

黄土地区地铁竖井转横通暗挖施工稳定性分析

卫守峰^{1,2}

(1. 中国铁建大桥工程局集团有限公司, 天津 300300; 2. 西安建筑科技大学 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:针对地铁暗挖采用的竖井转横通道施工中采用的先竖井封底,再通过井内临时搭设的施工平台进行竖井转横通道施工的“先竖井后横通”施工方案存在的施工周期长、安全隐患大的问题,依托在建的西安地铁五号线区间黄土隧道工程的施工,进行了竖井转横通道施工方案的数值试验研究,分析了黄土地层中“先竖井后横通”施工和竖井施工到横通道高程后先转入横通道施工,在横通道具备作业空间后进行竖井下部开挖的“竖井-横通并行”施工时竖井-横通道结构及地层的变形、受力特点,对比研究两种施工方案引起的地表沉降及围岩塑性区的变化。数值分析表明,“竖井-横通并行”施工时,马头门横向收敛位移和竖井靠近马头门一侧井壁的支护结构应力较“先竖井后横通”施工方案小约 14 % 以上,因此对稳定性较好的黄土地层,建议采用“竖井-横通并行”施工方案。

关键词:地铁工程;竖井转横通道;施工方法;黄土地层;数值模拟

中图分类号: TU 443

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)03-0366-10

Optimization analysis of tunnel construction methods through cross aisle from subway shaft based on numerical test analysis in loess stratum

WEI Shoufeng^{1,2}

(1. Chinese Railway Bridge Engineering Bureau Group Co. Ltd., Tianjin 300300, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering of Shaanxi Province, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: The safety control of excavation through cross aisle from subway shaft is the key technology in building urban metro. The old method applied is to excavate the shaft to design elevation position and then to excavate the cross aisle. Owing to the long excavating time and too much space taken, the paper takes finite element analysis software to analyze a new method, i. e. to excavate the shaft to the temporary inverted arch elevation position in superior step of the cross aisle and then to excavate the shaft based on successfully using the last method in the construction through cross aisle from subway shaft of Xian rail traffic line 5 in the first phase. The paper analyzes the consolidation safety in two different ways by large finite element analysis Software. Results show that the surface and construction about the cross aisle show the same results after the whole excavation in loess stratum. And the new way can get a better result, about 30 %, at controlling the crosswise strain of the horsehead and the mechanical conditions of sidewall, so that the tunnels were more stable. Comparative analysis of field monitoring results prove economic, security and feasibility of “cross-channel parallel shaft construction” program.

Key words: subway engineering; cross aisle from subway shaft; construction method; loess strata; numerical simulation

在既有建(构)筑物密集的城市地下工程建设中,普遍采用对交通影响较小的暗挖或盖挖法施工^[1-6]。暗挖或盖挖施工中通常需要通过竖井转横通道然后进行车站或区间隧道正线施工。竖井转横通道施工以及竖井转横通道施工中马头门能否安全、快速施工是地下工程暗挖和盖挖顺利施工的关键^[7-10]。目前竖井转横通道施工普遍采用竖井先行施工,到封底标高后通过临时搭设施工平台进

行横通道施工的“先竖井后横通道”施工方案^[11];另一种常用的施工方法是在竖井施工至横通道标高时先行施工横通道,横通道施工至预定位置后进行竖井剩余部分施工的“竖井-横通并行”施工方案。针对不同竖井转横通道的施工,王福恩等^[12]针对沈阳地铁 1 号线不同地层,分析了不同竖井转横通道施工工艺的特点,提出了在竖井底部地层较好条件宜采用“竖井-横通并行”的施工方法;针

收稿日期: 2019-10-23 修改稿日期: 2020-05-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578447); 陕西省建设厅科技发展计划项目(2019-k39)

第一作者: 卫守峰(1976—),男,硕士,高级工程师,主要从事隧道与地下工程施工管理方面的工作。E-mail: 214452111@qq.com

对竖井转横通道施工的稳定性问题，贺长俊等^[13]分析了“先竖井后横通”施工时不同断面竖井及马头门部位的受力特点；针对广州轨道交通换乘站大跨浅埋暗挖隧道的施工，白铭海等^[14]采用数值分析方法研究了竖井转横通道施工的稳定问题，提出了有针对性的施工应对措施；针对深圳地铁五号线区间隧道的施工，蒋青青等^[15]讨论了施工中不同加固措施对地层变形的控制效应，提出并实施的横通道支护快速封闭措施，有效控制了横通道施工中的地层变形。

以上针对具体工程进行的研究对竖井进横通道施工的变形控制和施工安全控制具有一定的指导意义，但目前对竖井转横通道不同施工方案的确定研究还鲜见报道。以西安地铁五号线一期月登阁~三殿村区间隧道暗挖施工为工程背景，对降水条件下的黄土地层中竖井转横通道施工的稳定性问题进行数值试验研究，分析降水条件下黄土地层中“先竖井后横通”和“竖井-横通并行”两种施工方案时竖井-横通支护体系和地层的力学响应及变形特征，明确少水黄土地层中竖井转横通道施工的控制重点及竖井转横通道施工的优化方案。研究明确了降水条件下黄土地层采用“竖井-横通并行”施工方案的安全、可行性，为黄土地区竖井转横通设计和施工提供了理论依据。

1 竖井转横通道施工方案比选分析

1.1 工程概况

西安地铁五号线一期工程月登阁站~三殿村站区间隧道采用矿山法暗挖施工；正线区间暗挖隧道通过 ZDK44+310 桩号处设置的竖井通过横通道进行施工。工程区间隧道拟建区间场地属沣河三级阶地，场地平坦，地形起伏小。工程区间隧道施工竖井周边为荒地，无重要建筑物。施工竖井地质剖面如图 1 所示。根据地勘资料，竖井和横通道覆盖层从下至上，从老到新依次为：老黄土 Q_2^{eol} 、新黄土 Q_3^{eol} 、杂填土 Q_4^{ml} 。区间隧道稳定地下水位埋深在 30.00~39.35 m 之间，水位年变化幅度在 2.0 m 左右。因本区间地下段均位于地下水位以上，可不考虑地下水的影响。

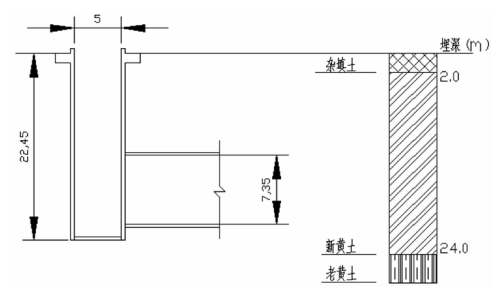


图 1 区间隧道施工竖井剖面图(单位: cm)

Fig. 1 Geological conditions of shafts (unit: cm)

表 1 竖井支护参数表

Tab. 1 Shaft supporting parameter

项目		主要材料及规格	结构尺寸
支 护	超前小导管	$\Phi 42 \times 3.5$, $L=2\text{ m}/3.5\text{ m}$, 钢花管	间距 $1.0 \times 1.0\text{ m}/1.5 \times 1.5\text{ m}$
	格栅钢架	C25、C14 钢筋	纵间距: $0.75/0.5\text{ m}$
	钢筋网	$\Phi 8\ 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 网格	四周铺设、双层
	竖向连接筋	C22 钢筋	环向间距: 1.0 m , 内外双层
	喷混凝土	C25 早强混凝土	厚度 400 mm

表 2 横通道支护参数表

Tab. 2 Cross passage supporting parameter

项目		主要材料及规格	结构尺寸
支 护	大管棚	$\Phi 108 \times 6$	$L=10\text{ m}$, 环向间距 0.5 m
	超前小导管	$\Phi 42 \times 3.5$, $L=2\text{ m}/3.5\text{ m}$, 钢管	环向间距 0.3 m 纵向间距 1.5 m
	格栅钢架	C25、C14 钢筋	纵间距: 0.5 m
	钢筋网	$\Phi 8\ 150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ 网格	四周铺设、双层
	竖向连接筋	C22 钢筋	环向间距: 1.0 m , 内外双层
	喷混凝土	C25 早强混凝土	厚度 300 mm
	二次衬砌	C35 防水钢筋混凝土 抗渗等级 p10	厚 0.6 m

工程区间隧道竖井平面尺寸 $5.00\text{ m} \times 6.50\text{ m}$, 井深 22.45 m ; 竖井横通道总长 27.93 m , 净宽 4.50 m , 净高 7.35 m . 横通道靠竖井端设马头门. 竖井井口设锁口圈梁, 断面尺寸 $2.00\text{ m} \times 1.00\text{ m}$. 竖井支护参数见表 1, 横通道支护参数见表 2.

1.2 竖井转横通施工方案

竖井先行施工封底后再进行横通道施工的“先竖井后横通”施工方案(施工方案一), 竖井与横通道交叉段施工分五步完成, 图 2 给出了工程“先竖井后横通”施工工序图, 施工技术要点如下:

(1) 竖井锁口段的施工: 开挖锁口段并设置锁口段井壁的支护. 设置安全栅栏和安全门.

(2) 竖井井身的施工: 井身标准段采用格栅钢架网喷 C25 混凝土形成井壁的支护结构.

(3) 竖井井底的施工: 竖井井底的结构面比横通道结构的底面低 2.00 m , 采用 C30 混凝土封底.

(4) 破横通道马头门的施工: 在竖井封底完成后, 搭设施工平台至横通道位置进行马头门破除作业. 马头门破除后架立钢格栅支撑, 喷射混凝土, 设置临时仰拱.

(5) 横通道的施工: 横通道采用台阶法施工, 上台阶进尺 $5 \sim 8\text{ m}$ 后破除马头门下台阶混凝土, 架设钢格栅并喷射混凝土形成初期支护; 其后并行进行横通道上下台阶施工.

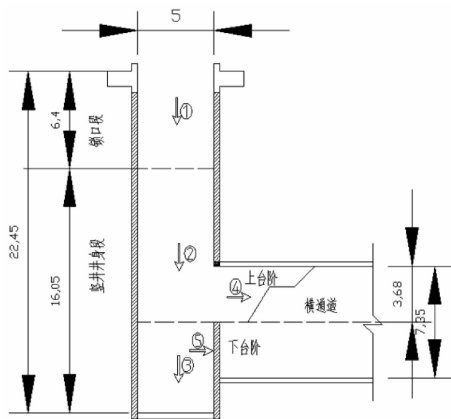


图 2 方案一施工工序图

Fig. 2 Construction sequence of the first plan

在竖井施工至横通道位置破除横通道马头门, 进行横通道施工; 其后并行进行竖井剩余部分及横通道台阶法施工的“竖井-横通并行”(施工方案二)施工工艺见图 3 所示, 其施工要点如下:

(1) 竖井锁口段的施工: 与施工方案一相同.

(2) 竖井井身的施工: 井身施工至横通道上台阶位置, 停止开挖进行临时封闭施工.

(3) 马头门横通道的上台阶施工: 竖井临时封

底完成后, 进行马头门段超前支护, 破除马头门并转入横通道上台阶施工.

(4) 竖井剩余部分及横通道下台阶的施工: 竖井转横通道施工的上台阶进尺 4.0 m 后, 并行进行横通道下台阶和竖井剩余部分的施工; 竖井井窝施工完成后完成竖井永久性封底混凝土浇筑.

(5) 横通道的台阶法施工: 重复步骤(4)横通道的开挖至主线隧道位置, 转入正线马头门施工.

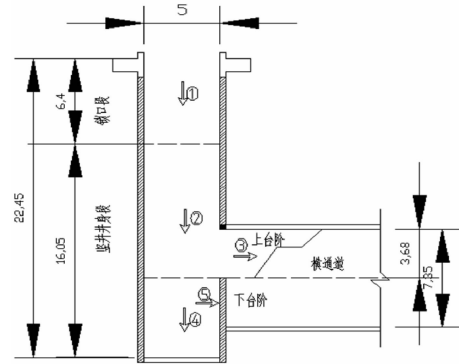


图 3 方案二施工工序图

Fig. 3 Construction sequence of the second plan

1.3 竖井转横通施工方案的比较

对于国内普遍使用的“先竖井后横通道”和“竖井-横通并行”两种施工方案, 都有较为成熟的设计和施工实例. 大量工程实践表明, 按“先竖井后横通道”的施工方法, 竖井和横通道交叉施工, 马头门的施工稳定较好; 但其施工工序复杂, 竖井转横通马头门的破除需要在竖井封底混凝土达到一定强度后搭设高度达 9 m 的作业平台; 横通道上台阶支护完成后需要拆除作业平台, 而后再进行下台阶的施工. 作业平台的搭设、拆除, 费时、费力, 施工危险性高, 工序间干扰大.

采用“竖井-横通并行”的施工方法, 竖井施工至横通道上台阶位置后进行竖井临时封底, 转而进行横通道上台阶施工; 上台阶推进 4 m , 满足横通道施工空间要求后转入竖井剩余部分的施工, 并进行横通道马头门下台阶施工. 工序上, “竖井-横通并行”的施工方法, 竖井转横通道上台阶施工可在临时封底上进行, 施工简便、操作性强, 减少了施工中的作业平台的搭设、拆除时间, 工作量大为减少, 且避免了高空作业的安全隐患.

“竖井-横通道并行”施工方法在工序上对“先竖井后横通道”施工方法进行了优化, 缩短了施工时间, 提高了作业安全性, 因此“竖井-横通并行”方案在工序上较“先竖井后横通道”施工方法有一定的优势, 但两种施工方法下竖井和横通道结构的

变形和力学响应不同，需要结合工程特点，采用 MIDAS 有限元分析软件对两种施工方案施工引起的地表沉降，竖井、横通道和施工交叉位置的应力和变形特性进行分析。

2 竖井转横通道施工稳定性数值试验

2.1 数值试验模型及参数

根据月登阁站~三殿村站区间隧道竖井工程场址条件，竖井转横通道施工模拟分析中，地层简化为均质水平的层状分布，地层岩土体采用 Mohr-Column 本构模型。

竖井转横通道计算分析模型在 X 方向的尺寸为 66.00 m，在 Y 方向上的尺寸为 36.00 m，在 Z 方向上的尺寸为 36.00 m，共划分单元数为 43 802。分别约束计算模型 X、Y(水平)方向上的平动自由度及 Z(竖直)方向底部的平动自由度。数值试验模型见图 4。分析中竖井及横通道支护按弹性考虑，材料参数按勘察资料，见表 3。

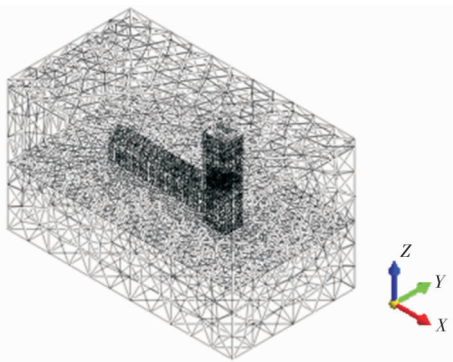


图 4 竖井转横通道施工模拟数值模型
Fig. 4 Location of shaft and cross passage

表 3 模型物理力学参数表

Tab. 3 Physico-mechanical parameters of model

名称	重度 kN/m ³	模量 /MPa	泊松比	摩擦角 /°	粘聚力 /kPa	厚度 /m
杂填土	16.50	9.00	0.43	16.00	5.00	2.00
新黄土	15.80	13.50	0.38	21.00	25.00	19.00
老黄土	15.90	18.00	0.35	20.00	30.00	17.00
支护	22.00	23500.00	0.20	—	—	0.20

2.2 数值试验方案及步骤

“先竖井后横通”施工方案(方案一)的施工模拟步骤：①竖井锁口段开挖支护；②竖井井身循环开挖、支护，至竖井底部，进行竖井封底；③横通道马头门上台阶开挖支护，进尺 6.00 m；④横通道马头门下台阶开挖支护，进尺 3.00 m；⑤横通道循环开挖、支护至预定长度。横通道施工完成，共 90 个施工步骤。图 5 给出了“先竖井后横

通”施工方案时，竖井转横通道段的施工工序图。

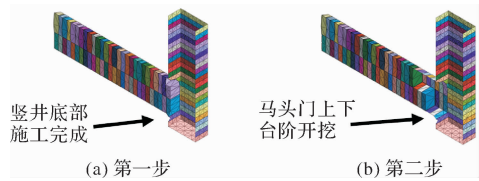


图 5 先竖井后横通施工时竖井转横通
施工工序(方案一)

Fig. 5 Construction of the first plan
shaft and cross passage

“竖井-横通并行”施工方案(方案二)施工模拟步骤：①竖井锁口段开挖支护；②井身循环开挖、支护至横通道上台阶下方 2.00 m 后进行竖井临时封底；③横通道马头门上台阶开挖、支护，进尺 4.00 m；④破除竖井临时封底，开挖竖井剩余部分，进行竖井永久封底；⑤进行横通马头门的下台阶开挖、支护，循环进尺 4.00 m；⑥横通道循环开挖、支护至预定长度。横通道开挖完成，共有 91 个施工步骤。图 6 为模拟“竖井-横通并行”施工时，竖井转横通道段的施工工序图。

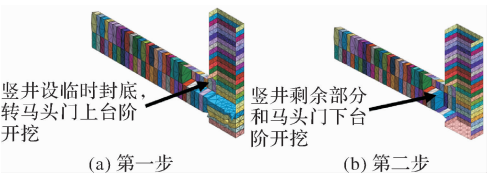


图 6 并行方案时竖井转横通道施工工序(方案二)

Fig. 6 Shaft construction and cross
passage of second plan

2.3 数值试验结果及分析

2.3.1 地层沉降特性分析

区间竖井转横通道不同施工方案引起的地表沉降变形对比见图 7。由图 7 可见，不同的竖井转横通道施工方案引起的地表的变形变化特性基本一致；施工引起的地表变形基本呈椭圆形，椭圆形沉降坑的长轴方向平行横通道方向；此时，施工引起的最大变形出现在远离横通道方向靠锁口圈梁的地表处，最大的变形量约 15.00 mm。

表 4 竖井转横通道施工中竖井最大变形对比表(单位：mm)

Tab. 4 Maximum deformation of shaft (unit: mm)

方案	方案一			方案二		
	X	Y	Z	X	Y	Z
数值	17.48	26.82	38.15	13.65	23.10	38.35
	马头门	马头门		马头门	马头门	
位置	拱底标	拱腰标	竖井	拱底标	拱腰标	竖井
	高内侧	高两侧	井窝	高内侧	高两侧	井窝
	井壁	井壁		井壁	井壁	

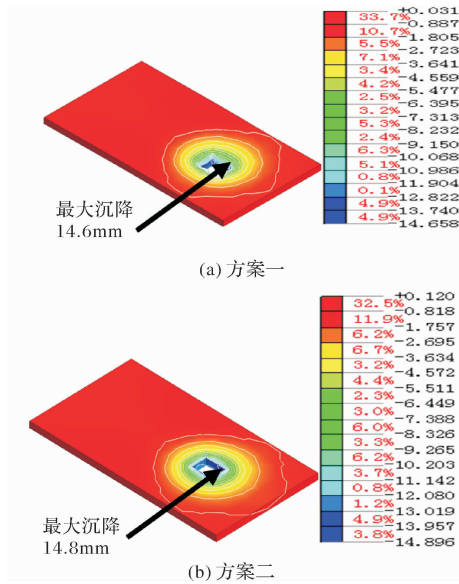


图 7 地表沉降(单位: mm)

Fig. 7 Ground surface settlement (unit: mm)

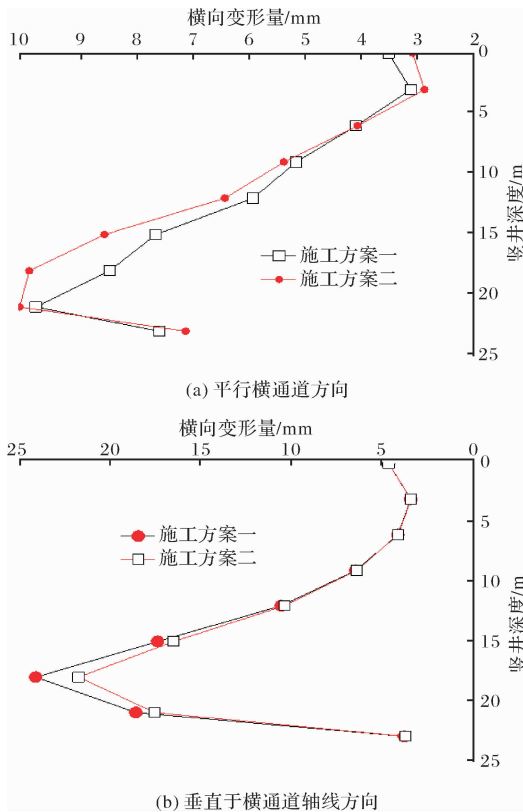


图 8 竖井井壁随深度变化曲线

Fig. 8 Deformation of shaft under different depth

2.3.2 竖井支护结构的稳定性分析

两种施工方案下,竖井支护整体上都处于受压的状态,表 4 给出了竖井不同方向上的最大变形值;由表可知,两种施工方案下,竖井不同方向上的最大变形位置基本一致,平面上的最大变形位置靠近马头门.方案二相较于方案一,在 X、Y、Z 方向上的最大变形量减少了 21.91%、

13.87%、-0.52%.

由图 8(a)给出了两种方案下,施工完成时竖井后井壁随竖井深度向横通道侧的变形曲线可见,在竖井深度 0~6.00 m 之间,方案二比方案一引起的变形量要小;但在竖井深度的 6.00~21.00 m 之间,方案二比方案一的变形要大;在竖井施工至深度 18.00 m 时,竖井最大变形量相差约 20.00%,但在竖井开挖深度超过 18.00 m 之后,两种方案施工引起的变形趋于一致.

图 8(b)为两种施工方案下,竖井两侧井壁随竖井深度向临空面变形的对比曲线.整体上看,方案二下,竖井的收敛变形值都比方案一小,且在竖井深度 18.00 m 处,变减量减小了 9.79%.

表 5 给出了不同方案下竖井支护结构最大受力对比表.在方案二时,结构支护最大主应力、最大剪应力较方案一分别减少了 14.38%和 19.57%,很大程度上改善了支护结构的受力状态,但两种施工方案下,竖井井壁靠近马头门的拱肩位置均为最大的受力位置.

表 5 竖井最大受力对比表(单位: kPa)

Tab. 5 Maximum force of shaft (unit: kPa)

方案	方案一	方案二
应力	大主应力	最大剪应力
数值	10 216.00	10 618.21
位置	马头门拱肩标高内侧井壁	8 746.61
		8 539.54

图 9 给出了竖井深度内地层的塑性区分布图,由图可见,方案一和方案二施工时,竖井周边地层的塑性区分布均集中在竖井两侧的井壁处,范围在 2.00~4.00 m,并且方案一较方案二的地层的塑性区的面积大.

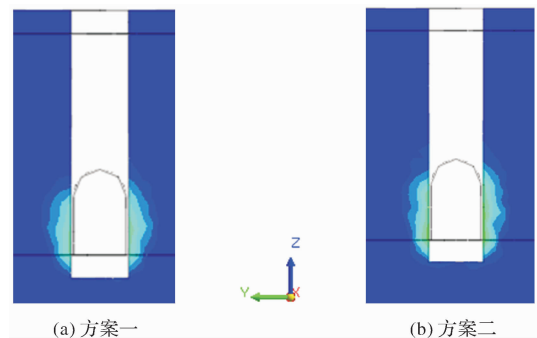


图 9 竖井围岩塑性分布

Fig. 9 Plastic zone of horizontal distribution surrounding rock

2.3.3 横通道支护结构的稳定性分析

两种施工方案下,横通道支护结构整体上均处于受压状态;表 6 给出了不同方案下竖井不同方

向上的位移对比表，由表可知，两种方案下，竖井在 X、Z 方向上的最大变形位置一致，但方案二比方案一变形小 21.91%、-3.92%。在 Y 方向上，两种施工方案下变形出现的最大位置不同，方案二出现的最大变形位置距离马头门 12.00 m，方案一出现的位置距离马头门 2.00 m；变形最大值离马头门越近，则在竖井与横通道的交叉部位，施工稳定性越差。因此方案二较为有利。

图 10(a)为两种方案下横通道拱顶、拱底变形曲线，两种方案下横通其变形基本一致。在马头门位置，方案二比方案一的拱底隆起量大 3.71 mm。图 10(b)为两种施工方案下横通道的横向收敛位移曲线，方案二时马头门在 Y 方向上的较方案一减少了 63.49%。

表 6 竖井转横通道施工时横通道变形对比表(单位: mm)
Tab. 6 Maximum deformation of cross passage (unit: mm)

方案	方案一			方案二		
方向	X	Y	Z	X	Y	Z
数值	17.48	14.31	25.73	13.65	12.97	26.74
位置	马头门拱底	马头门拱腰	距马头门 2m 横通拱底	马头门拱底	距马头门 12m 横通拱腰	距马头门 2m 横通拱底

由表 7 给出的两种方案下横通道支护的最大受力对比可见，不同施工方案时横通道的受力状态出现较大的变化。方案二的支护最大主应力位置相比方案一时的位置延后了 2.00 m，在横通道拱底的位置，最大主应力数值减少了 27.88%；方案二的支护最大剪应力比方案一大 365.8 kPa。

截取马头门处断面，对比分析地层中的塑性区分布，图 11 给出了不同方案时马头门处塑性区的分布。由图 11 可见，两种方案下地层塑性区分布在横通道马头门拱底的位置，且塑性区分布范围要比竖井周边的土体大。相对于方案一，方案二时竖井地层的塑性区的分布更浅，但在施工时也需要对周围地层进行加固。

表 7 横通道最大受力对比表(单位: kPa)

Tab. 7 Maximum force of cross passage (unit: kPa)

方案	方案一		方案二	
应力	大主应力	最大剪应力	大主应力	最大剪应力
数值	7 525.68	6 797.43	6 427.07	7 163.23
位置	马头门的拱腰	马头门的底拱	距马头门 2 m 横通拱底	马头门的拱肩

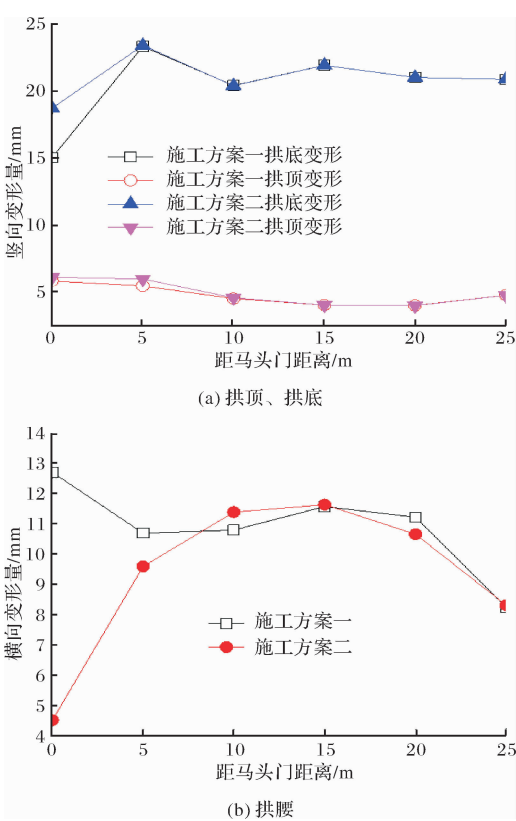


图 10 横通道不同位置的变形对比曲线
Fig. 10 Deformation of cross passage arch hance

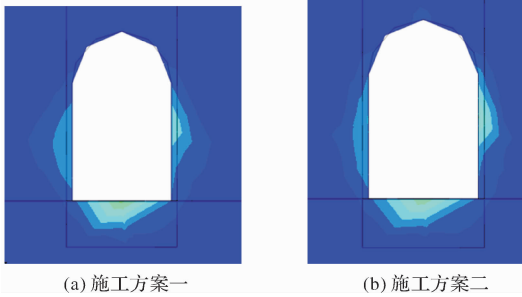


图 11 横通道马头门处围岩塑性对比分布
Fig. 11 plastic zone of horse head

2.3.4 马头门处支护结构的稳定性分析

竖井和横通道支护分析表明，两种方案时横通道马头门拱腰处竖井两侧井壁的收敛变形最大；做不同方案时两侧竖井收敛变形随施工的变化曲线，见图 12 所示。图 12 可见，在施工步骤 18 时（竖井施工至 18.00 m）时，竖井收敛变形急剧上升；在施工步骤 20 到 26，方案二进行横通道马头门上台阶开挖，此时，竖井收敛变形基本不变；剩余竖井开挖后，收敛变形继续增大，最大值达 44.94 mm；相较于方案一的变形最大值 52.28 mm，减少了 14.03%。

选取横通道距离马头门 2.00 m 的拱底位置进行对比分析，由图 13 给出的拱底变形随施工工序的变化曲线可见，施工至竖井深度 3.00 m 时，横

通道拱底开始出现隆起变形,随着施工的进行,隆起量逐渐变大.两种方案下横通道的最大隆起值大致相同.在施工趋于稳定时,方案二变形值较方案一大了1.01 mm.

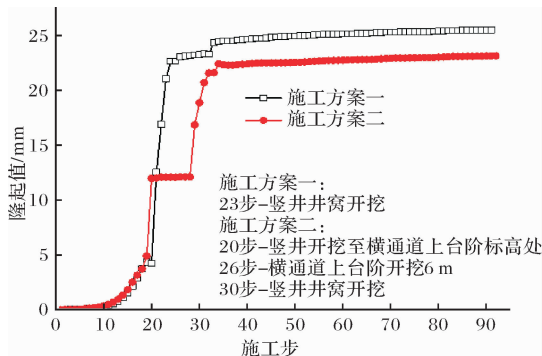


图 12 最大收敛值随施工变化曲线

Fig. 12 Variation process of maximum deformation of cross passage arch hance

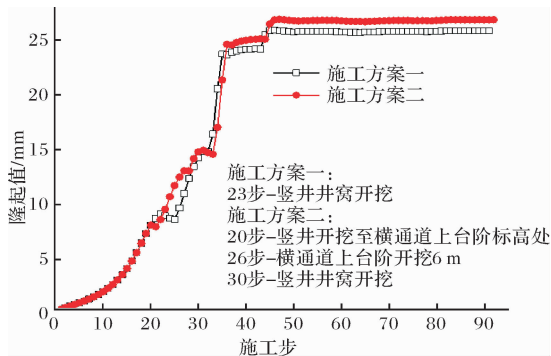


图 13 最大隆起位置随施工对比变化曲线

Fig. 13 Variation process of maximum deformation of cross passage invert

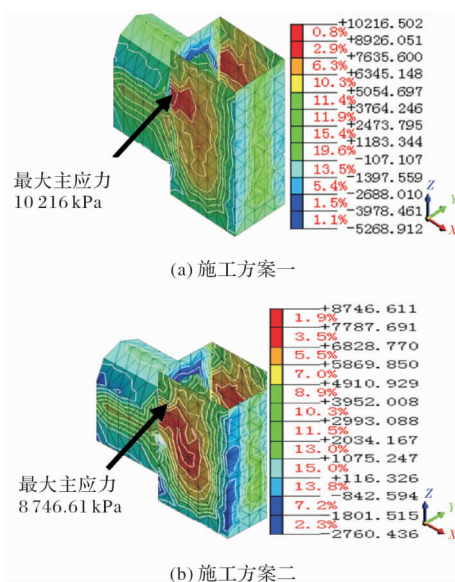


图 14 竖井马头门大主应力分布云图

Fig. 14 Maximum principal stress distribution of horse head

图 14 给出了竖井转横通道施工中竖井马头门段的大主应力分布云图,由图可见,方案二和方案一大主应力最大值都出现在马头门拱肩处的竖井井壁位置,但方案一的大主应力最大值比方案二的最大值小了14.38%.

图 15 给出了竖井转横通道施工中竖井马头门段的最大剪应力的分布云图.两种施工方案下马头门段支护结构受到的最大剪应力整体上比受到的最大主应力要小,且方案二比方案一时的最大剪应力值小了8.93%.

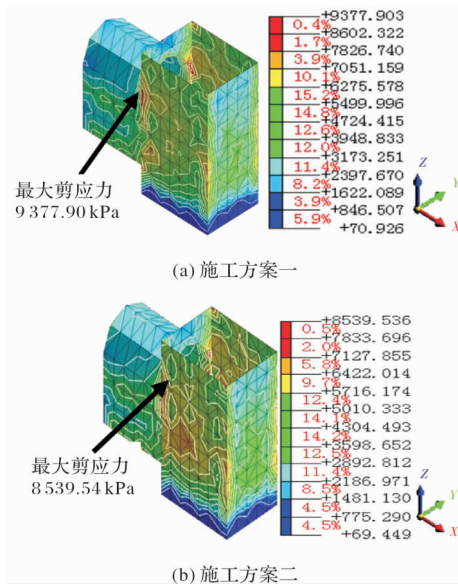


图 15 竖井马头门段剪应力分布云图

Fig. 15 Maximum shear stress distribution of horse head

综上所述,方案二相较于方案一能更有效地控制竖井、横通道结构支护的变形和受力.特别是方案二,能使横通道横向最大变形值减少63.49%.但是竖井和横通道交叉段、马头门位置依然是施工的危险位置,在马头门破除前需要对竖井、横通道周围土体进行加固.

综合两种施工方法和数值模拟结果的比较分析,建议西安地铁5号线月登阁站~三殿村站区间竖井采用“竖井-横通并行”的施工方案,并在施工中加强竖井马头门段的支护强度,确保施工中该应力集中部位的稳定性.

3 竖井转横通道施工及现场监测

3.1 区间隧道“竖井-横通并行”施工

西安地铁5号线月登阁站~三殿村站区间竖井按照建议的“竖井-横通并行”施工方案进行施工,基于数值试验分析结果和现场施工实际情况,确定竖井转横通道施工流程及施工控制技术要点

如下:

(1)进行竖井井口段的施工,在完成竖井周边管线等调查和改迁基础上,完成竖井锁口圈梁施工,并进行基槽开挖;

(2)竖井井身段开挖采用明挖逆做的人工开挖,每次开挖进尺 0.50 m,由上而下,边开挖边支护。鉴于黄土地层的复杂性,竖井应避免全断面开挖,宜采取分侧、分块,边挖边支;竖井采用的开挖顺序见图 16 所示。

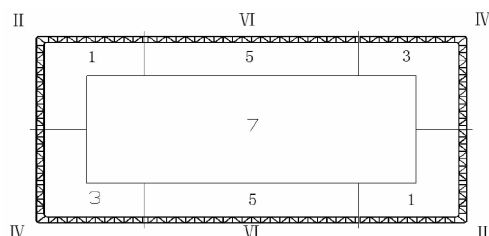


图16 竖井开挖、支护顺序(1、3、5、7为开挖顺序, II、IV、VI为格栅钢架施工顺序)

Fig. 16 Excavation and support sequence of shaft

(1、3、5、7 are excavation sequence, II、IV、VI are support sequence)

(3)竖井井壁土方分侧、分块开挖中,每开挖完成一段,在净空检查合格后初喷 40 mm 砼封闭,再挂 $\Phi 6.5@150\text{ mm}\times 150\text{ mm}$ 钢筋焊接成的双层钢筋网;其后进行格栅钢架施工并补喷 C25 混凝土至 400 mm。

(4)进行竖井井壁地层固结注浆。在竖井井壁设 $\Phi 42\times 3.5$, $L=3\text{ m}$ 的注浆钢管,每格格栅钢架打设一次,环向间距 0.4 m;在喷砼后立即采用 1:1 水泥-水玻璃双液浆进行地层固结注浆。

(5)竖井开挖至马头门位置时,于马头门上设置加强型钢钢架,继续开挖至横通道上台阶底部;进行 30 cm 的素喷 C25 砼封底后转入横通道施工。

(6)竖井横通道施工的关键是马头门的施工,根据数值模拟分析,该处结构受力复杂,是施工控制的重点。为确保施工安全,在马头门破除前的换撑处置中在横通道上台阶开挖部分采用 I20 型钢设置临时支撑,并在进洞后拆除。

(7)进行横通道顶部超前小导管的施作,采用 $\Phi 42\times 3.5$, $L=4\text{ m}$ 小导管进行超前注浆加固横通道地层;小导管注浆固结后破除马头门。横通道开洞后先并行设置 I20 型钢钢架 3 榀,喷射砼完成支护。

(8)按环形开挖预留核心土方式进行横通土体开挖及支护,在上台阶推进 4.00 m 后进行下部台

阶的施工;上下台阶并行施工,下台阶推进 4.00 m 后转而进行竖井剩余部分的施工。

(9)竖井开挖至设计深度进行永久封底施工,采用间距 0.50 m 的 I20a 工字钢和厚度 350 mm 网喷 C25 砼封底;设置井壁临时爬梯等辅助施工设施,完成竖井转横通道的施工。

3.2 区间隧道施工安全监测

为确保竖井转横通道的施工安全,在施工过程中对竖井转横通道并行施工引起的地表沉降和横通道拱顶沉降进行了跟踪监测。工程竖井及横通道地表沉降监测点布置如图 17 所示,监测断面以 5.00 m 为间隔,共设 5 组。

选取 H1 系列监测点进行分析,图 18 给出了地表沉降和横通道拱顶沉降监测数据图,由图和现场监测数据的分析可见,对地下水位较低的黄土地层或是降水条件下的黄土地层,施工引起的沉降均较小;就地表沉降量数值而言,受竖井和横通道施工的影响,地表最大沉降值约为 10.00 mm,小于规范要求的 30.00 mm 的控制值。对横通道施工引起的横通道拱顶的变形而言,其沉降最大值出现在马头门附近,距离马头门距离越远,拱顶沉降量将随之减小。但模拟结果整体上要比实测结果要小。

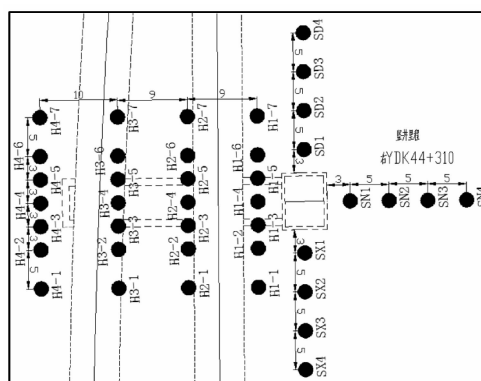


图 17 监测点布置图

Fig. 17 Layout of measuring points

对比分析数值模拟和现场监测变形的变化,由图 18 可见,施工监测结果与模拟分析中地表沉降最大位置基本一致,且其数值相差不大;就马头门处的变形而言,实际监测中马头门拱顶向临空面变形,而模拟结果为向地表的抬升变形。但就数值分析和监测结果的数值对比而言,采用“竖井-横通并行”施工方案引起的地层以及竖井、横通道支护结构变形均在 15.00 mm 之内,因此,降水条件下的黄土地层中,如地层稳定,采用“竖井-横通并行”施工的方案经济、可行。

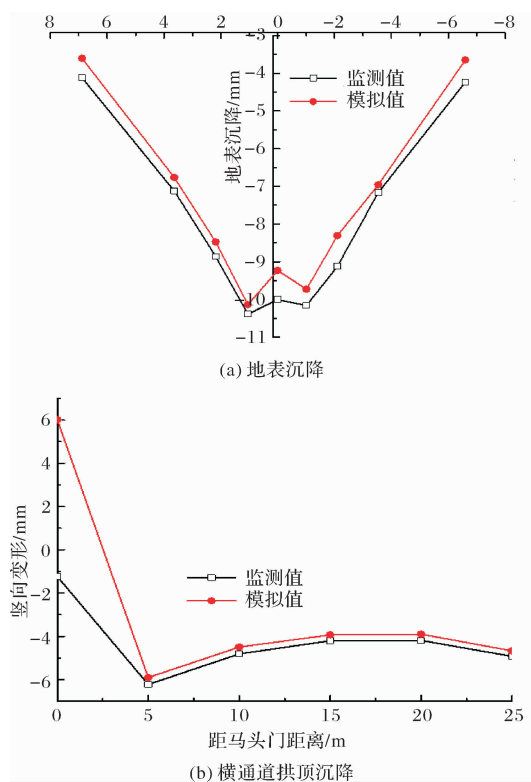


图18 “竖井-横通并行”施工地表沉降对比

Fig. 18 Comparisons of measured and calculated ground surface settlements

4 结论

以西安市地铁五号线一期工程中月登阁站~三殿村站区间隧道竖井转横通道施工为背景,对少水条件下的黄土地层中竖井转横通道施工的稳定进行数值试验,分析了“竖井-横通并行”施工方案以及“先竖井后横通”施工方案引起的地层及竖井、横通支护结构的变形、受力特点,论文研究可得出如下研究结论:

(1) 降水条件下黄土地层中采用“竖井-横通并行”方案和“先竖井后横通”方案引起的地表沉降基本相同,但“竖井-横通并行”方案在控制竖井和横通本身的变形效果上具有明显的优势,并行方案较“先竖井后横通”方案时竖井和横通道的收敛变形减小了约21.91%。

(2) 采用“竖井-横通并行”施工方案时,横通道最大收敛位移出现在距马头门2倍竖井跨度位置,而“先竖井后横通”方案横通道的水平收敛变形最大值出现在马头门附近。

(3) 黄土地层中不同竖井转横通道施工方案施工时,竖井井壁靠近马头门位置均将出现局部的应力集中,因此是施工加固的重点位置。但就应力的数值而言,“竖井-横通并行”施工方案中竖井马

头门附近的大主应力较“先竖井后横通”方案减小了14.38%,因此并行方案竖井安全系数较高。

(4) 黄土地层中不同竖井转横通道施工方案施工时,竖井-横通道周边地层中的塑性区均出现在马头门附近,且以马头门拱底位置处地层的塑性范围最大,因此竖井转横通道施工中需加强横通道底部地层的加固。

基于数值模拟试验的对比分析和跟踪施工进行的变形监测均表明,在稳定的黄土地层中采用“竖井-横通并行”方案经济、可行,因此,在黄土地区的地铁暗挖施工中的竖井转横通道施工,应优先选用“竖井-横通道并行”施工方案。

参考文献 References

- [1] 宋战平,张丹锋,曲建生,等. 承压富水砂土地层桩洞法施工变形控制研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版),2015,47(1):33-38.
SONG Zhanping, ZHANG Danfeng, QU Jiansheng, et al. Study on the deformation control of PBA construction method in pressure water sand stratum[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2015, 47(1): 33-38.
- [2] 王东元,曲慧红,李文波. 既有线下邻近大断面地铁双隧道暗挖施工对地表形变的影响[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(S2):4075-4085.
WANG Dongyuan, QU Huihong, LI Wenbo. Issues affecting ground subsidence induced by covered excavation for large cross-sectional twin tunnel under existing structures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(S2): 4075-4085.
- [3] 刘涛,张瑾,闫楠. 岩石地区浅埋暗挖地铁车站支护结构设计初步研究[J]. 岩土工程学报,2010,33(S2):347-350.
LIU Tao, ZHANG Jin, YAN Nan. Retaining structure design of subway station of under cutting with shallow over burden in rock strata[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 33(S2): 347-350.
- [4] 罗富荣,国斌. 北京地铁天安门西站“暗挖逆筑法”施工技术[J]. 岩土工程学报,2001,23(1):75-78.
LUO Furong, GUO Bin. Construction technology of “tunneling and top-down method” at west Tian'an men station in metro of Beijing[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 75-78.
- [5] 王林琳,杨修. 暗挖地铁车站开挖引起临近古建筑沉降的研究[J]. 铁道建筑技术,2014,31(4):17-20.
WANG Linlin, YANG Xiu. Research on the Subsidence of Adjacent Ancient Building Close to the Underground Excavation of Subway Station[J]. Railway

- Construction Technology, 2014, 31(4): 17-20.
- [6] 台启民,张顶立,房倩,等. 暗挖重叠地铁隧道地表变形特性分析[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(12): 2472-2480.
- TAI Qimin, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. Analysis of ground surface deformation induce by excavation of crossing metro tunnels in urban under ground [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(12): 2472-2480.
- [7] 李静. 竖井横通道转正洞施工方案比选[J]. 隧道建设,2008,28(4):476-478.
- LI Jing. Comparison of construction Scheme for conversion from Horizontal and shaft to main tunnel[J]. Tunnel Construction, 2008, 28(4): 476-478.
- [8] 邵晶. 城市地铁施工的数值模拟与参数反分析[D]. 大连:大连交通大学,2011.
- SHAO Jing. The construction Numerical simulation and back analysis Parameters of urban subway[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2011.
- [9] 俞琳. 软岩隧道开挖与支护数值分析[D]. 大连:大连理工大学,2005.
- YU Lin. Numerical analysis on tunnel excavation and support in soft rock[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2005.
- [10] 王清标,蒋金泉,路林海,等. 不同开挖方式对近距离交叠隧道影响模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(10):2079-2087.
- WANG Qingbiao, JIANG Jinquan, LU Linhai, et al. Numerical simulation for influence law of different excavation methods on adjacent over lapping tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(10): 2079-2087.
- [11] 杨福麟,刘永林,胡斌. 武汉地铁隧道开挖引起地表沉降的数值模拟研究[J]. 工程地质学报,2013,21(1): 85-91.
- YANG Fulin, LIU Yong-lin, HU Bin. Numerical simulation of ground subsidence to tunnel excavation for wuhan subway [J]. Journal of Engineering Geology, 2013, 21(1): 85-91.
- [12] 王福恩,张付林. 地铁竖井横通道破马头门施工技术研究[J]. 安徽建筑,2009,166(3):54-55,77.
- WANG Fuen, ZHANG Fulin. Study on the Opening Technology of Horsehead between Subway Shaft and Cross Aisle[J]. Anhui Architecture, 2009, 166(3): 54-55,77.
- [13] 贺长俊,蒋中庸,崔志杰,等. 城市地下工程施工中的马头门开挖技术[J]. 市政技术,2012,3(3):17-21.
- HE Changjun, JIANG Zhongyong, CUI Zhijie, et al. Ingate Excavation Technology of Urban Underground Engineering Construction[J]. Municipal Engineering Technology, 2012, 3(3): 17-21.
- [14] 白铭海,吉小明. 地铁小竖井转横通道施工大跨隧道数值模拟分析[J]. 地下空间与工程学报,2015,11(4):469-476.
- BAI Minghai, JI Xiaoming. Numerical Simulation Analysis of Large-Span Tunnel Construction through Cross Aisle from Subway Small Shaft [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2015, 11(4): 469-476.
- [15] 蒋青青,黄晓阳,周恺,等. 复杂条件下地铁隧道马头门施工技术与监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010,29(S1):2858-2865.
- JIANG Qingqing, HUANG Xiaoyang, ZHOU Kai, et al. Construction technology and monitoring analysis of subway tunnel ingate under complex condition [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(S1): 2858-2865.

(编辑 吴海西 沈 波)