

声波测试法在判别地下厂房 EDZ 中的应用

徐光黎¹, 董家兴², 李志鹏¹, 宋胜武³, 张世殊³, 王金生³

1. 中国地质大学岩土钻掘与防护教育部工程研究中心, 湖北武汉 430074

2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南昆明 650500

3. 中国电力建设集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川成都 610072

摘要: 洞室开挖不可避免地会损伤岩体, 对于规模巨大、布置异常复杂的水电地下厂房围岩尤甚, 合理地确定开挖损伤区(EDZ)分布成为地下洞室的信息化设计、施工和安全运营的关键性问题, 在引入 EDZ 概念及强 EDZ、弱 EDZ 和基本未损区分区的基础上, 提出采用声波测试方法来确定强 EDZ 和弱 EDZ 的分布。将声波波速—深度曲线划分为 I 型、II 型和 III 型等 3 种曲线类型, 根据曲线特征点, 对 EDZ 进行定性、半定量的初判。根据波速计算得出的损伤因子 D , 对强、弱 EDZ 和基本未损区进行定量的判别。首次提出的基于声波测试法, 定性、半定量和定量相结合的综合研判法具有创新性, 为客观评价地下洞室 EDZ 提供了科学的方法。

关键词: 地下洞室; 开挖损伤区(EDZ); 声波测试; 声波曲线特征; 损伤因子; 地质工程。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2014)11-1599-08

收稿日期: 2013-11-15

EDZ Assessment for Underground Cavern by Acoustic Wave Method

Xu Guangli¹, Dong Jiaying², Li Zhipeng¹, Song Shengwu³, Zhang Shishu³, Wang Jinsheng³

1. Engineering Research Center of Rock Soil Drilling & Excavation and Protection of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China

3. Chengdu Investigation, Design & Research Institute Co., LTD, Power China, Chengdu 610072, China

Abstract: Excavation Damaged Zone (EDZ) assessment is important for the design, execution and operation of modern underground engineering. However, it is very difficult to determine EDZ because of the complexity of lithology, geostress, excavation method, cavern size and shape, etc.. Based on its definition, EDZ is subdivided into excavation highly damaged zone (EHDZ), excavation slightly damaged zone (ESDZ) and basically undamaged zone in this paper. Acoustic wave velocity method is suggested to determine EDZ. The acoustic wave curves are classified into type I, type II and type III. EHDZ and ESDZ can be qualitatively determined by characteristic points of acoustic wave curves. A damage factor D calculated by the acoustic wave velocities is adapted to quantitatively assess EDZ. It is found that the comprehensive method and index provide us a good assessment of EDZ for underground caverns.

Key words: underground cavern; Excavation Damaged Zone; acoustic wave method; damage factor; geology engineering.

近年来,我国完建的或在建的水电站引水发电系统的地下厂房规模之大、埋深之深、环境地质条件之复杂,都是前所未有的,世上少有的。例如,向家坝水电站主厂房尺寸为(宽)33.4 m×(高)88 m×(长)255 m,是目前世界上最高的;溪洛渡水电站主厂房(宽)31.9 m×(高)77.6 m×(长)440 m,是世界上最长的(樊启祥和王义峰,2011);锦屏II级水电站厂房

引水系统的垂直埋深达1 500~2 525 m,是世界上最深的(Wu *et al.*, 2010)。图1为在建的H水电引水系统立体图。引水发电系统包括进水压力管道、主厂房、主变室、尾调室、尾水连接洞、排水廊道、出线洞、开关站、进厂交通洞、尾调室交通洞、尾水隧洞、公路隧道和排风洞等。地下厂房系统布置在右岸山体内,安装4台机组,总装机容量为1 700 MW;主厂房尺寸为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(Nos. 41472263, 40572152); 雅砻江水电开发联合研究基金重点资助项目(No. 50539100); 中国水电工程顾问集团公司科研项目(No. P099)。

作者简介: 徐光黎(1963—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事岩土力学、地质灾害等方面的教学与研究。E-mail: xu1963@cug.edu.cn

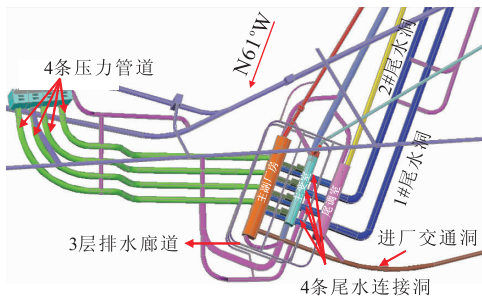


图 1 H 水电站地下水引水发电系统洞室群

Fig. 1 Sketch of underground caverns of H Hydropower Project

(宽)29.7 m×(高)74.4 m×(长)224.4 m, 主变室(宽)18.8 m×(高)25.2 m×(长)141.1 m, 1#、2#尾水调压室(宽)23.5 m×(高)74.0 m×(长)60.0 m. 洞室群断面相异,长短不一,空间布置上异常复杂.而且,在变质灰岩岩体中的初始地应力高达 36.4 MPa,属高地应力地质环境.

在高地应力条件下,地下洞室开挖必然释放应变能,在洞周产生重分布应力作用,使得围岩产生损伤、变形或破坏,其力学和水力性质发生改变.大规模地下厂房不仅洞室交叉多,开挖工序复杂,反复爆破,而且施工周期长,时间效应显著.围岩的损伤、松弛直接关系到地下洞室的设计、施工、运营的安全和建设成本(刘宁等,2011),例如,支护锚杆(索)的长度和预应力的大小.因此,合理地评价围岩的开挖损伤区(Excavation Damaged Zone,简称 EDZ)分布成为大规模地下厂房建设的关键性问题.

然而,由于 EDZ 受岩性、地应力、洞室形状、开挖方式和时间等因素的影响(吉小明,2005;邹红英和肖明,2010;张建海等,2011),如何合理、定量地确定地下洞室围岩 EDZ 的程度和范围,至今仍是一个尚未完全解决的问题.工程实践和理论研究表明,声波测试法是评判 EDZ 的快速、直观的技术方法,首次提出的利用声波—深度曲线特征和损伤因子的确定方法,可以定性、定量地综合评价 EDZ.

1 EDZ 概念

我国对因开挖而造成地下洞室岩体的力学、水理性质变化的描述,有围岩松弛圈、松动圈、扰动区、塑性区和损伤区等术语,理解因人而异,定义各不相同,存在较大的混乱.在国际上,不同国家的学者因研究目的、岩石性质和地质应力环境的差异,也未能形成一个公认的 EDZ 定义(Martino and Chandler, 2004; Wu *et al.*, 2009).术语上,有 EDZ(Excava-

tion Damaged Zone,开挖损伤区)和 EdZ(Excavation disturbed Zone,开挖扰动区)之分.在加拿大和美国,EDZ 和 EdZ 基本上为同义词.在瑞典和瑞士,EDZ 是指在地下洞室的附近产生了不可逆的变形和新的裂纹;而 EdZ 则是指在岩体内部产生了可恢复的弹性变形.在结晶岩体中,EDZ 和 EdZ 都有使用,但在塑性软岩中使用 EdZ.地下洞室的围岩状态是一个从岩体结构变化,发展到物性变化和强度丧失的发展变化过程,由微裂纹的发生、扩展导致岩体结构变化,由新生裂纹的产生和裂隙的张开导致围岩特性的劣化,进一步的发展使围岩丧失承载力而破坏(Uno *et al.*, 2002).Martino and Chandler (2004)给出的 EDZ 定义为:由于洞室开挖而造成围岩力学性质和水理性质产生可测量的、不可逆的变化(Wu *et al.*, 2009).这一不可逆的损伤源于因开挖引起能量释放、应力重分布或热载效应,损伤发生在洞室围岩附近.

笔者认为,EdZ 包含 EDZ,有扰动不一定就有损伤,EdZ 范围大于 EDZ.按照弹性理论分析,应力重分布作用影响达洞径的 3 倍范围,当重分布应力小于岩石的起裂强度时,岩石的损伤可以忽略不计,产生若干的弹性变形不影响岩体的完整性和强度.当重分布应力大于起裂强度时,岩石起裂、成核、扩展、张开、贯通,导致围岩特性的劣化.因此,在工程上采用 EDZ 术语是合适的,定义为因洞室开挖而引起应变能释放、应力重分布作用,围岩产生新的裂隙损伤,造成围岩的力学性质和水理性质产生可测的、不可逆的变化.

EDZ 可细分为强 EDZ(Excavation Highly Damaged Zone, EHDZ)和弱 EDZ(Excavation Slightly Damaged Zone, ESDZ)(图 2).强 EDZ 包括可见的宏观裂纹在内的损伤范围,渗透系数比岩

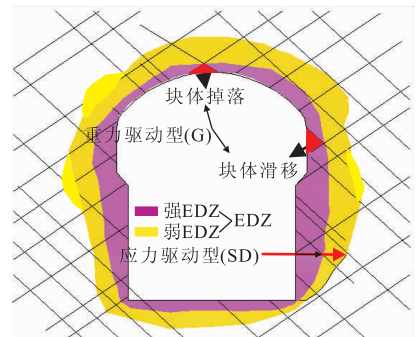


图 2 洞室 EDZ 分布及其分区

Fig. 2 EDZ around the excavation

块的大 3~7 个数量级, 主要由爆破损伤和应力重分布造成. 弱 EDZ 为微裂纹损伤范围, 渗透系数比岩块的大 1~2 个数量级, 主要是由应力重分布形成的. 在工程实践中, 强 EDZ 与弱 EDZ, 与俗称的松动圈和松弛圈、强松弛圈和弱松弛圈、主级松动圈和次级松动圈、宏观破裂区和外扰动区基本对应, 具有相同之处, 是对损伤程度的一个相对划分.

2 声波测试

2.1 声波测试原理

声波测试方法是建立在固体介质中弹性波传播理论的基础上的, 其传播特性随岩体的密度和裂隙而变化, 在速度和振幅上都有所响应. 振幅的衰减, 取决于岩体对声波的吸收作用(邹红英等, 2010). 因此, 可以利用声波的衰减速度来判别 EDZ 发展状况(邹红英等, 2010; Li *et al.*, 2011, 2012; 刘宁等, 2011; 严鹏等, 2011; 张建海等, 2011; 赵海斌等, 2011; 朱泽奇等, 2013).

在我国地下洞室围岩检测中, 一般采用单孔声波测试方法(图 3). 把一只发射换能器和 2 只接受换能器放入钻孔中, 从孔底向孔口连续观测, 移动步距 0.2 m. 利用 2 只接受换能器的间距和声波初至时间差, 就能计算出接受换能器所在位置孔壁岩体的声波速度(刘宁等, 2011).

2.2 波速—深度曲线类型

声波测试获得的波速—深度曲线能反映围岩 EDZ 的损伤程度和深度, 所以, 深入分析波速—深度曲线特征, 有助于我们从定性、半定量的角度把握 EDZ 范围.

张建海等(2011)在大量研究波速—深度曲线的

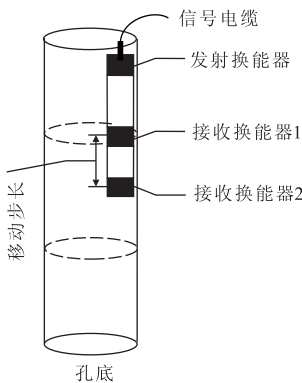


图 3 钻孔中声波测试

Fig. 3 Sketch of acoustic wave testing in borehole

基础上, 将声波曲线分为 5 种类型: 稳定上升+稳定波动型、稳定上升+剧烈波动型、不稳定上升+稳定波动型、不稳定上升+剧烈波动型和波速没有明显下降等类型. 统计得出: 在锦屏 I 级和溪洛渡水电站地下厂房中, 声波曲线以不稳定上升+稳定波动型和不稳定上升+剧烈波动型为主, 占 64%~73%.

笔者通过对岩浆岩、沉积岩和变质岩的地下洞室声波—深度曲线研究, 将其归纳为: I 型、II 型和 III 型等 3 种类型(图 4); 利用波速曲线的特征可定性、半定量地判别 EDZ 的分布深度.

(1) I 型声波曲线: 曲线分 3 段. 第 1 段为波速上升较慢段, 总体上围岩有很大损伤, 靠近洞室边墙处波速最低, 往里岩体损伤减小曲线呈波状上升, 对应强 EDZ; 第 2 段波速上升较快段, 振幅的衰减逐渐减小, 曲线呈震荡性上升, 在裂缝处波速低, 岩桥处波速相对较高, 对应弱 EDZ; 第 3 段为波速基本一致段, 波速小幅度波动, 对应基本未损岩体(图 4a). 此类曲线最为常见, 在重力驱动型、应力驱动型和复合型破坏模式的围岩中均有出现.

(2) II 型声波曲线: 曲线也分为 3 段. 第 1 段为低波速段, 在洞室边墙附近的岩体损伤极大, 波速降低幅度大且波速基本相等, 对应强 EDZ; 第 2 段为

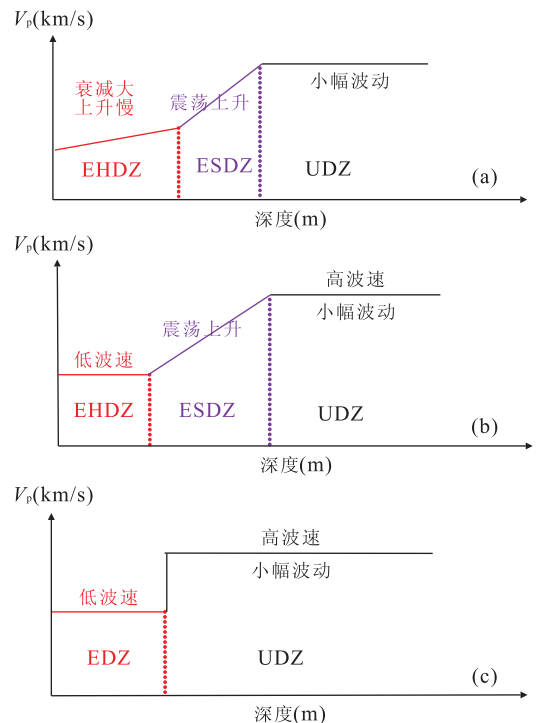


图 4 声波速度—深度曲线类型

Fig. 4 Curve types of acoustic velocity versus the depth

a. I 型声波曲线; b. II 型声波曲线; c. III 型声波曲线

波速上升段,曲线呈震荡性上升,对应弱 EDZ;第 3 段为高波速段,波速基本相等,呈小幅度的波动,对应基本未损岩体(图 4b)。II 型声波曲线常在高地应力条件下应力驱动型和复合型破坏模式的围岩中出现。

(3) III 型声波曲线:曲线分为 2 段。第 1 段为低波速段,岩体损伤极大,波速降低幅度大,波速基本相等,强、弱 EDZ 重合,或者弱 EDZ 很快过渡到基本未损段;第 2 段为高波速段,波速大体相等,仅有小幅的波动,属基本未损岩体(图 4c)。总体上,波速曲线具有突变性,它可能出现在高地应力条件下复合型破坏模式的围岩中,或者出现在高地应力下开挖初期、衬砌之前阶段。

2.3 损伤因子

声波波速是随着岩性、结构面发育程度和隙宽、赋存的地质环境而改变的,如随地应力增大而增大。损伤岩体是相对未损岩体而言的,因此,采用波速的大小来划分强、弱 EDZ 和基本未损区是不合理的。为此,引入损伤因子 D 来判别 EDZ。

岩体的弹性模量 E 和泊松比 μ 是描述岩体抗变形能力的力学性质指标,与波速密切相关。在弹性介质中,通过波速可以计算出岩体的弹性模量 E 和泊松比 μ 。岩体声波的纵波波速 V_p 、横波波速 V_s 与弹性模量 E 、密度 ρ 和泊松比 μ 之间有如下关系:

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \sqrt{\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}}, \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\mu)}}. \quad (2)$$

由式(1)和(2),可得,

$$\mu = \frac{V_p^2/2 - V_s^2}{V_p^2 - V_s^2}. \quad (3)$$

由于横波不能在液体中传播,容易产生测试误差,所以,在岩体力学中,一般采用纵波波速来建立与弹性模量之间的关系。设地下洞室开挖受损后围岩的波速为 \bar{V}_p ,则根据式(1)波速 \bar{V}_p 为:

$$\bar{V}_p = \frac{\bar{E}}{\rho} \frac{1-\bar{\mu}}{(1+\bar{\mu})(1-2\bar{\mu})}. \quad (4)$$

在地下洞室开挖过程中,应力重分布作用引起岩石微缺陷成核、扩展、汇合,形成宏观的裂隙或破坏。缺陷、裂隙的群体效应可用损伤因子 D 来刻画,定义为(吉小明,2005):

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E}. \quad (5)$$

考虑到在开挖重分布应力作用下,损伤岩体的泊松比 μ 、密度 ρ 变化不大,可视为 2 个定值。则,由

式(1)和式(5),损伤因子 D 可写成:

$$D = 1 - \frac{\bar{E}}{E} = 1 - \frac{\rho \bar{V}_p^2}{\rho V_p^2} = 1 - \frac{\bar{V}_p^2}{V_p^2}. \quad (6)$$

由式(6)可知,利用声波检测技术获得了未损岩体的纵波波速 V_p 和受损后围岩的波速 \bar{V}_p ,就可以很方便地确定出围岩的损伤因子。公式(6)为判别围岩 EDZ 提供了定量指标。

2.4 损伤因子 D 与 EDZ 分区

利用损伤因子 D 定量地判别 EDZ 时,即划分强、弱 EDZ 和基本未损区时,必须制定一个合理的标准界限值。而这个标准界限值还必须与现行的规范、技术要求相匹配,满足地质工程师的经验判断。弱 EDZ 与基本未损区、强 EDZ 与弱 EDZ 的界限值确定如下。

(1)弱 EDZ 和基本未损区的界限值。《水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范》DL/T5389-2007,根据波速前后变化率 η 将爆破影响和基础岩体开挖质量分为:影响甚微、影响轻微和有影响 3 个级别。波速前后变化率 η 定义为:

$$\eta = (C_{p1} - C_{p2})/C_{p1}. \quad (7)$$

式中, C_{p1} 和 C_{p2} 分布为岩体爆破前后或者基础开挖前后的同一测试部位的波速。并且,当 $\eta < 10\%$ 时判断为爆破或基础开挖无影响或影响甚微;当 $15\% < \eta < 10\%$ 时判断为爆破或开挖影响轻微;当 η 定义 $> 15\%$ 时判断为爆破或开挖有影响。

由公式(6)和(7),可以计算出波速前后变化率 η 所对应的损伤因子 D 。当 $\eta = 10\%$ 和 15% 时,对应的损伤因子分别为 $D = 0.19$ 和 $D = 0.28$ 。即当 $D < 0.19$ 时,围岩损伤甚微;当 $0.19 < D < 0.28$ 时,围岩有轻微损伤;当 $D > 0.28$ 时,围岩有损伤。考虑到大型地下洞室工程的重要性、工程应用的简洁性原则,将弱 EDZ 和基本未损区的界限值确定为 $D = 0.2$ 。

(2)强 EDZ 和弱 EDZ 的界限值。《水力水电工程地质勘察规范》GB50287-2006,根据完整性系数 K_v 将岩体的完整程度划分为:完整、较完整、完整性差、较破碎、破碎 5 个等级(中华人民共和国行业标准编写组,2007;中国电力企业联合会,2008)。完整性系数 K_v 定义为:

$$K_v = (V_p/V_{pr})^2, \quad (8)$$

式中, V_p 和 V_{pr} 分布为岩体和岩块的纵波波速。根据将岩体的完整程度划分为:完整、较完整、完整性差、较破碎、破碎 5 个等级的界限值 K_v 依次为:0.75, 0.55, 0.35 和 0.15。

同理,根据公式(6)和(8),可以计算出完整性系

表 1 损伤因子 D 与 EDZ 划分

Table 1 Damage factor D and EDZ classification

围岩分区	损伤因子 D	损伤程度	声波曲线特征
强 EDZ (EHDZ)	$D \geq 0.6$	损伤显著	波速低、衰减快、降幅大
弱 EDZ (ESDZ)	$0.6 > D > 0.2$	有损伤	波速有降低, 曲线起伏大, 具有震荡性
基本未损区 (UDZ)	$D \leq 0.2$	基本未损伤	波速高, 曲线波动幅度小, 渐趋定值

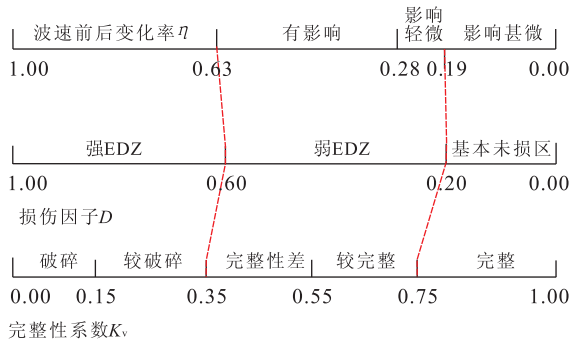


图 5 损伤因子与波速前后变化率和完整性系数的对应关系
Fig. 5 Relationship among damage factor, variation of acoustic wave velocity and integrity coefficient

数 K_v 值所对应的损伤因子 D . 当完整性系数 $K_v = 0.15, 0.35$ 和 0.55 时, 即岩体破碎、较破碎和完整性差时, 对应的损伤因子分别为 $D = 0.85, D = 0.65$ 和 $D = 0.45$. 同理, 考虑到大型地下洞室工程的重要性和工程应用的简洁性原则, 可以将强、弱 EDZ 的界限值确定为 $D = 0.6$.

综上, 根据损伤因子 D 的大小, 可将地下洞室围岩损伤划分为强、弱 EDZ 和基本未损区, 如表 1 所示. 损伤因子 D 与波速前后变化率和完整性系数 K_v 的对应关系如图 5 所示. 当 $D \geq 0.6$ 时, 为强 EDZ, 围岩受到大的损伤, 岩体破碎—较破碎, 波速急剧降低; 当 $0.2 < D < 0.6$ 时, 为弱 EDZ, 围岩受到损伤, 岩体完整性差—较完整, 波速有降低; 当 $D \leq 0.2$ 时, 为基本未损区, 围岩受到损伤很小, 开挖影响甚微, 岩体完整, 波速高且基本一致.

3 应用实例

3.1 工程概况

H 水电站地下厂房洞室(图 1)布置在右岸, 水平埋深 $280 \sim 510$ m, 垂直埋深 $400 \sim 660$ m. 岩性为下泥盆统(D_1)中厚层—厚层状变质灰岩, 岩层产状 $N50^\circ \sim 70^\circ E / NW \angle 25^\circ \sim 50^\circ$, 抗压强度约 100 MPa.

实测地应力 $\sigma_1 = 36.4$ MPa, 洞室轴线方位 $N61^\circ W$, 与最大主应力方向($N41^\circ W$)的交角为 20° .

主厂房开挖至第 IV 层、洞高 37.5 m 时, 在上下游岩锚梁浇筑的混凝土及其上部边墙喷射混凝土处, 出现了明显的变形、开裂、锚头内陷等现象. 在硬脆性岩体中, 出现了超乎常规的变形现象, 引起了警觉. 为此, 专门停止了后续开挖, 以分析其原因. 其中, 声波检测成果为确定地下洞室围岩 EDZ 深度提供了直接的、可视的依据.

3.2 从声波曲线特征初判 EDZ

在定量判别 EDZ 深度之前, 笔者首先定性地从声波曲线特征上来初判 EDZ 深度. 图 6 给出了声波测试得出的 3 种波速—深度曲线类型.

图 6 声波曲线特征显示, 它们具有较好的分段性. 图 6a 为在 2012 年 11 月 18 日在测点(a): 厂(横) $0+008$ m 的上游边墙、高程 1718 m 处的声波曲线, 属 I 型波速曲线, 强、弱 EDZ 分别为 4 m 和 5 m. 图 6b 为 2013 年 8 月 4 日在测点(b): 厂(横) $0+106$ m 的下游边墙、高程 1718 m 处测得的声波曲线, 为 II 型波速曲线, 强 EDZ 约为 4 m, 弱 EDZ 深约 8 m. 图 6c 为 2013 年 8 月 5 日在测点(c): 厂(横)

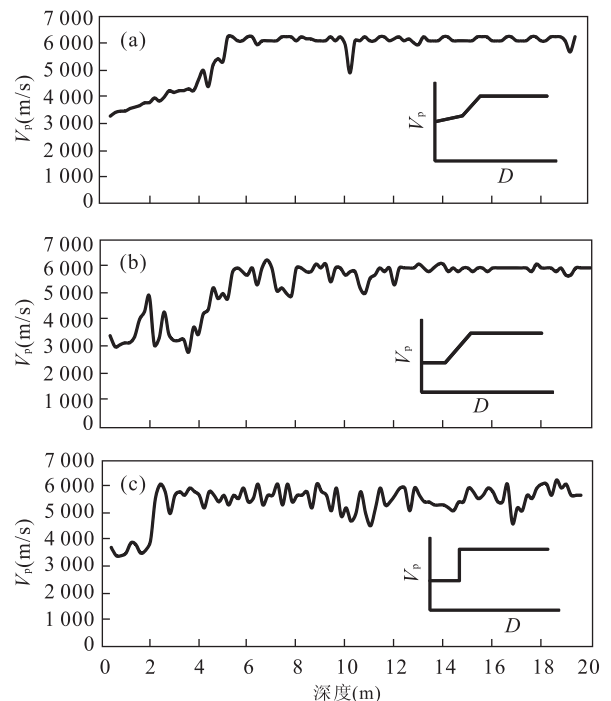


图 6 声波—深度曲线

Fig. 6 Curves of acoustic velocity versus the depth
a. 测点(a): C1718+008S1-20121118 (I 型波速曲线); b. 测点(b): C1718+106X2-20130804 (II 型波速曲线); c. 测点(c): C1697+073S1-20130805 (III 型波速曲线)

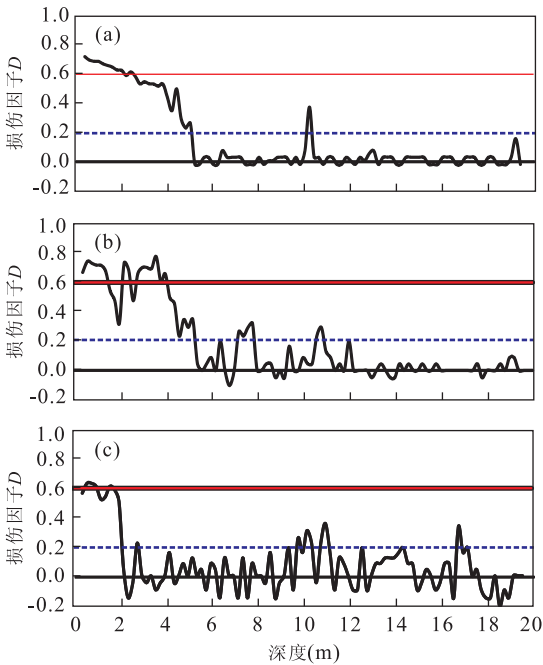


图 7 损伤因子 D —深度曲线

Fig. 7 Curves of damage factor D versus the depth

a. 测点(a): C1718+008S1—20121118; b. 测点(b): C1718+106X2—20130804; c. 测点(c): C1697+073S1—20130805

表 2 基于声波曲线特征和损伤因子 D 的 EDZ 判别结果

Table 2 Results of and EDZ assessment based on the curve characteristics of acoustic wave and damage factor D

测点	声波曲线特征		损伤因子 D		差值
	强 EDZ(m)	弱 EDZ(m)	强 EDZ(m)	弱 EDZ(m)	
(a)	4.0	5.0	2.4	5.0	强 EDZ: 1.6 m 弱 EDZ: 0 m
(b)	4.0	8.0	4.0	8.0	0
(c)	2.0	—	2.0	—	0

0+073 m 的上游边墙、高程 1 697 m 处测得的声波曲线,为 III 型波速曲线,强 EDZ 约为 2 m,弱 EDZ 不明显,直接过渡到基本未损区。

3.3 从损伤因子 D 定量判别 EDZ

在把握 H 电站地下厂房声波曲线特征的基础上,再从定量的角度来判别 EDZ 深度,以避免人为的主观性。

图 7 为根据公式(6)计算得出图 6 中的 3 个检测点的损伤因子 D —深度曲线。由损伤因子 D 和表 1 的规定界限值,就可以定量判别出 EDZ 深度。表 2 为定性初判和定量判别成果的对比如表。由表 2 可知,虽然测点(a)的强 EDZ 深度有 1.6 m 的出入,但弱 EDZ 深度是一致的;除此之外,两者判别得出的成果具有很好的可比性,定量判别结果符合定性初判结果。可见,只要仔细研判声波曲线特征,就有可能

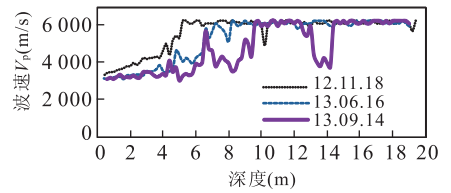


图 8 测点(a): C1718+008S 声波随时间而变化

Fig. 8 Changes of wave velocity with time at C1718+008S

判断出合理的 EDZ 分区;损伤因子 D 为客观地判别 EDZ 提供了一个定量的指标。

3.4 EDZ 随时间的变化

H 电站地下厂房于 2011 年 11 月 1 日开工,截止到 2013 年 8 月 5 日完成第 IV 层开挖,已经形成了高 37.5 m 的洞室。2012 年 11 月 18 日在测点(a)进行了首次声波检测,至 2013 年 9 月 14 日共进行了 7 次检测。图 8 和 9 分别为其中的 3 次声波—深度曲线、损伤因子—深度曲线。图 10 为根据损伤因子 D 整理得出强、弱 EDZ—开工天数(开挖进展)的关系图。

由图 8~10 可知:(1)在测点(a)、不同时间测得的波速曲线的特征未发生本质变化,仍属 I 型波速曲线;(2)随着时间的推移、开挖的进行,波速降低且向深处发展,说明 EDZ 在扩展。但最低波速在 3 200 m/s 前后。从理论上分析,由于声波测试是采用水来耦合的,所以最低波速不会小于 1 500 m/s;(3)对应 $D \geq 0.6$ 和 $0.2 < D < 0.6$ 的强、弱 EDZ 的深度在增大,而且, D 一旦小于 0.2 之后,很快就在在 ± 0 上下波动,说明采用 $D=0.2$ 作为弱 EDZ 与基本未损区的界限是合理的;(4)EDZ 在第 III 层开挖结束后,弱 EDZ 未超过 6 m,但在第 IV 层开挖后,特别是在第 IV 层开挖后期,EDZ 深度急剧增大。而且,即使在停工期间,EDZ 仍有较大幅度的增长。第 IV 层开挖及停工以来,弱 EDZ 深度发展到 14.2 m,与第 III 层开挖相比,弱 EDZ 深度增大了 9.2 m,强 EDZ 深度增大了 4.4 m;(5)目前只开挖到了第 IV

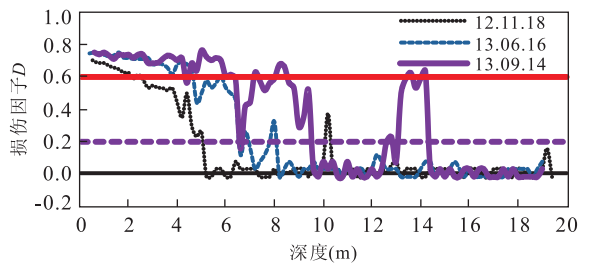


图 9 测点(a): C1718+008S 处损伤因子 D 随时间而变化

Fig. 9 Changes of damage factor D with time at C1718+008S

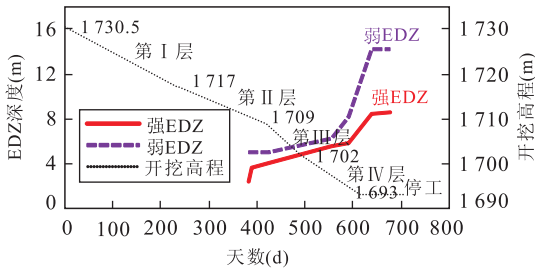


图 10 测点(a):C1718+008S处 EDZ 随时间而变化情况
Fig. 10 Changes of EDZ at C1718+008S with time

层、洞高 37.5 m, EDZ 已经超出了常规的深度, 距离最终最大洞高 74.4 m 尚有 5 层, 约 37 m 需要开挖, 因此, 在后续开挖之前, 对高程 1693 m 上方的边墙进行补强是非常有必要的。

综上, 利用声波测试获得的声波曲线特征可以定性地对 EDZ 进行初判, 利用波速计算得出的损伤因子可以定量地对 EDZ 进行判别, 通过定性初判和定量判别两者结合, 可以敏感地确定出随开挖进程而变化的强、弱 EDZ 深度。由此, 对我们评价围岩的损伤程度、信息化设计和施工提供了科学的依据。

4 结论

(1) 声波波速—深度曲线可以分为 I 型、II 型和 III 型等 3 种曲线类型。根据曲线的拐点或突变点, 可以定性、半定量地对 EDZ 进行初判。强 EDZ 对应低波速区, 振幅衰减大; 弱 EDZ 对应波速上升区, 波速—深度曲线具有震荡性; 在基本未损区, 波速略有波动而趋于定值。

(2) 根据波速计算得出的损伤因子 D 可以定量地判别强、弱 EDZ 和基本未损区, 其界限值分别 ≥ 0.6 、 $0.2 \sim 0.6$ 和 ≤ 0.2 , 且与现行规范相匹配, 便于工程应用。

(3) 首次提出的基于声波测试法, 定性、半定量和定量相结合的综合研判 EDZ 的方法具有创新性, 其物理意义明确, 是一种快捷、直观、可视的无损检测方法, 为客观评价地下洞室 EDZ 提供了科学的方法和技术指标。

References

China Electricity Council, 2008. GB50287-2006 Code for Hydropower Engineering Geological Investigation. China Planning Press, Beijing (in Chinese).
Fan, Q. X., Wang, Y. F., 2011. A Case Study of Rock Mass Engineering of Underground Powerhouse at Xiluodu

Hydropower Station. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30 (Suppl. 1): 2986—2993 (in Chinese with English abstract).
Ji, X. M., 2005. Study on Mechanical and Hydraulic Behavior of Tunnel Surrounding Rock Masses in Excavation Disturbed Zone. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24(10): 1697—1702 (in Chinese with English abstract).
Li, S. J., Feng, X. T., Li, Z. H., et al., 2011. In Situ Experiments on Width and Evolution Characteristics of Excavation Damaged Zone in Deeply Buried Tunnels. *Science China (Technological Sciences)*, 54 (Suppl. 1): 167—174. doi:10.1007/s11431-011-4637-0
Li, S. J., Feng, X. T., Li, Z. H., et al., 2012. Evolution of Fractures in the Excavation Damaged Zone of a Deeply Buried Tunnel during TBM Construction. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 55: 125—138. doi:10.1016/j.ijrmms.2012.07.004
Liu, N., Zhang, C. S., Chu, W. J., 2011. Detection and Analysis of Excavation Damage of Deep Tunnel. *Rock and Soil Mechanics*, 32 (Suppl. 2): 526—531, 538 (in Chinese with English abstract).
Martino, J. B., Chandler, N. A., 2004. Excavation-Induced Damage Studies at the Underground Research Laboratory. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41: 1413—1426. doi:10.1016/j.ijmms.2004.09.010
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China, 2007. DL/T5389-2007 Construction Technical Specification on Rock-Foundation Excavating Engineering of Hydraulic Structures. China Water & Power Press, Beijing (in Chinese).
Uno, H., Tasaka, Y., Ishida, T., et al., 2002. Analysis and Evaluation of Excavation Loosened Zone around Caverns Based on In-Situ Measurements. *Journal of Japan Civil Engineer*, 722/III—61: 13—24.
Wu, F. Q., Liu, J. Y., Liu, T., et al., 2009. A Method for Assessment of Excavation Damaged Zone (EDZ) of a Rock Mass and Its Application to a Dam Foundation Case. *Engineering Geology*, 104: 254—262. doi:10.1016/j.enggeo.2008.11.005
Wu, S. Y., Shen, M. B., Wang, J., 2010. Jinping Hydropower Project: Main Technical Issues on Engineering Geology and Rock Mechanics. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 69: 325—332. doi:10.1007/s10064-010-0272-4
Yan, P., Lu, W. B., Chen, M., et al., 2011. In-Situ Test Research on Influence of Excavation Method on Induced

- Damage Zone in Deep Tunnel, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(6): 1097—1106 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J. H., Hu, Z. X., Yang, Y. T., et al., 2011. Acoustic Velocity Fitting and Monitoring Feedback Analysis of Surrounding Rock Loosing Zone in Underground Powerhouse, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(6): 1191—1197 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, H. B., Fu, J. J., Zhou, J. P., 2011. Dynamic Analysis of Loose Zone at the Sidewall of Large Underground Cavern in High Geostress Zone, *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 28(9): 35—39 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Z. Q., Sheng, Q., Zhang, Y. H., et al., 2013. Research on Excavation Damage Zone of Underground Powerhouse of Dagangshan Hydropower Station, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 30(4): 734—739 (in Chinese with English abstract).
- Zou, H. Y., Xiao, M., 2010. Study of Methodology for Assessment of Excavation Disturbed Zone of Underground Caverns, *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 29(3): 513—519 (in Chinese with English abstract).
- 质勘察规范. 北京: 中国计划出版社.
- 樊启祥, 王义峰, 2011. 溪洛渡水电站地下厂房岩体工程实践. 岩石力学与工程学报, 30(增刊 1): 2986—2993.
- 吉小明, 2005. 隧道开挖的围岩损伤扰动带分析. 岩石力学与工程学报, 24(10): 1697—1702.
- 刘宁, 张春生, 诸卫江, 2011. 深埋隧洞开挖损伤区的检测及特征分析. 岩土力学, 32(增刊 2): 526—531, 538.
- 中华人民共和国行业标准编写组, 2007. DL/T5389-2007 水工建筑物岩石基础开挖工程施工技术规范. 北京: 中国水利电力出版社.
- 严鹏, 卢文波, 陈明, 等, 2011. 深部岩体开挖方式对损伤区影响的试验研究. 岩石力学与工程学报, 30(6): 1097—1106.
- 张建海, 胡著秀, 杨永涛, 等, 2011. 地下厂房围岩松动圈声波拟合及监测反馈分析. 岩石力学与工程学报, 30(6): 1191—1197.
- 赵海斌, 付建军, 周江平, 2011. 高地应力区大型地下洞室边墙松动圈动态分析研究. 长江科学院院报, 28(9): 35—39.
- 朱泽奇, 盛谦, 张勇慧, 等, 2013. 大岗山水电站地下厂房洞室群围岩开挖损伤区研究. 岩石力学与工程学报, 32(4): 734—739.
- 邹红英, 肖明, 2010. 地下洞室开挖松动圈评估方法研究. 岩石力学与工程学报, 29(3): 513—519.

附中文参考文献

中国电力企业联合会, 2008. GB50287-2006 水力发电工程地