

地铁隧道爆破施工下穿地表建筑物的减振技术研究

方俊波

(中铁隧道集团有限公司, 河南洛阳 471009)

[摘要] 城市地铁区间隧道爆破施工中面临的一个重要问题就是降低爆破振动对临近地表建筑物的影响。青岛地铁一期工程03号线03标段下穿建筑物时,为了确保距隧道拱顶5~8 m的地表建筑物安全,采用了大中空孔直眼掏槽技术、一次起爆分部延时爆破、浅孔多眼等技术,将地表建筑物最大垂直振速控制在国标允许范围之内,隧道通过后地表建筑物完好无损。并在施工中解决了大断面隧道爆破施工导爆管雷管段数不能满足施工要求、分断面施工不能同时实施爆破作业,施工效率低下的问题,既保证了工程施工安全又满足了进度要求。

[关键词] 爆破设计;直眼掏槽;大直径中空孔;分部延时起爆;浅孔爆破

[中图分类号] TU443 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2014)11-0058-07

1 工程概况

青岛地铁一期工程03号线自青岛火车站至青岛火车北站,全长24.9 km,全部为地下段,共设22个站点,全线采用钻爆法施工。沿线下穿、侧穿各种类型的建(构)筑物多达95处。地铁隧道爆破施工中面临的一个重要问题就是降低爆破振动对临近地表建筑物的影响^[1,2]。开展隧道爆破减振技术方面的研究对于地铁隧道的顺利建设、确保地面建筑物(构筑物)、交通干道及地下管线的安全具有重要的理论意义和实用价值。

青岛地铁一期工程03号线03标段,在K4+780.51~K4+900区段共下穿如家快捷酒店、伊美尔整形医院。该区段隧道围岩级别为Ⅱ~Ⅲ级,围岩岩性主要为花岗岩,整体性较好,岩体性质与地质条件均无大的变化。如家快捷酒店建成于2004年,砖混结构、毛条石基础结构,建筑物地下1层为餐

厅,地上5层为酒店客房,基础为3层条石扩大基础,隧道拱顶距基础垂直距离为5 m,距地面垂直距离为7.4 m。伊美尔整形医院建成于2004年,砖混结构、毛条石基础结构,本建筑物所处地势为北边高南边低,南边基础底距隧道开挖顶部的垂直距离为6.4 m。此两个地表建筑物与区间隧道的平面位置关系如图1所示。

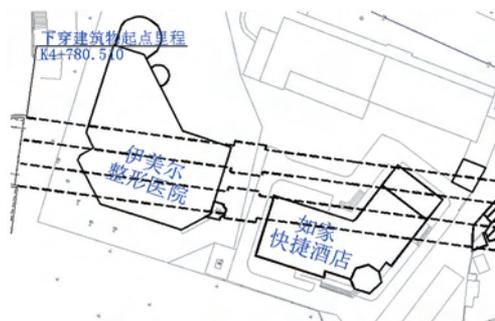


图1 区间隧道下穿建筑物平面位置图

Fig. 1 Planer graph of subway tunnel underpass upper buildings

[收稿日期] 2014-08-15

[作者简介] 方俊波,1969年出生,男,湖北孝感市人,教授级高级工程师,主要从事隧道及地下工程技术工作及管理工作;

E-mail: fjb5365@sina.com

2 钻爆设计原则

根据工程实际、工程要求、地质地形条件和地表建筑物分布情况,确定设计原则如下。

1) 确保地面建筑物、市政管线和现场施工人员的安全。设计方案要进行爆破振动安全计算,要严格按照《爆破安全规程》GB 6722—2003^[3]进行设计和施工,要有具体的安全施工措施。

2) 采用联合布置大直径中空孔,台阶分部开挖等方法尽可能多地创造爆破临空面,有效降低爆破振动对保护目标的有害影响^[4]。

3) 通过降低掘进进尺、增加钻眼数量,控制爆破规模等措施,控制单孔装药量和最大单段起爆药量,使有限的装药量均匀地分布在被爆岩体中,从而将地面控制点的爆破振动速度控制在设计要求的范围内^[5,6]。

4) 对设计确定的钻爆参数进行现场爆破试验和爆破振动监测,以取得合理的爆破参数。爆破参数应根据地质地形条件、地面建筑物、地下管线、保护岩柱的具体情况,结合爆破振动监测结果,适时调整、动态管理^[7]。

3 钻爆设计

3.1 开挖方案

隧道施工方法应根据施工条件、围岩类别、埋置深度、断面大小以及环境条件等,并考虑安全、经济、工期等要求选择。当隧道施工对周围环境产生不利影响时,应把环境条件作为选择施工方法的重要因素。同时应考虑围岩变化时施工方法的适应性及其变更的可能性,以免造成工程失误和增加不必要的投资。

根据城区已有减振爆破施工经验,本方案选用微台阶法作为基本的钻爆施工方法。设计上台阶高度约为3.2 m,下台阶高度约为3.6 m。上台阶爆破时掏槽区位于中部偏下部位,采用大直径钻机钻取两个直径120 mm的中空孔来增加自由面,减小爆破时带来的振动。爆破时先爆掏槽区后爆辅助区,先爆中部和下部后爆两侧和顶部,避免底板眼被埋情况和减少扒渣次数。按照单孔单段装药将上台阶分成八个部分,按照I~VIII顺序逐次起爆,如图2所示。

为便于与上台阶平行作业,下台阶开挖滞后上台阶3~5 m,实施上下分层开挖。上下台阶分层的

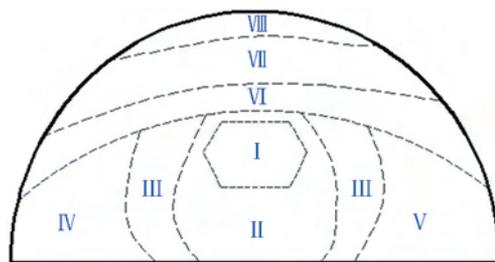


图2 上台阶爆破施工方案

Fig. 2 Construction scheme of upper bench blasting

目的是为了减小单孔装药量,降低爆破振动。下台阶均采用水平钻孔。

3.2 上台阶钻爆设计

3.2.1 炮孔深度与循环进尺

本工程的炮孔深度及循环进尺主要受地表建筑物控制点允许爆破振动速度控制。取循环进尺为0.5 m,炮孔深度控制在0.6~0.7 m。水平布置的中空孔一次钻凿深度为10~20 m。掏槽炮孔长度取0.7 m,辅助眼炮孔深度为0.6 m,周边眼深度为0.6 m。

3.2.2 炮孔和中空孔直径

采用TY-28凿岩机,炮孔直径 $d=42$ mm。掏槽中空孔直径为120 mm,采用KY-140-275履带式潜孔钻机。

3.2.3 炮孔布置

3.2.3.1 掏槽眼

上台阶采用两个大直径中空孔直眼掏槽,中空孔直径为120 mm。掏槽眼围绕中空孔环形分布。最内侧掏槽眼距中空孔边沿75 mm,掏槽眼间距向外逐步扩大。掏槽眼布置如图3所示。

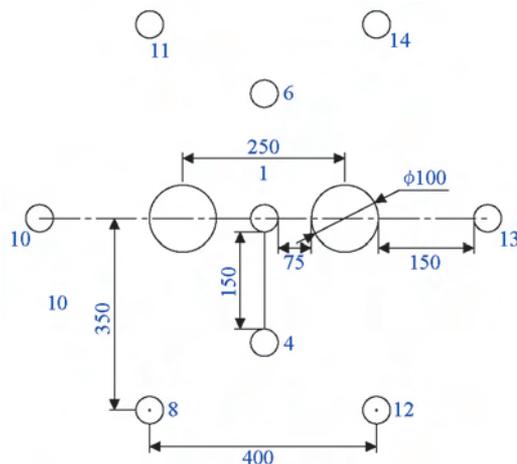


图3 掏槽眼布置(单位:mm)

Fig. 3 Cut hole layout (unit:mm)

3.2.3.2 周边眼

周边眼沿隧道开挖轮廓线布置。根据经验,对于光面爆破周边眼间距 $E=300\text{ mm}$ 。周边眼的炮孔密集系数 K 与最小抵抗线 W 之间的关系为 $K=E/W$ 。一般 $E < W$,取 $K=0.85$,则对于光面爆破取光爆层厚度 $W=350\text{ mm}$ 。装药集中度为 0.10 kg/m^3 。光爆参数值如表1所示。

表1 光面爆破参数

Table 1 Parameters of smooth blasting

岩石类别	炮孔间距 E/cm	抵抗线 W/cm	密集系数 $K=E/W$	装药集中度 $/(kg \cdot m^{-3})$
中硬岩	30~35	35~40	0.85~0.9	0.10~0.12

必要时,可在周边眼之间布设空孔,对于空孔的直径和间距可根据实际地质情况和爆破振动控制需要灵活设置。

3.2.3.3 辅助眼

辅助眼采用直线形布置或直线形与弧形布置相结合的方式。辅助眼的间距 a 、排距 b 应大于周边眼的最小抵抗线 W ,而且 a 、 b 的取值与炮孔的单孔装药量有关。要降低炮孔的单孔装药量,应相应缩

小炮孔的间排距。本设计取 $a=350\sim 400\text{ mm}$ 、 $b=350\sim 400\text{ mm}$ 。

3.2.4 单孔装药量

3.2.4.1 掏槽眼

由于采用大直径中空孔,可以有效降低掏槽眼的最大单孔装药量。根据爆破振动控制要求,取掏槽眼单孔装药量为 0.1 kg 。

3.2.4.2 辅助眼

辅助眼的装药量与围岩的坚硬程度、炸药单耗、炮孔长度及辅助眼的炮孔数量及间排距等参数有关。辅助眼的单孔装药量按式(1)计算

$$q = \tau \cdot \gamma \cdot L \quad (1)$$

式(1)中, q 为辅助眼的单孔装药量, kg ; τ 为装药系数,根据炮孔间排距及围岩性质, τ 取 0.1 ; γ 为每米药卷的炸药质量, kg/m ,对于直径为 32 mm 的乳化炸药, $\gamma=1\text{ kg/m}$; L 为炮孔长度, m ,对于炮孔长度为 0.7 m 的辅助眼,计算得 $q=0.1 \times 1 \times 0.7=0.07\text{ kg}$,取 $q=0.1\text{ kg}$ 。

3.2.5 上台阶爆破设计图及参数表

上台阶爆破设计图如图4所示,参数如表2所示。

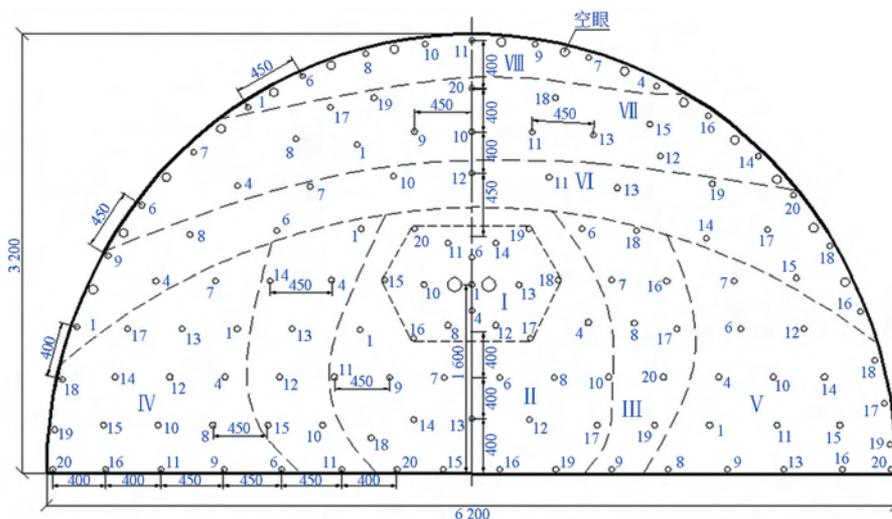


图4 区间隧道上台阶炮孔布置图(单位:mm)

Fig. 4 Blasting hole layout graph of subway tunnel upper bench blasting excavation(unit: mm)

经济技术指标:开挖面积为 16 m^2 ;预计进尺为 0.5 m ;炮孔数为 142 个,其中空孔个数为 15 个,减振孔为 2 个;比钻孔个数为 8.875 个/m^2 ;炸药量为 13.5 kg ;单耗为 1.69 kg/m^3 。

3.3 下台阶钻爆设计

3.3.1 台阶高度与炮孔深度

上台阶的超前开挖,使得下台阶爆破时已经较上台阶增加了 $1\sim 2$ 个临空面。由于上台阶的围岩

已经爆除,下台阶爆破对地表的振动影响已经大大减弱。本设计取下台阶高度 3.6 m,循环进尺为

1.2 m,炮孔深度控制在 1.2 m 以内,光爆孔比主爆区炮孔深 0.1~0.2 m。

表 2 上台阶爆破参数

Table 2 Blasting parameters of upper bench

部位	炮孔名称	段号	眼数	炮孔深度/m	单孔装药量/kg	单段最大装药量/kg
I	掏槽+扩槽	1、4、6~20	15	0.7	0.1	0.1
II	辅助+底板	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
III	辅助+底板	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
IV	辅助+底板+周边	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
V	辅助+底板+周边	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
VI	辅助+周边	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
VII	辅助+周边	1、4、6~20	17	0.6	0.1	0.1
VIII	周边	1、4、6~11	8	0.6	0.1	0.1
	空孔	—	17	—	—	—
	总计	—	142	—	—	—

起爆顺序: I—II—III—IV—V—VI—VII—VIII

3.3.2 炮孔布置

3.3.2.1 最小抵抗线、孔距和排距

最小抵抗线按式(2)计算

$$W=(0.4 \sim 1.0)L \quad (2)$$

式(2)中, L 为炮孔深度,m,取 1.1~1.2 m;则 $W=(0.4 \sim 1.0)L=(0.4 \sim 1.0)(1.1 \sim 1.2)=0.44 \sim 1.2$ m,为降低爆破振动对地面建筑物的影响,实际取 $W=0.5$ m;取主爆区炮孔密集系数 $m=1$,炮孔孔距 $a=0.5$ m,则炮孔排距 $b=a/m=0.5$ m。

3.3.2.2 周边眼

根据经验,炮孔间距 E 与炮孔直径 d 之间的关系为 $E=(10 \sim 18)d$ 。取 $d=42$ mm,则 $E=420 \sim 756$ mm。根据地质情况,为了取得更好的光爆效果,以及减小爆破时对地表建筑物振动,取 $E=400$ mm。

周边眼的炮孔密集系数 K 与最小抵抗线 W 之间的关系为 $K=E/W$ 。一般 $E < W$,取 $K=0.8$,则对于光面爆破取光爆层厚度 $W=500$ mm。

周边眼选用 $\phi 32$ mm 的乳化炸药药卷。使用时将药卷沿药卷轴线一分为二,相当于直径 16 mm 的药卷。装药的不耦合系数为 2.63。

3.3.3 单孔装药量

3.3.3.1 主爆区炮孔

主爆区炮孔的单孔装药量按式(3)计算

$$q=kabL \quad (3)$$

式(3)中, k 为单位耗药量, kg/m^3 ,取 $k=0.8 \text{ kg}/\text{m}^3$; a 为孔距,m,取 $a=0.5$ m; b 为排距,m,取 $b=0.5$ m; L 为炮孔深度,m,取 $L=1.1 \sim 1.5$ m。

则 $q=kabL=0.2574 \sim 0.316 \text{ kg}$,实际取 $q=0.3 \text{ kg}$ 。

设计采用逐孔逐段起爆。如加大单段起爆的炮孔数量,则必须相应减小炮孔深度,保持最大单孔起爆药量不超过 0.3 kg。同时根据地面爆破振动监测结果,及时调整最大单段起爆药量,确保地面建筑物的安全。

3.3.3.2 周边眼

周边眼的装药量主要根据炮孔间距、最小抵抗线和装药集中度确定。光面爆破的参考数值如表 1 所示。对于装药集中度,本设计取光面爆破为 $0.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1}$ 。下台阶周边眼的主要参数为炮孔深度 1.2 m,单孔装药量 0.24 kg,实际取 0.3 kg。

3.3.4 下台阶爆破设计图及爆破参数

左右线隧道下台阶炮孔布置图如图 5 所示,参数如表 3 所示。

经济技术指标:开挖面积为 17 m^2 ;预计循环进尺为 1.0 m;炮孔个数为 68 个;比钻眼数为 4 个/ m^2 ;炸药量为 20.4 kg;炸药单耗为 $1.05 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

4 装药结构

掏槽眼和扩槽眼采用正向起爆。进行预裂爆破的炮孔采用空气间隔不耦合装药结构(见图 6)。为保证炮孔内各间隔药卷同时起爆,所有空气间隔装药均使用导爆索连接各药卷。

由于隧道断面大,炮孔数量多,可供使用的雷管段数少,允许的段起爆药量较小,必要时,在同一爆破断面内采用孔内毫秒延时,在不同爆破断面

间采用孔外秒延时爆破相结合的方法,以降低单段起爆药量和起爆次数。

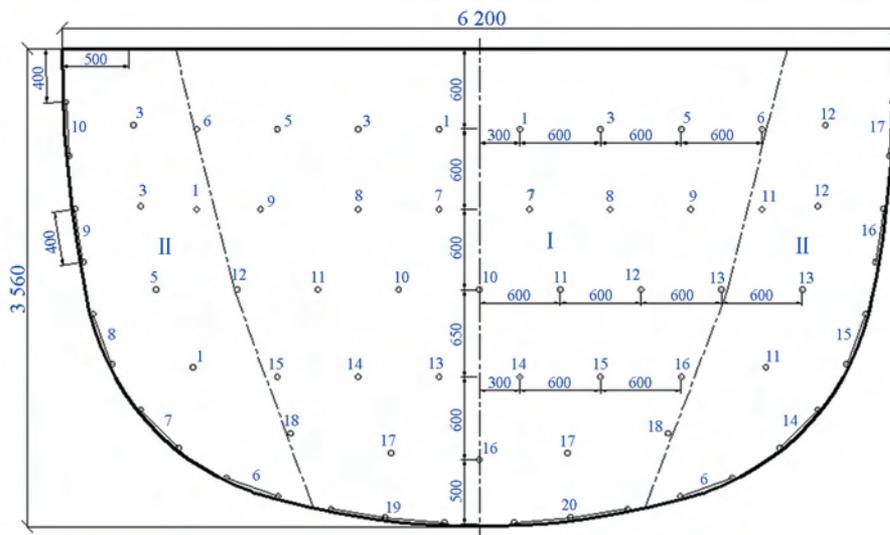


图5 区间隧道下台阶炮孔布置(单位:mm)

Fig. 5 Blasting hole layout graph of subway tunnel below bench blasting excavation(unit :mm)

表3 下台阶爆破参数

Table 3 Blasting parameters of below bench

炮次	炮孔类型	段号	眼数	炮孔深度/m	单孔装药/kg	单段最大起爆药量/kg
I	辅助眼	1,3,5~18	32	1.2	0.3	0.6
	周边眼	19~20	6	1.2	0.3	0.9
II	辅助眼	1,3,5	10	1.2	0.3	0.6
	周边眼	6~10	20	1.2	0.3	0.6
	总计	—	68	—	—	—

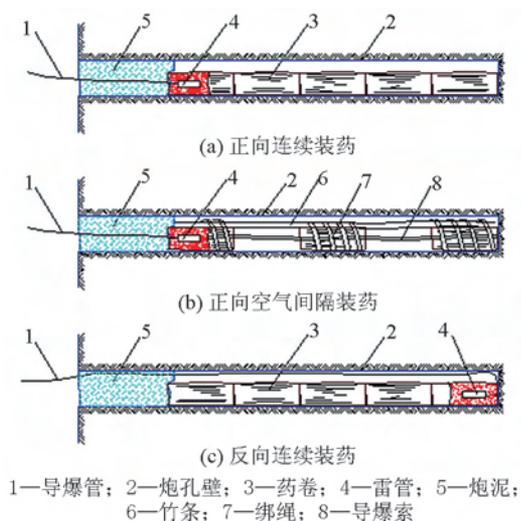


图6 装药结构

Fig. 6 Charge structure

所有炮孔均采用正向起爆方式。周边眼选用 $\phi 32$ mm的乳化炸药药卷。使用时将药卷沿药卷轴

线一分为二,相当于直径16 mm的药卷。装药的不耦合系数为2.63。

5 起爆网路

采用非电导爆管起爆系统,发爆器配击发针击发起爆。

采用“一次起爆分部延时爆破”技术(见图7)。该技术将掘进工作面分为两个或两个以上分断面,分断面沿掘进工作面前进方向依次错开一定距离。通过分部雷管有效地将分断面上爆破产生的振动分隔开。由于分部雷管可以选择延期时间较长的秒延期雷管,因此在分断面上使用的毫秒延期导爆管雷管的段别、段数及总的延期时间等彼此之间不受影响。这样就较好地解决了大断面隧道爆破开挖过程中的两个问题。一是解决了大断面隧道爆破施工导爆管雷管段数不能满足要求的问题;二是解决了隧道分断面(特别是以左右方式分隔的

分断面)施工不能同时实施爆破作业,施工效率低下的问题。这两个问题的解决,一方面可以有效地降低爆破振动,另一方面还可以保证工程的施工效率和进度。

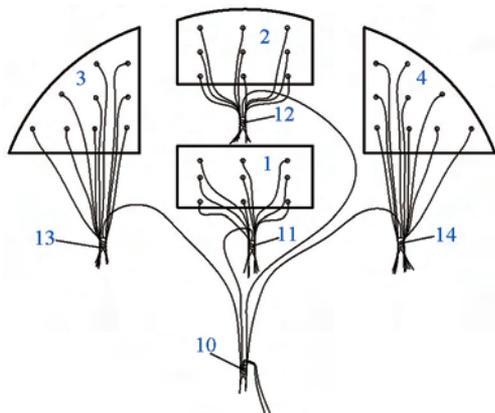


图7 起爆网路示意图

Fig. 7 Sketch map of initiation circuit

6 爆破振动验算

6.1 爆破振动计算参数 K 、 α 值的确定

《爆破安全规程》GB 6722—2003给出了不同岩性的 K 、 α 取值范围(见表4)。

表4 不同岩性的 K 、 α 值

Table 4 K , α of different lithology

岩性	K	α
微风化花岗岩	150	1.5
中风化花岗岩	200	1.65
强风化花岗岩	250	1.8

根据前期工程实践和实测数据,结合本次下穿建筑物左右线的地质剖面图,当爆破点至计算保护对象间为中风化花岗岩时, K 取200, α 取1.65。当爆破点至计算保护对象间为强风化花岗岩时, K 取250, α 取1.8。

6.2 爆破振动对地面建筑物的安全验算

对于本次下穿建筑物结构类型及基础形式均为砖混结构、毛石条基础,建成于2004年,抗振能力一般。根据《爆破安全规程》GB 6722—2003的爆破振动安全允许标准,地表建筑物的爆破振动安全允许标准为2 cm/s。

在本工程项目中,爆源与保护对象之间的距离 R 是已知的(见表5),可以用式(4)求算延时爆破时的爆破振速。

$$v = K \left(\frac{Q}{R} \right)^\alpha \quad (4)$$

式(4)中, R 为爆源与需要保护的建筑物之间的距离,m; Q 为炸药量,kg,齐发爆破为总药量,延时爆破为最大一段药量; v 为保护对象所在地质点振动安全允许速度,cm/s; K 、 α 为与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

表5 不同方案爆破参数及设计的单段最大起爆药量

Table 5 Blasting parameters of different scheme and the corresponding maximum charge of per delay interval

$R_{\text{掏槽}}/m$		$R_{\text{周边}}/m$		$Q_{\text{掏槽}}/kg$	$Q_{\text{周边}}/kg$
地下室	地表	地下室	地表		
9	12	7.4	10.4	0.1	0.1

注:表中的 $R_{\text{掏槽}}$ 指各方案掏槽爆破爆心分别距地下室地表及地表的距离, $R_{\text{周边}}$ 指各方案拱顶周边眼分别距地下室地表及地表的距离, $Q_{\text{掏槽}}$ 指各方案掏槽爆破单段最大起爆药量, $Q_{\text{周边}}$ 指各方案周边眼爆破单段最大起爆药量

根据下穿建筑物地质剖面图,如家快捷酒店和伊美尔整形医院基础底部地层均为中风化花岗岩,基础形式均为砖混结构、毛石条基础。隧道拱顶距如家酒店和伊美尔整形医院基础分别为5 m和6.4 m,单段最大起爆药量分别为0.1 kg和0.075 kg,因此只要验证如家酒店地面振速满足业主要求则伊美尔整形医院地面振速也满足振动控制要求。掏槽爆破时产生的振动最大,但考虑到上台阶拱顶周边眼距地表距离较近,同时加以验算。计算保护对象所在的质点振动安全允许速度结果如表6所示。

表6 爆破振动速度验算结果

Table 6 Checking computations of blasting vibration velocity

爆破方案	起爆位置	振动速度 $v/(cm \cdot s^{-1})$
A	掏槽爆破	1.50
	拱顶周边眼爆破	2.07

计算结果表明本设计所产生的爆破振动被控制在合理范围之内,地表建筑物的安全有较大保

障,是安全的。

7 爆破效果

监测结果表明,青岛地铁一期工程03号线03标段在K4+780.51~K4+900区段下穿如家快捷酒店、伊美尔整形医院施工过程中爆破振动控制良好,所产生的振动控制在2 cm/s以下,未对隧道上部建(构)筑物产生不良影响,且在爆破施工过程中未发生一例超振事故。同时在下穿施工过程中,沿线居民正常的工作生活基本未受到影响。至2013年8月,区间隧道均已顺利下穿地表建筑物,地表建筑物无墙体开裂及结构错位等损坏现象。

8 结语

1)相对于斜眼掏槽,采用大直径中空孔直眼掏槽能减少掏槽眼爆破振动强度,确保振速不超出振动控制标准。

2)通过实施浅孔爆破及分部起爆,尽最大努力控制最大单段药量,城区地铁硬岩隧道是在近距离条件下采用钻爆法下穿地表建筑物,并保证其

结构安全不受损伤。

3)通过采用“一次起爆分部延时爆破”技术,一方面解决了大断面隧道爆破施工导爆管雷管段数不能满足施工要求的问题,有效降低了爆破振动;二是解决了隧道分断面(特别是以左右方式分隔的分断面)施工不能同时实施爆破作业,施工效率低下的问题,可以保证工程的施工效率和进度。

参考文献

- [1] 李现森,付迎春,孙星亮.青黄海底隧道接线工程近接地面建筑物段爆破震动控制数值分析[J].石家庄铁道学院学报(自然科学版),2007,20(4):71-74.
- [2] 赵继增.青岛地铁隧道掘进的爆破控制及减振方法[J].地铁与轻轨,1998(5):25-30.
- [3] 李萍.渐进式大直径空孔螺旋掏槽爆破参数的研究[D].武汉:武汉理工大学,2010.
- [4] 周春锋.城市浅埋隧道开挖减震控制爆破技术[J].工程爆破,2001,7(1):57-61.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局.中华人民共和国国家标准:爆破安全规程[S].GB 6722—2003.
- [6] 邹定祥.复杂环境下的地铁隧道爆破技术[C]//第七届全国工程爆破学术会议论文集工程爆破文集.北京,2001.
- [7] 罗厚金,方俊波.青岛胶州湾海底隧道陆域段近距下穿地表建筑物爆破震动控制技术[J].隧道建设,2011,31(3):375-380.

Study on vibration reduction to adjacent surface building due to subway tunnel blasting

Fang Junbo

(China Railway Tunnel Stock Co. Ltd., Luoyang, Henan 471009, China)

[Abstract] To reduce the blasting vibration is important for blasting excavation in subway tunnel construction. Take the 3rd bid section of Line 3 of Qingdao subway project for example, the distance between tunnel vault and ground is 5~8 m, in order to insure the safety of the upper buildings, technologies of parallel cut with big empty hole, one-time initiation and delay by parts, and multiply short holes were adopted in the project. The results show that the maximum value of vertical vibration limited in the criterion allowance, and the upper buildings was intact. Besides, problems of shock conducting tube detonator delay number difficulty to meet large cross-section tunnel blasting excavation requirements, multiple cross-section can't initiation simultaneous, and low construction efficiency were solved, which ensure the construction safety and schedule.

[Key words] blasting design; parallel cut; big empty hole; delay-time initiation; short-hole blasting