



墙延伸段 10 m 以外的开挖区域定为本次爆破开挖区域,即图 1 中的 C 区和 D 区。

### 3 爆破设计

(1) 开挖区域均为中等风化的片麻岩,岩石坚固系数  $f=7 \sim 10$ ,炸药为 2 号岩石乳化炸药,明挖松动爆破单耗药量取  $0.3 \text{ kg/m}^3$ 。

(2) 火工材料的种类及规格:

炸药:2 号岩石乳化炸药;

雷管:毫秒非电雷管,段别为 MS1 ~ MS10;

传爆器材:导爆索;

起爆器材:火雷管。

(3) 预裂爆破设计:

采用手风钻钻孔:

孔径  $d_1 = 42 \text{ mm}$ 。

① 炮孔间距  $a$  的计算:

根据经验公式  $a = (7 \sim 10)d_1 = (7 \sim 10) \times 42 = 294 \sim 420(\text{mm})$ 。

选用  $a = 400 \text{ mm}$ 。

② 堵塞长度  $L_3$  的计算:

$L_3 = (1/3 \sim 1/2)H = (1/3 \sim 1/2) \times 2.35 = 0.784 \sim 1.175(\text{m})$ 。

选取  $L_3 = 1 \text{ m}$ 。

③ 超深  $h_{s2}$  的计算:

$h_{s2} = (0.12 \sim 0.3)H = (0.1 \sim 0.3) \times 2.35 = 0.235 \sim 0.705(\text{m})$

取  $h_{s2} = 0.25 \text{ m}$ 。

④ 柔性垫层:为减少爆破对坝基的影响,在炮孔底部设置柔性垫层,柔性垫层材料选用细沙,柔性垫层厚  $0.25 \text{ m}$ 。

⑤ 线装药密度  $q_x$  的计算:

$$q_x = 0.042[\alpha_p]^{0.63} a^{0.6} = 0.042 \times (70 \sim 100)^{0.63} \times 0.4^{0.6} = 0.3532 \sim 0.385(\text{kg/m})$$

选取  $q_x = 0.35 \text{ kg/m}$ 。

式中  $q_x$  为线装药密度,  $\text{kg/m}$ , 定义为全孔装药量扣除底部增加的装药量后除以长度;  $\alpha_p$  为岩石极限抗压强度,  $\text{MPa}$ ;  $H$  为开挖深度,  $\text{m}$ 。

⑥ 底部增加装药  $q_{x1}$  的计算:

$$q_{x1} = 1/3(H - L_3)f q_x = 1/3 \times (2.35 - 1) \times 0.35 \times 0.35 = 0.055(\text{kg})$$

式中  $f$  为孔底装药增加系数,选  $f=0.35$ 。

⑦ 单孔装药量  $Q_1$  的计算:

$$Q_1 = q_x(2.35 - 0.9) + q_{x1} = 0.35 \times (2.35$$

$$- 1) + 0.055 = 0.527(\text{kg})$$

选单孔装药量  $Q_1 = 0.5(\text{kg})$ 。

(4) 主爆区的设计。

采用垂直钻孔,由于开挖区域内上下游岩层开挖厚度差异较大,项目部根据开挖区域内的现场实际情况:靠近上游侧桩号  $0 + 34.000 \sim 0 + 68.000$  内的岩层较平整,平均厚度约为  $2.35 \text{ m}$ ,而下游侧桩号  $0 + 68.000 \sim 0 + 73.550 \text{ m}$  之间的岩层较厚,取平均开挖深度为  $4.6 \text{ m}$ ,因此,我们建议分两层爆破,每次爆破厚度不超过  $2.5 \text{ m}$ 。具体参数如下:

$H = 2.35 \text{ m}$ ;

采用手风钻钻孔:

$d_1 = 42 \text{ mm}$ 。

$$h_{s2} = (0.12 \sim 0.3)H = (0.1 \sim 0.3) \times 2.35 = 0.235 \sim 0.705(\text{m})$$

取  $h_{s2} = 0.25 \text{ m}$ 。

孔深:  $L = H + h_{s1} = 2.35 + 0.25 = 2.6(\text{m})$ 。

底盘最小抵抗线  $W_1$ :

$$W_1 = (15 \sim 30)d_1 = (15 \sim 30) \times 0.042 = 0.63 \sim 1.26(\text{m})$$

选取  $W_1 = 0.6 \text{ m}$ 。

孔距  $a$  和排距  $b$ :

$$a = mW_1 = (0.8 \sim 2) \times 0.6 = 0.48 \sim 1.2(\text{m})$$

式中  $m$  为密集系数,一般取  $0.8 \sim 2$ ; 选取  $a = 1 \text{ m}$ ; 一般取  $b = a/1.25 = 1/1.25 = 0.8$ , 取  $b = 0.8 \text{ m}$ 。

堵塞长度  $L_2 = (1/3 \sim 1/2) \times H = (1/3 \sim 1/2) \times 2.35 = 0.783 \sim 1.175(\text{m})$ ; 选取  $L_2 = 0.9 \text{ m}$ 。

对于单位炸药耗药量,由于本次爆破为松动爆破,岩石为片麻岩,其极限抗压强度为  $70 \sim 100 \text{ MPa}$ ,故选取单位炸药耗药量  $q = 0.3 \text{ kg/m}^3$ 。

单孔炸药量:

第一排单孔炸药量:

$$Q_1 = qaW_1H = 0.3 \times 1 \times 0.6 \times 2.35 = 0.44(\text{kg})$$

选用  $Q_1 = 0.5 \text{ kg}$ 。

从第二排孔开始,以后各排孔的每孔装药量:

$$Q_2 = kqabH = (1.1 \sim 1.2) \times 0.3 \times 1 \times 0.8 \times 2.35 = 0.621 \sim 0.68(\text{kg})$$

式中  $k$  为克服前排孔岩石阻力的增加系数,一般取  $1.1 \sim 1.2$ 。

选取  $Q_2 = 0.7 \text{ kg}$ 。

最终选取的爆破设计参数见表1。

表1 KENANA 渠首坝段下游消力池底板石方爆破设计参数表

炮孔类型	钻孔机械	孔径 /m	孔深 /m	间距 /m	排距 /m	孔数 /个	线装药密度 /kg·m <sup>-1</sup>	单耗药量 /kg·m <sup>-3</sup>	每孔装药量 /kg	总装药量 /kg	共计装药量 /kg
预裂孔	手风钻	42	2.6	0.4	0.6	270	0.35		0.5	135	2 130
主爆孔	手风钻	42	2.6	1	0.8	2 850		0.3	0.7	1 995	

#### 4 爆破安全核算

##### 4.1 空气冲击波超压值 $\Delta P$ 计算

(1) 主爆区爆破对现有混凝土结构及建筑物的影响。

主爆区排与排之间采取微差爆破,单响总药量为每排炮孔装药总量  $Q_1 = 39 \times 0.7 = 27.3 \text{ (kg)}$ 。

$$\Delta P_{11} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{11}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{20.125} \right)^{1.55} = 0.0779 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_{12} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{12}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{21.5} \right)^{1.55} = 0.0703 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_{13} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{13}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{104} \right)^{1.55} = 0.0065 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

式中  $\Delta P_{ij}$  为空气冲击波超压值,  $10^5 \text{ Pa}$ ;  $k, \alpha$  为经验系数和指数; 一般梯段爆破取  $k = 1.48, \alpha = 1.55$ ;  $Q_1$  为爆破炸药量,  $\text{kg}$ ; 延时爆破为最大一段药量;  $R_{ij}$  为药包至危害对象的距离,  $\text{m}$ 。现场测量结果表明:

第一排主爆孔几何中心距 KENANA 上游已有混凝土底板的距离  $R_{11} = 20.125 \text{ m}$ ;

第一排主爆孔几何中心距 59#支墩新浇混凝土结构面的距离  $R_{12} = 21.5 \text{ m}$ 。

根据现场测量得知:距爆破区域最近的发电厂的建筑物为 NEC 机修车间,第一排主爆孔几何中心距机修车间的距离  $R_{13} = 104 \text{ m}$ 。

$\Delta P_{11} = 0.0779 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  (原 KENANA 混凝土底板结构无损坏)

$\Delta P_{12} = 0.0703 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  (59#支墩新浇混凝土结构无损坏)

$\Delta P_{13} = 0.0065 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.09 \times 10^5 \text{ Pa}$  (对 NEC 机修车间无影响)。

(2) 预裂孔爆破对现有混凝土结构及建筑物的影响。

主要演算与主爆孔平行的一排预裂孔爆破对现有混凝土结构及建筑物的影响。该排预裂孔的炸药总量  $Q_2 = 48.5 \text{ kg}$

$$\Delta P_{21} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{21}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.5}}{20.125} \right)^{1.55} = 0.1048 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_{22} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{22}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.5}}{21.1} \right)^{1.55} = 0.0974 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$\Delta P_{23} = k \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{23}} \right)^\alpha = 1.48 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.5}}{104} \right)^{1.55} = 0.00822 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

式中  $R_{ij}$  为药包至危害对象的距离,  $\text{m}$ 。根据现场测量结果得知:

预裂孔爆破几何中心距 KENANA 上游已有混凝土底板的距离  $R_{21} = 20.125 \text{ m}$ 。

预裂孔爆破几何中心距 59#支墩新浇混凝土结构面的距离  $R_{22} = 21.1 \text{ m}$ 。

根据现场测量得知距爆破区域最近的发电厂的建筑物为 NEC 机修车间,预裂孔爆破几何中心距机修车间的距离  $R_{23} = 104 \text{ m}$ 。

$\Delta P_{21} = 0.1048 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  (原 KENANA 混凝土底板结构无损坏)

$\Delta P_{22} = 0.0974 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.25 \times 10^5 \text{ Pa}$  (59#支墩新浇混凝土结构无损坏)

$\Delta P_{23} = 0.00822 \times 10^5 \text{ Pa} < 0.09 \times 10^5 \text{ Pa}$  (对 NEC 机修车间无影响)。

以上计算结果均满足爆破安全规程要求的安全限制,故本次爆破的空气冲击波超压值满足安全要求。

##### 4.2 地震波

(1) 主爆区爆破产生的爆破质点震动速度:

$$V_{11} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{11}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{20.125} \right)^{1.65} = 8.705 \text{ (cm/s)}$$

$$V_{12} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{12}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{21.5} \right)^{1.65}$$

$$= 7.805 \text{ (cm/s)}$$

$$V_{13} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_1}}{R_{13}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{27.3}}{104} \right)^{1.65}$$

$$= 0.579 \text{ (cm/s)}$$

式中  $V_{ij}$  为质点的震动速度, cm/s;  $m$  为与爆破点到计算保护对象间的地形地质条件有关的系数;  $\beta$  为衰减指数; 根据岩石的极限抗压强度为 70 ~ 100 MPa, 可选  $m = 200$ ,  $\beta = 1.65$ 。根据现场测量结果得知:

第一排主爆孔几何中心距 KENANA 上游已有混凝土底板的距离  $R_{11} = 20.125 \text{ m}$ ;

第一排主爆孔几何中心距 59#支墩新浇混凝土结构面的距离  $R_{12} = 21.5 \text{ m}$ 。

根据现场测量结果得知: 距爆破区域最近的发电厂区的建筑物为 NEC 机修车间, 第一排主爆孔几何中心距机修车间的距离  $R_{13} = 104 \text{ m}$ 。

爆破安全规程规定:

水工隧洞质点震动速度不超过 13 cm/s;

新浇大体积混凝土龄期超过 28 d 的质点振动速度不超过 12 cm/s;

水电站机修站等质点振动速度不超过 1 cm/s。

$V_{11} = 8.705 \text{ cm/s} < 13 \text{ cm/s}$  (原 KENANA 混凝土底板结构无损坏)。

$V_{12} = 7.805 \text{ cm/s} < 12 \text{ cm/s}$  (59#支墩新浇混凝土结构无损坏)。

$V_{13} = 0.579 \text{ cm/s} < 1 \text{ cm/s}$  (对 NEC 机修车间无影响)。

(2) 预裂孔爆破产生的爆破质点震动速度对现有混凝土结构及建筑物的影响。

主要演算与主爆孔平行的一排预裂孔爆破对现有混凝土结构及建筑物的影响。该排预裂孔的炸药总量  $Q_2 = 48.5 \text{ kg}$ 。

$$V_{21} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{21}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.5}}{20.125} \right)^{1.65}$$

$$= 11.941 \text{ (cm/s)}$$

$$V_{22} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{22}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.5}}{21.1} \right)^{1.65}$$

$$= 11.044 \text{ (cm/s)}$$

$$V_{23} = m \left( \frac{\sqrt[3]{Q_2}}{R_{23}} \right)^\beta = 200 \times \left( \frac{\sqrt[3]{48.50}}{104} \right)^{1.65}$$

$$= 0.794 \text{ (cm/s)}$$

根据现场测量结果得知:

预裂孔爆破几何中心距 KENANA 上游已有混凝土底板的距离  $R_{21} = 20.125 \text{ m}$ 。

预裂孔爆破几何中心距 59#支墩新浇混凝土结构面的距离  $R_{22} = 21.1 \text{ m}$ 。

根据现场测量结果得知: 距爆破区域最近的发电厂区的建筑物为 NEC 机修车间, 预裂孔爆破几何中心距机修车间的距离  $R_{23} = 104 \text{ m}$ 。

$V_{21} = 11.94 \text{ cm/s} < 13 \text{ cm/s}$  (原 KENANA 混凝土底板结构无损坏);

$V_{22} = 11.044 \text{ cm/s} < 12 \text{ cm/s}$  (59#支墩新浇混凝土结构无损坏);

$V_{23} = 0.794 \text{ cm/s} < 1 \text{ cm/s}$  (对 NEC 机修车间无影响)。

以上计算结果均满足爆破安全规程要求的安全限制, 故本次爆破的质点震动速度满足安全要求。

## 5 所采取的其他爆破安全控制措施

(1) 为了控制飞石对人员及附近建筑物的影响, 将爆破飞石控制在 30 m 范围内。在爆破区域内铺设沙袋, 以最大限度地减少飞石对人员及附近建筑物的影响。

(2) 由专业爆破人员完成装药及整个起爆网络安装, 非专业爆破人员在整个装药过程中不得进入爆破区域。

(3) 待爆破完成后, 在专业爆破人员确认爆破区域内无危险后, 采用液压锤结合风镐对欠挖及未达到爆破效果的部位进行处理。

## 6 结语

2011 年 2 月 4 日, 我们根据爆破设计方案, 对 KENANA 渠首坝段下游消力池底板 C 区、D 区石方进行爆破。爆破结果表明: 通过爆破控制及采取安全防护措施, 消力池底板 C 区、D 区的石方松动爆破效果良好, 附近建筑物未受到破坏影响。

作者简介:

彭明(1977-), 男, 四川南部人, 工程师, 学士, 从事水利水电工程施工技术与管理工作。

(责任编辑: 李燕辉)