

基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性研究

朱 雷, 黄润秋, 王小群, 聂德新

(成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059)

摘 要: 基于滑带应力状态分析和室内试验, 提出了基于滑带强度参数动态演化的滑坡稳定性评价方法, 并将应力状态作为评价滑面力学参数的主要指标, 以合理地反映滑面强度状态对滑坡稳定性的影响。通过室内试验, 获得了滑面强度参数与工程性状、力学参数之间的量化关系, 在该基础上, 通过数值计算, 对滑面的力学参数和滑坡的稳定性进行三维计算。计算结果表明, 利用提出的方法能较好地反映出滑带强度参数的空间分区特征。同时, 对工况变动情况下滑带的强度参数进行量化取值, 并对滑坡的稳定性进行动态计算, 提出的计算方法更能体现出滑坡力学参数与稳定性的动态变化过程。

关 键 词: 滑坡; 滑带; 强度参数; 动态演化; 稳定性

中图分类号: P 642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598 (2015) 增 2-0431-08

Stability study of landslide based on dynamic evolution of sliding surface strength parameter

ZHU Lei, HUAN Run-qiu, WANG Xiao-qun, NIE De-xin

(State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: A dynamic evaluation of landslide sliding surface strength parameters approach is proposed to analyses the stability of large-scale landslides which are controlled by groundwater fluctuations within the slide. The proposed approach utilizes a dynamic model in conjunction with stress state to describe the strength parameters of the sliding surface. Both experimental and theoretical analyses are carried out. Subsequently, three-dimensional numerical modelling of the landslide is carried out to explore the influence of three-dimensional sliding surface geometry and groundwater level fluctuations on sliding surface strength parameters. Simulations of the slide suggest that the approach proposed can describe the strength parameters of Badi landslide. In addition, simulations indicate that groundwater has not significantly influenced on sliding surface strength parameters under situ stress state.

Keywords: landslide; sliding surface; strength parameter; dynamic evolution; stability

1 引 言

滑带的强度参数是控制滑坡的变形和稳定性的主要因素, 在长期地质过程中滑带强度参数特征会形成自己的演化特征, 如在水电工程库区, 库水位的变动直接引起滑坡的应力场特征滑带强度参数的变化, 使得库岸滑坡的演化过程更为复杂。如何准确地把握库岸滑坡在水库蓄水稳定性的变化趋势, 是一个具有重要理论价值与应用价值的课题^[1-4]。

目前滑带的强度参数取值较多的是在现场取样在室内进行直剪试验、反演法、规范取值^[5-7], 很少考虑滑带强度参数的动态演化过程, 这些取值方

法只能得出某一种工况下滑带的强度参数, 不能反映出其动态演化过程, 很难对滑坡在水位变动条件下的稳定性做出准确的评价。因此, 对滑带的强度参数的动态演化过程展开评价对评价滑坡稳定性的发展趋势具有重大意义。

滑带的形成与演化是一个长期过程, 与其所处的应力环境与地下水条件关系密切, 滑坡中应力场的分布具有很明显的空间分区特征, 导致滑带的力学参数具有很明显的空间分区特征, 要想准确评价滑带强度参数, 必须在其评价中考虑其演化过程中的因素, 基于以上因素, 本研究开展了理论分析和试验^[8-9], 提出了滑带土参数的评价与计算方法。

2 工程概况

巴迪滑坡位于云南维西县境内的澜沧江右岸。出露高程为 1 797~2 150 m, 滑坡平面呈“钟形”见图 1。圈椅状地形明显, 上部宽约 50~100 m, 中部宽约 400~500 m, 前缘宽约 600 m。整个滑坡从后部至前部有 4 级台阶, 表部略向河床倾斜。巴迪滑坡滑坡体主要由下二叠统灰岩、砾岩、玄武岩及侏罗系砂岩、板岩破坏的块体构成。滑坡体下游侧主要由砾岩、结晶灰岩块石及巨石构成, 块石多呈架空状。中部、前部主要为碎石、块石所构成, 块径较下游侧小, 结构也较下游侧密实。

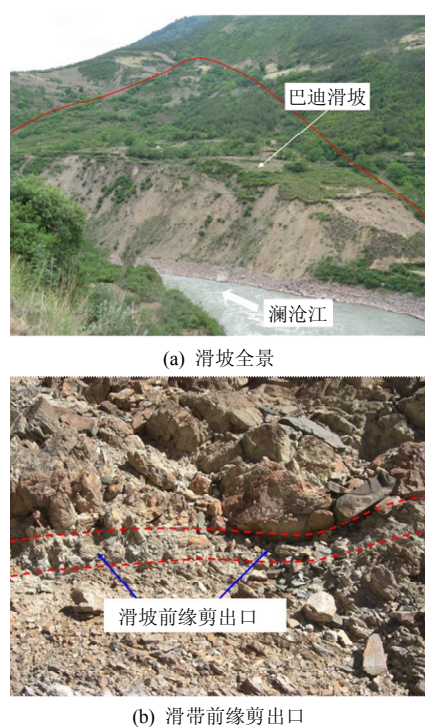


图 1 巴迪滑坡
Fig.1 Badi landslide

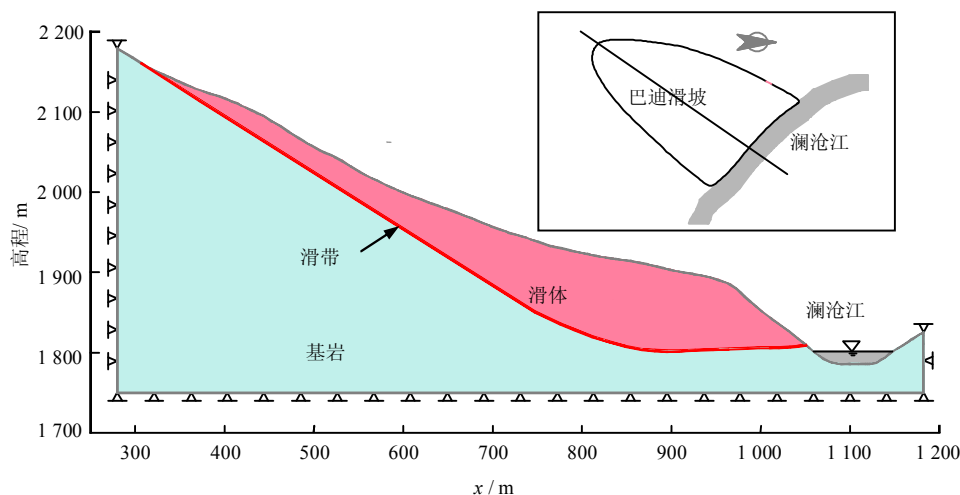


图 2 巴迪滑坡平面图
Fig.2 Plan of Badi landslide

如图 2 所示, 巴迪滑坡在剖面上的形态呈帚状形, 前缘厚度大, 为 104 m 左右, 中部厚度为 40~78 m, 后缘高程为 2 150 m, 体积大约为 920 万 m^3 。该滑坡位于澜沧江乌弄龙水电站库区, 目前澜沧江水位接近该滑坡前缘, 但没有超过前缘剪出口。下游的乌弄龙水电站蓄水后, 水位将上涨 50~80 m, 对滑坡会产生一定的影响, 如果该滑坡失稳, 则有可能造成滑坡堵江, 影响下游乌弄龙水电站的运营。

3 滑带力学参数与应力环境对应关系的量化研究

滑带的力学参数与工程性状、应力环境密切相关, 将现场滑带中取得的试样重新进行饱水压密、固结, 还原其形成过程, 获得了物理力学参数与压力的关系。室内的固结过程与泥质物在演化过程中逐渐被压密本质上一致。在土工压缩试验中, 滑带试样在压力作用下排水、固结过程最终达到的效果与滑带泥质物的演化是一样的, 因此可用孔隙比、干密度和含水率作为描述室内试验的定量指标, 从而评价滑带在各种条件下的强度特性^[10-11]。

3.1 滑带的应力状态

对于特定的介质, 作用于其周围的应力可以视为围压。就滑带而言, 沿着空间走向延伸的, 垂直其延伸方向即倾向则是它的围压, 因此可以用滑带的法向压应力来反映其受到的地应力。

已知一点的应力状态, 可用弹性力学理论导出该点任一斜截面上的正应力 σ_{ij} 为

$$\sigma_N = n_i n_j \sigma_{ij}, \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中: n_i 、 n_j 为方向余弦; σ_{ij} 为应力分量。

通常, 主应力方向并不是所选的坐标系方向, 如果主应力方向与所选坐标系一致, 则式 (1) 可简化为

$$\sigma_N = n_1^2 \sigma_1 + n_2^2 \sigma_2 + n_3^2 \sigma_3 \quad (2)$$

$$\sigma_N = \sigma_1 \cos^2 \theta_1 + \sigma_2 \cos^2 \theta_2 + \sigma_3 \cos^2 \theta_3 \quad (3)$$

$$\cos \theta_i = 1 - [\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta_i - 2 \cos \alpha \cos \beta_i \cos \gamma_i + (\sin \beta_i - \sin \alpha)^2] / 2 \quad (4)$$

式中: θ_i 为结构面法线与主应力的夹角; α 为结构面法线倾角; β_i 为某主应力方向倾角; γ_i 为主应力方位角与结构面法向方位角之差。

3.2 滑带土性状与应力之间对应关系的量化

现场在滑坡体前缘地段, 开挖探槽取得滑带土

的原状样, 测得试样密度均值为 23.3 kN/m^3 , 含水率均值为 9.4% , 塑限为 14% , 液限为 24.5% , 计算的孔隙比为 0.28 , 饱和度为 91% 。以这些指标为基础, 由重力压密原理获得滑面不同部位的物理指标。

在现场对滑带进行取样时作用在滑带上的围压被解除, 导致黏土矿物迅速吸水, 从而引起天然孔隙比和密度发生变化, 强度参数也随之改变, 所以获得的强度参数不能代表原位条件下的参数。根据上述思路, 在室内进行滑带土的压缩试验, 获得滑带上覆正应力与其孔隙比之间的对应关系, 再通过室内试验, 试验相关步骤见文献[8—10], 获取不同孔隙比 (含水率) 下滑带的强度参数, 建立压应力和孔隙比之间的关系, 如图 4 所示。

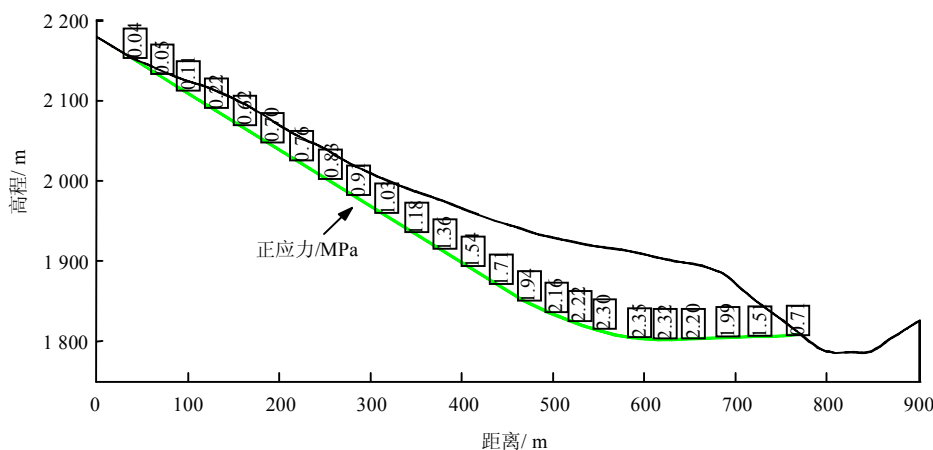


图 3 滑带正应力分布

Fig.3 Distribution of normal stress on slide zones

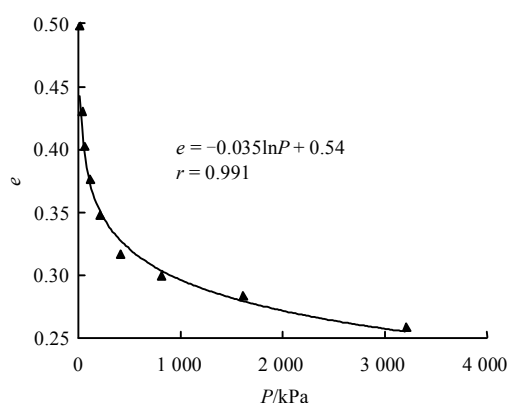


图 4 孔隙比与正应力对关系^[12]

Fig.4 Relationship between normal pressure and void ratio

孔隙比与正应力之间的对应关系为

$$e = -0.035 \ln P + 0.54 \quad (5)$$

式中: e 为孔隙比; P 为正应力。

根据土力学理论有

$$\rho_d = G / (1 + e) \quad (6)$$

式中: ρ_d 为干密度。

联立式 (5)、(6) 可得

$$\rho_d = G / [1 + (0.54 - 0.035 \ln p)] \quad (7)$$

式 (7) 反映出在正应力作用下滑带性状的变化规律, 建立出滑带性状与正应力之间的量化表达关系后以此为基础, 获得滑带不同部位的正应力, 即可获得不同部位滑带的性状, 是后面滑带的力学参数取值的基础。

3.3 滑带土强度参数与应力之间对应关系的量化

同一滑带土黏粒含量、黏土矿物成分一致, 控制滑带土摩擦因数、黏聚力因素是含水率。为此, 首先开展了不同含水率滑带土剪切试验, 获得量化关系。然后, 用重力压密试验得到的孔隙比与正应力之间的关系, 获得了强度参数与正应力之间的对

应关系^[12]。本次开展 9 组不同含水率滑带土剪切试验, 得到含水率与黏聚力、含水率与内摩擦角的关系, 如图 5、6 所示。

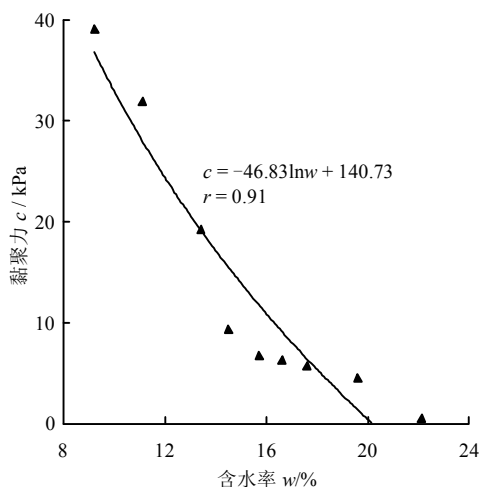


图 5 黏聚力与含水率对应关系^[12]

Fig.5 Relationship between cohesion and water content^[12]

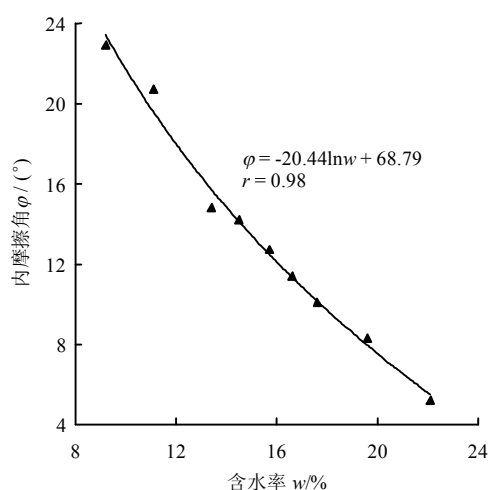


图 6 内摩擦角与含水率对应关系^[12]

Fig.6 Relationship between internal friction angle and water content

滑带土强度参数与含水率之间的对应关系为

$$\left. \begin{aligned} c &= -46.83 \ln w + 140.73 \\ \varphi &= -20.44 \ln w + 68.79 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

将式 (5) 代入式 (8), 获得滑带强度参数与正应力、饱和度之间的关系式:

$$\left. \begin{aligned} c &= -46.83 \ln \left(\frac{S_r(-0.035 \ln P + 0.54)}{G} \right) + 140.73 \\ \varphi &= -20.44 \ln \left(\frac{S_r(-0.035 \ln P + 0.54)}{G} \right) + 68.79 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

由式 (9) 可见, 滑带的强度参数只与含水率和正应力有关系。获得了滑带的强度参数与其所在的

工程地质环境的量化关系之后, 就可以对滑带的力学参数和滑坡的稳定性展开定量评价, 同时有了量化关系, 也可以很方便地评价工况变动下滑带的力学参数和滑坡的稳定性, 真正做到了滑坡稳定性的动态评价。

4 滑坡力学参数与稳定性的动态评价

4.1 滑带土强度参数动态取值模型

前文对滑带所处的应力状态和强度参数进行了分析, 这里借助于 FLAC3D 软件内置的 fish 语言, 按照所处的应力环境和水环境对其进行取值^[13]。

滑带在水位线以上时饱和度取 91%, 则式 (9) 为

$$\left. \begin{aligned} c &= -46.83 \ln \left(\frac{0.91(-0.035 \ln P + 0.54)}{2.77} \right) + 140.73 \\ \varphi &= -20.44 \ln \left(\frac{0.91(-0.035 \ln P + 0.54)}{2.77} \right) + 68.79 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

滑带在水位线以下时饱和度取 100%, 则式 (9)

为

$$\left. \begin{aligned} c &= -46.83 \ln \left(\frac{-0.035 \ln P + 0.54}{2.77} \right) + 140.73 \\ \varphi &= -20.44 \ln \left(\frac{-0.035 \ln P + 0.54}{2.77} \right) + 68.79 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

具体计算过程: 首先计算正常水位下坡体的渗流场, 然后利用弹性模型计算其重力场, 获得滑坡的初始应力场, 最后将计算结果清零, 利用 fish 语言编辑强度参数与正应力之间的表达关系对滑带每个单元分别进行赋值, 很方便的对不同工况下滑带的参数与滑坡的稳定性进行计算。

4.2 计算模型

计算模型见图 7。根据地质资料, 由于该滑坡滑带明显, 对滑坡起主要控制作用, 同时考虑到简化计算模型, 将滑坡模型可概化为上部滑体、滑带 (厚 1 m) 和基岩。对滑带三维形态进行分析获得多个点的三维空间坐标, 进行拟合获得了滑面的空间展布特征。计算模型范围为顺滑动方向为 1 200 m (X 轴方向), 垂直滑动方向为 900 m (Y 轴方向), 垂直方向为 600 m。正常水位为海拔 1 800 m, 蓄水后水位为海拔 1 900 m, 计算时考虑水位变动对滑坡的影响。

根据室内物理力学试验、地质类比等方法, 确定了岩土体物理力学参数, 见表 1。

4.3 初始条件下滑带应力场和强度参数分布特征

初始场采用弹性模型计算, 从图 8 可以看出,

滑带主应力分布特征的三维效应明显,滑带体以自重应力场为主,主要受滑带形态和地形控制,自上而下,量值上呈逐渐增加的趋势。在底滑面周围应力发生锐减,分异现象较为明显,受侧向约束作用和形态影响,滑带中心部位为相对高应力区。

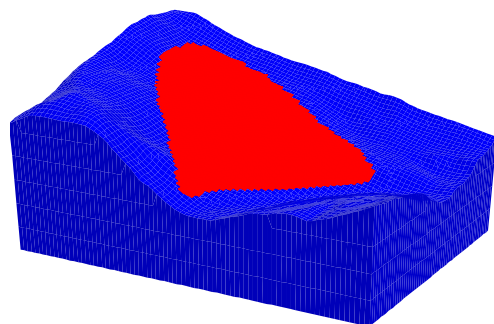


图7 计算模型

Fig.7 Calculation model

表1 岩土体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock and soil mass

材料	变形模量 /GPa	泊松比	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa	密度/(kg/m ³)	
					天然	饱和
基岩	12.00	0.22	45	1.2	2 500	2 550
滑带	0.08	0.28			2 100	2 300
滑体	1.50	0.25	30	0.6	2 200	2 400

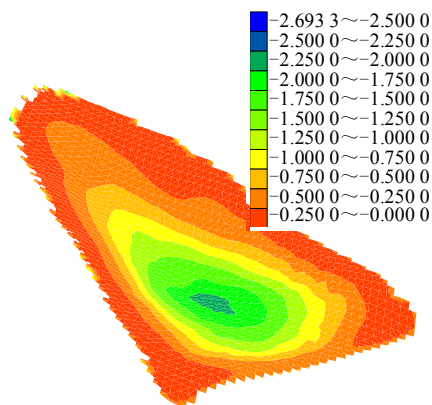


图8 初始条件下滑带正应力分布特征(单位: kPa)

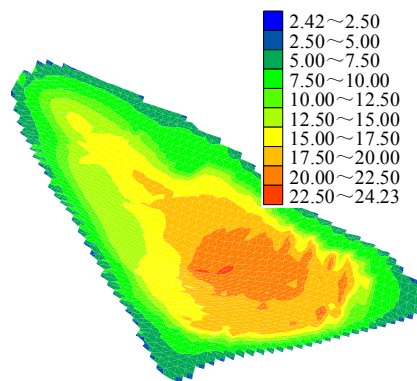
Fig.8 Distribution characteristics of slide zones under initial normal press(unit: kPa)

由强度参数分布图(见图 9)可以看出,滑带强度参数分布特征与压应力分布特征基本一致,滑带的强度特征受控于滑坡的自重应力场,由于滑带三维形态的约束作用,滑带下端中心部位的强度参数较高,向两边扩展,强度参数逐渐降低。

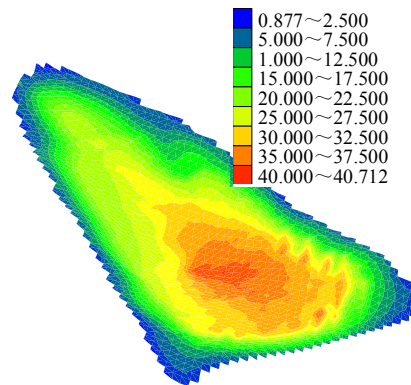
4.3 水位变动条件下滑带应力场和强度参数分布特征

巴迪滑坡是浮托减重型滑坡,浮托减重型滑坡是库水对滑坡的影响以浮托减重作用为主的滑坡,

此类滑坡特性为涉水部分渗透性好,在水位上升过程中水能快速渗入滑体内,导致抗滑段有效应力降低;在库水下降过程中能快速渗出滑体外,抗滑段有效应力增大,稳定性系数也会有所提升。本文主要从水位上升角度来考虑。



(a) 内摩擦角分布图(单位: °)



(b) 黏聚力分布(单位: kPa)

图9 天然工况下滑带强度参数分布云图

Fig.9 Nephogram of strength parameters of slide zones under natural working conditions

采用饱和渗流理论计算巴迪滑坡渗流场的动态变化过程,渗流场计算时基岩的渗透性相对岩土体较小,计算时可视为不透水材料,左、右边界设为不透水边界,坡表按水位动态变化设为动水头边界。最后,将动态渗流场计算结果应用于稳定性分析,计算结果如图 10 所示。

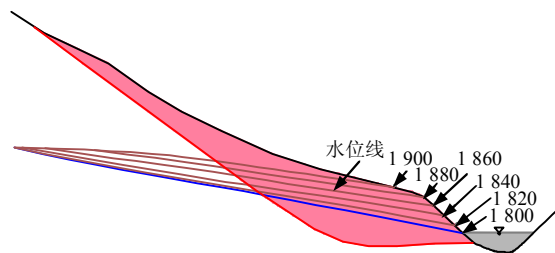


图10 库水位上涨时斜坡体地下水位变化示意图(单位: m)

Fig.10 Sketch of groundwater table change in slope with reservoir water level rising(unit: m)

对蓄水条件下滑带强度分布特征和滑坡的变形的动态过程进行计算, 水位上升过程可分为 5 个过程: 1 820 m-1 840 m-1 860 m-1 880 m-1 900 m, 分别考虑这几种情况下滑带的强度参数的动态变化过程和滑坡变形特征。计算结果见图 11。限于篇幅, 只列出 1 860 m 和 1 900 m 两种水位。从图中可以看出, 受滑带形态和上覆滑体的厚度控制, 滑带所受正应力分布集中在滑带下游中部, 形成明显的应力集中区, 分异明显, 正应力从集中区向周围开始消失, 逐渐减小, 从滑带的正应力集中区也可以发现滑坡的中下游段是其锁固段, 该段对滑坡的稳定性贡献最大。

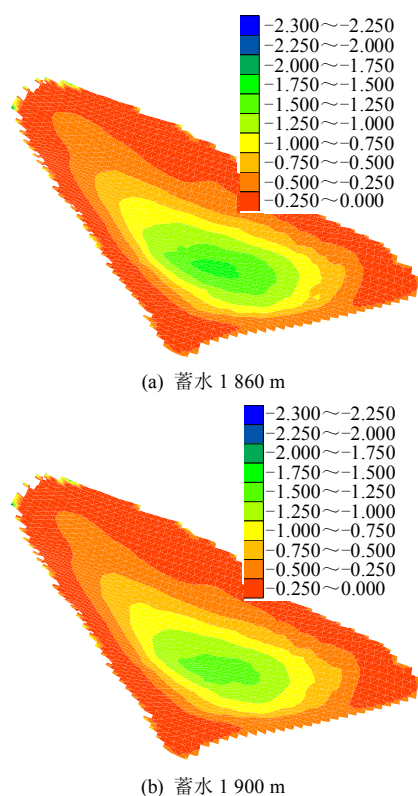


图 11 蓄水 1 860 m 和 1 900 m 时滑带正应力分布云图 (单位: 10^6 Pa)

Fig.11 Nephogram of normal stresses of slide zones at reservoir water levels of 1 860 m and 1 900 m (unit: 10^6 Pa)

从量值上看, 蓄水后由于滑坡体在水位线一下部位的重度变成浮重度, 重度变小, 导致其作用在滑带上的正应力变小。蓄水初期, 其正应力减小幅度较大, 随着蓄水位的增高, 正应力减小的幅度越来越小, 接近最高蓄水位后, 正应力基本未见明显变化。主要原因是该滑坡的形态特征: 该滑坡主要部分集中在前缘, 蓄水后滑体的主要部分的重度先达到饱和重度, 蓄水到一定高程后滑体后缘部分的重度变化对整个滑坡的应力状态改变不大。

如图 12 所示, 与正应力变化趋势一样, 滑带的强度参数变化也是在蓄水初期变化较为显著, 蓄水

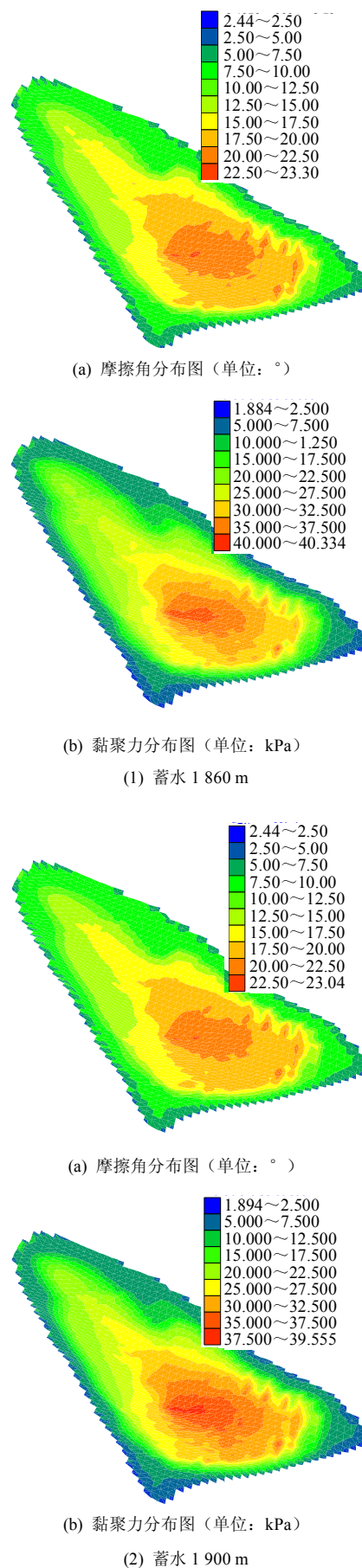


图 12 蓄水 1 860 m 和 1 900 m 时滑带强度参数分布云图
Fig.12 Nephogram of strength parameters of slide zones at reservoir water levels of 1 860 m and 1 900 m

到 1 860 m 时, 内摩擦角降幅约 2° , 在蓄水后期一直达到蓄水高程, 变化不明显。从其强度参数动态发展过程来看, 在蓄水条件下滑坡稳定性主要控制因素是应力环境的改变, 而应力环境的改变主要体现在两方面: 一方面由于正应力的变小, 导致其强度参数降低, 另一方面是正应力减小, 导致滑带的抗滑力降低。两方面共同作用, 导致了滑坡的整体稳定性变化。

不同滑坡蓄水过程中稳定性变化趋势会有所差异, 在水位变动的情况下滑坡的应力环境、水环境会发生变化, 因此, 滑坡稳定性是一个动态变化过程, 要全面分析一个滑坡的稳定性的发展趋势, 必须考虑其强度参数的动态变化过程。

4.4 水位变动条件下滑坡稳定性动态变化过程

获得了滑坡应力和力学参数的动态变化过程后, 可对滑坡的稳定性发展趋势进行准确地判断。与前面一样, 分别取蓄水过程中几个阶段分析, 过程分别为 1 820 m-1 840 m-1 860 m-1 880 m-1 900 m。

采用强度折减法获取不同蓄水高程滑坡的安全系数^[14-15], 采用坡内某点(在滑坡体内)水平位移增量与强度折减系数增量的关系曲线来确定安全系数, 以水平位移增量与折减系数曲线发生突变作为判别标准。

根据摩尔-库仑强度准则 $\tau = \sigma' \tan \varphi + c$ 可知, 滑坡抗滑段的抗滑力与有效应力 σ' 有关。根据有效应力原理, 有效应力等于总应力 σ 减去孔隙水压力 u , 即 $\sigma' = \sigma - u$ 。在库水上升过程中, 抗滑段有效应力减小, 会导致抗滑段的抗滑力随之减小。

如图 13 所示, 在开始蓄水阶段, 坡体的安全系数变化较大, 从初始阶段的 1.32 降到 1.14, 蓄水高程为 1 880 m 时, 安全系数又有少许的回升, 达到 1.16, 达到蓄水高程后滑坡的安全系数基本没有变化。

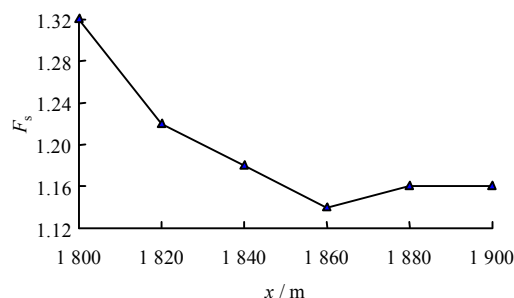


图 13 安全系数与蓄水高程之间的对应关系
Fig.13 Relationship between safety factor and reservoir water level

5 结 语

基于滑带的形成与演化过程, 对滑带强度参数进行了室内试验, 建立起滑带强度参数与应力、水之间的量化关系, 结果表现其参数应力状态和含水率变化较为明显, 为准确地评价滑坡的力学参数与稳定性提供计算模型。

利用建立的强度参数动态取值方法, 对该滑坡的强度参数与稳定性进行了动态研究, 并对其稳定性发展状态做出了预测, 比较全面地考虑了蓄水条件下应力场和强度参数动态变化对滑坡稳定性的影响。

对滑坡实例进行了研究结果表明, 蓄水过程中滑坡初期的应力场与力学参数变化较为明显, 后期变化不显著。

参 考 文 献

- [1] 罗先启, 刘德富, 吴剑, 等. 雨水及库水作用下滑坡模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(14): 2476-2483.
LUO Xian-qi, LIU De-fu, WU Jian, et al. Model test study on landslide under rainfall and reservoir water fluctuation[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(14): 2476-2483.
- [2] 张明, 胡瑞林, 崔芳鹏, 等. 考虑水岩物理化学作用的库岸堆积体边坡稳定性研究—以金沙江下咱日堆积体为例[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(增刊 2): 3699-3704.
ZHANG Ming, HU Rui-lin, CUI Fang-peng, et al. Stability study on reservoir accumulation body considering physical and chemical reactions between water and accumulation body—Taking Xiazanri accumulation body for example[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(Supp.2): 3699-3704.
- [3] 董金玉, 杨继红, 孙文怀, 等. 库水位升降作用下大型堆积体边坡变形破坏预测[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1774-1780.
DONG Jin-yu, YANG Ji-hong, SUN Wen-huai, et al. Prediction of deformation and failure of a large-scale deposit slope during reservoir water level fluctuation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(6): 1774-1780.
- [4] LI C D, HU X L, TANG H M, et al. Evaluation and control study on reservoir bank landslide in the Three Gorges Reservoir region, China[J]. *Disaster Advances*,

- 2012, 5(4): 1501—1507.
- [5] 许宝田, 阎长虹, 陈汉永, 等. 边坡岩体软弱夹层力学特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3078—3081.
XU Bao-tian, YAN Chang-hong, CHEN Han-yong, et al. Experimental study of mechanical property of weak intercalated layers in slope rock mass[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3078—3081.
- [6] 国家电力公司华东勘测设计研究院. DL 5108—1999 混凝土重力坝设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 卢坤林, 朱大勇, 许强, 等. 滑带土抗剪强度参数的三维反分析[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3319—3323.
LU Kun-lin, ZHU Da-yong, XU Qiang, YANG Yang, et al. 3D back analysis of shear strength parameters of slip soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2010, 31(10): 3319—3323.
- [8] 聂德新, 符文熹, 任光明, 等. 天然围压下软弱夹层的工程特性及当前研究中存在的问题分析[J]. 工程地质学报, 1999, 7(4): 298—302.
NIE De-xin, FU Wen-xi, REN Guang-ming, et al. Analysis of engineering properties of weak layer zone under natural confining pressure and the existing problems in the present studies[J]. **Journal of Engineering Geology**, 1999, 7(4): 298—302.
- [9] 符文熹, 聂德新, 尚岳全, 等. 地应力作用下软弱夹层的工程特性研究[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(5): 584—587.
FU Wen-xi, NIE De-xin, SHANG Yue-quan, et al. Study on engineering properties of weak layers under ground stresses[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2002, 24(5): 584—587.
- [10] 聂德新, 张咸恭, 韩文峰. 围压效应与软弱夹层物理力学特性的相关性研究[J]. 地质灾害与环境保护, 1990, 1(2): 30—35.
NIE De-xin, ZHANG Xian-gong, HAN Wen-feng. The correlation between confining pressure effect and physical and mechanical properties of weak intercalations[J]. **Journal of Geological Hazards and Environment Preservation**, 1990, 1(2): 30—35.
- [11] 聂德新. 岩体的场位特征研究[J]. 工程地质学报, 2000, 8(3): 41—45.
NIE De-xin. The study of field features of rock mass[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2000, 8(3): 41—45.
- [12] 游敏, 聂德新. 利用大型岩质滑坡形成的环境条件及重力压密原理分析滑面形态与强度参数[J]. 工程地质学报, 2010, 18(4): 470—476.
YOU Min, NIE De-xin. Use of landslide formation environment information and principle of gravity compaction for large-scale rock landslide slip surface shape and strength parameters[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2010, 18(4): 470—476.
- [13] 朱雷. 金沙江观音岩水电站坝基软弱结构面工程地质特性及抗滑稳定性研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [14] 赵尚毅, 郑颖人, 张玉芳. 极限分析有限元法讲座 II—限元强度折减法中边坡失稳的判据探讨[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 332—336.
ZHAO Shang-yi, ZHENG Ying-ren, ZHANG Yu-fang. Study on slope failure criterion in strength reduction finite element method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 332—336.
- [15] 栾茂田, 武亚军, 年廷凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 1—8.
LUAN Mao-tian, WU Ya-jun, NIAN Ting-kai. A criterion for evaluating slope stability based on development of plastic zone by shear strength reduction FEM[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2003, 23(3): 1—8.