

中文引用格式:彭亚雄,周子霖,姚颖康,等. 爆破作用下层状围岩隧道突变失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 171-178.

英文引用格式:PENG Yaxiong, ZHOU Zipei, YAO Yingkang, et al. Study on catastrophe instability criterion of layered surrounding rock in tunnel under blasting[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 171-178.

爆破作用下层状围岩隧道突变失稳判据研究*

彭亚雄^{1,2}副教授, 周子霖¹, 姚颖康²高级工程师, 刘运思¹副教授, 左清军³副教授

(1 湖南科技大学 岩土工程稳定控制与健康监测湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201;

2 江汉大学 省部共建精细爆破国家重点实验室, 湖北 武汉 430056;

3 三峡大学 防灾减灾湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

中图分类号: X913.4; TU235.1 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.01.2440

基金项目: 湖南省教育厅科学研究项目(22B0486); 江汉大学省部共建精细爆破国家重点实验室、江汉大学爆破工程湖北省重点实验室联合开放基金资助(PBSKL-2022-D-08)。

【摘要】 为判断爆破振动与损伤作用下层状岩体隧道的围岩稳定性, 根据层状围岩失稳特征建立隧道力学模型, 考虑爆破损伤和振动效应, 构建层状围岩隧道系统总势能方程和突变失稳判据, 分析爆破作用下层状围岩稳定性演化规律; 并以沪昆高铁湖南段姚家隧道为工程背景, 分析层状围岩隧道稳定性。结果表明: 层状围岩隧道发生突变失稳的充要条件是满足分岔集方程, 即当突变特征值 $\Delta \leq 0$ 时系统可能发生突变失稳; 爆破累积效应造成围岩刚度不断降低, 爆破药量增加提高爆破振动效应, 这些均导致层状围岩失稳概率增加; 实际隧道失稳评价结果与施工现场情况、监测结果一致, 验证了失稳判据的有效性。

【关键词】 爆破作用; 层状围岩隧道; 失稳判据; 突变理论; 稳定性

Study on catastrophe instability criterion of layered surrounding rock in tunnel under blasting

PENG Yaxiong^{1,2}, ZHOU Zipei¹, YAO Yingkang², LIU Yungsi¹, ZUO Qingjun³

(1 Hunan Provincial Key Laboratory of Geotechnical Engineering for Stability Control and Health

Monitoring, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan Hunan 411201, China; 2 State

Key Laboratory of Precision Blasting, Jiangnan University, Wuhan Hubei 4300561, China;

3 Hubei Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation, China Three Gorges

University, Yichang Hubei 443002, China)

Abstract: In order to judge the stability of the surrounding rock in a tunnel under the blasting vibration and damage, the mechanics model was established according to the instability characteristics of the layered surrounding rock. Considering the blasting damage and vibration effect, the total potential energy equation and catastrophe instability criterion were established, and the stability evolution law of tunnel under blasting was analyzed. Taking Yaojia tunnel in Hunan of Shanghai-Kunming high-speed railway as an engineering background, the stability of the layered surrounding rock in the tunnel was analyzed. The

results show that the necessary and sufficient condition for the catastrophe instability of layered surrounding rock in the tunnel satisfies the bifurcation equation, that is, when the mutation eigenvalue $\Delta \leq 0$, the system may suffer catastrophe instability. The cumulative effect of blasting results in the continuous reduction of surrounding rock stiffness, and the increase of blasting charge aggravates the blasting vibration effect, both of which increase instability probability for stratified surrounding rock. The actual instability evaluation results are consistent with the construction site situation and monitoring results, which verifies the effectiveness of the instability criterion.

Keywords: blasting effect; layered surrounding rock tunnel; instability criterion; catastrophe theory; stability

0 引言

层状岩体是自然界中广泛分布的含有宏观层理的非连续介质^[1]。层状岩体特殊的层理构造,使其具有显著的各向异性特征,层理面易发生弯曲、拉伸及剪切破坏,对隧道围岩稳定性有重大影响^[2]。层状围岩隧道爆破开挖过程中,爆炸应力波使层状岩体发生初始劣化开裂,爆生气体导致层状岩体的层理面、裂隙在准静态和动态压力下张开与扩展,极易导致围岩破坏失稳,给施工带来极大隐患。

为确保隧道施工过程中层状围岩保持稳定,国内学者开展了大量研究。夏彬伟等^[3]研究了隧道层状围岩的应力分布特征与破坏过程,发现随着荷载增加,围岩呈现偏压破坏模式。温建永^[4]分析了层状岩体隧道病害特征与原因,提出了病害段的整治方法和施工控制措施。黄智刚等^[5]探讨了富水板岩的软化机制,构建了板岩非线性软化力学模型。王登科等^[6]利用离散元数值方法分析了岩层倾角影响的层状岩体隧道围岩变形规律。爆破损伤和振动效应对层状围岩隧道施工稳定性影响极大。吴亮等^[7]建立了既有层状围岩隧道迎爆侧最危险点的简化力学模型,分析了隧道半径与岩层厚度比、岩层倾角和隧道埋深等因素对隧道围岩稳定性的影响。MA Longhao 等^[8]分析了爆破作用下层状岩体应力波传播、裂纹扩展和断裂模式,探讨了不同爆破工况下围岩渐进破坏过程。

层状岩体隧道的内鼓破坏形式十分常见,其破坏表现出突变特征,属于几何非线性稳定问题。突变理论作为非线性问题的重要分析手段,已经应用于层状岩体稳定性研究。姜永东^[9]和穆成林^[10]等采用突变理论,分别建立了层状岩体弯折破坏失稳模型和层状边坡失稳的燕尾突变模型,应用于实际工程稳定性评价并取得较好效果。已有研究成果分析了考虑层理特征的隧道围岩稳定性问题,获得了

围岩变形特征和失稳判据。但现有成果均罕有分析爆破反复作用隧道围岩稳定性,没有推导考虑爆破作用的围岩失稳判据。

鉴于此,笔者拟在研究考虑层状围岩隧道力学模型基础上,考虑爆破损伤效应和爆破振动效应,推导层状围岩隧道突变失稳判据,并应用于工程实践,以为隧道围岩失稳分析与控制提供理论依据。

1 层状围岩隧道力学模型

1.1 力学模型

层状岩体隧道进行爆破施工,爆破应力波和地震波作用下层状岩体易发生弯折内鼓破坏,进而引起隧道失稳。对于隧道层状围岩,各层岩体的长度与宽度远大于厚度,可将其变形破坏问题简化为简支梁的稳定性问题^[11]。岩梁弯曲变形中间最大,向两侧逐渐减少。根据文献[12],层状围岩的简化力学模型如图1所示。图中: l 为岩梁长度,m; h 为厚度,m; b 为宽度,m,取值1; α 为岩层角度,(°); E 为弹性模量,GPa; σ_1 为垂直地应力,MPa; σ_2 为水平地应力,MPa。上覆围岩压力及岩梁自重的分布集度 $q = \gamma_c \times h$,kN/m²,其中, γ_c 为岩体重度,kN/m³。 F 为岩梁承受横向作用力,kN,其计算公式如下^[12]:

$$F = [q \sin \alpha - (c + q \cos \alpha \tan \varphi)] l \quad (1)$$

式中: c 为岩体黏聚力,MPa; φ 为岩体内摩擦角,(°)。

根据层状围岩的简化力学模型,岩梁弯曲的挠度曲线可假定为:

$$y = \frac{u}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi x}{l} \right) \quad (2)$$

式中 u 为 $x=l/2$ 处的挠度。

1.2 爆破作用效应

1) 爆破损伤效应。爆破反复作用将对层状围岩产生累积损伤,引入损伤变量 D 修正层状围岩力

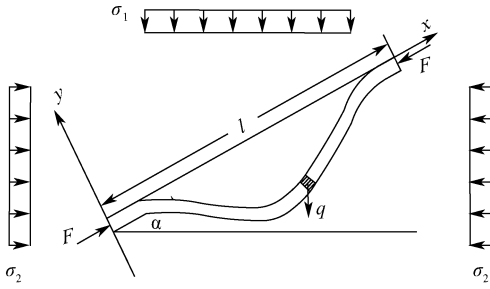


图 1 层状围岩的力学模型

Fig. 1 Mechanical model of layered surrounding rock

学参数。光面爆破是隧道施工的常用方法^[13],根据文献[14],假定光面爆破前后围岩密度 ρ 和泊松比 ν 近似相等,则有:

$$D = 1 - (v_i/v_0)^2 = 1 - E_c/E_0 \quad (3)$$

式中: v_i 为不同爆破次数后岩体的纵波波速, m/s, 其中, i 为爆破次数^[15]; v_0 为爆破前岩体的纵波波速, m/s; E_c 为爆破后等效弹性模量, GPa; E_0 为初始弹性模量, GPa。

2) 爆破振动效应。为简化计算,将爆破振动等效为静荷载,其经验公式^[16]:

$$F_B = 2\pi M \cdot f \cdot \beta_F \cdot K \left(\frac{Q^{1/3}}{R} \right)^\zeta \quad (4)$$

式中: F_B 为爆破等效静力, N; M 为岩体质量, kg; f 为主频, Hz; β_F 为等效静力系数,取 0.2~0.3,岩体结构面发育取小值; Q 为单段最大药量, kg; R 为爆心距, m; K, ζ 为振动衰减的地质系数。其中, f, K 和 ζ 通过现场振动测试和数据拟合得到,说明了上式的正确性与工程实用性。

1.3 层状围岩势能方程

根据 1.1 节中建立的力学模型,层状围岩隧道系统的总势能方程由以下部分组成:

1) 岩梁弯折变形的累积弹性应变能 V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_0^l M(x) d\theta \quad (5)$$

式中: $M(x)$ 为距岩梁脚部为 x 处的力矩; $d\theta$ 为岩梁弯曲弧度,可分别表示为:

$$d\theta = \frac{M(x)}{EI} ds \quad M(x) = EIy'' \quad (6)$$

式中: I 为岩梁惯性矩, $I = bh^3/12$, 取 $b = 1$; $ds = \sqrt{1 + (y')^2} dx \approx 1 + 0.5(y')^2$ 。

将式(1)和式(2)代入式(4)可得:

$$V_1 = \frac{1}{2} \int_0^l EI(y'')^2 ds = \frac{1}{2} \int_0^l EI(y'')^2 \sqrt{1 + (y')^2} dx = \frac{(1-D)E_0Il}{8} \left(\frac{\pi}{l} \right)^6 u^4 + (1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 u^2 \quad (7)$$

2) 岩梁横向作用力做功 V_2 :

$$V_2 = \frac{1}{2} F \int_0^l (y')^2 dx = \frac{Fl}{4} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 u^2 \quad (8)$$

3) 上覆岩体作用力做功 V_3 :

$$V_3 = \frac{1}{2} \int_0^l q(l-x)(y')^2 \sin\alpha dx + \int_0^l qy \cos\alpha dx = \frac{ql^2}{8} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \sin\alpha \cdot u^2 + ql \cos\alpha \cdot u \quad (9)$$

4) 围岩层间剪应力做功 V_4 :

$$V_4 = \frac{1}{2} \tau \int_0^l (y')^2 dx = \frac{\tau l}{4} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 u^2 \quad (10)$$

式中: τ 为岩体层间极限剪应力, kPa, 与相邻岩体的压应力和层间接触与摩擦力有关。根据文献[17],岩体层间剪应力极限公式:

$$\tau = \frac{(\sigma_s \kappa + c_s)}{2h} \cdot l \quad (11)$$

式中: σ_s 为相邻岩层压应力, kPa; c_s 为层间接触面黏聚力, MPa; κ 为层间摩擦因子。

5) 爆破振动势能 V_5 :

$$V_5 = \frac{1}{2} F_B \int_0^l (y')^2 dx = \frac{F_B l}{4} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 u^2 \quad (12)$$

系统总势能方程 V 为:

$$V = V_1 - V_2 - V_3 + V_4 - V_5 \quad (13)$$

将式(5)一式(12)代入式(13)可得:

$$V = \frac{(1-D)E_0Il}{8} \left(\frac{\pi}{l} \right)^6 u^4 + \frac{1}{4} \left[4(1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l} \right)^4 - Fl \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 - \frac{ql^2}{2} \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \sin\alpha + \tau l \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 - F_B l \left(\frac{\pi}{l} \right)^2 \right] u^2 - ql \cos\alpha \cdot u \quad (14)$$

2 层状围岩隧道突变失稳判据

2.1 突变失稳模型

尖点突变模型具有高阶模型的滞后、发散性态;由于计算模式简单,能够抽象出失稳性状,应用最为广泛。该模型描述突变过程,采用了具有折叠翼缘结构的平衡曲面^[18]。平衡曲面下叶为层状围岩失稳的孕育过程,即围岩损伤劣化过程,属于准稳定状态;上叶为层状围岩失稳后的再次稳定状态;中叶则表示层状围岩不稳定状态。

根据尖点突变理论,对层状围岩隧道的系统总势能方程进行变量代换,推导其尖点突变的标准型式,令:

$$x = \left[\frac{(1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l}\right)^6}{2} \right]^{1/4} u \quad (15)$$

$$a = \frac{1}{2} \left[4(1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l}\right)^4 - Fl \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - \frac{ql^2 \left(\frac{\pi}{l}\right)^2}{2} \sin\alpha + \tau l \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - F_B l \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 \right] \cdot \left[\frac{(1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l}\right)^6}{2} \right]^{-1/2} \quad (16)$$

$$b = -ql \cos\alpha \cdot \left[\frac{(1-D)E_0Il \left(\frac{\pi}{l}\right)^6}{2} \right]^{-1/4} \quad (17)$$

以 a 和 b 为控制变量, x 为状态变量的尖点突变的标准形式:

$$V = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx \quad (18)$$

对式(18)求导,并令其为0。得到所有平衡点组成的平衡曲面方程,也表示力的平-衡条件:

$$V' = x^3 + ax + b = 0 \quad (19)$$

奇点集可表示为:

$$V'' = 3x^2 + a = 0 \quad (20)$$

由式(20)得到系统的分岔集方程:

$$\Delta = 4a^3 + 27b^2 = 0 \quad (21)$$

式中 Δ 为突变特征值。

2.2 失稳判据

满足分岔集方程是隧道突变失稳的充要条件,即式(21)。 $\Delta=0$ 表示系统处于突变失稳的临界状态; $\Delta<0$ 系统发生突变失稳; $\Delta>0$ 为稳定状态。因此,推导出层状围岩隧道失稳的充要力学条件为:

$$\left[4(1-D)E_0I \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - F - F_B + \tau l - \frac{ql}{2} \sin\alpha \right]^3 + \frac{27}{4}q^2 \cdot (1-D)E_0I = 0 \quad (22)$$

由式(21)可知: Δ 中 $27b^2 \geq 0$ 恒成立,仅 $4a^3 \leq 0$ 可满足 $\Delta<0$,则隧道失稳的必要条件为

$$F \geq F_d = 4(1-D)E_0I \left(\frac{\pi}{l}\right)^2 - F_B - \frac{ql}{2} \sin\alpha + \tau l \quad (23)$$

式中 F_d 为围岩计算抗力,当 $F \geq F_d$ 时,围岩可能发生失稳。

2.3 爆破作用影响分析

由式(23)可知:爆破作用对层状围岩稳定性的影响主要反映在损伤变量 D 和爆破作用力 F_B ,即爆破损伤效应和爆破振动效应影响。

1) 爆破损伤效应。为探讨爆破损伤效应的影响规律,假定层状围岩物理力学和爆破参数: $I =$

$0.01 \text{ m}^4, l = 5 \text{ m}, q = 10 \text{ kN/m}, \alpha = 30^\circ, \tau = 55 \text{ kPa}, c = 0.2 \text{ MPa}, \varphi = 26^\circ, F_B = 400 \text{ kN}, E_0$ 分别取 15、25、35 GPa,代入式(1)和式(23),得到岩梁承受横向作用力 F 和不同损伤变量 D 条件下计算抗力 F_d 的变化曲线,如图2所示。

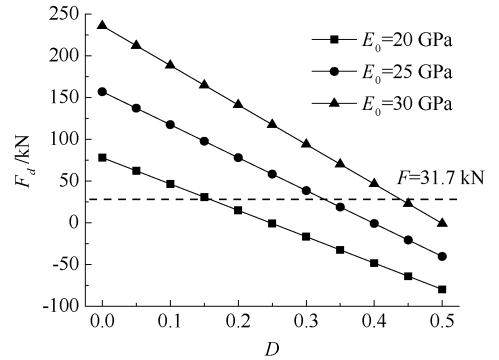


图2 计算抗力 F_d 随损伤变量 D 的变化关系

Fig. 2 Relationship between computing resistivity F_d and damage variable D

由图2可知:初始弹性模量 E_0 越大,围岩初始计算抗力 F_d 也越大,围岩越稳定。随着爆破次数增加,损伤变量 D 值逐渐增大,围岩的计算抗力 F_d 呈线性降低,发生失稳的可能性增加;当 $F_d < F$ 时,表明隧道围岩可能发生破坏。说明反复爆破的累积损伤效应导致围岩刚度降低,层状围岩失稳可能性增加。

2) 爆破振动效应。为分析爆破振动对围岩失稳的影响,假定层状围岩物理力学参数: $E_0 = 20 \text{ GPa}, I = 0.01 \text{ m}^4, D = 0.2, l = 5 \text{ m}, q = 10 \text{ kN/m}, \alpha = 30^\circ, \tau = 55 \text{ kPa}, c = 0.2 \text{ MPa}, \varphi = 26^\circ$,爆破参数: $f = 25 \text{ Hz}, \beta_f = 0.2, K = 250, \zeta = 1.8, R = 1 \text{ m}$ 。代入式(1)、式(4)和式(23),得到围岩横向作用力 F 和不同爆破药量 Q 条件下抗力 F_d 的变化曲线,如图3所示。

由图3可知:随着爆破药量 Q 的增加,爆破等效作用力 F_B 呈幂指数增大,围岩计算抗力 F_d 则近似呈线性降低,爆破振动效应不断增强导致隧道围岩稳定性不断降低。当爆破药量 Q 达到 55 kg 时,围岩计算抗力 $F_d = 5.9 \text{ kN}$ 小于 F 值,表明此工况下满足式(23)中 $F \geq F_d$ 的失稳条件,即隧道围岩可能发生破坏。

综上,爆破损伤和振动效应均对层状围岩隧道失稳产生较大影响。因此,采用有效地控制爆破措施,降低单次爆破药量和提高光面爆破效果,能够有效降低隧道失稳风险。

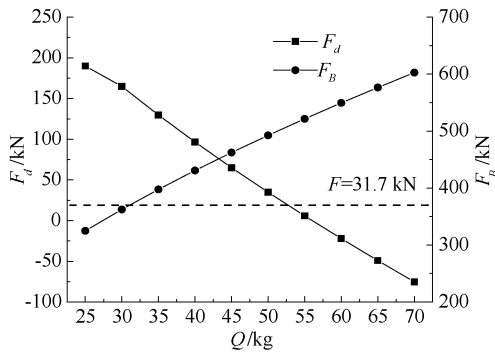


图 3 计算抗力 F_d 随爆破药量 Q 的变化关系

Fig. 3 Relationship between computing resistivity F_d and blasting charge Q

3 工程应用

3.1 工程概况

沪昆客运专线湖南段 9 标段的姚家隧道为标段控制性工程,全长 6 955 m,最大埋深 247 m,开挖面积约 140 m²,属特大断面隧道。隧道围岩为砂质板岩(P₁³),地层产状为 250~260°∠46~55°。板理的走向与隧道轴线近于平行,为厚层层状结构。在隧道爆破施工过程中,发生了隧道围岩失稳和结构破坏,现场情况如图 4 所示。

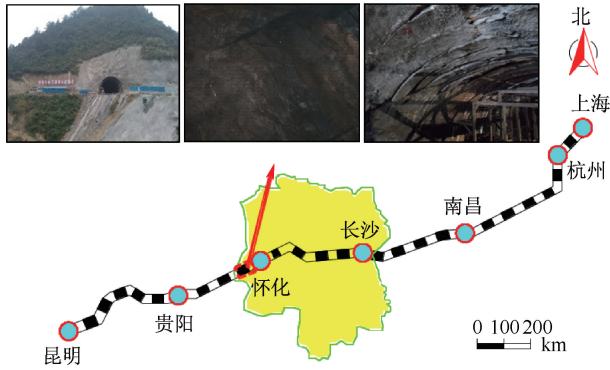


图 4 姚家隧道现场情况

Fig. 4 Site conditions of Yaojia tunnel

3.2 现场声波与振动测试

现场施工中分别测试 DK380+837、DK381+263 和 DK384+029 这 3 个断面的现场声波和爆破振动,分析围岩损伤程度和动力响应特性。

1) 现场声波测试。现场测试根据《工程岩体试验标准》^[19]要求进行,采用跨孔测试方法,在测试断面边墙处钻掘测孔,孔深为 10 m,孔间距为 50 cm。从孔底处每 20 cm 进行一次测试,获得不同深度声波测试数据。

围岩的声波波速随着深度增加不断变大,当深度达到 4 m,波速随深度变化明显减小而区域稳定,将 4~5 m 处稳定的声波波速作为计算参数,计算爆破反复作用的围岩损伤变量 D 值,见表 1。

表 1 围岩声波波速 v_i 和损伤变量 D
Tab. 1 Rock acoustic wave velocity v_i and damage variable D

断面里程	计算参数	累积爆破次数			
		0	5	10	15
DK380+837	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	3 786	3 619	3 428	3 185
	D	0	0.086	0.180	0.292
DK381+263	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	3 931	3 770	3 584	3 347
	D	0	0.080	0.169	0.275
DK384+029	$v_i/(m \cdot s^{-1})$	4 047	3 885	3 700	3 478
	D	0	0.078	0.164	0.261

2) 爆破振动测试。根据《爆破安全规程》^[20]要求,爆破振动判据采用保护对象所在地基础质点峰值振动速度和主振频率。因此,现场振动测试时在距工作面 20~50 m,间隔 10 m 的断面拱脚处各布置一个监测点。开展 3 次爆破振动测试,收集各点监测数据。计算 3 个方向的峰值合速度,通过数据拟合得到获得式(4)中振动衰减的地质系数,结果如图 5 所示。图中, v_p 为爆破峰值振速, cm/s。

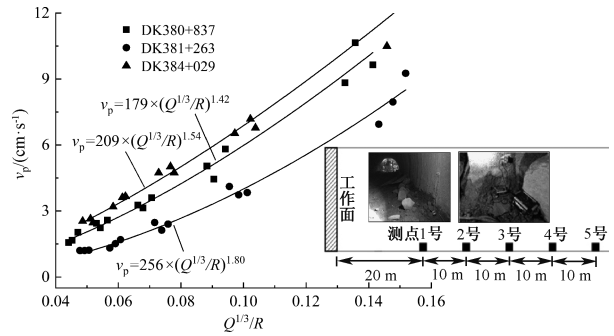


图 5 爆破振动监测数据

Fig. 5 Monitoring data of blasting vibration

3.3 稳定性分析

选取上述 3 个断面分析层状围岩稳定性。根据隧道勘察和室内试验,3 个研究区域内围岩均为砂质板岩,隧道采用光面爆破,各研究区的物理力学参数和爆破参数见表 2。将参数代入式(1)、式(4)和式(23),计算得到横向作用力 F 和计算抗力 F_d 值,不同累积爆破次数的计算抗力 F_d 如图 6 所示。

根据计算结果和图 6 可知:隧道里程为 DK380+837、DK381+263 和 DK384+029 区域进行施工时,围岩承受横向作用力 F 分别为 5.0、13.6 和 31.0kN;

表 2 围岩物理力学参数与爆破参数

Tab. 2 Physical & mechanical parameters and blasting parameters of surrounding rock

断面里程	围岩物理力学参数									爆破与振动参数			
	$\gamma_c / (\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	E_0 / GPa	I	l / m	h / cm	$\alpha / (^\circ)$	τ / kPa	c / MPa	$\varphi / (^\circ)$	K	ζ	f / Hz	Q / kg
DK380+837	26.4	35.58	0.01	5.2	5.0	32	60	0.20	26	179	1.42	25.5	22.6
DK381+263	25.3	32.52	0.01	5.1	5.0	41	50	0.22	26	256	1.80	21.3	23.8
DK384+029	26.8	34.87	0.01	4.9	5.0	62	55	0.21	26	209	1.54	26.4	24.2

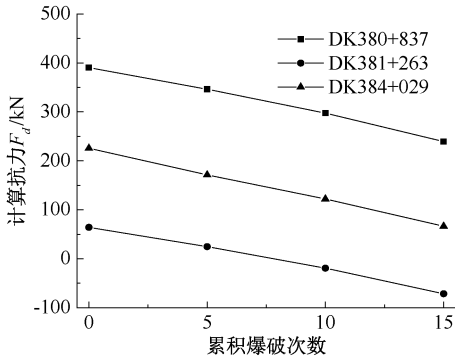


图 6 不同累积爆破次数的计算抗力 F_d

Fig. 6 Computing resistivity F_d with different cumulative blasting times

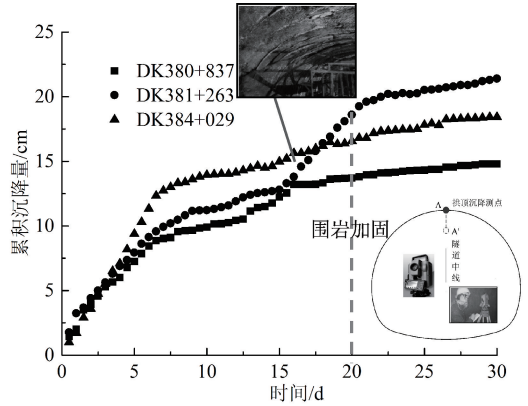


图 7 隧道拱顶累积沉降量

Fig. 7 Accumulated settlement of tunnel vault

初始计算抗力 F_d 分别为 390.2、64.0 和 255.7kN，横向作用力均小于抗力，说明围岩均处于稳定状态。而 DK381+263 区域的初始计算抗力值最低且与横向作用力差值最小，对比围岩力学参数，发现该区域围岩稳定性相对较差，具有潜在失稳风险。

爆破反复作用后，3 处断面围岩损伤变量 D 均增加，计算抗力 F_d 则不断减小。对于 DK380+837 和 DK384+029 区域，当累积爆破次数达到 15 次时，其 F_d 值远大于 F 值，处于稳定状态。DK381+263 区域在爆破累积 5 次数时 F_d 为 24.6 kN 略大于 F 值，仍保持稳定；而爆破累积 10 次时 F_d 为 -19.3 kN 已经低于 0，表明隧道处于可能发生失稳的状态。

3.4 现场工况分析

根据上述分析，隧道在 DK380+837 和 DK384+029 处于稳定状态，在 DK381+263 区域则处于可能发生失稳的状态。为验证突变理论分析的准确性，现场通过监控量测分析围岩稳定情况。拱顶沉降与边墙收敛数据如图 7 所示。

由图 7 可知：DK380+837 和 DK384+029 断面的拱顶累积沉降量在爆破开挖后大幅增加，6~7 天后缓慢增加，最终趋于稳定，层状围岩处于稳定状态。DK381+263 断面爆破开挖后同样是先大幅增加后趋于稳定，但是在开挖后 15 天时，沉降量呈现明显的增大趋势，初期支护出现明显开裂，显现出围岩失

稳征兆。为避免围岩坍塌和支护结构破坏，在 20 天时对围岩与支护结构进行加固，随后累积沉降量缓慢增加，说明围岩变形得到了有效控制。

对比 3 个断面围岩地质条件发现，围岩物理力学参数差异不大，仅岩层角度 α 变化较为明显，计算发现，DK381+263 断面围岩承受爆破作用下等效静力最大，同时，随着爆破作用次数增加计算抗力大幅下降。因此，认为导致 DK381+263 断面出现围岩失稳征兆可能的原因是岩层角度变化、爆破损伤和振动作用的影响。

对选取的典型断面进行突变失稳分析，隧道施工现场情况、监测结果与突变失稳判据结果一致，证明推导的爆破作用下层状围岩隧道突变失稳判据具备一定的有效性，该方法可以准确预测层状围岩隧道施工稳定性。建议在类似工况下，结合失稳判据和现场监测分析，预判围岩稳定性，采用弱爆破、短进尺的方式，减小爆破损伤和振动效应，提高隧道施工安全性。

4 结论

1) 根据突变理论，推导了爆破作用下层状围岩隧道突变失稳的充要条件，即 $\Delta=0$ 表示系统处于突变失稳的临界状态； $\Delta<0$ 隧道发生突变失稳； $\Delta>0$ 为稳定状态。隧道失稳的必要条件为岩层横向作用力 F 大于计算抗力 F_d 。

2) 根据推导的围岩失稳判据可知:爆破作用对层状围岩稳定性的影响主要反映在损伤变量 D 和爆破作用力 F_b , 即爆破损伤效应和爆破振动效应影响。分析表明爆破累积损伤效应导致围岩刚度降低, 层状围岩失稳可能性增加; 随着爆破药量 Q 的

增加, 爆破振动效应增强, 降低层状围岩稳定性。

3) 根据突变失稳判据得到的隧道围岩的横向作用力 F 、计算抗力 F_d 和稳定性状态, 其评价结果与施工现场情况、监测结果一致, 验证了该失稳判据的有效性与准确性。

参 考 文 献

- [1] ZHOU Yangyi, FENG Xiating, XU Dingping, et al. Experimental investigation of the mechanical behavior of bedded rocks and its implication for high sidewall caverns [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49(9): 3 643-3 669.
- [2] 李二强, 冯吉利, 张龙飞, 等. 水-岩及风化作用下层状炭质板岩巴西劈裂试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2021, 43(2): 329-337.
LI Erqiang, FENG Jili, ZHANG Longfei, et al. Brazilian tests on layered carbonaceous slate under water-rock interaction and weathering[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2021, 43(2): 329-337.
- [3] 夏彬伟, 胡科, 卢义玉, 等. 深埋隧道层状岩体破坏过程特征模型试验[J]. *中国公路学报*, 2012, 25(1): 107-114.
XIA Binwei, HU Ke, LU Yiyu, et al. Model test for characteristics of failure process of layered rock mass in deep buried tunnel[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2012, 25(1): 107-114.
- [4] 温建永. 层状岩体隧道病害机理分析及整治措施研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2017, 14(5): 1 024-1 028.
WEN Jianyong. Research on the damage of structure and its treatment for a tunnel constructed in interbedded rock mass[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2017, 14(5): 1 024-1 028.
- [5] 黄智刚, 左清军, 吴立, 等. 水岩作用下泥质板岩软化非线性机制研究[J]. *岩土力学*, 2020, 41(9): 2 931-2 942.
HUANG Zhigang, ZUO Qingjun, WU Li, et al. Nonlinear softening mechanism of argillaceous slate under water-rock interaction[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2020, 41(9): 2 931-2 942.
- [6] 王登科, 骆建军, 文绍全, 等. 岩层倾角对层状偏压隧道围岩稳定性影响分析[J]. *北京交通大学学报*, 2022, 46(3): 95-102.
WANG Dengke, LUO Jianjun, WEN Shaoquan, et al. Influence analysis of rock dip angle on surrounding rock stability of layered unsymmetrical-loaded tunnel[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2022, 46(3): 95-102.
- [7] 吴亮, 李凤, 卢文波, 等. 爆破扰动下邻近层状围岩隧道的稳定性与振速阈值[J]. *爆炸与冲击*, 2017, 37(2): 208-214.
WU Liang, LI Feng, LU Wenbo, et al. Vibration velocity threshold of a tunnel adjacent to surrounding layered rocks under blasting load[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2017, 37(2): 208-214.
- [8] MA Longhao, JIANG Xiang, CHEN Jie et al. Analysis of damages in layered surrounding rocks induced by blasting during tunnel construction[J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2021, 21(7): DOI: 10.1142/S0219455421500899.
- [9] 姜永东, 鲜学福, 郭臣业. 层状岩质边坡失稳的燕尾突变模型[J]. *重庆大学学报*, 2008, 31(5): 553-557.
JIANG Yongdong, XIAN Xuefu, GUO Chenye. A swallowtail catastrophe model on destabilization of stratified rock slope[J]. *Journal of Chongqing University*, 2008, 31(5): 553-557.
- [10] 穆成林, 裴向军, 路军富, 等. 基于尖点突变模型巷道层状围岩失稳机制及判据研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(6): 1 429-1 435.
MU Chenglin, PEI Xiangjun, LU Junfu, et al. Study on the instability criterion of layered rock mass failure based on the cusp catastrophe theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(6): 1 429-1 435.
- [11] 罗彦斌, 陈建勋, 王利宝, 等. 考虑层间黏聚力的水平层状围岩隧道顶板力学模型计算[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(10): 230-237, 265.
LUO Yanbin, CHEN Jianxun, WANG Libao, et al. Mechanical model calculations of tunnel roof with horizontal stratified

- rock mass tunneling considering the interlayer cohesion[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(10): 230-237, 265.
- [12] 秦四清, 王思敬, 孙强, 等. 非线性岩土力学基础[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 37-38.
- [13] 付晓强, 俞缙. 冻结立井爆破井壁振动与围岩损伤控制研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(9): 67-74.
FU Xiaoqiang, YU Jin. Shaft lining vibration and surrounding rock damage control after freezing shaft blasting[J]. China Safety Science Journal, 2020, 31(9): 67-74.
- [14] 朱传云, 喻胜春. 爆破引起岩体损伤的判别方法研究[J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 12-16.
ZHU Chuanyun, YU Shengchun. Study on the criterion of rockmass damage caused by blasting[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 12-16.
- [15] 王智德, 马祖遥. 爆破荷载作用下顺层岩质边坡的损伤特性研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(11): 72-79.
WANG Zhide, MA Zuyao. Research on damage characteristics of rock bedding under blasting load [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(11): 72-79.
- [16] 王家臣, 孙书伟. 露天矿边坡工程[M]. 北京: 科学出版社, 2016: 26-29.
- [17] 温森, 赵廷喜. 深埋隧洞层状围岩变形分析[J]. 金属矿山, 2009(4): 11-15.
WEN Sen, ZHAO Yanxi. Analysis of the deformation of stratified rock surrounding deep tunnels [J]. Metal Mine, 2009(4): 11-15.
- [18] 彭亚雄, 刘广进, 黄智刚, 等. 穿越富水断层带隧道爆破围岩突变失稳判据研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(5): 104-111.
PENG Yaxiong, LIU Guangjin, HUANG Zhigang, et al. Study on catastrophe instability criterion of surrounding rock in tunnels blasting crossing water-rich fault zones[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(5): 104-111.
- [19] GB/T50266—2013, 工程岩体试验方法标准[S].
GB/T50266—2013, Standard for test methods of engineering rock mass[S].
- [20] GB6722—2014, 爆破安全规程[S].
GB6722—2014, Safety regulations for blasting[S].



作者简介: 彭亚雄 (1990—),男,湖南宁乡人,博士,副教授,主要从事隧道与爆破工程等方面的研究。E-mail:1020172@hnust.edu.cn。