

DOI: 10.11779/CJGE202005020

岩石高边坡爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律研究

杨建华^{1,2}, 代金豪^{1,2}, 姚池^{1,2}, 蒋水华^{1,2}, 姜清辉^{1,2}

(1. 南昌大学建筑工程学院, 江西 南昌 330031; 2. 南昌大学江西省尾矿库工程安全重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘要: 岩石边坡爆破开挖引起的岩体力学性能劣化对边坡稳定具有不利的影响, Hoek-Brown (H-B) 准则是快速估算损伤岩体力学参数的有效途径之一。针对白鹤滩水电站左岸 834~750 m 高程拱肩槽边坡爆破开挖, 通过分析爆破后边坡岩体的声波速度, 定量确定了 H-B 准则中扰动因子 D 的取值及其随深度的变化规律, 在此基础上研究了损伤区内岩体力学参数的弱化规律。研究表明: 随着岩体深度的增加, 扰动因子 D 线性降低, 损伤区内岩体变形模量线性增大, 岩体单轴抗压强度、单轴抗拉强度、内摩擦角和黏聚力非线性增大; 爆破开挖扰动下岩体单轴抗压强度弱化最为严重, 内摩擦角弱化程度最小。研究成果可为边坡稳定性分析与支护设计的岩体力学参数取值提供参考。

关键词: 岩石边坡; 爆破; 开挖损伤区; Hoek-Brown 准则

中图分类号: TU45

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2020)05-0968-08

作者简介: 杨建华(1986—), 男, 博士, 副教授, 主要从事岩石动力学及工程爆破方面的研究工作。E-mail: yangjianhua86@ncu.edu.cn。

Weakening laws of rock mass properties in blasting excavation damage zone of high rock slopes

YANG Jian-hua^{1,2}, DAI Jin-hao^{1,2}, YAO Chi^{1,2}, JIANG Shui-hua^{1,2}, JIANG Qing-hui^{1,2}

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Key Laboratory of Tailings Reservoir Engineering Safety of Jiangxi Province, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: The weakening of rock mass properties caused by blasting excavation has an adverse effect on slope stability. The Hoek-Brown (H-B) criterion is one of the effective approaches to quickly estimate the mechanical properties of the damaged rock mass. For blasting excavation of the left-bank arch spandrel groove slope of Baihetan Hydropower Station at an elevation of 834~750 m, the disturbance factor in the H-B criterion and its variation with the increasing depth are quantified by analyzing the acoustic wave velocities of the damaged rock mass after blasting. Based on this, the weakening laws of the rock mass properties in the damaged zone are studied. The results show that the disturbance factor decreases linearly as the depth into the slope face increases. In this case, the deformation modulus of rock mass increases linearly with an increase in depth. However, the increases are nonlinear in the uniaxial compressive strength, uniaxial tensile strength, internal friction angle and cohesion. Under blasting excavation disturbance, the uniaxial compressive strength is the most seriously weakened, while the internal friction angle is the lightest weakened. The research results can provide reference for the selection of appropriate rock mass parameters with regard to slope stability analysis and support design.

Key words: rock slope; blasting; excavation damage zone; Hoek-Brown criterion

0 引言

大型水电工程的岩石高边坡在大坝枢纽建设及运行过程中发挥着重要作用, 高边坡的稳定将长期影响乃至控制工程全生命周期内的库坝安全, 没有高边坡的稳定就没有库坝安全^[1]。钻爆法作为一种经济、高效的岩体开挖方式, 目前是大型水电工程岩石高边坡开挖的主要手段。炸药爆炸产生的冲击波和高压气体在破碎开挖岩体的同时, 不可避免地会对保留岩体造成损伤^[2]。此外, 对于深切河谷高地应力区的岩石边

坡, 开挖卸荷引起的应力松弛同样会对边坡保留岩体造成损伤^[3]。开挖面附近受爆破损伤和应力松弛影响的区域称为爆破开挖损伤区 (EDZ)^[4]。爆破开挖损伤区内岩体完整性变差、力学性能降低, 对岩石高边

基金项目: 长江科学院开放研究基金项目 (CKWV2018467/KY); 国家自然科学基金项目 (U1765207, 51969015); 江西省自然科学基金项目 (20181BAB206047, 20192ACB21019); 江西省重点实验室计划项目 (20181BCD40003)

收稿日期: 2019-06-05

*通信作者 (E-mail: chi.yao@ncu.edu.cn)

坡的稳定将产生十分不利的影 响。因此, 研究爆破开挖损伤区内的岩体力学参数弱化效应对岩石高边坡稳定性评价与支护设计具有十分重要的意义。

原位试验是获取现场岩体力学参数最直接、最准确的方法。然而开展现场原位试验周期长、费用高, 且在高陡的边坡坡面上不便布置大型实验设备, 因此依靠现场原位试验确定岩石高边坡爆破开挖损伤区内的岩体力学参数还存在较大的困难。为了快速获取开挖损伤区内的岩体力学参数, 许多科研人员采用诸如广义 Hoek-Brown (H-B) 破坏准则的经验公式来进行估算。如姜光成等^[5]根据改进的 GSI 量化和 H-B 准则来估算矿岩的力学参数; 於汝山等^[6]结合 H-B 准则并引进岩体完整系数来估算深部岩体的强度参数; 程爱平等^[7]将 H-B 准则与蒙特卡罗随机方法结合来估算节理岩体的强度及变形参数。

H-B 准则通过引入扰动因子 D 来表征爆破损伤和应力松弛对岩体力学性能的影响^[8]。但 H-B 准则在对扰动因子 D 的确定中只给出了定性的描述和少量的实例, 这给采用 H-B 准则估算开挖损伤区内的岩体力学参数带来了很大的不便。此外, 2002 版 H-B 准则将整个开挖损伤区内的扰动因子 D 视为常而未考虑 D 随岩体深度的变化^[8], 如图 1 所示。为克服上述不足, 闫长斌等^[9]引入岩体完整性指数来计算扰动因子, 巫德斌等^[10]、夏开宗等^[11]利用开挖前后岩体的声波速度来确定扰动因子; Zheng 等^[12]和 Yilmaz 等^[13]假定扰动因子随边坡岩体深度线性递减。然而, 由于缺乏充足的理论基础和足够的试验数据, 目前对 H-B 准则中扰动因子 D 随岩体深度的变化规律尚未认识清楚, 制约了 H-B 准则在开挖损伤区岩体力学参数估算中的应用。

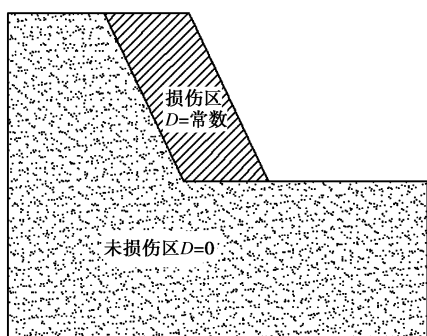


图 1 H-B 准则中开挖损伤区扰动因子 D 的取值

Fig. 1 Values of disturbance factor D in excavation damage zone in H-B criterion

岩体声波速度与岩体强度和变形模量具有很好的相关性^[14], 且易于测量获取。通过对白鹤滩水电站左岸拱肩槽边坡岩体的声波速度进行分析, 研究扰动因子 D 随边坡岩体深度的变化规律; 在此基础上, 采用 H-B 准则研究该岩石高边坡爆破开挖损伤区内的岩体力学参数弱化规律, 研究结果可为本工程和类似工程

边坡稳定性评价与支护设计的岩体力学参数取值提供参考。

1 工程概况与岩体声波测试

1.1 白鹤滩左岸拱肩槽边坡工程概况

白鹤滩水电站位于金沙江下游四川省宁南县和云南省巧家县境内, 总装机容量 16000 MW, 多年平均发电量 640.95 亿 kW·h, 是“西电东送”的骨干电源点之一。工程枢纽由混凝土双曲拱坝、泄洪消能建筑物、引水发电系统等主要建筑物组成。混凝土双曲拱坝坝顶高程 834 m, 最大坝高 289 m。左岸拱肩槽边坡从 834 m 高程开挖, 针对不同的边坡岩体采用 1:0.1~1:0.5 渐变坡设计, 每级坡高 20~30 m, 每级马道宽 3~5 m。左岸坝肩岩体主要由峨眉山玄武岩第三、第四岩流层构成, 岩性主要为玄武岩夹角砾熔岩。左岸建基面除高程 834~820 m 范围是弱风化下段、弱卸荷的 III₂ 类岩体 (镶嵌或次块状结构) 外, 其余范围均主要是弱风化下段——微新、无卸荷的 III₁ 类岩体 (次块状或块状结构), 如图 2 所示。左岸拱肩槽边坡主要出露 NE 向断层 F₁₇, 于中高程斜切拱肩槽边坡。在 F17 断层上盘发育有 NNW 向 f₁₀₈、f₁₁₀ 张扭性断层。在 720~740 m 高程发育层间错动带 C₃₋₁、C₃, 靠近河床坝基部位发育层内错动带 LS₃₃₁、LS₃₃₁₇、LS₃₃₁₈ 和 LS₃₃₁₉。

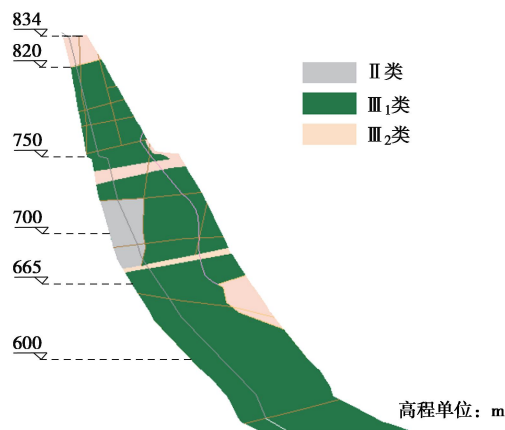


图 2 左岸拱肩槽边坡三维视图

Fig. 2 Three-dimensional view of left-bank arch spandrel groove slope

拱肩槽边坡采用深孔梯段爆破法进行开挖, 梯段爆破高度约 10 m。拱肩槽边坡作为拱坝的建基面, 其开挖质量要求严格, 故在设计开挖轮廓面上采用了预裂控制爆破的方法以减小主爆孔爆破对保留岩体的损伤。预裂孔深为 10~15 m、孔径为 90 mm, 采用不耦合装药结构, 药卷直径 32 mm, 线装药密度约 0.3 kg/m, 预裂孔爆破最大单响药量约 18 kg。预裂爆破后形成的开挖轮廓面较为平整, 半孔率较高, 如图 3 所示。

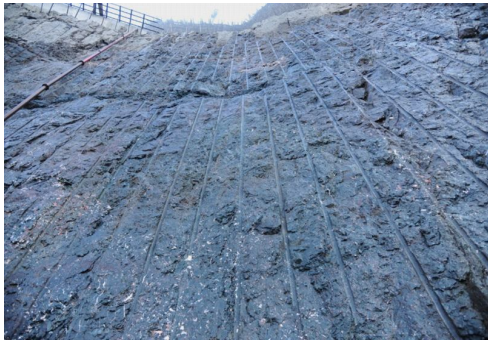


图3 预裂爆破后的拱肩槽边坡轮廓面

Fig. 3 Profile of arch spandrel groove slope after presplitting blasting

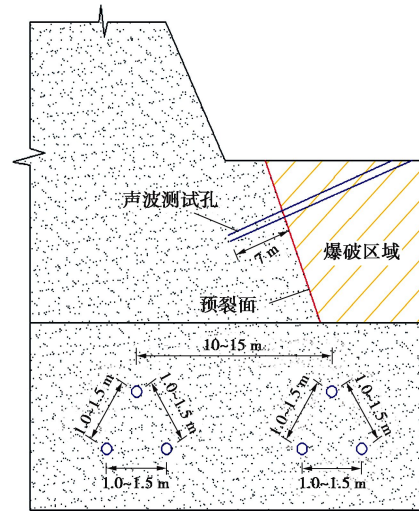
1.2 岩体声波测试

目前工程实践中确定爆破开挖损伤区范围的方法主要有钻孔取芯法、声波检测法、钻孔成像法、压水试验法等，其中声波检测法因其操作简便、成本低、精度高而被广泛采用。

白鹤滩左岸 834~750 m 高程拱肩槽边坡爆破开挖过程中，笔者在不同开挖台阶对边坡岩体进行了 12 次声波测试，其中前 3 次在 834~820 m 高程的 III₂ 类岩体中进行，后 9 次在 820~750 m 高程的 III₁ 类岩体中进行，声波测试方案如图 4 所示。在每一个开挖台阶最后一个梯段爆破前，从爆区表面钻斜向声波测试孔，声波测试孔与开挖轮廓面垂直并穿过轮廓面 7 m，整个声波孔长约 15 m，声波孔孔径 90 mm。每次测试钻设两组声波孔，一组位于上游侧，一组位于下游侧，两组声波孔相距约 10~15 m。每组由 3 个平行的声波测试孔组成，相邻孔间距 1.0~1.5 m。每一个开挖台阶最后一个梯段爆破前 1~2 d 进行爆前声波测试，测试完成后将孔内灌满细砂对测试孔进行保护；爆破后待爆渣清理到合适高程，将测试孔中的细砂用高压风吹出，而后进行爆后声波测试。

岩体声波检测同时采用单孔和跨孔两种测试方法，换能器按 0.2 m 的间隔从孔底逐步向孔口移动，从而测试边坡不同深度处的岩体波速。每一测点测读两次，取其平均值为最终读数。12 次测试所得到的不同深度处的岩体声波速度（P 波速度）如图 5 所示，图中横坐标 0 对应边坡坡面位置。由于本文仅分析爆破后边坡岩体最终的损伤范围及损伤程度，因此图 5 中仅给出了爆后声波测试的数据。现场测试数据表明，单孔测试法所测得的岩体波速大于跨孔测试法所测得的岩体波速，但二者差别不大，因此将两种测试方法所测得的数据合在一起进行统计分析以增大样本数目。从图 5 可以看到，在 834~820 m 高程 III₂ 类玄武岩中测得的岩体波速离散型较大，而在 820~750 m 高程 III₁ 类玄武岩中测得的岩体波速规律性较好。整体上看，在边坡表面 0~3 m 范围内，岩体波速随深度

增加有逐步增大的趋势。可见，不同深度处的岩体受爆破开挖扰动的程度不同，在整个开挖损伤区内将扰动因子 D 视为常数是不合理的。



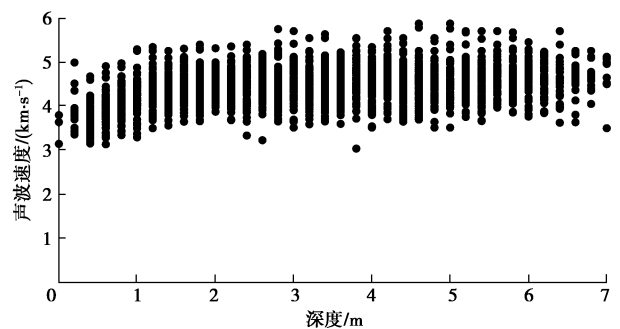
(a) 示意图



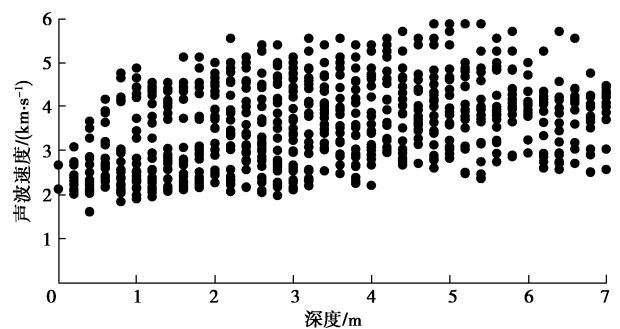
(b) 现场图

图4 声波测试孔布置图

Fig. 4 Arrangement of acoustic testing holes



(a) III₁类玄武岩



(b) III₂类玄武岩

图5 不同深度处的岩体 P 波速度

Fig. 5 Acoustic P-wave velocities tested at different depths

2 H-B 准则扰动因子 D 的确定

2.1 扰动因子 D 与岩体波速的关系

H-B 准则 2002 版通过引入扰动因子 D 来反映爆破损伤和应力松弛对岩体力学性能的影响, 该版本的 H-B 准则表示为^[8]

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (1)$$

式中 σ_1, σ_3 分别为岩体破坏时的最大主应力和最小主应力; σ_{ci} 为完整岩石试件的单轴抗压强度; m_b, s, a 为岩体材料参数, 与岩性和岩体结构面情况有关, 可表示为地质强度指标 GSI 和扰动因子 D 的函数:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \quad (2)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \quad (3)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-GSI/15} - e^{-20/3}) \quad (4)$$

式中, m_i 是完整岩石的材料常数, 反映岩石的软硬程度。

对于岩石边坡工程, H-B 准则 2002 版中建议: 对于土木工程小规模岩石边坡开挖, 当采用轮廓控制爆破、施工质量较好时 D 取 0.7, 爆破开挖施工质量较差时 D 取 1.0; 对于露天采矿大规模的岩石边坡爆破开挖, 爆破损伤与应力松弛扰动作用强烈, 此时 D 取 1.0, 当软岩采用机械开挖时则 D 取 0.7。可见, H-B 准则建议的扰动因子取值原则只是定性分析了扰动程度, 可操作性不强。本文从实用和简便的原则出发, 利用 H-B 准则和岩体质量指标 Q 系统, 建立基于岩体声波速度的扰动因子 D 定量计算方法。

Barton 通过对大量岩体工程数据的统计分析, 建立了岩体地震波波速与岩体质量指标 Q 之间的关系^[15]:

$$V_p = 3.5 + \log Q_c \quad (5)$$

$$Q_c = Q \times \frac{\sigma_{ci}}{100} \quad (6)$$

式中, V_p 为地震波 P 波速速 (km/s)。

根据 Barton 的研究^[15], 岩体变形模量 E_m 与岩体质量指标 Q_c 有如下经验关系:

$$E_m = 10 \times Q_c^{1/3} \quad (7)$$

由式 (5), (7) 可得 E_m 和 V_p 之间的关系:

$$E_m = 10 \times 10^{(V_p-3.5)^3} \quad (8)$$

对于未损伤的岩体, 岩体变形模量和地震波速表示为 E_{m0} 和 V_{p0} , 则

$$E_{m0} = 10 \times 10^{(V_{p0}-3.5)^3} \quad (9)$$

损伤岩体与未损伤岩体的变形模量之比 E_m/E_{m0}

为

$$E_m / E_{m0} = 10^{(V_p-V_{p0})^3} \quad (10)$$

在 H-B 准则 2002 版中, 岩体变形模量 E_m 由下式给出^[8]:

$$E_{m0} = \begin{cases} \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}) \\ \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (11)$$

对于未损伤的岩体 ($D=0$):

$$E_{m0} = \begin{cases} \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} \leq 100 \text{ MPa}) \\ 10^{(GSI-10)/40} & (\sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}) \end{cases} \quad (12)$$

由式 (11), (12) 可得

$$E_m / E_{m0} = 1 - D/2 \quad (13)$$

联立式 (10), (13), 则可建立扰动因子 D 与岩体地震波波速之间的关系:

$$D = 2 \left[1 - 10^{(V_p-V_{p0})^3} \right] \quad (14)$$

值得注意的是, Barton 的岩体质量指标 Q 系统采用的是岩体地震波速度。地震法和声波法同属于弹性波测试方法, 大量研究表明, 岩体声波速度与地震波速度具有较好的相关性^[16]。根据白鹤滩水电站岩石边坡工程中的测试数据, 如图 6 所示, 岩体地震波速度 V_p 略小于岩体声波速度 c_p , 二者存在如下统计关系:

$$V_p = 0.89c_p + 0.05 \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14), 扰动因子 D 与岩体声波速度的关系为

$$D = 2 \left[1 - 10^{(c_p-c_{p0})^3/3.4} \right] \quad (16)$$

式中, c_{p0} 为未损伤岩体的声波速度。

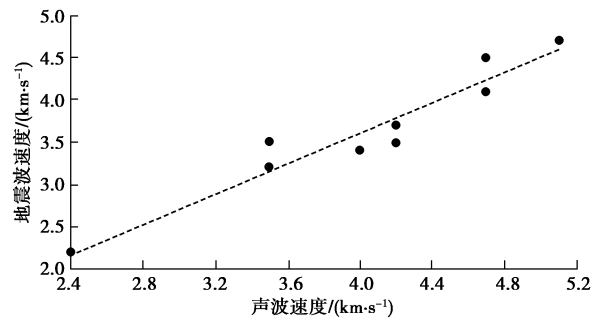


图 6 岩体地震波与声波测试数据

Fig. 6 Seismic wave of rock mass and test data of acoustic wave

2.2 扰动因子 D 随深度的变化规律

从式 (16) 可以看到, 如果已知未损伤岩体的声波速度 c_{p0} 和损伤岩体的声波速度 c_p , 即可量化确定 H-B 准则中的扰动因子 D 。由于声波测试孔钻孔较深, 靠近孔底部位的岩体受爆破开挖扰动作用很小, 岩体未出现损伤, 因此靠近孔底部位的岩体声波速度可近

似认为是未损伤岩体的声波速度 c_{p0} 。图 5 中的岩体声波速度是 12 次试验、72 个声波孔的测试数据，因而表现出了一定的离散性。为便于分析不同深度处的扰动因子 D ，取同一深度所有监测值的平均值来表示该深度处的岩体声波速度。由于同一深度处的测试样本数较多，采用平均值来表征也具有较高的可靠性。

根据图 5 中的测试数据，III₁类玄武岩和III₂类玄武岩不同深度处的岩体平均波速如图 7 所示。从图中可以看到，在III₁类玄武岩边坡坡面后 0~2.0 m、III₂类玄武岩边坡坡面后 0~3.2 m 范围内，岩体波速有明显上升的趋势，这表明该范围内的岩体受到了剧烈的爆破开挖扰动而产生了损伤，此区域为边坡的爆破开挖损伤区，其波速为损伤岩体的波速 c_p 。损伤区外，岩体的平均波速虽有波动，但整体趋于稳定，损伤区外各测点平均波速的平均值记为未损伤岩体的声波速度 c_{p0} 。III₁类和III₂类玄武岩边坡岩体的爆破开挖损伤区深度、未损伤岩体的声波速度列于表 1。可以看到，笔者现场测试所得到的未损伤岩体的波速在地勘报告建议值范围之内，这表明本文的测试数据是合理可靠的。爆破开挖扰动在III₂类玄武岩中引起的损伤的深度明显大于在III₁类玄武岩中的损伤深度，这是由于岩体质量越差，开挖岩体破碎所消耗的能量越少，更多的爆炸能作用在了边坡保留岩体上，引起保留岩体损伤破坏。

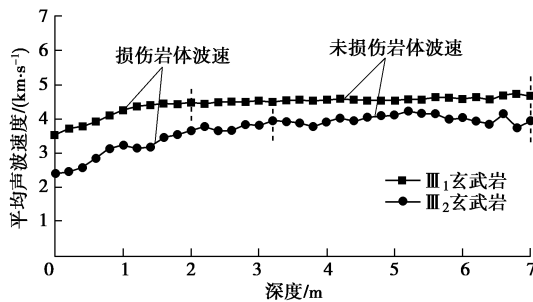


图 7 不同深度处的岩体平均声波速度

Fig. 7 Average velocities of acoustic wave at different depths

表 1 爆破开挖损伤区深度及未损伤岩体的波速

Table 1 Depth of blasting excavation damage zone and acoustic velocity of undamaged rock mass

| 岩体类别 | 损伤区深度/m | 未损伤岩体波速/(km·s ⁻¹) | |
|-----------------------|---------|-------------------------------|-----------|
| | | 本文测量值 | 地勘建议值 |
| III ₁ 类玄武岩 | 2.0 | 4.54 | 4.20~4.70 |
| III ₂ 类玄武岩 | 3.2 | 3.94 | 3.50~4.20 |

将图 7 中的未损伤岩体波速 c_{p0} 和不同深度处的损伤岩体波速 c_p 代入式 (16) 得到开挖损伤区内不同深度处的扰动因子 D ，如图 8 所示。如上所述，岩体质量越差，爆破开挖扰动引起的岩体损伤越严重。在

III₂类玄武岩中，边坡坡面后 0.6 m 范围内岩体的扰动因子达到了 1.0，而在III₁类玄武岩中，仅边坡表面岩体的扰动因子达到 1.0。对图 8 (a) III₁类玄武岩中不同深度处的扰动因子进行线性拟合，相关系数高达 0.98；对图 8 (b) III₂类玄武岩中 0.6~3.2 m 深度处的扰动因子进行线性拟合，相关系数也高达 0.96。因此，可以认为扰动因子 D 随深度的增加从 1.0 线性降低至 0。需要指出的是，对于质量较好的岩体，扰动因子 D 在整个开挖损伤区内线性降低；而对于质量较差的岩体，扰动因子 D 在靠近坡面一定范围内先保持恒定值 1.0 不变，而后随深度的增大而线性降低。

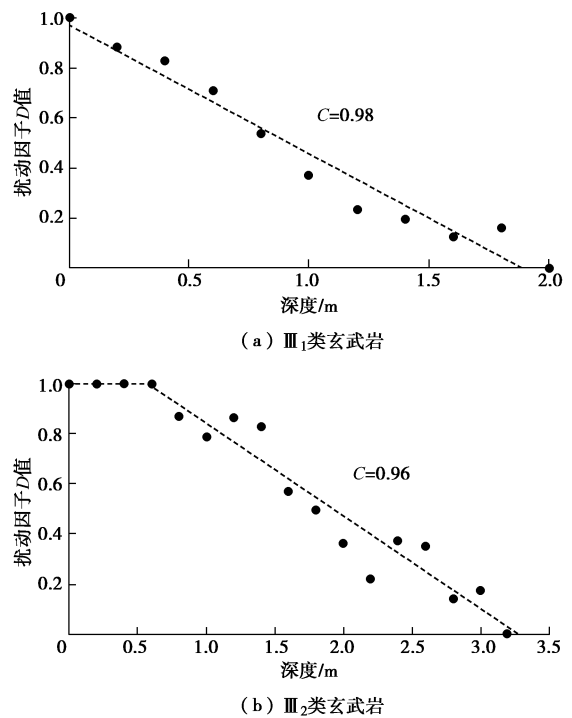


图 8 扰动因子 D 随深度的变化

Fig. 8 Variation of disturbance factor D with increasing depth

3 爆破开挖损伤区岩体力学参数弱化规律

由于爆破和应力松弛引起的岩体损伤，边坡爆破开挖损伤区内的岩体力学参数弱于未损伤岩体的力学参数。如果将未损伤岩体的力学参数 ($D=0$) 赋予损伤区内的岩体，势必会过高地估计边坡的稳定性；反之，如果将损伤区内的岩体全部视为完全损伤的岩体 ($D=1.0$)，边坡的稳定分析又偏于保守。因此，有必要研究边坡爆破开挖损伤区内岩体力学参数随深度的变化规律。

本节以III₁类玄武岩为例进行研究，定义边坡坡面岩体的扰动因子为 D_{max} ，扰动因子 D 随边坡岩体深度的增加而线性降低，其表达式为

$$D = \left(1 - \frac{d}{h_{EDZ}}\right) D_{max}, \quad (17)$$

式中, d 是距坡面的垂直距离, h_{EDZ} 是爆破开挖损伤区的深度。对于本工程 III₁ 类玄武岩, $h_{EDZ}=2.0$ m, $D_{max}=1.0$ 。

将式 (17) 代入式 (13) 得

$$\frac{E_m}{E_{m0}} = 1 - \frac{D_{max}}{2} \left(1 - \frac{d}{h_{EDZ}}\right) \quad (18)$$

可见, 在边坡表面 ($d=0$ m、 $D_{max}=1.0$), 岩体损伤最为严重, 其变形模量降低了 50%。随着深度 d 的增加, 损伤岩体的变形模量线性增大, 直至达到未损伤岩体的变形模量 E_{m0} , 如图 9 所示。若缺少现场岩体变形试验, 未损伤岩体的变形模量 E_{m0} 可采用 H-B 准则式 (12) 进行估算。

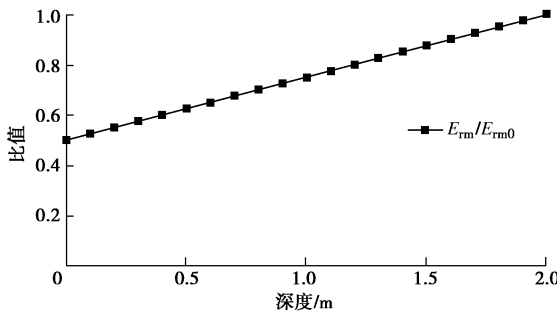


图 9 损伤区内的岩体变形模量 E 随深度的变化

Fig. 9 Variation of rock deformation modulus E with depth in damage zone

H-B 准则还给出了岩体单轴抗压强度和单轴抗拉强度的估计。令式 (1) 中 $\sigma_3=0$, 岩体破坏时的最大主应力 σ_1 即为岩体单轴抗压强度 σ_c :

$$\sigma_c = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (19)$$

根据 Hoek^[17] 的研究, 脆性材料在单向拉伸时的抗拉强度等于双向拉伸时的抗拉强度, 令式 (1) 中 $\sigma_1=\sigma_3=\sigma_t$, 可得岩体单轴抗拉强度 σ_t :

$$\sigma_t = \left| -\frac{s\sigma_{ci}}{m_b} \right| \quad (20)$$

对于岩石边坡稳定性分析, 更多采用的是岩体抗剪强度参数。Hoek 等研究表明, 当 $\sigma_t < \sigma_3 < \sigma_{3max}$ 时, 非线性的 H-B 准则曲线与线性的 Mohr-Coulomb (M-C) 准则曲线非常吻合^[8]。假定在该范围内 H-B

准则为线性的, 将 H-B 准则线性段转化为 M-C 准则可得到等效的内摩擦角 φ 和黏聚力 c :

$$\varphi = \arcsin \left[\frac{3am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)+3am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right], \quad (21)$$

$$c = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}/[(1+a)(2+a)]}}, \quad (22)$$

式中, $\sigma_{3n} = \sigma_{3max} / \sigma_{ci}$, σ_{3max} 为最小主应力的上限值, 对于边坡工程,

$$\sigma_{3max} = 0.72\sigma_{cm} \left(\frac{\sigma_{cm}}{\gamma H} \right)^{-0.91}, \quad (23)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)](m_b/4 + s)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}, \quad (24)$$

式中, γ 为岩体重度, H 为边坡高度。

根据白鹤滩左岸拱肩槽边坡的岩性及岩体基本特征, 按照 H-B 准则参数取值方法^[8], 取 $\sigma_{ci}=70$ MPa、 $m_i=17$ 、GSI 为 55 (III₁ 类玄武岩) 和 50 (III₂ 类玄武岩), 采用 H-B 准则估算的未损伤岩体 ($D=0$) 的变形模量及强度参数如表 2 所示, 表中 σ_{c0} , σ_{t0} , φ_0 和 c_0 分别为未损伤岩体的单轴抗压强度、单轴抗拉强度、内摩擦角和黏聚力。工程勘测设计阶段开展了现场岩体变形试验和抗剪试验, 获得了岩体的变形模量和抗剪强度参数, 见表 2。H-B 准则估算值与现场原位试验建议值基本一致, 这表明采用 H-B 准则估算本边坡的岩体力学参数是可行的。

从式 (19) ~ (22) 可以看到, 岩体强度参数 σ_c , σ_t , φ 和 c 均与岩体材料常数 m_b 和 s 有关, 而 m_b 和 s 又是扰动因子 D 的函数。因此, 随着深度的增加, 当扰动因子 D 从 1.0 线性减小到 0 时, 开挖损伤区内的岩体强度参数也会随之发生改变, 如图 10 所示。在边坡坡面上 ($d=0$ m、 $D=1.0$), 损伤岩体与未损伤岩体的强度参数比值 σ_c/σ_{c0} , σ_t/σ_{t0} , φ/φ_0 , c/c_0 分别为 0.28, 0.41, 0.76 和 0.54。可见, 受爆破开挖扰动的影 响, 岩体单轴抗压强度弱化最为严重, 单轴抗拉强度其次, 内摩擦角受到的影响最小。随着深度的增加, 这些强度参数以不同的速率增长到初始强度值。与岩体变形模量不同, 这些强度参数随深度的增加表

表 2 未损伤岩体的力学参数

Table 2 Mechanical parameters of undamaged rock mass

| 岩体分类 | H-B 准则估算值 | | | | | 现场试验建议值 | | |
|-----------------------|---------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|------------------|---------------------|----------------------|------------------|
| | E_{m0}/GPa | σ_{c0}/MPa | σ_{t0}/MPa | $\varphi_0/(^\circ)$ | c_0/MPa | E_{m0}/GPa | $\varphi_0/(^\circ)$ | c_0/MPa |
| III ₁ 类玄武岩 | 11.2 | 5.63 | 0.14 | 53 | 1.3 | 10~12 | 45~50 | 1.0~1.2 |
| III ₂ 类玄武岩 | 8.4 | 4.22 | 0.09 | 51 | 1.1 | 8~10 | 42~45 | 0.9~1.0 |

现为非线性增长,单轴抗压强度和单轴抗拉强度的增长先慢后快,内摩擦角和黏聚力的增长先快后慢。

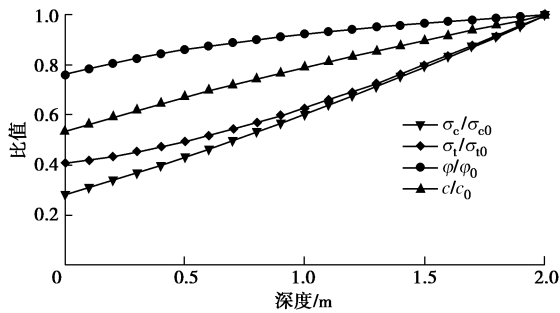


图 10 损伤区内的岩体强度参数随深度的变化

Fig. 10 Variation of strength parameters of rock mass with increasing depth in damage zone

4 结 论

通过对白鹤滩水电站左岸 834~750 m 高程拱肩槽边坡爆破开挖后的岩体声波速度进行分析,量化了 H-B 准则中的扰动因子 D 随边坡岩体深度的变化规律,在此基础上分析了爆破开挖损伤区内的岩体力学参数弱化效应。

(1) 对于质量较好的边坡岩体,扰动因子 D 随深度的增加而线性降低;对于质量较差的边坡岩体,扰动因子 D 在一定深度范围内先保持为恒定值 1.0 不变,而后线性降低。

(2) 随着深度增加,扰动因子 D 线性减小,爆破开挖损伤区内的岩体变形模量线性增大,岩体单轴抗压强度、单轴抗拉强度、内摩擦角和黏聚力非线性增大;岩体单轴抗压强度受爆破开挖扰动的影响最大,内摩擦角受到的影响最小。

参考文献:

[1] 周创兵. 水电工程高陡边坡全生命周期安全控制研究综述[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(6): 1081 - 1093. (ZHOU Chuang-bing. A prospect of researches on life-cycle safety control on high-steep rock slopes in hydropower engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1081 - 1093. (in Chinese))

[2] 刘杰, 冯世国, 李天斌, 等. 冲击荷载作用下岩石动态响应预测研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(11): 2022 - 2030. (LIU Jie, FENG Shi-guo, LI Tian-bin, et al. Prediction of dynamic response of rock under impact loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(11): 2022 - 2030. (in Chinese))

[3] 程立, 刘耀儒, 陶灼夫, 等. 拱坝建基面开挖过程中不平

衡力变化及处理效果研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1670 - 1679. (CHENG Li, LIU Yao-ru, TAO Zhuo-fu, et al. Variation of unbalanced force during excavation of arch dam base surface and treatment effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1670 - 1679. (in Chinese))

- [4] SIREN T, KANTIA P, RINNE M. Considerations and observations of stress-induced and construction-induced excavation damage zone in crystalline rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2015, 73: 165 - 174.
- [5] 姜光成, 胡乃联, 洪根意, 等. 基于 GSI 值量化和修正方法的岩体力学参数确定[J]. 岩土力学, 2018, 39(6): 2211 - 2218. (JIANG Guang-cheng, HU Nai-lian, HONG Gen-yi, et al. Determination of rock mass mechanical parameters based on quantification and correction method of GSI value[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(6): 2211 - 2218. (in Chinese))
- [6] 於汝山, 杨宜, 许冬丽. Hoek-Brown 强度准则在深部岩体力学参数估算中的应用研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(1): 123 - 127. (YU Ru-shan, YANG Yi, XU Dong-li. Application of Hoek-Brown strength criterion in estimating mechanical parameters of deep rock mass[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(1): 123 - 127. (in Chinese))
- [7] 程爱平, 肖术, 许梦国, 等. 基于广义 Hoek-Brown 准则的节理岩体强度及变形参数随机分析[J]. 岩土力学, 2017, 38(1): 205 - 213. (CHENG Ai-ping, XIAO Shu, XU Meng-guo, et al. Stochastic analysis of strength and deformation parameters of jointed rock mass based on generalized Hoek-Brown criterion[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(1): 205 - 213. (in Chinese))
- [8] HOEK E, CARRANZA-TORRES C, CORKUM B. Hoek-Brown failure criterion—2002 edition[C]// Proceedings of the North American Rock Mechanics Society NARMS-TAC, 2002, Toronto: 267 - 273.
- [9] 闫长斌, 李国权, 陈东亮, 等. 基于岩体爆破累积损伤效应的 Hoek-Brown 准则修正公式[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 2951 - 2964. (YAN Chang-bin, LI Guo-quan, CHENG Dong-liang, et al. Amended expressions of Hoek-Brown criterion based on blasting cumulative damage effects of rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 2951 - 2964. (in Chinese))
- [10] 巫德斌, 徐卫亚. 基于 Hoek-Brown 准则的边坡开挖岩

- 体力学参数研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2005, **33**(1): 89 - 93. (WU De-bin, XU Wei-ya. Hoek-Brown criterion-based study on mechanical parameters[J]. Journal of Hohai Universit (Natural Sciences), 2005, **33**(1): 89 - 93.(in Chinese))
- [11] 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. (XIA Kai-zong, CHEN Cong-xin, LIU Xiu-min, et al. 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))
- [12] ZHENG H, LI T, SHEN J, XU CS, et al. The effects of blast damage zone thickness on rock slope stability[J]. Engineering Geology, 2018, **246**: 19 - 27.
- [13] YILMAZ M, ERTIN A, ER S, et al. Numerical modelling of steep slopes in open rock quarries[J]. Journal of the Geological Society of India, 2018, **91**(2): 232 - 238.
- [14] 严 鹏, 张 晨, 高启栋, 等. 不同损伤程度下岩石力学参数变化的声波测试[J]. 岩土力学, 2015, **36**(12):3425 - 3432. (YAN Peng, ZHANG Cheng, GAO Qi-dong, et al. Acoustic wave test on mechanical properties variation of rocks under different damage degrees[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(12): 3425 - 3432. (in Chinese))
- [15] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 2002, **39**(2): 185 - 216.
- [16] 张程远, 王文恺, 王 爽, 等. 基于岩体完整性评价的超声-地震波速度跨尺度转换方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, **37**(11): 2435 - 2445. (ZHANG Cheng-yuan, WAN Wen-kai, WANG Shuang, et al. Conversion method from ultrasonic to seismic velocity based on rock integrity assessment[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, **37**(11): 2435 - 2445. (in Chinese))
- [17] HOEK E. Strength of jointed rock masses[J]. Géotechnique, 1983, **33**(3): 187 - 223.

本期广告索引

- 封2 北京筑信达工程咨询有限公司
封3 北京理正软件股份有限公司
封4 节约每滴水·保护水资源