

高速公路扩建大断面特小净距隧道爆破稳定控制技术 技术研究

林从谋¹, 陈礼彪², 蒋丽丽³, 郑宏利⁴

(1. 华侨大学 岩土工程研究所, 福建 泉州 362021; 2. 福建省高速公路建设总指挥部, 福建 福州 350001;
3. 煤炭工业济南设计研究院有限公司, 山东 济南 250031; 4. 中铁16局集团第四分公司, 北京 101400)

摘要: 以国内罕见的大帽山隧道为工程背景, 结合国内现有研究成果和规范, 研究新建隧道爆破施工时确保既有运营隧道安全稳定的控制技术。以现代信息化施工理论为依据, 充分运用现场监控量测, 将既有隧道质点振动速度的临界值确定为 20 cm/s, 对既有隧道爆破质点振动速度进行监测、回归分析和爆破参数的优化; 最终现场监测结果表明, 优化后的最大装药量等爆破参数设计合理, 该爆破设计在现阶段未对既有隧道安全产生较大影响; 同时, 运用数值模拟的方法, 得到中夹岩和既有隧道壁面的质点振动速度随时间的变化规律, 所得最大振速符合规范要求, 验证该次爆破设计是合理的。通过数据分析得出隧道肩部的振动速度是隧道底部的 1.19~3.99 倍, 隧道腰部的振动速度为隧道底部的 1.10~3.11 倍, 迎爆侧振动速度为背爆侧的 5~10 倍。该研究成果为今后类似隧道工程的爆破掘进工程在理论上和施工方法上提供参考借鉴。

关键词: 隧道工程; 小净距隧道; 爆破监测; 数值模拟

中图分类号: U 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2010)07 - 1371 - 08

RESEARCH ON BLASTING STABILITY CONTROL TECHNOLOGY OF LARGE-SPAN HIGHWAY TUNNEL WITH SUPER-SMALL CLEAR SPACING AT HIGHWAY EXPANSION PROJECT

LIN Congmou¹, CHEN Libiao², JIANG Lili³, ZHENG Hongli⁴

(1. *Research Institute of Geotechnical Engineering, Huaqiao University, Quanzhou, Fujian 362021, China;*
2. *Expressway Construction Headquarters of Fujian Provincial, Fuzhou, Fujian 350001, China;*
3. *Coal Industry Jinnan Design and Research Co., Ltd., Jinan, Shandong 250031, China;*
4. *China Railway 16 Bureau Group 4th Branch, Beijing 101400, China*)

Abstract: Based on the uncommon tunnel—Damaoshan tunnel, the stability control technology of tunnel is studied when blasting construction on new-built tunnel, combining with the current study results and codes. According to the modern information construction theory, and the field monitoring technique is used to obtain the blasting vibration velocity and regression analysis result, the critical value of particle vibration velocity of existing tunnel is defined as 20 cm/s, then the blasting parameters are optimized. The final monitoring result indicates that the operation of the railway is not influenced by the construction of tunnels obviously. At the same time, the numerical simulation is employed to get the law of vibration velocity in disturbed rock and exiting tunnel wall rock variation with time. The largest blasting velocity of rock can be proved to be accordance with the criterion,

收稿日期: 2010 - 02 - 25; **修回日期:** 2010 - 03 - 30

基金项目: 福建省科技重点课题资助项目(2007H0055); 泉州市科技课题资助项目(2007Z42); 福建省交通科技发展课题资助(200910)

作者简介: 林从谋(1957 -), 男, 博士, 1982 年毕业于山东矿业学院矿井建设专业, 现任教授, 主要从事岩石动力学和地下结构方面的教学与研究工作,
E-mail: cmlin@hqu.edu.cn

which validates that this kind of control technique about blasting stabilization is reasonable. Through data analysis, some results are obtained: vibration velocity at tunnel shoulder is that at the bottom 1.19 - 3.99 times, vibration velocity at tunnel waist is that at bottom 1.10 - 3.11 times, vibration at head-burst side is that at back side 5 - 10 times. The research result offers the theoretical and methodological experiences to the similar engineering.

Key words: tunnelling engineering; tunnel with small clear spacing; blasting monitoring; numerical simulation

1 引言

小净距隧道是继分离式隧道、连拱隧道后出现的一种适应性较强的新型隧道形式。由于不受地形条件以及总体线路线型的限制,又较之连拱隧道施工工艺简单、易于防水处治和造价易于控制,采用的工程实例急速增加。在公路、铁路、城市地铁以及水利等工程中都出现了小净距隧道^[1~2]。因为两相邻隧道间围岩最小净距小于规范^[3]给出的规定值,后开挖隧道的爆破振动对先开挖隧道产生较大影响:近区岩体损伤、中远区岩体振动等危害,从而对岩体及临近既有隧道的安全稳定造成威胁。因此,如何控制新建隧道的爆破开挖对相邻隧道的影响,保证既有隧道运营安全是施工的难点,也是国内外爆破与岩石力学界关心的核心问题之一^[4~6]。

本文以国内罕见的大帽山隧道工程为背景,运用现代信息化反馈设计理论,通过对现场爆破试验实测振动数据的分析,研究既有运营隧道壁面及中夹岩的振动特性及其变化规律,讨论振动强度与爆破装药量之间的相互关系,完善设计方案,指导现场施工。本研究解决了高速公路扩建工程中,大断面特小净距隧道的施工难题,为今后类似工程的爆破掘进工程在理论和施工方法上提供了参考借鉴。

2 工程概况

大帽山隧道位于沈海高速公路泉州—厦门段扩建工程 A8 标段,扩建方案为在原两洞之间新建一座四车道隧道,并将原有右洞扩建为四车道。其设计及施工难点:(1) 新建与既有左线隧道中间岩核净宽(净距)为 5.89 m,新建两洞中间岩核净宽 8.83 m,轴线距离仅 29.61 m,约 0.4B(B 为隧道开挖跨度),均属特小净距隧道;(2) 隧道在 V 级围岩中开挖跨度达 22 m,扁平率约为 0.626,属软弱围岩中大跨度扁平隧道(四车道大断面小净距隧道在国内外少见);(3) 国内基本无可类比的工程,设计及施工经

验极少;(4) 规范^[3]中部分条款不适用本隧道的设计;(5) 工期紧,施工中要确保高速公路运营安全。隧道区属构造剥蚀微丘地貌,穿越的地层岩性为强~弱风化的花岗岩。左右线隧道均位于线路直线段上,长度为 600 m。根据不同的围岩类别采用不同的施工方式,新建隧道 V 级围岩采用双侧壁导坑法开挖,双层初期支护,IV 级围岩以下采用单侧壁导坑法开挖,单层初期支护。

3 大断面小净距隧道开挖爆破与信息化施工技术

3.1 开挖爆破方案

新建隧道断面大、净距小,如何控制新建隧道的爆破开挖对相邻隧道的影响,保证既有隧道运营安全是本工程施工的难点。为了确保安全,初步设计施工措施为:爆破时间高速公路管理部门协调,将爆破时间安排在高速公路车辆通行相对较少的时间段;坚持按照“短进尺、弱爆破、快支护、早衬砌”的施工原则,提出了限制最大单段装药量的短进尺微振爆破技术措施,在施工技术上既确保隧道围岩的稳定,又保证高速公路的正常运营。为确保隧道爆破施工的精确和安全,先进行了爆破试验段的试验,通过现场监测,了解新建隧道爆破振动强度,确定爆破振动对临近既有隧道安全的影响程度。图 1 为新建隧道 V 级围岩双侧壁导坑炮孔布置图,图中 I~VI 为导坑爆破开挖顺序,数字代表起爆段数,其爆破装药参数如表 1, 2 所示。

3.2 爆破振动监测

监控量测是监视围岩稳定及判断设计与施工方法是否正确的重要手段,通过监测分析结果,合理调整开挖方法、爆破参数及起爆方式,以达到既保证新建隧道施工安全,又确保既有隧道正常运营的要求^[7~10]。本工程监测采用四川拓普测控科技有限公司生产的 UBOX20016 型及成都中科动态有限公司生产的 IDTS3850 型爆破震动监测专用仪器。

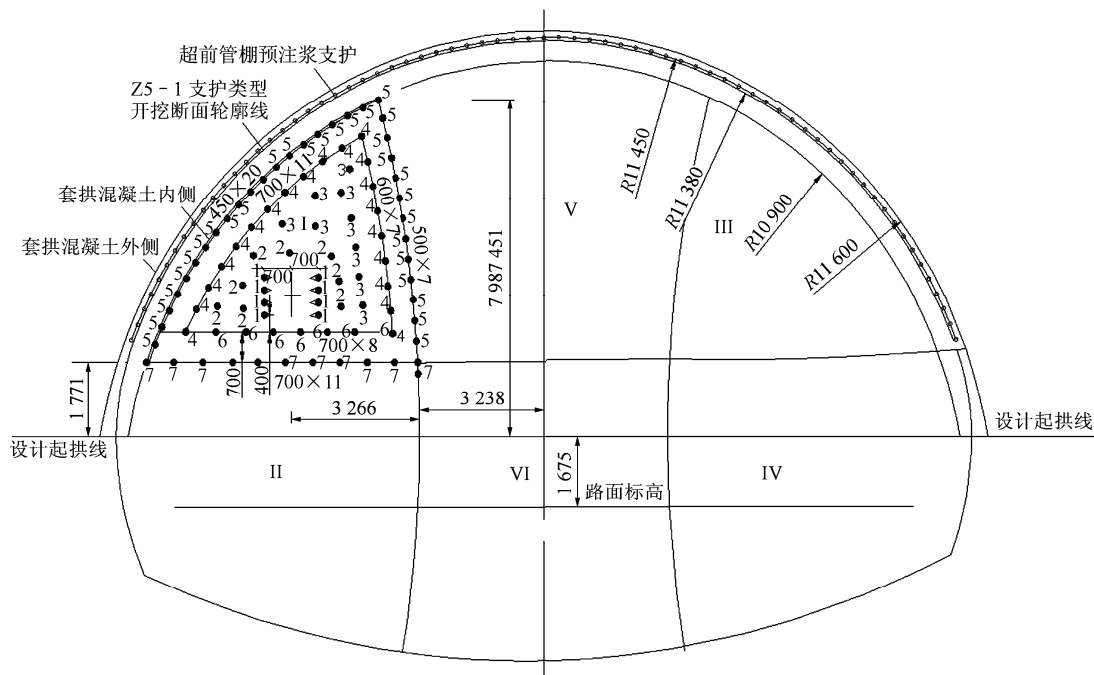


图 1 新建隧道 V 级围岩双侧壁导坑炮孔布置图(单位: mm)

Fig.1 Double-wall pit hole layout guide in grade V rock of new-built tunnel(unit: mm)

表 1 V 级围岩双侧壁左侧上导坑开挖毫秒微差爆破装药参数表

Table 1 Millisecond blasting charge parameters at the left side of pairs of lateral wall in group V rock

爆破序号	炮眼名称	眼号	眼深 /m	炮眼个数	单眼装药量/kg	总装药量/kg	毫秒雷管段数	发
I	掏槽眼	1	1.2	8	0.40	3.20	1	11
II	周边眼	2	0.8	40	0.10	3.60	3	8
III	内圈眼	3	0.8	20	0.15	3.00	3	8
IV	辅助眼	4	0.8	20	0.15	3.00	5	13
V	内圈眼	5	0.8	23	0.15	3.45	7	16
VI	掏槽眼	6	1.2	9	0.30	2.70	9	19
VII	底板眼	7	0.8	9	0.40	3.60	11	30
合计				135		22.55		130

表 2 周边眼爆破设计参数表

Table 2 Blasting design parameters of peripheral hole

项目	周边眼间距 R_1/cm	最小抵抗线 W/cm	相对距离 /m	装药集中度 $(g \cdot m^{-1})$	坑道断面 $/m^2$	眼深 L/m
毫秒微差爆破	40~50	75~83	0.6	130	28	1.2

测点及传感器布置遵守以下原则^[11]:

- (1) 最大震动断面发生的位置和方向的监测;
- (2) 爆破地震波衰减规律观测;
- (3) 爆破地震波效应跟踪监测。

监测点以 10 m 为间距依次布置在既有隧道中间岩柱的拱、腰和底部, 每个测点布置径向、切向和垂直向 3 个传感器。测点沿隧道轴线布置位置分 2 种情况: 测点位于爆破面前方(见图 2(a)), 测点位于爆破面后方(见图 2(b)), 以对比分析爆破施工对爆破面前方和后方中夹岩的影响规律。

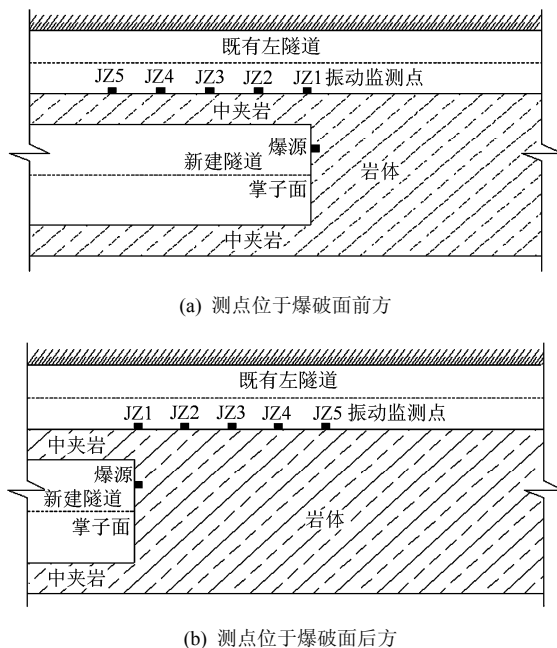


图 2 测点在隧道纵向平面的布置示意图

Fig.2 Arrangement of monitoring points in the longitudinal profile

沿隧道轴线各测点振动速度监测数据汇总见表 3。在新建隧道掌子面处，测点沿既有隧道断面布置，测点分别位于隧道的迎爆侧拱脚、迎爆侧拱腰、迎爆侧拱肩、背爆侧拱肩、背爆侧拱腰、背爆侧拱脚，以 C1~C6 表示(见图 3)，以对比分析爆破振动对中间岩柱拱脚、拱腰和拱肩部位的影响。

表 3 V 级围岩中沿隧道轴线各测点振动速度监测数据汇总
Table 3 Vibration velocities of monitoring points along the tunnel axis in grade V rocks $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$

监测方案	监测方向	振动监测点				
		JZ1	JZ2	JZ3	JZ4	JZ5
前方拱脚	径向	7.72	3.49	1.40	0.84	0.72
	切向	7.60	3.38	1.33	0.81	0.66
	垂直	7.55	3.11	1.25	0.72	0.43
	合速度	13.21	5.77	2.30	1.37	1.07
后方拱脚	径向	6.15	3.57	1.60	0.99	0.51
	切向	5.88	3.41	1.62	0.94	0.46
	垂直	5.54	3.37	1.78	0.92	0.40
	合速度	10.15	5.97	2.89	1.65	0.80
前方拱腰	径向	12.57	5.09	2.99	1.07	0.67
	切向	12.43	4.89	2.69	1.59	1.08
	垂直	10.31	4.97	1.68	0.96	0.57
	合速度	19.46	8.63	4.36	2.14	1.39
后方拱腰	径向	8.43	4.89	2.19	1.36	0.70
	切向	8.05	4.66	2.22	1.29	0.63
	垂直	7.58	4.62	2.44	1.26	0.55
	合速度	13.91	8.18	3.96	2.26	1.09
前方拱肩	径向	13.11	5.43	3.77	1.53	1.28
	切向	12.43	5.12	2.69	1.59	1.08
	垂直	11.31	5.11	1.68	1.64	1.01
	合速度	19.66	9.04	4.93	2.75	1.96
后方拱肩	径向	11.87	6.89	3.09	1.91	0.98
	切向	11.34	6.57	3.13	1.82	0.89
	垂直	10.68	6.50	3.43	1.77	0.78
	合速度	19.17	11.53	5.58	3.18	1.54

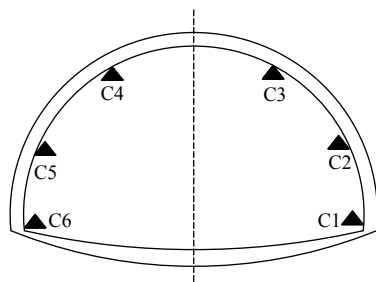


图 3 测点在隧道横断面上的布置示意图

Fig.3 Arrangement of monitoring points in the vertical cross-section

既有隧道左线 V 级围岩振动速度峰值全断面包

络图见图 4，由图 4 中可以看出隧道肩部振动峰值最大，腰部次之，底部最小；切向方向的振动速度峰值远大于垂直方向振动速度峰值。并通过大量数据分析得出隧道肩部的振动速度是隧道底部的 1.19~3.99 倍，隧道腰部的振动速度是隧道底部的 1.10~3.11 倍，迎爆侧振动速度为背爆侧的 5~10 倍。新建隧道爆破开挖对邻近既有隧道将产生极大的影响，影响最大的部位是既有隧道的迎爆侧，说明在施工过程中，迎爆侧是爆破开挖控制的薄弱部位，应重点对迎爆侧拱肩部位进行严密监控，控制好拱肩部位的振动速度，整个隧道的稳定也就得到了控制。

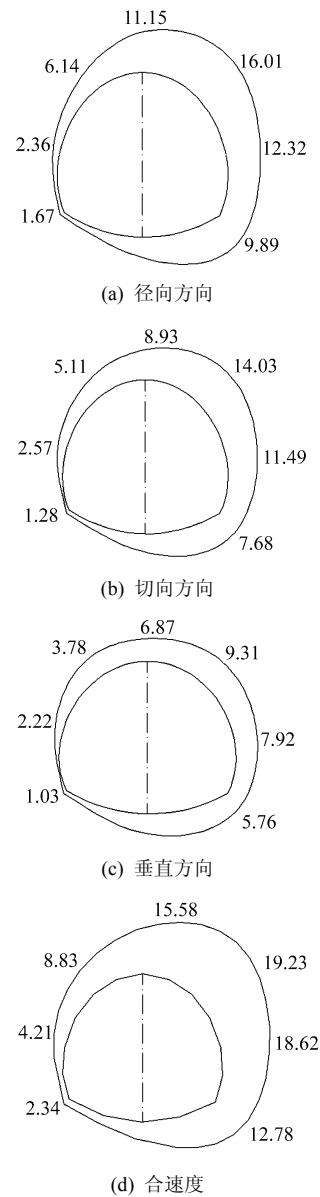


图 4 既有隧道左线 V 级围岩振动速度峰值全断面包络图 (单位: cm/s)

Fig.4 Envelope diagram of peak vibration velocity along whole cross-section in grade V rock of left existing tunnel(unit: cm/s)

3.3 回归分析

根据我国规程^[10]及国内外的一些研究成果可知, 在我国和前苏联地区研究爆破振动传播与衰减规律时, 都普遍采用萨道夫斯基^[10]的经验公式对爆破振动的监测数据进行回归:

$$v = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: v 为峰值质点速度(cm/s), K 为与爆破场地等条件有关的系数, Q 为最大单响炸药量(kg), R 为测点与爆源的距离(m), α 为与地质条件有关的爆破地震波的衰减系数。通过最小二乘法可求 K 和 α 值, 以进行爆破振动强度的预测。

大帽山隧道不同围岩振动速度回归经验公式见表 4。由于现场条件限制, 拱顶的振动速度难以监测到, 故根据振动速度衰减的规律, 推断出拱顶的振动速度峰值, 如图 4 所示。

表 4 不同围岩振动速度回归经验公式

Table 4 Regression empirical equations of different rock vibration velocities

围岩等级	径向		切向	
	经验公式	r	经验公式	r
IV	$v = 169.73\rho^{0.76}$	0.88	$v = 106.77\rho^{1.20}$	0.91
V	$v = 70.87\rho^{1.49}$	0.84	$v = 36.23\rho^{1.43}$	0.90
围岩等级	垂直		合矢量	
	经验公式	r	经验公式	r
IV	$v = 42.21\rho^{0.76}$	0.89	$v = 132.71\rho^{1.32}$	0.92
V	$v = 30.32\rho^{1.31}$	0.86	$v = 63.23\rho^{1.43}$	0.86

注: r 为相关系数。

3.4 爆破安全判据

我国现行的规程^[10]中把保护对象所在地质点峰值震动速度作为爆破震动的安全标准, 并将交通隧道安全允许标准定为 10~20 cm/s。表 5 为国内部份小净距隧道爆破振速控制阈值。

吴超凡^[11]通过数值计算得到: 当速度为 15 cm/s 时, 达到混凝土极限强度的面积约占二次衬砌面积(除仰拱)的 5%; 当速度为 20 cm/s 左右时, 达到混凝土极限强度的面积约占二次衬砌面积(除仰拱)的 15%, 但没有贯通整个结构截面; 当大于 20 cm/s 时, 达到混凝土极限强度的面积约占二次衬砌面积百分比逐渐增大, 而且逐渐扩展到围岩, 贯通整个二次衬砌的截面。因此将大帽山隧道既有隧道的临界值修订为 20 cm/s。

表 5 国内部份小净距隧道爆破振速控制阈值

Table 5 Control threshold of blasting vibration velocities for part of domestic tunnels with small clear spanning

名称	净距/m	临界值/(cm·s ⁻¹)
东北老隧道扩建工程 ^[12]	19.20~18.70	15
招宝山公路隧道 ^[13]	0.90~0.95	10
椒金山隧道 ^[14]	-	10~15
武隆隧道 ^[15]	16.50~40.50(轴距)	25
梧桐山隧道 ^[16]	13.50	4.0(III类), 6.0(IV类)
小洋山隧道 ^[17]	9.14~9.34	10
板桃隧道 ^[18]	6.14	1.8
三福高速公路隧道 ^[2]	5.00	15(衬砌) 10(II, III级)
董家山隧道 ^[19]	3.75~21.86	15
石狮隧道 ^[20]	8.20	15

3.5 爆破参数设计优化

初始的爆破监测数据虽然未超标, 但已接近临界值 20 cm/s, 如果按照初始爆破设计继续爆破, 将对既有运营隧道产生很大的影响。接下来的爆破即是根据前期爆破振动预测的结果, 优化爆破设计, 并进行监测, 为顺利开挖完成大帽山隧道做好准备。优化后的爆破参数如表 6, 7 所示。

表 6 V 级围岩双侧壁左侧上导坑开挖毫秒微差爆破装药优化设计参数表

Table 6 Millisecond blasting charge optimization parameters at the left side of pairs of lateral wall in grade V rocks

爆破序号	炮眼名称	眼号	眼深/m	炮眼个数	单眼装药量/kg	总装药量/kg	毫秒雷管	
							段数	发
I	掏槽眼	1	1.2	8	0.20	1.60	1	8
II	辅助眼	2	0.8	8	0.15	1.20	2	8
III	辅助眼	3	0.8	9	0.15	1.35	3	9
IV	内圈眼	4	0.8	19	0.15	2.85	5	19
V	周边眼	5	0.8	36	0.10	3.60	7	36
VI	二台眼	6	0.8	7	0.20	1.40	9	7
VII	底板眼	7	0.9	11	0.25	2.75	11	11
合计				98		14.75		94

调整完爆破设计后, 再次对大帽山隧道的爆破振动进行监测, 爆破监测点设在既有左线隧道的肩部, 监测数据汇总见表 8。由表 8 看出监测得到的拱肩部位最大振动速度为 15.78 cm/s, 小于临界值 20 cm/s, 优化后的爆破设计在现阶段未对既有运营

表 7 周边眼爆破优化设计参数表

Table 7 Blasting optimization design parameters of peripheral hole

项目	周边眼间距/cm	最小抵抗线W/cm	相对距离/m	装药集中度/(g·m ⁻¹)	坑道断面/m ²	炮眼深度L/m
毫秒微差爆破	40~50	75~83	0.6	130	28	0.8

表 8 V 级围岩中既有左线隧道肩部各测点振动速度监测数据汇总

Table 8 Vibration velocities of monitoring points at shoulders of left lane of the tunnel in grade V rocks cm·s⁻¹

监测方案	监测方向	振动监测点				
		JZ1	JZ2	JZ3	JZ4	JZ5
前方拱肩	径向	13.34	9.87	5.54	2.76	1.78
	切向	13.11	9.76	5.31	2.80	1.70
	垂直	8.78	5.49	3.29	2.08	1.46
	合速度	15.78	11.93	8.35	4.45	2.86
后方拱肩	径向	12.57	9.34	5.25	3.47	1.69
	切向	12.04	8.94	5.02	3.32	1.61
	垂直	8.12	5.99	3.11	1.97	1.38
	合速度	14.52	10.25	7.90	5.19	2.71

隧道产生较大影响。由监测结果还发现，装药量是影响爆破效果和地震波的主要因素，尤其是单段药量和爆破段数的影响，当单段最大药量加大时，实测质点最大振速明显加大；爆破段数增多，对控制地震波也十分有利。为确保爆破监测结果的可靠，施工过程中必须严格按照爆破设计进行装药、联线。

4 数值分析

为了更好地对既有隧道进行稳定性控制，确保隧道的顺利施工和既有运营隧道的安全运行，本文采用 ANSYS/LS-DYNA 显式有限元程序建立三维数值模型模拟隧道爆破开挖过程中对邻近隧道的影响情况。模拟过程中，选取埋设监测仪器的断面为研究对象，根据实际情况取隧道的埋深、围岩的力学参数和初始地应力参数，建立三维模型，划分六面体单元网格^[21]。

越来越多的工程实测数据表明，岩石是一种黏弹性的工程材料，故在模拟中，将岩石看作黏弹材料。新建隧道爆破开挖，掏槽眼的最大药量达到 3.6 kg。根据杨年华和刘慧^[22]的研究，当装药分散以后，质点的峰值速度显著降低，故数值模拟中将炸

药取为 14.75 kg，按照集中装药方式进行分析，结果趋于保守。

高能炸药起爆后，炸药内部单元的压力 P 由状态方程来求得。一般采用 JWL(Jones-Wilkens-Lee) 状态方程，JWL 方程描述了炸药爆炸时的化学能变化情况，一般表现为

$$p = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{wE}{V} \quad (2)$$

式中： V 为相对体积； E 为内能常数； A, B, R_1, R_2, w 均为特征参数，对于特定炸药而言，为常数^[23]。

炸药和岩石的具体参数如表 9 所示。模型计算时间为 0.6 s，时间步长为 0.000 2 s，计算的质量缩放系数为 0.6。

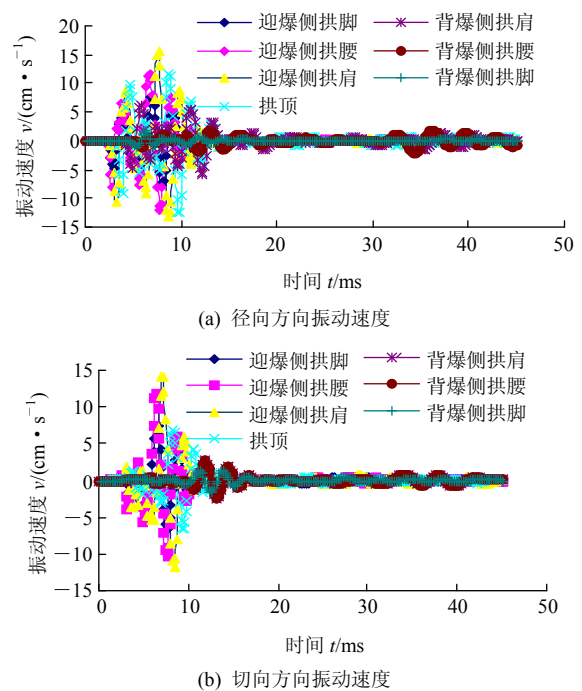
表 9 炸药和岩石的具体参数汇总表

Table 9 Specific parameters of explosives and the rock matrix

高能炸药材料							
密度/(kg·m ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	A/GPa	B/GPa	R ₁	R ₂	w	E ₀ /MJ
1 310	5 500	214.4	0.182	4.2	0.9	0.41	4.192
岩石介质							
密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	屈服应力/MPa	剪切模量/GPa	衰减系数		
2 500	15	0.25	3.0	4.2	0.5		

注：E₀ 为初始比内能。

采用以上模型可以形象地得到既有隧道的峰值振速，并可绘出与该爆破点相对应的隧道掌子面处全断面振动速度时程曲线见图 5。



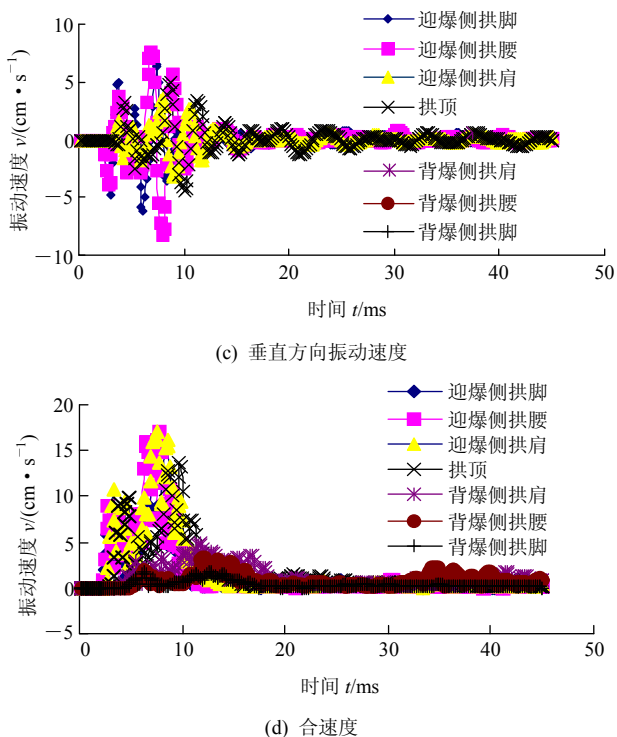


图 5 既有隧道掌子面处全断面振动速度时程曲线
Fig.5 Vibration velocity-time curves of cross-section at working face in existing tunnel

在同一爆破开挖过程中, 同时监测掌子面前方和后方拱肩部位沿隧道传播的振动速度, 并采用上述模型进行模拟, 得到既有隧道左线迎爆侧拱肩振动速度计算值与实测值对比图, 见图 6。

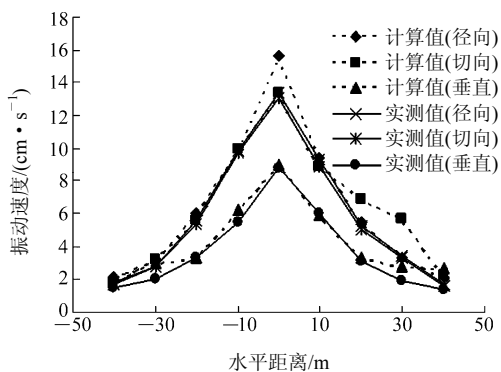


图 6 既有隧道左线迎爆侧拱肩振动速度计算值与实测值对比图
Fig.6 Comparison between blast vibration velocities calculated and measured values chart near the blasting side of left existing tunnel

由图 5 可知, 既有隧道断面处振速随时间推移越来越小, 最大振速为 16.99 cm/s, 与实测值相差不大, 并小于临界振动速度。由图 6 可以看出, 数值计算值稍大于实测值, 但比较接近实测值, 除个别测点外, 误差均可控制在 5%以内, 这样既保证

了数值计算的安全性, 又保证了准确性, 故用数值计算来分析和预测隧道爆破开挖过程中对临近既有隧道的振动影响是可行且可靠的。

5 结 论

在大帽山隧道爆破掘进过程中, 充分运用现代化信息施工理论, 把设计、施工和监测紧密结合起来, 得到了如下结论:

(1) 根据大跨度小净距隧道的爆破施工特点, 制定了合理的爆破监测方案, 并对原爆破设计方案进行监测, 并通过大量数据分析得出隧道肩部的振动速度比隧道底部的 1.19~3.99 倍, 隧道腰部的振动速度为隧道底部的 1.10~3.11 倍, 迎爆侧振动速度为背爆侧的 5~10 倍。

(2) 应用监测结果数据对施工进行反馈设计, 及时调整优化爆破参数, 不同地段爆破的段最大药量应根据测算的 K, α 值和周围建筑物的距离经过计算后做适当的调整。

(3) 通过分析将大帽山隧道既有隧道的临界值修订为 20 cm/s。

(4) 对原爆破参数进行调整、优化, 监测得到既有左线隧道肩部振动速度最大值均未超过 20 cm/s, 小于隧道的临界值, 可见优化后的最大装药量等爆破参数设计合理。

(5) 通过数值计算得到既有隧道断面处最大振速为 16.99 cm/s, 与实测值相差不大, 并小于临界振动速度。并通过对计算值与实测值的对比证明了用数值计算来预测、分析隧道爆破对既有隧道的振动影响是可行且可靠的。

参考文献(References):

[1] 黄拔洲, 陈少华, 秦 峰. 小净距隧道在京福高速公路上的实践[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2003, 26(10): 19 - 22.(HUANG Bazhou, CHEN Shaohua, QIN Feng. Development of parallel tunnels with super-small interval in Beijing-Fuzhou freeway engineering[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science), 2003, 26(10): 19 - 22.(in Chinese))

[2] 丛恩伟. 并行双洞小净距公路隧道施工技术[J]. 铁道标准设计, 2003, (10): 71 - 74.(CONG Enwei. Construction of a highway tunnel composed of parallel twin tubes with small clear spacing[J]. Railway Standard Design, 2003, (10): 71 - 74.(in Chinese))

[3] 中华人民共和国行业标准编写组. JTGD70 - 2004 公路隧道设计规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.(The Professional

- Standards Compilation Group of People's Republic of China. JTGD70 - 2004 Code for design of road tunnel[S]. Beijing: China Communications Press, 2004.(in Chinese))
- [4] 刘 伟, 靳晓光, 陈少华. 高速公路小净距隧道合理净距的探讨[J]. 地下空间, 2004, 24(3): 380 - 386.(LIU Wei, JIN Xiaoguang, CHEN Shaohua. Investigation on reasonable clear interval of small-interval tunnel for the freeway[J]. Underground Space, 2004, 24(3): 380 - 386.(in Chinese))
- [5] 刘 慧. 招宝山超小净距双线隧道的安全控爆研究[J]. 工程爆破, 2000, 6(1): 51 - 55.(LIU Hui. Study of safety of controlled blasting of Zhaobaoshan twintunnel with minishort separation[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(1): 51 - 55.(in Chinese))
- [6] 谭忠盛, 杨小林, 王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 281 - 285.(TAN Zhongsheng, YANG Xiaolin, WANG Mengshu. Effect of blast in double line tunnel on existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 281 - 285.(in Chinese))
- [7] 方俊波, 崔天麟. 浅埋地铁区间爆破振动对地表建筑物的影响[J]. 现代隧道技术, 2000, (5): 28 - 31, 41.(FANG Junbo, CUI Tianlin. Vibration effect of shallow-buried metro running tunnel blasting on surface structures[J]. Modern Tunnelling Technology, 2000, (5): 28 - 31, 41.(in Chinese))
- [8] 张世雄, 胡建华, 阳生权, 等. 地下工程爆破振动监测与分析[J]. 爆破, 2001, 18(2): 49 - 52.(ZHANG Shixiong, HU Jianhua, YANG Shengquan, et al. Monitoring and analysis of blast vibration in underground engineering[J]. Blasting, 2001, 18(2): 49 - 52.(in Chinese))
- [9] 林学文, 王兰民. 隧洞的爆破地振动效应问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1997, 16(3): 274 - 278.(LIN Xuewen, WANG Lanmin. The effect of blast vibration on tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1997, 16(3): 274 - 278.(in Chinese))
- [10] 中华人民共和国国家标准编写组. GB6722 - 2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.(the National Standards Compilation Group of People's Republic of China. GB6722 - 2003 Safety regulations for blasting[S]. Beijing: Standards Press of China, 2004.(in Chinese))
- [11] 吴超凡. 特大断面小净距隧道爆破开挖震动标准的研究[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(4): 19 - 24.(WU Chaofan. Blasting vibration control technology for closely-spaced tunnels with super-large cross-sections[J]. Tunnel Construction, 2009, 46(4): 19 - 24.(in Chinese))
- [12] 王玖玖. 小净距隧道控制爆破关键技术[J]. 国防交通工程与技术, 2006, 4(4): 64 - 67.(WANG Jiujiu. Small clear-distance controlled blasting techniques for tunneling[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defense, 2006, 4(4): 64 - 67.(in Chinese))
- [13] 刘 慧, 史雅语, 冯叔瑜. 招宝山超小净间距双线隧道控制爆破监测[J]. 爆破, 1997, 14(4): 25 - 28.(LIU Hui, SHI Yayu, FENG Shuyu. The monitoring of controlled blasting for twin-tunnel with a ultra short net interval in Zhaobao mountain[J]. Blasting, 1997, 14(4): 25 - 28.(in Chinese))
- [14] 黄宝龙. 复杂环境下小间距隧道施工控制关键技术研究[硕士学位论文][D]. 北京: 北京交通大学, 2006.(HUANG Baolong. Study on pivotal techniques of neighborhood tunnel in complicated environment [M. S. Thesis][D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [15] 张庆军. 武隆小净距隧道掘进控制爆破技术及其应用[硕士学位论文][D]. 成都: 西南交通大学, 2006.(ZHANG Qingjun. The controlled blasting technique for excavation of small interval zone in Wulong tunnel and its application[M. S. Thesis][D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.(in Chinese))
- [16] 郗庆桃. 梧桐山隧道爆破震动控制技术措施[J]. 世界隧道, 1999, (4): 45 - 53.(XI Qingtao. Blasting vibration control measures used in Wutongshan tunnel[J]. World Tunnelling, 1999, (4): 45 - 53.(in Chinese))
- [17] 孙忠成. 小洋山小净距群洞隧道施工技术[J]. 铁道标准设计, 2006, (12): 66 - 69.(SUN Zhongcheng. Construction of a Highway Tunnels with small clear spacing in Xiaoyangshan[J]. Railway Standard Design, 2006, (12): 66 - 69.(in Chinese))
- [18] 原郭兵, 孟庆明. 板桃隧道洞口段两超小净距隧道的施工[J]. 现代隧道技术, 2002, 39(1): 54 - 57.(YUAN Guobing, MENG Qingming. Portal section construction of Bantao twin tube tunnel with small clear spacing[J]. Modern Tunnelling Technology, 2002, 39(1): 54 - 57.(in Chinese))
- [19] 姚 勇, 何 川, 晏启祥, 等. 董家山隧道小净距段爆破控制研究[J]. 公路, 2005, (11): 212 - 217.(YAO Yong, HE Chuan, YAN Qixiang, et al. A study on blasting control of section with small clear spacing of Dongjiashan twin tunnel[J]. Highway, 2005, (11): 212 - 217.(in Chinese))
- [20] 杨转运, 龚雄文, 王 羽, 等. 小净距并行隧道施工技术要点[J]. 隧道建设, 2005, 25(2): 40 - 43.(YANG Zhuanyun, GONG Xiongwen, WANG Yu, et al. The essential construction of parallel tunnel with small clear spacing[J]. Tunnel Construction, 2005, 25(2): 40 - 43.(in Chinese))
- [21] 赵海鸥. LS-DYNA 动力分析指南[M]. 北京: 兵器工业出版社, 2003.(ZHAO Haiou. Guide to dynamic analysis of LS-DYNA[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 2003.(in Chinese))
- [22] 杨年华, 刘 慧. 近距离爆破引起的隧道周边振动场[J]. 工程爆破, 2000, 6(2): 6 - 10.(YANG Nianhua, LIU Hui. Vibration field at tunnel contour induced by a close-in blasting[J]. Engineering Blasting, 2000, 6(2): 6 - 10.(in Chinese))
- [23] 杨 军, 金乾坤, 黄风雷. 岩石爆破理论模型及数值计算[M]. 北京: 科学出版社, 1999.(YANG Jun, JIN Qiankun, HANG Fenglei. Theoretical model and numerical calculation of rock blasting[M]. Beijing: Science Press, 1999.(in Chinese))