方的应力集中处,可以更 清楚地看到方案四右侧 6 号导洞上方存在 2 处应 力较高区域。在图 9 给出的两方案 y=44.6 m 截面 的竖向应力等值线图中,可以看到同样的现象。

具体分析四个平面的应力集中程度,可得 P1~P4监测平面上受影响区域竖向应力集中系数 分别为1.364、1.596、1.413和1.796。应力极值出 现的位置,P1平面极值点坐标变为(28,38.9,4.5), 位于6号导洞上方区域,是不同方案中首次改变; P2、P3平面均同方案三;P4平面同方案一。

2.5 结果对比分析

汇总四个方案的模拟结果,表3列出了四个方 案的应力集中系数结果,表4给出了四个方案应力 极值点的位置。 从表 3 可以看出,方案一至三的上层 P1 和 P2 平面应力集中系数大于相应的 P3 和 P4 平面;方案 四则相反,下层的 P3 和 P4 平面应力集中系数大于 上层的 P1 和 P2 平面,反映出先开挖上层导洞时, 最终上层导洞周围土体的应力集中程度高于下层 导洞,而先开挖下层导洞时,则导致下层导洞周围 土体的应力集中程度较高。

表 3 四种方案应力集中系数

平面 方案	P1 (z=4.5 m)	P2 (z=0 m)	P3 (z=-8.3 m)	P4 (z=-12.8 m)
方案一	1.453	1.761	1.334	1.632
方案二	1.509	1.696	1.343	1.663
方案三	1.445	1.711	1.343	1.711
方案四	1.364	1.596	1.413	1.796

此外,可以看到没有方案在引起应力集中程度 方面呈现绝对优势,P1和P2平面的应力集中系数 最小值出现在方案四中,P3和P4平面的应力集中 系数最小值出现在方案一中。对每个方案四个平 面的应力集中系数取平均值,可以发现方案四最 小,为1.542;方案一其次,为1.545;方案二和方案 三基本一致,为1.553。反映出先开挖一层导洞再



图 10 塑性区分布图 (y=44.6 m)

开挖另一层导洞这种常用的施工方案,要优于上下 层导洞之间交错开挖。同时,考虑到上下层导洞交 错开挖需要先完成上下两层横通道的施工,不利于 施工组织,也没有减小导洞周围土体的应力集中程 度,因此方案一和方案四在实际施工中是优先选用 的,也是较为常用的方案,这不仅便于施工组织,而 且引起的导洞周围土体应力集中程度较小。

从表4可以看出,极值点坐标最大的差别出现 在P1平面,先开挖上层6号和8号导洞的方案一 至三,极值点均在2号导洞上方,而先开挖下层14 号和16号导洞的方案四,极值点出现在6号导洞 上方,且更靠近导洞深部。可见上下层之间的先后 开挖顺序对最上层P1平面极值点位置影响较为明 显。其余极值点位置的改变基本上仅是改变x坐 标的正负号,也不存在较为清晰的变化规律。

表 4 四种方案应力极值点坐标

平面 方案	P1 (z=4.5 m)	P2 (z=0 m)	P3 (z=-8.3 m)	P4 (z=-12.8 m)
方案一	(-6,38.9,4.5)	(-6,36.3,0)	(8,24,-8.3)	(6,36.3,-12.8)
方案二	(-6,38.9,4.5)	(-6,36.3,0)	(-8,26,-8.3)	(-6,36.3,-12.8)
方案三	(-6,38.9,4.5)	(6,36.3,0)	(8,26,-8.3)	(-6,36.3,-12.8)
方案四	(28,38.9,4.5)	(6,36.3,0)	(8,26,-8.3)	(6,36.3,-12.8)

值得注意的是,所有列举的极值点 y 坐标均小 于 38.9 m,位置基本都处于车站靠横通道进口一 侧,可以看出横通道的存在使得施工导洞时,在交 叉区域形成较为明显的应力集中现象,施工中需要 做好交叉口的支护作业来应对这一问题。

进一步分析塑性区分布,图 10 给出了 4 种方 案下 y=44.6 m 截面的塑性区分布图,可以看到四 个方案下层导洞区域的塑性区分布更广。对比不 同方案,方案四塑性区分布范围最小,尤其是上层 导洞周围塑性区分布少,没有形成左右贯通的塑性 区;方案一其次,但上层导洞顶部还未形成左右贯 通的塑性区;方案二和三相差不大、塑性区分布均 较广,上层导洞顶部塑性区基本左右贯通。可见, 从塑性区分布的角度而言,方案四最优,方案一其 次,方案二和方案三对土体影响较大。

3 结论

(1)先开挖上层导洞时,最终上层导洞周围土体的应力集中程度高于下层导洞,而先开挖下层导洞,则导致下层导洞周围土体的应力集中程度较高,因此实际施工中更需要关注先开挖层导洞的临时支撑性能。

(下转第34页)

参考文献:

- [1] 张飞,王建强,罗寒.七参数坐标转换模型的比较分析 [J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(5): 48-51.
- [2] 孔钰如.基于布尔莎模型的坐标转换算法[J].科技风, 2021 (4):1-2.
- [3] 尹慧芳,党亚民,郑作亚.济宁矿区坐标转换精度影响 因素的分析 [J]. 北京测绘, 2011 (3): 4-7.
- [4] 曾文宪,陶本藻.三维坐标转换的非线性模型[J]. 武汉 大学学报·信息科学版,2003,28(5):566-568.
- [5] 姚宜斌,黄承猛,李程春,等.一种适用于大角度的三 维坐标转换参数求解算法 [J]. 武汉大学学报·信息科学 版,2012,37(3):253-256.
- [6] Grafarend E W, Awange J L. Nonlinear analysis of the

(上接第13页)

(2) 在引起应力集中程度方面, 没有方案具有 绝对优势。四个平面的应力集中系数取平均值,方 案四最小为1.542,方案一其次为1.545,方案二和 三基本一致为1.553,相对而言先开挖一层导洞再 开挖另一层导洞这种常用的施工方案,要优于上下 层导洞之间交错开挖。

(3)极值点基本都处于车站靠横通道进口一 侧,可以看出横通道的存在使得施工导洞时,在交 叉区域形成较为明显的应力集中现象,施工中需要 做好交叉口的支护作业来应对这一问题。

(4) 塑性区分布方面, 方案四分布范围最小, 方 案一其次,方案二和三分布范围均较大。

(5)从应力集中程度、塑性区分布范围和施工 便利性的角度综合考虑,可在实际施工中优先选用 方案四和方案一。未来可以进一步在相似工程现 场布设应力监测点采集数据,对比数值模拟结果, 验证研究成果的可靠性。

参考文献:

- [1] 高志刚. 柱洞法在北京地铁车站工程施工中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2017,20(5):127-133.
- [2] 许亚斋,余鹏. 棚盖暗作法 PBA 地铁车站沉降规律探 讨[J].铁道标准设计,2019,63(12):130-136.
- [3] 陈庆章. 砂卵石地层中 PBA 工法导洞开挖顺序对地表 沉降的影响 [J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 81-84.
- [4] 刘加柱,孙礼超,张壮,等.地铁车站 PBA 洞桩法施工

three-dimensional datum transformation[conformal group C_7(3)[J].Journal of Geodesy, 2003, 77(1/2):66-76.

- [7] 吕志鹏,伍吉仓,公羽.利用四元数改进大旋转角坐标 变换模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2016, 41 (4): 547-553.
- [8] 王世达,潘国荣.大旋转角空间相似变换的封闭解模 型研究 [J]. 测绘地理信息, 2021, 46 (S1): 282-287.
- [9] 陈义, 沈云中, 刘大杰. 适用于大旋转角的三维基准 转换的一种简便模型[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2004,29(12):1101-1105.
- [10] 马下平,张中成,师芸,等.附有约束条件的大旋转角 三维坐标转换[J]. 测绘科学, 2019, 44(8): 13-18.
- [11] 魏二虎,殷志祥,李广文,等.虚拟观测值法在三维坐 标转换中的应用研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2014,39(2):152-156.

力学效应研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(S1): 240-247,307.

- [5] 罗富荣,汪玉华.北京地区 PBA 法施工暗挖地铁车站 地表变形分析 [J]. 隧道建设, 2016, 36(1): 20-26.
- [6] 王峥峥,郭翔宇.地铁车站洞桩法施工对地层沉降影 响研究 [J]. 大连理工大学学报, 2016, 56(3): 257-262.
- [7] 朱宝磊.大空间地铁车站洞桩法施工力学效应研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2015.
- [8] 姚君华,宋文杰,董军.PBA 工法导洞不同开挖顺序对 地表沉降的影响 [J]. 公路, 2013, 58(1): 298-302.
- [9] 王杨.PBA 工法导洞开挖顺序对地层沉降的影响分析 [J]. 特种结构, 2016, 33(5): 10-13.
- [10] 单仁亮,黄博,李润军,等.PBA 车站导洞双向开挖方案 比选[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32 (2): 200-208.
- [11] 任建喜,曹西太郎.PBA 法地铁车站施工诱发地表变形 规律研究 [J]. 铁道工程学报, 2018, 35(9): 88-92.
- [12] 纪文杰,黄博,姚直书,等.PBA 工法横通道及导洞施工 对地表沉降的影响[J]. 安徽理工大学学报(自然科学 版),2020,40(1):21-26.
- [13] 陈孟乔, 牛煜虹, 刘学彦. 砂土地层盾构隧道开挖面土 体应力状态分析 [J]. 隧道建设, 2015, 35(S2): 22-25.
- [14] 程邦富,程林.某软弱围岩公路隧道开挖工法数值模 拟与监测数据对比分析 [J]. 安徽建筑大学学报,2020, 28(1):7-13.
- [15] 丁祖德,汪伟伟,文锦诚,等.考虑开挖应力路径的浅 埋偏压隧道施工顺序探讨[J]. 昆明理工大学学报(自 然科学版),2020,45(6):140-148.