

文章编号: 1000-7598 (2009) 05-1399-05

路堑边坡开挖对邻近既有隧道影响研究

赵东平¹, 王明年², 贾玲利³

(1. 中国中铁二院工程集团有限责任公司, 610031; 2. 西南交通大学 土木工程学院, 610031; 3. 西南交通大学 建筑工程学院, 610031)

摘 要: 设计中的承德迎宾大道路堑边坡邻近既有京承铁路 21 号隧道, 边坡开挖后会对既有隧道产生不利影响。根据现场试验取得的围岩及隧道衬砌的力学参数, 对边坡开挖进行了静力学和动力学数值分析, 研究了路堑边坡可开挖的最大范围及爆破振动对隧道的影响。结果表明: 当路堑二级边坡坡脚距离隧道中心线距离大于等于 30 m 时, 边坡开挖后隧道衬砌内力虽有增加, 但仍可保证结构安全。进行边坡爆破开挖时, 如考虑 3 倍的安全系数, 当京承铁路 21 号隧道衬砌振速小于 1.5 cm/s 时, 隧道衬砌内产生的动拉应力小于衬砌极限抗拉强度, 可按此控制指标进行现场监测。

关 键 词: 路堑边坡; 邻近; 既有隧道; 静力学; 动力学

中图分类号: U 451

文献标识码: A

Research on influence of excavating road trench slope on adjacent existing tunnel

ZHAO Dong-ping¹, WANG Ming-nian², JIA Ling-li³

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. School of Architecture, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The Yingbin Avenue trench slope being designed is adjacent to the existing Jingcheng railway 21th tunnel, the tunnel will suffer a bad affection when the slope be excavated. A numerical analysis of statics and dynamics according to the rock and lining parameters from the field test has been undertaken. This paper studies the maximum extension of slope which can be excavated and the influence of tunnel on slope blasting vibration. The result indicates while the distance between the base of second slope and tunnel center line is larger than 30 m, the inner force of tunnel lining will increase but the structure still in safety state when the second slope be excavated; and when we excavate the slope by blasting method, if we consider a triple safety factor, and while the vibration velocity is smaller than 1.5 cm/s, the dynamic tension stress of the 21th tunnel lining is smaller than its ultimate value; and therefore we can undertake field monitoring by the reference control vibration velocity.

Key words: road trench slope; adjacent; statics; dynamics

1 引 言

随着我国社会经济的发展, 基础设施的建设力度逐年加大。由于地质、地形因素的制约, 一些新建基础设施与原有铁路隧道距离较近, 如在傍山隧道处修建水库、公路等基础设施^[1-2], 这些新旧结构物之间的距离较小, 新设施的修建必定会对既有隧道产生不利影响。因此, 在新设施修建之初, 设计方案中要考虑的首要问题是如何保证修建期间及后期既有隧道结构安全, 从而达到新设施的修建与既有铁路隧道安全运营的双赢目标。以往的研究多为静力学研究^[3-4], 而岩质边坡开挖往往采用爆破

施工方法, 因此, 分析既有隧道结构在爆破荷载作用下的动力响应是必要的。本文依托设计中的河北承德迎宾大道工程, 从静力学及动力学角度, 研究了路堑边坡开挖对隧道结构的影响。

2 工程概况

承德市迎宾大道位于承德市区南部, 是京承高速公路进入承德市区的城市主干道。在 K0+230 处路幅变窄, 因左侧是河流, 为保证迎宾大道路幅宽度, 需要挖除公路东侧一部分山体, 而目前承担着繁重运输任务的京承铁路 21 号隧道在此山体内穿过, 原有山体坡脚距离既有京承铁路 21 号隧道中线

收稿日期: 2007-09-12

第一作者简介: 赵东平, 男, 1979 年生, 博士研究生, 工程师, 主要从事地下工程理论与计算方面的研究。E-mail: dpingzhao@163.com

约 50 m。

京承铁路隧道至今已经使用了 70 多年。隧道全长 188.32 m。承德方向位于半径为 400 m 的曲线上，洞内坡度为 2.5 ‰；北京方向位于直线上，洞内坡度为 5.7 ‰。隧道断面为马蹄形，衬砌为变截面，厚度从拱顶 0.4 m 增大至墙脚 0.73 m。

由于公路路堑和既有铁路隧道距离较近，路堑开挖必然改变隧道周边围岩的应力状态。为了确保路堑开挖后铁路隧道的安全，同时为路堑设计提供依据，需要研究山体开挖的范围。此外，当进行边坡爆破开挖时，需要对铁路隧道进行现场监测，确定监测控制指标。为此，针对工程的具体情况进行了静力学和动力学分析。

3 路堑边坡开挖对隧道的影响

由于路堑边坡开挖以后会对既有隧道产生不利影响，为减小其影响程度，对路堑可开挖的范围进行了研究。如图 1 所示，预设了 4 种路堑边坡位置，根据现场实测围岩参数，从静力学角度计算分析了边坡开挖对既有隧道产生的影响。

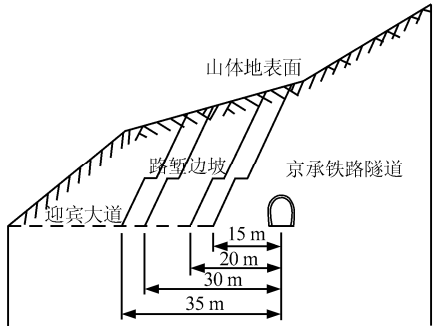


图 1 迎宾大道边坡与京承铁路隧道位置关系
Fig.1 The position relation between Jingcheng Railway tunnel and slope of Yingbin Avenue

3.1 有限元模型及参数

由于隧道运营年久，因此，对隧道衬砌混凝土进行了强度检测，同时对围岩进行取样。根据现场实测结果，确定有限元分析参数如表 1 所示，有限元模型如图 2 所示。

表 1 有限元分析参数
Table 1 Analysis parameters of FEM

材料	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	黏聚力 c / kPa	内摩擦角 $\varphi / (^{\circ})$	密度 $\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$
III级围岩	1.3	0.3	3.27	32.5	2.4
隧道衬砌	29.5	0.2			2.5

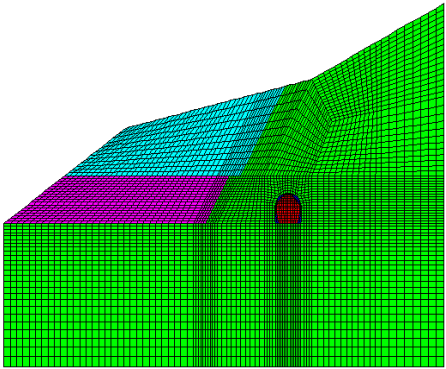


图 2 有限元计算模型
Fig.2 The model of FEM

3.2 计算工况

为了分析不同距离的边坡开挖前后衬砌主应力的变化情况，根据图 1 计算了 5 种工况，如表 2 所示。

表 2 计算工况
Table 2 The cases of calculation

参数	工况编号				
	1	2	3	4	5
二级边坡坡脚距离 隧道中线的距离/m	自重应力场	35	30	20	15

3.3 计算结果及分析

各个工况下当 1、2 级边坡开挖后隧道衬砌第 1 和第 3 主应力最大值如表 3 所示。

表 3 隧道衬砌主应力最大值
Table 3 The maximum principal stresses of tunnel lining

工况编号	1 级边坡开挖		2 级边坡开挖	
	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa	σ_1 / MPa	σ_3 / MPa
1	0.29	-3.68		
2	0.31	-4.65	0.30	-5.21
3	0.30	-5.73	0.88	-7.23
4	0.32	-6.23	2.76	-13.46
5	0.34	-7.50	5.65	-15.02

京承铁路 21 号隧道衬砌使用的是 C25 混凝土，根据现场取样试验可知，该标号混凝土当前抗压及抗拉极限强度分别为 24.8 MPa 和 1.95 MPa。由计算结果可知，当路堑边坡开挖后隧道衬砌主应力随着边坡与隧道之间的距离减小而增大。当承德迎宾大道路堑 2 级边坡坡脚与隧道中心线距离小于 30 m 时，边坡开挖将导致隧道衬砌主应力明显增大，且个别位置已经超过衬砌极限抗拉强度。由此确定，路堑可开挖的最大范围应使 2 级边坡坡脚距离隧道中心线不小于 30 m，即工况 2 或工况 3 是可选择方案。

4 爆破振动对隧道的影响

爆破振动对衬砌的影响可以从衬砌的动应力及关键点振速值来分析。当衬砌动应力达到其极限抗拉强度时,结构会产生破坏。因此,动应力是一个重要控制参数。但由于动应力在现场不便于量测,因此,可以通过分析衬砌最大动应力值和对应的关键点最大振速值之间的关系,来求得衬砌极限应力值对应的最大振速值时,以此最大振速作为现场监控指标。

4.1 爆破方案

由于边坡岩石较硬(Ⅲ级围岩),经论证后决定采用控制爆破对边坡进行分层开挖,分层高度不超过4 m,炮孔深度为3~4 m。采用等微差起爆网路,形成逐孔依次波浪式起爆,使岩石松动开裂而不飞散,滑塌而不抛掷,以尽可能地减小爆破对隧道的影响。

4.2 边坡参数

根据2.3节的分析结果,选取2级边坡坡脚距离隧道中心线30 m进行边坡设计,具体如图3所示。采用控制爆破时炮孔布置,爆破分层高度取4 m。

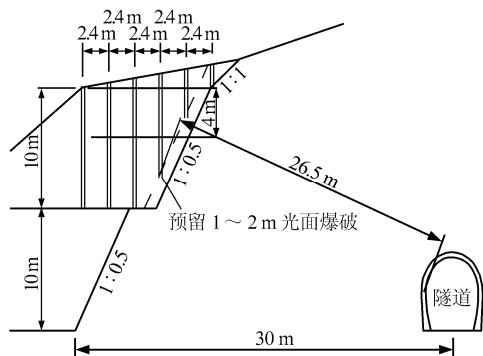


图3 边坡爆破炮孔布置图

Fig.3 The hole layout drawing of the slope

4.3 爆破荷载

采用有限元法分析爆破振动影响的一个关键工作是爆破加载模型,这包含确定爆破激振力的大小、作用位置和方向、到来时刻和持续时间等方面的内容。本次计算假定如下:

(1) 爆破荷载以压力形式均布作用在坡面上,方向垂直于坡面。

(2) 根据计算和爆破的实际情况,将荷载曲线简化为三角形波,如图4所示。

(3) 冲击荷载典型曲线 本次分析取加载时间为10 ms,卸载时间为70 ms。

作用在结构上的爆破荷载可简化为具有线性上升段和下降段的三角形荷载^[5-7]。根据经验公式,爆破荷载的应力峰值 $P_{\max}$ 采用如下公式^[8-10]计算:

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2154}{Z^3} - 0.8034 \text{ kPa} \quad (1)$$

式中: Z 为比例距离^[8], $Z = R/Q^{1/3}$; R 为炮眼至荷载作用面的距离(m); Q 为单孔炮眼装药量(kg)。

爆破荷载-时间历程曲线见图4,图中 $P_{\max}$ 根据计算工况选取,不同工况下的具体数值见表4。

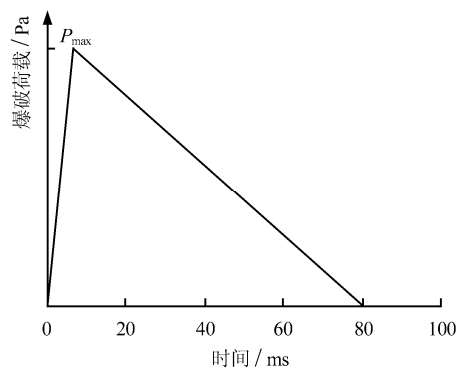


图4 边坡爆破荷载历程曲线

Fig.4 The time-history curve of blasting loads

表4 各工况爆破荷载峰值及计算时间
Table 4 The maximum values of blast loads and calculation time for different cases

计算工况编号	$P_{\max} / 10^7 \text{ Pa}$	计算时间/s
1-1	1.25	2.0
2	6.77	1.0
3	8.91	1.0
4	8.41	1.0
5	10.00	1.0
6	25.10	1.0

4.4 阻尼及边界条件

为了模拟动力学能量的发散问题,同时减小计算代价,采用FLAC^{3D}进行动力分析时,在边界采用了吸收边界条件^[11],该边界条件可以用APPLY命令和适当的关键词施加于有限元边界面上。本次计算采用比较通用的瑞利(Rayleigh)阻尼,体系的阻尼矩阵为质量矩阵和刚度矩阵的线性组合,如下:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

式中: α 、 β 均为常数,可按下式确定:

$$\alpha = \xi\omega_1, \quad \beta = \xi/\omega_1 \quad (3)$$

式中: ω_1 为基频, 采用 ANSYS 软件由模态分析求出 ($\omega_1 = 3 \text{ Hz}$); ξ 为阻尼比。 ξ 的值与结构类型、材料性质和荷载波形有关。根据文献[12], 取 $\xi = 0.01$ 。

4.5 计算工况

本次共进行了 6 种工况的动力计算, 各工况边坡爆破荷载最大值及计算时间取值如表 4 所示。

4.6 计算结果分析

对以上 6 种工况进行计算, 分析结果表明: 爆破振动引起隧道衬砌动应力变化, 主要受动拉应力控制, 位置均在隧道迎爆侧内侧; 动压应力与衬砌混凝土极限压应力相比相对较小, 不受控制。为此, 以动拉应力为主进行分析。

将爆破振动引起隧道衬砌最大动拉应力和相应点的最大振动速度列于表 5, 并绘于图 5。

表 5 各工况最大振速及第一主应力最大值
Table 5 The maximum velocity and first principal stresses for different cases

计算工况编号	最大拉应力 / MPa	最大振速 / (cm/s)	位置
1	0.12	0.53	
2	1.43	4.03	
3	2.02	5.03	
4	2.20	5.34	隧道迎爆侧拱腰内侧
5	2.61	6.02	
6	4.95	11.82	

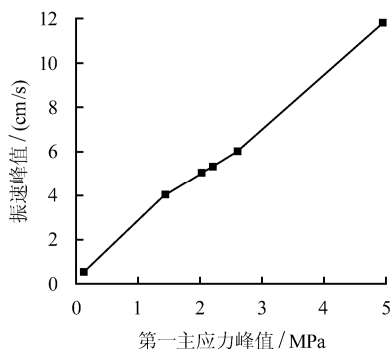


图 5 第一主应力最大值与振速峰值关系曲线

Fig.5 The relation curve between the maximum of first principal stress and the maximal vibration velocity

由表 5 及图 5 可知:

(1) 爆破振动引起隧道衬砌动应力变化, 主要受动拉应力控制, 位置均在隧道迎爆侧内侧。

(2) 当作用在坡面上的爆破荷载增大时, 隧道结构动应力及衬砌质点振速均增大, 动应力及衬砌质点振速峰值与爆破荷载表现出非线性关系。

(3) 在进行边坡爆破时, 为了保证隧道结构

不被破坏, 应当选择与隧道衬砌混凝土极限抗拉强度相对应的振速进行控制。对于本隧道衬砌 (C25 混凝土), 其抗拉极限强度为 1.95 MPa, 因此, 隧道衬砌质点最大振速应控制在 5.03 cm/s。为了保证隧道结构安全, 取安全系数为 3.0, 则最大振速应控制在 1.5 cm/s 以内。

5 结 论

(1) 对边坡开挖进行静力学分析表明, 两级边坡开挖均会对隧道结构应力产生影响。这种影响以二级边坡开挖更为显著。

(2) 当承德迎宾大道路堑二级边坡与既有京承铁路 21 号隧道中心线距离大于等于 30 m 时, 二级边坡开挖后隧道衬砌内力虽有增大, 但均在允许范围内。

(3) 边坡开挖后, 当二级边坡坡脚距离隧道中心线小于 30 m 时, 二级边坡开挖后隧道衬砌第一主应力最大值超过混凝土极限抗拉强度。因此, 边坡坡脚距离隧道中线最小安全距离为 30 m。

(4) 爆破振动引起隧道衬砌动应力变化, 主要受动拉应力控制, 位置均在隧道迎爆侧的拱腰内侧。

(5) 当作用在坡面上的爆破荷载增大时, 隧道结构动应力及衬砌质点振速均增大, 动应力及衬砌质点振速峰值与爆破荷载表现出非线性关系。

(6) 在进行边坡爆破时, 为了保证隧道结构不被破坏, 应当选择与隧道衬砌混凝土极限抗拉强度相对应的振速进行控制。

(7) 根据本隧道情况, 如果考虑 3 倍安全系数, 则在爆破施工时, 隧道衬砌的控制振速应不大于 1.5 cm/s。

(8) 边坡开挖爆破施工作业应在火车通行的间歇时间进行, 以免爆破振动与列车振动产生叠加, 从而最大限度地减小对既有京承铁路 21 号隧道的影响。

参 考 文 献

- [1] 赵东平, 王明年. 水库蓄水后对既有傍山铁路隧道运营安全的影响研究[J]. 现代隧道技术, 2005, 42(6): 29—35.
ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study on the influence of the water-storing in a reservoir on the safety operation of an existing mountainside railway tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2005, 42(6): 29—35.
- [2] 刘洪洲. 南京疏港公路近距离路堑开挖对栖霞山铁路隧道结构的影响研究[J]. 公路, 2003, (5): 142—145.

- LIU Hong-zhou. Study on the influence of Qixia Mountain railway tunnel structure on the closed excavation of Najing-Shugang road trench[J]. **Highway**, 2003, 5: 142—145.
- [3] 江学良, 曹平, 杨慧. 层状岩质边坡开挖过程的有限元模拟[J]. 岩土力学, 2006, 27(11): 1935—1940.
- JIANG Xue-liang, CAO Ping, YANG Hui. Simulation of stage excavation for stratified rock slope by using two-dimensional elastoplastic finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2006, 27(11): 1935—1940.
- [4] 上官甦, 曾蔚. 边坡开挖的有限元数值模拟分析[J]. 公路交通科技, 2006, 23(5): 32—35.
- SHANGGUAN Su, ZENG Wei. Finite element modeling on high and steep cut-slope[J]. **Journal of Highway and Transportation Research and Development**, 2006, 23(5): 32—35.
- [5] 孙均, 候学渊. 地下结构[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 696—697.
- [6] 赵东平, 王明年. 小净距交叉隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 115—119.
- ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study on influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2007, 29(1): 115—119.
- [7] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2): 204—209.
- LIU Guo-hua, WANG Zheng-yu. Dynamic response and blast-resistance analysis of a tunnel subjected to blast loading[J]. **Journal of Zhejiang University (Engineering Science)**, 2004, 38(2): 204—209.
- [8] HSIN Y L, HONG H. Reliability analysis of reinforced concrete slabs under explosive loading[J]. **Structural Safety**, 2001, 23(2): 157—178.
- [9] HSIN Y L, HONG H. Reliability analysis of direct shear and flexural failure modes of RC slabs under explosive loading[J]. **Engineering Structures**, 2002, 24(2): 189—198.
- [10] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 北京煤炭工业出版社, 1984: 177—179.
- [11] 刘波, 韩彦辉. FLAC 原理、实例与应用指南[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005: 127—131.
- [12] 潘小马. 邻近隧道施工对既有隧道的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2002: 26—27.