

连通率法与 Hoek-Brown 经验估算法的力学参数估值比较

丛璐¹, 宋彦辉¹, 孟祥凌²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054;
2. 中国水电顾问集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要:以镇安抽水蓄能电站上库边坡大理岩为例,分别运用连通率法和 Hoek-Brown 经验估算法对岩体力学参数进行分析计算。计算结果表明:连通率法计算的大理岩力学参数与 Hoek-Brown 经验估算法的估算值比较接近,后者稍小于前者,其中黏聚力约低 13%,内摩擦因数约低 3%,连通率法计算精度较高,是一种简便易行的计算岩体力学参数的方法。

关键词:边坡岩体;力学参数;连通率法;Hoek-Brown 经验估算法

中图分类号: TU452 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2014)01-0090-04

Comparison of mechanical parameters of rock mass obtained from connectivity rate method and Hoek-Brown criterion// CONG Lu¹, SONG Yanhui¹, MENG Xiangling² (1. School of Geology Engineering and Geometrics, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Hydrochina Xibei Engineering Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Taking the Zhen'an Pumped-storage Hydropower Station as an example, the mechanical parameters of a rock mass were calculated with the connectivity rate method and Hoek-Brown criterion. The results show that the calculated results of the two methods are close, the calculated values of the Hoek-Brown criterion are slightly smaller than those of the connectivity rate method, and the cohesion and internal friction coefficient calculated with the Hoek-Brown criterion are 13% and 3% smaller than those with the connectivity rate method, respectively. This indicates that the connectivity rate method is a simple and effective way to determine the mechanical parameters of rock mass.

Key words: slope of rock mass; mechanical parameter; connectivity rate; Hoek-Brown criterion

边坡岩体的力学参数是影响边坡稳定性的主要因素,尤其对于发育 3 组及以上节理的似均质岩体更是如此。目前对边坡岩体力学参数的选取方法主要包括室内试验法、原位测试法^[1]、连通率法^[2]、Hoek-Brown 经验估算法^[3]等。室内试验法只能进行岩块的试验并脱离了边坡的应力环境,因此其结果与边坡岩体的实际情况相差较大。原位测试法通常采用平洞内的大剪试验来获得边坡的力学参数,该方法被认为是目前确定岩体力学参数最直接的方法,但由于该方法耗时耗资,不便于大量应用,并且试验尺寸与整个边坡岩体相比仍显代表性不足。

连通率法主要是通过建立岩体节理网络找到岩体中的最大连通路径,从而了解边坡潜在的失稳方式,利用岩块和结构面的力学参数计算岩体的力学参数,从而评价边坡的稳定性。汪小刚等^[4]在确定连通率的过程中考虑了节理和岩桥的组合破坏机制;Zhang 等^[5-6]分别在二维和随机不连续三维网络的基础上确定连通率;徐光黎等^[7]把岩体简化成一

种规则模型来估算其连通率;Einstein 等^[8-11]通过大量对比试验对连通率的确定问题进行了研究。

Hoek-Brown 经验估算法是一种常见的估算岩体力学参数的方法,很多学者对这种方法进行了不断探索与研究,如 Cai 等^[12]为应用 Hoek-Brown 公式提出了地质强度指数的半定量确定方法;Yang 等^[13]运用非线性 Hoek-Brown 准则提出了斜坡岩体等效抗剪强度估算方法,将岩体近似看作均质体,不仅考虑了边坡不同部位岩体的综合特征,还特别考虑围岩应力场环境,估算结果接近于客观情况,已被大量工程所采用。

本文以镇安抽水蓄能电站上库边坡大理岩的力学参数选取为例,分别运用连通率法和 Hoek-Brown 经验估算法对边坡岩体的力学参数进行估算,以期对比两种估算结果,分析存在的问题。

1 连通率法

在边坡稳定性分析中,主要研究边坡向临空方

向的抗剪切变形能力,即在该方向上边坡岩体的抗剪强度,为此,首先统计边坡结构面的发育状况,获得各组结构面的优势产状及统计规律,如倾向、倾角、迹长、间距等的分布形式及其均值、方差等,以此为基础进行节理裂隙网络连通率模拟,并根据完整岩块及结构面的力学参数计算岩体的力学参数,其中连通率的计算是关键。

目前国内常用的连通率法主要有路径搜索法和带宽投影法两种,其中路径搜索法主要是搜索“最短路径”(即岩体破坏时需要的剪力最小的路径)上的连通率来确定岩体的连通率^[14];带宽投影法则是统计一定带宽范围内的、与其破坏方向夹角小于允许值的结构面,然后计算连通率,即

$$k = \frac{\sum L_T}{L} \tag{1}$$

式中: k 为岩体连通率; $\sum L_T$ 为剪切方向上结构面的投影总长度; L 为剪切方向岩体的总长度。本文采用带宽投影法计算岩体的力学参数。

2 Hoek-Brown 经验估算法

通过大量的岩体试验,并对试验结果进行统计分析后,Hock 和 Brown 应用试错法,于 1980 年提出了裂隙岩体狭义的 Hock-Brown 经验强度准则,并在 1992 年针对该准则的不足,提出了修正后的经验公式^[15]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{2}$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为岩体破坏时的最大、最小主应力; σ_c 为岩块单轴抗压强度; m_b 为经验参数; s 、 a 为与岩体特征有关的常数。与式(2)相对应的等效岩体力学参数 φ 与 c 的计算公式为

$$\varphi = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \tag{3}$$
$$c = \frac{\sigma_c [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}](s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \tag{4}$$

式中: φ 为岩体内摩擦角; c 为岩体黏聚力; σ_{3n} 为侧

限应力上限值与岩块单轴抗压强度的比值。应指出的是,Hoek-Brown 经验公式中的有关参数是通过岩体质量分级体系 RMR 和地质强度指数获得的,目前还可应用岩体计算软件 Roclab 计算岩体的抗剪强度。

3 实例力学参数估值比较

3.1 工程概况

镇安抽水蓄能电站位于陕西省商洛市镇安县月河乡境内,地处秦岭山区,上水库位于月河右岸支流金盆沟内,水库正常蓄水位 1 392.00 m,总库容 1 172 万 m³,死水位 1 367.00 m,有效库容 861 万 m³,最大坝高 120.00 m。

工程区地处秦岭山区腹地,属侵蚀山地地貌,上水库地面高程为 1 260.00 ~ 1 330.00 m,左岸最高山峰海拔 1 729.80 m,右岸黑山海拔 2 000.90 m。山高坡陡,坡度为 50° ~ 70°,局部为陡崖,岸坡高度约 150 m。地表植被繁茂,以生长松木、杂木、灌木等林地为主。区内大小冲沟发育,展布以 N-E 向为主,少数近 S-N 向。上水库岸坡岩性主要为大理岩,其中主要发育 4 组节理:138° ∠ 75°、107° ∠ 74°、80° ∠ 67°、57° ∠ 56°。

3.2 连通率法的力学参数估值

对镇安抽水蓄能电站上库右坝肩大理岩进行野外节理统计,得到各组节理的分布特征,如表 1 所示。

依据表 1 的节理分布特征进行结构面网络模拟,在模拟过程中,按照带宽投影法(带宽取 2 m)计算不同方向的连通率。每次模拟的区域面积为 50 m × 50 m。为使模拟结果符合结构面分布规律,每个模拟区域均反复模拟多次,由此得到上库右坝肩岩体结构网络模拟图,如图 1 所示。

根据图 1 的模拟结果,利用自编的结构面模拟软件求得右坝肩在垂直岸坡方向上的最大连通率为 56.13%,可利用经验公式(5)(6)计算边坡岩体的力学参数^[14]:

$$c_a = (1 - k)c_r + kc_j \tag{5}$$

$$\tan \varphi_a = (1 - k)\tan \varphi_r + k\tan \varphi_j \tag{6}$$

式中: c_a 、 $\tan \varphi_a$ 为节理岩体的综合抗剪强度指标; c_r 、

表 1 上库右坝肩大理岩节理分布特征

节理	倾向			倾角			间距			迹长		
	均值/(°)	标准差/(°)	分布	均值/(°)	标准差/(°)	分布	均值/m	标准差/m	分布	均值/m	标准差/m	分布
138° ∠ 75°	139.82	3.92	正态	76.86	7.61	正态	0.24	0.49	负指数	2.66	0.82	正 态
107° ∠ 74°	105.71	9.78	正态	75.26	6.73	正态	0.87	1.12	负指数	5.74	5.74	负指数
80° ∠ 67°	79.41	3.65	正态	71.47	6.93	正态	0.5	1.15	负指数	1.63	1.63	负指数
57° ∠ 56°	56.75	5.35	正态	57.31	8.62	正态	1.45	2.02	负指数	2.42	0.98	正 态

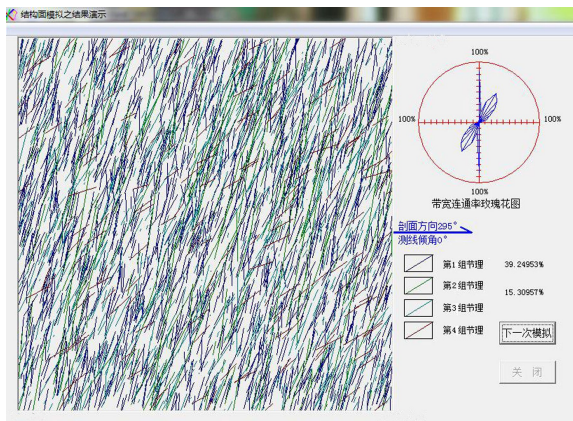


图1 上库右坝肩岩体结构网络模拟

$\tan\varphi_r$ 和 c_j 、 $\tan\varphi_j$ 分别为岩桥和结构面的抗剪强度指标。

根据室内试验测得 $c_r = 1.8 \text{ MPa}$ ， $\varphi_r = 50^\circ$ ；由现场回弹试验及巴顿公式^[16]得到 $c_j = 0.02 \text{ MPa}$ ， $\varphi_j = 35^\circ$ ； k 值取最大连通率 56.13%。将数据代入式 (5) (6)，求得上库右坝肩岩体的黏聚力、内摩擦因数分别为 0.82 MPa 和 0.92。

3.3 Hoek-Brown 经验估算法的力学参数估值

首先根据岩体质量分级体系 RMR，计算地质强度指数，然后根据式 (7) ~ (9) 计算 a 、 s 、 m_b 的值^[14]：

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6}(e^{-G_{SI}/15} - e^{-20/3}) \quad (7)$$

$$s = \exp\left(\frac{G_{SI} - 100}{8.25}\right) \quad (8)$$

$$m_b = m \exp\left(\frac{G_{SI} - 100}{24.5}\right)^a \quad (9)$$

式中： G_{SI} 为地质强度指数。 σ_c 值根据室内试验结果测出， σ_{3n} 按式 (10) 计算：

$$\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_c} \quad (10)$$

其中

$$\frac{\sigma_{3\max}}{\sigma_{cm}} = 0.72 \left(\frac{\sigma_{cm}}{\rho g H} \right)^{-0.91}$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_c \frac{[m_b + 4s - a(m_b - 8s)] \left(\frac{m_b}{4} + s \right)^{a-1}}{2(1+a)(2+a)}$$

式中： $\sigma_{3\max}$ 为侧限应力上限值； σ_{cm} 为岩体的单轴抗压强度； ρ 为岩体密度； H 为边坡高度。利用式 (7) ~ (10) 计算出上库右坝肩大理岩的力学参数为： $a = 0.505$ ， $s = 0.0026$ ， $m_b = 1.353$ ， $\sigma_{3\max} = 2.10$ ，将各参数值代入式 (3) (4)，可以得到上库右坝肩岩体的黏聚力、内摩擦因数分别为 0.708 MPa 和 0.894。

3.4 力学参数估算比较

从前文的估算结果可以看出，连通率法计算的大理岩力学参数与 Hoek-Brown 经验估算法的估算

值比较接近，后者稍小于前者，其中内聚力约低 13%，内摩擦因数约低 3%，采用 Hoek-Brown 经验估算法时，如果岩体内部发育 3 组以上节理，可以将岩体近似看作均质体，并不关注某个方向的结构面和岩桥的力学参数，而是考虑岩体整体的力学参数；而采用连通率法计算岩体力学参数时，要考虑最大连通路径方向上的结构面和岩桥的力学参数。两种方法的估算结果比较接近，但并不存在确定的大小关系，在实际工程中可根据工程边坡具体情况并参照有关规范选取较安全的参数。

4 结 语

Hoek-Brown 经验估算法已被纳入相关工程技术规范，并在国内外诸多工程中得到广泛运用。本文以镇安抽水蓄能电站上库大理岩边坡工程为实例，分别运用连通率法和 Hoek-Brown 经验估算法对边坡岩体的力学参数进行估算，计算结果表明连通率法的估算结果稍大于 Hoek-Brown 经验估算法，但两者十分接近，因此利用连通率法估算边坡岩体力学参数也是一种简便易行的有效方法。

参考文献：

- [1] 陈祖安, 潘家铮, 何璟, 等. 中国水力发电工程: 工程地质卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000: 141-145.
- [2] 肖建勋, 程远帆, 王利丰. 岩体结构面连通率研究进展及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(2): 325-328. (XIAO Jianxun, CHENG Yuanfan, WANG Lifeng. Development of research of connectivity rate of discontinuities in rock mass and application[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(2): 325-328. (in Chinese))
- [3] CAI M, KAISER P K, UNO H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(1): 3-19.
- [4] 汪小刚, 陈祖煜. 应用蒙特卡洛法确定节理岩体的连通率和综合抗剪强度指标[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 345-355. (WANG Xiaogang, CHEN Zhuayu. Determination of joint persistence and shear strength parameters of rock masses by Monte Carlo method[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1992, 11(4): 345-355. (in Chinese))
- [5] ZHANG X. A two dimensional model of en-echelon jointed rock masses with multi-discontinuity geometry parameters[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 1989, 22(3): 231-242.
- [6] 陈剑平, 肖树芳, 王清. 随机不连续面三维网络计算机模拟原理[M]. 长春: 东北师范大学出版社, 1993.

- [7] 徐光黎,潘别桐,唐辉明. 岩体结构模型与应用[M]. 武汉:中国地质大学出版社,1993.
- [8] EINSTEIN H H, VENEZIANO D, BAECHER G B, et al. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1983, 20 (5): 227-236.
- [9] 黄建安,王思敬. 断续结构岩体失稳破坏的分离面[J]. 水文工程地质, 1984, 28 (3): 21-25. (HUANG Jianan, WANG Sijing. Separation plane of instability failure in the fractured structured rock mass [J]. Chinese Journal of Hydrogeology and Engineering Geology, 1984, 28 (3): 21-25. (in Chinese))
- [10] 姚家建,王秋明,冯承树. 缓倾角结构面连通系数的研究[J]. 工程地质学报, 1989, 3 (1): 43-51. (YAO Jiajian, WANG Qiumin, FEN Chengshu. A study on the connection ratio of lower dip structure plane [J]. Chinese Journal of Engineering Geology, 1989, 3 (1): 43-51. (in Chinese))
- [11] 汪小刚,贾志欣,陈祖煜. 岩石结构面网络模拟原理在节理岩体连通率研究中的应用 [J]. 水利水电技术, 1998, 29 (10): 43-47. (WANG Xiaogang, JIA Zixing, CHEN Zhuayu. An application of discontinuities network modeling principle in the research of discontinuities connection ratio of jointed rock mass [J]. Irrigation Works and Power Technique, 1998, 29 (10): 43-47. (in Chinese))
- [12] CAI M, KAISE P K, UNO H, et al. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41 (1): 3-19.
- [13] YANG X L, YIN J H. Slope Equivalent Mohr-Coulomb strength parameters for rock masses satisfying the Hoek-Brown Criterion [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2010, 43 (4): 505-511.
- [14] 陈祖煜,汪小刚,杨健,等. 岩质边坡稳定分析:原理、方法、程序[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [15] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[C]//Proceeding of Rock Characterization, Symposium on International Society of Rock Mechanics. London: British Geotechnical Society. 1992: 209-213.
- [16] 刘佑荣,唐辉明. 岩体力学[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

(收稿日期:2013-01-20 编辑:周红梅)

(上接第 80 页)

- [5] 赵延风,宋松柏,孟秦倩. 普通城门洞形断面临界水深的近似计算方法[J]. 长江科学院院报, 2008, 25 (4): 14-15. (ZHAO Yanfeng, SONG Songbai, MENG Qinqian. Approximate method calculating critical water depth in common city-opening shaped cross-section [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2008, 25 (4): 14-15 (in Chinese))
- [6] 文辉,李风玲. 再论城门洞形断面隧洞临界水深的近似计算[J]. 人民长江, 2009, 40 (11): 78-79. (WEN Hui, LI Fengling. Discussion on approximate calculation of critical depth of a Arched Section Tunnel [J]. Yangtze River, 2009, 40 (11): 78-79 (in Chinese))
- [7] 文辉,李风玲,李霞. 标准 I 型马蹄形断面正常水深的近似算法[J]. 人民黄河, 2008, 30 (7): 89-90. (WEN Hui, LI Fengling, LI Xia. Approximate solution on normal depth of standard I type horseshoe section tunnel [J]. Yellow River, 2008, 30 (7): 89-90 (in Chinese))
- [8] 王正中,陈涛,卢琴,等. 马蹄形断面隧洞临界水深的直接计算[J]. 水力发电学报, 2005, 24 (5): 95-98. (WANG Zhengzhong, CHEN Tao, LU Qin, et al. The direct solution on critical depth of horseshoe section tunnel [J]. Journal of hydroelectric engineering, 2005, 24 (5): 95-98. (in Chinese))
- [9] 张宽地,吕宏兴,陈俊英. 马蹄形过水断面临界水深的直接算法[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (4): 15-18.
- (ZHANG Kuandi, LÜ Hongxing, CHEN Junying. Direct calculation of critical depth of horseshoe section tunnel [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (4): 15-18. (in Chinese))
- [10] 张迈,柳桃青. 一个大型水工隧洞的断面形状选择[J]. 湖北水力发电, 2008, 75 (2): 10-12. (ZHANG Mai, LIU Taoqing. Selection of cross-section form of a large hydraulic tunnel [J]. Hubei Water Power, 2008, 75 (2): 10-12. (in Chinese))
- [11] 文辉,李风玲. 平底 I 型马蹄形断面临界水深的直接求解[J]. 长江科学院院报, 2013, 30 (4): 40-43. (WEN Hui, LI Fengling. Direct solution to the critical depth of I-type horseshoe cross-section with flat bottom [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2013, 30 (4): 40-43. (in Chinese))
- [12] DL/T 5195—2004 水工隧洞设计规范[S].

(收稿日期:2013-01-31 编辑:周红梅)

