

隧道地质系数精确测定施工技术

蔡峰¹ 耿重阳² 杨姣³

1. 中国铁道科学研究院, 北京经纬信息技术有限公司西南分公司 四川成都 610000
2. 中国铁道科学研究院, 北京经纬信息技术有限公司 北京 100081
3. 中铁二局集团有限公司 四川成都 610000

摘要: 中老铁路连接中国昆明和老挝万象, 是“一带一路”、中老友谊的标志性工程。友谊隧道穿越泥岩夹砂岩, 盐岩含石膏等地层, 其中盐岩段长度约 1.8km。为控制盐岩地层爆破松动圈, 抑制水的溶解速度及深度, 关键是降低爆破振动对初支喷砼的影响程度。本文以中老铁路友谊隧道为依托, 经过现场实验, 通过理论分析结合数值模拟, 以单孔爆破+地质鉴定组合的方法, 对爆破监测数据进行合理的监测采集, 提高爆破振动 K、 α 参数值的精度。达到控制爆破振动速度, 降低爆破对初期支护产生裂隙病害的目的。

关键词: 爆破振动; 地质系数; 爆破监测; 单孔爆破; 预测波形

Construction technology of accurate determination of tunnel geological coefficient

Feng Cai¹ Chongyang Geng² Jiao Yang³

1. The China National Academy of Railway Sciences, Beijing Jingwei Information Technology Co., Ltd. Southwest Branch, Chengdu Sichuan 610000
2. The China National Academy of Railway Sciences, Beijing Jingwei Information Technology Co., LTD, Beijing 100081
3. China Railway Second Bureau Group Co., LTD, Chengdu Sichuan 610000

Abstract: The China-Laos Railway, which connects Kunming, China, and Vientiane, Laos, is a landmark project of the "the Belt and Road" and China-Laos Friendship. The Friendship Tunnel passes through mudstone mixed with sandstone, salt rock containing gypsum and other strata, of which the length of salt rock section is about 1.8km. In order to control the blasting loose ring in salt rock stratum and inhibit the dissolution rate and depth of water, the key is to reduce the impact of blasting vibration on the initial shotcrete. Based on the Friendship Tunnel of the China-Laos Railway, through field experiments, theoretical analysis and numerical simulation, this paper conducts reasonable monitoring and collection of blasting monitoring data by the combination of single hole blasting and geological identification, which improves the precision of blasting vibration K and parameter α , and achieves the purpose of controlling the blasting vibration speed and reducing the crack disease caused by blasting on the initial support.

Keywords: Blasting vibration; Geological coefficient; Blasting monitoring; Single hole blasting; Predicted waveform

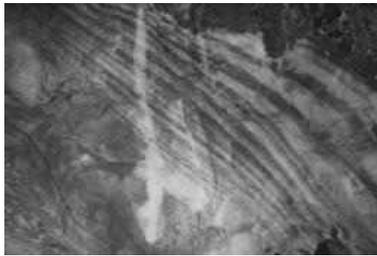
引言

中老铁路连接中国昆明和老挝万象, 是“一带一路”、中老友谊的标志性工程。友谊隧道是中老铁路的门户通道, 隧道始于中老边境磨憨口岸, 终于老挝磨丁经济开发区, 全长 9595m, 其中中国境内长 7170m, 老挝境内长 2425m, 按 160km/h 单线设计。

一、研究背景

友谊隧道穿越泥岩夹砂岩, 盐岩含石膏等地层, 其中盐岩段长度约 1.8km, 主要分布于老挝境内, 长度约 1.5km。盐岩在掌子面呈条带状、块状、层状等形态产出, 见图 1, 最高含量高达 80% 以上。盐岩具有强溶蚀、强腐蚀、膨胀

性^[2], 对隧道结构破坏作用显著, 速度快, 危害大。仰拱、矮边墙、拱墙衬砌开裂, 见图 1; 基底底鼓、溶蚀空腔; 初支开裂、表面盐类结晶物析出; 洞内钢材腐蚀严重^[1]。如何防止地下水 (NaCl 溶液) 渗透至隧道结构内部破坏结构; 如何防止盐岩地层不断溶解造成隧道结构变形、破坏, 保障隧道服役性能, 是本工程成败的控制性难题。控制盐岩地层爆破松动圈, 抑制水的溶解速度及深度; 关键是降低对初支喷砼的影响程度, 尽可能不因爆破影响产生裂纹, 保障喷砼的抗渗性能不受较大影响。就需要在隧道开挖爆破工程进行爆破监测, 控制爆破振动速度, 防止爆破对初期支护产生的裂隙病害。



掌子面盐岩地层



盐岩



钢筋腐蚀



衬砌裂缝

图 1

二、研究现状

但在现有技术条件下,采用何种爆破参数,往往是根据萨道夫斯基公式来确定^[3]。

萨道夫斯基公式:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha$$

式中: v (cm/s) 为介质质点振动速度的峰值; R (m) 为爆心距离; Q (kg) 为炸药量即同时段爆破的总药量,延时爆破为单段最大药量; K 、 α 为与爆破条件、场地地质条件等有关的系数。

通过人为主管判断或回归分析来确定其 K 、 α 值(地质参数),从而确定装药量、孔距、孔深等相关参数。然而,爆破振动效应十分复杂,影响的因素很多,到目前为止,在振动预测上尚无完善的理论。人为判断地质参数会产生

极大的误差,利用爆破回归分析也会产生很大的误差,主要影响因素包括以下几个方面:(1)地质因素 α 、 β (2)质点距爆源的距离 R (3)振动波形相互叠加、抵消(4)复杂岩层组合形式、风化程度(5)装药量 Q 。大部分爆破监测都是通过现场采集振动速度、齐爆药量、质点与振源的距离,通过回归方程对 K 、 α 的值进行测定,但受多种因素影响回归分析的相关系数较低,爆破振动峰值计算误差可达 180% ~ 280%[4-8]。

通过测定盐岩隧道盐岩地层的地质参数 k 、 α 值,精确爆破参数,控制盐岩地层爆破松动圈,抑制水的溶解及深度,降低对初支喷砼的影响程度,尽可能不因爆破影响产生裂纹,保障喷砼的抗渗性能不受较大影响。为得到比较可信的 K 和 α 的值,需要利用合理有效的爆破监测方法进行数据采集。

三、爆破振动预测方法

1. 理论原理

一般隧道内振动监测主要是通过不同段位齐爆产生的地震波,利用监测软件收集波形,并对其进行分析,提取最大振动速度,通过回归方程确定地质系数 k 、 α 。在进行回归计算时,相关系数 γ 代表数据误差的范围,一般隧道测定时,相关系数 γ 较低,爆破振动峰值计算误差较大,这将极大的消减地质系数的可信度。通过提高相关系数 γ ,可以达到减小误差的目的。

核心原理:利用单孔爆破+地质鉴定组合的方法,对爆破监测数据进行合理的监测采集,从而得到精确的 K 、 α 值。思路:(1)通过单孔爆破试验,确定爆破振动波形,提取峰值速度 v ,能有效提高峰值速度的准确性,避免了由多段位爆破时,波峰重叠产生的超高峰速或波形相互抵消的低峰速。(2)通过对岩层进行划分分类,测定不同岩层的 K 、 α 值,更精准的对炮孔布置进行指导。

2. 数据获取

根据场地情况,选取 3 个监测断面,根据单炮孔位置,在射线方向及监测断面布置监测点 R_1 、监测点 R_2 、监测点 R_3 ,见图 2、图 3,记录监测断面与掌子面的距离 R_1 、 R_2 、 R_3 ,见表 1,通过 3 个监测点同时进行爆破振动数据记录。

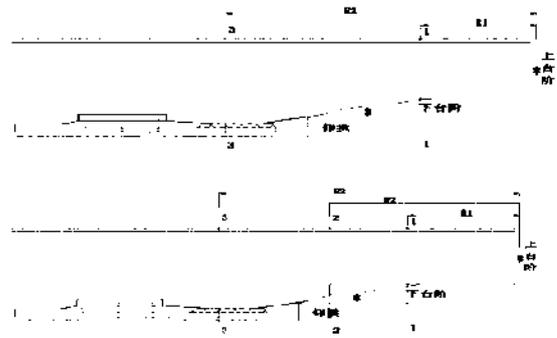


图 2 监测断面设置



图3 测点布置

表1 测试距离记录

编号	范围	实测距离(m)
R1	$20m \leq R1 \leq 25m$	22
R2	$35m \leq R2 \leq 45m$	40
R3	$55m \leq R3 \leq 65m$	61

3. 实施步骤



(1) 根据岩石新鲜面,判断大致岩性,利用放大镜观测岩石主要矿物组成,判定地层后,根据岩层硬度、矿物组成等按比例进行划分,绘制素描图。

(2) 绘制钻爆图,选取单孔爆破孔,单独设置段位。

(3) 根据图纸距离,分别在 $20m \leq R1 \leq 25m$; $35m \leq R1 \leq 45$; $55m \leq R3 \leq 65m$ 选取3个点,确认单爆孔的位置,在单爆孔射线方向布设3个监测点。

(4) 利用 Blasting vibration analysis 软件 [9] 对数据进行提取,通过单孔爆破采集到数据,对整体爆破进行预测,根据预测结果与实际爆破进行对比,消除叠加错误数据,利用回归法计算,并验证相关系数。

四、应用实例

中老铁路友谊隧道老挝段,隧道开挖过程中,施工爆破采用毫秒管,应用本文中的方法进行工程实验。图4是岩石鉴定,通过地质鉴定法,利用放大镜判定掌子面揭露岩层岩性,利用罗盘进行掌子面产状测量,并绘制地质素描图,如图5。根据岩石组合及产状,将掌子面划分为1~3个区域,见图6。根据现场揭示的掌子面,绘制钻爆图,如图7。

以上台阶开挖掌子面为例,钻爆图根据设计给出的地质系数,及按小组已划分好的地层区域绘制钻爆图,如图7所示;在钻爆图中选取1~3个单爆孔,并明确钻爆参数,见表2。



图4 地质鉴定

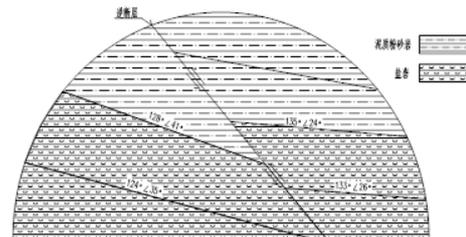


图5 地质素描图

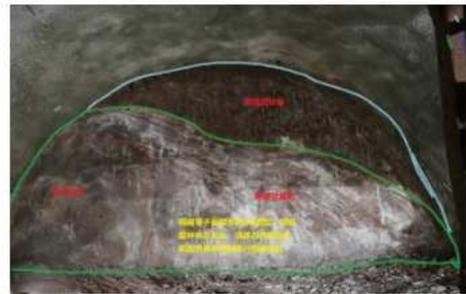


图6 掌子面岩层区域划分

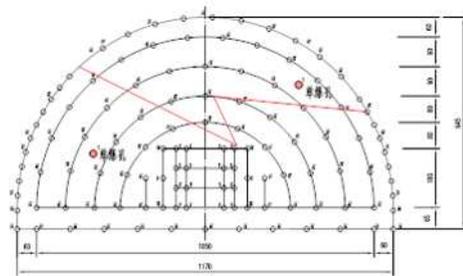


图7 单爆孔设置位置

部位	序号	炮孔名称	炮眼数 (个)	炮眼长度 (cm)	雷管段数 (段)	装药直径	每孔药卷数(卷/孔)	单孔装药量 (kg)	合计药量 (kg)
上台阶	1	单爆孔	2	110	1	Φ32	3	0.7	2.1
	2	小掏槽	8	117	3	Φ32	3	0.7	5.6
	3	大掏槽	8	112	4	Φ32	2.5	0.55	4.4
	4	辅助眼	33	100	5, 6	Φ32	2	0.4	13.2
	5	内圈眼	23	100	11	Φ32	1.5	0.25	5.75
	6	周边眼	45	100	13	Φ25	1.5	0.2	9
合计			117个					37.95kg	

利用 Blasting vibration analysis 软件对数据进行提取, 得到单孔爆破波形曲线及整体爆破波形振动曲线见图 8、图 9。通过单控爆破取得的波形, 对整体爆破进行预测。根据预测的波形, 见图 10, 与实际振动波形进行对比, 一是验证单孔爆破波形与整体爆破的相同性, 二是消除因波峰叠加或相互抵消的错误峰值。根据预测波形提取峰值速度。

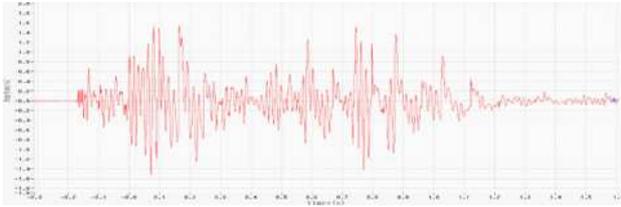


图 8 单孔爆破监测图

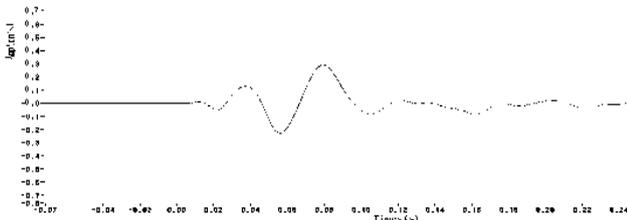


图 9 整体爆破监测图

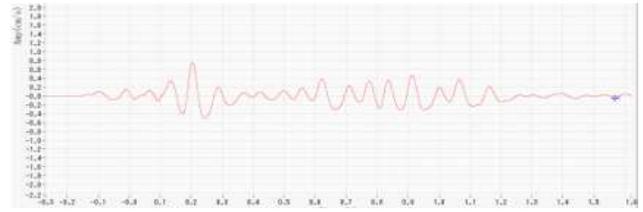


图 10 预测爆破监测图

利用线性回归方程计算 k 、 α 值及相关系数 γ 的值, 对比分析相关系数 γ 的误差率, 是否达到效果 [10-11]。

公式拟定:

$$v = K \times \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R}\right)^\alpha$$

取对数:

$$\lg v = \lg K + \alpha (1/3 \lg Q - \lg R)$$

令: $\lg v = Y$ $x = \lg R - 1/3 \lg Q$ $\lg K = b$, $\alpha = a$, 即: $y = ax + b$

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2}$$

$$b = y_0 - ax_0$$

$$\gamma = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)(y_i - y_0)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - x_0)^2 \sum_{i=1}^n (y_i - y_0)^2}}$$

式中: x_0 、 y_0 分别为 x_i 、 y_i 算术平均值, x_i 、 y_i 分别为第 i 个有效样本的实测计算值。

表 3 实验数据分析

次数	孔深	序号	段位	Q 单	孔数	Q 总	V _x	V _y	xi=lnR- 1/3lnQ	yx=lnv	yy=lnv
1	2	1	3	1.2	17	20.4	0.1901	0.9129	-3.089	-1.660	-0.091
2	2	2	5	1.2	10	12	0.9685	1.092	-3.266	-0.032	0.088
	2	3	7	0.9	13	11.7	1.6151	1.7	-3.274	0.479	0.531
	2	4	9	0.75	6	4.5	2.8484	1.9555	-3.593	1.047	0.671
	4	1	7	1.8	6	10.8	0.0105	0.5914	-2.608	-0.018	-0.525
	4	2	10	1.8	10	18	0.9824	0.7033	-2.438	0.225	-0.352
3	2		10	0.6	2	1.2	1.2519	1.8261	-3.340	0.723	0.602
	4	3	12	1.8	8	14.4	2.0598	1.778	-2.512	-1.570	0.575
	2		12	0.6	2	1.2	0.208	0.2421	-3.340	-1.890	-1.418
	4	4	14	1.8	6	10.8	0.151	0.2452	-2.608	-1.890	-1.406
	2	1	3	1.2	20	24	0.3542	0.06	-3.035	-1.038	-2.813
	2	2	5	1.2	10	12	0.4428	0.054	-3.266	-0.815	-2.919
	2	3	7	0.9	12	10.8	0.4877	0.05	-3.301	-0.718	-2.996
	2	4	10	0.9	6	5.4	0.2491	0.061	-3.532	-1.390	-2.797
4	2	5	11	0.75	14	10.5	0.279	0.049	-3.311	-1.277	-3.016
	2	6	13	0.6	30	18	0.3632	0.088	-3.131	-1.013	-2.430
	2	7	15	0.6	14	8.4	0.615	0.043	-3.385	-0.486	-3.147
	1.2	1	1	1.2	2	2.4	0.4656	1.9663	-2.886	-0.764	0.676
	1.2	2	3	1.2	15	18	0.7133	1.645	-2.231	-0.338	0.498
	1.2	3	5	1.2	15	18	2.8556	2.6599	-2.239	1.049	0.978
	1.2	4	7	1.2	10	12	1.1197	3.0591	-2.370	0.113	1.118
1.2	5	9	1.2	29	34.8	1.3671	1.2741	-2.028	0.313	0.242	
1.2	6	11	1.2	35	42	3.7259	1.3794	-1.940	1.315	0.322	
1.2	7	13	0.9	4	3.6	5.4589	2.1392	-2.763	1.697	0.760	

通过单孔爆破 + 地层分类的方法对隧道开挖作业, 进行 4 次监测得到同类地层的爆破振动波形, 并提取数据, 见表 3, 计算地层的 k 、 α 值, 并通过整体爆破的相关系数 (γ) 与单孔爆破预测的相关系数 (γ) 进行对比得到, 见表 4:

表 4 实验结果统计

次数	整体爆破计算地质系数				单孔预测爆破地质系数			
	K	α	γ	误差率 1/ γ %	K	α	γ	误差率 1/ γ %
1	98	1.36	0.46	217%	199	1.68	0.72	138%
2	177	1.63	0.55	181%	220	1.73	0.71	141%
3	135	1.44	0.62	161%	170	1.61	0.75	133%
4	180	1.70	0.66	151%	234	1.75	0.76	132%
AVG	147.5	1.53	0.57	177%	206	1.75	0.76	136%

根据现场统计, 利用单孔爆破预测的方法 γ 值明显降低, 误差平均值在 136%, 小于设定目标值 140%。达到目标要求回归系数 $\leq 140\%$ 。

五、总结

综上所述, 基于单孔爆破 + 地质鉴定综合判定的方法, 预测同类岩层爆破振动具有跟精确的理论和实用价值, 与传统的统计加经验系数预报方法相比有以下优点。

(1) 通过单孔爆破同类岩层的振动波形, 不仅局限于振动峰值速度, 能够有效消除整体爆破峰值累加或抵消的情况, 更加精准的预测不同岩层的系数值 K 、 α 值, 更精准的对炮孔布置进行指导。

(2) 本文中方法在工程实际应用中未用经验系数, 避免了人为因素影响; 而且包含了实际地质条件和爆破条件的信息, 预测结果更准确。

(3) 本文中方法工程现场实施过程中需要现场实测振动点数量相比传统预测方式少很多, 预测效率和准确度有显著提高, 工程可行性更强, 便于在实际工程中推广。

参考文献:

[1] 王志杰, 李金宜, 邓宇航, 等. 盐岩隧道施工病害揭示及致灾因子研究 [J]. 现代隧道技术, 2021, 58(5): 46-55. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2021.05.006.

[2] 马洪岭, 陈锋, 杨春和, 等. 深部盐岩溶解速率试验研究 [J]. 矿业研究与开发, 2010, 30(5): 9-13.

[3] 闫常陆, 王峰. 基于萨道夫斯基公式拟合的爆破振动规律研究 [J]. 现代矿业, 2018, 34(6): 109-111. DOI:10.3969/j.issn.1674-6082.2018.06.024.

[4] 杨年华, 张乐. 爆破振动波叠加数值预测方法 [J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1): 84-90. DOI:10.3969/j.issn.1001-1455.2012.01.015.

[5] 陈庆, 王宏图, 胡国忠, 等. 隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术 [J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 964-967. DOI:10.3969/j.issn.1000-7598.2005.06.029.

[6] 张先勇, 黄梅, 邹锦州, 等. 隧道爆破振动试验研究 [J]. 交通科技, 2018(2): 108-112. DOI:10.3963/j.issn.1671-7570.2018.02.025.

[7] 孙崔源, 张民庆, 郭云龙, 等. 小间距并行隧道施工爆破振动控制技术试验研究 [J]. 铁道建筑, 2019, 59(1): 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1003-1995.2019.01.12.

[8] 陈贵, 高文学, 刘冬, 等. 浅埋隧道开挖爆破震动监测与控制技术 [J]. 现代隧道技术, 2014, 51(5): 193-198. DOI:10.13807/j.cnki.mtt.2014.05.030.

[9] 林世雄. 爆破安全评估的新设备——TC-4850 爆破测振仪 [J]. 爆破, 2008, 25(2): 33, 52. DOI:10.3963/j.issn.1001-487X.2008.02.024.

[10] 王路杰, 王海亮. 浅埋隧道爆破振动衰减系数 K 、 α 值的回归分析 [J]. 国防交通工程与技术, 2016, 14(4): 48-51, 47. DOI:10.13219/j.gjgyat.2016.04.013.

[11] 杨珊, 陈建宏, 郭宏斌, 等. 基于回归分析的隧道爆破振动传播规律研究 [J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(10): 71-75. DOI:10.3969/j.issn.1003-3033.2011.10.011.

基金项目: 铁科院集团公司基金 (2021YJ138)

作者简介: 蔡峰 (1990-), 男, 新疆, 工程师, 硕士, 主要从事隧道工程地质研究和高速铁路信息化方面的工作。