

文章编号: 1001-1986(2010)03-0032-05

# 基于斜坡变形演化的岩体强度估算方法

王亮清, 吴 琼, 梁 烨, 张显书, 唐辉明

(中国地质大学工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 由于斜坡岩体所受的应力场在空间上具有分区性, 导致相同岩性与结构特征的岩体其强度参数是不同的。研究斜坡变形演化过程中应力场的空间分布特征, 揭示斜坡演化过程对岩体强度参数的影响, 对斜坡岩体稳定性评价与优化设计起着举足轻重的作用。以北盘江善泥坡水电站上坝址岩体为例, 在工程地质岩组划分的基础上, 利用 Hoek-Brown 强度准则初步估算各岩组强度参数; 恢复斜坡的原始地形并建立相应的数学力学模型, 根据斜坡不同时期的变形演化特点, 应用 FLAC3D 软件模拟斜坡岩体变形演化过程中应力场的空间分布特点, 以此为基础进一步划分上述岩组, 最后根据岩体所受的真实应力与 Hoek-brown 准则估算新分组后的斜坡岩体强度参数, 得出更加符合实际情况的强度参数。

**关键词:** 斜坡变形演化; 风化程度; Hoek-Brown 强度准则; FLAC3D; 强度参数估算

**中图分类号:** TU45; P642.22 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.03.008

## Estimating method of rockmass strength parameters based on slope deformation process

WANG Liangqing, WU Qiong, LIANG Ye, ZHANG Xianshu, TANG Huiming

(Engineering Faculty, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Rockmass strength parameters depend to some extent on stress values acted on the rockmass. Strength parameters of rockmass, which have the same rock properties and structure, are different because of different stress values acted on the rockmass in the space distribution. Based on the slope deformation process analysis, slope stress spatial distribution is evaluated and influence of rockmass strength parameters is revealed in the process of slope deformation evolvement. The study plays an significant role in stability evaluation and engineering optimization design. Taking the rockmass in upper dam site of Shannipo hydropower station as an example, based on partition of engineering geology petrofabric, primary shear strength parameters of rockmass are estimated by Hoek-Brown criteria. Geological mechanical model, for which original topography is renewed, is established. According to slope deformation process, spatial distribution properties of stress values are discussed by FLAC3D software. A subdivided engineering geological petrofabric, from which slope stress properties are considered, is determined and strength parameters, which made the result more reasonable, are estimated.

**Key words:** slope deformation process; weathering extent (degree); Hoek-Brown criteria; FLAC3D; strength parameters estimation

影响岩体强度参数的主要因素有岩块强度、结构面特性、岩体结构特征与岩体所处的环境状态。具有相同岩性和结构特征的岩体所处的环境不同时, 其力学性质也不同。目前岩体强度参数的确定方法主要有: a. 理论分析方法<sup>[1-2]</sup>; b. 岩体分类方法, 此法是基于 Hoek-Brown 强度准则与工程岩体分级, 其核心问题是岩体软硬程度相关的参数  $m$  和与岩石内部颗粒间抗拉强度及颗粒间啮合程度有关的参数  $s$  的确定<sup>[2-5]</sup>; c. 通过室内外试验确定岩体强度参数的

试验方法<sup>[6-9]</sup>; d. 计算机模拟方法, 这是根据岩体的几何模型、本构模型与边界条件, 建立相应的数学力学模型, 在此基础上开展计算机模拟实验研究<sup>[10-13]</sup>; e. 反分析方法, 该法在线性反分析的基础上发展了弹塑性、粘弹性、粘弹塑性等非线性反分析。在确实性反分析的基础上, 发展了智能岩石力学<sup>[14]</sup>等非确定性反分析; 在有限元反演分析的基础上发展了边界元、离散元、半解析元等反演分析法。除上述方法外, 还有一些其他方法可以用来确定岩

收稿日期: 2009-10-30

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(40702050); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(CUG090104)

作者简介: 王亮清(1972—), 男, 山西静乐人, 副教授, 博士后, 主要从事岩体变形机理与稳定性及防治工程适宜性研究。

体强度参数,如:声波测试技术、岩体分形分维理论、断裂损伤力学、统计数学等方法。以上方法在确定岩体的强度参数时各有其优缺点,理论研究方法由于岩体的非均质性与各向异性,岩体的强度参数的确定很难用统一的理论公式表达;室内外实体实验与模型试验固然准确可靠,但是花费大,一般小的工程难以实现;反分析方法所确定的参数能够反映岩体综合强度参数,但是在反分析过程中地质模型的确定、参数的选择与计算方法的确定有许多问题值得研究,且该方法费时费钱。岩体分类方法是确定岩体强度参数比较流行的一种方法,但是在应用该方法与强度准则进行估算时,对斜坡岩体所受的应力状态一般根据深度计算自重应力进而确定岩体所受的应力场特点,斜坡岩体与一般的材料体的主要区别是斜坡岩体所受的应力场是斜坡变形演化作用的结果,即斜坡岩体所受的应力应该根据斜坡的变形演化过程来分析。基于以上原因,本文以北盘江善泥坡水电站上坝址岩体为例,在工程地质岩组划分的基础上,恢复斜坡的原始地形并建立相应的数学力学模型,应用有限单元法分析斜坡不同时期的变形演化特点与应力场的空间分布特点,对不同岩组不同风化程度的岩体进行应力分组,最后根据岩体所受的真实应力与 Hoek-Brown 准则估算斜坡岩体强度参数,揭示斜坡演化过程对岩体强度参数的影响。该研究成果对岩体边坡稳定性评价、建基面划分与评价、边坡与结构的优化设计提供了良好的理论依据。

## 1 研究思路

基于斜坡变形演化的岩体强度参数估算方法的主要思路与步骤为:a. 搜集研究区基础地质资料、工程地质勘察资料与设计资料;b. 对斜坡岩体的结构特征与主要岩石的物理力学性质进行测试与分析,划分斜坡岩体工程岩组;d. 根据岩体强度准则初步估算岩体的强度参数;e. 建立岩体斜坡地质力学模型;f. 利用有限元法分析斜坡演化过程;g. 根据应力场的空间分布特征细分斜坡岩体应力场;h. 根据应力场分区与 Hoek-Brown 准则研究不同岩组强度参数的空间分布特征。研究思路框图见图 1。

## 2 研究区工程地质概况与岩组划分

### 2.1 工程地质概况

善泥坡水电站位于贵州省水城县境内的北盘江上游河段法德大桥附近。上坝址位于善泥坡峡谷灰岩出口段,河流流向为  $N61^{\circ}E$ ,枯水期天然河水位高程 800 m,水库正常蓄水位 885 m。左岸陡壁顶高

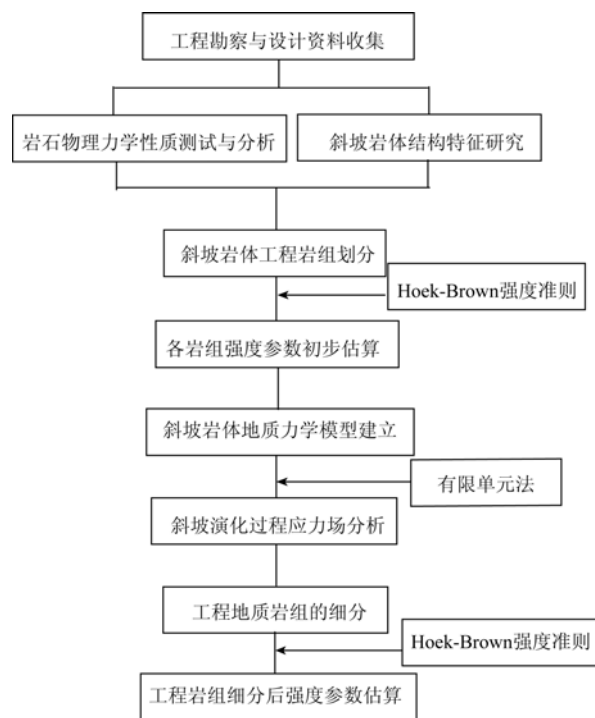


图1 研究思路框图

Fig. 1 Diagram of research approach

程 1 200 m 左右,斜坡坡度  $20^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。右岸 830 m 以下为  $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$  的陡坡,830~960 m 为一陡壁,960 m 以上为一缓坡,坡度为  $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 。坝址河床及两岸主要出露地层为二叠系下统茅口组及栖霞组第二段 ( $P_1q^2+P_1m$ ) 深灰色、灰色厚层灰岩,局部含少量燧石结核。河床下部为栖霞组第一段 ( $P_1q^1$ ) 中厚层夹厚层、薄层灰岩、泥炭质灰岩夹泥页岩。下伏基岩为梁山组 ( $P_1l$ ) 石英砂岩及泥页岩(图 2)。河床覆盖层厚 15~20 m,成分为冲积砂卵石及大块石。两岸坡脚有少量崩塌堆积块石夹碎石、粘土,厚 3~20 m。上坝址位于猴子场背斜南西翼,单斜构造,岩层产状为  $N10^{\circ}W$ ,  $SW\angle 10^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ,缓倾上游偏左岸。

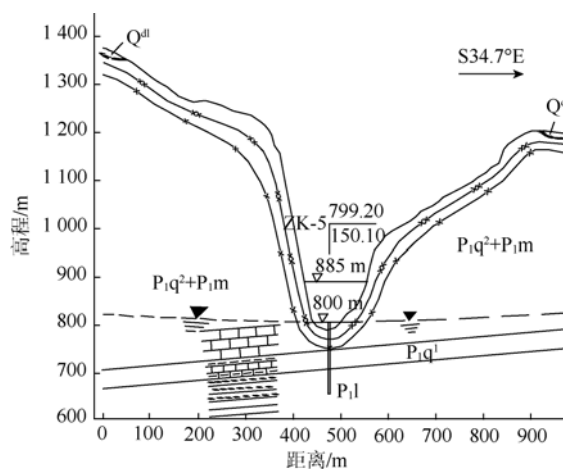


图2 上坝址坝轴线地质剖面图

Fig. 2 Geological section of the upper dam site along the dam axis direction

## 2.2 斜坡岩体工程岩组划分

根据地层岩性、风化程度及两岸岩体的工程地质性质,对上坝址斜坡岩体进行分组。首先根据地层岩性将斜坡岩体分为 3 组,分别为岩组①( $P_{1m}+P_{1q}^2$ )厚层灰岩;岩组②( $P_{1q}^1$ )中厚层灰岩夹页岩及泥页岩;岩组③( $P_{1L}$ )石英砂岩夹泥页岩。其次根据平硐岩体、钻孔岩心夹泥程度、波速等资料,大致可分为弱、微、新鲜岩体 3 个带。弱风化主要表现为裂隙较发育,并沿结构面普遍溶蚀和夹泥;微风化岩体裂隙偶有夹泥外,多数为方解石充填或见铁质浸染。因此,按风化程度可将岩组①细分为:岩组①-1(弱风化)、岩组①-2(微风化)、岩组①-3(新鲜)。最后根据左右两岸相同高程处岩体的声波大小与岩体工程地质特点,可将岩组①再次细分为:岩组①-1(L)(左岸)、岩组①-2(L)(左岸)、岩组①-3(L)(左岸)、岩组①-1(R)(右岸)、岩组①-2(R)(右岸)、岩组①-3(R)(右岸)。各岩组的岩性特点与工程分组见图 3。

## 3 斜坡岩体强度参数初步估算

在斜坡岩体工程分组的基础上,利用弹性波实测资料与室内试验资料(表 1),采用 Hoek-Brown 强度准则初步估算斜坡岩体强度参数。

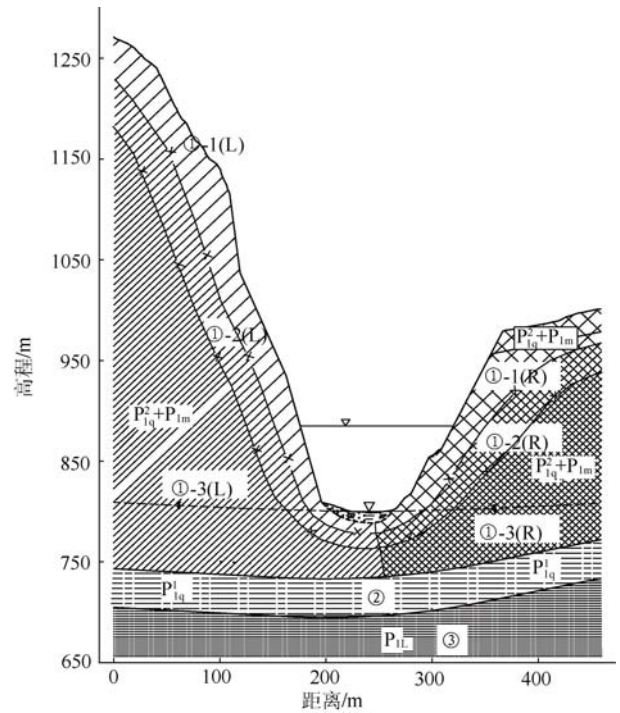


图 3 上坝址轴线工程地质岩组分区图

Fig. 3 Engineering geological zoning graph of the upper dam site along the dam axis direction

表 1 上坝址各岩组岩体力学参数初步估算结果

Table 1 Estimation result of rock mechanics parameters in the upper dam site

岩 组	地 层	岩性描述	纵波波速/m·s <sup>-1</sup>	岩块饱和单轴抗压强度/MPa
①-1 (L)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 弱风化	2 600	67.4
①-2 (L)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 微风化	4 475	67.4
①-3 (L)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 新鲜	5 020	67.4
①-1 (R)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 弱风化	2 445	35~40
①-2 (R)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 微风化	4 200	36.2~92.2
①-3 (R)	$P_{1q}^2+P_{1m}$	厚层至块状灰岩, 新鲜	4 500	67.4
②	$P_{1q}^1$	中厚层、薄层灰岩、泥质灰岩夹泥页岩, 新鲜	4 060	67.4
③	$P_{1L}$	中厚层至厚层石英砂岩夹泥页岩	4 865	67.4

### 3.1 法向应力对抗剪强度参数的影响

利用 Hoek-Brown 准则对不同风化程度的岩组①-1 (L)、①-2 (L)和①-3 (L)计算瞬时抗剪强度,其结果见图 4 与图 5。可以看出:a. 同组岩体的瞬时内摩擦角随法向应力的增加而减小,瞬时内聚力随法向应力的增加而增大;法向应力相同时,岩体质量越好瞬时内摩擦角和瞬时内聚力的数值越大。b. 同组岩体在扰动和非扰动情况下,瞬时内摩擦角和瞬时内聚力的数值有较大差异。岩体因扰动而使瞬时内摩擦角降低的百分比随法向应力的增加而增大,其中新鲜岩体为 5%~30%,微风化岩体为 10%~50%,弱风化岩体为 15%~75%;内聚力降低的百分比随法向应力的增加而增大,新鲜岩体为 50%~60%,微风化岩体为 50%~70%,弱风化岩体为 50%~80%。c. 按瞬时内摩

擦角随法向应力变化的快慢程度可将曲线大致划分为 3 个阶段:急剧减小阶段(法向应力为 0~1 MPa)、缓慢减小阶段(法向应力为 1~6 MPa)与略微减小阶段(法向应力大于 6 MPa)。d. 法向应力为 0~1 MPa 的阶段中,瞬时内摩擦角曲线急剧减小的程度与岩体的风化程度有关,风化越严重,瞬时内摩擦角的变化率越大,如岩组①-1(L)的变化率为 21.5°/MPa,而岩组①-3(L)的变化率仅为 8.3°/MPa。

### 3.2 法向应力取值范围对抗剪强度参数的影响

应用 Hoek-Brown 强度准则估算岩体的抗剪强度参数时,首先要确定岩体所处正应力的取值范围,若给定正应力的范围不同,估算得到的岩体抗剪强度参数值也不尽相同。为考察正应力取值范围对岩体抗剪强度参数的影响,下面以岩组①-1(L)和

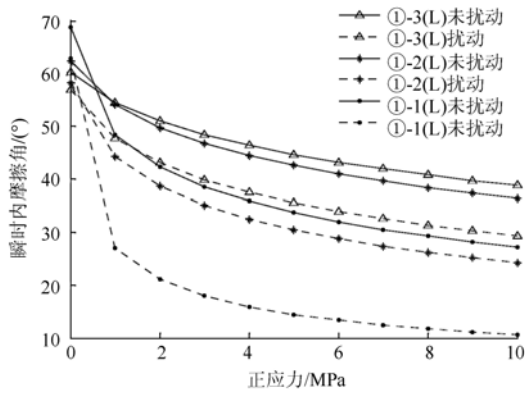


图 4 岩体内摩擦角随正应力变化曲线

Fig. 4 Relationship between friction angles and normal stresses

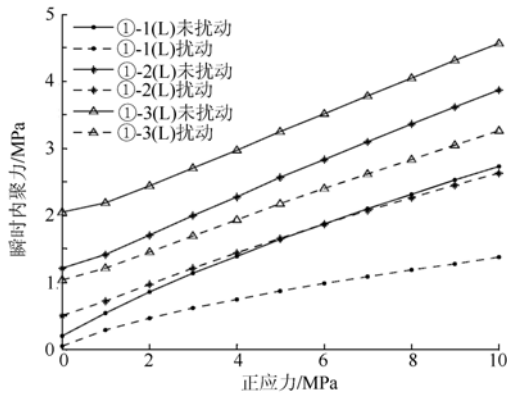


图 5 岩体内聚力随正应力变化曲线

Fig. 5 Relationship between cohesions and normal stresses

①-3(L)为例，分析正应力取值范围的敏感性。表 2 和图 6 的计算结果表明，随正应力取值范围增大，内聚力的估算结果逐渐增大，内摩擦角的估算结果逐渐减小，抗剪强度参数值受正应力取值范围影响较大。

#### 4 斜坡演化过程的强度参数估算

##### 4.1 斜坡演化过程应力场数值模拟

根据斜坡区的岩体分组和边界条件建立斜坡演化过程的数学力学模型，计算边界：左右边界为铰支边界，底边界为固定边界。根据库区地貌对比分析，斜坡附近见三级剥夷面，第一级剥夷面高程为 2 200~2 000 m(大娄山期)；第二级剥夷面高程为 1 800~1 600 m(山盆期)；第三级剥夷面高程为 1 200~1 100m(宽谷期)，北盘江河谷于 1 100 m 高程左右急剧下切，转入峡谷期，并发育四级河流阶地。Ⅰ级阶地在坝址区不明显，Ⅱ级阶地高程在 830~840 m；Ⅲ级阶地高程在 950~960 m；Ⅳ级阶地高程为 1 020 m。依据本区地壳抬升历史，将斜坡形成过程分为 5 次集中卸荷，卸荷平面高程分别为：1 150 m、1 020 m、955 m、835 m 和 797 m(谷底)。利用 FLAC3D 对斜坡演化过程的应力场进行模拟，模拟结果见图 7。

由斜坡演化过程应力分析结果可知：岸坡形成前原始应力等值线基本呈水平分布，随深度的增加

表 2 正应力取值范围的敏感性分析  
Table 2 Sensitivity analysis of the value range of normal stress

正应力 /MPa	岩组 -1(L)(岩体质量较差)			岩组 -3(L)(岩体质量较好)		
	综合内聚力/MPa	综合内摩擦角/(°)	拟合优度系数	综合内聚力/MPa	综合内摩擦角/(°)	拟合优度系数
0~1	0.201 7	45.4	0.992 7	0.898 3	53.7	0.998 4
0~4	0.417 8	33.9	0.987 7	1.115 9	45.5	0.995 2
0~7	0.597 2	29.2	0.985 3	1.334 6	41.3	0.993 3
0~10	0.757 2	26.3	0.983 7	1.544 1	38.4	0.992 0
0~15	0.996 8	23.1	0.981 9	1.873 9	34.9	0.990 4
0~20	1.213 1	21.0	0.980 5	2.183 9	32.4	0.989 1

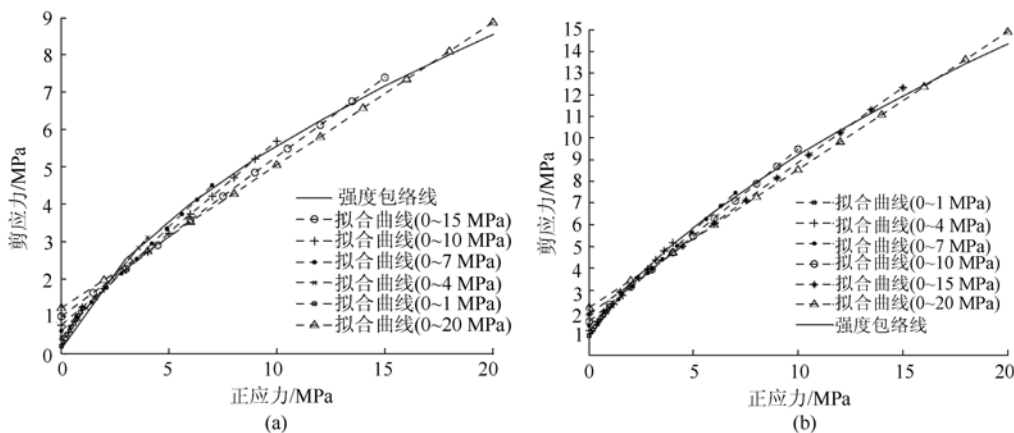


图 6 正应力取值范围对拟合结果的影响

Fig. 6 The influence of the value ranges of normal stress on the fitting results  
a——岩组①-1(L); b——岩组①-3(L)



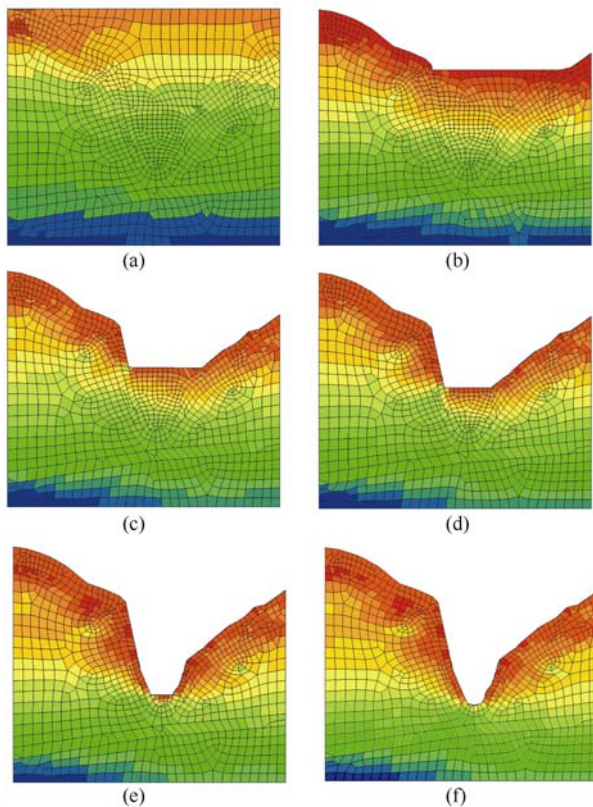


图 7 斜坡逐步卸荷最大主应力云图

Fig. 7 Maximum principle stress contours of the slope after each step of unloading  
a——斜坡形成前初始应力云图; b——第一次斜坡卸荷后;  
c——第二次斜坡卸荷后; d——第三次斜坡卸荷后;  
e——第四次斜坡卸荷后; f——形成现代斜坡后

而增大,开挖卸荷后,等值线逐渐发生弯曲,形状与开挖边界基本一致,随着卸荷作用的进行,低应力等值线逐渐错断为左右两段,直至现代岸坡形成,垂向应力等值线在两侧岸坡坡体中与坡面斜交,与坡顶近于平行。左右岸坡同一高度处垂向应力不同,左岸高于右岸。最大应力(应力绝对值)出现在左侧岸坡底部。

#### 4.2 根据应力场特征进行斜坡工程地质分区

岩体应力水平的差异将对岩体强度参数的估算结果造成很大的影响。为此,根据以上模拟结果,将图 2 的工程地质岩体分区再次细分,如图 8 所示。

#### 4.3 基于斜坡演化过程的斜坡岩体强度参数估算

根据考虑斜坡演化过程的工程岩组分区结果,利用 Hoek-Brown 强度在考虑不同分区正应力取值范围不同的情况下估算岩体强度参数,结果见表 3。

### 5 结 论

a. 斜坡岩体所处的应力环境对岩体力学参数值的大小起着十分重要的作用。本文从斜坡岩体变形演化过程出发,根据斜坡演化工程中应力场的空间分布特点并结合传统的 Hoek-Brown 破坏准则,揭示斜坡岩体强度参数的变化规律并探讨强度参数的确定方法。

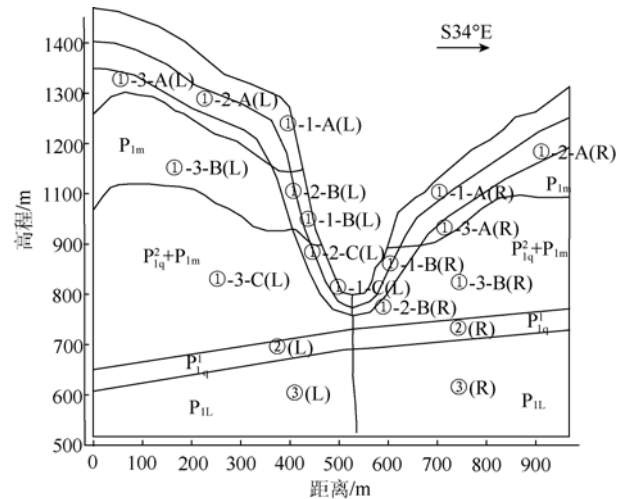


图 8 细化后的岩体工程地质分区图

Fig. 8 Refined engineering geological zoning graph

表 3 工程岩组细分后各区的综合抗剪强度参数  
Table 3 Comprehensive shear strength parameters of different zones after refinement

分区号	正应力取值范围/MPa	综合内聚力 C/MPa	综合内摩擦角 $\Phi/(^{\circ})$
①-1-A(L)	0~4	0.306 6~0.624 2	26.8~46.2
①-2-A(L)	0~4	0.748 0~1.462 0	40.3~50.9
①-3-A(L)	0~4	1.249 8~2.246 2	44.3~51.8
①-1-B(L)	0~8	0.417 9~0.832 5	18.1~38.4
①-2-B(L)	0~8	1.055 5~1.829 6	34.2~45.9
①-3-B(L)	0~8	1.556 7~2.579 3	38.9~47.5
①-1-C(L)	0~12	0.593 8~1.170 7	15.1~34.3
①-2-C(L)	0~12	1.343 2~2.192 8	30.6~42.5
①-3-C(L)	0~16	2.152 9~3.271 1	33.0~42.2
①-1-A(R)	0~4	0.288 8~0.589 7	25.5~45.6
①-2-A(R)	0~4	0.545 7~1.096 7	36.8~49.8
①-3-A(R)	0~4	1.068 1~1.977 6	43.2~51.6
①-1-B(R)	0~8	0.511 8~0.969 1	19.5~39.1
①-2-B(R)	0~8	0.840 1~1.478 5	30.4~44.4
①-3-B(R)	0~8	1.377 7~2.322 4	37.6~47.1
②(L)	0~18	1.357 5~2.089 9	20.1~31.3
②(R)	0~10	0.923 9~1.494 6	24.9~36.6
③(L)	0~20	1.524 6~2.523 5	19.8~32.4
③(R)	0~16	1.321 1~2.230 4	21.6~34.3

b. 将现代岸坡形成后的应力云图与岸坡形成前的初始云图对比可知,按传统方法估算得正应力范围与实际情况有较大差异,而这势必影响到岩体强度参数的估算结果。对远离岸坡的岩体这种影响较小,而对岸坡坡面附近的岩体影响较大。

c. 根据上述思路与方法得出的岩体强度参数更符合岩体的实际受力情况,使岩体力学参数估算更加合理。

(下转第 40 页)