

DOI: 10.7672/sgjs2026020106

# 基于稳定性分析的仰坡卸荷与隧道爆破 进洞交叉施工研究\*

赵欢聪<sup>1</sup>, 杨承民<sup>2</sup>, 李敏<sup>1</sup>, 叶四桥<sup>2</sup>, 曾彬<sup>2</sup>

(1. 湖州市公路与运输管理中心, 浙江 湖州 313099; 2. 重庆交通大学河海学院, 重庆 400074)

[摘要] 在湖州市戚家山隧道工程中, 进行隧道爆破进洞与仰坡切坡交叉施工时, 利用有限元分析法对高边坡稳定性进行分析, 建立监测点分析边坡位移峰值与安全系数。研究表明, 戚家山双洞隧道因地质环境较差, 后缘裂隙发育, 隧道洞口仰坡初始欠稳定。当隧道进洞爆破施工时, 边坡可能进一步整体性滑动, 对安全施工产生较大隐患, 模拟分析后发现边坡塑性区贯通, 上部岩体有沿滑面滑动的趋势, 此时边坡安全系数仅 1.13, 第 8 级边坡切坡后边坡位移下降明显, 塑性区并未贯通, 边坡安全系数为 1.33, 处于稳定状态。当确定隧道进洞到 4, 26, 42, 66, 74, 92, 108m 时, 需分别对边坡进行卸荷, 90m 以后隧道爆破施工对边坡产生的影响明显减弱, 108m 以后对边坡整体产生的影响较小。进行对应进尺隧道开挖时, 应保证边坡切坡到对应级别, 即可保证现场隧道与边坡安全施工, 证明交叉施工的可行性。

[关键词] 隧道; 仰坡; 稳定性; 爆破; 开挖; 交叉施工

[中图分类号] U455.6

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2026)02-0106-05

## Cross Construction of Tunnel Blasting Excavation and Front Slope Unloading Based on Stability Analysis

ZHAO Huancong<sup>1</sup>, YANG Chengmin<sup>2</sup>, LI Min<sup>1</sup>, YE Siqiao<sup>2</sup>, ZENG Bin<sup>2</sup>

(1. Huzhou Highway and Transportation Management Center, Huzhou, Zhejiang 313099, China;

2. School of River &amp; Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** In the Qijia Mountain Tunnel project in Huzhou City, when conducting cross-construction of tunnel blasting and slope cutting, the finite element analysis method was utilized to analyze the stability of the high slope, and monitoring points were established to analyze the peak displacement and safety factor of the slope. The research results show that, due to the poor engineering geological environment of Qijia Mountain Tunnel and the development of fissures at the trailing edge, the front slope is currently in an unstable state. When the tunnel is blasted into the hole, the slope may further slide as a whole, which will cause great hidden dangers to the safe construction. The slope safety factor is only 1.13. After the 8-level slope is cut, the slope displacement decreases significantly, the plastic zone is not penetrated, and the slope safety factor is 1.33 in a stable state. It is determined that when the tunnel enters the tunnel to 4, 26, 42, 66, 74, 92, 108m, the slope needs to be unloaded respectively. After 90m, the impact of tunnel blasting construction on the slope is significantly weakened. After 108m, it has only a small impact on the overall slope. During the excavation of the above-mentioned corresponding footage tunnel, ensuring that the slope is cut to the corresponding level can ensure the safe construction of the on-site tunnel and the slope, which proves the feasibility of cross construction.

**Keywords:** tunnels; front slope; stability; blasting; excavation; cross construction

\* 浙江省交通运输厅科技计划(2022-GCKY-01); 重庆市建设科技计划(城科字 2024 第 1-8 号); 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2020021)

[作者简介] 赵欢聪, 高级工程师, E-mail: 3612267@qq.com

[通信作者] 曾彬, 副教授, 硕士生导师, E-mail: zb@cqjtu.edu.cn

[收稿日期] 2025-09-25

## 0 引言

目前我国隧道建设进入新的发展阶段,面临的困难越来越多<sup>[1-2]</sup>,如许多隧道工程需穿过场地条件复杂的区域,且经常面临断层、破碎带、震动、滑坡以及溶洞群等不利条件。此外,当隧道左右洞间距或埋深过小时,隧道进洞施工可能进一步影响边坡稳定性。吴红刚等<sup>[3]</sup>分析隧道现场监测数据,与双洞隧道与边坡耦合变形机制及隧道-边坡体系,提出双洞隧道-边坡体系变形机制理论。隧道边坡坡面通常受地表水侵蚀与外界风化作用,同时由于洞口段隧道埋深较浅,隧道衬砌结构上部岩体因承载力不足,导致洞口仰坡地表坡面易受拉开裂,若此时再受隧道进洞开挖扰动影响,会影响其稳定性<sup>[4]</sup>。叶小兵等<sup>[5]</sup>对已稳定的滑坡坡脚进行切坡施工,导致山体失稳导致滑坡,所以在保证隧道安全进洞施工前提下进行边坡滑坡治理是值得研究的方向。方建勤等<sup>[6]</sup>运用极限平衡与有限元法评价隧道左、右洞口的仰坡稳定性。肖万春等<sup>[7]</sup>运用赤平投影、极限平衡法计算隧道洞口段仰坡的稳定性,并得出安全系数与应力云图。李斌等<sup>[8]</sup>得出滑移-压碎-剪断失稳模式,并结合边坡地质力学模型、极限平衡及强度理论推导出陡倾顺层岩质边坡滑移-压碎-剪断失稳的判据。金培杰<sup>[9]</sup>基于重庆万梁高速公路高边坡失稳问题建立地质概念模型,得到边坡变形滑动成因与机制。大部分研究主要针对隧道开挖对边坡稳定性的影响,对边坡卸荷与隧道进洞交叉施工下的高边坡稳定性研究较少。本文利用 MIDAS GTS 有限元软件建立数值模型,分析交叉施工的可行性,并研究隧道爆破施工时振动速度的传递规律,得到受隧道施工影响的边坡位移和安全系数变化规律。

## 1 工程概况

104 国道长兴李家巷至湖州施家桥段的戚家山隧道处于低山丘陵区,所属山脉呈东西向长条状,隧道穿越山体地势起伏较大,最大埋深为 140m。洞口洞顶标高为 33.000m,洞口埋深约 44m,隧道净宽 14m、净高 9.1m,隧址区地面最高点高程约 175.000m,隧道设计洞顶高程 30.000~38.000m,属越岭隧道。边坡共 8 级台阶,卸荷后坡率为 1:1.45,台阶宽 2m。出口端上部山体现状如图 1 所示。隧道进洞口丘陵斜坡的自然坡度约 10°,隧道埋深浅,坡表植被发育。隧道明暗交界桩号为 K1+680(左洞 ZK1+695),洞口桩号为 K1+700(左洞 ZK1+715)。

由图 1 可知,隧道洞口上部山体为强风化岩体,

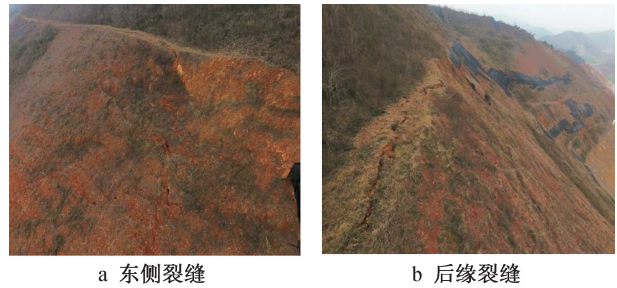


图 1 隧道出口端上部山体现状

Fig. 1 Status of the upper part of the mountain at the exit end for the tunnel

已出现明显的大范围变形和裂缝,边坡处于欠稳定状态,严重威胁坡底隧道进洞施工,为保证施工安全,边坡处治与隧道进洞施工应交叉进行。

## 2 数值分析

### 2.1 建立模型

根据戚家山隧道的工程地质条件,结合边界效应,在双洞隧道两侧延展 3~5 倍的隧道截面宽度,建立 260m×175m×153m 的数值模型,左右洞间距 30m。根据场地勘察报告可知,隧道洞口附近存在东西向断层破碎带,开挖后应及时进行支护,防止隧道冒顶或拱顶沉降受构造带影响。戚家山隧道洞口段内部围岩较破碎,为 V 级围岩 1;上部坡体表面受风化影响,为 V 级围岩 2,如图 2 所示。

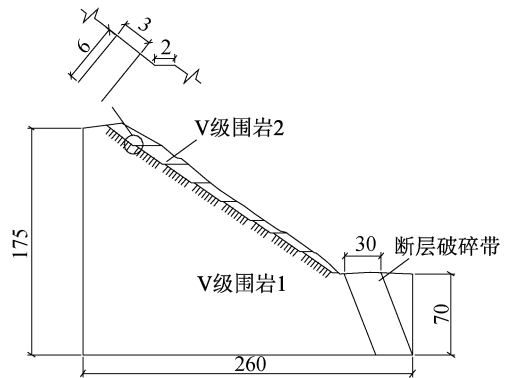


图 2 边坡计算模型(单位:m)

Fig. 2 Calculation model of slope(unit:m)

边坡加固采用锚喷支护方式,即 20cm 厚的 C20 喷混凝土加钢筋网与  $\phi 22$  砂浆锚杆的形式,隧道衬砌由初期支护、二次衬砌与内支撑组成,其中钢拱架物力学参数通过折算到喷射混凝土的形式体现<sup>[10]</sup>。

$$E_z = \frac{A_g E_g + S_c E_c}{A_g + S_c} \quad (1)$$

$$\rho_z = \frac{A_g \rho_g + S_c \rho_c}{A_g + S_c} \quad (2)$$

式中: $E_z$  为折算后的初期支护弹性模量; $E_g, E_c$  分别

为钢拱架和喷射混凝土的弹性模量;  $\rho_z$  为折算后的混凝土密度;  $\rho_g, \rho_c$  分别为钢拱架和喷射混凝土的密度;  $A_g$  为钢拱架截面积;  $S_c$  为喷射混凝土截面积。

模型计算中围岩及衬砌结构的物理力学参数如表 1 所示。

表 1 围岩及衬砌结构物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of surrounding rock and lining structure

项目	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	重度 $\gamma/$ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	黏聚力 $c/\text{kPa}$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
V级围岩 1	1 800	0.28	23	70	23
V级围岩 2	2 000	0.28	27	120	23
破碎带	1 600	0.30	21	60	22
初期支护	28 000	0.20	22	—	—
二次衬砌	30 000	0.20	22	—	—
内支撑	23 000	0.20	25	—	—
锚杆	2 100 000	0.25	78	—	—
边坡喷射 混凝土	25 000	0.30	22	—	—

进行模拟分析前,在边坡每级底部设置 1 个监测点,共设 8 个监测点。监测点主要反映隧道开挖后边坡位移、振速与安全系数的变化情况,其布设形式如图 3 所示。

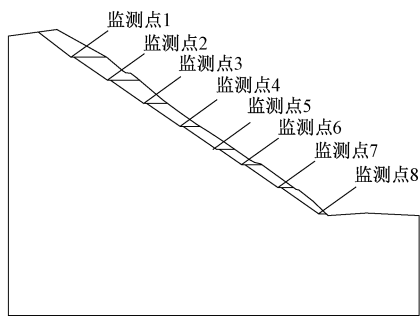


图 3 监测点布设

Fig. 3 Layout of monitoring points

### 2.2 爆破荷载确定

爆破时岩体内部产生的应力波一般呈三角形,前期荷载快速到达峰值,然后快速衰减,此时回弹膨胀现象出现于围岩中,用三角形荷载模拟爆破产生的荷载符合实际<sup>[11]</sup>,三角形形式的最大爆破荷载  $P_{\max}$  计算如下:

$$P_{\max} = \frac{139.97}{Z} + \frac{844.81}{Z^2} + \frac{2\ 154}{Z^3} - 0.803\ 4 \quad (3)$$

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{Q}} \quad (4)$$

式中:  $Z$  为比例距离;  $R$  为爆破中心到荷载作用面的距离,此处取 1.5m;  $Q$  为炸药量,此处取 8kg。根据现场数据绘制隧道爆破的荷载时程曲线,如图 4 所示。

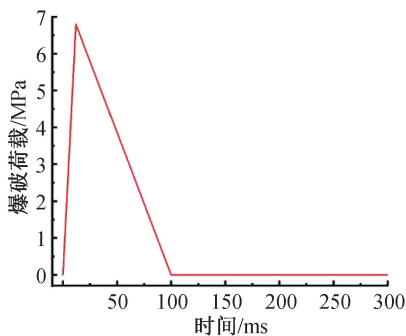


图 4 爆破荷载时程曲线

Fig. 4 Blasting load time-history curve

### 2.3 工况设置

首先对欠稳定边坡进行卸荷加固,当安全系数达到 1.30 后隧道左洞先行施工,施工 30m 后右洞开始施工,采用双侧壁导坑法以 2m 为 1 个研究段,分析该段时间内边坡的稳定性,若不稳定则对边坡进行卸荷与加固,稳定后开始分析下个研究段。

### 3 模拟结果与分析

#### 3.1 初始稳定性分析

由第 8 级切坡前后边坡稳定性的有限元云图可知,在自然工况下,边坡坡顶附近位移最大,坡顶  $x, z$  向最大位移分别为 7.75, 14.44mm, 根据强度折减法模拟得到边坡稳定性系数为 1.13, 即边坡处于欠稳定状态。由初始边坡等效塑性应变有限元云图可知,边坡出现 1 条剪应变增量变化较快的区域,且已贯通,当边坡  $x$  与  $z$  向位移持续增大时,坡顶可能因为拉应力出现拉裂的现象,这条剪应变快速变化的区域极有可能在隧道施工时产生滑坡,导致边坡整体失稳。

如图 5 所示,卸荷后  $x$  向最大位移为 6.01mm,  $z$  向最大位移为 -11.46mm, 对比卸荷前分别下降 24.06%, 21.07%, 合向最大位移减少 40%, 当边坡进行第 8 级卸荷支护后,边坡安全系数为 1.33, 对比卸荷前增大 11.8%, 为稳定状态。各监测点的  $x, z$  向位移明显减小, 塑性区并未贯通, 因此开始隧道施工。

#### 3.2 第 7, 6, 5 级切坡前后边坡位移分析

第 8 级卸荷后边坡趋于稳定, 现进行隧道爆破施工, 爆破时第 5, 6, 7 级卸荷前后边坡位移变化如图 6 所示。由图 6 可知, 隧道进洞 2, 26, 42m 时, 边坡安全系数分别为 1.26, 1.28, 1.27, 处于欠稳定状态, 因此需对边坡进行卸荷。卸荷后安全系数均 > 1.30, 各监测点的位移明显减小。卸荷后最大位移分别为 11.43, 10.65, 7.57mm, 对比卸荷前分别下降 3.06%, 10.88%, 15.91%。因爆破影响使隧道拱顶与坡脚位移最大, 施工时应重点进行监控量测。

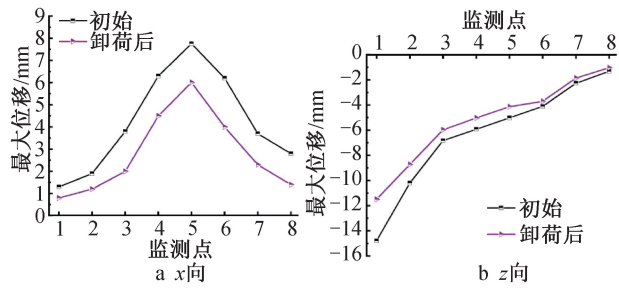


图5 卸荷前后边坡位移变化

Fig. 5 Slope displacement change before and after unloading

卸荷后,边坡塑性区未出现贯通,边坡坡脚处塑性应变值最大,整体对边坡影响较小。此时隧道进洞能保证边坡稳定,确保施工安全。

### 3.3 第4,3,2级切坡前后边坡位移分析

卸荷第7,6,5级后边坡趋于稳定,现进行隧道爆破施工。由爆破时第4,3,2级卸荷前后边坡位移云图及对比曲线可知,当隧道进洞66,74,92m时,边坡安全系数分别为1.28,1.28,1.29,处于欠稳定状态,因此需对边坡卸荷。卸荷后安全系数均 $>1.30$ ,各监测点位移明显减小。卸荷后最大位移分别为5.50,4.25,3.14mm,对比卸荷前分别下降3.17%,8.02%,10.12%。坡顶处位移由隆起变为沉降,说明隧道进洞施工时,坡体先与边坡卸荷加固区产生挤压,上部岩体先向上发育,后因隧道施工坡体向下沉降。因爆破影响使拱顶与坡脚处位移最大,施工时应重点进行监控量测。卸荷后,边坡塑性区未出现贯通,边坡坡脚处塑性应变最大,整体对边坡影响较小。此时隧道进洞能保证边坡稳定,确保施工安全。

### 3.4 第1级切坡前后边坡位移分析

如图6a所示,边坡进行第1级卸荷支护后,边坡安全系数为1.32,超过规范中1级边坡安全系数1.3的规定,处于稳定状态。各监测点位移明显减小,卸荷后最大位移为3.43mm,对比卸荷前下降12.01%。与自然工况不同,因爆破影响使第2~4级边坡位移较大,施工时应重点进行监控量测,此时隧道进洞能保证边坡稳定,因此继续施工。在后续模拟中,随着爆源埋深与进洞距离不断增大,边坡位移变化较小,边坡安全系数为1.33,处于稳定状态,此时边坡稳定性对比之前增加0.01,隧道施工不会对边坡产生较大影响。

### 3.5 爆破施工注意事项及现场监测结果

为降低隧道爆破对洞口边坡扰动的影响,需注意以下事项:①慎重选择爆破参数,包括单位药量、爆破间隔时间及起爆方式等,必须进行多次试

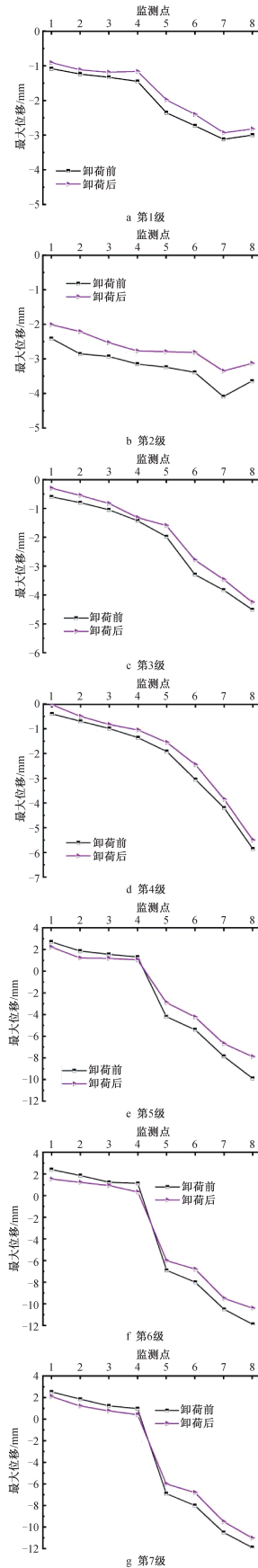


图6 隧道贯通竣工后洞口边坡各监测点位移量

Fig. 6 Displacement of each monitoring point of the portal slope after the tunnel completion

爆并对结果进行归纳总结后,才可供施工采用;②对于地质条件复杂的工况,可适当减少药量,避免对洞口边坡、周围设施及环境产生影响;③严格按照设计布置爆破孔位和孔径,并根据施工现场情况进行技术交底,完成钻孔后,逐一检查,再装药爆破;④同一地段地质状况有变时,需再次试爆,以准确确定施工参数,若遇不良地质(如夹层、大孔隙等)情况,应由技术人员局部调整孔位布置;⑤爆破器材在使用前需检查其完好性,如雷管引爆管是否完整、有无变形等;⑥爆破完毕后,应及时检查爆破地段情况,及时上报和处理出现的问题,并采取必要防护措施。

戚家山隧道于2020年5月17日开工,2022年8月15日贯通竣工,相比初始未施工前,隧道贯通竣工后8个监测点的位移变化如图7所示。可以看出,8个监测点的位移量较小,处于稳定状态,说明隧道内爆破施工对切坡后的洞口边坡稳定性没有产生较大影响。

#### 4 结语

1)戚家山双洞隧道因工程地质环境较差,围岩较破碎,边坡高陡,洞口段仰坡有较厚的滑坡体,且后缘裂隙发育,表明该边坡目前处于欠稳定状态。当隧道进洞爆破施工时,坡体易滑动,未来可能进一步发生整体性滑动,应及时采取卸荷等措施。

2)边坡一开始处于欠稳定状态,塑性区已贯通,上部岩体有沿滑面滑动的趋势,此时边坡安全系数仅1.13,在隧道爆破施工影响下会导致边坡位移骤变,可能产生滑坡等地质灾害。因此,需对边坡进行卸荷加固,卸荷第8级边坡后, $x, z$ 向位移分别下降24.06%,21.07%,塑性区此时并未贯通,边坡安全系数为1.33,处于稳定状态。

3)模拟时确定隧道从进洞到4,26,42,66,74,92,108m时需分别对边坡进行卸荷,到达90m后隧道爆破施工对边坡产生的影响明显减弱,位移曲线趋于收敛,到达108m后对边坡整体仅产生较小的影响。在上述对应进尺隧道开挖时,应保证边坡切坡到对应级别,以保证现场隧道与边坡安全施工,由隧道贯通竣工后监测结果证明交叉施工可行。

#### 参考文献:

[1] 杨会军,胡春林,谌文武,等.断层及其破碎带隧道信息化施工[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3917-3922.  
YANG H J, HU C L, CHEN W W, et al. Information construction of the tunnel in a fault and crush[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2004, 23(22): 3917-3922.

[2] 张志勇,张国强,连佳机,等.层状软岩隧道塌方原因分析及对策[J].公路,2010,55(2):190-193.

ZHANG Z Y, ZHANG G Q, LIAN J J, et al. Analysis of causes of collapse in layered soft rock tunnels and countermeasures[J]. Highway, 2010, 55(2): 190-193.

[3] 吴红刚,吴道勇,马惠民,等.隧道-滑坡体系类型和隧道变形模式研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(S2):3632-3642.  
WU H G, WU D Y, MA H M, et al. Research on tunnel-landslide system types and tunnel deformation modes[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2012, 31(S2): 3632-3642.

[4] 董永.公路隧道洞口边坡稳定性分析[D].上海:同济大学,2008.  
DONG Y. Research on slope stability of the tunnel entrance[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.

[5] 叶小兵,罗翔,高海东.高速公路隧道洞口仰坡滑坡监测与治理[J].铁道工程学报,2002,19(3):48-50,53.  
YE X B, LUO X, GAO H D. Landslide monitoring and its preventive treatments for elevated slope at tunnel portal of certain expressway[J]. Journal of railway engineering society, 2002, 19(3): 48-50, 53.

[6] 方建勤,廖树忠.隧道施工对洞口边坡稳定性影响研究[J].公路,2009,54(12):192-196.  
FANG J Q, LIAO S Z. Research on impact of tunnel construction on stability of tunnel entrance slope[J]. Highway, 2009, 54(12): 192-196.

[7] 肖万春,邹林,田茂中.洪家渡水电站工程地质问题及对策[J].水力发电,2001,27(9):5-8,58.  
XIAO W C, ZOU L, TIAN M Z. Main engineering geological problems of Hongjiadu Hydropower Station and their countermeasures[J]. Water power, 2001, 27(9): 5-8, 58.

[8] 李斌,黄达,王复明,等.陡倾顺层岩质边坡滑移-压碎-剪断型失稳机制及判据研究[J].施工技术(中英文),2024,53(24):38-44.  
LI B, HUANG D, WANG F M, et al. Research on sliding-crushing-shearing type instability mechanism and criteria of steeply inclined progressive rock slope[J]. Construction technology, 2024, 53(24): 38-44.

[9] 金培杰.重庆市万梁高速公路顺层岩石高边坡失稳破坏机制与稳定性评价[J].岩石力学与工程学报,2003,22(S2):2748-2750.  
JIN P J. Instability failure mechanism and stability evaluation of the high slope of rock along the bedding of Wanliang Expressway in Chongqing City[J]. Chinese journal of rock mechanics and engineering, 2003, 22(S2): 2748-2750.

[10] 李浩,王立彬,王飞球,等.高铁隧道支护参数多目标优化研究[J].林业工程学报,2021,6(5):169-175.  
LI H, WANG L B, WANG F Q, et al. Research on multi-objective optimization of support parameters of high-speed railway tunnel[J]. Journal of forestry engineering, 2021, 6(5): 169-175.

[11] 毕继红,钟建辉.邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J].工程爆破,2004,10(4):69-73.  
BI J H, ZHONG J H. Study on influence of blasting vibration from excavation of a new tunnel on existed tunnel[J]. Engineering blasting, 2004, 10(4): 69-73.