Journal of Engineering Geology 工程地质学报 1004-9665/2018/26(5)-1196-07

胡巍，柳景华，庞云铭，等. 2018. 基于 H-B 准则的各向异性边坡岩体强度参数修正研究[J]. 工程地质学报，26(5)：1196-1202. doi：10.13544/j.cnki.jeg.2018122

Hu Wei, Liu Jinghua, Pang Yunming, et al. 2018. Correction of strength parameters for anisotropic slope rock mass based on H-B principles[J]. Journal of Engineering Geology, 26(5): 1196-1202. doi: 10.13544/j.cnki.jeg.2018122

基于 H-B 准则的各向异性边坡岩体强度参数修正研究*

胡 巍[①②] 柳景华[①] 庞云铭[①] 钟 华[①]

(①长江勘测规划设计研究院有限责任公司 武汉 430010)

(②成都理工大学 成都 610059)

摘 要 在岩质边坡的稳定性计算分析中，各向异性岩体抗剪强度参数的合理取值直接决定了分析成果的可靠性。为充分考虑岩体各向异性对边坡工程的影响，本文基于 H-B 强度准则，利用边坡岩体质量分类体系 CSMR 替代 RMR，对参数 m_b、s 进行修正，并由此进一步计算得到各向异性边坡岩体的等效 M-C 强度参数。通过工程实例，计算比较了金沙江某水电站导流洞出口边坡在相同基岩条件、不同开挖设计方案下强度参数修正前后的边坡稳定安全系数。研究结果表明，岩体各向异性对边坡稳定性影响较大，未考虑岩体各向异性的岩体参数用于边坡稳定性计算时不能准确反映边坡的实际稳定性状态；而经过各向异性修正后，导流洞出口边坡两种设计方案下的整体稳定安全系数计算结果分别为 1.11 和 1.70，与工程地质定性、半定量评价结果基本相符。通过本文提出的方法对边坡各向异性岩体参数进行修正，并在此基础上对边坡整体稳定性进行计算分析是可行的。

关键词 H-B 强度准则；岩体各向异性；强度参数；边坡岩体质量分类；稳定性

中图分类号：O319.56 **文献标识码**：A doi：10.13544/j.cnki.jeg.2018122

CORRECTION OF STRENGTH PARAMETERS FOR ANISOTROPIC SLOPE ROCK MASS BASED ON H-B PRINCIPLES

HU Wei[①②] LIU Jinghua[①] PANG Yunming[①] ZHONG Hua[①]

(①*Changjiang Institute of Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan* 430010)

(②*Chengdu University of Technology, Chengdu* 610059)

Abstract The calculation result of stability of anisotropic rock slope is directly dependent on the value of shear strength parameters of the rock mass. In order to take the influence of rock anisotropy on slope stability into account, we use CSMR instead of RMR in the H-B strength criterion, and modify the parameters m_b and s. Then, the equivalent M-C strength parameters of anisotropic rock mass can be obtained. They are combined with the calculation of the slope engineering at the exit of the diversion tunnel of a hydropower station in Jinsha River. The safety factors of the slope stability before and after the correction of the strength parameters under the same bedrock conditions and different excavation design schemes are calculated and compared. The results indicate that the stability of the slope is greatly affected by the anisotropy of rock mass. Without considering the anisotropy of rock mass, the stability of slope cannot be accurately reflected in the calculation result of slope stability. After anisotropy correction, the calculation results of slope safety factors of the two design schemes are 1.11 and 1.70 respectively,

* 收稿日期：2018-04-30；收到修改稿日期：2018-07-15.

基金项目：湖北省自然科学基金项目(2017CFB382)资助.

第一作者简介：胡巍(1986-)，男，博士后，高级工程师，主要从事水利水电工程地质勘察及相关研究工作. Email：huwei_cumt@163.com

which are basically consistent with the qualitative and semi-quantitative evaluation. In summary, the method for correcting the parameters of anisotropic rock mass of slope is feasible.

Key words　H-B strength criterion; Anisotropy of rock mass; Strength parameter; Slope mass rating; Stability

0　引　言

边坡稳定问题是各类工程建设中涉及的重要技术问题。边坡稳定性的准确评价不仅决定了边坡处理方案选择,更决定了边坡工程成败与安全。关于边坡稳定性的评价方法较多,实际应用中,除工程地质定性评价方法外,使用最为成熟和广泛的仍为极限平衡法,其次为数值模拟法,该两种方法也是各行业相关规程、规范等所推荐的方法(中华人民共和国电力行业标准编写组, 2007; 中华人民共和国水利行业标准编写组, 2007)。

对于(似)层状结构等各向异性岩质边坡的稳定性分析,通常需要根据结构面产状与坡面的组合关系确定边坡地质结构类型,判断其变形破坏模式,根据破坏模式及边界条件选取相应的稳定计算方法。但当边坡的控制结构面不贯通、不发育、不明确时,无法确定边坡确定性滑移边界,其整体稳定性计算需以岩体的综合强度参数为基础。因此,对于各向异性显著岩质边坡,强度参数取值合理与否至关重要。

岩体强度参数通常可采用现场试验、室内试验、反演分析和工程地质类比等方法,综合分析确定抗剪强度指标。在项目建设的前期研究阶段,更多的是依靠室内试验结合工程经验并参考规范进行取值。

同时,Hoek-Brown 强度准则也越来越多地应用于岩体强度参数的评价分析中(郭维祥等, 2017)。Hoek-Brown 强度准则自 1980 年提出以来(Hoeket al.,1980a, 1980b, 1997),经过近 40 a 发展,已被广泛认可。但广义 H-B 岩体强度准则的应用具有一定局限性,即该准则一般用于均质岩体分析,而不适用于各向异性明显的岩体结构。

如何在岩体强度准则中反映各向异性对工程的影响是岩体力学始终关注的重要课题。Jaeger (1960, 1971)提出单弱面理论,其主要思想是根据加载方向对岩体材料的黏聚力进行修正; 徐卫亚等(2007)应用损伤力学、节理张量理论,将岩体抗剪强度参数表达为等效正交各向异性变化的抗剪强度参数; 刘东燕等(1998)研究了断续节理的各向异性对 Hoek-Brown 强度准则参数的影响; 尹晓萌等(2017)采用室内三轴压缩试验研究了片岩的各向异性特征;Halakatevakis et al. (2010)通过数值方法分析了岩石强度和节理率对岩体强度各向异性的影响。

对于边坡分析中层状、似层状岩体的各向异性问题,本文基于 H-B 强度准则,引入边坡岩体质量分类 CSMR 对 M-C 强度参数进行修正,并以修正的抗剪强度参数对边坡稳定性进行极限平衡法分析。该方法为解决岩土工程分析中的强度各向异性问题提供了新的方法和思路。

1　各向异性对边坡稳定性的影响

受岩土体结构特征影响,一些岩土体物理力学性质存在明显的各向异性。工程作用力的方向不同,其岩土体材料表现出的强度、变形特征也不一致。就边坡工程而言,岩体自身的抗滑力主要受到岩体内优势结构面发育特征的影响。

如图 1a 与图 1b 所示,某一地层岩性、岩体结构等基本地质条件相同,但边坡开挖方向相反。图 1a 所示边坡潜在失稳破坏模式呈滑移式破坏,边坡稳定性较差; 而图 1b 所示边坡以倾倒破坏为主,且稳定性相对较好。在实际工程应用中,对某一范围岩体通常提出一套综合物理力学参数用于设计计算,而鲜有考虑岩体各向异性与多种工程作用力方

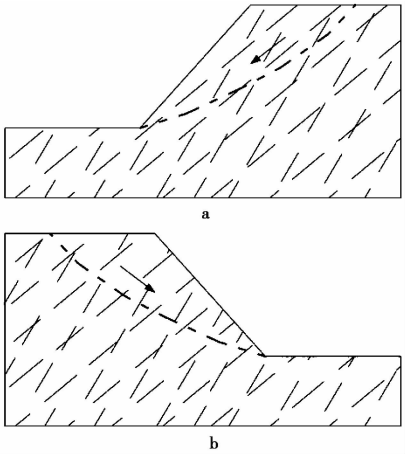

图 1　岩体各向异性对边坡稳定性的影响示意

Fig. 1　The influence of the anisotropy of rock mass on the stability of slope

向的相互关系。在对以下两种情况的边坡整体稳定性进行评价时,若采用同一套物理力学参数进行极限平衡、强度折减分析或进行应力、变形分析,必然得到相同的分析结果,但显然与实际情况不符。

因此,对于各向异性明显的岩土体材料参数,应该具体工况具体分析,根据实际情况对参数进行必要修正。

2 各向异性岩质边坡强度参数修正

2.1 岩质边坡抗剪强度参数取值的一般方法

对岩质边坡抗剪强度参数的取值,通常包括以下几种情况:

(1)对于有特定控制性结构面的边坡,可通过试验确定结构面参数;当试验资料不足时,则需根据边坡工程地质条件,通过工程地质类比、结合经验并参考规范建议值综合确定。

(2)对于成组的结构面,则需按其优势方向考虑其连通率,计入岩桥效应。此时边坡结构面的精细调查和统计至关重要,但对人工开挖边坡而言,裂隙统计等工作实施起来难度及成本较大。

(3)对于处于极限状态的变形边坡或已失稳破坏的边坡,可以根据边坡变形、破坏程度,按临界安全系数(0.95~1.05)反算综合强度参数,以此作为设计采用值。

(4)对于无特定控制性结构面的各向同性节理岩体的抗剪强度,可以采用 H-B 岩体破坏准则和 GSI 或 RMR 系统结合岩体质量分级和试验成果确定。

但对于无特定控制性结构面的各向异性节理岩体,H-B 准则适用性较差,但可以考虑对其进行优化,本文拟采用边坡岩体质量分类 CSMR 对其进行修正研究。

2.2 H-B 强度准则

广义 H-B 岩体强度准则表达式如公示(1)所示(Hoek et al, 1992):

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \tag{1}$$

式中,m_b,s,a 为反映岩体特征的经验参数。

E.Hoek 和 E. T. Brown 结合岩体地质力学分类(RMR)提出了岩体参数 m_b,s,a 取值方法:

(1)扰动岩体

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\dfrac{RMR - 100}{14}\right) m_i \\ s = \exp\left(\dfrac{RMR - 100}{6}\right) \\ a = 0.5 \end{cases} \tag{2}$$

(2)未扰动岩体

$$\begin{cases} m_b = \exp\left(\dfrac{RMR - 100}{28}\right) m_i \\ s = \exp\left(\dfrac{RMR - 100}{9}\right) \\ a = 0.5 \end{cases} \tag{3}$$

式中,m_i 为完整岩石的 H-B 常数。

在实际应用中,根据 RMR 对 H-B 强度准则的参数进行取值具有一定局限性,因此,Hoek 等又发展了基于地质强度指标(GSI)的岩体参数 m_b,s, a 的取值方法。

无论是基于 RMR 分类还是 GSI 系统的 H-B 准则均主要适用于各向同性的均质岩体。水电水利工程边坡设计规范(DLT5353-2006)附录 H 提供了基于 RMR 与 GSI 系统确定各向同性节理岩体抗剪强度的方法,而对于各向异性岩体抗剪强度的确定方法也未做过多的阐述。

2.3 边坡岩体质量分级

在边坡工程中,M.Romana 综合考虑结构面、坡面相互关系以及边坡开挖方式等因素,在 RMR 岩体质量评价方法的基础上,发展提出了边坡岩体质量分级方法 SMR(Slope Mass Rating):

$$SMR = RMR - F_1F_2F_3 + F_4 \tag{4}$$

式中,F_1,F_2,F_3 为岩体不连续面与坡面间产状组合关系调整值,具体如表 1 所示;F_4 为边坡开挖方式调整值,考虑了开挖方式对岩体质量的扰动。

SMR 分级综合考虑了影响边坡稳定的多种因素,应用方便、直观,在国际上获得了广泛应用。我国技术人员在 SMR 基础上增加了对边坡高度和结构面条件因素的修正,形成 CSMR(Chinese Slope Mass Rating)体系(冯树荣等, 2013)。

$$CSMR = \xi RMR - \lambda F_1F_2F_3 + F_4 \tag{5}$$

式中,ξ 为坡高修正系数,$\xi = 0.57 + 34.4/H$;λ 为结构面条件系数,取值如表 2 所示。

2.4 边坡各向异性岩体强度参数的修正

在 H-B 强度准则中,各向同性的岩体参数 m_b, s, a 可通过式(2)、式(3)求得。在进行边坡稳定性

表 1　结构面方向修正

Table 1　Correction of structural plane direction

破坏机制	情况	非常有利	有利	一般	不利	非常不利
P T	$\gamma_1=\lvert\alpha_j-\alpha_s\rvert$ $\gamma_1=\lvert\alpha_j-\alpha_s-180°\rvert$	>30°	30°~20°	20°~10°	10°~5°	<5°
P,T	F_1	0.15	0.40	0.70	0.85	1.00
P	$\gamma_2=\lvert\beta_j\rvert$	<20°	20°~30°	30°~35°	35°~45°	>45°
P T	F_2 F_2	0.15 1	0.40 1	0.70 1	0.85 1	1.00 1
P	$\gamma_3=\beta_j-\beta_s$	>10°	10°~0	0	0~(-10°)	<-10°
T	$\gamma_3=\beta_j+\beta_s$	<110°	110°~120°	>120°	—	—
P,T	F_3	0	5	25	50	60

P 为滑动，T 为倾倒，α_s 为边坡倾向，α_j 为结构面倾向，β_s 为边坡倾角，β_j 为结构面倾角

表 2　结构面条件系数

Table 2　Structural surface condition coefficient

结构面条件	λ
断层、夹泥层	1.0
层面、贯穿裂隙	0.8~0.9
节理	0.7

分析时，对于各向异性的边坡岩体参数，本文拟采用 *CSMR* 代替式(2)、式(3)中的 *RMR*，由此将各向异性对边坡的影响反映于强度参数中。具体如下

(1)扰动岩体

$$\begin{cases} m_b=\exp\left(\dfrac{CSMR-100}{14}\right)m_i \\ s=\exp\left(\dfrac{CSMR-100}{6}\right) \\ a=0.5 \end{cases} \tag{6}$$

(2)未扰动岩体

$$\begin{cases} m_b=\exp\left(\dfrac{CSMR-100}{28}\right)m_i \\ s=\exp\left(\dfrac{CSMR-100}{9}\right) \\ a=0.5 \end{cases} \tag{7}$$

在大多数极限平衡计算及数值模拟中，均以莫尔-库仑强度准则为计算基础。因此，在采用非线性的 H-B 强度准则进行边坡稳定性分析时，需将式(1)中的主应力转换成正应力和剪应力的形式，从而确定等效抗剪强度参数 c、φ 值。H-B 强度参数与 M-C 强度参数的转换如式(8)、式(9)所示。

$$c=\frac{\sigma_c\left[(1+2a)s+(1-a)m_b\sigma_{3n}\right](s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)\sqrt{1+6a(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}/}} \tag{8}$$

$$\varphi=\sin^{-1}\left[\frac{6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a)+6am_b(s+m_b\sigma_{3n})^{a-1}}\right] \tag{9}$$

3　工程算例

3.1　基本地质条件

金沙江某水电站导流洞出口人工边坡由洞脸边坡及左、右侧坡组成，侧面坡边坡走向与导流洞出口轴线方向一致。

其中，左侧坡靠近山内，规模较大。设计过程中，先后对两种导流出口方案进行了比选。方案一侧面坡走向 354°，方案二侧面坡走向 8°。人工边坡每 15 m 设置一马道，马道宽 2 m，单级开挖坡比 1∶0.3~1∶0.5。最大坡高达 90 m 左右。人工边坡代表性剖面如图 2 所示。

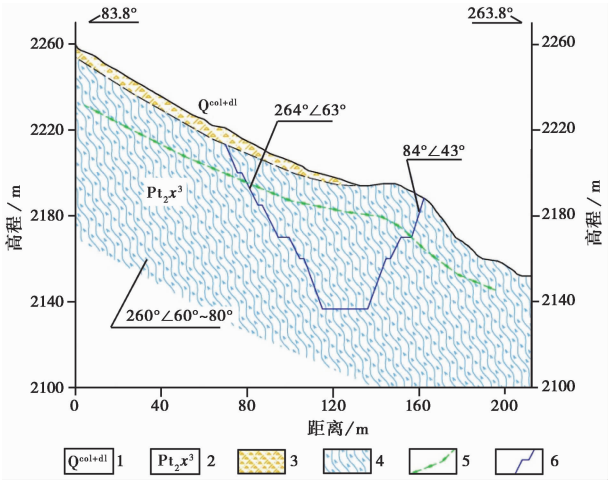

图 2　导流洞出口人工边坡代表性剖面

Fig. 2　There presentative section of left slope at the diversion tunnel outlet

1. 崩坡积物；2. 雄松群；3. 碎块石土；4. 斜长角闪(片)岩；5. 弱卸荷下限；6. 边坡开挖线

边坡基岩为斜长角闪(片)岩,岩质坚硬,单轴饱和抗压强度 60~80 MPa。局部片理较发育,新鲜岩体片理面一般胶结紧密,片理产状 260°∠70°,多呈层状-次块状结构。基岩发育两组优势裂隙,第一组产状 260°∠50°~70°,沿片理面发育,裂隙闭合,局部微张,裂面起伏稍粗;第二组产状 115°∠75°,裂隙闭合,局部微张,裂面起伏稍粗。导流洞出口所处自然边坡弱风化深度一般为 20 m 左右,局部最深约 70 m。弱卸荷带水平深度 15~25 m。在边坡开挖范围内,钻孔及平硐未揭露地下水。

3.2 边坡稳定性定性评价

3.2.1 图解法

左侧坡结构面赤平投影如图 3 所示。方案一边坡开挖后呈顺向坡结构,人工边坡坡面倾角 63°,而第一组优势裂隙倾角 50°~70°,部分范围倾角小于坡面倾角,边坡可能滑移破坏,稳定性差;方案二边坡开挖后呈斜向坡(视顺向坡)结构,第一组优势裂隙与坡面小角度相交,交角 18°左右,边坡存在潜在稳定性问题,但稳定性相对方案一较好。

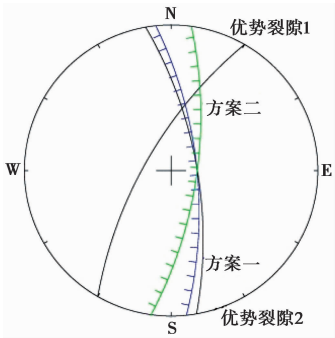

图 3 导流洞出口左侧坡赤平投影图

Fig. 3 The stereogram of left slope at the diversion tunnel outlet

3.2.2 SMR 与 CSMR 法

导流洞出口人工边坡以微风化、新鲜岩体为主,根据钻孔、平硐勘探及相关试验资料,参照《RMR 系统分类及其评分值表》(中华人民共和国电力行业标准编写组, 2007),对边坡基岩的完整岩石强度、岩芯质量指标、节理间距、节理条件及地下水条件进行赋分,得到基岩 $RMR=75$,具体如表 3 所示。

在不同人工边坡方案条件下,根据坡面与结构面产状相互关系及坡高、结构面性状等边坡稳定影响因素,分别对边坡岩体质量按 SMR 和 CSMR 分级方法进行修正,如表 4 所示。

方案一人工边坡 $SMR=25$, $CSMR=28.75$,边坡岩体质量属Ⅳ类,边坡不稳定;方案二人工边坡 $SMR=40$, $CSMR=41.5$,边坡岩体质量属Ⅲ~Ⅳ类,边坡基本稳定-不稳定。

表 3 人工边坡基岩 RMR 评分表

Table 3 RMR evaluation on the rock mass of artificialslope

	分类参数	条 件	评分
1	完整岩石强度	岩块单轴饱和抗压强度 60~80 MPa	7
2	岩芯质量指标 RQD	微新岩体 $RQD=40\%\sim80\%$	13
3	节理间距	平硐及钻孔揭露节理间距 0.5~1 m 左右	15
4	节理条件	节理一般平直稍粗,闭合无充填,节理面一般轻微风化	25
5	地下水	边坡范围内,钻孔、平硐均为干燥无水	15
6	总分		75

表 4 不同方案人工边坡 SMR 和 CSMR 评分

Table 4 SMR evaluation on the different artificial slope schemes

	RMR	F_1	F_2	F_3	F_4	ξ	λ	SMR	$CSMR$
方案一	75	1	1	50	0	0.95	0.85	25	28.75
方案二	75	0.7	1	50	0	0.95	0.85	40	41.5

3.3 边坡岩体参数修正及稳定性定量评价

3.3.1 参数修正前

(1)基于 H-B 准则的参数取值:不考虑边坡岩体质量修正,根据 H-B 准则,利用 RMR 求解岩体等效 $M-C$ 抗剪强度参数。其中, $RMR=75$,斜长角闪(片)岩完整岩石常数 $m_i=12$,岩块饱和单轴抗压强度 $\sigma_{ci}=70$ MPa,边坡高度 $H=90$ m。计算得到边坡岩体 $c=1.57$ MPa, $f=1.12$。

(2)原位试验:对该工程坝址区斜长角闪(片)岩进行了多组原位剪切试验,试验过程中未考虑片理方向性的影响。试验得到抗剪强度参数算术平均值 $c=1.27$ MPa, $f=1.01$。

使用 Sarma 法,采用以上两种参数计算导流洞出口左侧边坡整体稳定性,如表 5 所示。计算结果表明,方案一、方案二边坡稳定安全系数相同,且边坡整体稳定性好。但该计算结果与边坡稳定工程地质定性评价结果存在偏差。

3.3.2 参数修正后

传统的 H-B 准则未考虑工程作用力与岩体各向异性的方向关系。因此,本文将 SMR 或 $CSMR$ 引入 H-B 强度准则,代替式(2)中的 RMR,由此对边坡岩体参数进行各向异性修正,并进一步计算得到

表 5　边坡参数及稳定性计算成果

Table 5　The result of slope parameters and calculation of slope stability

参数	*RMR*	*c* /MPa	*f*	整体稳定安全系数
H-B 准则(RMR)	75	1.57	1.12	4.81
原位试验参数		1.27	1.01	4.04

方案一、方案二计算结果一致

其等效 M-C 强度参数。CSMR 体系中考虑了结构面性状及坡高对岩体质量的影响，对引起岩体各向异性的因素考虑更为全面，因此本文选用 CSMR 进行修正。但由于 H-B 准则中已考虑了扰动因素对岩体质量的影响，所以此处 CSMR 中 F_4 不给予赋值。

以 M-C 强度参数为基础，采用 Sarma 法计算不同方案修正参数持久工况下的边坡整体稳定性。计算结果如表 6 所示。

表 6　边坡参数修正及稳定性计算成果

Table 6　The result of correction of slope parameters and calculation of slope stability

方案	参数	*CSMR*	*c* /MPa	*f*	整体稳定安全系数
方案一	H-B 准则修正(SMR)	28.75	0.23	0.43	1.11
方案二	H-B 准则修正(SMR)	41.5	0.38	0.61	1.70

边坡岩体抗剪强度参数经各向异性修正后减小，边坡整体稳定性计算结果随之降低。根据计算结果，方案一边坡整体稳定安全系数 1.11，整体稳定性不满足该类边坡设计安全系数要求；方案二边坡整体基本稳定。

3.4　边坡岩体参数修正及稳定性对比分析

设计方案一中，导流洞出口左侧边坡发育一组顺坡向优势裂隙，对边坡整体稳定构成较大影响，通过图解法、SMR 或 CSMR 法判断，边坡整体稳定性较差。方案二呈视顺向坡结构，优势裂隙与坡面小角度相交，边坡稳定性相对较好。

考虑岩体各向异性对参数的影响，根据边坡岩体质量分级，按结构面发育产状与坡面产状相互关系等对参数进行修正，由此计算得到两种方案的边坡整体稳定性系数分别为 1.11 与 1.70，与工程地质定性、半定量判断结果相符。而直接由 RMR 计算得到的强度参数以及未考虑各向异性进行的原位试验的强度参数均明显偏大，边坡稳定计算结果不符合实际情况。

4　结　论

(1)边坡稳定性分析评价时，岩体强度参数的各向异性对边坡稳定性影响较大。需考虑结构面发育产状与边坡坡面的相互关系等因素对边坡岩体质量、岩体强度参数等进行修正优化。

(2)未考虑各向异性条件的岩体参数用于边坡稳定性计算时，安全系数为 4.81、4.04，计算结果与定性、半定量评价存在偏差；而经过边坡岩体质量分级修正后的等效 M-C 参数用于边坡稳定性计算时，两种设计方案的边坡安全系数分别为 1.11 和 1.70，计算结果与定性、半定量评价结果相符。

(3)边坡工程中，考虑岩体各向异性对边坡稳定性的作用影响，在 H-B 强度准则中采用 CSMR 替代 RMR 对各向异性边坡岩体强度参数进行修正，并用于边坡稳定性分析是可行的。

参　考　文　献

Feng S R, Peng T B, et al. 2013. Hydraulic design manual, slope engineering and geological disaster prevention and control[M]. Beijing: China Electric and Power Press.

Guo W X, Zheng K X, Hu Z, et al. 2017. Comparative study on two methods of rock mass strength parameters for application in hydropower engineering[J]. Journal of Engineering Geology, 25(1): 171-179.

Halakatevakis N, Sofianos A I. 2010. Correlation of the Hoek-Brown failure criterion for a sparsely jointed rock mass with an extended plane of weakness theory[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 47(7): 1166-1179.

Hoek E, Brown E T. 1980a. Empirical strength criterion for rock masses[J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106(9): 1013-1035.

Hoek E, Brown E T. 1980b. Underground excavations in rocks[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy: 527.

Hoek E, Brown E T. 1997. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34(8): 1165-1186.

Hoek E, Wood D, Shah S. 1992. A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses[C]//Hudson J A. Proceedings of the Rock Characterization, Symposium of ISRM. London: British Geotechnical Society: 209-214.

Jaeger J C. 1960. Shear failure of anisotropic rocks[J]. Geology Magazine, 97(1): 65-72.

Jaeger J C. 1971. Friction of rocks and stability of rock slope[J].

Géotechnique,21(2): 97-134.

Liu D Y, Zhu K S. 1998. A study of strength anisotropy of rock mass containing intermittent joints[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,17(4): 366-371.

Standard Compilation Group of Electric Power Industry of the People's Republic of China. 2007. Slope design specifications of hydropower and water projects (DLT5353-2006) [S]. Beijing: China Electric and Power Press.

Standard Compilation Group of Water Conservancy Industry of the People's Republic of China. 2007. Slope design specifications of water and hydropower projects (SL386-2007) [S]. Beijing: China Water & Power Press.

Xu W Y, Zhang G K. 2007. Study on orthotropic equivalent strength parameters of jointed rock mass[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,29(6): 806-810.

Yin X P, Yan E C, Cui X J, et al. 2017. Characteristic of strength anisotropy and failure modes of schist[J]Journal of Engineering Geology,25(4): 943-952.

冯树荣,彭土标,等. 2013. 水工设计手册——边坡工程与地质灾害防治[M]. 北京: 中国水利水电出版社.

郭维祥,郑克勋,胡政,等. 2017. Hoek—Brown 强度参数取值及水电工程应用方法对比研究[J]. 工程地质学报,25(1): 171-179.

刘东燕,朱可善. 1998. 含断续节理岩体强度的各向异性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 17(4): 366-371.

徐卫亚,张贵科. 2007. 节理岩体正交各向异性等效强度参数研究[J]. 岩土工程学报,29(6): 806-810.

尹晓萌,晏鄂川,崔学杰,等. 2017. 片岩强度各向异性特征及破坏模式分析[J]. 工程地质学报, 25(4): 943-952.

中华人民共和国电力行业标准编写组. 2007. 水电水利工程边坡设计规范(DLT5353-2006)[S]. 北京:中国电力出版社.

中华人民共和国水利行业标准编写组. 2007. 水利水电工程边坡设计规范(SL386-2007)[S]. 北京:水利水电出版社.