

# 无充填硬性岩体结构面抗剪强度估算方法及应用

钟 华, 杨 火 平, 贺 金 明

(长江三峡勘测研究院有限公司(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:**岩体结构面抗剪强度参数是进行结构地基抗滑稳定计算的基本参数。通常,对于小型工程均是由有经验的地质工程师通过对各结构面的性质进行分析后,参照类比经验取值;而对于大型工程都是通过试验获得参数值。类比取值完全取决于地质工程师的工程经验,试验只能对部分代表性结构面进行,不可能包含所有具体结构面。而将裂隙面的粗糙度和结构面的岩壁强度综合考虑,能弥补两种方法的不足,可在现场方便快捷地估算出岩体结构面的抗剪强度。通过工程实例介绍了该方法在现场的具体运用,可供工程技术人员借鉴。

**关 键 词:**抗剪强度;岩体结构面;裂隙粗糙度;岩壁强度;沐若水电站

中图法分类号: P642

文献标志码: A

DOI:10.16232/j.cnki.1001-4179.2015.14.016

岩体中含有各类结构面,这些结构面往往是岩体中的弱面,在进行建筑物地基的抗滑稳定计算时,结构面的发育情况往往是最为关注的因素。因此,准确查明结构面的发育情况及给定其合适的抗剪强度参数是地质工作的重要内容。结构面按充填性质可分为胶结型、泥质充填、碎屑物充填、无充填硬性等诸多类型,对有充填物的结构面,其抗剪强度主要取决于充填物的性质,而无充填的结构面,其抗剪强度主要取决于裂隙面的粗糙度和岩壁的强度。

在工程实践中,一般大型工程均进行了现场及室内力学试验,对代表性结构面的抗剪强度参数综合试验及工程经验确定各类结构面的抗剪强度参数,而对于一些试验成果不是很充足的工程,结构面的抗剪强度参数主要通过经验类比确定,参数取值是否合理,取决于地质工程师的工程经验,有很大的人为因素。本文以马来西亚沐若水电站为例,介绍了现场定量估算无充填硬性结构面抗剪强度参数的方法,为最终确定结构面的抗剪强度参数提供了便捷、实用的参考。

## 1 基本原理

平直的、无起伏的结构面,其剪切强度  $\tau_p$  和正应力  $\sigma_n$  关系可用莫尔-库伦公式表示为

$$\tau_p = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

式中,  $c$  为黏滞强度;  $\varphi$  为摩擦角。

而大多数结构面均为起伏的面, (1) 式可进一步修正为

$$\tau = \sigma_n \tan (\varphi_b + i) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_b$  为结构面的基本摩擦角;  $i$  为锯齿面结构与结构面的夹角。

可见在一定的正应力条件下,结构面的抗剪能力主要由基本摩擦角和起伏度共同决定。

巴顿在研究结构面抗剪强度时<sup>[1]</sup>,主要考虑了结构面岩壁强度及裂隙面的粗糙度,另外考虑施加于结构面上的剪应力与正应力条件,因为不同应力条件下,结构面的咬合程度不同,对结构面抗剪强度参数有较大影响。具体计算方法如下

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \varphi_b + JRC \times \log_{10} \left( \frac{ICS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (3)$$

式中,  $\tau$  为剪应力;  $\sigma_n$  为正应力;  $\varphi_b$  为新鲜岩体基本摩擦角;  $JRC$  为裂隙面粗糙度系数;  $ICS$  为裂隙岩壁岩体单轴抗压强度。

对于风化裂隙,可将公式(1)修正如下:

$$\tau = \sigma_n \tan \left[ \varphi_r + JRC \times \log_{10} \left( \frac{ICS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (4)$$

(4) 式中,  $\varphi_r = (\varphi_b - 20) + 20 \times (r/R)$

其中,  $\varphi_r$  为风化裂隙岩壁岩体残余摩擦角;  $r$  为风化岩体回弹仪数;  $R$  为新鲜岩体回弹仪数。

对巴顿公式进一步的求解式(2), 得到以下等式:

$$\sigma_i = \text{ATN}(\frac{\partial \tau}{\partial \sigma}) \tag{5}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial \sigma_n} = \tan [JRC \times \log_{10}(\frac{ICS}{\sigma_n} + \varphi_r)] - \frac{\pi x JRC}{180 \times \log_{10} \tan^2 [JRC \times \log_{10}(\frac{ICS}{\sigma_n} + \varphi_r)]} \tag{6}$$

按莫尔 - 库伦准则(图1), 黏滞强度  $C_i$  值为剪应力与正应力关系曲线的切线在剪应力轴上的截距, 得到式(7)。

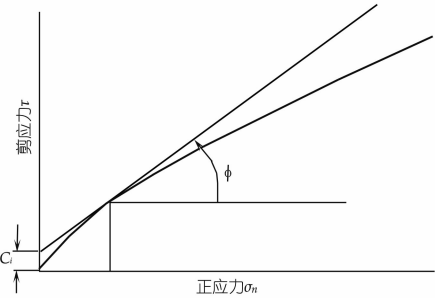


图1 剪应力 - 正应力关系曲线

$$C_i = \tau - \sigma_n \tan \varphi_i \tag{7}$$

将(5)、(6)、(7)式编制成计算机程序, 在给定一系列正应力及剪应力的情况下, 可以求得裂隙的抗剪强度  $\varphi_i$  及  $C_i$  值。最小正应力  $\sigma_{\min}$  及剪应力  $\tau_{\min}$  分别按(8)、(9)式确定

$$\sigma_{\min} = 10^{\log_{10}(JCS) - (\frac{70 - \varphi_r}{JRC})} \tag{8}$$

$$\tau_{\min} = \sigma_{\min} [\varphi_r + JRC \log_{10}(JCS/\sigma_{\min})] \pi / 180 \tag{9}$$

在得到一系列的抗剪强度  $\varphi_i$  及  $C_i$  值后, 结合具体工程特点, 依据工程地基压应力值确定裂隙的抗剪强度  $\varphi$  及  $C$  值(如某工程地基压应力为 2 MPa, 则在裂隙抗剪强度取值时用 2 MPa 正应力下对应的  $\varphi_i$  及  $C_i$  值)。

2 各参数的确定方法<sup>[2]</sup>

(1)  $\sigma_b$  的确定。采用钻孔岩芯确定, 具体方法是每次取 3 根岩芯, 其中 2 根并排放在一起, 另 1 根放在上面, 下面的两根岩芯倾斜, 直到上面的岩芯开始滑动, 记下开始滑动的倾斜角  $\alpha_s$ , 依据下式确定岩体的基本摩擦角。

$$\sigma_b = \tan^{-1}(1.155 \tan \alpha_s) \tag{10}$$

(2)  $JRC$  的确定。现场测定每一条裂隙的起伏度, 依据图 2 确定  $JRC$ 。

(3)  $JCS$  的确定。如果已有岩石单轴抗压强度试

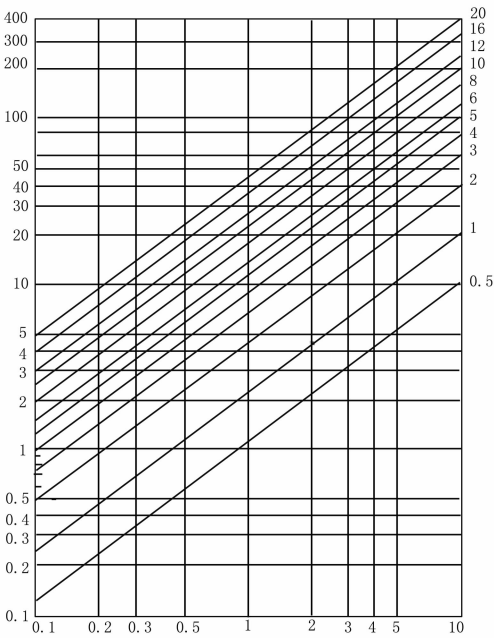


图2 根据裂隙的起伏度估计粗糙度

验资料, 则可直接采用。否则可采用回弹仪现场测定每条裂隙岩壁硬度, 依据图 3 确定其单轴抗压强度。

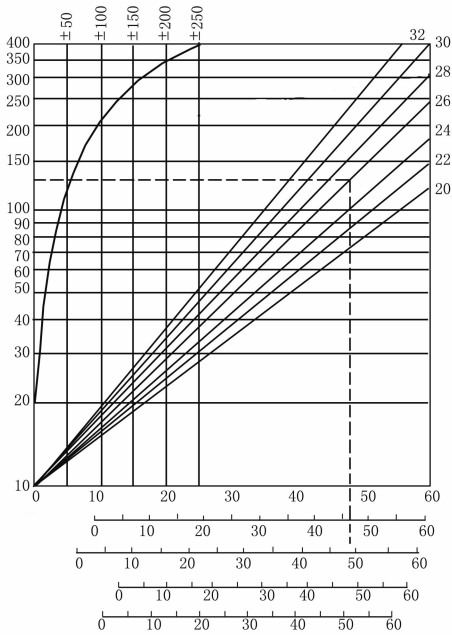


图3 利用回弹仪估算岩壁单轴抗压强度

3 在沐若水电项目中的应用实例

沐若水电项目位于马来西亚沙捞越州民都鲁省拉让河上, 为碾压混凝土重力坝, 坝高 153 m, 总装机容量 944 MW。主要建坝岩体为第三系杂砂岩及少量页岩。工程建设初期, 对区内代表性岩体主要结构面进

行了部分室内和现场物理力学试验,基本查明了各类岩体的物理力学性质。试验结果表明,新鲜砂岩的单轴抗压强度为 60 ~ 80 MPa,岩石抗剪断强度  $f' = 1.1 \sim 1.3$ ,  $C' = 1.1 \sim 1.3$  MPa,新鲜页岩的单轴抗压强度为 11.2 ~ 17.2 MPa,岩石抗剪断强度  $f' = 0.5$ ,  $C' = 0.5$  MPa。

3.1 坝基裂隙发育规律

沐若大坝坝基岩体主要为厚度 127 m 的陡倾砂岩,层面、层间软弱夹层不构成坝基抗滑稳定的控制条件,因此,砂岩中裂隙尤其是缓化解裂隙的发育程度是影响坝基抗滑稳定的重要因素。经过前期及施工期的补充勘察,查明坝基下无延伸范围大的中、缓倾角的软弱结构面,部分规模较小的裂隙均发育于浅表部的风化卸荷带中,深部新鲜岩体一般较完整。坝基开挖完成后,为查明坝基岩体的完整性,布置了一系列钻孔,通过钻孔高清录像技术,详细分析了坝基岩体的结构面发育情况,尤其是缓倾角结构面的发育情况。经分析,坝基砂岩中主要发育以下 3 组缓倾角结构面<sup>[3]</sup>,均属卸荷性质的短小裂隙。

- (1) 结构面 A。倾向 NW,倾角 11° ~ 25°,主要发育在左岸坝基下,发育深度在坝基下 15 m 以内,裂隙张开,以无充填的硬性结构面为主。
- (2) 结构面 B。倾向 SW,倾角 20° ~ 30°,主要发育于河床坝段,发育深度坝基下 12 m 范围内,面多粗糙,张开,以无充填或充填方解石为主。
- (3) 结构面 C。倾向 SE,倾角 40° ~ 60°,主要发育于右岸坝段,发育深度 15 m 范围内,面多粗糙,闭合,基本无充填。

上述 3 组裂隙面均有不同程度的风化,但基本无充填,采用现场估算的方法确定抗剪力学参数。

3.2 裂隙力学参数现场估算

现场测定了各组裂隙的粗糙度系数  $JRC$ 、新鲜岩体的基本摩擦角  $\alpha_s$ ,岩石单轴抗压强度  $JCS$  采用前期试验值,沐若大坝坝基压应力平均值约 2 MPa,各组裂隙 2 MPa 正应力条件下的抗剪强度参数计算见表 1。

表 1 现场估算裂隙抗剪强度参数计算成果(2 MPa 正应力)

结构面	$\varphi_{\min}/(^{\circ})$	$\varphi_{\max}/(^{\circ})$	$\varphi_{\text{平均}}/(^{\circ})$	$C_{\min}/\text{MPa}$	$C_{\max}/\text{MPa}$	$C_{\text{平均}}/\text{MPa}$
A	28.70	35.90	32.15	0.14	0.59	0.34
B	26.79	38.94	30.88	0.07	0.58	0.21
C	26.79	35.68	32.12	0.06	0.60	0.30

从估算结果看,在 2 MPa 正应力条件下,坝基无充填裂隙,抗剪强度  $f = 0.5 \sim 0.81$ ,  $C = 0.06 \sim 0.59$  MPa。

3.3 现场估算值与试验值的对比

前期在左坝肩砂岩中进行了 2 组硬性结构面的直剪试验,该类结构面抗剪强度  $f = 0.9 \sim 0.94$ ,  $C = 0.03 \sim 0.17$  MPa。可以看出,现场估算  $f$  值要比试验值低,而  $C$  值则高于试验值。主要原因是,试验砂岩中的裂隙岩壁为新鲜状态,而坝基下裂隙多有少量的风化现象,另外,试件尺寸一般为 0.5 m × 0.5 m,裂隙尺度较小,裂隙的起伏度没有充分反映到抗剪强度参数中去,现场测量裂隙粗糙度时,多为几米至十几米,裂隙充分考虑了粗糙度因素,而粗糙度对  $C$  值的影响非常明显<sup>[4]</sup>。因此,现场估算的  $f$  值比试验值小,  $C$  值比试验值大。

4 结 语

本文提供的方法仅适用于无充填硬性裂隙抗剪强度的估算,对于有充填物的软弱结构面,其抗剪强度主要取决于充填物性质,需要试验或有经验的工程师类比确定其抗剪强度参数。

参考文献:

- [1] Barton, N. R. Review of a new shear strength criterion for rock joints [J]. Eng. Geol., 1973, (7).
- [2] Barton, N. R. and Choubey, V. The shear strength of rock joints in theory and practice[J]. Rock Mech., 1977.
- [3] 长江勘测规划设计研究有限公司. 马来西亚沐若水电项目大坝坝基工程地质总结报告[R]. 武汉:长江勘测规划设计研究有限公司, 2011.
- [4] Barton N R, Bandis S C. Effects of block size on the the shear behaviour of jointed rock. [C] // 23rd U. S. symp. on rock mechanics, Berkeley, 1982.

(编辑:赵凤超)

(下转第 64 页)



(4) 通过每平方米的造价比较,含 NS-box 系统的地下连续墙造价与传统的地下连续墙基本相当,NS-box 系统可作为特定环境下城市地下连续墙支护结构的优选方案。

#### 参考文献:

[1] 中国土木工程学会土力学及岩土工程分会主编. 深基坑支护技术

指南[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,2012.

[2] 刘国彬,王卫东. 基坑工程手册[M]. 北京:中国建筑工程工业出版社,2009.

[3] 赵海丰,桂树强. H+Hat 组合型钢桩在基坑工程中的适用性研究[J]. 人民长江,2012,(5).

[4] GB42/159-2004 基坑工程技术规程[S]. (编辑:赵凤超)

## Study on applicability of NS-box system in supporting structure of foundation pit

ZHAO Haifeng<sup>1,2</sup>, WANG Dahua<sup>2</sup>, JIA Jing<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>

(1. Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China; 2 Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Taking a subway foundation pit as an example, the application of NS-box system in underground diaphragm wall supporting structure of foundation pit is calculated and analyzed by means of limit equilibrium and finite element numerical simulation. The underground diaphragm wall support of NS-box system is compared with the traditional support in terms of technology and economy, construction speed, construction complexity, application scope and environmental impacts. The results show that the application of NS-box system in underground diaphragm wall support is safe and feasible with remarkable advantages in construction technology and environmental protection.

**Key words:** underground diaphragm wall; supporting structure; NS-box system; foundation pit

(上接第 50 页)

## Application of multiple linear regression in inversion of tunnel ground stress

SHI Cunpeng, WANG Jiaxiang, CHEN Changsheng, WANG Wangsheng, HU Wei

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To overcome the drawbacks of insufficient measuring point of ground stress, it is necessary to invert the ground stress field by multiple linear regression method. Aiming at a deep-buried tunnel, according to the ground stress data measured by hydraulic fracturing method, the inversion of ground stress is carried out. Based on the introduction to the basic inversion theory and error analysis, the inverted results of ground stress are provided. The results show that the calculated results by multiple linear regression is in accordance with the measured data, so it is feasible to be applied in the evaluation of ground stress in the presented tunnel section; due to the influence from horizontal tectonic stress and fracture structure, the ground stress in the presented section reveals some spatial variability.

**Key words:** hydraulic fracturing method; multiple linear regression; inversion of ground stress; deep buried tunnel

(上接第 57 页)

## Estimation method of shear strength of rock mass discontinuity without filling and its application

ZHONG Hua, YANG Huoping, HE Jinming

(Sanxia Exploration and Survey Co., Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The shear strength parameters of rock mass discontinuity are basic parameters in anti-sliding stability calculation of structure foundation. In small-scale project, the value of the parameter is taken by the experienced engineer through the analysis and classification of the characteristics of discontinuity; while, in large-type project, it is obtained by test. The former method depends on the experience of engineer, and the latter can not cover all discontinuities because the test can only be performed to partial typical discontinuity. We described how to estimate the shear strength parameters of some specific discontinuities quantitatively, and the method is practical and convenient.

**Key words:** shear strength; rock mass discontinuity; roughness of fracture; rock face strength; Murum Hydropower Station