

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.10.002

# 特大断面浅埋暗挖隧道十字岩柱开挖 技术模型试验研究

刘泉声<sup>1,2</sup>, 彭星新<sup>1,3</sup>, 雷广峰<sup>1,3</sup>, 王俊涛<sup>1,3</sup>, 张静<sup>1,3</sup>, 肖龙鸽<sup>4</sup>

(1. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 2. 武汉大学 土木建筑工程学院 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 中建南方投资有限公司, 广东 深圳 518022)

**摘要:** 特大断面浅埋暗挖隧道是一种新型隧道, 目前尚无相应的设计施工技术规范与标准可循。以重庆市轨道交通3号线红旗河沟车站隧道为工程背景, 结合以前施工方法的优缺点, 提出了一种新的施工方法十字岩柱法。为了解这种施工方法在施工过程中隧道围岩位移和应力的变化情况, 采用地质力学模型试验方法进行研究。试验对监测断面的位移和应力进行系统监测, 全方位地了解各开挖步隧道围岩各处的应力与位移变化情况。选取工程背景现场的地质参数, 采用ABAQUS软件建立数值分析模型, 将数值计算与试验实测结果进行对比, 两者的位移与应力变化规律基本一致, 这表明模型试验实测的数据比较准确地揭示了隧道围岩位移及应力变化规律。其研究工作可对今后类似工程的施工提供经验和指导。

**关键词:** 隧道工程; 特大断面; 超浅埋; 十字岩柱; 模型试验

中图分类号: TU 43

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)07-2780-09

## Geomechanical model test on excavation technology of super-large cross-section ultra-shallow tunnel with cross rock pillar method

LIU Quan-sheng<sup>1,2</sup>, PENG Xing-xin<sup>1,3</sup>, LEI Guang-feng<sup>1,3</sup>, WANG Jun-tao<sup>1,3</sup>,  
ZHANG Jing<sup>1,3</sup>, XIAO Long-ge<sup>4</sup>

(1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Safety Engineering of Hubei Province, School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University, Wuhan, Hubei 430072, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. China Construction South Investment Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong 518022, China)

**Abstract:** Recently, a new type tunnel emerges with these main features of super-large, cross-section and ultra-shallow. However, there are no relevant technical standards for the design and construction of the station tunnel at present. Taken Hongqihogou Station tunnel in Chongqing Metro 3rd line as the engineering background, a novel excavating method named the cross rock pillar method was developed by considering the advantages and disadvantages of the former methods of tunnel construction. A geomechanical model test was used to monitor stress and deformation of surrounding rock mass of the station tunnel during the process of excavation. The stress and displacement of surrounding rock were comprehensively analyzed during each step excavation. According to the geological parameters of the tunnel, a numerical analysis model was established based on ABAQUS software. By comparing monitoring results with numerical results, it indicates that the variation laws of stress and displacement are essentially the same. It is proved that the model test effectively reveals the variation laws of the stress and displacement of the tunnel. Therefore, this study provides valuable experience and useful guidance for the construction of similar projects in the future.

**Keywords:** tunnelling engineering; super-large cross-section; ultra-shallow; cross rock pillar method; model test

## 1 引言

目前, 城市轨道交通已成为解决大中城市交通

拥堵问题的首选方案。然而, 在城市轨道交通网络的建设过程中, 为了城市居民出行方便, 设置了一些换乘站, 即2条或3条轨道路线交汇于一点, 从

收稿日期: 2015-12-16

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(No. 41130742); 国家自然科学基金面上项目(No. 51474205)。

This work was supported by the Key Program of National Natural Science Foundation of China (41130742) and the General Program of Natural Science Foundation of China (51474205).

第一作者简介: 刘泉声, 男, 1962年生, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事岩石工程方面的教学与研究工作。E-mail: liuqs@whrsm.ac.cn

通讯作者: 彭星新, 男, 1990年生, 博士研究生, 主要从事隧道开挖及TBM岩-机相互作用的研究工作。E-mail: pengxingxin\_cumt@126.com

而出现了一些大断面浅埋暗挖隧道。大断面浅埋暗挖工程与小断面浅埋暗挖工程有很大的不同，由于断面太大，带来的问题比小断面浅埋暗挖工程复杂很多。因此，必须深入研究隧道开挖技术，解决在开挖超大断面浅埋暗挖隧道中存在的问题，保证城市轨道交通的顺利建设。

许多学者<sup>[1-3]</sup>进行了大断面隧道施工对围岩扰动及其应力状态的研究。研究表明，隧道围岩强度越低、越破碎，稳定所需的时间越长，另外不同的开挖方法及其开挖步序对围岩的收敛变形也有较大的影响。因此，在地质情况较差的条件下，隧道开挖方法及其开挖步序是大断面隧道的关键问题。

目前，模型试验和数值分析是研究隧道施工过程中围岩变形及其力学行为的重要手段。很多学者<sup>[4-9]</sup>使用模型试验和数值分析的方法对隧道施工进行了大量的研究，研究结果可有效揭示隧道施工过程中围岩变形及其应力变化规律。

上述学者研究大多是山体大断面隧道，埋深比较大，围岩条件较好，而针对围岩条件较差的超大断面浅埋隧道的研究较少。因此，本文以重庆市轨道交通红旗河沟站特大断面浅埋暗挖隧道为工程背景，提出一种新的开挖方法，即十字岩柱法，采用模型试验和数值分析的方法研究该开挖方法在超大断面浅埋隧道开挖过程中围岩的位移与应力变化规律，研究成果可有效指导工程设计和施工。

## 2 十字岩柱法简介

十字岩柱法是将超大断面隧道开挖通过十字岩柱转化为 5 步开挖的一种新方法，是由双侧壁导洞法演变而来的，其主要的区别在于将原来的左、右导洞上、中、下分部顺序开挖改变为对角开挖，再进行中部解除。隧道开挖的示意图及流程图如图 1、2 所示。

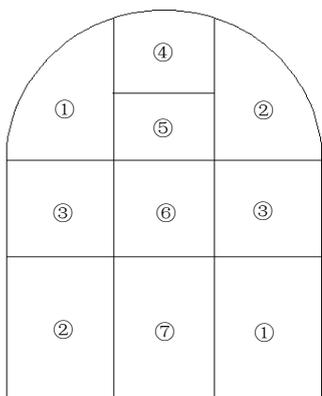


图 1 车站隧道开挖示意图  
Fig.1 Diagram of excavation of the station tunnel

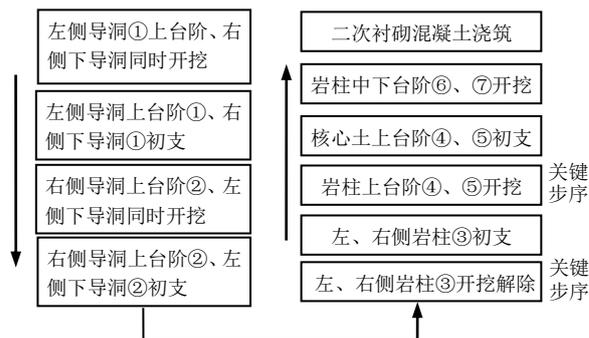


图 2 现场开挖流程图  
Fig.2 Flow chart of the excavation on site

该方法的基本思想是利用十字岩柱自由承载能力对隧道提供竖向、水平向支撑，抑制隧道变形，并通过内岩作用改善围岩及其他内岩受力状态，进而提高围岩的自承能力，抑制隧道变形，提高隧道施工过程稳定性。

该施工开挖方法的特点如下：

(1) 本工法与传统双侧壁导坑法相比，采用对角导坑同时开挖，可充分利用大断面隧道特性，增加开挖工作面，加快隧道开挖速度，有效缩短施工工期。

(2) 充分利用天然十字岩柱或通过加固的十字岩柱对隧道提供水平竖向支撑，减少隧道水平收敛变形和拱顶沉降，确保隧道施工期间的安全。

(3) 由于利用了十字岩柱的自身承载能力取代了部分或全部临时内部支撑的作用，所以，节约工程材料成本。

(4) 利用隧道下导洞施工局部仰拱和部分边墙后再解除岩柱，从而减低隧道二衬断面高度，解决超大断面模板台车施工难题。

为了进一步了解该开挖方法的可行性及开挖过程中围岩的位移及应力的变化规律，采用模型试验和数值模拟相结合的方法进行研究。

## 3 模型相似材料的选取

### 3.1 工程概况

以重庆市轨道交通红旗河沟站为工程背景，该车站埋深为 13.0~20.5 m，是一座暗挖地下岛式车站，车站平面尺寸为 178.9 m×20.5 m，有效站台长度为 120 m，车站开挖断面有多种不同大小的断面。最大开挖断面达 760 m<sup>2</sup> (25.55 m×32.83 m)，该断面位于 3 号线与 6 号线的交叉处 (如图 3 所示)，属典型的超大断面浅埋暗挖隧道。

根据地质勘查资料显示，红旗河沟暗挖车站隧道沿线地层岩性自上而下依次为：人工填土，厚度为 0.8~6.3 m；中风化砂岩，厚度为 8.6~17.5 m，

岩体较完整；砂质泥岩，层厚为 22~29.5 m，岩体较完整，车站最大断面围岩埋深最薄处仅 8.6 m。岩层呈单斜状构造，车站隧址内无区域性断层，地质条件简单。工程地质纵断面图如图 4 所示。

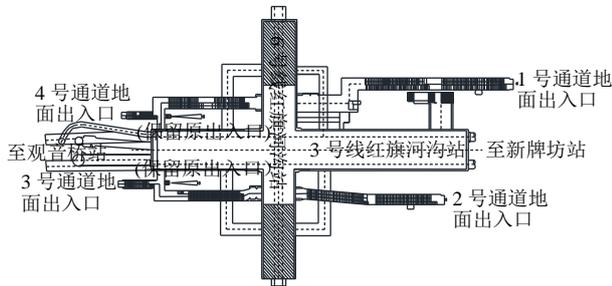


图 3 车站平面图

Fig.3 Plan of the station tunnel

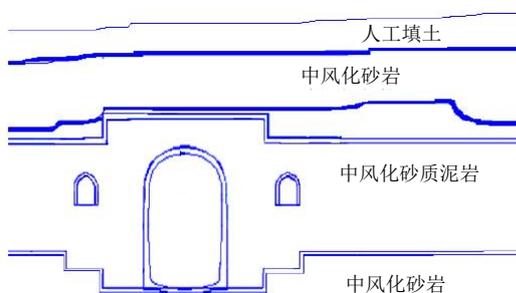


图 4 最大断面工程地质纵断面示意图

Fig.4 The maximum engineering section in geological longitudinal profile

根据上述的工程地质概况，车站最大断面隧道拱顶都有中风化砂岩、人工填土，开挖断面地层主要为中风化砂质泥岩，属于 IV 级围岩。本文的模型试验对地层进行了简化，将中风化砂岩等同为中风化砂质泥岩，表层的人工填土采用一般的黏土。

根据现场岩石力学试验结果，红旗河沟车站隧道原岩（中风化砂质泥岩）的物理力学性质见表 1，根据相似原理<sup>[10-11]</sup>，考虑模型几何相似尺寸  $C_L = 50$ 、重度相似比尺  $C_r = 1$ ，则可得到模型材料的物理力学参数，如表 1 所示。

表 1 原型和模型材料的物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the prototype and the model materials

材料类型	$\gamma/(\text{kN/m}^3)$	$E/\text{MPa}$	$\mu$	$c/\text{kPa}$	$\sigma_c/\text{MPa}$	$\varphi/(\text{°})$
原岩	25.09	2 449.00	0.34	1 200	20.700	35
模型	25.00	48.98	0.34	24	0.414	35

注： $\gamma$ 为重度， $E$ 为弹性模量， $\mu$ 为泊松比， $c$ 为凝聚力， $\sigma_c$ 为抗压强度， $\varphi$ 为内摩擦角。

### 3.2 模型材料的选取及配制

很多学者<sup>[12-17]</sup>对模型试验相似材料进行了大量研究，他们采用不同的原材料进行配比，研制出

多种不同性能的相似材料，各种材料各有利弊。结合各原材料的性能、工程地质情况、地质参数以及经济性、安全性，本模型试验选用市场上常见的铁精粉、石英砂、石膏、凡士林。其中铁精粉用于调节模型材料的密度，石英砂是骨料，石膏的作用是调节凝聚力，凡士林的作用是调节内摩擦角。根据表 1 中的力学参数，以相似材料的重度、抗压强度、凝聚力、内摩擦角以及变形模量为控制指标，开展了配比试验、单轴抗压强度试验、直剪试验，通过调整铁晶砂胶结相似材料各个组成成分的比例，进行正交试验和二次细化试验，最终得到满足相应条件的配比，如表 2 所示。

表 2 车站隧道模型材料的配比

Table 2 Proportion of the model materials

铁粉 /%	石英砂 /%	水 /%	石膏 /%	凡士林 /%
43.48	43.35	3.48	5.22	4.35

## 4 三维地质模型的制作

### 4.1 三维地质模型基本情况

红旗河沟车站隧道最大断面原型模拟尺寸为  $90\text{ m} \times 60\text{ m} \times 30\text{ m}$  = 长（平行隧道轴向方向） $\times$ 高（沿高程方向） $\times$ 厚（垂直隧道轴线方向）。模型试验几何相似比尺取为 1:50，据此可得隧道模型的模拟尺寸为  $1.8\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ 。

为了更加直观地观察开挖过程中围岩及掌子面的情况，模型架的正面采用较厚的有机玻璃板。为了模拟衬砌，根据相似原理以及支护参数，用较薄的有机玻璃板模拟衬砌；为了模拟注浆，注浆材料选用普通硅酸盐水泥，用小注射器在有机玻璃板上预留的注浆孔注入浆液；为了模拟锚固，进行了多种材料的力学试验，最终选取较符合刚度和强度要求的细铝丝作为锚杆的模型材料，有机玻璃薄板上预留了小孔，铝丝可以直接插入。

### 4.2 模型制作工艺流程

车站隧道试验模型采用分层人工压实、自然风干法制作，其基本流程如下：①根据试验前期准备阶段获取的配比，称取各成分的重量，准备配制模型材料；②将称好的材料倒入搅拌机，进行均匀搅拌；③待材料搅拌均匀之后，加入液态凡士林拌合均匀；④将拌好的材料倒入模型箱内，由下往上分层摊铺材料；⑤每铺一层，人工用铁质加压板均匀压实材料；⑥按设计标高在洞周围分层设置量测元件；⑦按照①~⑥步的顺序，逐层的填筑材料、自

然风干、埋设测量元件，直至模型制作完成。

### 5 模型开挖

通过与现场施工方案的比对，开挖时每次开挖步距向前推进 5 cm，开挖过程中应变砖、微型多点位移计、微型压电式传感器都能进行实时监测，在开挖过程中只需记录各开挖步的起始时间以及开挖结束的时间。在每步开挖结束后，暂停开挖，观察各监测仪器上的读数，待数据较稳定后继续开挖，每个开挖工序之间间隔大约为 10 min。整个开挖过程共分 34 步，隧洞开挖采用人工钻凿方式，导致整个开挖过程持续时间很长，要求做到实时不间断地监测，所以在开挖过程中应配备足够的试验监测人员及后勤保障人员，保证试验过程持续不间断地按计划进行。

将开挖区域划分为图 1 所示的 7 个部分，具体开挖步骤如表 3 所示。

表 3 隧道模型具体开挖步骤  
Table 3 Specific steps of tunnel excavation

开挖时步	内容
1	部位①开挖 30 cm，加边墙支护锚杆，放有机玻璃护板
2	部位②开挖 10 cm，加有机玻璃脚板，加边墙支护锚杆
3	解除岩体③10 cm，加边墙锚杆
4	拆除④10 cm，加顶部锚杆，拆除⑤10 cm
5	部位①开挖至 40 cm，加边墙支护锚杆和有机玻璃护板
6	部位②开挖至 20 cm，加有机玻璃脚板和边墙支护锚杆
7	解除岩体③至 20 cm，加边墙锚杆
8	拆除④至 20 cm，加顶部锚杆，拆除⑤至 20 cm
9	部位①开挖至 50 cm，加边墙支护锚杆和有机玻璃护板
10	部位②开挖至 30 cm，加有机玻璃脚板和边墙支护锚杆
11	解除岩体③至 30 cm，加边墙锚杆
12	拆除④至 30 cm，加顶部锚杆，拆除⑤至 30 cm
13	拆除⑥至 10 cm
14	部位①开挖完，加边墙支护锚杆，放有机玻璃护板
15	部位②开挖至 40 cm，加有机玻璃脚板和边墙支护锚杆
16	解除岩体③至 40 cm，加边墙锚杆
17	拆除④至 40 cm，加顶部锚杆，拆除⑤至 40 cm
18	拆除⑥至 20 cm
19	拆除⑦至 10 cm
20	部位②开挖至 50 cm
21	解除岩体③至 50 cm，加边墙锚杆
22	拆除④至 50 cm，加顶部锚杆，拆除⑤至 50 cm
23	拆除⑥至 30 cm
24	拆除⑦至 20 cm
25	部位②开挖至 60 cm
26	解除岩体③至 60 cm，加边墙锚杆
27	拆除④至 50 cm，加顶部锚杆，拆除⑤至 60 cm

后面的开挖时步 28~34 分别为：拆除⑥至 40 cm；拆除⑦至 30 cm；拆除⑥至 50 cm；拆除⑦

至 40 cm；拆除⑥至 60 cm；拆除⑦至 50 cm；拆除⑦至 60 cm。其中开挖部位①和②时，每次分两步开挖，每次开挖 5 cm（代表实际开挖 2.5 m）。图 5 为开挖过程中的照片。



图 5 模型隧道开挖照片  
Fig.5 Photo of excavation of the model tunnel

### 6 三维数值建模

为了验证模型试验监测结果的准确性，采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟。模型的竖直方向向上取隧道实际埋深，向下取 3 倍隧洞高度，在水平方向上左、右取隧道跨度的 3 倍。模型的边界条件：上部为自由边界，侧面与底面均为法向约束边界。车站隧道区域内无大的构造作用且隧道为浅埋，初始应力按自重应力场。

根据工程现场的地质资料，得到红旗河沟车站主要地质参数如表 1 所示，支护参数如表 4 所示，计算采用三维模型，开挖的方案与模型试验的开挖方案一致，计算模型如图 6 所示。

表 4 支护参数  
Table 4 Supporting parameters

类型	设计材料	弹性模量/GPa	泊松比
初期支护	C25 喷混凝土	25	0.34
二次衬砌	C30 喷混凝土	30	0.34

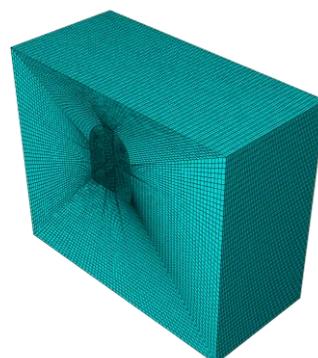


图 6 计算模型  
Fig.6 Numerical model

## 7 模型试验结果分析

### 7.1 围岩位移分析

图 7 给出了车站隧道模型位移监测断面布置图。

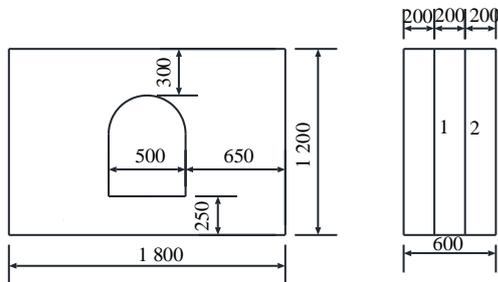


图 7 隧道模型位移监测断面布置图 (单位: mm)

Fig.7 Layout of the monitoring sections of displacement for the tunnel (unit: mm)

图 8 给出了车站隧道模型位移监测点布置图。

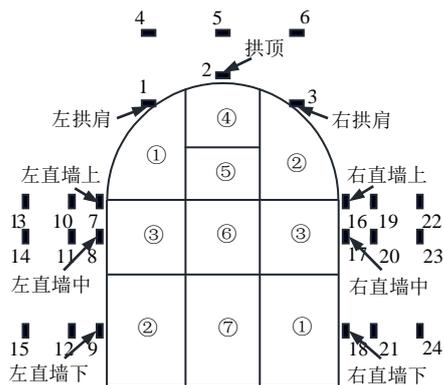


图 8 位移监测点布置图

Fig.8 Layout of monitoring points of displacement

图 9(a)~9(i)给出了隧道监测断面拱顶、左拱肩、右拱肩、左直墙上、右直墙上、左直墙中、右直墙中、左直墙下、右直墙下 9 个部位随开挖时步实测和数值计算位移变化曲线。图 9(a)~9(i)中“—”号分别表示拱顶位移方向向下和直墙位移方向朝内。

由图分析可知:

(1) 实测的与计算模型中的位移变化曲线变化规律基本一致, 最大的位移值相差不大, 说明实测的位移值有效, 监测结果能反映真实的位移变化。

(2) 在开挖过程中, 对模型进行了扰动, 隧洞围岩的应力重新分布导致了洞周发生变形, 变形都朝洞内。试验设计无额外加载, 只有自重应力, 导致变形较大的区域是拱顶, 拱顶垂直向下位移大于直墙水平方向的位移。

(3) 按照开挖计划开挖结束后, 洞直墙的水平位移和洞拱的垂直位移都较小, 最大变形处位于拱顶, 变形值为 7.45 mm, 总体来看, 隧道洞周变形值满足施工的要求。

(4) 在开挖过程中, 当开挖到监测断面时, 相应的监测点处的位移显著增大, 并随着后续的开挖, 监测点的位移还在缓慢增大, 但最终增幅不大。

(5) 开挖完之后, 两个监测断面左右对称的监测点位移都趋近于一个值。

(6) 开挖过程中, 开挖①区域时, ②区域围岩会产生较大的位移, 开挖②区域时, ①区域围岩也会产生较大的位移。因此, 在开挖过程中需控制好①、②区域之间的间距, 降低①、②区域交替开挖造成的相互影响。

(7) 监测控制点处的岩梁或岩柱被开挖后, 两个监测断面上拱顶、直墙中位移明显比直墙上、直墙下增大的幅度大, 这说明十字岩柱法对抑制直墙的变形起到了重要作用。

另外, 如图 8 所示, 在两个监测断面拱顶、拱肩、直墙上、中、下沿洞外围岩深部方向埋设的多点位移计, 监测结果表明, 远离洞周测点的位移比洞周测点的位移小, 洞周位移沿洞外围岩深部方向逐渐减小, 说明隧洞模型开挖后洞周围岩的变形量与距洞周的距离成反比。

本模型试验主要是为了研究十字岩柱对隧道开挖的影响, 下面对拱顶及左、右直墙中的变形进行具体分析。

(1) 拱顶下沉分析:

第 1 断面在第 8、12、17、22 和 27 步的岩柱④开挖之前, 由于两侧已经有较大的临空面, 原来的拱部围岩变成岩柱与两侧的初期支护支撑, 相对于原岩来说支撑力作用减弱, 所以拱顶上方围岩向下挤压, 岩柱产生较小的竖向位移。而第 1 断面在第 8、12、17、22 和 27 步的岩柱④开挖之后, 拱顶失去岩柱的支撑, 拱顶出现较大的竖向位移, 从图 9(a) 可得各步的竖向位移合计为 5.02 mm, 占拱顶总下沉值的 67.59%。第 2 断面与第 1 断面情况相似, 在岩柱④开挖之前拱顶位移较小, 岩柱④开挖之后, 产生较大的位移, 合计为 5.45 mm, 占拱顶总下沉值的 73.06%。

从以上分析可知, 拱顶的竖向位移主要是由岩柱④的开挖引起的, 但每次开挖岩柱④之后的拱顶变形较小。因此, 在实际的工程开挖中应特别加强拱顶位移及地表沉降监测, 并做好拱顶的控制措施, 防止造成坍塌。

(2) 左、右直墙中位移分析：

第 1 断面在第 7、11、16、21 和 26 步的岩梁③开挖之前，岩梁③上、下两侧产生了较大的临空面，直墙中围岩变成由岩梁③及上、下两侧洞初期支护支撑，支撑作用比原岩减弱，所以墙中围岩会向洞内挤压，岩梁③会被压缩，产生的水平位移较小，而第 1 断面在第 7、11、16、21 和 26 步的岩梁③开挖之后，左、右直墙中失去岩梁的支撑，仅靠两侧洞初期支护，对墙中围岩的支撑作用大大减弱，墙中围岩向洞内挤压，从图 9(f)、9(g)中可得左直墙中各步的水平位移合计为 2.63 mm，占左直墙中总水平位移值的 51.93%，右直墙中合计 2.93 mm，占右直墙中总水平位移值的 57.56%。第 2 断面与第 1 断面情况相似，在岩梁③开挖之前直墙中位移较小，岩梁③开挖之后，产生较大的位移，左、右直墙中的水平位移分别为 1.63、1.71 mm，分别占左、右直墙中总水平位移的 32.01%、34.05%。

以上数据显示，直墙中部的水平位移主要是由水平方向岩柱的开挖引起的，每解除一次岩梁③，左、右直墙中产生较小的位移。因此，在实际的工程开挖中应特别加强直墙中部位移的监测，并做好直墙水平位移的控制措施。

实际工程现场的开挖顺序是先开挖左上、右上两个侧洞，后开挖左下、右下两个侧洞，这与本文的开挖顺序有所不同。工程现场对部分区域进行了监测，实测的拱顶位移为 7.51 mm，左侧拱肩竖向位移为 4.64 mm，左侧侧墙水平位移为 5.33 mm，而本模型试验监测到的拱顶位移为 7.45 mm，左拱肩竖向位移为 5.14 mm，左侧侧墙的水平位移为 5.09 mm，二者各测点的位移值相差较小。另外从图 5 中可看出，没有围岩掉块、坍塌的现象，开挖面比较平整，没有出现破裂现象，说明本文采用的开挖方法中洞室围岩加固是比较稳定的，设计方案中的开挖步骤是合理的，满足施工的要求。

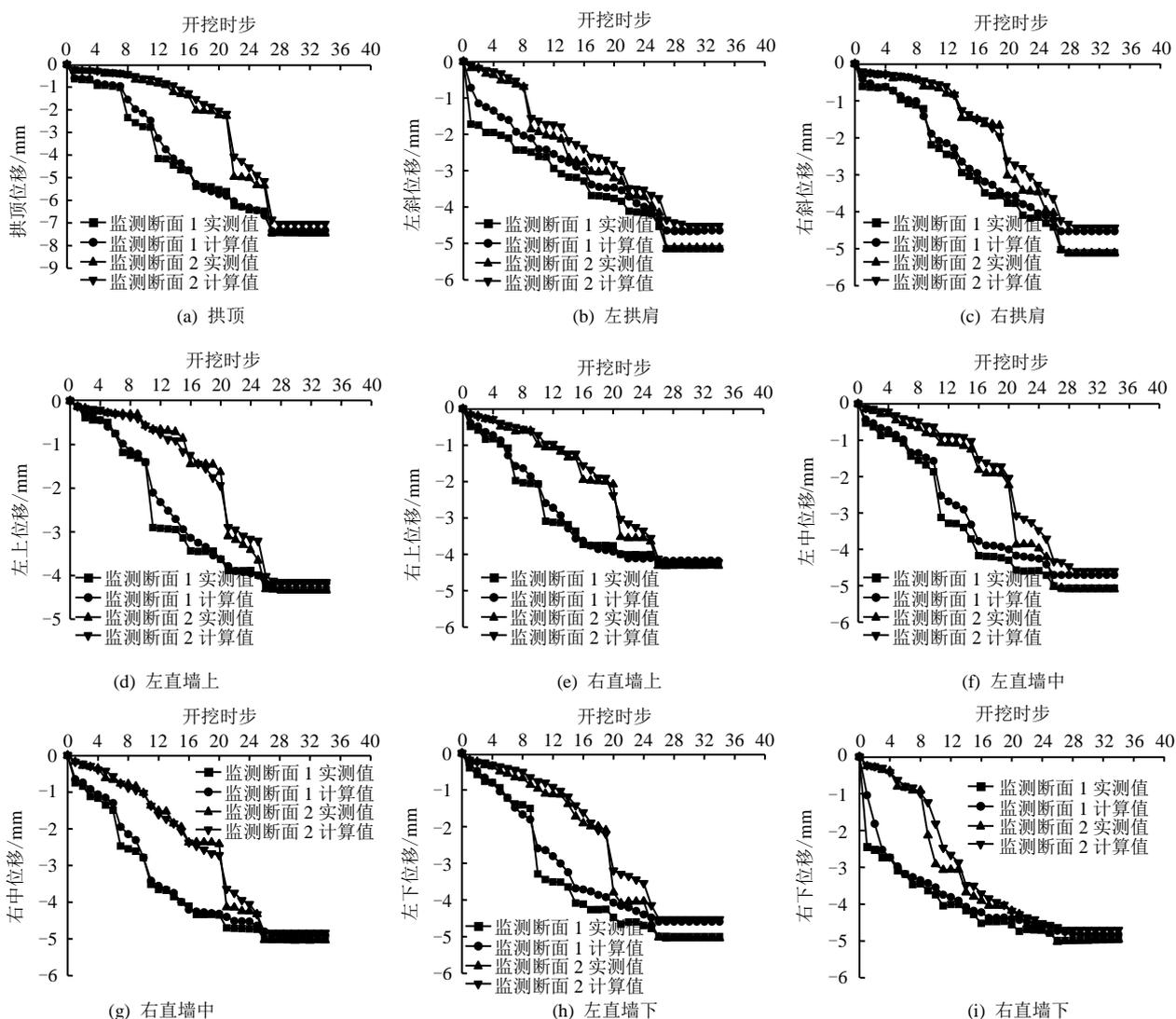


图 9 监测点位移变化曲线  
Fig.9 Variations of displacement of monitoring points

### 7.2 围岩应力分析

在如图7所示的监测断面1布置了应力监测点,监测点布置图与图8类似,监测点对应图8中箭头所指位置。

图10、11分别是第1监测断面9个监测点处隧道围岩在各开挖步下的第一主应力、第三主应力。由于第开挖27步以后,第一主应力和第三主应力变化不大,故在图10、11中没有显示第27步以后的应力值。模型的应力已按照相似原理换算成原型应力。图12、13分别是开挖完之后第一主应力和第三主应力的云图。通过比较可知,实测与计算结果基本一致,这表明实测结果基本能反应开挖过程围岩应力的变化规律,下面对各第一和第三主应力的变化规律做具体分析。

#### (1) 第一主应力变化规律应力

从图10可以看出,未开挖时,隧道围岩各点的都是受自重应力的影响,全都受压,埋深越深,围岩应力越大。当第1步开挖之后,隧道左上和右下部各产生较大的临空面,应力进行调整重新分布,其中左拱肩、左直墙上和右直墙中的应力发生巨变,由压应力变为拉应力,第2~5步监测点围岩应力变化较小,第6步开挖之后,监测断面1的右拱肩、右直墙上和左直墙中临空,应力发生巨变,由压应力变为拉应力。第7步岩梁③被开挖后,由于左、右直墙中都处于受拉的状态,故应力变化不大。在第9步岩柱④被开挖之后,拱顶临空,拱顶失去了支撑,应力发生巨变,由原来的压应力变为拉应力。隧道开挖断面通过监测断面1之后,各监测点的第一主应力变化很小,趋于稳定。

#### (2) 第三主应力变化规律

从图11中可以看出,监测断面各监测点第三主应力随开挖步序地进行应力值变化规律。第1步开挖之后,左拱肩下部出现临空,导致第三主应力减小,而左直墙上、左直墙中、右直墙中、右直墙下的第三主应力明显增大,主要原因是由于左上及右下部被掏空,失去了原有的支撑作用,导致其他部位承担的荷载增大。第6步开挖之后,监测断面1处的右上及左下部分被掏空,左直墙下及右直墙下的应力增大,其他监测点的应力也进行了一些调整,但变化不大。第7步岩梁③被开挖后,各监测点的应力变化不大。第9步岩柱④被开挖后,拱顶失去支撑,拱顶处的第三主应力明显减小。

综合如图10、11所示应力变化曲线,隧道围岩各监测点的围岩应力随着开挖地进行,压应力不断增大。除左直墙下、右直墙下外,其他各点的围岩都处于拉压的应力状态,左直墙下、右直墙下始终

处于压应力状态,应力相对集中。整体来看,拱顶处围岩主要以拉应力为主,其他部位以压应力为主。

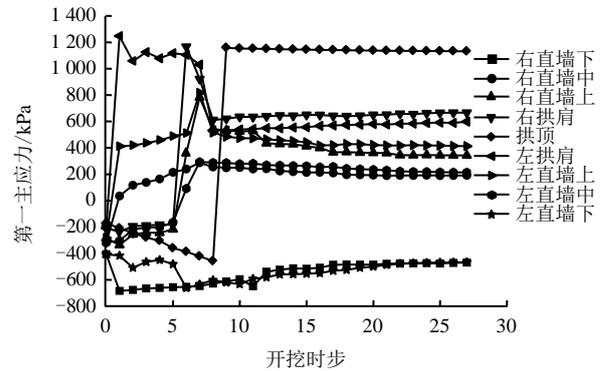


图10 测点第一主应力值

Fig.10 The maximum principal stress values of measuring points

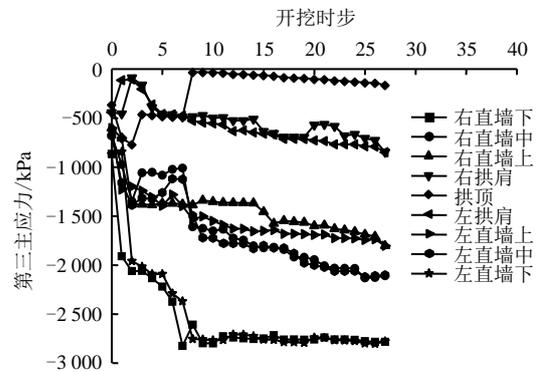


图11 测点第三主应力值

Fig.11 The minor principal stress values of measuring points

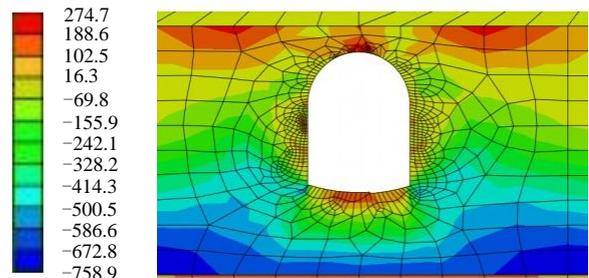


图12 第一主应力云图(单位:kPa)

Fig.12 Nephogram of the maximum principal stress (unit: kPa)

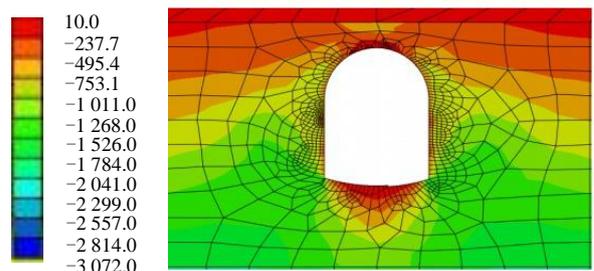


图13 第三主应力云图(单位:kPa)

Fig.13 Nephogram of the minimum principal stress (unit: kPa)

## 8 结 论

(1) 本文提出的十字岩柱法是对上下分导坑法的改进, 采用对角开挖, 先左上右下、后左下右上, 开挖过程中没有出现围岩掉块、坍塌的现象, 开挖面也没有出现破裂现象, 说明该情况下洞室围岩经过加固是比较稳定的, 设计方案中的开挖步序是合理的。

(2) 对隧道最大断面进行了系统的位移监测, 拱顶的最大沉降位移为 7.45 mm, 左、右拱肩的最大沉降位移分别为 5.14、5.11 mm, 左、右直墙上最大的水平收敛位移分别为 4.34、4.28 mm, 左、右直墙中的最大水平收敛位移为 5.09、4.97 mm, 左、右直墙下的最大水平收敛位移分别为 5.04、4.95 mm, 总体来看, 变形位移较小, 满足施工要求, 由此可见, 该方法能较好地控制围岩的稳定性。

(3) 十字岩柱开挖法明显抑制了拱顶及左右直墙的变形, 解除十字岩柱部分时拱顶或直墙的变形显著增大, 需提前做好控制措施。因此, 解除十字岩柱是该开挖方法的关键, 后续还需对岩柱的形状及尺寸进行优化, 进一步减小因解除十字岩柱而产生的变形。

(4) 隧道开挖过程中, 拱顶及拱肩会出现较大的拉应力, 墙脚会出现较大的压应力, 因此, 需做好防护措施, 防止拱顶出现拉破坏及墙脚挤压破坏。

(5) 本文的模型试验很好地模拟了十字岩柱的开挖, 揭示了车站隧道洞周的应力、位移变化规律, 其成果可指导今后类似工程的设计与施工。

## 参 考 文 献

- [1] 周丁恒, 曲海锋, 蔡永昌, 等. 特大断面大跨度隧道围岩变形的现场试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(9): 1773—1782.  
ZHOU Ding-heng, QU Hai-feng, CAI Yong-chang, et al. In-situ test surrounding rock deformation in super-large section and large-span tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2009, 28(9): 1773—1782.
- [2] 覃卫民, 李祺, 任伟中, 等. 复杂结构形式隧道的围岩位移监测分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(3): 549—557.  
QIN Wei-min, LI Qi, REN Wei-zhong, et al. Monitoring analysis of surrounding rock displacement of complex structure tunnel[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(3): 549—557.
- [3] MANDAL S K, SINGH M M. Evaluating extent and causes of overbreak in tunnels[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2009, 24(1): 22—36.
- [4] 张强勇, 李术才, 李勇, 等. 大型分岔隧道围岩稳定与支护三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 4051—4059.  
ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, LI Yong, et al. 3D Geomechanical model test research on stability and supporting for surrounding rock mass of a large-scale diversion tunnel al Engineering[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(2): 4051—4059.
- [5] 徐前卫, 朱合华, 廖少明, 等. 软土地层土压平衡盾构施工的模式试验研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(12): 1849—1857.  
XU Qian-wei, ZHU He-hua, LIAO Shao-ming, et al. Experimental study on EPB shield tunnel construction in soft ground[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(12): 1849—1857.
- [6] 黄文生, 司铁汉, 陈文胜, 等. 断层对大跨度隧道围岩应力影响的有限元分析[J]. 岩土工程学报, 2006, 25(增刊 2): 3788—3793.  
HUANG Wen-sheng, SI Tie-han, CHEN Wen-sheng, et al. Finite element analysis of influence of fault on large-span tunnel surrounding rock stress[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp. 2): 3788—3793.
- [7] 刘晓敏, 盛谦, 陈健, 等. 大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究(1): 岩体相似材料配比试验[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 83—88.  
LIU Xiao-min, SHENG Qian, CHEN Jian, et al. Seismic shaking table test for large-scale underground cavern group(I): Proportioning test on similar materials of surrounding rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(1): 83—88.
- [8] 张强勇, 李术才, 焦玉勇. 岩体数值分析方法与地质力学模型试验原理及工程应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
ZHANG Qiang-yong, LI Shu-cai, JIAO Yu-yong. Rock mass numerical analysis method and geomechanics model test principle and engineering application[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.
- [9] 李仲奎, 徐千军, 罗光福. 大型地下水电站厂房洞群三维地质力学试验[J]. 水利学报, 2002, 33(5): 31—36.  
LI Zhong-kui, XU Qian-jun, LUO Guang-fu. 3D geomechanical model test for large scaled underground

- hydropower station[J]. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2002, 33(5): 31—36.
- [10] 袁文忠. 相似理论与静力学模型试验[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 1998.
- YUAN Wen-zhong. Simulation theory and statics model test[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 1998.
- [11] FUMAGALLI E. Statical and geomechanical model[M]. New York: Springer, 1973.
- [12] 王汉鹏, 张庆贺, 袁亮, 等. 含瓦斯煤相似材料研制及其突出试验应用[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1676—1682.
- WANG Han-peng, ZHANG Qing-he, YUAN Liang, et al. Development of a similar material for methane-coal and its application to outburst experiment[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2015, 36(6): 1676—1682.
- [13] 陈安敏, 顾金才, 沈俊. 岩土工程多功能模拟实验装置的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(3): 372—378.
- CHEN An-min, GU Jin-cai, SHEN Jun. Development and application of multifunctional apparatus for geotechnical engineering model test[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2004, 23(3): 372—378.
- [14] 杨旭, 苏定立, 周斌, 等. 红层软岩模型试验相似材料的配比试验研究[J]. 岩土力学, 2016, 37(8): 2231—2237.
- YANG Xu, SU Ding-li, ZHOU Bin, et al. Experiment study on similarity ratio of similar material for model test on red-bed soft rock[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(8): 2231—2237.
- [15] 王凯, 李术才, 张庆松, 等. 流-固耦合模型试验用的新型相似材料研制及应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(9): 2521—2533.
- WANG Kai, LI Shu-cai, ZHANG Qing-song, et al. Development and application of new similar materials of surrounding rock for a fluid-solid coupling model test[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2016, 37(9): 2521—2533.
- [16] 马芳平, 李仲奎, 罗光福. NIOS 模型材料及其在地质力学相似模型试验中的应用[J]. 水利发电学报, 2004, 23(1): 48—51.
- MA Fang-ping, LI Zhou-kui, LUO Guang-fu. NIOS model material and its use in geo-mechanical similarity model test[J]. **Journal of Hydroelectric Engineering**, 2004, 23(1): 48—51.
- [17] 李树忱, 冯现大, 李术才, 等. 新型固-流耦合相似材料的研制及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(2): 281—288.
- LI Shu-chen, FENG Xian-da, LI Shu-cai, et al. Research and development of a new similar material for solid-fluid coupling and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(2): 281—288.

---

#### 上接第 2779 页

- [14] 姜耀东, 李海涛, 赵毅鑫, 等. 加载速率对能量积聚与耗散的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2014, 43(3): 369—374.
- JIANG Yao-dong, LI Hai-tao, ZHAO Yi-xin, et al. Effect of loading rate on energy accumulation and dissipation in rocks[J]. **Journal of China University of Mining & Technology**, 2014, 43(3): 369—374.
- [15] 周瑞光, 罗光伟, 石锡钟. 加载速度对强度和破坏机制的影响[J]. 地质科学, 1981, 4: 398—402.
- ZHOU Rui-guang, LUO Guang-wei, SHI Xi-zhong. The effect of loading rate on strength and failure mechanism of rocks[J]. **Scientia Geologica Sinica**, 1981, 4: 398—402.
- [16] 杨小彬, 宋义敏, 赵同彬. 岩石变形破坏演化力学分析[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2016.
- YANG Xiao-bin, SONG Yi-min, ZHAO Tong-bin. Mechanics analysis of deformation and failure of rock[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2016.
- [17] 宋义敏. 非均匀变形场测量的 DSCM 及其用于岩石破坏实验研究[D]. 北京: 清华大学, 2010.
- SONG Yi-min. Digital speckle correlation method for non-homogenous deformation field measurement and its application to the experimental study of rock failure[D]. Beijing: Tsinghua University, 2010.