

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.020

## 基于 Hoek-Brown 准则的爆破损伤 对边坡稳定性的影响\*

张卉<sup>1</sup>, 吴祖咸<sup>2</sup>, 徐帅<sup>3</sup>, 吴朝峰<sup>4</sup>, 吕庆<sup>3</sup>

(1. 浙江同济科技职业学院, 杭州 311231; 2. 浙江华云电力工程设计咨询有限公司, 杭州 310012;  
3. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 中国能源建设集团 浙江省电力设计院有限公司, 杭州 310000)

**摘要:** 爆破是目前岩质边坡的主要开挖方式, 为评估爆破损伤对工程边坡稳定性的影响, 基于 Hoek-Brown 强度准则中的扰动因子  $D$  探讨爆破损伤的弱化规律。以岩体纵波波速变化表征  $D$  的空间变化规律, 获得指数型分布的  $D$  值变化形式来反映爆破损伤程度的空间分布特征。探讨了  $D$  值的分布规律及爆破影响范围对边坡安全系数的影响。算例表明:  $D$  值按指数型分布规律渐变, 稳定性系数为 1.14; 按线性和二次函数分布规律渐变时, 稳定性系数增加至 1.39 和 1.47; 考虑扰动区范围内  $D$  值指数型分布渐变, 采用系统锚杆加固能有效补偿爆破损伤造成的岩体力学性质下降及边坡稳定性不足。研究结果表明: 采用  $D$  渐变弱化的方式, 能较好的反映爆破损伤对边坡稳定的实际影响; 采用系统锚杆可对爆破损伤进行有效控制;  $D$  的分布形式及范围会对边坡稳定性评价结果造成较大影响。

**关键词:** Hoek-Brown 强度准则; 爆破损伤; 扰动因子; 边坡稳定; 系统锚杆

**中图分类号:** TD235.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-487X(2022)01-0134-06

## Influence of Blasting Damage Zone on Slope Stability based on Hoek-brown Criterion

ZHANG Hui<sup>1</sup>, WU Zu-xian<sup>2</sup>, XU Shuai<sup>3</sup>, WU Chao-feng<sup>4</sup>, LV Qing<sup>3</sup>

(1. Zhejiang Tongji Vocational College of Science and Technology, Hangzhou 311231, China;  
2. Zhejiang Huayun Electric Power Design & Consultation CO., LTD., Hangzhou 310012, China;  
3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;  
4. Zhejiang Electric Power Design Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** Blasting is the main excavation method of rock slope at present. In order to evaluate the effect of blasting damage on the stability of engineering slope, the weakening law of blasting damage is discussed based on the disturbance factor  $D$  in Hoek Brown strength criterion. Using the spatial variation of  $D$  characterized by change of longitudinal wave velocity in rock mass, the exponential type of  $D$  was obtained to reflect the spatial distribution of blasting damage degree. The impact on the factor of safety of the distribution rules as well as the influence area of the disturbance factor  $D$  were explored consequently. For the case in hand, the computed factor of safety is 1.14 when the value of  $D$  is gradually changed according to the law of exponential distribution, and the factor of safety increases to 1.39 and 1.47 respectively when it is gradually changed according to the law of linear and quadratic distribution. Considering the gradual change of exponential distributed  $D$  value in the blasting damage zone, the systematic bolts can effectively compensate the loss of the slope stability due to the rock mass mechanical properties weakened by blasting. The results show that considering gradual weakening of  $D$  can better reflect the actual effect of blasting damage on slope stability, the blasting damage can be effectively controlled by the system bolt, and the different distribution patterns and ranges of  $D$  have great influence on the factor of safety.

**Key words:** Hoek-Brown criterion; blasting induced damage; disturbance factor; slope stability; systematic rock-bolt

爆破是目前岩质边坡的主要开挖方式。在爆破冲击荷载作用下,实现破岩开挖的同时,不可避免地会对爆孔附近的预留岩体造成扰动和损伤,引起岩体力学性质劣化,进而影响边坡稳定性。如何评价爆破损伤对岩体力学性质及边坡稳定性的影响,是边坡工程中的重要问题。为此,国内外学者开展了大量的研究:汪海波和徐颖对爆破前后围岩的松动圈半径进行测试<sup>[1]</sup>,分析了爆破对围岩损伤范围的影响;左双英等采用 FLAC 3D 模拟了岩体爆破损伤范围及破裂深度<sup>[2]</sup>。Hoek 等在 2002 年提出的 Hoek-Brown 强度准则修正版本中首次引入了扰动因子  $D$  来描述爆破质量对岩体强度和变形模量的影响<sup>[3]</sup>,实现了岩体爆破损伤的定量表征。但对扰动因子  $D$  的具体取值,Hoek 等仅给出了经验建议,在实际工程应用中难以准确取值。为此,闫长斌和徐国元建立修正系数  $K_s$  和  $K_m$  来表示岩体受爆破扰动的影响程度<sup>[4]</sup>,为损伤区的参数取值提供了方法;夏开宗等尝试将扰动因子  $D$  与岩体纵波波速相联系<sup>[5,6]</sup>,得到  $D$  的估算公式。最新的 2018 版 Hoek-Brown 强度准则给出了定量的扰动因子  $D$ <sup>[7]</sup>,其取值为 0~1。扰动因子  $D$  考虑了地下工程爆破开挖和机械开挖两种情况,而在地面工程方面,覆盖了矿山和土建边坡<sup>[8]</sup>。这些工作为  $D$  的合理取值提供了参考,但正如 Hoek 提出的, $D$  的取值在岩体空间上不应是常量,而应随爆心距的增加逐渐减小<sup>[9]</sup>。目前,关于扰动因子  $D$  空间分布规律的讨论还很少。

本文基于 Hoek-Brown 强度准则,研究  $D$  值的分布规律和影响范围及其与边坡安全系数的相关关系。以岩体的纵波波速表征  $D$  的分布规律,进而探讨爆破损伤对边坡稳定性的影响与防护措施。本文研究结论可为认识爆破损伤的演化规律、评价边坡的稳定性及提出相应工程措施提供参考。

## 1 工程案例

某岩质边坡高 105 m。地层岩性为紫红色砂

岩。边坡采用七级台阶开挖,自下向上第一、二、三级台阶每级高 15 m,坡度为 1:0.2;第四、五级台阶每级高 15 m,坡度为 1:0.25;最上面第六、七级台阶每级高 15 m,坡度为 1:0.3。台阶间设置 2 m 宽马道,如图 1 所示。

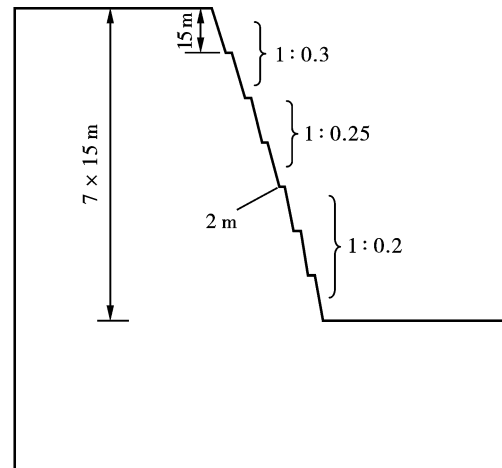


图 1 边坡开挖方案图

Fig. 1 Slope excavation scheme

## 2 Hoek-Brown 模型及计算参数

为评价边坡的稳定性,采用 Hoek-Brown 模型描述边坡岩体。其中, $m_i$ (完整岩体的 Hoek-Brown 常数)依据边坡岩体岩性和 Hoek 等基于大量工程经验及实验数据得出的经验确定<sup>[10-12]</sup>。考虑到本工程主要为砂岩,岩体的  $m_i$  值取 13。地质强度指标 GSI 的取值综合考虑了风化程度、粗糙度以及内部填充物等岩体性质取为 50。

采用 Hoek-Brown 强度准则中的扰动因子  $D$  来考虑爆破损伤对岩体力学性质及边坡稳定的影响。

Hoek 等建议<sup>[9]</sup>:“对于边坡,带有自由面且严格控制的爆破,所造成的损伤区范围为 0.3 到 0.5 倍  $h$ (台阶高度)”。对于本工程, $h$  为 15 m,故可先初步考虑损伤区范围  $T_0 = 0.5 h = 7.5$  m。

对大量岩石工程爆破测试数据进行分析拟合,结果表明<sup>[13,14]</sup>:岩体纵波波速在爆破开挖面附近降幅较大,随着爆心距增加而逐渐增大,至一定距离后趋于稳定,爆破前后岩体波速的变化规律符合分段线性函数特征。

将损伤区岩体的纵波波速表示为  $V_d$ ,未损伤区域岩体波速表示为  $V_{ud}$ ,采用分段线性函数描述,则

收稿日期:2021-09-15

作者简介:张 卉(1984-),女,硕士,讲师、工程师,主要从事建筑结构工程和岩土工程方面的研究,(E-mail)75582291@qq.com。

通讯作者:吕 庆(1978-),男,教授、博导,主要从事地质灾害基础理论与防治技术研究,(E-mail)lvqing@zju.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41772287);浙江省重点研发计划(2021C03159、2020C03092)

爆破后岩体波速可表示为

$$V_d = k(T - T_0) + V_{ud} \quad (T \leq T_0) \quad (1)$$

$$V_d = V_{ud} \quad (T > T_0) \quad (2)$$

式中:  $T$  为岩体波速测试深度, m;  $T_0$  为爆破损伤区范围, m;  $k$  为线性函数斜率。

对于本边坡, 根据勘查资料, 考虑原岩纵波波速  $V_{ud}$  为 3500 m/s, 爆破开挖面处 ( $T=0$ ) 纵波波速  $V_{d0}$  取 1900 m/s, 损伤区范围  $T_0$  取 7.5 m。按照式(1), 故损伤区波速变化可表述为

$$V_d = 0.213T + 1.9 \quad (T \leq 7.5) \quad (3)$$

式中,  $V_d$  为损伤区岩体的纵波波速, km/s。

Hoek-Brown 强度准则关于岩体模量与扰动因子  $D$  之间的关系如下<sup>[3]</sup>

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{6SI-10}/40 \quad (\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}) \quad (4)$$

式中,  $\sigma_{ci}$  为完整岩石的单轴抗压强度。

Barton 研究了岩体变形模量  $E_m$  及纵波波速  $V_p$  的关系如下<sup>[15]</sup>

$$E_m = 10 \times 10^{(V_p-3.5)/3} \quad (5)$$

夏开宗等将受扰动影响的岩体变形模量表示为  $E_d$ , 未受影响的表示为  $E_{ud}$ , 联合式(4)、(5)得到<sup>[5]</sup>

$$D = 2 \left[ 1 - \frac{10^{(V_d-3.5)/3}}{10^{(V_{ud}-3.5)/3}} \right] \quad (6)$$

上述分析将扰动因子  $D$ 、变形模量  $E_m$  及纵波波速  $V_p$  关联, 获得了扰动因子的定量表达式。但所得扰动因子仍视为均一值, 未考虑  $D$  值随着深度的变化, 这显然与工程实际不符。本文考虑到爆破能量总是由近及远逐渐衰减, 因此岩体爆破损伤程度也应由近及远逐渐变化的。故将式(1)所述的损伤区波速线性变化规律, 代入式(6), 则有

$$D = 2 \left[ 1 - 10^{(V_d-V_{ud})/3} \right] = 2 - \frac{2}{10^{\frac{kT}{T_0}}} 10^{\frac{kT}{3}} \quad (7)$$

式(7)是通过岩体纵波波速表征的扰动因子  $D$  的取值, 反映了爆破损伤程度随深度变化的规律。式(7)表明  $D$  值符合指数形式的空间变化规律。

值得注意的是: 考虑到  $D$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 当利用式(7)计算得到扰动因子  $D$  大于 1 时, 应按  $D=1$  考虑。对于本文工程案例, 当  $T \leq 3.2$  m 时, 计算所得的  $D$  应取 1。因此,  $D$  值的空间分布规律为

$$D = 2 - 0.586 \times 1.18T \quad (3.2 < T \leq 7.5) \quad (8)$$

$$D = 1 \quad (T \leq 3.2) \quad (9)$$

### 3 扰动因子 $D$ 对边坡稳定性的影响

考虑扰动因子  $D$  的空间分布规律, 基于 Hoek-

Brown 强度准则可获得边坡不同深度的岩体力学参数, 进一步可分析岩体爆破损伤对边坡稳定性的影响。为此, 本文采用极限平衡法, 分析扰动因子  $D$  的分布规律和范围对边坡稳定性的影响。

#### 3.1 扰动因子 $D$ 变化规律及对岩体稳定性的影响

采用 RocScience 系列软件中的 Slide 9.0 程序 (www.rocsience.com) 进行边坡稳定性计算。计算中边坡岩体采用 Hoek-Brown 强度准则, 选择 Spencer 法考虑非圆弧滑面情况, 最不利滑面由退火算法自动搜索确定。为全面分析爆破损伤变化规律的影响, 计算共考虑以下五种工况:

(1) 将整个岩体视为扰动区, 将扰动因子  $D$  取定值, 结果如表 1 和图 2 所示。

表 1 扰动因子对岩体稳定性影响

Table 1 Influence of disturbance factors on rock mass stability

| $D$   | 0    | 0.3  | 0.5  | 0.7  | 0.9  | 1    |
|-------|------|------|------|------|------|------|
| $F_s$ | 1.60 | 1.38 | 1.25 | 1.11 | 0.95 | 0.86 |

可见, 当扰动因子  $D$  从 0 到 1 变化, 相应的安全系数由 1.60 降至 0.86, 潜在滑动面深度 ( $S1$ ) 由 20.1 m 减至 14.8 m, 说明  $D$  值对边坡安全系数和潜在滑动面深度影响显著。但将整个边坡均视为扰动区, 这显然是不合理的。

(2) 考虑扰动区范围  $T_0$  内  $D$  值取 1, 忽略  $D$  值的空间变化规律 (这是目前多数考虑爆破损伤影响的算法)。计算相应岩体安全系数。计算获得安全系数  $F_s = 0.97$ 。如图 3(a) 所示, 此时潜在滑动面位于爆破损伤区内。由于爆破损伤程度总是沿深度逐渐减弱的, 因此将损伤区范围内  $D$  值取 1 所获得的结果显然是偏于保守的。

(3) 考虑扰动区范围  $T_0$  内  $D$  值按照指数型分布规律渐变。计算获得的边坡安全系数  $F_s = 1.14$ , 相比于  $D=1$  的情况, 计算获得的安全系数提高了。此外, 如图 3(b) 所示, 潜在滑动面仍位于爆破损伤区内但深度变浅。

(4) 考虑扰动区范围  $T_0$  内  $D$  值分别按照:

(a) 线性函数变化 ( $D = 1 - T/7.5$ ), 计算获得的边坡安全系数  $F_s = 1.39$ , 如图 3(c) 所示。

(b) 二次函数变化 [ $D = (T - 7.5)^2/56.25$ ], 计算获得的边坡安全系数  $F_s = 1.47$ , 如图 3(d) 所示。

由此可见,  $D$  的分布规律对边坡稳定计算结果影响显著。按指数型分布规律渐变, 稳定性系数仅为 1.14; 但按线性和二次函数分布规律渐变时, 稳

定性系数增加为 1.39 和 1.47。

布规律渐变,采用系统锚杆对其进行加固。

(5) 考虑扰动区范围  $T_0$  内  $D$  值按照指数型分

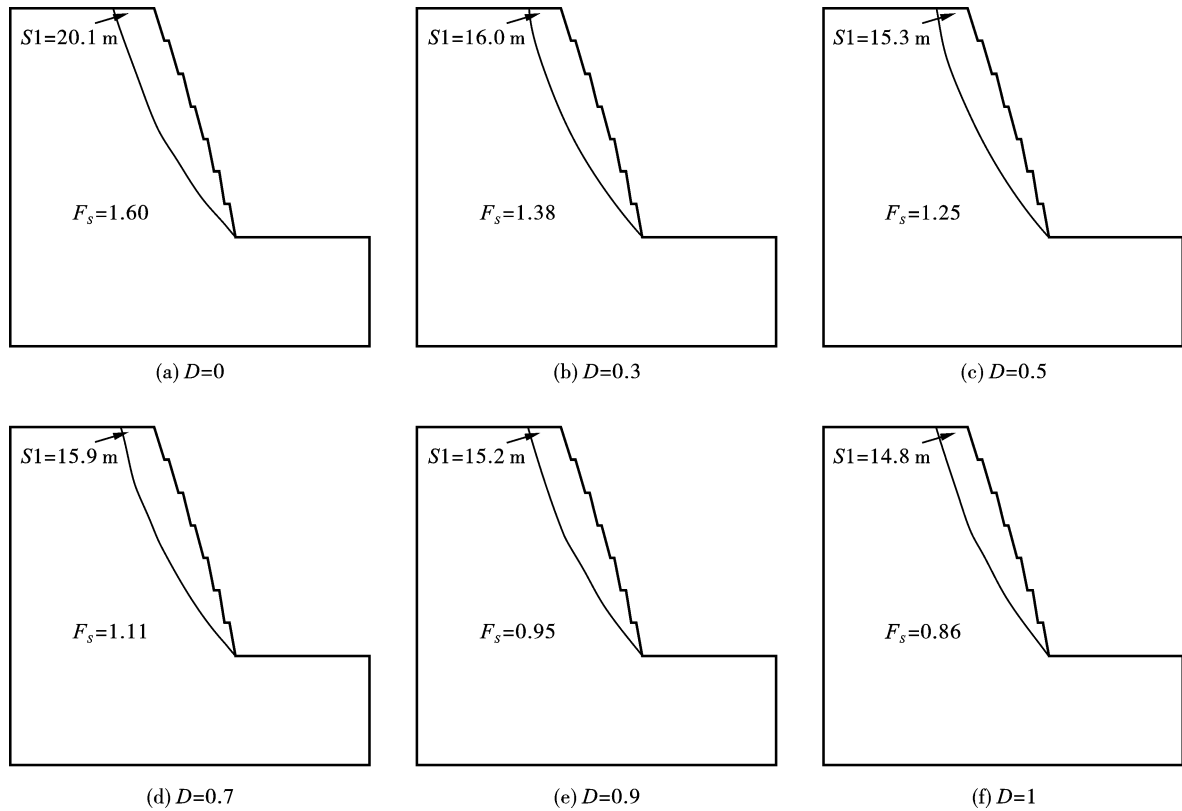


图 2 不同扰动因子  $D$  值下边坡安全系数变化

Fig. 2 Changes of slope factor of safety under different disturbance factor  $D$  values

具体加固措施如下:采用直径 25 mm,长 10 m 的锚杆,按照 4 m × 4 m 间距沿坡面系统布置,锚杆设计承载力为 176 kN。计算得到相应边坡安全系数  $F_s = 1.36$ ,如图 3(e)所示。说明采用系统锚杆能有效地补偿爆破损伤造成的岩体力学性质下降以及由此带来的边坡坡面稳定性不足的问题。从另一方面说明了系统锚杆在坡面防护中的作用。

### 3.2 动范围对边坡稳定性影响

Hoek 指出<sup>[9]</sup>,运用扰动因子  $D$  时,需要选择合理的爆破影响区域,进而定义该区域的岩体损伤程度。对于边坡台阶式爆破,Hoek 根据实际工程经验和实际爆破方式来估算爆破损坏区的范围<sup>[9]</sup>,如图 4 与表 2 所示。

对于实际边坡工程,一般均采取一定控制措施进行爆破开挖。对于本文工程案例,我们按照具有临空面的且控制良好的爆破或按照具有临空面且带控制措施的爆破(如一个或多个缓冲行)考虑。其中, $T_0/h$  值分别取 0.3 ~ 0.5 或 0.5 ~ 1(见表 2)。

前面分析扰动因子  $D$  的变化规律对于边坡稳定影响时,损伤区范围  $T_0$  取为 0.5h。下面考虑损

伤区范围  $T_0$  在 0.1 ~ 0.9h 变化时,边坡稳定性计算结果的变化,结果如图 5 所示。

表 2 边坡岩体爆破损伤范围参考值<sup>[9]</sup>  
Table 2 Reference value of blasting damage range of slope rock mass<sup>[9]</sup>

| 爆破设计情况                     | 损伤范围 $T_0$            |
|----------------------------|-----------------------|
| 大型生产爆破<br>(无控制措施)          | $T_0 = 2 \sim 2.5h$   |
| 具临空面的大型生产爆破<br>(无控制措施)     | $T_0 = 1 \sim 1.5h$   |
| 有控制措施的生产爆破<br>(一个或多个缓冲行)   | $T_0 = 1 \sim 1.2h$   |
| 具临空面且控制措施的爆破<br>(一个或多个缓冲行) | $T_0 = 0.5 \sim 1h$   |
| 具临空面且严格控制的生产爆破             | $T_0 = 0.3 \sim 0.5h$ |

显然,当  $T_0$ (损伤范围)/ $h$ (台阶高度)取值由小变大时,相应的边坡安全系数下降较明显,体现了工程爆破中准确评价爆破损伤范围及采用合理爆破控制措施的重要意义。

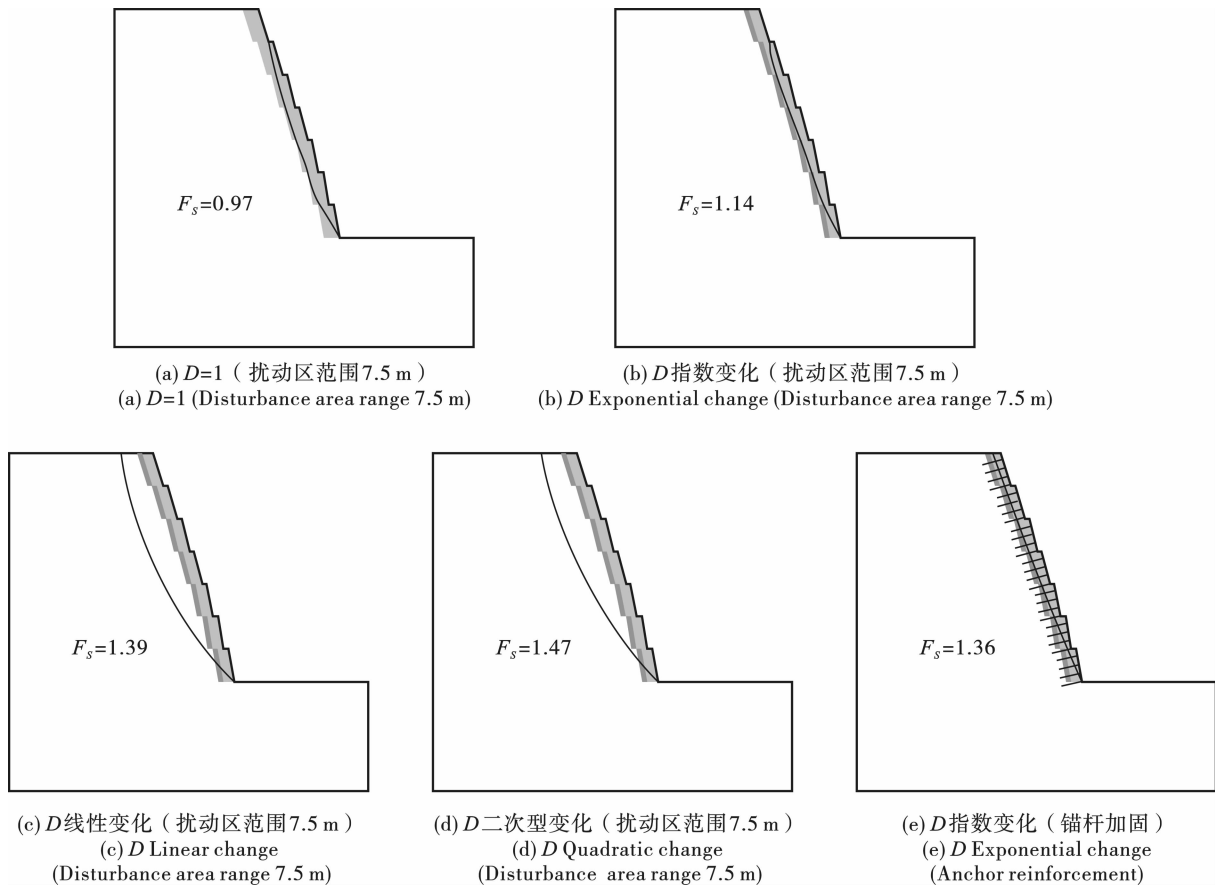


图3 不同D值分布规律下边坡安全系数

Fig. 3 Slope factor of safety under different D value distribution laws

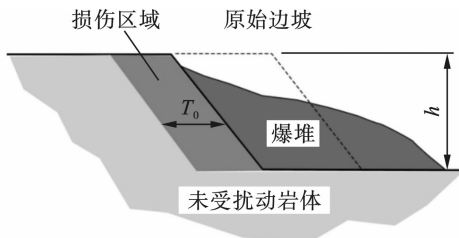


图4 边坡岩体爆破损伤区域示意<sup>[9]</sup>

Fig. 4 Schematic diagram of blasting damage zone of slope rock mass<sup>[9]</sup>

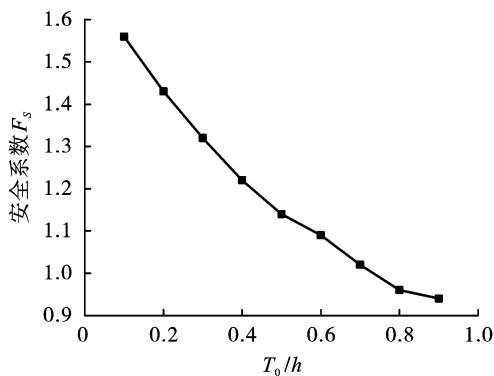


图5 损伤区范围变化对边坡稳定性影响

Fig. 5 Influence of damage area change on slope stability

### 4 结论

基于 Hoek-Brown 准则中的扰动因子  $D$  分析了爆破损伤对边坡稳定性的影响。首先基于岩体纵波波速表征了  $D$  值的空间分布规律,在此基础上探讨了  $D$  的分布规律和范围对边坡稳定性的影响。主要结论如下:

(1) 爆破后岩体纵波波速变化情况可近似按照分段线性函数特征进行表征,据此获得扰动因子  $D$  按照指数型函数分布,可为定量评价岩体爆破损伤提供依据。

(2) 基于工程案例,由极限平衡计算结果可知,若不考虑爆破损伤的影响,将导致稳定性评价结果偏不安全;若考虑全部坡体范围内爆破损伤取均值,则稳定性计算结果偏保守。采用扰动因子  $D$  空间分布渐变的方式,能较好的反映实际爆破损伤对岩体力学性质及边坡稳定的影响。采用系统锚杆有效抑制爆破损伤给边坡稳定带来的不利影响,从而确保开挖后边坡的整体和局部稳定。

(3) 扰动因子  $D$  的空间分布规律和范围对边坡稳定性计算结果影响显著。为获得更加符合实际的

计算结果,应根据边坡工程实际爆破开挖方式确定爆破损伤空间变化规律和影响范围。

所用方法和获得的结果可为边坡爆破开挖方案确定和加固工程设计提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 汪海波,徐 颖. 爆破对软岩巷道松动范围影响的测试与分析[J]. 煤矿安全,2012,43(11):198-200.
- [1] WANG Hai-bo, XU Ying. Testing and analysis of influence of blasting on soft rock roadway loose zone[J]. Safety in Coal Mines,2012,43(11):198-200. (in Chinese)
- [2] 左双英,肖 明,续建科,等. 隧道爆破开挖围岩动力损伤效应数值模拟[J]. 岩土力学,2011,32(10):3171-3176.
- [2] ZUO Shuang-ying, XIAO Ming, XU Jian-ke, et al. Numerical simulation of dynamic damage effect of surrounding rocks for tunnels by blasting excavation[J]. Rock and Soil Mechanics,2011,32(10):3171-3176. (in Chinese)
- [3] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition[C]//HAMMAH R, BAWDEN W F, CURRAN J, et al. Proceedings of the North American RockMechanics Society NARMS-TAC 2002. Toronto: University of Toronto Press, 2002: 267-273.
- [4] 闫长斌,徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(22):4030-4035.
- [4] YAN Chang-bin, XU Guo-yuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(22):4030-4035. (in Chinese)
- [5] 夏开宗,陈从新,刘秀敏,等. 基于岩体波速的 Hoek-Brown 准则预测岩体力学参数方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报,2013,32(7):1458-1466.
- [5] XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min. Estimation of rock mass mechanical parameters based on ultrasonic velocity of rock mass and Hoek-Brown criterion and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013,32(7):1458-1466. (in Chinese)
- [6] 孙金山,卢文波. Hoek-Brown 经验强度准则的修正及应用[J]. 武汉大学学报(工学版),2008,41(1):63-66.
- [6] SUN Jin-shan, LU Wen-bo. Modification of Hoek-Brown criterion and its application[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2008,41(1):63-66. (in Chinese)
- [7] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion and GSI—2018 edition [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2019,11(3):445-463.
- [8] 陈祖煜,周嘉伟,蔡云鹏,等. 工程边坡应用 Hoek-Brown 强度准则时的扰动因子取值探讨[J]. 长江科学院院报,2020,37(2):72-80,92.
- [8] CHEN Zu-yu, ZHOU Jia-wei, CAI Yun-peng, et al. Appraisal on selection of disturbance factor for engineered slopes by Hoek-Brown criterion 2018 edition [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2020,37(2):72-80,92. (in Chinese)
- [9] HOEK E. Blast Damage Factor D[Z]. Technical note for RocNews,2012.
- [10] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences,1997,34(8):1165-1186.
- [11] MARINOS P, HOEK E. Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2001,60(2):85-92.
- [12] 苏永华,封立志,李志勇,等. Hoek-Brown 准则中确定地质强度指标因素的量化[J]. 岩石力学与工程学报,2009,28(4):679-686.
- [12] SU Yong-hua, FENG Li-zhi, LI Zhi-yong, et al. Quantification of elements for geological strength index in Hoek-Brown criterion[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2009,28(4):679-686. (in Chinese)
- [13] 张建海,胡著秀,杨永涛,等. 地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报,2011,30(6):1191-1197.
- [13] ZHANG Jian-hai, HU Zhu-xiu, YANG Yong-tao, et al. Acoustic velocity fitting and monitoring feedback analysis of surrounding rock loose zone in underground powerhouse[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2011,30(6):1191-1197. (in Chinese)
- [14] 肖国强,覃毅宝,王法刚,等. 声波法在三峡工程永久船闸边坡岩体卸荷松弛监测中的应用[J]. 岩土力学,2006,27(S2):1235-1238.
- [14] XIAO Guo-qiang, QIN Yi-bao, WANG Fa-gang, et al. Application of acoustic wave method in monitoring unloading relaxation of rock mass of Three Gorges Dam permanent shiplock slope [J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(S2):1235-1238. (in Chinese)
- [15] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2002,39(2):185-216.