

陈康达,宋彦辉,巨广宏,等.坝基岩体岩石质量指标、波速和透水率的关系——以青海玛沁地区玛尔挡水电站为例[J].地球科学与环境学报,2018,40(6):822-828.

CHEN Kang-da, SONG Yan-hui, JU Guang-hong, et al. Relationships Among Rock Quality Designation, Wave Velocity and Permeability of Dam Foundation Rock Mass—Taking Ma'erdang Hydropower Station in Maqin Area of Qinghai, China as an Example[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(6): 822-828.

坝基岩体岩石质量指标、波速和透水率的关系 ——以青海玛沁地区玛尔挡水电站为例

陈康达¹, 宋彦辉^{1,2*}, 巨广宏³, 戎娟¹, 陈子玉¹

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 长安大学 西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710054; 3. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:坝基岩体质量分级指标包括岩石质量指标(RQD, Q)、纵波波速(V)以及透水率(ω)等。他们相互之间存在一定关系,并随深度(h)的变化而变化。以青海玛沁地区玛尔挡水电站河床坝基6个钻孔的实测数据为基础,对上述指标随深度的变化规律及相互关系进行研究。结果表明:同一深度的岩石质量指标差异较大,但整体上随深度的增加呈线性带状增大,上、下限的线性关系分别为 $Q=0.488h+67.886$ 与 $Q=0.309h+2.319$;透水率与深度具有较好的相关性,随深度增大,透水率呈幂函数曲线下落趋势,即 $\omega=1\,329.192h^{-1.599}$;岩石质量指标、透水率和深度的拟合度较高;随着岩石质量指标的增大,纵波波速整体上呈线性带状增大的趋势,上、下限的线性关系分别为 $V=40.493Q+3\,612.9$ 和 $V=32.458Q+1\,822.6$,而透水率的几何平均值呈下降趋势,与岩石质量指标的算术平均值具有很好的相关性,即 $\omega=6.378-3.708\times 10^{-7}Q^{3.832}$ 。

关键词:坝基岩体;质量分级;岩石质量指标;透水率;水电站;波速;深度

中图分类号:P642;TV221.2

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2018)06-0822-07

Relationships Among Rock Quality Designation, Wave Velocity and Permeability of Dam Foundation Rock Mass

—Taking Ma'erdang Hydropower Station in Maqin Area of Qinghai, China as an Example

CHEN Kang-da¹, SONG Yan-hui^{1,2*}, JU Guang-hong³, RONG Juan¹, CHEN Zi-yu¹

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education,

Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China; 3. Northwest Engineering Corporation

Limited of Power China, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: The quality classification indicators of dam foundation rock mass include the rock quality designation (RQD, Q), the velocity of the longitudinal wave (V), the permeability (ω), and so on. They have a certain relationship with each other and change with the depth (h). Based on the measured data of 6 boreholes on the riverbed dam foundation of Ma'erdang hydropower station in Maqin area of Qinghai, the variation of the above indices with depth and the

收稿日期:2018-05-12;修回日期:2018-09-03

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:国家自然科学基金项目(41772365)

作者简介:陈康达(1994-),男,江苏徐州人,工学硕士研究生, E-mail: 429175074@qq.com.

* 通讯作者:宋彦辉(1968-),男,河北邢台人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: dcdgx30@chd.edu.cn.

relationships among them were studied. The results show that the RQD at the same depth is quite different, but increases in linear ribbon with the increase of depth as a whole, and the linear relationship for the upper and lower limits can be expressed by formulas $Q=0.488h+67.886$ and $Q=0.309h+2.319$, respectively; the permeability and depth have a good correlation, and the permeability decreases as a power function curve with the increase of depth, which is $\omega=1\,329.192h^{-1.599}$; the degree of fitting among RQD, permeability and depth is higher; the velocity of the longitudinal wave increases in linear ribbon with the increase of RQD, and the linear relationships for the upper and lower limits are $V=40.493Q+3\,612.9$ and $V=32.458Q+1\,822.6$, while the geometric mean of permeability tends to decrease and has a good correlation with the arithmetic mean of RQD, which is $\omega=6.378-3.708\times 10^{-7}Q^{3.832}$.

Key words: dam foundation rock mass; quality classification; rock quality designation; permeability; hydropower station; wave velocity; depth

0 引言

工程岩体质量是复杂岩体工程地质特性的综合反映。它不仅客观地反映了岩体结构固有的物理力学特性,而且为工程稳定性分析、岩体的合理利用以及正确选择各类岩体力学参数等提供了可靠的依据。因此,岩体质量评价是沟通岩体工程勘察、设计和施工的桥梁与纽带^[1]。在岩体质量评价过程中,岩石质量指标、波速和透水率都是评价岩体质量的主要指标。从它们的含义及宏观地质规律而言,三者之间存在一定的相关关系,如宏观上岩石质量指标大者,波速也较大,而透水率较小。但由于地质条件的复杂性,三者之间的相关关系有时存在一定的离散性。刘仰鹏等研究发现,岩石质量指标随着孔深的增大而增大^[2-3];蒋小伟等也通过对某花岗岩体的研究,得出岩石质量指标总体上随深度增大的规律,同时利用岩石质量指标估算出该花岗岩体的平均渗透系数,发现局部岩石质量指标和渗透系数随深度变化的离散性很大^[4]。Qureshi 等发现在岩石质量指标大于 25% 情况下,可用岩石质量指标估算岩体的渗透系数^[5]。Piscopo 等研究发现局部岩石质量指标和透水率的相关性并不大^[6],因为岩石质量指标并不包含岩体结构面的连通性信息,而结构面的连通性影响岩体的渗透性和完整性^[7-8]。杨勇等也提出了可利用岩石质量指标估算渗透系数,其方法较为方便^[9]。此外,受自重应力场影响,岩体裂隙的发育、张开程度和深度之间存在对应关系,从而引起透水率和深度之间存在对应关系。大量试验研究^[10-13]表明岩体的透水率随着深度的增大而减小。Ku 等得出渗透系数随孔深呈幂函数曲线降低^[14]。Chen 等利用单轴压缩试验模拟了深度对波速大小

影响的 3 个阶段,得出波速随着上覆应力的增大先增大而后趋于稳定的变化趋势^[15]。吴世斌等以金沙江白鹤滩水电站泄洪洞围岩为研究对象,得出在不同类型的岩体中波速与孔深的相关性存在很大差异^[16]。孙渊等也研究发现,波速随深度整体上呈阶梯状增加^[17]。李景山等关于波速与透水率之间的关系研究表明,对于岩性比较单一的坝基岩体,岩体的波速和透水率之间存在一定的内在联系^[18]。

本文通过对青海玛沁地区玛尔挡水电站河床坝基上 6 个钻孔(ZK165、ZK166、ZK169、ZK171、ZK172 和 ZK174)实测得到的钻孔深度的岩石质量指标(RQD)、纵波波速(V)以及透水率(ω)进行分析,通过 Origin 软件使用最小二乘法进行数据拟合,分别探讨岩石质量指标、透水率和深度的关系及三者之间的对应关系。

1 工程地质概况

玛尔挡水电站坝址位于青海省玛沁县拉军镇上游约 5 km 的黄河干流上。按规划设计,玛尔挡水电站为堆石坝。工程规模为 I 等大(1)型工程,主要建筑物为 1 级,次要建筑物为 3 级,是一座以发电为主的大型水电枢纽工程^[19],正常蓄水位为 3 270 m。

坝址区出露的地层岩性为:①中—上三叠统,岩性为灰—灰绿—灰黑色中细粒变质砂岩、长石石英砂岩、钙质细砂岩,偶夹砂质板岩,整体属区域变质岩(轻度),靠近侵入接触带部位,由于叠加接触热变质作用,变质程度加深,其间穿插有侵入岩脉(二长岩脉、细晶岩脉和石英脉);②中生代侵入岩,岩性为灰白色似斑状二长岩($\pi\gamma_5$),与三叠系地层呈侵入接触关系,接触面工程性状较好;③第三系,与三叠系地层及中生代侵入岩呈沉积接触,主要岩性为紫红

色黏土岩(R^b)、砾岩、角砾岩和泥质粉砂岩,少量砂岩和泥岩等;④第四系,主要为两岸缓坡处堆积和河床冲积砂砾石。根据河心钻孔揭露情况,河床覆盖层不厚,为2~5 m。

根据地表出露、钻孔及平硐揭露,似斑状二长岩与变质砂岩侵入接触带结合良好,分布上基本沿右岸坝址下游—左岸坝址上游斜向分布(NW—SE向)。根据初步勘探,侵入岩向地下深处有扩大趋势;从地表看,两种坚硬岩石构成的坝址峡谷在岸边分布最高,基岩面向两岸远处及上、下游均呈逐渐下降趋势。工程地质剖面如图1所示。

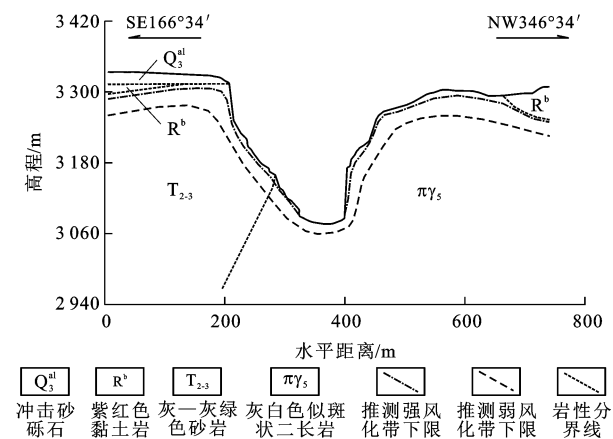


图1 青海玛沁地区玛尔挡水电站工程地质剖面
Fig.1 Engineering Geological Profile of Ma'erdang Hydropower Station in Maqin Area of Qinghai

根据钻孔描述,河床坝基岩体的岩性比较单一,50 m深度上以似斑状二长岩、第三系砾岩为主,50 m深度下以变质砂岩等坚硬岩为主。

2 坝基钻孔实测数据及对应性处理

2.1 获取方法

通过玛尔挡水电站河床坝基6个钻孔(ZK165、ZK166、ZK169、ZK171、ZK172、ZK174)的实测数据,得到每个钻孔不同深度的纵波波速、透水率以及岩石质量指标。钻孔波速测试采用RS-ST01C型数字声波仪,探头采用一发双收换能器,采样间隔为0.8~1.0 μs ,记录点间距为20 cm;透水率由钻孔压水试验获得,大约每5 m为一试验段;岩石质量指标则是运用XY-100型钻机取直径为75 mm的金刚石钻头和双层岩芯管在岩石中钻进的每个回次统计值,回次尺寸从几十厘米到几米不等。

2.2 对应性处理

为获得各钻孔同一深度段不同测试指标的相互关系,需要解决各实测数据在深度上的对应问题。

图2为同一深度段透水率与多个岩石质量指标之间的对应关系。

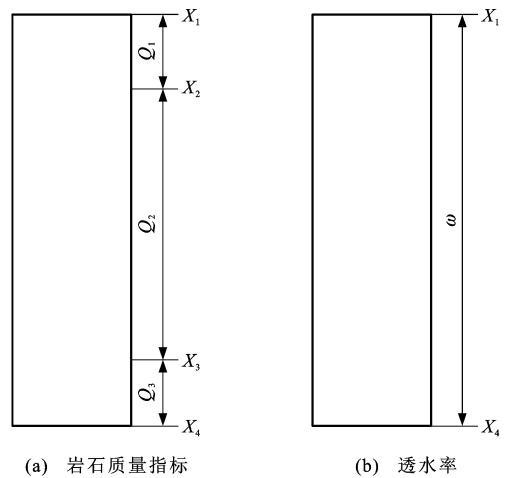


图2 同一深度段透水率与多个岩石质量指标

Fig.2 Permeability and Multiple RQDs at the Same Depth
根据图2,求出同一深度段岩石质量指标为

$$Q = \sum_{i=1}^3 Q_i (X_{i+1} - X_i) / (X_4 - X_1) \quad (1)$$

式中: Q 为岩石质量指标; Q_i 为 X_i 到 X_{i+1} 之间的岩石质量指标, $i=1,2,3$; X_i 为深度, $i=1,2,3,4$ 。

在同一深度段内,每20 cm测得一个纵波波速,在进行地质分析时删去异常高值或低值后,取该深度段波速的算术平均值作为对应性替换进行分析研究。

3 岩石质量指标、透水率和深度的关系

3.1 岩石质量指标和深度的关系

取每个回次深度的下限深度对应该回次的平均岩石质量指标,分析其随深度的变化。由图3可知,同一深度的岩石质量指标差异较大,但整体上随深度的增加呈线性带状增大。带状区域上、下限的线性关系分别为

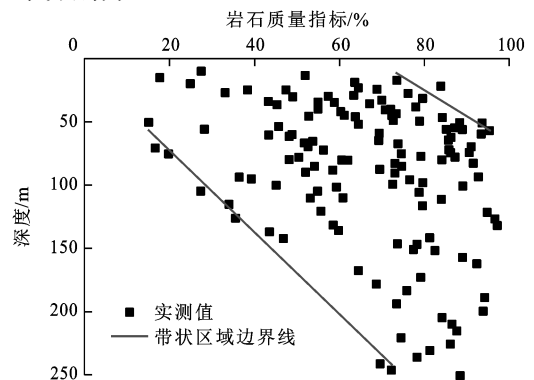


图3 岩石质量指标随深度的变化
Fig.3 Variation of RQD with Depth

$$Q = 0.488h + 67.886 \quad (2)$$

$$Q = 0.309h + 2.319 \quad (3)$$

式中: h 为钻孔深度。

由于河床坝基开挖前,岩体处于一定应力状态,并与周围岩体以应力的形式互相制约并达到平衡。随着河流的下切,地表上覆岩体不断被剥蚀,使河床岩体发生卸荷回弹^[20]。在这一过程中,临空面表部岩体应力释放(相当于给临空面附近岩体施加了一种拉张力)势必导致表部岩体沿已有结构面拉张变形,并可产生新的卸荷节理;随深度增加,卸荷作用减弱,新生节理随之减少,相应岩石质量指标整体增大。对于玛尔挡水电站河床坝基来说,由于岩性主要为似斑状二长岩及变质砂岩,属坚硬岩,岩体储存的弹性应变能高,所以卸荷裂隙显著。伍法权等的研究也表明,岩体的卸荷风化变形破坏能导致岩体完整性的显著降低^[21-23];裴书锋等通过对高边坡坝基柱状节理玄武岩开挖卸荷时效松弛特性的研究,也发现岩体质量与孔深关系密切^[24]。

3.2 透水率和深度的关系

玛尔挡水电站河床坝基某个深度段的透水率(ω)对应该回次的下限深度,舍去异常值,将6个钻孔的透水率、深度进行拟合,得到透水率随深度的变化(图4)。

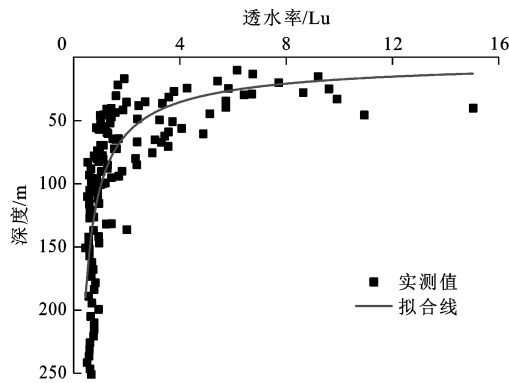


图4 透水率随深度的变化

Fig. 4 Variation of Permeability with Depth

透水率和深度具有较好相关性,随着深度增加,透水率减小。总体上,透水率随深度的变化可用幂函数曲线来表示,其函数关系为

$$\omega = 410.7h^{-1.299} \quad R^2 = 0.553 \quad (4)$$

式中: R^2 为判定系数。

以钻孔 ZK165 和 ZK166 为例分析单个钻孔的透水率和深度之间的关系(图5、6)。由图5、6可以看出,单个钻孔岩体透水率和深度亦具有较好的幂函数相关性。

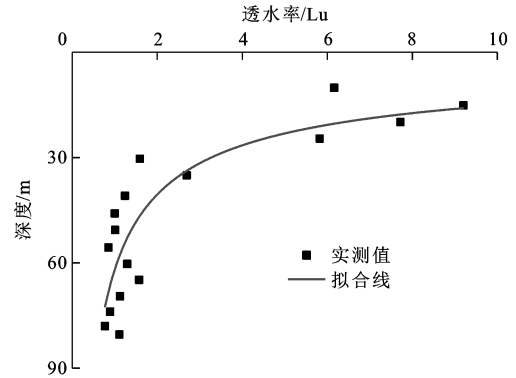


图5 钻孔 ZK165 透水率随深度的变化

Fig. 5 Variation of Permeability of Borehole ZK165 with Depth

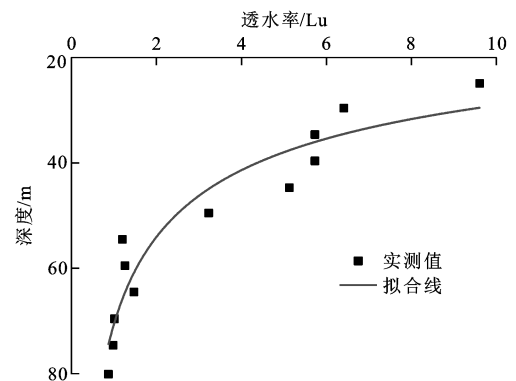


图6 钻孔 ZK166 透水率随深度的变化

Fig. 6 Variation of Permeability of Borehole ZK166 with Depth

钻孔 ZK165 和 ZK166 岩体透水率和深度的函数关系分别为

$$\omega = 851.1h^{-1.635} \quad R^2 = 0.704 \quad (5)$$

$$\omega = 62\,529h^{-2.594} \quad R^2 = 0.895 \quad (6)$$

取6个钻孔同一深度的岩体透水率几何平均值,并舍去个别异常值后,得到平均透水率和深度的拟合曲线,如图7所示。

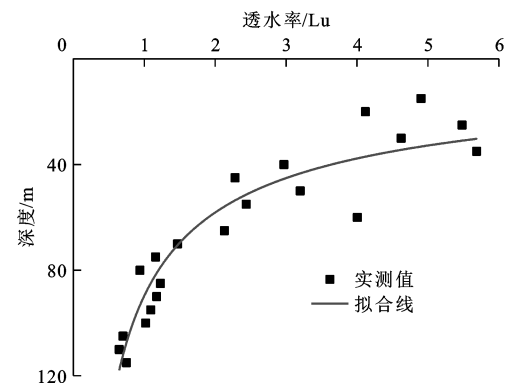


图7 平均透水率随深度的变化

Fig. 7 Variation of Average Permeability with Depth

6个钻孔同一深度的透水率几何平均值与深度也呈明显的幂函数关系。其表达式为

$$\omega = 1\,329.192h^{-1.599} \quad R^2 = 0.881 \quad (7)$$

受自重应力的影响,岩体裂隙的闭合度和深度之间存在相关性,从而引起透水率和深度之间存在相关性。随着深度的增加,岩体裂隙与结构面的频数也变低。同时,上覆岩体不断被剥蚀而使得河床岩体发生卸荷,导致原处于天然状态下的岩体上覆应力释放,从而使得岩体裂隙的闭合程度发生变化,即闭合度变低。因此,随着深度的增加,岩体的透水率降低。

综上所述,玛尔挡水电站河床坝基岩体透水率与深度具有较好的相关性,即随深度增大,透水率呈幂函数曲线下降。

4 岩石质量指标、纵波波速、透水率的相互关系

4.1 岩石质量指标和纵波波速的关系

对钻孔实测数据进行对应性处理后,舍去异常值,分析岩石质量指标和纵波波速(V)的关系(图8)。由图8可知,岩石质量指标和波速的对应性较差。其主要有两种原因:一种是传统岩石质量指标的不足,不能完全反映岩体中的裂隙发育情况,也不能反映结构面的张开度;另一种是硬性紧闭结构面的影响,硬性紧闭结构发育孔段虽然岩体较为破碎,岩石质量指标较低,但岩体波速较高,造成岩石质量指标与波速对应较差。

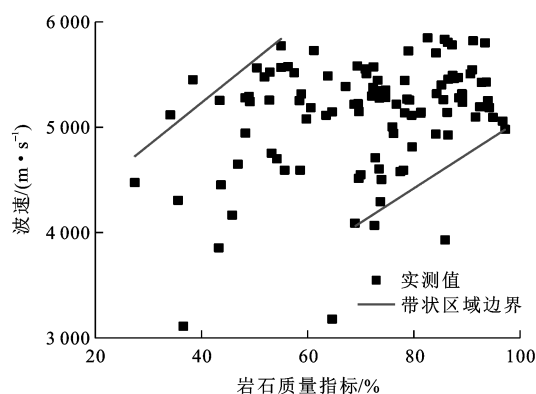


图8 岩石质量指标和波速的关系

Fig. 8 Relationship Between RQD and Wave Velocity

尽管如此,随着岩石质量指标的增高,波速总体上呈线性带状增大的趋势。带状区域上、下限的线性关系分别为

$$V = 40.493Q + 3\,612.9 \quad (8)$$

$$V = 32.458Q + 1\,822.6 \quad (9)$$

4.2 岩石质量指标和透水率的关系

根据本文给出的数据处理方法,求出每个透水率深度段的加权平均岩石质量指标,得到岩石质量指标和透水率的关系(图9)。从图9可见,两者的离散性较大,但随着岩石质量指标增大,透水率整体上有减小趋势。岩石质量指标和深度以及透水率和深度都有很好的相关性,可以推测岩石质量指标均值和透水率均值之间有很好的相关性。

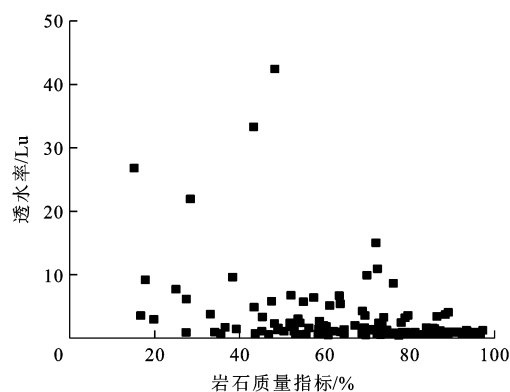


图9 岩石质量指标和透水率的关系

Fig. 9 Relationship Between RQD and Permeability

图10给出了6个钻孔的岩石质量指标均值和透水率均值的拟合曲线,其中岩石质量指标取算术平均值,透水率取几何平均值。由图10可知,透水率的几何平均值和岩石质量指标的算术平均值成负相关关系,且相关性较好。两者关系为

$$\omega = 6.378 - 3.708 \times 10^{-7} Q^{3.832} \quad R^2 = 0.635 \quad (10)$$

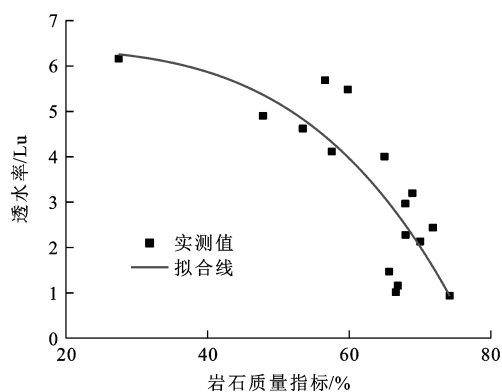


图10 岩石质量指标算术平均值和透水率几何平均值的关系

Fig. 10 Relationship Between Arithmetic Mean of RQD and Geometric Mean of Permeability

5 结语

(1)随着深度的增加,青海玛沁地区玛尔挡水电站河床坝基岩石质量指标整体上呈增加趋势,上、下限明显,其表达式分别为 $Q = 0.488h + 67.886$ 和 $Q =$

$0.309h + 2.319$ 。

(2)随着深度增加,玛尔挡水电站河床坝基岩体透水率呈幂函数曲线减小,其中同一深度透水率几何平均值与深度之间具有良好的相关关系,即 $\omega = 1\,329.192h^{-1.599}$ 。由于玛尔挡水电站河床坝基岩体多属坚硬岩,所以可得出坚硬岩体透水率几何平均值与深度之间具有良好的相关性。

(3)岩石质量指标与波速成线性正相关关系,但离散性较大,上、下限关系分别为 $V = 40.493Q + 3\,612.9$ 和 $V = 32.458Q + 1\,822.6$ 。

(4)岩石质量指标的算术平均值与透水率的几何平均值成良好的负相关关系,即 $\omega = 6.378 - 3.708 \times 10^{-7} Q^{3.832}$ 。

参考文献:

References:

- [1] 陈昌彦,王贵荣. 各类岩体质量评价方法的相关性探讨[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1894-1900.
CHEN Chang-yan, WANG Gui-rong. Discussion on the Interrelation of Various Rock Mass Quality Classification Systems at Home and Abroad[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(12): 1894-1900.
- [2] 刘仰鹏,贺少辉,汪大海,等. 基于空间插值的工程岩体 RQD 预测方法[J]. 岩土力学, 2015, 36(11): 3329-3336.
LIU Yang-peng, HE Shao-hui, WANG Da-hai, et al. RQD Prediction Method of Engineering Rock Mass Based on Spatial Interpolation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(11): 3329-3336.
- [3] 陈君,刘明明,李星,等. 一种基于地质指标的裂隙岩体渗透系数估算模型[J]. 岩土力学, 2016, 37(6): 1706-1714.
CHEN Jun, LIU Ming-ming, LI Xing, et al. A Geological Indexes-based Empirical Model for Estimation of Permeability Coefficient in Fractured Rock Mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(6): 1706-1714.
- [4] 蒋小伟,万力,王旭升,等. 利用 RQD 估算岩体不同深度的平均渗透系数和平均变形模量[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3163-3167.
JIANG Xiao-wei, WAN Li, WANG Xu-sheng, et al. Estimation of Depth-dependent Hydraulic Conductivity and Deformation Modulus Using RQD[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3163-3167.
- [5] QURESHI M U, AL-MAWALI K, KHAN K M. Using RQD to Estimate the In-situ Permeability of Discontinuous Sedimentary Rocks[M] // CUI Y J, EMERIAULT F, GHABEZLOO S, et al. Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers Conference, Volume 2: Advances in Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Paris: IOS Press, 2013: 447-450.
- [6] PISCOPO V, BAIOCCHI A, LOTTI F, et al. Estimation of Rock Mass Permeability Using Variation in Hydraulic Conductivity with Depth: Experiences in Hard Rocks of Western Turkey[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 77(4): 1663-1671.
- [7] 王旭,晏鄂川. 节理岩体结构面连通性研究及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(增1): 4905-4911.
WANG Xu, YAN E-chuan. Connectivity Research of Discontinuities and Application in Jointed Rock Mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(S1): 4905-4911.
- [8] 王晋丽,陈喜,黄远洋,等. 岩体裂隙网络随机生成及连通性研究[J]. 水文地质工程地质, 2013, 40(2): 30-35.
WANG Jin-li, CHEN Xi, HUANG Yuan-yang, et al. A Study of Stochastic Generation and Connectivity of Fracture Network in Rock Mass[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2013, 40(2): 30-35.
- [9] 杨勇,姜桂春,孙伟. 裂隙岩体透水率与其完整性指数及 BQ 值的关系初探[J]. 工程勘察, 2012(1): 35-38.
YANG Yong, JIANG Gui-chun, SUN Wei. Preliminary Discussion on the Relationship of Permeability Rate of Fractured Rock and Its Intactness Index and BQ Value[J]. Geotechnical Investigation and Surveying, 2012(1): 35-38.
- [10] 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.
- [11] 张曼菲,孙蓉琳,梁杏. 通量上边界渗透系数随埋深增加指数衰减的地下水流系统[J]. 地质科技情报, 2015, 34(4): 189-193.
ZHANG Man-fei, SUN Rong-lin, LIANG Xing. Effect of Decay Exponential in Hydraulic Conductivity with Depth on Groundwater Flow System Based on Flux Upper Boundary[J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(4): 189-193.
- [12] ASSARI A, MOHAMMADI Z. Analysis of Rock Quality Designation (RQD) and Lugeon Values in a Karstic

- Formation Using the Sequential Indicator Simulation Approach, Karun IV Dam Site, Iran[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017, 76(2):771-782.
- [13] 蒋小伟, 万力, 胡晓农. 砂泥岩裂隙岩体埋深和岩性对渗透性影响分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(4): 574-580.
- JIANG Xiao-wei, WAN Li, HU Xiao-nong. Variation of Permeability with Depth and Lithology in a Formation of Fractured Sandstone-mudstone Media[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(4): 574-580.
- [14] KU C Y, HSU S M, CHIOU L B, et al. An Empirical Model for Estimating Hydraulic Conductivity of Highly Disturbed Clastic Sedimentary Rocks in Taiwan[J]. Engineering Geology, 2009, 109(3/4): 213-223.
- [15] CHEN X, XU Z Y. The Ultrasonic P-wave Velocity-stress Relationship of Rocks and Its Application[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2016, 76(2): 661-669.
- [16] 吴世斌, 黄纪村, 罗刚. 白鹤滩水电站泄洪洞围岩波速及可灌性研究[J]. 人民长江, 2018, 49(增1): 241-244.
- WU Shi-bin, HUANG Ji-cun, LUO Gang. Study on Wave Velocity and Irrigability of Surrounding Rock of Spillway Tunnel of Baihetan Hydropower Station[J]. Yangtze River, 2018, 49(S1): 241-244.
- [17] 孙渊, 吴迪, 张良, 等. 弹性波法在水库坝基检测中的应用[J]. 长安大学学报: 地球科学版, 2003, 25(4): 76-79.
- SUN Yuan, WU Di, ZHANG Liang, et al. Application of Elastic Wave Method in Exploring the Groundwork of Reservoir Dam[J]. Journal of Chang'an University: Earth Science Edition, 2003, 25(4): 76-79.
- [18] 李景山, 赵善国, 孙殿民, 等. 岩体声波速度与透水率关系分析[J]. 黑龙江水专学报, 2002, 29(2): 22-23.
- LI Jing-shan, ZHAO Shan-guo, SUN Dian-min, et al. Analysis on the Relation Between Rock Sonic Wave Speed and Water Permeability Rate[J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 2002, 29(2): 22-23.
- [19] 孙苗. 岩体质量分级的程序设计及应用[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- SUN Miao. A Program Design and Application on Rock Mass Quality[D]. Xi'an: Chang'an University, 2011.
- [20] 张春峰. 地质空间曲面重构及三维建模方法探讨[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- ZHANG Chun-feng. Discussion on 3D Modeling Method and the Geological Spatial Surface Reconstruction[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [21] 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(6): 1091-1098.
- WU Fa-quan, LIU Tong, TANG Xian-liang, et al. Research on Unloading and Zonation of Rock Mass Dam Foundation Excavation: A Case Study of Xiaowan Hydropower Station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(6): 1091-1098.
- [22] 徐建闽, 王昊, 王祖国, 等. 坝基岩体质量分级影响因素及分级标准[J]. 水利水电技术, 2017, 48(10): 87-92.
- XU Jian-min, WANG Hao, WANG Zu-guo, et al. Influence Factors and Classification Standards for Rock Mass Quality Classification of Dam Foundation[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(10): 87-92.
- [23] 李夕兵, 陈正红, 曹文卓, 等. 不同卸荷速率下大理岩破裂时效特性与机理研究[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(9): 1565-1574.
- LI Xi-bing, CHEN Zheng-hong, CAO Wen-zhuo, et al. Time-effect Properties and Mechanisms of Marble Failure Under Different Unloading Rates[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(9): 1565-1574.
- [24] 裴书锋, 冯夏庭, 张建聪, 等. 高边坡坝基柱状节理玄武岩开挖卸荷时效松弛特性[J]. 岩土力学, 2018, 39(10): 1-12.
- PEI Shu-feng, FENG Xia-ting, ZHANG Jian-cong, et al. Loosing Characteristics of Columnar Jointed Basalts in High-slope Dam Foundation During Excavation and Time-dependent[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(10): 1-12.