

文章编号: 1000-7598(2009)11-3481-05

浅埋偏压隧道洞口坍方数值分析与处治

汪宏¹, 蒋超^{1,2}

(1. 江苏科技大学 航海学院, 江苏 镇江 212003; 2. 长沙市规划设计院有限责任公司 建一部, 长沙 410007)

摘要: 某公路隧道在进洞时出现坍方。针对该隧道工程的实际情况, 建立数值分析模型, 采用 ANSYS 程序模拟隧道施工力学行为, 从围岩塑性区分布、位移以及锚杆和混凝土衬砌内力分布情况分析隧道变形和坍塌发生的原因。结果表明: 隧道浅埋偏压、围岩力学性质差及施工支护不当导致坍方。结合工程实际提出洞内加固、地表注浆加固及开挖控制的综合处治方法, 取得了理想的效果, 为日后类似工程提供借鉴与参考。

关键词: 浅埋隧道; 偏压; 坍方; 数值分析

中图分类号: U 45

文献标识码: A

Numerical analysis of a collapsed portal for shallow tunnel under asymmetrical pressure and its treatment

WANG Hong¹, JIANG Chao^{1,2}

(1. Institute of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China, 2. Department 1 of Architectural Design, Changsha Planning and Design Institute Co., Ltd., Changsha 410007, China)

Abstract: During construction of the portal for a tunnel, collapse accident occurred. According to the field geological and construction conditions, the numerical model is set up; and the commercial software ANSYS is adopted to simulate the behaviors of the tunnel and surrounding rock. Based on the results of plastic zones in surrounding rocks, deformations in rock and lining, and the inner forces within rock bolts and reinforced concrete lining, the deformation of the tunnel and the causes of tunnel collapse are analyzed. The results show that: shallow tunnel bias, poor mechanical properties of rock and construction support landslides resulting from collapse. The comprehensive remedy measures consisting of reinforcement inside, surface grouting reinforcement and excavation control are proposed. Good results are achieved so as to offer reference for the future similar projects.

Key words: shallow tunnel; asymmetrical pressure; collapse; numerical analysis

1 引言

隧道坍方是隧道施工中较为常见的一种事故, 不仅会延误工期、提高工程造价, 甚至会造成人身伤害。如果处治不当, 还可能影响后续施工, 遗留工程质量隐患。因此, 分析隧道坍方的机制, 采取有效措施进行处治是隧道设计和施工中面临的重要课题。

对于浅埋偏压隧道坍塌的分析和处置, 国内外工程实例分析较多^[1-3], 但从理论上讨论坍塌的机制并提出处置措施的尚为少见, 而对于隧道围岩一半为土体, 一半为岩体的研究, 更是少之又少。为有效处理该隧道进洞施工坍方, 本文根据现场具体情况, 建立数值分析模型, 采用 ANSYS 程序的单

元生死功能, 模拟隧道施工力学行为, 讨论在半岩半土围岩、浅埋偏压隧道坍塌的机制, 通过数值分析提出处治措施, 保证隧道施工的正常进行。

2 工程概况

国道 209 线通道至青龙界公路改建工程通道隧道, 起讫桩号为 K1+680~K1+940, 全长 260 m, 属短隧道。隧道平面桥头端位于直线上, 独峰端位于 $R=250\text{ m}$ 、 $A=56.1^\circ$ 的曲线内。隧道纵面位于 3% 的下坡段, 独峰端 153 m 位于半径为 4 200 m 的凸型竖曲线中。

2.1 地质情况

址区地貌为山岭重丘, 隧道通过处地形较为陡峻, 地面自然坡度为 $40^\circ\sim 50^\circ$, 山坡植被十分发育,

收稿日期: 2008-07-24

基金项目: 江苏省教委自然科学基金项目 (No. 2006CH103J)。

第一作者简介: 汪宏, 男, 1960 年生, 学士, 副教授, 教研室主任, 主要从事港航和海洋结构工程。E-mail: wh2900@163.com

灌木、杂草丛生。通道隧道桥头端洞口段地质为风化板岩及亚黏土层，亚黏土层厚为 1.5~5.3 m，全风化板厚为 2.3~4.0 m，强风化板岩厚为 2.9~13.6 m，弱风化板岩层厚较大，岩质较硬，节理裂隙较发育。

2.2 设计情况

本隧道为双向两车道二级公路隧道，路线设计行车速度为 40 km/h，主洞建筑限界按 60 km/h 行车速度预留，建筑限界净宽 10.0 m、净高 5.0 m，隧道内轮廓采用单心圆形式。行车道（含侧向宽度）宽 8.0 m，人行道宽 1.0 m。

隧道桥头端洞口段原支护设计作为 IV 级围岩进行设计，采用 $\phi 22$ mm 格栅拱架（间距 100 cm）、 $\phi 8$ mm 钢筋网（间距 20 cm $\times$ 20 cm，单层）、22 cm 厚喷射混凝土进行初期支护。边仰坡采用锚杆加喷射混凝土防护。

2.3 施工情况

施工组织设计要求在隧道的洞口段采用台阶法分部开挖，施工前先做好排水、导水、防水系统，初期支护采用喷铺支护+格栅拱+钢筋网的联合支护形式。二次衬砌采用液压衬砌台车，全断面一次施工。装碴运输采用无轨运输。

3 坍方情况

2007 年 8 月 2 日，在桥头端洞口施工完第 1 榀格栅拱架及第 1 循环的超前小导管后进行开挖，炮眼深 0.5 m，距离超前小导管 0.4 m 左右。爆破后 2 h 左右洞口拱部出现局部坍塌，坍塌面高为 5 m、长为 4 m、宽为 6 m 左右，如图 1、2 所示。

4 坍方原因分析

通过设计、施工、监理等各方在现场进行察看和分析后，认为造成本次大规模坍方的原因有以下几点：



图 1 桥头端洞口坍塌

Fig.1 Collapsed hole of qiaotou end



图 2 坍塌掉下的钢筋网

Fig.2 Reinforced network of collapse

(1) 该隧道桥头端洞口段围岩非常破碎，岩性为全、强风化板岩，节理裂隙十分发育且有裂隙水，裂隙间形成软弱夹层。从洞内的坍体表面观察，约 80 % 的坍体已完全风化成砂黏土，其粒径小于 3.0 mm，其余为孤石，最大直径为 0.5 m 左右，这样的松散结构，其结合力主要依赖砂粒之间的摩擦力，开挖后不能自稳，极易发生坍方。

(2) 地下水丰富。在开挖过程中，就经常出现大量的渗漏水，特别是风化板岩这样的松散结构遇水后，其自稳时间几乎为 0。

(3) 原设计支护形式不能满足安全和质量要求。

4.1 数值模型建立

考虑隧道坍方范围较大，数值计算采用平面应变模型，选取通道隧道桥头端洞口典型断面进行分析。在该断面上，隧道位于山体一侧，左低右高，隧道左侧围岩为砂土及全风化板岩，右侧围岩为弱风化板岩，围岩表现出明显的浅埋偏压特性。利用 ANSYS 中的单元生死功能，按照实际工程开挖与支护情况进行模拟分析，洞口开挖后的网格划分情况如图 3 所示。

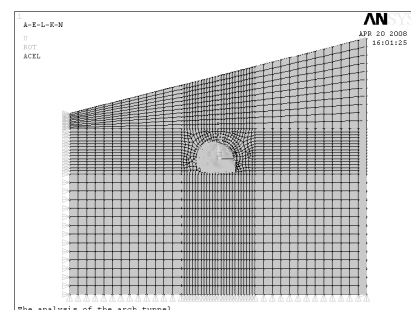


图 3 数值计算模型

Fig.3 Numerical model

计算模型的水平方向长度取为 100 m，垂直方向从隧道拱圈中心向下取 45 m 的范围，向上一直到顶部模拟地表轮廓线。隧道拱圈中心向下 5 m，向上到顶部，以衬砌中心线为界，左上部分围岩为

土体, 其余围岩部分为岩体。模型的边界采用位移约束条件, 边界条件为: 底部采用位移边界条件, 即水平和垂直方向的位移均约束, 侧面仅水平方向位移约束, 顶部模拟真实地表状况不加约束条件。

在二维平面应变分析模型中, 隧道围岩使用 D-P 材料, 采用弹塑性本构模型以及 Drucker-Prager 屈服准则^[4]进行非线性静力分析, 用 Beam3 单元模拟喷射混凝土和钢拱架, 用 Plane42 单元模拟围岩, 采用 Link1 单元模拟锚杆^[6]。围岩、锚杆和混凝土衬砌具体几何参数为实际设计和施工的数值, 其物理力学指标取值见表 1^[7]。

表 1 材料特性参数

Table 1 Properties of materials

材料类型	E /Pa	ρ /(g/m ³)	ν	φ /(°)	c /Pa	ϕ /mm
岩体	1.5×10^9	2.2	0.4	28	0.16×10^6	
土体	2.5×10^8	2.0	0.32	32.5	0.2×10^6	
混凝土	28.5×10^9	2.5	0.2			
钢材	1.7×10^{11}	8.0	0.3			25

注: E 为弹性模量; ρ 为密度; ν 为泊松比; φ 为内摩擦角; c 为凝聚力; ϕ 为锚杆直径; 锚杆长度取 3 m。

数值模拟分两步进行, 首先对模型施加重力加速度, 生成初始地应力场; 然后模拟隧道开挖并及时进行支护, 释放 100 % 的初始地应力, 分析隧道开挖荷载释放后围岩应力、应变以及破坏特征, 进而分析坍塌的原因。

4.2 数值计算结果分析

通过数值分析可以得出隧道围岩和支护结构应力场与位移场、塑性区分布等, 利用这些结果可评价围岩和结构的稳定性^[8]。

下面主要从 3 个方面进行讨论分析:

- (1) 应力分布情况, 包括围岩塑性区及最大、最小主应力分布。
- (2) 位移分布情况, 包括垂直位移、水平方向位移。
- (3) 锚杆和混凝土衬砌内力分布, 包括锚杆轴力分布、衬砌轴力和弯矩等。

图 4 是洞口施工完成时围岩平均应力分布云图。可以看出, 洞室两侧的围岩压力分布呈不对称分布, 岩体与土体交界处突变明显, 右边岩体部分应力较大, 左边土体部分应力较小, 表现出明显的偏压。

该隧道为浅埋偏压隧道, 主要承受上覆土层重量产生的自重压力, 而隧道左侧上覆盖层较薄, 右侧相对较厚。在这种情况下, 一般隧道左侧受力比右侧小, 垂直位移较大的一块集中在隧道顶部右侧,

同时隧道围岩左侧为土体, 右侧为岩体。因此, 从图 5~6 可以看出, 水平位移最大出现在隧道右侧的腰部及拱脚处, 垂直位移右侧比左侧稍大, 垂直负向(向下)位移较大的一块集中在隧道顶部偏右侧, 这个结果与实际发生坍塌的位置一致。

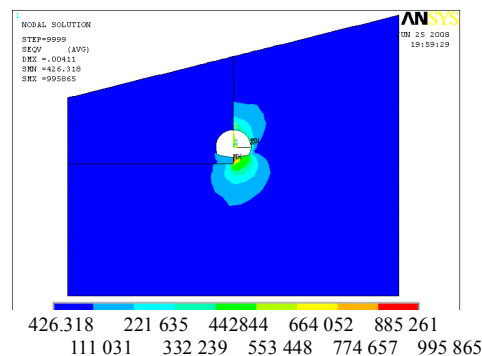


图 4 应力分布图 (单位: Pa)

Fig.4 Distribution of stress (unit: Pa)

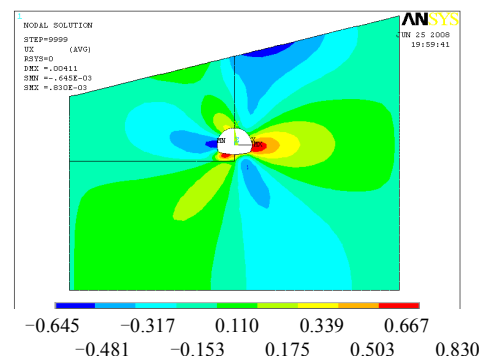
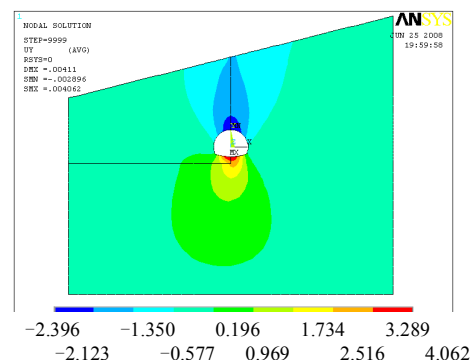
图 5 水平方向位移分布图 (单位: 10^{-3} m)Fig.5 Distribution of horizontal displacements (unit: 10^{-3} m)图 6 垂直方向位移分布图 (单位: 10^{-3} m)Fig.6 Distribution of vertical displacements (unit: 10^{-3} m)

图 7 和图 8 反映了锚杆轴应变及轴力分布状况。由图可知, 不同部位的锚杆受力是不同的, 拱顶部位的锚杆受力较大, 其中拱顶右侧锚杆受力最大。从整体看, 右侧锚杆的轴力大小要大于左侧锚杆,

由此也反映出隧道存在偏压现象使得两侧锚杆受力大小不同。

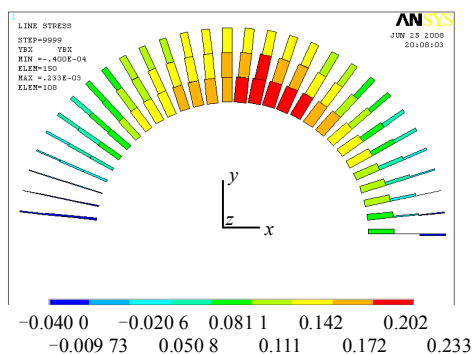


图7 锚杆轴应变分布图 (单位: 10^{-3} m)

Fig.7 Distribution of axial strain of cables (unit: 10^{-3} m)

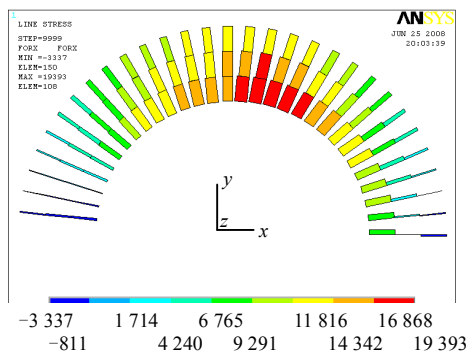


图8 锚杆轴力分布图 (单位: N)

Fig.8 Distribution of axial forces of cables (unit: N)

从图9和图10混凝土衬砌的内力图可知,衬砌的轴力分布较均匀,顶部和底部较大,而衬砌的弯矩分布为拱顶小,两侧靠近拱脚的部分较大,且弯矩的最大值出现在右侧拱脚处。

5 处理措施的分析

根据以上分析,探究了坍方原因,为坍方处理提供了基本思路和相应的判据。综合相关规范^[9],参照数值分析结果提出更加合理的处治方案,保证浅埋偏压隧道施工的安全,提高隧道结构的安全性,特别是提高岩体部分围岩的稳定性。对于该隧道坍方的处理,由以上分析计算,采用洞内加固和地表注浆加固的综合处置措施,这些措施主要包括:

(1) 将暗洞出口(桥头端)10 m范围内加强复合衬砌,特别加强岩体部分围岩的衬砌强度,有关参数相应调整,其他段根据实际地质情况另行确定。

(2) 采用单排超前小导管 $\phi 42 \times 2.5$ mm。土体部分间距为0.4 m,长为4.0 m,排距为0.5 m;岩体部分间距为0.4 m,长为4.5 m,排距为0.5 m。拱部 126° 范围内呈梅花型布置,保证搭接长度不小于

1.5 m,超前小导管与钢支撑(钢格栅)必须焊接。

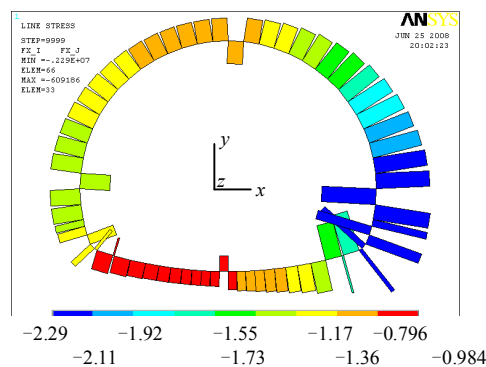


图9 支护轴力图 (单位: 10^6 N)

Fig.9 Distribution of axial forces of shoring (unit: 10^6 N)

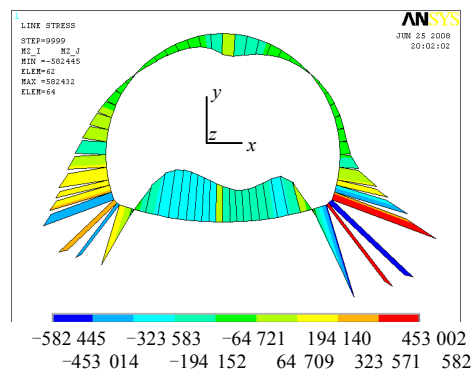


图10 支护弯矩图 (单位: $N \cdot m$)

Fig.10 Distribution of moment of shoring (unit: $N \cdot m$)

(3) 设立I18工字钢拱架,间距为0.5 m,拱脚以上设单层 $\phi 8$ mm钢筋网(20×20 cm),以加强喷射混凝土刚度;坍方段坡面采用 $\phi 22$ mm砂浆锚杆,间距1 m,土体部分长4 m,岩体部分长4.5 m,梅花型布置;设单层 $\phi 8$ mm钢筋网(20×20 cm),C20喷射混凝土支护,厚度为10 cm。

(4) 安设注浆导管,采用节长3、6 m的 $\phi 108 \times 6$ mm热轧无缝钢管,环向间距为50 cm,丝扣连接,循环注浆,每次注浆长度为4.0 m,分3次完成,注浆厚度应保证洞内坍体以及设计拱顶标高以上3.0 m的松散体全部固结,注浆按水泥用量及注浆压力双控方法,注浆压力为1.0~1.5 MPa,要求固结强度达到2.0~3.0 MPa。施工效果如图11所示。

其中,坍方段的开挖及支护包括以下措施:

(1) 先施作超前支护,采用 $\phi 42$ mm的小导管预注浆,长为4.0 m,间距为0.4 m。

(2) 采用弧形导坑预留核心土法开挖,先开挖岩体一侧,完成初期支护后再开挖另一侧。开挖高度为1.5~2.0 m,开挖长度为每一循环1.0 m,开挖后立即进行喷锚支护,并安设格栅拱架。具体参数

为: 锚杆 $\phi 22$ mm, 长为 3.5 m, 岩体一侧喷射混凝土厚 25 cm, 其他部分喷射混凝土厚为 22 cm, 分 2~3 次完成, 格栅拱间距为 0.8 m, 格栅拱之间采用 $\phi 22$ mm 的钢筋纵向连接, 格栅拱的底部采用 $\phi 22$ mm 的槽钢纵向连接。

(3) 弧形导坑完成后, 采用挖马口的方法, 分别开挖左、右两侧边墙; 边墙开挖后, 立即进行喷锚支护并将格栅拱顺接下来, 形成整体。

(4) 边墙开挖完成后、最后开挖核心土。

通道隧道桥头端坍方处理历时近两个月, 因处治方案选择合理, 对坍段进行处理后, 该段没有发生开裂、下沉等不良现象。该处理不仅保证了顺利安全的进洞, 也节约了成本, 同时为后续顺利施工提供了条件。



(a) K1+920 段长 4.5 m 岩体部分超前小导管



(b) K1+920 段 I18 工字钢



(c) K1+920 段 $\phi 8$ mm 钢筋网



(d) K1+920 段中空锚杆

图 11 洞口坍方处理效果图

Fig.11 Hole landslide treatement drings

6 结 论

(1) 根据分析, 隧道浅埋偏压, 且围岩部分为

土体, 部分为强风化甚至全风化岩石, 围岩力学性质极差, 隧道开挖后产生较大的塑性区且与地表相连通, 围岩变形较大; 施工支护不及时或者支护强度不足, 使围岩产生一定的应力释放、围岩和支护结构产生过大的变形, 导致坍方事故的发生。

(2) 数值分析结果表明, 水平位移最大出现在隧道右侧的腰部及拱脚处, 垂直位移右侧比左侧稍大, 垂直负向(向下)位移较大的一块集中在隧道顶部偏右侧。这个结果与实际施工时发生坍塌的位置一致。右侧锚杆的轴力大小要大于左侧锚杆, 由此也反映出隧道存在偏压现象使得两侧锚杆受力大小不同。

(3) 针对该隧道的实际情况, 结合数值分析结果, 考虑半岩半土围岩的特殊性, 提出洞内加固、地表注浆加固以及开挖控制的综合处置措施, 对土体部分和岩体部分分别采用不同的加固措施, 取得了理想的效果。研究结果对同类隧道的设计和施工具有参考和借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 李锦平, 黄武来. 浅埋隧道通顶坍塌整治与思考[J]. 中国铁路, 1996, (7): 49—51.
- [2] 冯秀国. 采用地表注浆方法使隧道穿越坍塌区[J]. 铁道建筑, 1998, (2): 28—30.
- [3] DAY M J. Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnels[J]. *Environmental Geology*, 2003, 45(6): 859—863.
- [4] 宋玉香, 景诗庭, 朱永全. 隧道结构系统可靠度研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 780—784.
SONG Yu-xiang, JING Shi-ting, ZHU Yong-quan. Research on reliability of tunnel structural system[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 780—784.
- [5] 褚卫江, 苏静波, 徐卫亚. 基于一致性理论的 Drucker-Prager 材料弹黏塑本构模型[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 811—816.
CHU Wei-jiang, SU Jing-bo, XU Wei-ya. An elasto-viscoplastics model for Drucker-Prager material based on consistency theory[J]. *Rock nd Soil Mechanics*, 2008, 29(3): 811—816.
- [6] Itasca Consulting Group Inc. FLAC 2D, Fast Lagrangian analysis of continua, version 4.00, user's manual[R]. USA: Itasca Consulting Group, Inc., 2002.
- [7] 中华人民共和国交通部. JTG D70—2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [8] 李志勇, 晏莉, 阳军生. 浅埋偏压连拱隧道中导洞坍方数值分析与处治[J]. 岩土力学, 2007, 28(1): 102—106.
LI Zhi-yong, YAN Li, YANG Jun-sheng. Numerical analysis and treatment of a collapsed middle drift for shallow multi-arch tunnel under unsymmetrical pressure[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(1): 102—106.
- [9] 中华人民共和国交通部. JTJ024—94 公路隧道施工技术规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 1994.