

拱坝建基岩体开挖松弛特性研究

——以黄河拉西瓦水电站为例

杨天俊¹ 杨芸¹ 王启鸿¹ 符文熹²

1 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

2 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 水利水电学院

DOI:10.12238/hwr.v9i2.6117

[摘要] 岩体开挖打破原有地应力平衡, 引发卸荷回弹现象, 导致岩体逐步变形并收敛。本文以黄河拉西瓦水电站为研究对象, 基于其复杂的工程地质条件, 对坝基建基岩体的松弛带进行了系统判定。通过物探检测手段, 详细确定了松弛带的厚度, 一般在1.5米至2.5米之间, 局部可达6.4米。并在灌浆处理后复核了岩体的松弛度, 比较了处理前后岩体波速的差异。灌浆处理显著提高了岩体的可利用性, 岩体波速恢复度达60%以上。这些研究成果不仅为类似工程的坝基开挖提供了宝贵的参考, 还为后续研究奠定了坚实基础, 具有重要的理论和实践意义。

[关键词] 坝基岩体; 松弛度; 开挖卸荷; 工程特性

中图分类号: TV42+1.1 文献标识码: A

Study on excavation relaxation characteristics of arch dam foundation —— Take the Laxiwa Hydropower Station on the Yellow River as an example

Tianjun Yang¹ Yun Yang¹ Qihong Wang¹ Wenxi Fu²

1 Power China Northwest Survey and Design and Research Institute Co., LTD.

2 State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Development and Protection, School of Water Resources and Hydropower

[Abstract] The excavation of the rock mass breaks the original ground stress balance, which causes the phenomenon of unloading and rebound, and leads to the gradual deformation and convergence of the rock mass. Based on the complex engineering geological conditions. The thickness of the relaxation band was determined in detail, generally between 1.5 m and 2.5 m, and locally up to 6.4 m. The relaxation of rock mass was reviewed after grouting treatment, and the difference in wave velocity before and after treatment was compared. The grouting treatment significantly improved the availability of rock mass, and the recovery of rock mass reached more than 60%. These research results not only provide a valuable reference for the dam foundation excavation of similar projects, but also lay a solid foundation for the subsequent research, which has important theoretical and practical significance.

[Key words] Dam foundation rock; relaxation; excavation and unloading; engineering characteristics

引言

在漫长的地质历史演变过程中, 岩体经历了多种复杂的内外地质力学作用, 这些作用因不同时期、不同方式和不同过程而各异。岩体开挖会打破原有的地应力平衡, 引发卸荷回弹现象, 导致岩体逐步向暴露面缓慢变形并最终收敛^[1]。这种新的平衡状态是通过岩体的自组织能力实现的^[2-3]。在国际上, 众多研究致力于开挖扰动区的探讨, 研究了松动区岩体的变形和力学特

性^[4], 并深入分析了卸荷松动损伤的机理^[5-6], 提出了相关的数值模型和计算方法^[7], 这些研究为理解和预测岩体行为提供了重要的理论依据。

在我国, 许多大型水电工程, 如小湾、锦屏一级、拉西瓦以及三峡船闸的高边坡工程, 普遍遇到了显著的开挖卸荷松弛现象。学者们通过地质调查、钻孔声波测试、变形监测、变形试验、压水试验、钻孔录像和钻孔弹模测试等多种方法, 详细研究

了岩体开挖后的卸荷现象及其特征和规律,并深入探讨了卸荷松弛机理的力学机制^[8-12]。例如,尹健民等^[13]介绍了钻孔弹模测试的原理及结果,估算了卸荷松弛的深度,并与单孔声波监测结果进行了对比分析。段雪琴等^[14]则分析了基岩体深部松弛的成因及其对工程特性的影响。王吉亮等^[15]基于乌东德坝基的工程地质条件,详细调查了建基面,并通过高清电视和单孔声波测试等方法,深入研究了乌东德水电站坝基岩体开挖后的卸荷变形特征、松弛深度、松弛程度及时间效应。蔡斌等^[16]则从地质角度分析了坝基岩体卸荷松弛的时空效应及其与工程建设、蚀变和构造的关系,进一步揭示了这些因素对工程稳定性的影响。

本文以黄河拉西瓦水电站为研究对象,基于其复杂的工程地质条件,对坝基建基岩体的松弛带进行了系统判定。通过物探检测手段,详细确定了松弛带的厚度,并在灌浆处理后复核了岩体的松弛度,比较了处理前后岩体波速的差异。研究表明,这些措施有效提高了岩体的可利用性。这些研究成果不仅为类似工程的坝基开挖实践提供了宝贵的参考和指导,还为后续研究提供了坚实的基础,具有重要的理论和实践意义。

1 工程地质概况

1.1 地形地貌

坝址区位于龙羊峡谷出口段,河流自NE45°方向流入,至坝址处呈近EW方向,河流流向稳定,河道顺直。地貌上属高山峡谷,河谷狭窄、岸坡陡峻。上游稍开阔,坝基部位为峡谷收缩段,横剖面呈“V”字型。谷底岸顶相对高差达680~700m,平水期河水位2235m,水面宽45~55m,水深7~10m,水流湍急,主流线偏左岸,2400m高程处谷宽245~255m,正常蓄水位2452m处谷宽350~365m,坝顶高程2460m处谷宽365~385m。

河谷两岸基本对称,2400m高程以下谷坡陡立,平均坡度60~65°,2400m以上岸坡略缓,平均坡度40~45°,左岸岸坡从谷底至岸顶呈陡缓相间的台阶状,右岸岸坡比较均匀。

坝址区无大的深切冲沟,中小型冲沟如石门沟、扎卡沟等多沿断层发育,沟底宽一般5~15m,最大约20m,切割深度一般30~60m,最大100m,冲沟大都垂直河床,延伸不长。峡谷内阶地不发育,仅在个别高程有砂卵石层零星分布。坝基开挖剖面图如图1所示。

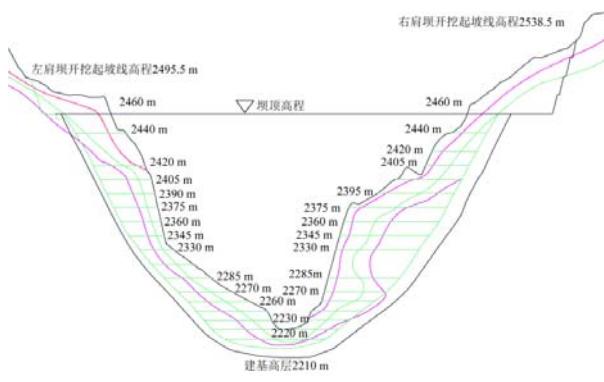


图1 坝基开挖梯段图

1.2 地层岩性

坝址区出露地层主要为三迭系下统龙羊峡群下亚群浅变质岩系(T1Ln1)、中生代印支期花岗岩(γ5)及第四系全新统(Q4)崩坡积、滑坡堆积及冲洪积层。而与工程直接相关的地层为中生代印支期花岗岩(γ5),呈岩基状产出,分布在1#吊桥以上至差其卡沟地段,顺河出露长2.1km。呈灰~灰白色,中粗粒结构,块状构造,侵入体与围岩(T1)呈波状侵入接触、结合紧密。坝址区第四系全新统(Q4)覆盖层不发育。

1.3 地层岩性

本区气候干燥、降雨量小,无充足地下水补给来源,坝址区主要接受大气降水补给,排泄于黄河。坝区岩体以结构完整、应力值高的花岗岩为主,故坝基地下水类型主要为花岗岩裂隙潜水。地下水埋藏较深,左岸自河边陡壁到坝顶高程处理深115~175m,右岸相应部位为40~187m,坝址区实测最大埋深235m。两岸水力坡降在上述区间内为25~30°,向岸里变缓,坡度5~10°。地下水位在7月份~10月份较高,略滞后于降雨季节。水位年变化幅度一般1~5m,左岸变化较大,ZK11、ZK29孔可达20m。两坝肩建基面开挖部位位于地下水位以上,谷底2235m至河床坝基开挖高程2210m均位于地下水位以下。

地下水属重碳酸氯化钾钠型水,个别水点为氯化钠钾水和硫酸钠钾水。游离CO₂含量一般0~12mg/L,侵蚀性CO₂为0~6mg/L,pH值为7.2~9.3,矿化度一般173~913mg/L,属弱碱性淡水,对混凝土无任何侵蚀性。

2 坝基建基岩体松弛带判定

2.1 松弛带确定的方法与原则

坝基开挖松弛带是指处于一定围压状态下的岩体。在建基面开挖及形成后,由于爆炸瞬间施压、之后建基岩体表层一定区域岩体经历爆炸应力快速解除,原岩应力短时释放,并逐渐稳定等一系列过程,最终完成应力调整。建基面及其以下一定深度范围内,岩体发生卸荷回弹、结构性松弛、岩体微细裂隙张开与扩展、岩爆等变形破坏及波速降低、岩体物理力学性能弱化的岩带。

松弛带判定的方法有很多,可归纳为地质宏观判定、物探测试、室内与现场试验、数值模拟等方法。其中物探测试孔一般垂直建基面布置,按波速的递变特征可以划分松弛带。坝肩开挖过程中,沿拱肩槽不同高程布置有声波测试孔,将各孔沿高程连成剖面,各孔纵坐标与坝面线的交点即为孔位,按照前述松弛厚度评价方法,根据波速变化情况将声波变化明显差异点定为松弛深度,并标示于图上,依次连接各孔确定的松弛线,便可得到整个坝肩松弛带的厚度。据此方法得到两岸坝肩边坡松弛带厚度。松弛度R概念,以表征松弛带岩体受损伤和松弛的程度,用松弛带岩体平均纵波速度与原岩(相对未松弛)平均波速的百分比确定。即:

$$R = \frac{\text{原岩平均纵波速} - \text{松弛带岩体平均纵波速}}{\text{原岩平均纵波速}} \times 100\%$$

2.2 松弛带划分结果

松弛带是指处于围压状态下的岩体在坝肩开挖过程中由于卸荷回弹、应力快速释放和爆破振动而使岩体微裂隙张开。依据黄河拉西瓦水电站坝基岩体物探检测,并据松弛度概念对左岸坝肩拱肩槽岩体松弛带厚度及松弛度统计结果汇总于表1。

表1 左岸坝肩单孔声波确定松弛带厚度及松弛度统计表

| 高程(m) | 松弛带厚度(m) | 松弛岩体 | | 原 岩 | | 松弛度(R) |
|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | | 波速范围(m/s) | 平均波速(m/s) | 波速范围(m/s) | 平均波速(m/s) | |
| 2445 | 2.6 | 1790~2430 | 2048 | 2390~3330 | 2780 | 26.3 |
| 2432 | 1.8 | 1510~2630 | 2030 | 2570~4400 | 3330 | 39 |
| 2415 | 2 | 1940~2930 | 2340 | 1970~4650 | 3190 | 26.6 |
| 2404 | 1.2 | 2990~3140 | 3050 | 3930~5710 | 5020 | 39.2 |
| 2385 | 2 | 4140~5190 | 4800 | 4570~5560 | 5280 | 9.1 |
| 2357 | 1 | 3280~3780 | 3470 | 3410~4770 | 4500 | 22.9 |
| 2340 | 1.8 | 2700~4120 | 3430 | 3370~5050 | 4480 | 23.4 |
| 2327 | 1.6 | 1960~3500 | 2400 | 2820~5200 | 4100 | 41.5 |
| 2312 | 2.2 | 2170~3790 | 2960 | 4380~5090 | 4870 | 39.2 |
| 2295 | 2.2 | 2190~4030 | 2650 | 3810~5360 | 4910 | 46 |
| 2280 | 6.4 | 1830~4060 | 2930 | 4470~5230 | 4970 | 41 |
| 2272 | 4.6 | 2060~3790 | 2540 | 2960~5150 | 4420 | 42.5 |
| 2262 | 2.4 | 1710~4620 | 3360 | 4190~5260 | 4740 | 29.1 |
| | 1.8 | 3570~4140 | 3770 | 3130~5450 | 4610 | 18.2 |
| 2250 | 2 | 3570~4090 | 3860 | 4360~4950 | 4800 | 22 |
| | 1.6 | 3810~4090 | 3970 | 3950~4950 | 4530 | 12.8 |
| 2240 | 1 | 4290~4500 | 4450 | 4390~5450 | 4900 | 9.2 |
| | 3.4 | 3710~4220 | 4010 | 4700~5240 | 5090 | 21.2 |

根据表1松弛度所绘松弛度随高程分布见图2

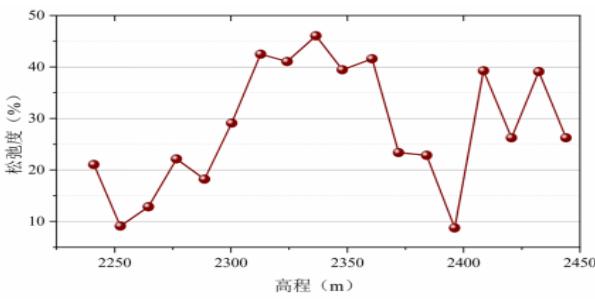


图2 左岸坝肩岩体松弛度随高程分布图

左岸坝肩岩体松弛带厚度一般小于2.5m,局部受构造影响较深,达3~4.6m,最深可达6.4m(如F211两侧),从松弛程度情况看,松弛度变幅较大,大部分小于30%,少量30%~40%,最高45%左右,最低10%左右。

右岸坝肩拱肩槽不同高程岩体松弛带厚度及松弛度统计结果汇总于表2。

表2 右岸坝肩单孔声波确定松弛带厚度及松弛度统计表

| 高程(m) | 松弛带厚度(m) | 松弛岩体 | | 原 岩 | | 松弛度R(%) |
|-------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------|
| | | 波速范围(m/s) | 平均波速(m/s) | 波速范围(m/s) | 平均波速(m/s) | |
| 2441 | 1.4 | 4440~4650 | 4610 | 4760~5400 | 5150 | 10.5 |
| 2417 | 1.6 | 3130~3650 | 3440 | 3300~3840 | 3630 | 5.2 |
| 2400 | 1.8 | 3470~5030 | 4340 | 3160~5450 | 4690 | 7.5 |
| 2385 | 1.4 | 3080~4890 | 4370 | 4610~5770 | 5250 | 16.8 |
| 2370 | 2.4 | 1910~5200 | 3680 | 2830~5580 | 4590 | 19.8 |
| 2355 | 4.8 | 2270~4070 | 2990 | 3240~5040 | 4110 | 27.3 |
| 2327 | 1.4 | 2680~4000 | 3460 | 2420~5040 | 4170 | 17 |
| 2312 | 1.4 | 4880~5130 | 4950 | 5000~5720 | 5390 | 8.2 |
| 2295 | 1.4 | 3640~4370 | 3920 | 4040~5100 | 4880 | 19.7 |
| 2280 | 2.4 | 3700~4880 | 4040 | 5300~6000 | 5580 | 27.6 |
| | 2.4 | 1460~4860 | 3290 | 1980~5140 | 4620 | 28.8 |
| 2270 | 1.8 | 3280~4050 | 3730 | 4440~5140 | 4920 | 24.2 |
| | 2 | 2000~4260 | 2930 | 2950~4860 | 4000 | 26.3 |
| 2260 | 4.6 | 1790~4160 | 2990 | 1830~5000 | 3910 | 23.5 |
| | 3.6 | 2730~3720 | 3110 | 3470~5140 | 4450 | 30.1 |
| 2250 | 7 | 1710~3420 | 2310 | 3990~5220 | 4580 | 49.6 |
| | 3.4 | 1550~4090 | 2180 | 2430~4500 | 3200 | 31.9 |
| 2240 | 3 | 2010~3210 | 2550 | 2020~5190 | 4190 | 39.1 |

根据上表松弛度所绘松弛度随高程分布见图3,越向低高程,松弛度增大,符合高陡峡谷岸坡、高地应力的地质环境条件。

右岸坝肩岩体松弛带厚度一般小于2.5m,少量3~5m,局部受构造影响较深,最深可达7m,从松弛程度情况看,松弛度绝大部分都低于30%,局部受构造和爆破振动影响较大的部位可达30%~40%,最大可达49.6%

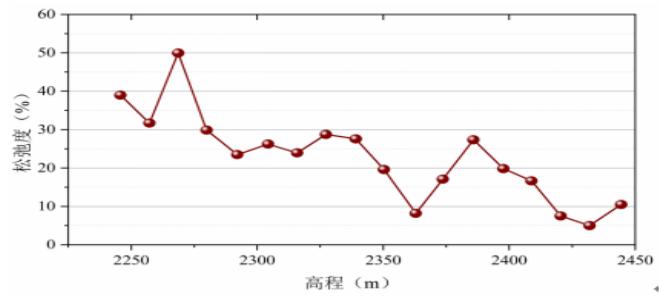


图3 右岸坝肩岩体松弛度随高程分布图

综上据对坝基两岸松弛度的分析,绘制拱肩槽边坡松弛深度剖面图,如图4所示。

综合上述物探测试成果,分析认为:

①左右岸坝肩建基松弛带岩体表面地震波、跨孔声波及单孔声波具有良好对应性,反映物探测试成果具有一定的可靠度

与准确性;

②左右岸坝肩岩体开挖卸荷产生的松弛岩体厚度大致相当,一般在1.5m~2.5m,局部因构造发育、应力释放及早期风化卸荷影响松弛厚度较大;

③综合表面地震波及跨孔声波资料,并主要根据单孔声波测试资料,左岸拱肩槽边坡可分为以下几段:2410m以上松弛厚度约1.8~2.6m,波速范围1510m/s~2930m/s,平均仅约2000m/s;2410m~2340m松弛厚度约1.2~2.0m,波速范围2700m/s~5190m/s,平均约3500m/s;2340m~2260m松弛厚度约1.6~2.5m,局部可达6.4m,波速范围1710m/s~4620m/s,平均约3000m/s;2260m~2240m松弛厚度约1.0~2.4m,2240m高程可达3.5m,波速范围3570m/s~4500m/s,平均约4000m/s;

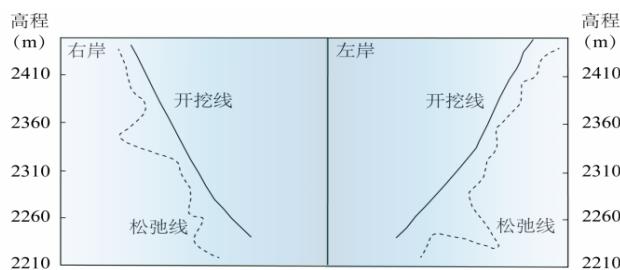


图4 两岸坝肩拱肩槽边坡松弛深度剖面图

④分析认为,左岸坝肩松弛厚度较大地段主要原因如下:

2410m以上:受早期风化卸荷影响大,此部位原岩波速仅约3000m/s,同时受2420m高程发育的Hf7-1、2410m高程发育的Hf7缓倾角断层影响;

2340m~2260m:主要受构造影响,其中2320m~2305m发育Hf3缓倾角断层,2290m~2260m发育F211断层组;

2260m~2240m:受坡脚应力集中影响大,与此处开挖后建基岩体表部片状剥离及葱皮状剥落相对应;

⑤综合表面地震波及跨孔声波资料,并主要根据单孔声波测试资料,右岸在2370m以上松弛厚度约1.4~1.8m,波速范围3080m/s~5030m/s,平均约4000m/s;2370m~2340m松弛厚度约2.4~4.8m,波速范围1910m/s~5200m/s,平均约3300m/s;2340m~2280m松弛厚度约1.4m,波速范围3920m/s~4950m/s,平均约4000m/s;2280m~2265m松弛厚度约1.8~2.4m,波速范围1460m/s~4880m/s,平均约3500m/s;2265m~2240m松弛厚度约3.0~7.0m,波速范围1550m/s~4160m/s,平均约2500m/s;

⑥分析认为,右岸坝肩松弛厚度较大地段主要原因如下:

2400m以上:主要受早期风化卸荷影响;

2370m~2340m:主要受构造影响,其中2360m~2345m发育HL32组、2340m~2330m发育Hf8缓倾角断层;

2265m~2240m:此段拱肩槽边坡结构面发育,尤其发育与开挖边坡相平行及夹角较小的NE-NEE组裂隙;

⑦松弛带岩体波速跨度较大,范围在2000~4000m/s之间,即松弛带岩体波速并不均一,而是与原岩波速、早期岸坡风化卸荷、结构面发育程度及地应力条件等密切相关,其中左岸2460m~

2410m段最低,平均为2000m/s,主要受原岩波速、早期岸坡风化卸荷影响;右岸2265m~2240m亦较低,平均为2500m/s,主要受构造发育影响;而左岸2260m~2240m高程段波速较高,平均为4000m/s,与坡脚原岩应力集中、岩体完整有关;右岸2460m~2370m、2340~2280m高程段波速亦较高,平均为4000m/s,与断裂不甚发育、岩体完整有关;

3 松弛带岩体灌浆效果

3.1 波速恢复程度分析

表3、表4为建基面以下0~3m及3m以下深度岩体灌后波速提高、波速提高率、松弛度及松弛岩体恢复度(对于建基面以下3m以深岩体称灌后岩体提高度)情况。其中松弛岩体恢复度Rh为:

表3 各坝段岩体有盖重固结灌浆后声波单孔速度统计表($\leq 3m$)

| 检测部位 | 段VP(m/s)) | | | | | | | | | | |
|-------|-----------|-----|------|----|-------|-------|-------|-------|-----|------|---------|
| | 灌前平均 | | 灌后平均 | | 波速提高 | | 波速提高率 | | 松弛度 | | 松弛岩体恢复度 |
| | 平均值 | 岩级 | 平均值 | 岩级 | 与原岩相比 | 与灌后相比 | 与原岩相比 | 与灌后相比 | 原岩 | 灌后 | |
| 9#坝段 | 2940 | IV | 5050 | I | 1990 | 2090 | 68% | 71% | 40% | -2% | 105% |
| 10#坝段 | 3590 | III | 5150 | I | 1220 | 1650 | 34% | 46% | 25% | -7% | 128% |
| 11#坝段 | 4440 | II | 5200 | I | 710 | 580 | 16% | 13% | 14% | -1% | 107% |
| 12#坝段 | 4980 | II | 5300 | I | 350 | 320 | 7% | 6% | 7% | 1% | 86% |
| 13#坝段 | 4330 | II | 4960 | II | 1000 | 630 | 23% | 15% | 19% | 7% | 63% |
| 14#坝段 | 3450 | III | 5320 | I | 1300 | 1870 | 38% | 54% | 27% | -12% | 144% |

注:松弛岩体恢复度=(1-原岩松弛度/灌后松弛度)×100%

表4 各坝段岩体有盖重固结灌浆后声波单孔速度统计表($> 3m$)

| 检测部位 | 段VP(m/s)) | | | | | | | | | |
|-------|-----------|----|------|----|-------|-------|-------|-------|-----------|--|
| | 灌前平均 | | 灌后平均 | | 波速提高 | | 波速提高率 | | 灌后岩体紧密提高度 | |
| | 平均值 | 岩级 | 平均值 | 岩级 | 与原岩相比 | 与灌后相比 | 与原岩相比 | 与灌后相比 | | |
| 9#坝段 | 5000 | I | 5310 | I | 0 | 310 | 0% | 6% | 106% | |
| 10#坝段 | 5020 | I | 5560 | I | 0 | 540 | 0% | 11% | 111% | |
| 11#坝段 | 5260 | I | 5560 | I | 0 | 300 | 0% | 6% | 106% | |
| 12#坝段 | 5380 | I | 5580 | I | 0 | 200 | 0% | 4% | 104% | |
| 13#坝段 | 5450 | I | 5550 | I | 0 | 100 | 0% | 2% | 102% | |
| 14#坝段 | 4850 | II | 5420 | I | 0 | 570 | 0% | 12% | 112% | |

从表3、表4可看出:

(1)经固结灌浆后,松弛带岩体可由IV级、III级、II级提高至I级、II级,且绝大部分提升至I级;因波速提高不大,建基面3m以深岩体灌前灌后岩级变化不大。

(2)建基面以下0~3m段松弛带岩体经灌浆后其波速提高远大于建基面3m以深岩体,波速提高可达320~2090m/s,平均可达约1000m/s;而建基面3m以深岩体波速提高仅100~570m/s,一般提升约300m/s。

(3)经固结灌浆后,松弛带岩体恢复度可达63~144%,平均提升达126%,说明灌浆后岩体紧密程度大大提高,甚至超过原岩。建基面3m以深岩体紧密程度提高至原来102~112%,平均提升达108%,其紧密程度有一定程度提高。

3.2 灌浆效果分析

河床坝段岩体通过锚固和有盖重常规固结灌浆施工后, 岩体质量有所提高, 特别是低速段岩体的波速提高较为明显, 平均提高10%左右。(1)固结灌浆前波速小于3200m/s的岩体, 固结灌浆后波速平均增长率大于50%, 甚至更高; 固结灌浆前波速 $3200\text{m/s} < V_p \leq 3800\text{m/s}$ 的岩体, 固结灌浆后波速平均增长率为40%; 固结灌浆前波速 $3800\text{m/s} < V_p \leq 4200\text{m/s}$ 的岩体, 固结灌浆后波速平均增长率为27%; 固结灌浆前波速 $4200\text{m/s} < V_p \leq 4800\text{m/s}$ 的岩体, 固结灌浆后波速平均增长率为16%; 波速大于4800m/s的岩体灌浆后波速增长率小于7%, 表明对完整岩体的灌浆效果一般。(2)固结灌浆后建基面0~3m范围内除13#坝段有个别测点波速小于3500m/s外, 其余测点段纵波波速均大于3800m/s, 表明灌浆效果好。

4 结论

(1)两岸坝肩开挖导致坝基表层岩体形成1.5m~2.5m厚的松弛带, 右岸局部因构造发育和早期风化影响, 松弛厚度达3.0~7.0m。岩体出现卸荷回弹变形、表面轻微剥离和开裂等现象, 剥离主要发生在河床低高程处, 厚度不超过20cm。

(2)根据松弛度R数值分级, 左岸松弛带中松弛轻微占27%、中等36.5%、较强烈36.5%, 平均松弛度28.2%; 右岸松弛带中松弛轻微占68%、中等25%、较强烈7%, 平均松弛度16.6%。两岸松弛度最大49.6%, 最小5.2%, 平均22.4%。除左岸2410m高程处岩体波速低于3000m/s外, 其他部位均在4200m/s以上, 整体以轻微至中等松弛为主。

(3)固结灌浆后, 松弛带岩体可由IV级、III级、II级提升至I级或II级, 绝大部分提升至I级, 波速提高约1000m/s, 恢复度达63~144%, 平均提升126%, 表明灌浆大大提高了岩体的紧密程度。

国家自然科学基金(42107172); 四川省科技厅重点研发项目(2022YFN0023)资助。

参考文献

- [1]陈宗基,傅冰骏.应力释放对开挖工程稳定性的重要影响[J].岩石力学与工程学报,1992,(01):1-10.
- [2]杨天俊,白兴平,杨芸.拉西瓦水电站右岸高边坡地质特征及工程治理[J].西北水电,2022(1):33-37.
- [3]于学馥,于加,徐俊.岩石力学新概念与开挖结构优化设计[M].北京:科学出版社,1995.
- [4]Nichols Jr T C.Rebound, its nature and effect on engineering works[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,1980,13(3):133-152.
- [5]HU J, Tao L E I, ZHOU K, et al. Mechanical response of roof rock mass unloading during continuous mining process in underground mine[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2011,21(12):2727-2733.
- [6]Wang E,Chen G,Yang X,et al.Study on the failure mechanism for coal roadway stability in jointed rock mass due to the excavation unloading effect[J].Energies,2020,13(10):2515.
- [7]Manouchehrian A, Cai M. Simulation of unstable rock failure under unloading conditions[J].Canadian Geotechnical Journal,2015,53(1):22-34.
- [8]陈德基,王军怀,余永志,等.三峡永久船闸高边坡稳定性几个问题的分析[J].人民长江,2002,(06):5-7+13.
- [9]祁生文,伍法权,庄华泽.小湾水电站坝基开挖岩体卸荷裂隙发育特征[J].岩石力学与工程学报,2008,(S1):2907-2912.
- [10]伍法权,刘彤,汤献良,等.坝基岩体开挖卸荷与分带研究——以小湾水电站坝基岩体开挖为例[J].岩石力学与工程学报,2009,28(06):1091-1098.
- [11]万宗礼,聂德新,杨天俊.高拱坝建基岩体研究与实践[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [12]巨广宏.高拱坝建基岩体开挖松弛工程地质特性研究[D].成都理工大学,2011.
- [13]万宗礼,聂德新,杨天俊,等.高拱坝建基岩体工程地质、岩体力学综合研究与成果应用[Z].中国水电顾问集团西北勘测设计研究院,2009.
- [14]段雪琴,任光明,夏敏,等.西南某水电站层状建基岩体松弛特征研究[J].工程地质学报,2014,22(01):124-129.
- [15]王吉亮,许琦,黄孝泉,等.乌东德水电站拱坝坝基岩体松弛特征研究[J].资源环境与工程,2017,31(04):364-370.
- [16]蔡斌,徐敬武,朱可俊.坝基岩体开挖卸荷松弛效应工程特性研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(05):1313-1321.

作者简介:

杨天俊(1963--),男,四川省巴中县人,正高级工程师,主要从事工程地质勘察工作。