

文章编号: 1674—8247(2020)01—0027—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.01.006

## 富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固方案研究

崔光耀<sup>1</sup> 朱建伟<sup>2</sup> 姜冲<sup>2</sup> 王立川<sup>2</sup> 祁家所<sup>1</sup>

(1. 北方工业大学, 北京 100144; 2. 中铁隧道集团一处有限公司, 重庆 401123)

**摘要:**为进一步研究富水岩溶铁路隧道超前支护方案的加固效果,文章以天坪隧道富水岩溶段为背景,采用FLAC3D数值计算软件建立岩溶大断面铁路隧道模型,对于大管棚加小导管注浆综合超前支护以及小导管注浆超前支护加固方案进行了优选分析。分析结果表明,大管棚加小导管综合超前支护相比较小导管注浆超前支护加固效果更加稳定:(1)衬砌结构位移变化方面,拱顶沉降最大值减小15.7%,上台阶水平收敛最大值减小19.4%;(2)掌子面挤出变形方面,中台阶上部掌子面挤出变形有所改善,其中上台阶水平收敛掌子面挤出变形量减小4.58%,中台阶水平收敛掌子面挤出变形量减小4.83%;(3)初期支护结构应力状态方面,最大压应力减小4.53%,最大拉应力减小15.6%。(4)相比较小导管注浆超前支护方案,大管棚加小导管综合超前支护方案更加适合富水岩溶大断面铁路隧道施工,研究成果可为类似隧道工程设计及施工提供参考。

**关键词:**隧道工程;富水岩溶;大断面;超前支护;加固方案

中图分类号:U457+.3 文献标志码:A

27

### Study on Advance Support Reinforcement Scheme for Large-section Railway Tunnel in Water-rich Karst Area

CUI Guangyao<sup>1</sup> ZHU Jianwei<sup>2</sup> JIANG Chong<sup>2</sup> WANG Lichuan<sup>2</sup> QI Jiasuo<sup>1</sup>

(1. North China University of Technology, Beijing 100144, China;

2. The First Construction Division Co., Ltd. of China Railway Tunnel Group, Chongqing 401123, China)

**Abstract:** In order to further study the reinforcement effect of the advance support scheme for the railway tunnel in water-rich karst area, based on the water-rich karst section of Tianping tunnel, FLAC3D numerical calculation software is adopted to establish the large-section railway tunnel model and the optimization analysis is made on the comprehensive advance support scheme with large pipe roof + small pipe and the advance support reinforcement scheme with small pipe grouting in the paper. The research results show that the comprehensive advance support with large pipe roof + small pipe is more stable than that with small pipe: (1) for the displacement change of lining structure, the maximum settlement of arch crown is reduced by 15.7%, and the maximum horizontal convergence of upper bench is reduced by 19.4%; (2) for the extrusion deformation of working face, the extrusion deformation of the upper working face of the middle bench is improved, in which the extrusion deformation of horizontal convergence working face of the upper bench is reduced by 4.58%, and that of the middle bench is reduced by 4.83%; (3) for stress state of initial supporting structure, the maximum compressive stress is reduced by 4.53%, and the maximum tensile stress is reduced by

收稿日期:2019-12-30

作者简介:崔光耀(1983-),男,副教授。

基金项目:国家自然科学基金项目资助(51408008);中铁隧道局集团有限公司科技创新计划(隧研合2013-01)

引文格式:崔光耀,朱建伟,姜冲,等.富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固方案研究[J].高速铁路技术,2020,11(1):27-31.

CUI Guangyao, ZHU Jianwei, JIANG Chong, et al. Study on Advance Support Reinforcement Scheme for Large-section Railway Tunnel in Water-rich Karst Area [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(1): 27-31.

15.6%; (4) Compared with the advance support scheme with small pipe, the comprehensive advance support scheme with large pipe roof + small pipe is more suitable for the construction of large-section railway tunnel in water-rich karst area. The research results can provide reference for design and construction of similar tunnel.

**Key words:** tunnel works; water-rich karst; large section; advance support; reinforcement scheme

随着我国西部大开发脚步的加快和经济的快速发展,西部地区铁路发展也越来越迅速。越来越多的铁路不可避免地需要穿越岩溶发育地区,溶洞、富水软弱围岩隧道随之增多<sup>[1-3]</sup>。如何保证富水岩溶地层隧道结构支护稳定性,是目前有待解决的重点问题之一。

目前,国内外专家学者对富水岩溶隧道的衬砌支护控制技术开展了部分研究,主要有富水软岩隧道的室内模型试验研究<sup>[4-5]</sup>、富水断层带初期支护综合处治方案优化研究<sup>[6-8]</sup>。富水破碎带隧道支护变形特征研究<sup>[9-10]</sup>、富水软岩隧道拱顶所需支护力的研究<sup>[11-12]</sup>等。但截止目前,对于富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固技术方面的研究还未成熟。基于此,本文以渝黔铁路天坪隧道富水岩溶段为依托,针对富水岩溶大断面铁路隧道超前支护加固技术进行研究。

## 1 天坪隧道富水岩溶段工程概况

### 1.1 地质条件

渝黔铁路天坪隧道位于贵州省北部,重庆与贵州省交界地段,隧道全长13 978 m,存在顺层偏压及多处断层,暴露后易风化崩解,且岩体完整性较差,易发生坍塌。隧道DK 127+195~DK 127+920段可溶岩发育,地下水与岩溶地表水系连通,地下水丰富,瞬时涌水量为500 m<sup>3</sup>/h,水质浑浊。隧道围岩以可溶性碳酸岩为主,遇水后强度迅速降低,围岩等级为V级。

### 1.2 衬砌结构设计

隧道富水岩溶段为马蹄形断面,初支采用C30耐腐蚀混凝土(厚28 cm),二衬采用C25喷射混凝土(厚45 cm)。

## 2 研究情况

### 2.1 计算模型

以天坪隧道富水岩溶段为背景建立计算模型,本构模型采用弹塑性模型,屈服准则采用摩尔-库伦准则。模型上下、左右边界距离均大于5倍洞径,计算纵向长取42 m,宽取72 m,高75 m。模型四周与底部边界施加法向约束,上边界为自由边界。

### 2.2 计算工况

为研究超前支护效应及相应施工过程中隧道的力学行为特征,本文对小导管注浆超前支护和大管棚加小导管注浆综合超前支护两种支护工况进行模拟。计

算工况如表1所示。

表1 计算工况表

工况	超前支护方式
1	小导管注浆超前支护
2	大管棚加小导管注浆综合超前支护

### 2.3 计算参数

围岩及支护结构物理力学指标如表2所示。

表2 计算模型参数表

参数	重度 /(kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	粘聚力 /MPa
上下盘IV级围岩	22	5.0	0.3	35	0.5
V级围岩	20	2.0	0.4	25	0.2
小导管注浆地层	1 920	170	0.36	34	39
大管棚加小导管 注浆地层	2 050	560	0.32	42	55
初支	25	28	0.2	-	-

### 2.4 测点布置

以 $y=21$  m处为监测断面,在仰拱与拱顶处分别设置沉降监测点,拱腰、边墙、拱脚处分别设置水平收敛线。测点布置如图1所示。

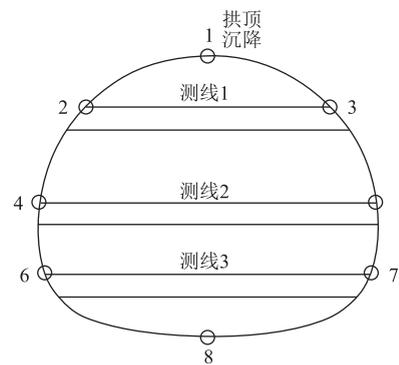


图1 测点布置图

## 3 计算结果及分析

### 3.1 结构位移

提取两种工况下监测断面的结构位移数据,绘制结构位移变化与开挖步关系曲线,如图2~图5所示,两种工况的位移监测最大值如表3所示。

由图2~图5可知,工况2的拱顶沉降值和台阶水平收敛值均较工况1小。其中拱顶沉降最大值减小18.5 mm,约为15.7%;上台阶水平收敛最大值减小

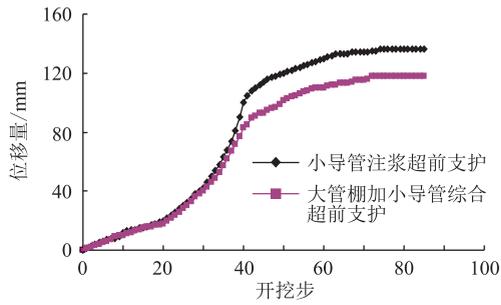


图2 拱顶下沉随开挖步关系曲线图

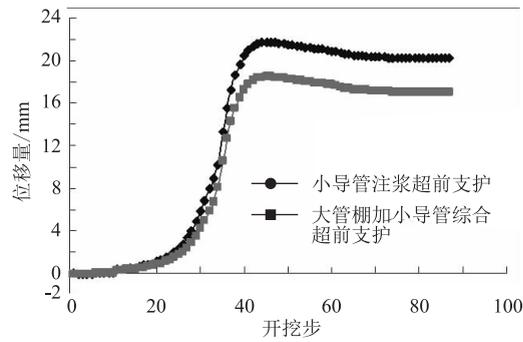


图3 上台阶水平收敛随开挖步关系曲线图

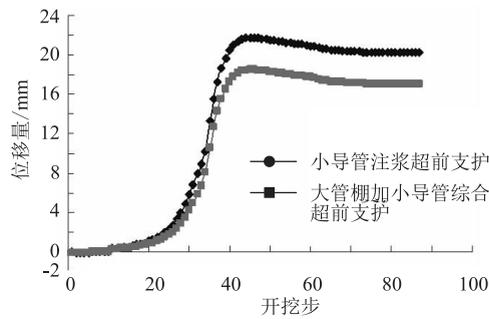


图4 中台阶水平收敛随开挖步关系曲线图

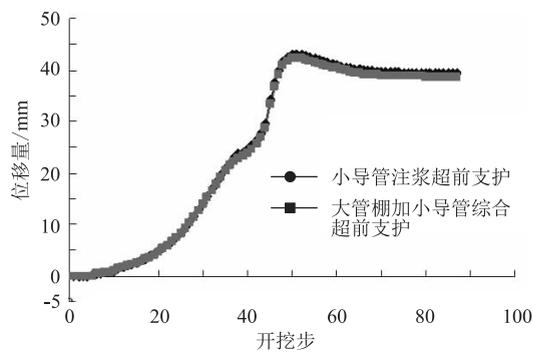


图5 下台阶水平收敛随开挖步关系曲线图

3.3 mm, 约为 19.4%; 中台阶水平收敛最大值减小 4.6 mm, 约为 12.6%。大管棚加小导管综合注浆超前支护对中上台阶水平收敛作用明显, 对下台阶作用微弱, 这是由支护设置位置造成的(支护设置于中上台

阶处)。

表3 结构位移监测最大值表(mm)

工况	拱顶沉降	上台阶	中台阶	下台阶
1	136.6	20.4	41.0	39.3
2	118.1	17.4	36.4	38.6

综上所述,大管棚加小导管注浆综合超前支护对隧道衬砌位移控制明显,特别是对上台阶水平收敛及拱顶沉降的控制作用尤为明显。

### 3.2 掌子面挤出变形

当隧道开挖至监测断面时,中上台阶掌子面挤出变形如图6、图7所示。

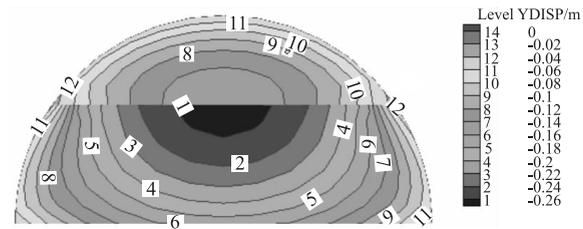


图6 工况1掌子面挤出变形图

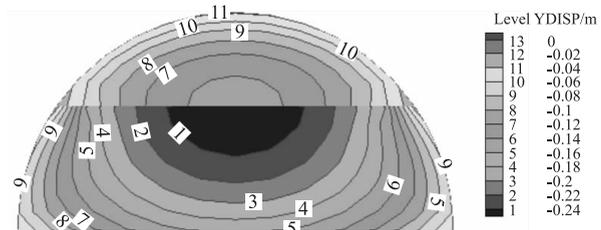


图7 工况2掌子面挤出变形图

由图6、图7可知,最大掌子面挤出变形均出现在上台阶偏下部。工况1上台阶最大掌子面挤出变形为 152.9 mm,中台阶最大掌子面挤出变形为 267.0 mm; 工况2上台阶最大掌子面挤出变形为 146.2 mm,中台阶最大掌子面挤出变形为 254.7 mm。较工况1,工况2上台阶最大掌子面挤出变形降低 4.58%,下台阶最大掌子面挤出变形降低 4.83%。由此可见,采用大管棚加小导管注浆综合超前支护对最大掌子面挤出变形有所改善。

### 3.3 初期支护结构应力

提取监测断面处初期支护的最小主应力和最大主应力分布云图,如图8~图11所示,两工况下初支最大拉应力、压应力值如表4所示。

表4 初期支护最大主应力表

工况	最大压应力/MPa	最大拉应力/MPa
1	8.53	8.76
2	8.16	7.58

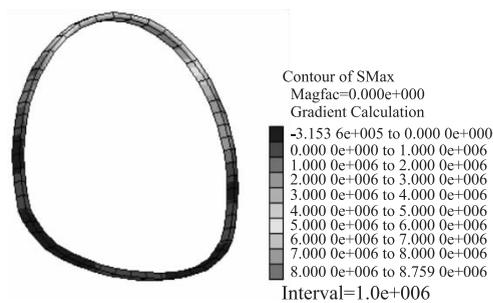


图 8 工况 1 初期支护最大主应力图 (Pa)

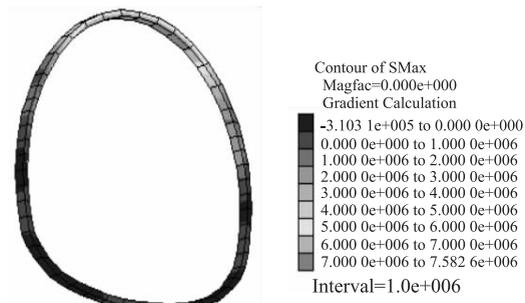


图 9 工况 2 初期支护最大主应力图 (Pa)

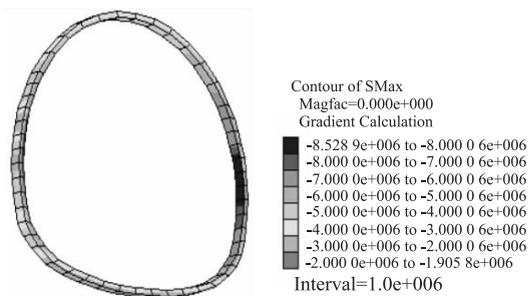


图 10 工况 1 初期支护的最小主应力图 (Pa)

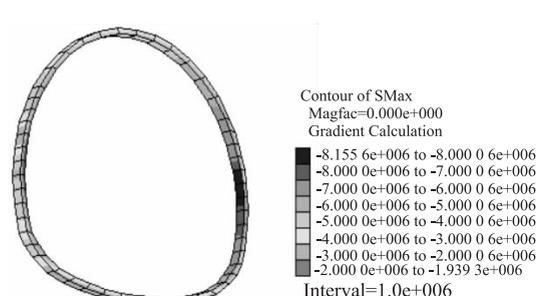


图 11 工况 2 初期支护的最小主应力图 (Pa)

由图 8 ~ 图 11 可知,在应力云图中,最大压应力均位于隧道边墙位置,而最大拉应力均位于拱顶位置。较工况 1,工况 2 应力值均有所降低。其中最大压应力减小 4.53%,最大拉应力减小 15.6%。

综上,采用大管棚加小导管注浆综合超前支护对初支所受应力状态有所改善,对初期支护所受拉应力

控制效果尤为显著。

#### 4 加固方案优选

两工况的位移、掌子面挤出变形及初支最大主应力最终计算结果如表 5 所示。

表 5 两工况下位移、掌子面挤出变形以及初支最大主应力表

工况	拱顶沉降/mm	各台阶水平收敛值/mm			各台阶最大掌子面挤出变形/mm		初支最大主应力/MPa	
		上台阶	中台阶	下台阶	上台阶	中台阶	压应力	拉应力
小导管注浆超前支护	136.7	20.3	41.1	39.4	152.9	267.0	8.53	8.76
大管棚加小导管注浆综合超前支护	118.2	17.0	36.5	38.7	146.2	254.7	8.16	7.58
加固效果	15.7%	19.4%	12.6%	1.8%	4.58%	4.83%	4.53%	15.6%

由表 5 可知,大管棚加小导管注浆综合超前支护的加固效果在各方面均较小导管注浆超前支护有所提升,且在上台阶水平收敛及初支最大拉应力方面提升显著,因此推荐渝黔铁路天坪隧道富水岩溶段采用大管棚加小导管注浆综合超前支护加固方式。

#### 5 结论

(1)采用大管棚加小导管注浆综合超前支护,各台阶水平收敛量与拱顶沉降量均较小导管注浆超前支护有所减小,其中拱顶沉降最大值减小 15.7%,上台阶水平收敛最大值减小 19.4%,中台阶水平收敛最大值减小 12.6%。说明大管棚加小导管注浆综合超前

支护在隧道开挖过程中对衬砌结构位移的控制作用较好,特别是对拱顶沉降和上台阶水平收敛的控制作用尤为显著。

(2)大管棚加小导管注浆综合超前支护对控制上台阶下部的掌子面挤出变形作用明显,较小导管注浆超前支护,上台阶最大掌子面挤出变形量减小 4.58%,中台阶最大掌子面挤出变形量减小 4.83%。

(3)较小导管注浆超前支护,大管棚加小导管注浆综合超前支护对初支受力有所改善。最大压应力减小 4.53%,最大拉应力减小 15.6%。

(4)渝黔铁路天坪隧道富水岩溶段推荐采用大管棚加小导管注浆综合超前支护加固方式。

## 参考文献:

- [1] 迟永利. 中梁山隧道穿越富水岩溶区施工技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.  
CHI Yongli. Study on the Construction Technologies of Zhongliangshan Tunnel through Rich Water Karst Area [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [2] 钱忠运. 黄土公路隧道富水段支护结构的受力特性分析[J]. 中外公路, 2011, 31(6): 209-212.  
QIAN Zhongyun. Analysis of Mechanical Characteristics of Supporting Structure in the Water-rich Section of Loess Highway Tunnel [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2011, 31(6): 209-212.
- [3] 张帆. 富水围岩条件下浅埋暗挖隧道施工关键技术研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2011.  
ZHANG Fan. Study on Key Technology of Shallow Buried Tunneling in Water-rich Surrounding Rock [D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2011.
- [4] 张拳, 刘彦玲, 邹婷, 等. 支护结构对富水软岩隧道变形及应力影响的模型试验[J]. 四川建筑, 2018, 38(4): 107-109.  
ZHANG Quan, LIU Yanling, ZOU Ting, et al. Model Test on the Influence of Support Structure on Deformation and Stress of Water-rich Soft Rock Tunnel [J]. Sichuan Architecture, 2018, 38(4): 107-109.
- [5] 张杰. 软弱富水地层中浅埋暗挖隧道支护结构受力及地表沉降规律的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.  
ZHANG Jie. Study on the Stress of Supporting Structure and Surface Subsidence of Shallow Embedded Tunnel in Watery and Weak Stratum [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [6] 王雄. 浅埋偏压富水隧道掘进支护工艺分析[J]. 河南科技, 2015, 31(4): 89-91.  
WANG Xiong. Investigation on the Shallow Bias Water-rich Tunnel Excavation and Supporting Technology [J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015, 31(4): 89-91.
- [7] 屈家旺, 刘泉声, 马昊. 泥质软岩隧道穿越富水断层带初期支护变形侵限机理及处治对策[J]. 现代隧道技术, 2017, 54(3): 181-189.  
QU Jiawang, LIU Quansheng, MA Hao. Support Deformation Induced Clearance Invasion and Treatment for A Pelitic Soft-Rock Tunnel Passing through A Water-Rich Fault Zone [J]. Modern Tunnelling Technology, 2017, 54(3): 181-189.
- [8] 宋文, 苏克敏. 浅埋、富水隧道初期支护大变形处理方案探讨[J]. 林业建设, 2011, 29(6): 54-56.  
SONG Wen, SU Keqi. Discussion on the Treatment Scheme of Large Deformation in the Initial Support of Shallow and Water-rich Tunnel [J]. Forestry Construction, 2011, 29(6): 54-56.
- [9] 何瀚. 穿越富水破碎带隧道开挖围岩稳定性分析及施工方案优化[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2016.  
HE Han. Stability Analysis of Surrounding Rock of Tunnel through Water Enriched Zone and the Optimization on Its Construction Scheme [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2016.
- [10] 聂林. 富水花岗岩蚀变带隧道大变形机理及控制技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.  
NIE Lin. Study on Mechanism of Large Deformation and Controlling Measures of Water-rich Altered Rock Tunnel [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.
- [11] 方菊明, 窦友谋. 香丽高速富水软岩隧道拱顶支护力的上限分析[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2017, 29(4): 85-88.  
FANG Juming, DOU Youmou. Upper Bound Solutions of Supporting Force of Tunnel Vault in Water-rich Soft Rock [J]. Journal of Hunan University of Arts and Science (Natural Science Edition), 2017, 29(4): 85-88.
- [12] 梁禹, 阳军生, 陈相宇. 富水砂层盾构隧道开挖面主动破坏极限支护力研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(1): 90-95.  
LIANG Yu, YANG Junsheng, CHEN Xiangyu. On the Limit Support Force on a Working Face under Active Failure: Case Study of a Shield-Driven Tunnel in a Water-Rich Sandy Stratum [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(1): 90-95.

(编辑:车晓娟 张红英)