

文章编号: 1000-7598 (2011) 01-0269-08

岩溶隧道开挖对溶洞处治结构影响的数值模拟分析

周雪铭¹, 刘 辉², 彭 川², 吴 美³

(1. 湖南省长湘高速公路建设开发有限公司, 长沙 410200; 2. 长沙理工大学 土木与建筑学院, 长沙 410076;
3. 广东清连高速发展有限公司, 广东 清远 511500)

摘 要: 结合清连高速公路白须公特大岩溶隧道施工过程, 采用三维有限元软件(ANSYS)对白须公隧道的处治结构与隧道开挖的相互作用进行了数值模拟。以隧道开挖中处治结构和围岩稳定性为研究对象, 从而分析处治结构在隧道开挖过程中的受力特性, 以及隧道围岩在隧道开挖过程中的位移。通过计算结果, 对处治结构在岩溶隧道中的支护效果进行了评价, 采用桩-承台-单边支撑墙-联系梁的处治方式是安全可靠的。在隧道开挖过程中, 开挖面附近的桩基应变、支撑墙压力都加速变大, 随后逐渐稳定, 说明处治结构承担了一部分围岩压力, 在岩溶隧道施工开挖中发挥了重要作用。分析结果与工程实测数据比较吻合, 可为隧道穿越大型溶洞提供设计和施工方面的借鉴和参考。

关 键 词: 岩溶隧道; 处治结构; 数值模拟; 溶洞

中图分类号: O 242.21

文献标识码: A

Numerical simulation analysis of deformation effect on treatment structure of karst cave due to karst tunnel excavation

ZHOU Xue-ming¹, LIU Hui², PENG Chuan², WU Xian³

(1. Hunan Changxiang Expressway Construction and Development Co. Ltd., Changsha 410200, China;
2. College of Civil and Architectural Engineering, Changsha University of Sciences and Technology, Changsha 410076, China;
3. Guangdong Qinglian Expressway Development Co. Ltd., Qingyuan, Guangdong 511500, China)

Abstract: According to a big karst cave in highway tunnel engineering of Qing-Lian Expressway in Baixugong, a three-dimensional element software (ANSYS) was employed to simulate the interaction between tunnel excavation and treatment structure in Baixugong tunnel. Stability of treatment structure and surrounding rock during tunnel excavation is studied in order to analyze the mechanical characteristics of treatment structure and the displacement of surrounding rock during tunnel excavation. According to analysis of calculation results, the pre-support effect of treatment structure in karst tunnels is evaluated. Treatment mode using pile-pile cap-one-wall support wall-connection beam, is safe and reliable. In the process of tunnel excavation, the pile strain and support wall stress all increased largely during the advance of excavation face, then gradually stabilized; and the treatment structure bears a part of surrounding rock pressure, it plays a support action role in karst tunnel excavation. The results are in good agreement with the field test data, so as to offer for reference in design and construction of tunnels crossing a big karst cave.

Key words: karst tunnel; treatment structure; numerical simulation; karst cave

1 引 言

随着高速公路建设的迅猛发展, 在岩溶地区修建公路隧道越来越多。此处公路隧道穿越大溶洞时, 采用桩-承台-单边支撑墙-联系梁的处治方式, 来保证隧道施工和运营期安全^[1-5]。因此, 数值模拟研究围岩稳定性和溶洞处治结构的安全可靠性具有重要意义^[6-7]。为今后岩溶地区公路隧道穿越大溶洞

的设计与施工提供了一定的依据与指导。

2 工程概况

白须公 1 号隧道为清(远)连(州)一级公路升级改造(高速)工程, 隧道起讫桩号 K2178+015~K2178+425, 长 410 m。

隧道在开挖到 K2178+074 时在隧道上半段面左侧发现溶洞, 溶洞洞腔最高约 46 m, 宽约 50 m,

收稿日期: 2009-09-11

第一作者简介: 周雪铭, 男, 1969 年生, 高级工程师, 主要从事高速公里施工与管理工作。

使用单元的生死功能来模拟隧道的开挖和支护,围岩的初始应力主要由重力引起,应力随深度逐渐增大,只考虑岩体的自重应力,忽略其构造应力。计算中取重力加速度 $g = 10 \text{ m/s}^2$,围岩的侧压力系数 $\lambda = 0.6$ 。待桩、承台、支撑墙组合结构施工完成后求解初始应力场。然后溶洞段隧道 30 m 采用台阶法开挖,通过如下步骤模拟整个隧道的施工过程:

(1) 按上下台阶 3 m 步距进行开挖,上台阶开挖完成后,进行求解平衡;

(2) 恢复上台阶初期支护的材料参数,模拟下台阶开挖施工,进行求解平衡,恢复下台阶初期支护;

(3) 继续开挖上台阶,进行求解平衡。

根据上述开挖和支护模拟方法可模拟整个隧道施工过程,总共 20 步工况,以对溶洞桩、台、墙组合结构效果进行评价。

4 数值模拟结果

4.1 桩基础分析

通过以上开挖模拟过程,可得到桩基础在不同工况下的受力状态,图 4 为不同工况下桩基础的水平位移。靠近隧道一排桩为右侧桩,远离的为左侧桩,并且按开挖面向前编号为 1[#]~6[#] 桩,特征点均为桩顶中心点,特征点如图 3。

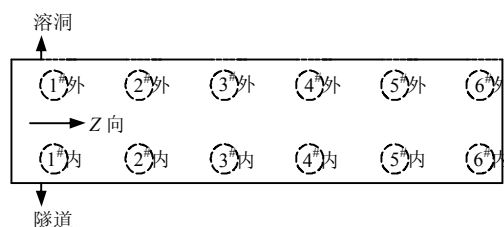


图3 桩特征点示意图

Fig.3 Sketch of feature points of pile

绘制桩顶部水平位移与开挖距离的关系曲线图,负值表示与 X 正方向相反,正值表示与 X 正方向同向。

根据图 4 计算结果可看出:

(1) 在隧道开挖完成后,两排桩基水平位移都为负向,说明在偏压下,桩发生了偏向溶洞的侧向位移。

(2) 在隧道开挖过程中,右侧桩的水平位移大于左侧桩的位移,并且右侧 3[#] 桩的位移值最大,达到了 0.35 mm,而左侧桩最大值为 0.15 mm。

(3) 在隧道开挖过程中,开挖面离桩越近,桩的水平位移值增加越大,当开挖到与桩同一个断面

时,水平位移值达到峰值,随后逐渐减小,其影响距离为 10 m 左右。

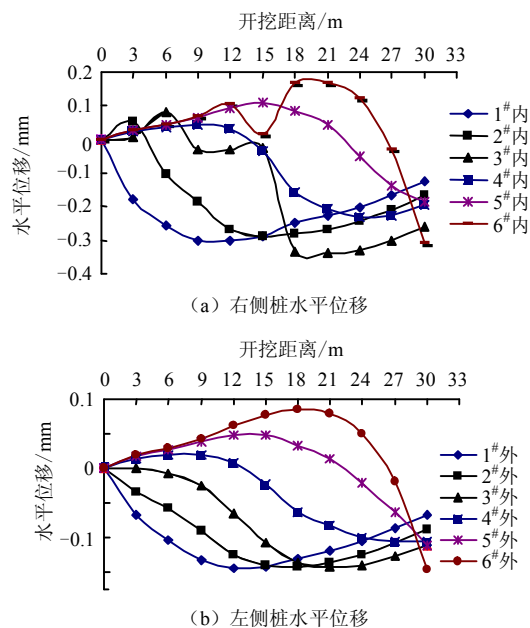


图4 不同工况下桩的水平位移

Fig.4 Horizontal displacements of piles under different working conditions

4.2 承台分析

绘制承台位移与开挖距离的关系曲线图,负值表示与 X 正方向相反,正值表示与 X 正方向同向,特征点示意图如图 5。

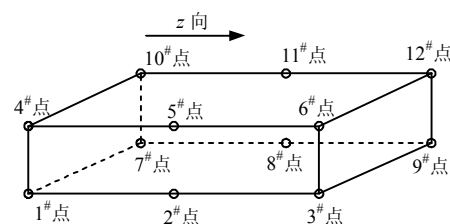


图5 承台特征点示意图

Fig.5 Sketch of feature points of pile cap

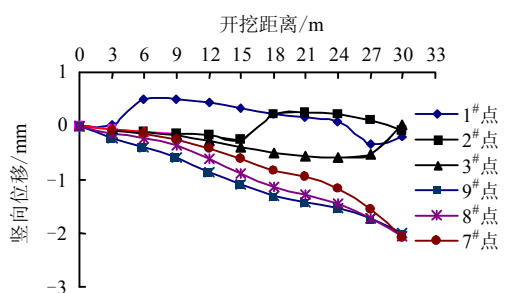
根据图 6 计算结果可看出:

(1) 特征点均发生了向下竖向位移,靠近隧道一侧的点竖向位移很小;远离隧道一侧的点竖向位移变化大,最大值为 2 mm,且离开挖面越近的点释放的竖向位移越小;特征点竖向位移大于水平位移见图 6 (a);

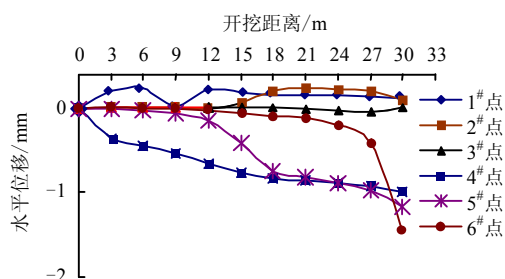
(2) 在隧道开挖过程中,7[#]~9[#] 特征点随开挖面向前掘进,其水平位移和竖向位移值逐渐增大;

(3) 从图 6 (b)、(c) 可知,特征点均发生了偏向溶洞一侧的水平位移,所以隧道 K2178+084~112 设置横向联系梁是有必要的,设置与承台预留

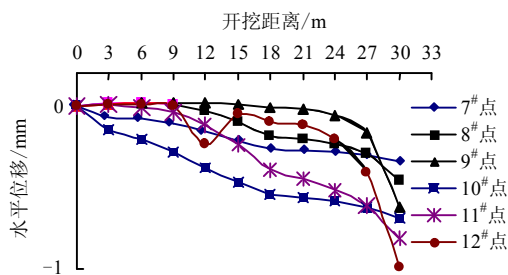
钢筋共同连接的横向联系梁,其可以很好地弥补基础不抗侧向压力缺点,大大增加了桩、台、墙组合结构的稳定性。



(a) 特征点竖向位移



(b) 特征点水平位移



(c) 特征点水平位移

图6 不同工况下承台特征点的水平和竖向位移
Fig.6 Horizontal and vertical displacements of feature points of pile cap under different working conditions

4.3 支撑墙分析

图7为不同工况下支撑墙的水平(X向)位移,其中负值表示位移与X轴方向相反,正值表示位移与X轴方向相同。

在支撑墙顶面与隧道围岩交汇处布设特征点1#~3#,支撑墙与初期支护界面布设4#~6#点,按开挖面向前编号,2#、5#在墙体纵向中间部分,其它特征点在两端。

根据图7计算结果可看出:在隧道开挖过程中,1#~6#点均发生了偏向溶洞的水平位移,且随开挖面向前掘进,其水平位移值逐渐增加,3#点变化最大,最大值为1.2 mm;所以在墙体另一侧采用反压回填,可以对隧道的偏压起到反压作用。

绘制支撑墙底面竖向位移与开挖距离的关系曲

线图,负值表示与Y正方向相反,正值表示与Y正方向同向。

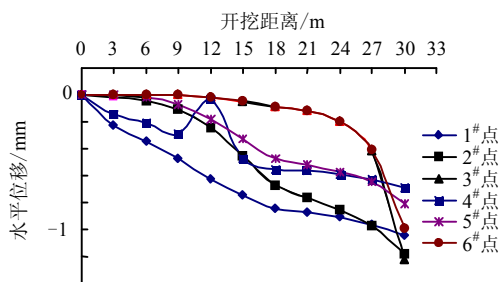


图7 不同工况下支撑墙特征点水平位移
Fig.7 Horizontal displacement of feature points of supporting wall under different working conditions

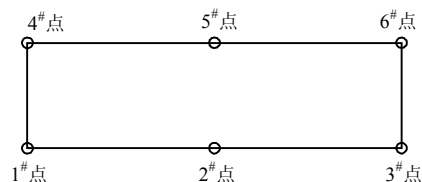


图8 支撑墙底面特征点示意
Fig.8 Sketch of feature points of supporting wall

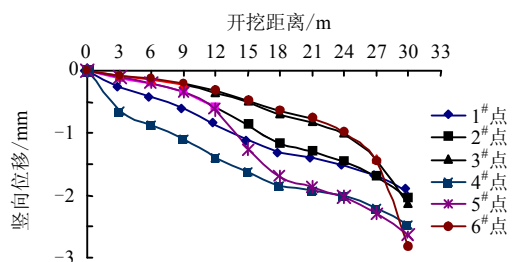


图9 不同工况下支撑墙特征点竖向位移
Fig.9 Vertical displacements of feature points of supporting wall under different working conditions

根据图9计算结果可看出:在隧道在隧道开挖过程中,1#~6#点均发生了向下竖向位移,随开挖面向前掘进,其竖向位移值也逐渐增大,最大值为2.75 mm。

图10为不同工况下支撑墙的竖向(Y向)应力图,其中负值表示受压,正值表示受拉。

从支撑墙的竖向(Y向)应力图10看出:

(1)在隧道开挖过程中,竖向应力最大发生在支撑墙的右脚处,最大值为13 MPa;而承台支撑墙与溶洞顶交界处为0.5~3.3 MPa。

(2)在隧道开挖过程中,随开挖面向前掘进,竖向应力最大值沿墙体右脚向前移动,并且竖向应力值也逐渐增加。

(3)最大竖向应力出现在墙体拱脚,所以其与

承台的连接部位在隧道施工中应加强该位置的施工质量。

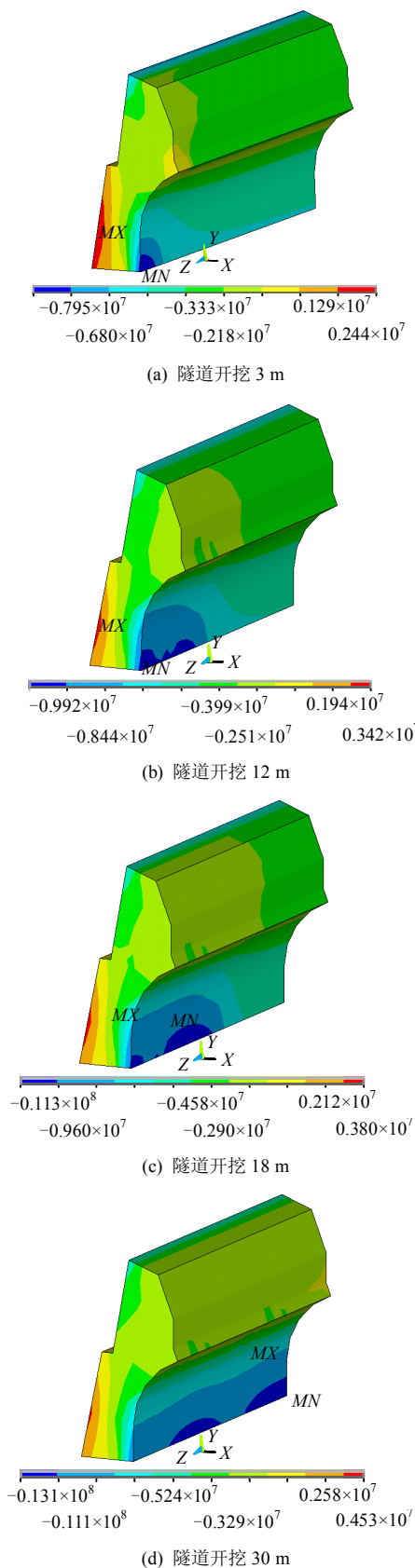


图 10 不同工况下支撑墙竖向应力图

Fig.10 Vertical stress diagrams of supporting wall under different working conditions

4.4 隧道围岩分析

隧道围岩各特征点布置情况如图 11。

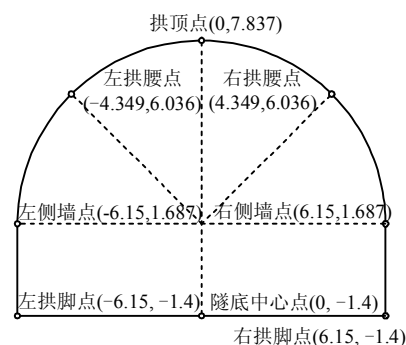


图 11 隧道围岩特征点示意图 (单位: m)

Fig.11 Sketch of feature points of surrounding rock (unit: cm)

图 12 为不同工况下隧道围岩 $Z=0$ 断面的位移图, 其中负值表示位移与 $Y(X)$ 轴方向相反, 正值表示位移与 $Y(X)$ 轴方向相同。

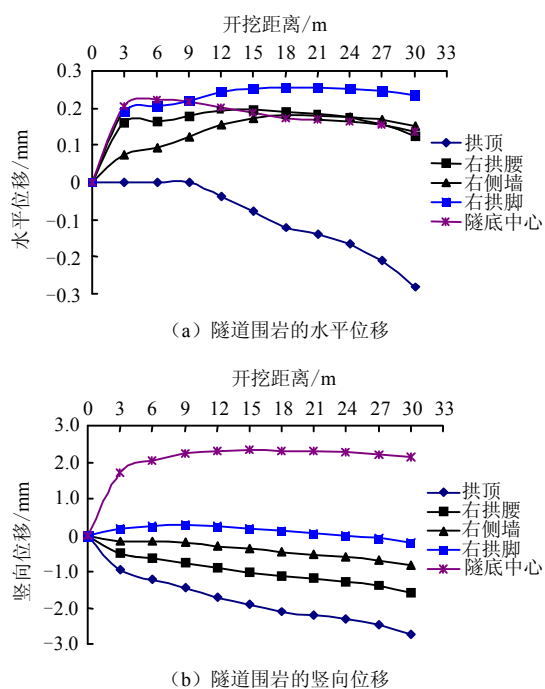


图 12 不同工况下隧道围岩的水平和竖向位移

Fig.12 Horizontal and vertical displacements of feature points of surrounding rock under different working conditions

根据图 12 计算结果可看出:

- (1) 在隧道开挖过程中, 拱顶水平位移偏向溶洞一侧, 其他特征点水平位移方向均向隧道外扩张;
- (2) 隧道拱腰、拱脚、侧墙和隧底中心水平位移受隧道开挖影响很小, 趋于一个恒定值, 而拱顶下沉随着开挖面的不断推进而逐步增大;
- (3) 隧道底中心竖向位移方向向上, 其他特征

点竖向位移方向向上,而拱顶竖向位移变化最大,变化值为 2.7 mm,隧道底部竖向位移值为 2.5 mm;

(4) 隧道围岩竖向位移远大于其水平位移。

4.5 初期支护分析

图 13 为不同工况下隧道初期支护的位移图,其中负值表示受压,正值表示受拉。

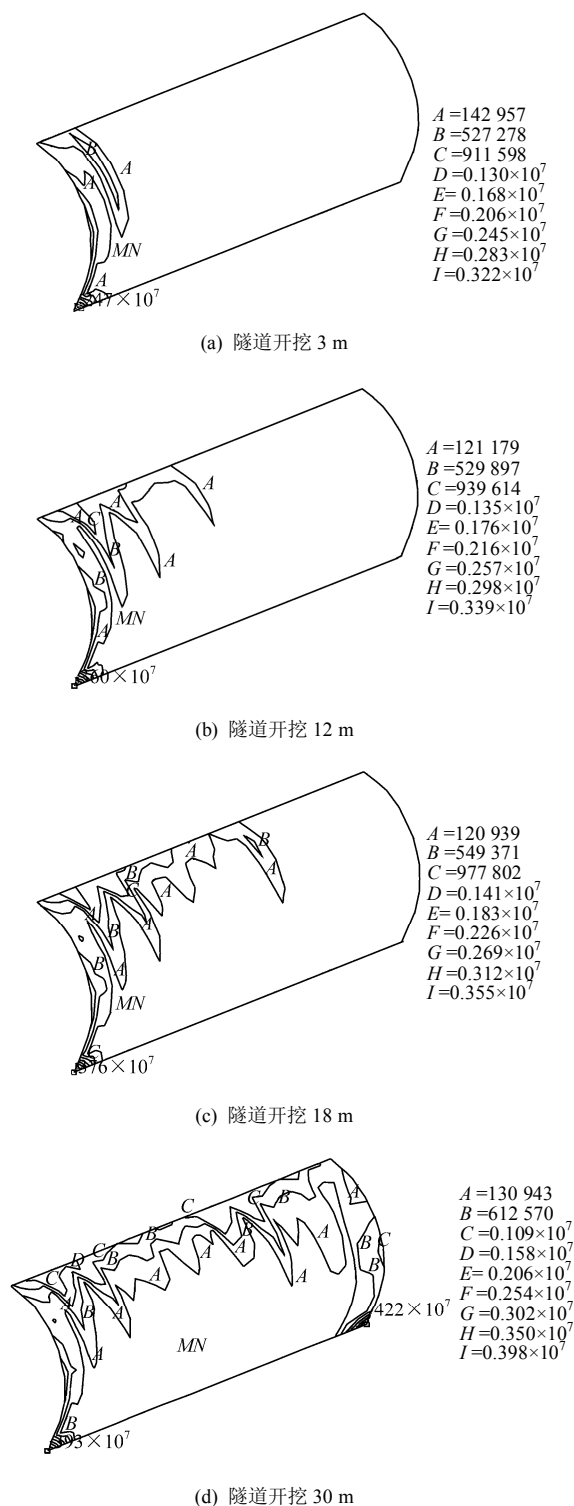


图 13 不同工况下初期支护等竖向应力值线

Fig.13 Equal vertical stress line of primary support under different working conditions

从图 13 可看出:

(1) 在隧道开挖过程中,初期支护的应力逐步增大,并且主要表现为压应力;

(2) 在初期支护中,最大压应力出现在初期支护拱脚以及先、后施工的连接部位,在隧道施工中应加强该位置的施工质量,特别是初期支护应落在基岩上,上下台阶连接部位应保证拱架连接质量;

(3) 在初期支护中,与支撑墙连接部分压应力也有 1.5 MPa,在隧道施工中应加强该位置的施工质量,应保证拱架连接质量;

(4) 计算结果反映初期支护的压应力值为 0.1~4 MPa,小于 C20 喷射混凝土的抗压强度(15 MPa),表明喷射混凝土受力是安全的。

5 监测数据分析

5.1 桩基础稳定性分析

桩基础变形采用 JMZX-212 型智能弦式应变计进行测量,在人工挖孔桩浇注完成后,在桩基础顶面以下大于 2 m 处,布置 3 个方向的表面应变计,现就靠外的 1[#] 桩外侧测试情况分析:

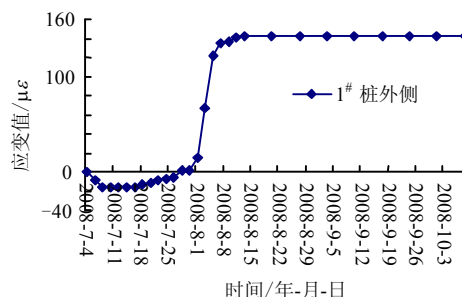


图 14 桩基础应变-时间关系曲线

Fig.14 Relationship between pile foundation strain and time

由图 14 可以看出,7 月 4 日~7 月底期间,在承台上浇注承力墙过程,桩基础应变比较小,承力墙浇注完成后开始稳定;8 月初主洞该断面开挖时,桩基础应变加速度变大,说明主洞开挖后,承力墙承担了来自围岩压力一部分压力;9 月中旬该段开始浇注二次衬砌,10 月初开始浇注横向联系梁,期间围岩压力也不再增大,桩基础应变趋于稳定。监测结果与 4.1 节计算结果显示:当开挖到与桩同一个断面时,水平位移值达到峰值,其影响距离 10 m 左右,两者较吻合。

5.2 支撑墙稳定性分析

承台支撑墙与溶洞顶交汇处采用 JMZX-5206A 型智能弦式压力盒,监测开挖过程中墙体受围岩应力的水平分力情况,以图 7 中 3[#] 点附近断面溶洞顶上压力盒分析:

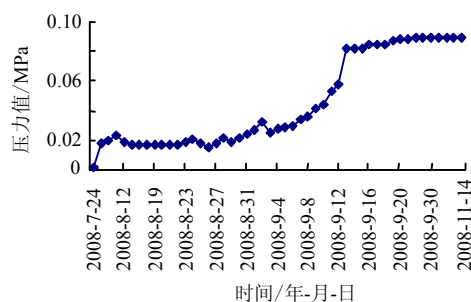


图15 围岩压力与时间关系曲线

Fig.15 Relationship between surrounding rock pressure and time

从图15可以看出:7月底到8月底进口方向的掘进对该段承力墙压力影响比较小;等到9月初该段开挖时,承力墙上压力盒变化迅速加大,9月中旬变化的速率开始减小,到10月初趋于稳定,说明应力重分布已经完成,围岩压力也趋于稳定,该处压力盒也是变化最大的。监测结果与5.2节计算结果显示:3#点变化最大,待隧道开挖到该断面时位移变化最大,两者吻合。

5.3 初期支护与围岩之间压力

沿隧道周边拱顶、拱腰、拱脚位置埋设JMZX-2050A型智能弦式压力盒,压力盒布设时先用砂浆将喷射混凝土面找平,然后使压力盒承压面(压力盒比较光的一面)紧贴围岩面并进行固定,测读初始压力值并进行调0,然后按一定的频率量测读数并整理数据,共布置5个测点。

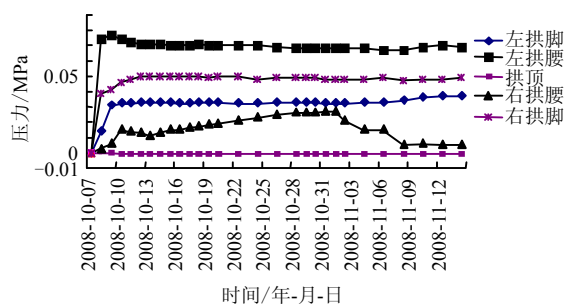


图16 初期支护与围岩之间压力时态曲线

Fig.16 Time-history curves of pressures between surrounding rock and primary support

从图16量测结果可看出:

初期支护与围岩之间最大压力为0.08 MPa,最大压力出现在与支撑墙连接部分的左拱腰位置,比数值分析结果略小,主要由于压力盒测试中很难绝对贴近围岩面。

6 结论

(1) 通过对溶洞段的隧道施工过程模拟,可以

看出,隧道采用桩、台、墙和横向联系梁组合结构是安全可靠的。

(2) 在隧道开挖过程中,桩基处治结构产生了偏向溶洞一侧的位移,开挖面离桩越近,桩的水平位移值增加越大,当开挖到与桩同一个断面时,水平位移值达到峰值,随后逐渐减小,其影响距离为10 m左右。并且内侧桩的水平位移大于外侧桩的位移。

(3) 施工开挖工程中,承台和支撑墙水平位移也偏向溶洞一侧,所以联系梁的设置及墙后土的反压回填对运营安全有较大益处;支撑墙最大竖向应力出现在墙体右拱脚,在隧道施工中应加强该位置的施工质量。

(4) 在隧道开挖过程中,初期支护的右拱脚和与支撑墙连接部分压力应力较大,在隧道施工中应加强该位置的施工质量,应保证拱架连接处的质量。

(5) 在隧道开挖过程中,处治结构有效抑制围岩压力和隧道偏压力,已经得到工程实例验证,但在处治结构支护条件下溶洞隧道围岩的应力分布过程及应力释放系数还有待研究。

参考文献

- [1] 张民庆, 黄鸿健, 田四明. 岩溶隧道安全设计、施工与管理[J]. 铁路工程学报, 2007, 104(5): 75—77.
ZHANG Min-qing, HUANG Hong-jian, TIAN Si-ming. Safe design, construction and management of karst tunnel[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2007, 104(5): 75—77.
- [2] 吕强. 铁路隧道穿越岩溶群区施工控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 4(42): 32—36.
LÜ Qiang. Construction techniques for a railway tunnel passing through karst group area[J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2005, 4(42): 32—36.
- [3] 中交第一公路勘察设计研究院隧道分院. 白须公 1#隧道溶洞段处理方案[R]. [S. l.]: [s. n.], 2007.
- [4] 夏卫国, 张兴来, 钟云健. 大董岭隧道穿越大型溶洞处治方案设计[J]. 公路交通, 2008, (4): 108—113.
XIA Wei-guo, ZHANG Xing-lai, ZHONG Yun-jian. Design of treatment scheme for Dadongling tunnel through large-scale karst cavity[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2008, (4): 108—113.

- [5] 赵万强. 遂渝铁路荆竹岭隧道复杂地质段设计[J]. 铁道工程学报, 2006, 92(2): 52—58.
ZHAO Wan-qiang. Design made for complex geological section of Jingzhuling tunnel on Suining-Chongqing railway line[J]. **Journal of Railway Engineering Society**, 2006, 92(2): 52—58.
- [6] 张胜, 沈洪波, 王飞. 不同施工工法对既有隧道影响的数值模拟研究[J]. 合肥工业大学学报, 2007, 30(5): 611—616.
ZHANG Sheng, SHEN Hong-bo, WANG Fei. Study on influence of two different construction methods on an existing tunnel by numerical simulation[J]. **Journal of Heifei Uinversity of Technology**, 2007, 30(5): 611—616.
- [7] 李元松, 李新平, 代翼飞, 等. 隧道围岩与衬砌受力特性测试与数值分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(7): 1348—1353.
LI Yuan-song, LI Xin-ping, DAI Yi-fei, et al. Mechanical property testing and numerical calculating on surrounding rock mass and support system of tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(7): 1348—1353.
- [8] 肖明, 叶超, 傅志浩, 等. 地下隧洞开挖和支护的三维数值分析计算[J]. 岩土力学, 2007, 28(12): 2501—2505.
XIAO Ming, YE Chao, FU Zhi-hao, et al. Three-dimensional numerical simulation and analysis of excavation and support in underground tunnel[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(12): 2501—2505.
- [9] 瞿万波, 刘新荣, 傅晏, 等. 洞桩法大断面小净距隧道围岩稳定性数值分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2799—2804.
QU Wan-bo, LIU Xin-rong, FU Yan, et al. Numerical simulation of preliminary lining of large section crossing tunnels constructed with PBA method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2009, 30(9): 2799—2804.
- [10] 王俊杰, 朱俊高, 吴寿昌. 大规模超长群桩基础工作性能的数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, (3): 701—706.
WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao, WU Shou-chang. Numerical simulation on behavior of large-scale overlength pile group foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, (3): 701—706.