

# 元大高速华竹隧道围岩施工设计及计算分析

刘春<sup>1</sup> 方永昌<sup>2</sup>

1 元谋驹龙建设工程有限公司, 云南楚雄, 651300;

2 华睿建岩(天津)科技有限公司, 天津, 300000;

**摘要:** 针对云南高原元谋至大姚高速公路华竹隧道地质情况, 进行爆破开挖重点难点分析, 爆破技术若未妥善应用, 可能导致隧道出现超挖或欠挖现象, 甚至危及隧道工程的安全<sup>[1]</sup>, 预防施工开挖过程中地质灾害的发生, 对Ⅳ级围岩开挖进行爆破设计, 开挖方式中的上台阶参数与下台阶掘进炮孔参数进行研究。同时对全断面开挖进行参数计算确定。对整个爆破开挖安全设计进行参数取值建议, 为施工单位施工提供科学依据, 预防或减轻灾害发生后造成的人员伤亡和财产损失, 为类似工程情况的施工处理提供借鉴意义。

**关键词:** Ⅳ级围岩; 爆破设计; 上台阶; 下台阶; 全断面

**DOI:** 10.64216/3080-1508.26.02.019

## 1 工程概况

元谋至大姚(新街)高速公路起于元谋县大水井, 与既有京昆高速搭接; 终点在大姚县碧么村, 与拟建的大攀高速顺接。项目路线全长 79.489km, 其中: 元谋县境内里程 29.855km, 大姚县境内里程 49.634km。华竹隧道为分离式长隧道, 右幅隧道起讫桩号为 K9+635~K10+675, 全长 1040m, 最大埋深约 146.96m, 左幅隧道起讫桩号为 ZK9+635~ZK10+650, 全长 1015m, 最大埋深约 146.29m。隧道进口左右幅线间距约为 24.8m, 中间段左右幅线间距约为 25.4m, 隧道出口左右幅线间距约为 21.92m。隧道内左、右幅纵坡均为 2.5%。进口端隧道轴线与坡面正交进洞, 出口端隧道轴线与坡面斜交进洞, 隧道进口与出口均采用端墙式洞门。

## 2 地质情况

(1) 地层岩性, 场区整体覆盖面属于第四系残坡积(Qel+dl)粉质黏土、第四系更新统(Qp)粉质黏土, 下伏基岩为下元古界上昆阳群片麻岩片岩段(Pt1Kn21)片麻岩夹大理岩。第四系残坡积层(Qel+dl)粉质黏土: 褐黄、褐红色, 硬塑状态, 含约 10%的强风化碎石。第四系更新统(Qp)粉质黏土: 灰黄、灰色, 半成岩状态, 强度一般, 多以粉质黏土为主, 局部含卵砾石, 卵砾石含量 10~30%不等, 呈薄层状覆盖于夷平面上, 厚度变化较大。(2) 地质构造, 项目区域位于扬子准地台亚一级大地构造单元内, 属于康滇地轴二级构造单元, 位于燕山晚期褶皱带、晋宁运动后形成的盐边—元谋台拱

及中生代形成的大型陆相沉积拗陷—滇中中台陷内。

## 3 重难点分析

(1) 对于隧道爆破施工方案的研究, 刘传阳<sup>[2]</sup>等研究了分岔段隧道爆破的施工方案, 韩高升<sup>[3]</sup>等研究了与既有隧道共线隧道爆破开挖的施工方案。本文研究的内容, 隧道出口左幅 ZK10+470~ZK10+640 开挖边线右侧约 105m 处, 右幅 K10+460~K10+660 隧道开挖边线右侧约 5m~100.5m 各处有一 500kv, 高压线塔洞身爆破开挖过程中保证爆破振动不对该高压线塔不安全造成影响是本工程施工过程中的重点难点。(2) 隧道横穿一连续山体, 进出口均位于山体斜坡上, 隧道地下水不发育, 隧道进出口地表植被弱发育, 出口端地形坡度较陡。(3) 隧道出口右幅 K10+460~K10+660 隧道开挖边线右侧有 500kv 高压线塔; 经现场复核, 隧道右幅右侧有两个 500kv 高压线塔, 1 号电塔距离右幅隧道开挖线 5 米, 2 号电塔距离右幅隧道开挖线 100.5 米, 1 号电塔段设计围岩情况: 隧道围岩为中风化片麻岩, 强、中风化大理岩, 节理裂隙较发育, 岩体较完整, 呈块状构造。(4) 参考《元谋至大姚(新街)高速公路标段两阶段施工图设计》、隧道 V 级围岩地段采用三台阶法开挖<sup>[4-5]</sup>, 辅以超前支护, 新奥法施工开挖循环进尺控制在 0.8m 以内, 中台阶与下台阶循环进尺 1.5m 以内。Ⅳ级围岩地段、采用两台阶法开挖, 光面爆破, 新奥法施工, 炮眼放样定位利用激光分光装置, 将激光一次性投射到隧道掌子面, 准确定位隧道炮眼位置、开挖轮廓线、光爆层线<sup>[6]</sup>。开挖循环进尺控制 1.8m 以内, 下台阶循环进尺 1.8m 以内。紧急停车带采用三台阶施

工法光面爆破,开挖循环进尺控制在1.8m以内,中、下台阶循环进尺1.8m以内。

#### 4 IV级围岩爆破设计

##### 4.1 上台阶炮孔平均深度计算

(1) IV级围岩掘进断面积  $103.66\text{m}^2$ ,  $L=l/\eta=1.8/0.9=2\text{m}$  考虑二次钻孔方便设计取  $L=2.1\text{m}$ 。(2) 炮孔数量估算, 式中:  $q$  为炸药单耗单位:  $\text{kg}/\text{m}^3$  参考《爆破施册》及类似工程经验取  $0.9\text{kg}/\text{m}^3$ ,  $S$  为隧道掘进断面积  $103.66\text{m}^2$ ,  $m$  为单只 32# 乳化炸药长度单位  $\text{cm}$ 。 $\eta$  为循环利用率 0.9。 $a$  为炮孔平均装药系数: 0.6 (参考类似工程经验与计算),  $G$  为单只炸药重量单位  $\text{kg}$ 。

$$N \geq \frac{qSm\eta}{aG} = \frac{0.9 \times 103.66 \times 0.3 \times 0.9}{0.6 \times 0.3} = 139 \text{ 个}$$

(3) 炮孔直径选择, 炮孔直径选用:  $d=42\text{mm}$ 。每循环总炸药用量  $Q=qV=0.9 \times 103.66 \times 1.8=168\text{kg}$ 。

##### 4.2 上台阶参数

(1) 掏槽孔炮孔深度, 掏槽深度为:  $2.1+0.2=2.3\text{m}$ 。(2) 掏槽孔长度:  $L$  掏 1= $2.2\text{m}$  倾角  $50^\circ$  掏槽深度  $1.7\text{m}$ ;  $L$  掏 2= $2.3/\sin 57^\circ=2.7\text{m}$  倾角  $57^\circ$  掏槽深度  $2.3\text{m}$ ;  $L$  掏 3= $2.3/\sin 64^\circ=2.5\text{m}$  倾角  $64^\circ$  掏槽深度  $2.3\text{m}$ 。(3) 辅助孔及周边孔长度  $L$  辅、周= $2.1\text{m}$ 。(4) 掏槽孔布置参数, 采用三层掏槽孔, 内掏槽孔与开挖面的夹角取  $50^\circ$  中间孔槽孔与开挖面的夹角取  $57^\circ$  外掏槽孔与开挖面的夹角  $64^\circ$ , 掏槽孔间的距离取  $60\text{cm}$ 。共布置 28 个炮孔其中: 一级掏槽孔布置 12 个、二级掏槽孔布置 8 个、三级掏槽孔布置 8 个。(5) 掏槽孔总装药量:  $Q$  掏 1= $aLm/G=0.7 \times 2.2 \times 0.3/0.3=1.54\text{kg}$  设计取  $1.5\text{kg}$ , 共 12 个炮孔, 总装药量  $18\text{kg}$ 。 $Q$  掏 2= $aLm/G=0.7 \times 2.7 \times 0.3/0.3=1.89\text{kg}$  设计取  $1.9\text{kg}$  共 8 个炮孔, 总装药量  $15.2\text{kg}$  设计取  $16\text{kg}$ 。 $Q$  掏 3= $aLm/G=0.7 \times 2.5 \times 0.3/0.3=1.75\text{kg}$  设计取  $1.8\text{kg}$  共 8 个炮孔, 总装药量  $14.4\text{kg}$  设计取  $15\text{kg}$ 。式中:  $a$  为装药系数 0.7。 $L$  为炮孔长度单位  $\text{m}$ 。 $m$  为单只 32# 乳化炸药长度单位  $\text{cm}$ 。 $G$  为单只炸药重量单位:  $\text{kg}$ 。(6) 掏槽孔总装药量为  $Q_{\text{掏}}=Q_{\text{掏1}}+Q_{\text{掏2}}+Q_{\text{掏3}}=18+15.2+14.4=47.6\text{kg}$  设计取  $48\text{kg}$ 。(7) 周边孔参数: 周边孔间距及最小抵抗线根据围岩情况和隧道断面尺寸: 周边孔间距取  $50\text{cm}$ , 光爆层厚度取  $60\text{cm}$ 。为了保证开挖净空, 周边孔向外倾斜倾角与开挖面夹角  $3^\circ$ , 长度  $2.1\text{m}$ 。(8) 周边孔数量: 结合炮孔实际间距等, 精确把握周边眼的具体个数:  $N_{\text{周}}=1842/50+1=38$ 。(9)

周边孔总装药量: 为确保光面爆破实际成效, 周边孔线装药密度为  $q_{\text{周}}=0.3\text{kg}/\text{m}$ ; (参考《爆破设计与施工》) 则单孔装药量为:  $Q_{\text{周}}=Lzq_{\text{周}}=2.1 \times 0.3=0.61\text{kg}$  设计取  $0.6\text{kg}$  共布置 38 个炮孔, 总装药量  $22.8\text{kg}$  设计取:  $23\text{kg}$ 。

(10) 辅助孔参数: 考虑围岩坚固系数, 辅助孔装药系数取为 0.55, 共布孔 33 个, 孔间距  $70\text{cm} \sim 130\text{cm}$ , 炮孔长度  $2.1\text{m}$ 。(11) 辅助孔单孔装药  $Q_{\text{辅}}=aLm/G=0.55 \times 2.1 \times 0.3/0.3=1.15\text{kg}$  设计取  $1.2\text{kg}$  共布置 33 个炮孔, 总装药量:  $39.6\text{kg}$  设计取  $40\text{kg}$ 。 $G$  为单只炸药重量单位  $\text{kg}$ 。(12) 底板孔参数底板孔布置: 孔间距  $100\text{cm}$ , 距离边墙  $60\text{cm}$ , 炮孔长度  $2.1\text{m}$ 。共布置 13 个炮孔, 炮孔间距  $100\text{cm}$ 。(13) 底板孔总装药量装药, 为了保证地板平整装药系数取 0.6。 $Q_{\text{底}}=aLm/G=0.6 \times 2.1 \times 0.3=1.26\text{kg}$  设计取  $1.3\text{kg}$  共布置 13 个炮孔, 总装药量  $17\text{kg}$ 。

##### 4.3 下台阶带仰拱掘进炮孔参数

(1) 下台阶带仰拱共布置 3 排掘进炮孔, 共布孔 31 个, 炮孔层间距  $100 \sim 93\text{cm}$  孔间距  $115\text{cm}$  炮孔长度  $2.0\text{m}$  (参考《公路工程施工安全技术规范》JTG/F90-2015)。(2) 下台阶掘进孔总装药量  $Q_{\text{下总}}=aLm/G=0.55 \times 2 \times 0.3/0.3=1.1$  共布置 31 个炮孔, 总装药量  $34\text{kg}$ 。 $G$  为单只炸药重量单位  $\text{kg}$ 。(3) 下台阶周边孔参数, 边墙加仰拱长  $1536\text{cm}$ , 孔间距  $50\text{cm}$  光爆层厚度  $60\text{cm}$  公布孔 38 个。(4) 下断面周边孔总装药量  $Q_{\text{周下总}}=Lzq_{\text{周}}=0.3 \times 2.0=0.6\text{kg}$  共布置 38 个炮孔, 总装药量设计取  $23\text{kg}$ 。

#### 5 全断面开挖爆破参数

(1) 掏槽孔应比其它炮孔加深  $0.3\text{m}$ , 采用三级楔形掏槽, 掏槽孔布置在断面中央偏下, 并考虑辅助孔布置较均匀。掏槽孔开口宽度为  $2\text{m}$ , 排距  $0.6\text{m}$ 、 $0.7\text{m}$ , 深度分别为  $2\text{m}$ 、 $3.81\text{m}$ 、 $3.55\text{m}$ , 角度分别为  $63^\circ$ 、 $67^\circ$ 、 $80^\circ$ 。(2) 辅助孔: 辅助孔采用弧形布置与直线形布置相结合的方式, 取环向间距  $a=100 \sim 120\text{cm}$ 、排距  $=90 \sim 100\text{cm}$ 。(3) 光面爆破参数: 周边孔间距, 周边孔间距适当缩小, 可以控制爆破轮廓, 避免超欠挖, 又不致过大地增加钻孔工作量, 孔间距的大小与岩石性质、炸药种类、炮眼直径有关, 一般为  $a=(0.6 \sim 0.8)W_{\text{min}}$ , 本断面  $a$  的值选用  $a=50\text{cm}$ 。光面爆破层, 光面爆破层就是周边眼与最外层辅助孔之间的一围岩层, 光面爆破层厚度就是周边孔的最小抵抗线  $W_{\text{min}}$ , 一般为  $W_{\text{min}}=(10 \sim$

20)d, 本断面选值  $W_{\min}=80\text{cm}$ 。③炮眼深度  $L$ , 预计每循环进尺  $2.7\text{m}$ , 炮孔深度  $L=3\text{m}$ 。(4)底板孔:  $a=80\sim 100\text{cm}$ 、 $b=80\sim 100\text{cm}$ 。(5)炮孔装药量: ①掏槽孔, 掏槽眼的单孔装药量: I级掏槽孔装药系数取  $0.75$ , 装药量计算:  $Q_{\text{掏1}}=aLm/G=0.75\times 2.0\times 0.3/0.3=1.5\text{kg}$ , 共  $8$  个炮孔, 总装药  $12\text{kg}$ 。②II级掏槽孔装药系数取  $0.75$ ,  $Q_{\text{掏2}}=aLm/G=0.75\times 3.8\times 0.3/0.3=2.8\text{kg}$  共  $8$  个炮孔, 总装药量  $22.4\text{kg}$ 。③III级掏槽孔装药系数取  $0.75$ ,  $Q_{\text{掏3}}=aLm/G=0.75\times 3.6\times 0.3/0.3=2.7\text{kg}$  共  $8$  个炮孔, 总装药量  $21.6\text{kg}$ 。④周边孔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。本设计取光面爆破装药集中度为  $0.3\text{kg/m}$ , 单孔装药量为  $3.0\times 0.3=0.9\text{kg}$ 。光爆孔底部增强装药。⑤辅助孔, 按照辅助孔孔距不同, 装药系数取  $0.65$ , 单孔装药为  $3\times 65\%/0.2=9.75$  节, 实际装药取  $9$  节, 单孔装药量为  $1.8\text{kg}$ 。施工时, 不同位置的辅助孔装药量不同, 可根据情况适当调整。  $Q_{\text{辅}}=aLm/G=0.65\times 3\times 0.3/0.3=1.95\text{kg}$  设计取  $2\text{kg}$ , 共  $72$  个炮孔, 总装药量  $144\text{kg}$ 。⑥底板孔,  $Q_{\text{底}}=aLm/G=0.7\times 3.0\times 0.3/0.3=2.1\text{kg}$  共  $13$  个炮孔, 总装药量  $27.3\text{kg}$  设计取  $27\text{kg}$ 。

## 6 爆破安全设计

爆破有害效应分析与计算, 爆破振动核算, 根据萨道夫斯基爆破震动速度公式  $V=K(Q^{1/3}/R)^a$ 。式中:  $R$ —爆破区域与保护对象距离;  $Q$ —炸药量; 延迟爆破为最大一段药;  $V$ —保护对象所在地质点振动安全允许

速度, 本工程根据不同保护物取相应值。爆破振动安全允许标准 ( $V$  值)。

普通掘进爆破隧道设计最大单响药量  $22\text{kg}$ , 逐孔控制起爆最大单段起爆药量为  $1.9\text{kg}$ , 要求先行洞就近处衬砌结构爆破振动速度控制在  $8\text{cm/s}$  以内、铁塔爆破振动速度控制在  $5.0\text{cm/s}$  以内。此处围岩为片麻岩夹大理岩。查表为次坚岩石,  $K$  取  $200$ 、 $a$  取  $1.65$ 、设计按照  $k$ 、 $\alpha$  取值参考表预估值, 先施工进口段控制爆破, 根施工监测反馈的信息分析出合理的  $k$ 、 $\alpha$  用来指爆破导施工。

## 参考文献

- [1] 傅洪贤, 赵勇, 谢晋水, 等. 爆破施工隧道围岩稳定性研究[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(2): 67-70.
- [2] 刘传阳, 杨年华, 崔晋中, 等. 隧道分岔段爆破掘进技术研究[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(7): 54-59.
- [3] 韩高升. 新苔井山隧道平行近接爆破设计及施工研究[J]. 爆破, 2020, 37(2): 48-52.
- [4] 《公路隧道施工技术规范》JTG-3660-2020.
- [5] 《公路工程施工安全技术规范》JTG/F90-2015.
- [6] 冯洲, 续欣莹, 郑宇轩, 等. 动态场景下基于实例分割和三维重建的多物体单目 SLAM[J]. 仪器仪表学报, 2023(8): 51-62.

作者简介: 刘春 (1986—), 男, 汉族, 湖南娄底人, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向: 公路工程。