

# 2011年公路隧道安全设计与运营管理 暨水下隧道建设技术国际会议

## 论文集

世界道路协会  
中国公路学会隧道工程分会  
厦门路桥建设集团有限公司  
厦门大学建筑与土木工程学院

编



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

# 2011年公路隧道安全设计与运营管理 暨水下隧道建设技术国际会议 论文集

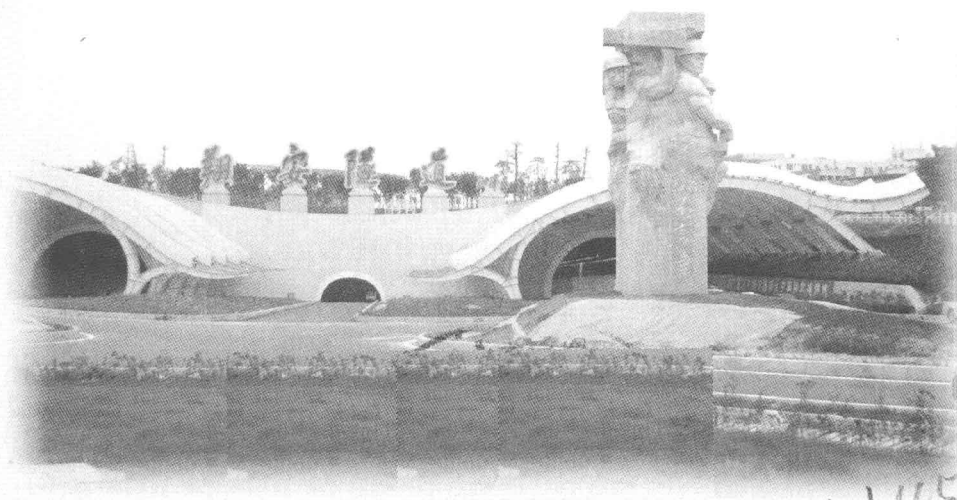
**Proceedings of International Seminar on  
Construction, Operation and Management  
Technology of Road Tunnel**

**March 2011**

世界道路协会  
中国公路学会隧道工程分会  
厦门路桥建设集团有限公司  
厦门大学建筑与土木工程学院

编

Permanent International Association of Road Congresses  
Tunnel Engineering Society CHTS  
Xiamen Road and Bridge Construction Group Co.,Ltd.  
College of Architecture and Civil Engineering,Xiamen University



重庆大学出版社

## 内 容 提 要

本论文集是为2011年3月在厦门召开的“2011年公路隧道安全设计与运营管理暨水下建设技术国际会议”而出版的论文集。该论文集共收录论文62篇,内容涉及公路隧道的研究与设计,长大公路隧道运营管理、通风、照明,水下隧道研究、设计与施工等。本论文集可供隧道管理、技术人员及有关师生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

2011年公路隧道安全设计与运营管理暨水下隧道建设  
技术国际会议论文集/世界道路协会,中国公路学会隧  
道工程分会等编. —重庆:重庆大学出版社,2011.3

ISBN 978-7-5624-5997-2

I. ①2… II. ①世…②中… III. ①公路隧道—交通  
运输安全—设计—国际学术会议—文集②公路隧道—交通  
运输管理—国际学术会议—文集③水下隧道—隧道工程—  
国际学术会议—文集 IV. ①U459-53

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第025018号

### 2011年公路隧道安全设计与运营管理 暨水下隧道建设技术国际会议论文集

世 界 道 路 协 会  
中国公路学会隧道工程分会 编  
厦门路桥建设集团有限公司  
厦门大学建筑与土木工程学院

策划编辑:刘颖果

责任编辑:刘颖果 范春青 版式设计:刘颖果

责任校对:邹 忌 责任印制:张 策

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:邓晓益

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (营销中心)

全国新华书店经销

自贡新华印刷厂印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:34 字数:849千

2011年3月第1版 2011年3月第1次印刷

ISBN 978-7-5624-5997-2 定价:98.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有,请勿擅自翻印和用本书

制作各类出版物及配套用书,违者必究

# 目 录

## 研究与设计

|                                |             |          |
|--------------------------------|-------------|----------|
| 岩溶隧道高水压下二次衬砌结构受力特性与安全性分析 ..... | 徐林生         | 李贻伟(3)   |
| 基于监控量测的隧道设计参数优化、围岩分级与预警研究 ...  | 林 志 蒋树屏     | 李星平(11)  |
| 深埋长大公路隧道应力形变测试技术及灾害防治 .....    | 马 亢 张志龙     | 裴建良(21)  |
| 隧道不等厚二衬的安全性评价 .....            | 田志宇         | 苏宗贤(34)  |
| 隧道安全控制基准研究 .....               | 朱成豪         | 张 明(41)  |
| 恩施下穿许家坪机场隧道结构设计及安全分析 .....     | 唐 墨         | 唐雄俊(46)  |
| 公路隧道车行横洞行车道宽度及平面布设方式研究 .....   | 秦 峰 丁 浩     | 方 林(57)  |
| 公路隧道斜交正作洞口设计 .....             | 唐 颖         | (65)     |
| 纤维锚杆预加固在大断面隧道中的应用研究 .....      | 周 捷 席锦州     | 漆泰岳(70)  |
| 盾构隧道施工灾害风险评估系统研究 .....         | 赵宁雨 梁 波     | 柳林超(76)  |
| 下穿高速公路立交桥盾构掘进控制技术研究 .....      | 张 恒 赵玉报     | 陈寿根(84)  |
| 盾构始发技术研究 .....                 | 赵先鹏 陈寿根     | 李彦兵(92)  |
| 武水高速公路特长隧道群监控技术探讨 .....        |             | 高晓波(99)  |
| 水下隧道勘察的新型水声仪及隧道施工地质预报 .....    |             | 钟世航(106) |
| 水压致裂应力测量在深埋隧道建设中的作用与意义 .....   | 沙 鹏 杜宇本 邓宏科 | 郭啟良(119) |
| 大型地下立交隧道新型通风方式研究 .....         | 邓 欣 涂 耘     | 林 志(128) |
| 我国城市交通隧道通风系统设计现状分析 .....       | 王文安 邓 欣     | (135)    |
| 山区公路隧道按需照明节能技术研究 .....         | 涂 耘 邓 欣     | (143)    |
| 基于安全的公路隧道照明影响因素分析与探讨 .....     |             | 郑 暄(150) |
| LED 光源在大断面高速公路隧道中的应用研究 .....   | 杨晓东 李国强     | 穆一经(156) |
| 高速公路隧道节能型供配电系统关键技术研究 .....     | 赵清碧 张 琦     | 吴小丽(161) |
| 新奥法条件下天恒山黏性土公路隧道施工关键技术 .....   |             | 王大庆(171) |

## 运营管理

|                            |         |       |
|----------------------------|---------|-------|
| 秦岭终南山公路隧道安全设计与运营管理研究 ..... | 韩 直 蒋树屏 | (181) |
|----------------------------|---------|-------|

|                                         |                      |
|-----------------------------------------|----------------------|
| 钱江隧道设计速度标准及交通安全分析 .....                 | 李伟平 吴德兴 郭 敏 王国华(187) |
| 长大公路隧道运营环境 FRAD 安全评价技术研究与应用 .....       | 陶 涛(195)             |
| 基于 Aimsun 二次开发技术的高速公路隧道入口段行车安全性评价 ..... | 郭 森 丛浩哲(206)         |
| 高速公路隧道入口处车辆行驶安全性研究 .....                | 皇甫国晟 张兰芳 丛浩哲(214)    |
| 提高公路隧道安全性培训的网络化学习和隧道模拟器 .....           | P. Pribyl(220)       |
| 地下道路交通标志方案研究 .....                      | 王 月 王俊骅 晁 灿(230)     |
| 隧道光环境对驾驶员生理反应初步实验研究 .....               | 刘 洋 李香红 朱守林 戚春华(237) |
| 高速公路隧道段驾驶员行车安全可靠影响因素分析 .....            | 桂玉峰 王俊骅(245)         |
| 大型地下互通式立交防灾救援 .....                     | 陈建忠 涂 耘(251)         |
| 钱江盾构隧道的火灾安全与逃生救援设计 .....                | 李伟平(261)             |
| 艾坪山隧道营运通风方案 .....                       | 黄华月 徐林生(270)         |
| 隧道轴流风机的变频调速与节能 .....                    | 刘建明(276)             |
| 西秦岭隧道店子坪斜井施工段施工通风技术 .....               | 李春奎(282)             |
| 对高桥隧比高速公路运营安全与节能的研究 .....               | 张立媛(288)             |

## 水下隧道

### 基于功能设计理念的湘江水下公路隧道设计

|                                 |                              |
|---------------------------------|------------------------------|
| .....                           | 蒋树屏 丁 浩 黄伦海 龙 勇 刘 敏(297)     |
| 厦门海底隧道强风化花岗岩力学特性研究 .....        | 于洪丹 陈卫忠 郭小红 贾善坡 曹俊杰 梁 巍(306) |
| 厦门海底隧道海域风化槽段围岩稳定性研究 .....       | 陈卫忠 于洪丹 郭小红 梁 巍(317)         |
| 综合超前地质预报技术及其在翔安海底隧道施工中的应用 ..... | 郭衍敬 黄明琦(331)                 |
| 厦门翔安海底隧道工程施工关键技术 .....          | 曾 超(337)                     |
| 厦门翔安海底隧道风化深槽施工技术 .....          | 孙振川(351)                     |
| 厦门海底隧道困难地层注浆技术前期可行性研究 .....     | 李 蓉 李 曼(364)                 |
| 厦门翔安海底隧道风化槽衬砌结构可靠度分析 .....      | 郭小红(376)                     |
| 潮汐对跨海峡隧道衬砌稳定性影响研究 .....         | 于洪丹 陈卫忠 郭小红 梁 巍 卢海峰 谭贤君(387) |
| 厦门翔安海底隧道结构长期监测系统设计与应用研究 .....   | 王明年 路军富 曾 超 张建斌(399)         |
| 厦门翔安海底隧道养护管理系统研究 .....          | 于 征 魏 聪 张建斌 徐 燕 林 旻 何 帆(409) |
| 厦门翔安隧道通风和防灾技术研究 .....           | 涂 耘 陈建忠 王小军(415)             |
| 厦门海峡隧道风化槽围岩衬砌防排水技术研究 .....      | 郭小红 梁 巍 陈卫忠 曹俊杰 于洪丹(423)     |
| 近海隧道混凝土结构耐久性设计探析 .....          | 贾瑞华 程 勇 程 占(434)             |

|                            |                         |       |
|----------------------------|-------------------------|-------|
| 爆破作用诱发海底隧道涌水机理分析           | 刘永胜 王梦恕 傅立新 易震宇 张进华     | (443) |
| 汕头苏埃湾海底隧道建设方案比选            | 刘继国 程 勇 郭小红             | (448) |
| 胶州湾海底隧道三臂凿岩台车全断面注浆快速钻孔施工技术 | 朱琴生                     | (456) |
| 钱江盾构隧道江北岸边段结构设计要点          | 吴德兴 黄 廷 李伟平 郑国平         | (464) |
| 长沙劳动西路越江盾构隧道的风险分析与对策       | 丁 浩 黄伦海                 | (475) |
| 越江盾构隧道开挖面稳定性研究             | 韦良文 张庆贺                 | (483) |
| 高水压超大直径盾构隧道结构健康监测系统设计研究    | 黄 俊 张顶立 黄清飞             | (490) |
| 沉管隧道地基与基础的设计选型             | 张志刚 刘洪洲 付佰勇             | (500) |
| 宁波甬江沉管隧道大修设计与施工            | 李伟平 吴德兴 郭 霄 高 翔 黄 廷 郑国平 | (511) |
| 公路水下隧道应急救援对策               | 王少飞 涂 耘 程崇国             | (522) |
| 城区水下隧道逃生通道设置形式研究           | 杨秀军 颜静仪 石志刚             | (530) |



# CONTENT

---

## Research and Design

|                                                                                                                                          |                                           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| Analysis on mechanical characteristics and safety of secondary lining structure for karst tunnel under high hydraulic pressure .....     | Xu Linsheng Li Yiwei(3)                   |
| Research on design methods and pre-warning system of the road tunnel .....                                                               | Lin Zhi Jiang Shuping Li Xingping(11)     |
| Measurement technologies of looseness range and secondary stress and prevention of hazard in deeply buried highway tunnel .....          | Ma Kang Zhang Zhilong Pei Jianliang(21)   |
| Security evaluation on secondary lining of unequal thickness in tunnel .....                                                             | Tian Zhiyu Su Zongxian(34)                |
| Study on safety control criteria of tunnel .....                                                                                         | Zhu Chenghao Zhang Ming(41)               |
| Design and safety analysis of tunnel structure beneath Xujiaping airport in Enshi city .....                                             | Tang Zhao Tang Xiongjun(46)               |
| Research on width and plane arrangement of transverse passageway in road tunnel .....                                                    | Qin Feng Ding Hao Fang Lin(57)            |
| Design on pseudo wall method in skew excavation portal for highway tunnel .....                                                          | Tang Ying(65)                             |
| Research on pre-reinforcement with fibre bolt in large cross-section tunnel .....                                                        | Zhou Jie Xi Jinzhou Qi Taiyue(70)         |
| Study on hazards assessment during shield tunnel construction .....                                                                      | Zhao Ningyu Liang Bo Liu Linchao(76)      |
| Study on control technology of shield tunneling traversing freeway flyover .....                                                         | Zhang Heng Zhao Yubao Chen Shougen(84)    |
| Study on starting techniques of shield .....                                                                                             | Zhao Xianpeng Chen Shougen Li Yanbing(92) |
| Research on monitoring technology of extra-long tunnel group for Wulong-Shuijiang freeway .....                                          | Gao Xiaobo(99)                            |
| New marine acoustic prospecting instrument to surveying of sub aqueous tunnel and geological prediction during tunnel construction ..... | Zhong Shihang(106)                        |
| Effect and significance of hydraulic fracture stress measurement in construction of deep-buried tun-                                     |                                           |

|                                                                                                           |                                          |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| nels .....                                                                                                | Sha Peng Du Yuben and so on(119)         |
| Research on new ventilation system of large-scale underground interchange tunnel .....                    | Deng Xin Tu Yun Lin Zhi(128)             |
| Analysis of present situation on ventilation system design of urban traffic tunnel in China .....         | Wang Wenan Deng Xin(135)                 |
| Research on energy-saving lighting technology according to need of mountain highway tunnel .....          | Tu Yun Deng Xin(143)                     |
| Analysis and discussion based on safety of highway tunnel lighting effect factor .....                    | Zheng Xuan(150)                          |
| LED light source applied to freeway tunnel with large cross section .....                                 | Yang Xiaodong Li Guoqiang Mu Yijing(156) |
| Research on key technology of energy-saving power supply and distribution system for freeway tunnel ..... | Zhao Qingbi Zhang Qi Wu Xiaoli(161)      |
| Key technology on NATM applied to Tianhengshan clay tunnel .....                                          | Wang Daqing(171)                         |

### Operation Management

|                                                                                                                      |                                                 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Research on safety design and operation management for Qinling Zhongnanshan highway tunnel .....                     | Han Zhi Jiang Shuping(181)                      |
| Analysis of design speed standard and traffic safety for Qiantang River tunnel .....                                 | Li Weiping Wu Dexing and so on(187)             |
| Study and application of FRAD evaluation technology for operation circumstance of highway tunnel .....               | Tao Tao(195)                                    |
| Evaluation on driving safety of freeway tunnel entrance based on technology of secondary development of aimsun ..... | Guo Sen Cong Haozhe(206)                        |
| Study on driving safety of freeway tunnel entrance .....                                                             | Huangfu Guosheng Zhang Lanfang Cong Haozhe(214) |
| Elearning and tunnel simulator as tool for improving safety in the road tunnels ...                                  | P. Příbyl(220)                                  |
| Research on traffic sign schemes for underground road .....                                                          | Wang Yue Wang Junhua Chao Can(230)              |
| Preliminary experiment study on light environment to physiological responses of driver in tunnel .....               | Liu Yang Li Xianghong and so on(237)            |
| Analysis on factors affecting drivers safety reliability in freeway tunnel .....                                     | Gui Yufeng Wang Junhua(245)                     |
| Fire protection and rescue of large underground interchange .....                                                    | Chen Jianzhong Tu Yun(251)                      |
| Design of fire safety and escape-rescue for Qiantang River tunnel .....                                              | Li Weiping(261)                                 |
| Ventilation scheme of Aipingshan tunnel .....                                                                        | Huang Huayue Xu Linsheng(270)                   |



|                                                                                                             |                   |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| Variable speed control and energy saving for tunnel axial fan .....                                         | Liu Jianming(276) |
| Construction ventilation technology for Dianziping inclined shaft of West Qinling tunnel .....              | Li Chunkui(282)   |
| Research on operation safety and energy saving of freeway with high proportion of bridges and tunnels ..... | Zhang Liyuan(288) |

## **Underwater Tunnel**

|                                                                                                                 |                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Design of underwater highway tunnel based on function design idea .....                                         | Jiang Shuping Ding Hao and so on(297)   |
| Research on mechanical characteristics of strong weathered granite for Xiamen subsea tunnel .....               | Yu Hongdan Chen Weizhong and so on(306) |
| Research on stability of surrounding rock for weathered strata of Xiamen subsea tunnel .....                    | Chen Weizhong Yu Hongdan and so on(317) |
| Application for integrative technologies of geological forecast in construction of Xiangnan subsea tunnel ..... | Guo Yanjing Huang Mingqi(331)           |
| Key technology on engineering construction of Xiamen Xiangnan subsea tunnel .....                               | Zeng Chao(337)                          |
| Construction technology for deep weathered slots of Xiangnan subsea tunnel in Xiamen .....                      | Sun Zhenchuan(351)                      |
| Feasibilit research on grouting technique of poor stratum in Xiamen Xiangnan subsea tunnel .....                | Li Rong Li Man(364)                     |
| Reliability analysis on linging structure of weathered slot for Xiangnan subsea tunnel in Xiamen .....          | Guo Xiaohong(376)                       |
| Research on effect of tide to stability of channel tunnel lining .....                                          | Yu Hongdan Chen Weizhong and so on(387) |
| Study on design of structure long-term monitoring system of Xiamen Xiangnan subsea tunnel .....                 | Wang Mingnian Lu Junfu and so on(399)   |
| Research on maintenance management systems of Xiamen Xiangnan subsea tunnel .....                               | Yu Zheng Wei Cong and so on(409)        |
| Study on ventilation and fire protection of Xiamen Xiangnan tunnel .....                                        | Tu Yun Chen Jianzhong Wang Xiaojun(415) |
| Study on waterproofing-drainage technique for weathered trough lining of Xiamen subsea tunnel .....             | Guo Xiaohong Liang Wei and so on(423)   |
| Study on durability design of maritime tunnel concrete structures .....                                         | Jia Ruihua Cheng Yong Cheng Zhan(434)   |
| Stability on water inflow mechanism of subsea tunnel induced by blasting excavation                             |                                         |

- ..... Liu Yongsheng Wang Mengshu and so on(443)
- Comparison of construction schemes on Suaiwan undersea tunnel in Shantou
- ..... Liu Jiguo Cheng Yong Guo Xiaohong(448)
- Construction technology on full-face grouting by 3-boom hydraulic rock-drilling jumbo for subsea tunnel of Jiaozhou Bay ..... Zhu Qinsheng(456)
- Design key points of shore structure in Qiantang River tunnel
- ..... Wu Dexing Huang Ting and so on(464)
- Risk analysis and countermeasures on river-crossing shield tunnel of Laodong West Road in Changsha city ..... Ding Hao Huang Lunhai(475)
- Research on face stability in river-cross shield tunnelling ... Wei Liangwen Zhang Qinghe(483)
- Research on health monitoring system of super large diameter shield tunnel structure under high hydraulic pressure ..... Huang Jun Zhang Dingli Huang Qingfei(490)
- Design selection on soil improvement and foundation for immersed tunnel
- ..... Zhang Zhigang Liu Hongzhou Fu Baiyong(500)
- Overhaul design and construction of Ningbo Yongjiang immersed tube tunnel
- ..... Li Weiping Wu Dexing and so on(511)
- Emergency rescue strategy of underwater road tunnel
- ..... Wang Shaofei Tu Yun Cheng Chongguo(522)
- Research on setting form for escape passage of underwater tunnel
- ..... Yang Xiujun Yan Jingyi Shi Zhigang(530)

---

# 研究与设计

## Research and Design



# 岩溶隧道高水压下二次衬砌结构受力特性与安全性分析

徐林生 李贻伟

(重庆交通大学土木建筑学院 重庆 400074)

**摘 要** 渝湘高速公路某深埋特长隧道位于岩溶富水区,其左洞 ZK38 + 645 ~ ZK39 + 040 位于构造溶蚀地段,岩体裂隙较为发育,二次衬砌结构受到高外水压力的作用。本文依据该隧道实际施工情况,选取 8 种计算工况,采用大型有限元软件 ANSYS10.0,对左洞典型高外水压力作用的断面进行弹塑性数值模拟分析,详细研究各种工况下二次衬砌结构的受力特性及其安全性状况,研究结果表明:在高外水压力作用下,该隧道仰拱和边墙的内力都较大,特别是墙脚的结构安全系数最小,极易产生破坏,设计施筑的二次衬砌结构所能承受的最大外水压力不超过 0.5 MPa。

**关键词** 公路隧道 外水压力 数值模拟 二次衬砌 安全系数

## Analysis on mechanical characteristics and safety of secondary lining structure for karst tunnel under high hydraulic pressure

*Xu Linsheng Li Yiwei*

(School of Civil Engineering & Architecture, Chongqing Jiaotong University,  
Chongqing, 400074, China)

**Abstract:** The deep-buried mountain tunnel of Yu-Xiang expressway locates in karst and water-rich zone, the sections from ZK38 + 645 to ZK39 + 040 pass through the jointed rock mass stratum of tectonic and corroded region where high external hydraulic pressure is likely to bear on the lining structure. According to the actual construction of representative section with high external hydraulic pressure, eight calculation cases are numerically simulated with elasto-plastic FEM by using ANSYS 10.0 software. The mechanical characteristics as well as safety factors of the secondary lining structure under different external hydraulic pressure are studied detailedly. The results show that the internal force is higher at invert and tunnel wall, and the safety factor is smallest at the foot of tunnel wall where the lining structure is likely to be fractured when bearing the external hydraulic pressure more than 0.5 MPa.

**Key words:** highway tunnel; external hydraulic pressure; numerical simulation; secondary lining; safety factor

随着隧道工程技术的进步和交通事业的发展,我国在岩溶富水区修建的公路隧道日益增多。考虑到大量排放地下水可能会导致中心水沟堵塞、地表环境恶化等问题,越来越多的岩溶富水区隧道逐渐采用“以堵为主,限量排放”的防排水设计原则<sup>[1]</sup>,这就势必会使隧道衬砌承受一定的外水压力作用。特别是深埋高水位公路隧道,如果防排水措施不当,隧道衬砌结构难免会受到较大的外水压力作用而产生渗漏和变形,严重时甚至会丧失稳定性。所以该类隧道的衬砌结构设计应该考虑外水压力的作用。但关于深埋隧道的外水压力问题,目前还没有一个成熟的求解方法<sup>[2]</sup>。水工隧洞设计规范<sup>[3]</sup>指出,可采用地下水位线至隧洞中心的水柱高乘以一定的折减系数方法来估算混凝土衬砌结构上的外水压力。现行公路隧道设计规范<sup>[4]</sup>虽然考虑到了水压力且作为永久荷载考虑,但并未给出其荷载大小的计算方法,这样进行隧道衬砌结构设计时就会存在一定的盲目性,其采用的隧道衬砌结构在高外水压力条件下能否经受住考验是一个值得深思的问题。所以,为了确保岩溶富水区深埋公路隧道的顺利施工和运营期间的使用安全,有必要对高外水压力作用条件下隧道衬砌结构的安全性问题作专项分析研究。

## 1 工程概况

研究区的岩溶隧道位于重庆市秀山县境内,为在建渝湘高速公路上的2车道分离式隧道,全长3 309.949 m;该隧道建筑限界净宽10.50 m、限高5.0 m。隧址区水文与工程地质条件复杂多变,其中隧道左洞ZK38+645~ZK39+040为构造溶蚀地段,地处平阳盖向斜的东翼,埋深达266~296 m,隧道结构易受高外水压作用;岩性主要为出露二叠系下统茅口组( $P_1m$ )厚层含燧石结核微晶灰岩、生物碎屑灰岩及泥质灰岩,隧道墙脚以上部位的围岩完整性相对较好,隧道两侧墙脚以下部位的围岩则较为破碎、岩溶裂隙发育,现场施工时曾发生过局部高压突水突泥事故。

## 2 数值模拟分析

### 2.1 计算模型与参数

针对该隧道上述研究区岩溶高压富水段特殊的水文与工程地质条件,选取左洞ZK38+645~ZK39+040构造溶蚀地段的ZK38+800典型断面,采用有限元软件ANSYS10.0,对其二次衬砌结构的受力特性与安全性进行计算分析,以指导动态设计与施工实践。该断面隧道埋深为280 m,设计施筑的支护衬砌结构主要参数为: $\phi 22$ 砂浆系统锚杆长3.5 m、间距100 cm $\times$ 100 cm; $\phi 6.5$ 钢筋网间距20 cm $\times$ 20 cm;钢拱架纵向间距100 cm;C20喷射混凝土厚18 cm,C25二次衬砌防水钢筋混凝土厚50 cm(见图1)。

有限元数值模拟计算采用平面应变模型,围岩选用plane 42单元按弹塑性体进行模拟,屈服准则采用Drucker-Prager准则<sup>[5]</sup>。二次衬砌采用beam 3单元按理想弹性体模拟,锚杆加固区和喷射混凝土统一采用plane 42单元,即适当提高其计算参数来近似模拟初期支护效果<sup>[6]</sup>。由于该断面隧道上下部围岩存在着一定的差异性,故隧道墙脚以上围岩取Ⅳ级围岩物理力学参数,两侧墙脚以下围岩则取Ⅴ级物理力学参数,同理上下部围岩加固区(即加固区Ⅰ、加固区Ⅱ)的参数选取也相应地有所不同(见表1)。



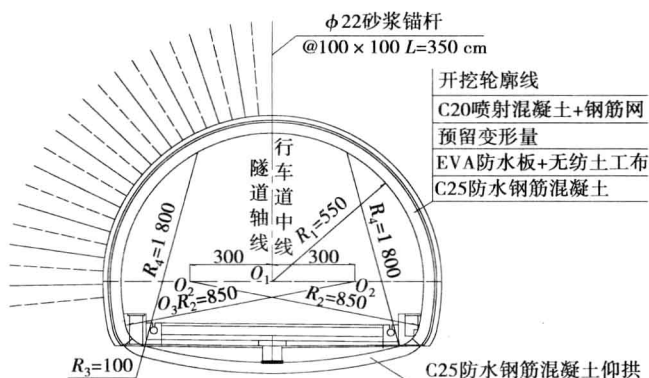


图1 隧道支护衬砌结构设计断面图

表1 有限元主要计算参数

| 材料类型   | 弹性模量<br>$E/\text{GPa}$ | 泊松比<br>$\mu$ | 重度<br>$\gamma/(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$ | 粘聚力<br>$c/\text{MPa}$ | 内摩擦角<br>$\varphi/(\circ)$ |
|--------|------------------------|--------------|------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| IV级围岩  | 5.5                    | 0.31         | 22                                             | 0.7                   | 38                        |
| V级围岩   | 2.0                    | 0.35         | 20                                             | 0.2                   | 27                        |
| 加固区 I  | 10.0                   | 0.30         | 23                                             | 1.2                   | 39                        |
| 加固区 II | 4.0                    | 0.34         | 21                                             | 0.5                   | 28                        |
| 二次衬砌   | 29.5                   | 0.16         | 25                                             | —                     | —                         |

计算模型(见图2)所取地层范围:水平方向两边各取4倍的隧道洞径,竖直方向由隧道中心至上下边界也各取4倍洞径。模型左右边界和下边界均施加法向位移约束;上边界为自由边界,且施加5.39 MPa的竖向均布荷载,以模拟上覆岩层的自重。

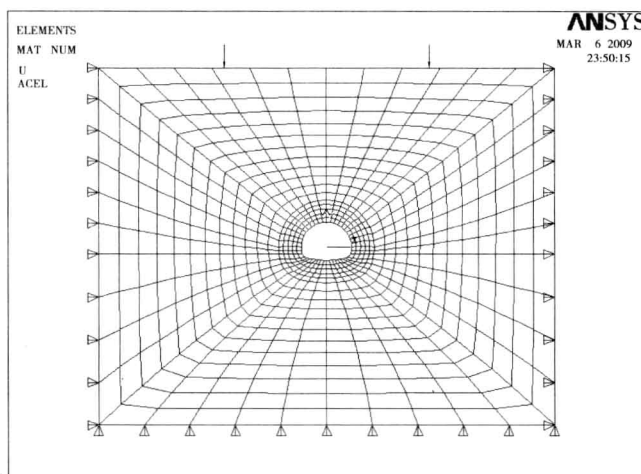


图2 计算模型和单元网格划分

## 2.2 计算工况

考虑到隧址区岩溶段的地下水位是动态变化,且衬砌外水压力的的大小需在总水压力大小的基础上进行一定折减,结合该隧道的埋深、围岩和衬砌外水压力实际显示状况,此次 ZK38 + 800 典型断面的数值模拟分析共选取 8 种计算工况依次进行,见表 2。

表 2 有限元计算各工况特征表

| 计算工况 | 外水压力 $P/\text{MPa}$ |       | 计算工况 | 外水压力 $P/\text{MPa}$ |       |
|------|---------------------|-------|------|---------------------|-------|
|      | 仰拱                  | 拱顶至墙脚 |      | 仰拱                  | 拱顶至墙脚 |
| 1    | 0                   | 0     | 5    | 1.000               | 0.500 |
| 2    | 0.250               | 0.250 | 6    | 1.250               | 0.625 |
| 3    | 0.500               | 0.250 | 7    | 1.500               | 0.750 |
| 4    | 0.750               | 0.375 | 8    | 1.750               | 0.875 |

## 2.3 过程实现和控制

各工况计算过程均分为以下 9 个步骤来完成:

- (1) 隧道围岩未开挖初始状态数值模拟。
- (2) 上台阶开挖。
- (3) 上台阶围岩初期支护加固。
- (4) 下台阶开挖。
- (5) 围岩初期支护加固。
- (6) 仰拱开挖。
- (7) 施筑仰拱。
- (8) 施筑拱墙部位二次衬砌。
- (9) 施加相应的衬砌外水压力。

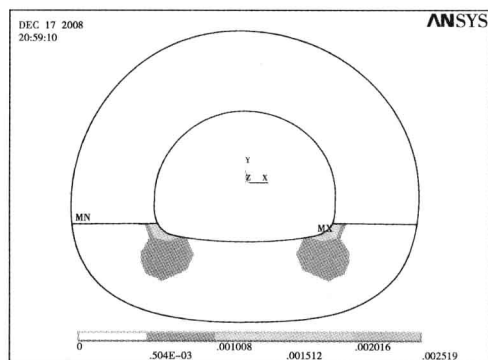
上述计算过程中不考虑右洞开挖对左洞围岩造成的影响,并假定隧道开挖阶段地应力释放 40%,施筑初期支护也释放 40%,二次衬砌施筑完成后再释放剩余 20% 的地应力<sup>[4]</sup>。

## 3 结果分析

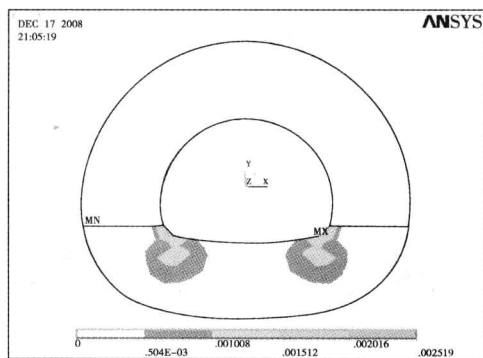
### 3.1 围岩塑性区分布

随着隧道开挖的进行,两侧墙脚角隅处围岩依次出现相关塑性区。计算结果表明:

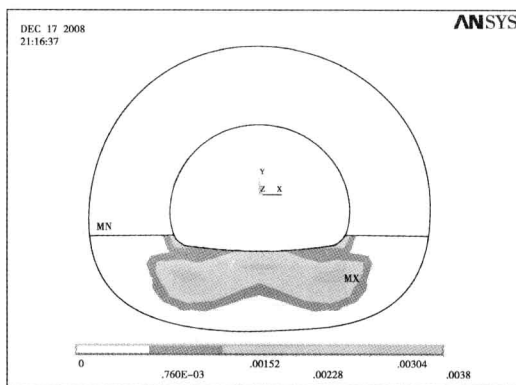
- (1) 未施筑二次衬砌之前,随着围岩应力的逐步释放,两侧墙脚角隅处围岩塑性区面积开始逐渐变大。
- (2) 二次衬砌施筑完成后,围岩塑性区主要分布在两侧墙脚和仰拱下方,随着外水压力的增加且不断向仰拱中心扩展,至工况 6 时仰拱下方两边塑性区已经贯通,近似呈“人”字型,如图 3 所示。



(a) 工况1



(b) 工况3



(c) 工况6

图3 不同工况下隧道围岩塑性区分布特征图

### 3.2 二次衬砌受力特征

为了方便分析隧道二次衬砌结构的内力总体分布特征,现选取如图4所示的6个特征点来加以重点说明。

计算结果表明:隧道二次衬砌结构每个部位的轴力全为压力,并且随着衬砌外水压力的增加而增大;拱圈所受轴力从上到下依次增大,其中拱顶至拱腰范围内轴力均较其他部位小;工况1~工况5时墙脚的轴力最大,仰拱的轴力呈两侧大、中间小的态势,工况6后仰拱的轴力则呈两侧小、中间大的态势,而且中心部位的轴力增加最为显著,为二次衬砌结构的最大轴力,如图5、图6所示。

隧道二次衬砌结构的最大弯矩主要发生在边墙和仰拱部位,其中特征点5的正弯矩(内侧受拉)最大,特征点4的负弯矩(外侧受拉)最大,且随外水压力的增加而明显变大,但始终未超过 $1\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,其他4个特征点的弯矩相对较小,变化也不明显;各种工况下拱腰至拱脚的负弯矩从上到下依次变大,工况1时拱顶至拱腰范围存在较小的正弯矩,但随着外水压力的增加而逐渐变为负弯矩(见图7、图8)。

综上所述,在外水压力作用下,隧道二次衬砌边墙以及仰拱的内力较大,特别是两侧墙脚

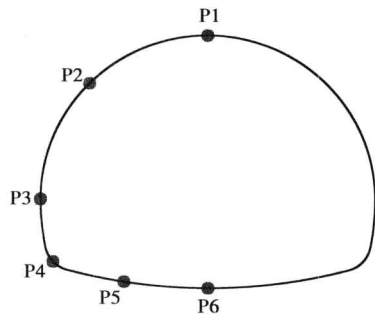


图4 各特征点位置图示