

# 车行横洞与隧道主洞交叉段局部失稳数值分析

刘山洪, 陈寅春, 李 刚

(重庆交通大学 土木建筑学院, 重庆 400074)

**摘要:** 以重庆涪陵聚云山隧道车行横洞与主洞交叉段施工出现裂缝为工程背景, 对隧道内结构受力行为复杂的交叉段, 采用数值分析方法建立三维有限元模型, 分析该处结构的变形及应力分布状态。分析结果表明: 地应力和结构应力集中是导致局部开裂并影响交叉段稳定性的两大关键因素, 通过对交叉段实施加固措施可有效地保证结构的稳定性, 同时给出提高交叉段稳定性在设计和施工方面的建议。

**关键词:** 隧道交叉段; 稳定性; 应力集中; 屈服破坏

中图分类号: U453

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2011)02-0217-04

## Numerical Analysis of Local Stability at Intersection Parts of Tunnel

LU Shan-hong CHEN Yin-chun LI Gang

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

**Abstract** A case study was carried out in intersection parts between the main tunnel and the transverse tunnel for truck of Juyunshan Tunnel in Fuling, Chongqing. Distributions of deformation and stresses in these parts caused by complex forces were presented. numerical analysis method with 3D finite element model was employed. The analysis results indicated that earth gravity of tunnel and structural loads were mainly responsible for local cracking and stability of intersection parts. Safety of the structure and stability could be guaranteed by strengthening means in the parts; several proposals of improving the stability of intersection parts both in designing and constructing were presented.

**Key words** intersection parts of tunnel; stability; stress concentration; yield failure

近些年, 经济的发展带动交通事业的不断进步, 为了满足交通需求, 长大隧道修建得越来越多, 鉴于隧道安全及功能的需要而修建的横洞(车行横洞、人行横洞、机房等)与主洞交叉连接, 交叉段临空面大, 力学行为较为复杂<sup>[1]</sup>。隧道洞室内交叉段为三维受力结构, 力学行为复杂; 目前对其研究方法主要是通过数值模型计算<sup>[2]</sup>; 史彦文, 等<sup>[3]</sup>采用数值分析软件对交叉段施工方案研究提出了指导交叉段施工工序有价值的结论; 黄明, 等<sup>[4]</sup>利用有限元分析软件对衬砌开裂段的应力场及位移场进行了模拟, 模拟结果验证了现场成因分析所得结论的正确性; 萧富元, 等<sup>[5]</sup>建立三维模型分析了横洞不同角度交叉对隧道稳定性影响指出交角越小横洞对主洞的影响范围越大。这些研究分析对隧道内交叉段受力机理做出了有价值的探讨, 具有工程实践价值。

重庆涪陵聚云山隧道车行横洞与主洞交叉段施工时初衬出现裂缝, 笔者结合该工程实例, 采用大型有限元软件 ANSYS 模拟自重应力场下隧道交叉段

隧道结构的力学行为, 分析影响隧道内交叉段稳定性的关键因素, 用以指导隧道交叉段设计和施工。

## 1 工程概况

### 1.1 工程背景

聚云山隧道工程为重庆市涪陵区聚云大道道路工程的重要组成部分, 隧道分为左、右两线, 各长约 2 280 m。隧道交叉口段位于苟家场背斜的轴部及两翼地带, 总体呈西陡东缓格局, 隧道该交叉段附近有一断层通过, 断层处上盘上升、下盘下降造成地表有重复现象; 地层较复杂, 在右线施工过程中曾多次出现塌方现象。

### 1.2 治理方案

重庆市涪陵聚云山隧道左线隧道开挖后在进行车行横洞开挖的工程中, 在 2009 年 8 月 25 日交叉段处主洞的初期支护出现了约 3 mm 宽裂缝, 长度范围约 3 m, 高度范围约 2 m, 3d 后裂缝宽度发展到 5 mm, 高度范围约 2.5 m, 经过反复论证, 对此交叉

收稿日期: 2010-12-28 修订日期: 2011-03-02

作者简介: 刘山洪(1968-), 男, 重庆垫江人, 副教授, 博士后, 主要从事桥梁隧道的稳定性分析及智能桥梁研究工作。E-mail: shanghongliu@hotmail.com

©1994-2014 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

段不稳定隐患做出如下处治:

- 1) 对整个车行横洞进行块、片石回填;采用直径 42 mm, 长 350 cm 的小导管进行注水泥浆固结, 小导管布设间距为 1.0 m@ 1.0 m, 梅花型布置, 长度为车行横洞封填长度, 注浆量按 50% 空隙率计, 注浆采用纯水泥浆。
- 2) 施工时短段拆除已被挤压破坏的支护层, 增设 I20B 工字钢支撑, 拱架间采用直径 22 mm 的钢筋连接, 间距 1.0 m。径向锚杆长度增加 3.0 m, 增设直径为 8 mm 的钢筋网, 喷 C25 混凝土, 布置超前注浆小导管, 布置范围同径向锚杆范围, 超前小导管长度 3.0 m, 间距 50 cm, 搭接长度 1.5 m。
- 3) 主洞裂缝段二衬施工完毕后, 再对车行横洞回填片石进行二次开挖, 重新对横洞施做支护与衬砌。
- 4) 在施工横洞时必须采取短拆除、短扩挖、短支护施工方案, 不允许进行爆破施工。

2 交叉段处稳定性分析

2.1 交叉段有限元模型分析

大型有限元软件 ANSYS 它拥有丰富的单元库、材料模型库和求解器, 可以高效地求解各种动静力线性及非线性问题, 在岩土工程模拟计算分析中体现出其非线性计算快速准确的优势<sup>[4]</sup>。

考虑交叉口段影响范围和埋深情况, 该计算模型取隧道主洞方向 50 m, 横向和高度方向各 42 m, 根据围岩性质采用三维实体单元 SOLID 45 模拟岩体和壳单元 SHELL 63 模拟衬砌<sup>[6]</sup>, 加固区以提高该区域的围岩参数模拟加固效果, 按表 1 赋予各个单元相应的材料属性, 选择适合岩土性质的 Drucker-Prager 屈服准则。

表 1 材料参数

Tab 1 Material parameters

材料	弹性模量 / MPa	泊松比	容重 / (N·m <sup>-3</sup> )	黏聚力 / MPa	内摩擦角 / (°)
岩土体 (IV)	2 000	0.35	2 200	0.4	27
加固圈岩土	6 000	0.25	2 300	1.0	40
衬砌	25 000	0.20	2 500	1.5	50

边界条件模拟无限地层岩土边界受力情况, 取前后左右面做水平约束, 底面做竖向约束, 上面为自由面<sup>[7-8]</sup>, 建立有限元模型如图 1、图 2, 计算方法采用非线性迭代方式求解。

提取有限元模型计算后隧道结构的变形结果, 在重力场的作用下, 加固前后的位移云图见图 3、图 4。加固后, 交叉段最大位移分布区域减小很多, 说明加固后横洞变形位移得到控制, 横洞对主洞的影响程度降低。

提取计算后隧道结构有限元模型的第 1 主应力

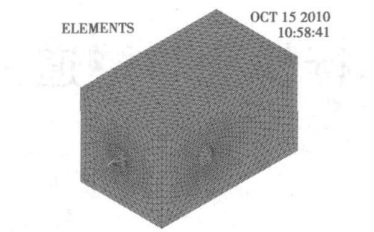


图 1 交叉段三维实体模型  
Fig. 1 Finite element model of the corner

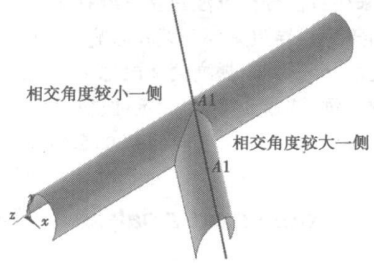


图 2 交叉段三维衬砌模型  
Fig. 2 Finite element model of tunnel 3D lining

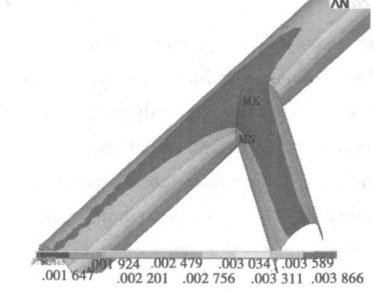


图 3 加固前结构位移云图  
Fig. 3 Displacement nephogram before reinforcement

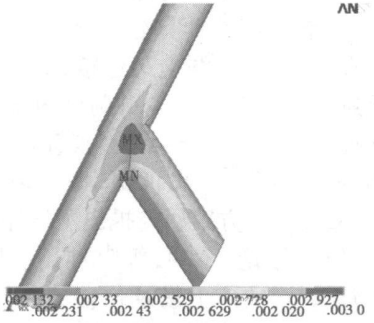


图 4 加固后结构位移云图  
Fig. 4 Displacement nephogram after reinforcement

结果见图 5 和图 6。加固前后衬砌结构第 1 主应力云图分布显示应力较大区域集中在两洞相交角较小一侧, 这与结构变形特点相一致。

由此可见隧道交叉段应力集中现象比较明显, 加固前交叉段的第 1 主应力集中在交叉段的拱顶拉应力达 2.8 MPa, 超出了混凝土的抗拉强度; 交叉段应力集中不仅造成结构大变形, 应力过大使得结构因抗力不足而破坏, 同时岩土作为脆性松散材

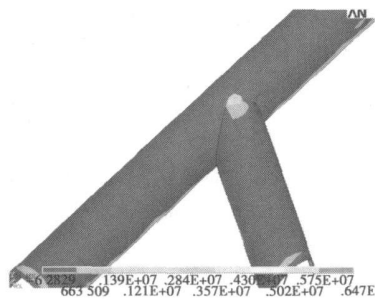


图 5 加固前第 1 主应力云图

Fig. 5 The 1<sup>st</sup> principal stress before reinforcement

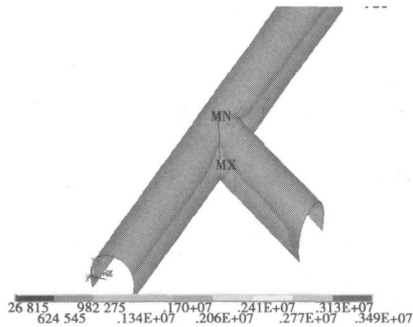


图 6 加固后第 1 主应力云图

Fig. 6 The 1<sup>st</sup> principal stress after reinforcement

料,局部破坏相邻岩石失去支撑受力不平衡而产生掉落,形成“漏砂”破坏<sup>[9-10]</sup>,使得整个结构全部失稳,这种易产生应力集中的结构在地应力附加荷载的作用下应力集中发展更为突出,这说明结构的应力集中是影响隧道交叉段稳定的主要因素。

2.2 交叉段裂缝成因分析

以上述数值计算结论从初始应力场、结构受力特点以及施工因素分析了聚云山隧道内交叉段产生裂缝的原因如下:

- 1) 从地质条件看,此段处于大背斜轴部和断层之间,受构造挤压,围岩软弱、破碎,层面发育。根据模型分析交叉段为空间应力集中结构,当该段结构侧压力较大时,附加侧向地应力增大结构应力集中的程度,削弱了交叉段稳定性能,裂缝是结构开始失稳的一个表现<sup>[11]</sup>。
- 2) 从结构受力看,主洞开挖后,不仅临空面增大,而且截面突变处应力较为集中,一处因应力集中破坏会引起“漏砂”式链式破坏反应,这正是观察到裂缝随时间发展不断增多增长的原因,与模型计算结论相吻合。
- 3) 在施工过程中,主洞已开挖完成部分,在横洞开挖与爆破的影响下,临空面大且应力较为集中的交叉段围岩受多次扰动影响<sup>[12-14]</sup>,多次扰动增加了结构应力重分布的次数和结构变形发展,降低结

构强度导致结构失稳;对于较为破碎的围岩,动力荷载削弱了围岩强度而增加围岩失稳的可能性。

3 提高交叉段稳定性措施

3.1 设计措施

从数值分析结果来看,交叉段处应力集中较为严重,设计时可采用改善线形使得交叉处圆缓平和过渡,有效地减小应力集中造成的初始局部破坏而引起的连锁破坏。

对比加固前后隧道交叉段位移分布云图和主应力分布云图发现,隧道交叉段结构应力集中的现象在加固后有所缓解,但该结构形式决定了此处应力集中现象无法避免,所以应对交叉地段一定范围内实施加强支护或局部补强措施<sup>[15-16]</sup>,如设置钢拱架、锚杆注浆、采用钢筋混凝土衬砌等等,确保应力集中处不会产生局部首先破坏带来的链式破坏效应<sup>[17]</sup>。对比聚云山隧道交叉段加固处理前、后数值模拟计算的拱顶最大位移和第 1 主应力发现加固后拱顶最大位移以及第 1 主应力均有明显降低如表 2。从交叉段位移云图上看,拱顶最大位移发展区域大幅度减小,加强支护或局部补强措施缩小了横洞开挖对主洞的影响范围。

表 2 加固前后位移应力对比

Tab 1 Contrast of displacement and stress before and after reinforcement

项目	拱顶最大位移 /mm	第 1 主应力 /MPa
加固前	3.80	2.8
加固后	1.02	0.5

3.2 施工措施

施工交叉横洞时采取短布距开挖,勤支护,少扰动施工原则,禁止爆破施工或控制爆破施工,尽量保护好围岩的自稳能力<sup>[18-19]</sup>。

由于围岩荷载大小难以确定,隧道变形监控点应布置在两洞相交倒角半径较小的上方区域,即交叉段拱顶最大位移处如图 3 拱架应力测点也应布置在交叉段最外圈拱架上,最外圈拱架受力最大如图 5 根据监测量测数据及时掌握围岩稳定动态,适时调整支护参数,确保了交叉段施工过程中的稳定性能。

4 结 论

笔者采用 ANSYS 有限元软件对重庆涪陵聚云山隧道左线隧道交叉段结构加固前、后进行了数值计算分析,计算结果表明:在地应力和结构局部应力联合作用下导致交叉段初期支护的失稳,所采用的加固方法保障了隧道交叉段的稳定性。通过对隧道交叉段结构受力、现有地应力、施工因素的分析得出

影响交叉段稳定性的因素,为隧道交叉段处的设计优化和施工方案改进提供理论参考。

1)交叉段结构形式上临空面大,应力集中现象明显是交叉段结构受力不利的自身属性,故而须在交叉段设计时加强支护的同时对交叉段线性做圆缓平和过渡以减小因应力集中而产生破坏的可能性;同时对交叉段应力集中区域实施局部补强措施可对其安全稳定性起到较好的效果。

2)现有地应力决定了交叉段所处的受力环境,处于大背斜轴部和断层之间的交叉段受构造挤压,受力情况更为不利,施工时应针对不同地应力造成的不利受力情况做出超前支护。

3)隧道内交叉段施工时,特别是破碎围岩,该处围岩先受主洞施工扰动,横洞的开挖时再次扰动该处围岩,引起围岩应力重新分布,破坏围岩的自稳能力,失去稳定的围岩成为支护结构荷载,故该段施工时应采取短布距,勤支护,少扰动的施工原则,禁止爆破施工或控制爆破施工,最大限度的降低对围岩的自稳能力的破坏。

#### 参考文献 (References):

- [1] 孙钧. 地下结构有限元法解析 [M]. 上海: 同济大学出版社, 1988: 5-6
- [2] 于学馥. 地下工程围岩稳定分析 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1983: 12-15.
- [3] 史彦文, 曹校勇, 韩常领, 等. 大断面公路隧道主洞与车行横洞交叉口数值模拟分析 [J]. 中外公路, 2009, 29(4): 405-409.  
SHI Yan-wen CAO Xiao-yong HAN Chang-ling et al. Numerical simulation of large sections highway tunnel bored holes and garage horizontal hole intersection [J]. Sino-foreign Highway, 2009, 4, 405-409
- [4] 黄明, 刘新荣, 杨武忠, 等. 深埋长大隧道交叉段衬砌裂缝成因分析与处治 [J]. 工程勘察, 2009(6): 45-61  
HUANG Ming LIU Xin-rong YANG Wu-zhong et al. Causes analysis and treatment for the lining crack of crossing section in a deep buried large tunnel [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009 (6): 45-61.
- [5] 萧富元, 俞旗文, 陈锦清, 等. 斜交角度对隧道交叉段安定及力学行为影响 [C]. 台北: 十一届台湾岩土工程会议, 2005 (1-06): 1-8.
- [6] 游步上. 隧道交叉段之三维变形量测与参数分析 [D]. 台北: 台湾科技大学, 1999: 123-125.
- [7] 关宝树, 园兆林, 王梦恕, 等. 隧道及地下工程 [M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2000: 135-146
- [8] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1998: 11-15
- [9] Deeks A J Randolph M F. Axisymmetric time-domain transmitting boundaries [J]. Journal of Engineering Mechanics, 1994, 120 (1): 25-42.
- [10] Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3D Version 2.10 Users Manual [M]. FLAC 3D. USA: Itasca Consulting Group Inc., 2002.
- [11] 邓治纲, 张庆贺, 吴敏慧, 等. 大型地铁十字换乘车站施工阶段变形预测 [J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 6(20): 2929-2936.  
DENG Zhi-gang ZHANG Qing-he WU Min-hui et al. Large subway cross the interchange station construction stage deformation forecast [J]. Rock Mechanics and Engineering Journal, 2006, 6(20): 2929-2936.
- [12] 顾承宇, 陈锦清, 高宪章. 山岳隧道交叉段三维力学行为研究 [C] / 海峡两岸地工技术岩土工程交流研讨会. 北京: 中国建筑业协会, 2004: 353-360.
- [13] 游步上. 隧道交叉段之三维变形量测与数值分析 [J]. 中国土木水利工程学刊, 2002, 14 (3): 419-428  
YOU Bu-shang. Tunnel cross-section of three-dimensional deformation measurement and numerical analysis [J]. China Civil Engineering, 2002, 14, (3): 419-428
- [14] 靳晓光. 深埋交叉隧道动态施工力学行为研究 [J]. 重庆建筑大学学报, 2008, 30(2): 26-31  
GE Xiao-guang. Dynamic construction mechanical behavior of a deeply-buried intersection tunnel [J]. Chongqing Construction University Journal, 2008, 30(2): 26-31.
- [15] Bieniawski Z T. Determining rock mass deformability: experience from case histories [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, 1978, 15: 237-248.
- [16] Hoek E, Carlos C T, Brent C. Hoek-Brown failure criterion for Lab 1.0 user manual [M]. Vancouver, Canada: [s.n.], 2002: 15-19.
- [17] Thareja D V R, Natarajan Madhavan K. Structure analysis and design of bifurcating tunnels [J]. Water Power & Dam Construction, 1980, 32: 42-46
- [18] 严松宏. 南京地铁区间交叉隧道空间弹塑性分析 [C] / 中国土木工程学会隧道及地下工程分会第十二届年会. 成都: 中铁西南科学研究院, 2002: 223-229
- [19] 王伟, 杨转运, 易丽, 等. 浅埋偏压隧道口的软弱围岩综合加固处治研究 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 29(5): 697-699  
WANG Wei YANG Zhuan-yun YI Li et al. Comprehensive strengthening treatment of soft surrounding rocks at shallow and unsymmetrical loading tunnel entrance [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2010 (5): 697-699