

# 重庆地区层状岩地层超大断面暗挖 地铁车站施工工法比选\*

张国华<sup>1</sup> 陈海勇<sup>1</sup> 邓 昆<sup>2,3</sup> 童建军<sup>3</sup> 马兴叶<sup>3</sup>

(1. 中铁开发投资有限公司, 650118, 昆明; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 410008, 长沙;

3. 西南交通大学土木工程学院, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

**摘 要** 针对重庆地区层状岩地层暗挖地铁车站的特殊地质条件、超大断面及受施工工法影响显著等特征,建立了层状岩地层双层叠合初支拱盖法、双侧壁导坑法、中隔墙加台阶法数值计算模型,进行了施工工法适应性分析,并结合实际工程经济指标进行了对比分析。结果表明:双层叠合初支拱盖法的各项考查指标均能很好地满足控制标准,且3种工法对洞周收敛形态控制都较好,衬砌结构的安全性亦较高;同时该工法能较好地适应重庆地区的地质条件及经济性要求,具有工作面大、效率高、工序少、施工安全等显著优点,亦具有较强的经济适用性。建议在重庆地区层状岩地层超大断面暗挖车站施工中采用双层叠合初支拱盖法施工。

**关键词** 地铁车站; 暗挖法; 超大断面; 层状岩地层; 拱盖法; 工法比选

**中图分类号** U455.41+1;U231.4

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.03.031

## Comparison of Chongqing Metro Station Construction Method in Super-large Section Tunnel of the Stratigraphic Strata

ZHANG Guohua, CHEN Haiyong, DENG Kun, TONG Jianjun, MA Xingye

**Abstract** Considering the special geological conditions of stratigraphic strata in Chongqing City, the super-large section and remarkable influence of the construction, where the metro station is constructed with subsurface excavation method, a numerical calculation model is established which adopts the double-layer superimposed initial support arch-cover method, double-sided heading method and CRD method, in order to analyze the adaptability of construction methods, and compare the actual engineering economic indicators. The results show that all the indexes of the double-layer superimposed initial arch-cover method can meet the control standards, and the convergence shape around the tunnel is better controlled by using each of the

3 construction methods, and the safety of the lining structure is also higher. The double-layer superimposed construction method adapts to the geological conditions and economic requirements of Chongqing area due to its obvious advantages such as large working face, high efficiency, less working procedures and safe construction, therefore has better economic applicability. In the construction of super-large cross-section underground excavation station in stratigraphic strata of Chongqing City, the double-layer superimposed method is recommended.

**Key words** metro station; subsurface excavation method; super-large section; stratigraphic strata; arch-cover method; construction method comparison

**First-author's address** China Railway Development Investment Co., Ltd., 650118, Kunming, China

目前,城市地铁暗挖车站施工主要采用的工法包括双侧壁导坑法、CD(中隔墙)法、CRD(中隔墙加台阶)法、洞桩法和拱盖法等。每种工法在开挖原理、适用环境及车站结构型式等方面的应用不尽相同,且在环境影响、造价和工期上存在较大区别。针对重庆地区层状岩地层,探索出一种经济适用的施工工法——双层叠合初支拱盖法。该施工工法作为全新的工法,在层状岩地层中的适应性仍未能明确,且各施工工法的关键性指标差异亦很大。

本文根据重庆地区的地质条件,并依托工程实际情况,着重分析了双侧壁导坑法和双层叠合初支拱盖法的适应性及经济性。为方便对比分析不同施工工法的效果,对双层叠合初支拱盖法、双侧壁导坑法及CRD法进行了数值模拟及工程实际对比分析。结论可为重庆地区层状岩地层暗挖车站施工工法的合理选择提供参考。

\* 重庆市应用开发计划重点项目(cstc2014yykfb30003)

## 1 层状岩地层超大断面暗挖地铁车站的施工工法

基于重庆地区层状岩地层的特殊地质条件、车站结构型式和受力特点,依托工程实际情况,统计分析了该地区在建及已建地铁车站的施工工法,模拟计算了双层叠合初支拱盖法、双侧壁导坑法和 CRD 法 3 种不同暗挖车站施工工法。各施工工法示意如图 1 所示。

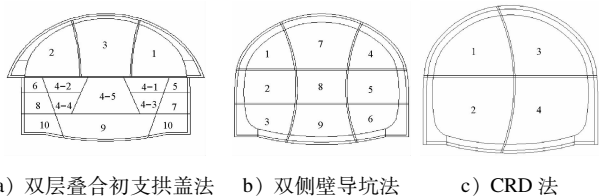


图 1 重庆地区层状岩地层各施工工法示意图

## 2 层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工工法数值模拟

### 2.1 计算模型及参数

基于地层-结构模型,采用 FLAC3D 数值软件进行计算分析。计算模型及监测断面如图 2~3 所示。依据重庆地区层状岩地层地勘和设计资料,对支护结构弹性模量进行等效处理,对锚杆加固区围岩的力学参数进行简化提高。围岩和支护结构的物理力学参数如表 1 所示。

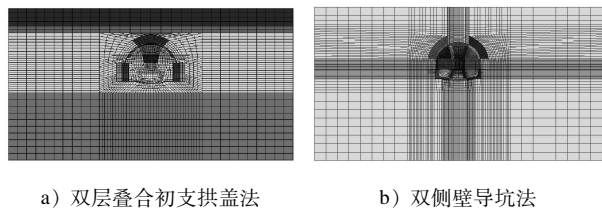


图 2 双层叠合初支拱盖法、双侧壁导坑法计算模型

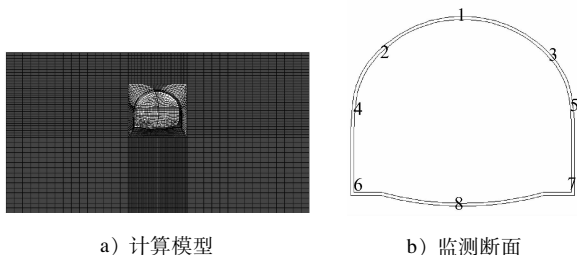


图 3 CRD 法计算模型及监测断面示意图

### 2.2 计算结果分析

#### 2.2.1 位移分析

图 4~6 为 3 种施工工法下的位移云图。由图

4~6 可知,双层叠合初支拱盖法中隧道的最大竖向位移位于拱顶部位,拱顶向下沉降值为 7.75 mm,地表最大沉降值为 5.18 mm;隧道水平位移最大值位于大拱脚位置,位移呈洞周向外扩张趋势,最大扩张值为 4.01 mm。双侧壁导坑法与双层叠合初支拱盖法的竖向位移变化形态类似,最大竖向位移出现在拱顶,其沉降值为 6.63 mm,地表沉降值为 4.37 mm;而在水平位移方面,双层叠合初支拱盖法则呈现与双侧壁导坑法不同的位移形态,洞周出现向内收敛的位移,最大值位于右侧墙角位置,洞周最大收敛值为 5.18 mm;而 CRD 法拱顶最大竖向位移为 11.4 mm,地表沉降最大值为 7.98 mm,其洞周亦呈现收敛形态,但其收敛值大于双侧壁导坑法,最大位移收敛值达到 8.42 mm,边墙处向内收敛趋势最为剧烈。3 种工法的位移曲线示意如图 7 所示。

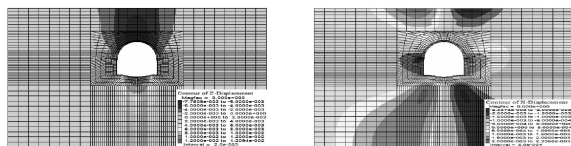


图 4 双层叠合初支拱盖法位移云图

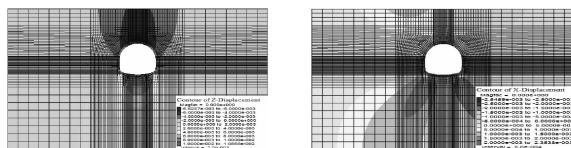


图 5 双侧壁导坑法位移云图

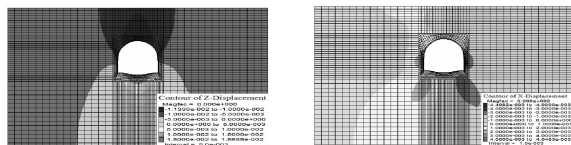


图 6 CRD 法位移云图

#### 2.2.2 受力分析

通过提取监测断面初期支护内力的相关数据,得到 3 种施工工法下的内力及相应截面安全系数如表 2 所示。由表 2 可知,双层叠合初支拱盖法安全系数最小值主要位于墙角部位,其次为拱腰部位;由于双层叠合初支拱盖法针对大拱脚区域实施打设注浆管注浆及设置加强型纵梁的措施,其大拱脚处位置内力及安全系数都处于较安全值,安全系数

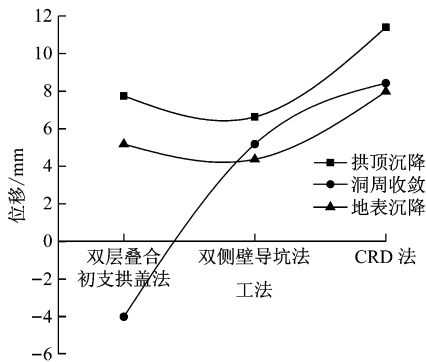


图7 三种工法的位移曲线图

最小值为 5.55。双侧壁导坑法拱腰及拱顶处安全性较高,安全系数明显高于其他截面;安全系数最小值同样位于墙角位置,最小值为 4.84。而从安全系数分析结果上看,CRD 法最小安全系数仅为 2.40,因此在安全性方面,采用 CRD 法进行层状岩地层超大断面暗挖车站施工较为危险。

2.2.3 围岩稳定性分析

图 8 为 3 种工法下围岩的塑性区。由图 8 可知,双层叠合初支拱盖法围岩塑性区出现在砂岩和砂质泥岩互层处,其中,大拱脚及下部边墙两侧围

表 1 围岩和支护结构的物理力学参数表

项目	弹性模量/GPa	抗拉强度/kPa	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	泊松比
素填土	0.40	80	2 050	20	11	0.35
砂质泥岩	1.10	148	2 560	600	32	0.39
砂岩	2.39	340	2 490	1 380	40	0.16
临时支护	36.10		2 680			0.18
初期支护	36.90		2 600			0.19

表 2 三种施工工法的内力计算结果

截面	双层叠合初支拱盖法			双侧壁导坑法			CRD 法		
	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数	轴力/kN	弯矩/(kN·m)	安全系数
1	-99	0.47	10.87	-73	0	9.60	-255	0.72	9.84
2	-278	11.35	6.79	-252	10.23	7.03	-761	5.56	3.24
3	-246	9.76	7.01	-236	8.62	8.55	-601	2.37	4.16
4	-88	-2.85	20.35	4	0.02	52.34	-90	1.57	26.25
5	-87	-2.87	20.82	0	0.03	42.00	-66	2.32	33.41
6	-261	-25.31	5.68	-231	28.27	4.84	-111	-0.59	2.40
7	-259	-26.88	5.55	-238	28.31	4.99	-461	33.63	3.99
8	-56	4.21	15.01	-26	-5.15	18.28	-47	-2.61	42.79

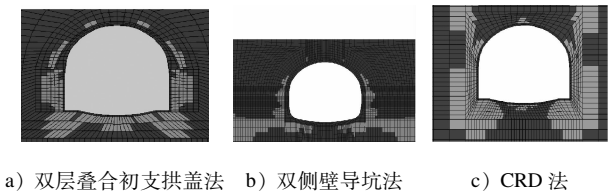


图 8 三种工法下围岩的塑性区图

岩出现较大塑性区。双侧壁导坑法施工条件下,围岩塑性区主要出现在墙脚、两侧边墙及拱脚位置,其中墙角出现了较大塑性区。CRD 法在同样的地质条件及支护参数下,其塑性区较前两种工法范围更大,塑性区的位置在洞周分布也更宽,表现为拱腰一直到下侧边墙及墙脚都产生了较为明显的塑性区范围。因此,在层状岩地层超大断面暗挖车站

的施工条件下,CRD 法的适应性较双层叠合初支拱盖法及双侧壁导坑法要弱。

2.3 结果对比

双层叠合初支拱盖法、双侧壁导坑法和 CRD 法的数值计算结果对比如表 3 所示。由表 3 可知,不同的施工工法对车站的影响程度不同,常规的双侧壁导坑法在对拱顶沉降、地表沉降及围岩稳定性等方面都表现出较高的安全性。首次运用于重庆地区的双层叠合初支拱盖法的计算结果与双侧壁导坑法较为接近,各项考查指标均能很好地满足控制标准,且在洞周收敛形态方面控制较好,衬砌结构的安全性亦较高。而 CRD 法施工相对偏危险,各项考查指标均明显差于其他两种工法,且在重庆地区

层状岩地层超大断面暗挖车站施工中适应性较差。

表 3 三种施工工法的计算结果对比表

施工工法	拱顶沉降/mm	洞周收敛/mm	地表沉降/mm	最小安全系数	围岩稳定性
双层叠合初支拱盖法	7.75	-4.01	5.18	5.55	三种施工工法作对比,双侧壁导坑法塑性区范围最小,双层叠合初支拱盖法塑性区主要位于大拱脚及侧边墙位置;而 CRD 法塑性区范围最大,分布范围也最宽,稳定性较差
双侧壁导坑法	6.63	5.18	4.37	4.84	
CRD 法	11.40	8.42	7.98	2.40	
注:洞周收敛正值表示向内收敛,负值表示向外扩张					

### 3 层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工工法经济性分析

由于 CRD 法在重庆地区层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工中的适应性较差,本文着重针对双层叠合初支拱盖法和双侧壁导坑法进行经济性分析。以重庆轨道交通 5 号线为工程背景,其相邻车站凤西路站和华岩寺站,分别采用双层叠合初支拱盖法和双侧壁导坑法进行施工。两个车站的地质情况、断面大小和车站功能定位均具有高度的一致性。且两车站可从施工便捷性、工期、经济性及

安全性等方面进行对比分析,亦具有高度的可信度。研究结论可为重庆地区层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工工法的综合比选提供参考。

#### 3.1 经济指标

统计重庆轨道交通 5 号线凤西路站和华岩寺站的工法经济指标(见表 4)可知,双层叠合初支拱盖法每延米的工程造价比双侧壁导坑法节约投资 2 856 元。因此对于超大断面暗挖地铁车站,采用双层叠合初支拱盖法施工比采用传统的双侧壁导坑法施工,整个工程可节约投资近 60 万元。

表 4 双层叠合初支拱盖法及双侧壁导坑法经济指标对比表

项目	名称	双侧壁导坑法 每延米造价/元	双层叠合初支拱盖法 每延米造价/元	每延米差价/元
土石方	土石方开挖	91 062	96 134	5 072
	土石方外运	42 522	44 891	2 369
初期支护	中空注浆锚杆	13 178	19 630	6 452
	钢筋网	3 354	4 559	1 205
	拱部有筋初喷混凝土厚 33 cm	11 720	11 914	194
	边墙有筋初喷混凝土厚 33 cm	10 863	11 043	180
	钢格栅型钢	31 828	32 335	507
	衬砌钢筋	1 647	1 677	30
	工字钢	27 855	20 754	- 7 101
临时支护	衬砌钢筋	1 811	1 002	- 809
	拱部有筋初喷混凝土厚 25 cm	8 410	4 616	- 3 794
	M30 砂浆锚杆	4 037	2 240	- 1 787
	钢筋网	798	436	- 362
	钢格栅型钢(拆除)	2 687	2 002	- 685
衬砌	平洞拱部 C40 混凝土	9 409	9 409	0
	平洞拱部混凝土模板	5 819	5 499	- 320
	衬砌钢筋	34 504	30 497	- 4 007
合计				- 2 856

3.2 施工进度

以华岩寺站为例,采用双侧壁导坑法施工时,其主体结构及开挖支护的施工进度一般为18~24 m/月,主体结构二衬的施工进度每7 d为9 m,工期总计约18个月。而采用双层叠合初支拱盖法进行施工时,上导洞开挖及支护的施工进度为2 m/d,历时约4个月;加强初支扣拱模筑混凝土约4个月;以上两部分施工作业考虑前后错开2个月,总计约6个月;下部主体开挖及支护每天按750 m<sup>3</sup>出土量计算,历时约5个月;二衬及防水施工预计5个月。因此,双层叠合初支拱盖法总工期约16个月,比双侧壁导坑法节省工期2个月。

实际工程中,重庆轨道交通5号线凤西路站采用双层叠合初支拱盖法施工。该车站于2015年1月20日开始进行车站主体施工,2015年6月25日完成上导洞开挖及拱盖施工,2015年7月11日—2015年12月15日完成车站主体下断面开挖支护施工,2016年4月完成二衬及防水施工。施工总历时15个月,比预计工期提前1个月。

在施工进度方面,双层叠合初支拱盖法的优势主要体现在如下几个方面:①下断面开挖时可通过拉中槽、马口跳槽等方式形成多个开挖面同时施工;②大大减少了拆除临时支撑体系的工作量;③开挖掌子面与二衬间的步距较大,使得施工空间较大,操作亦相对便利;④拱墙衬砌可直接采用模板台车施工,施工进度较快。

综上所述,双层叠合初支拱盖法施工的经济效益较为显著。该工法节省投资近60万元,缩短工期3个月,间接效益可达200余万元。同时,为复合式隧道掘进机过站提供了有利条件,对地表沉降控制效果较好,对成渝高速影响也较小,带来了较为理想的经济及社会效益。

4 结论

针对重庆地区层状岩地层暗挖地铁车站的特殊地质条件、超大断面及受施工工法影响显著等特点,对该地区暗挖车站常见的3种施工方法的适应性进行了数值模拟分析,对重庆轨道交通5号线相邻车站工程进行了综合对比分析,得到3种施工工法的主要特点(见表5)及主要结论如下所述:

(1)在适应性方面,不同的施工方法对隧道的影响程度不同。常规的双侧壁导坑法在对拱顶沉降、地表沉降及围岩稳定性等方面的控制均表现出良好的特性;CRD法施工相对偏危险,各项考查指标均明显差于其他两种工法。而在重庆地区首次运用的双层叠合初支拱盖法的计算结果与双侧壁导坑法较为接近,各项考查指标均能很好地满足控制标准,且对洞周收敛形态控制较好,衬砌结构的安全性亦较高,这说明该施工工法在层状岩地层中的运用是安全的,且在重庆地区具有较强的适用性和可行性。

表5 三种施工工法的主要特点

项目	双层叠合初支拱盖法	双侧壁导坑法	CRD法
主要特点	采用加强初支层叠合结构来做大拱盖,能更好地适应地层;具有工作面大、效率高、工序少、施工安全等显著优点,同时具有较强的经济适用性	两个侧洞先行,然后施作中洞;分块多,工序多,多次扰动地面沉降大;废弃工程量大,造价高	CRD法遵循“小分部、短台阶、短循环、快封闭、勤量测、强支护”的施工原则;自上而下、分块成环、随挖随撑、及时做好初期支护;临时支撑的施做和拆除困难
安全性	较高	高	低
适用范围	较广	广	较窄
防水质量	较好	较好	较好
施工难度	较小	大	小
施工速度	较快	慢	快
废弃工程量	较少	多	少
造价	较高	高	中

(2)从施工安全、施工进度及经济性角度对层状岩超大断面暗挖地铁车站施工方法进行综合比选发现:双层叠合初支拱盖法每延米的造价比双侧

壁导坑法节约投资2 856元,直接效益达60余万元,缩短工期3个月,间接效益可达200余万元,带来了较大的经济及社会效益;能较好地适应重庆地

(下转第173页)

(2) 牵引供电接触网(刚性、柔性或三轨)的设计,应满足防淹门无障碍关闭和断电的要求,连续设置的接触网应具有远程控制切断的功能。

(3) 防淹门应在轨道上进行空间及钢轨的预留,并应在轨道上进行门槽的固定及预埋设计,同时轨道专业应配合防淹门门体与防淹门处轨道轨枕间隙的设计及其与轨道相结合的止水封的安装及接口配合。

(4) 对穿越防淹门两侧结构的管线孔洞,应做好预留和封堵。针对远期更新改造、升级和发展整体预留的孔洞数量,应不低于已使用数量的 30% ~ 50%。预留孔洞宜采用法兰封堵。

(5) 防淹门的电源应满足安全性和可靠性的要求,防淹门监控系统应采用 UPS(不间断电源)进行供电,且 UPS 后备时间应不低于 1 h。

(6) 防淹门与信号系统之间必须实现正确的联锁关系,以确保旅客和列车的安全;防淹门应为信号系统提供防淹门状态信息以及请求关闭信息,信号系统为防淹门系统提供允许关闭信息,接口方式宜采用开关量无源接点。

(7) 信号系统提供给防淹门允许关闭信息,且接口分界点宜布置在防淹门控制室接口端子盘上;防淹门给信号系统提供防淹门完全关闭状态信息和防淹门请求关闭信息,接口分界点宜布置在信号设备室分线架上。

(8) 为保证安全行车,防淹门的全开状态信息必须发送至信号系统,以便在防淹门失去全开状态

时,信号系统可以进行列车的控制,使列车停在安全区域。

(9) 防淹门门体、专用机房(动力驱动机房和控制系统机房)及与防淹门相关的系统机房应当满足密闭性和防淹没设计要求。防淹门专用机房可以将动力驱动机房和控制系统机房进行合设,也可以对其进行分设;与防淹门相关的系统机房是给防淹门供电的机房和信号系统及通信系统的机房,应当设置在防淹门的保护侧,并满足密闭性和防淹(没)设计的要求。

## 4 结语

地铁防淹门设计涉及的各种可变因素较多,各种因素的组合又可派生出新的评估条件。因此,设计时需要慎重收集各种相关数据和材料,以便进行综合科学的风险评判,以确保地铁设施的安全可靠和乘客的生命安全。

## 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范:GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2013.
- [2] 孙增田. 广州地铁 2 号线防淹门系统的设计分析[J]. 都市轨道交通,2004,17(增刊):73.
- [3] 卢昌仪. 地铁防淹门系统的设计[J]. 都市轨道交通,2005,18(4):116.

(收稿日期:2018-06-08)

(上接第 141 页)

区的地质条件及经济要求,具有工作面大、效率高、工序少和施工安全等显著优点,具有较强的经济适用性。因此,在重庆地区层状岩地层超大断面暗挖地铁车站施工中,建议采用双层叠合初支拱盖法施工。

## 参考文献

- [1] 朱泽兵,刘新荣,张永兴. 大跨超浅埋轻轨车站隧道开挖方法研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(2):290.
- [2] 陈林杰,梁波,王国喜. 浅埋暗挖超大断面地铁车站隧道开挖方法研究[J]. 地下空间与工程学报,2013(4):928.
- [3] 丁春林,王君,王高彦,等. 浅埋大断面公路隧道开挖施工工法

比选[J]. 现代隧道技术,2014,51(增刊1):6.

- [4] 贾贵宝. 拱盖法在地铁车站施工中的应用[J]. 合作经济与科技,2011(12):126.
- [5] 吴学锋. 土岩复合地层拱盖法施工三维有限元数值模拟[J]. 城市轨道交通研究,2012,15(8):135.
- [6] 李磊. 深埋大断面隧道有限元二维应力分析[J]. 科技信息,2012,33:357.
- [7] 华福才,雷刚,郑广亮. 硬岩地区大跨度矿山法地铁隧道的沉降分析研究[C]//中国土木工程学会. 中国土木工程学会第十五届年会暨隧道及地下工程分会第十七届年会论文集. 昆明:中国土木工程学会隧道及地下工程分会,2012:7.
- [8] 张顶立,王梦恕,高军,等. 复杂围岩条件下大跨隧道修建技术研究[J]. 岩石力学与工程学报,2003,22(2):290.

(收稿日期:2017-05-10)