

DOI: 10.16285/j.rsm.2017.06.024

基于实测变形的雾江滑坡体弹-黏塑性参数反馈

黄耀英¹, 孙冠华², 李春光², 李祥红³, 左全裕³, 张如强³

(1. 三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071; 3. 湖南沅天河工程建设投资有限责任公司, 湖南 永州 425500)

摘 要: 雾江滑坡位于沅天河水库扩建工程库首右岸的雾江峡谷进口段, 下游边坡距大坝仅 300 余米, 是一个典型的古滑坡, 滑坡总体积为 $1.327 \times 10^4 \text{ m}^3$, 雾江滑坡稳定与否严重影响到大坝及泄水建筑物的运行与安全。首先分析了滑坡体实测位移; 接着针对滑坡体处于缓慢蠕滑过程中, 采用极限分析法, 假定安全系数为 1.0, 反演了滑坡体的强度参数; 然后选取滑坡体内部钻孔观测位移年蠕滑率, 假定滑坡体满足莫尔-库仑屈服准则, 由 Perzyna 假设计算黏塑性应变率, 结合滑坡体典型剖面有限元模型, 采用弹-黏塑性有限元计算程序进行滑坡体分析, 将正交设计法和优化算法相结合, 反演获得滑坡体和滑带的弹性模量和黏滞系数, 为进行该滑坡堆积体的稳定变形分析和监控提供了依据, 也可为同类工程参考。

关键词: 滑坡体; 滑带; 实测变形; 弹-黏塑性参数; 反馈

中图分类号: TU 473.1

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 7598 (2017) 06 - 1739 - 08

Elastic-viscoplastic parameter feedback of Wujiang river landslide corresponding to measured deformation

HUANG Yao-ying¹, SUN Guan-hua², LI Chun-guang², LI Xiang-hong³, ZUO Quan-yu³, ZHANG Ru-qiang³

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China; 3. Hunan Centian River Construction Investment Co. Ltd., Yongzhou, Hunan 425500, China)

Abstract: The Wujiang landslide at right bank of Wujiang Canyon is located at the entrance region extension project of Centian river reservoir. The distance from the downstream slope to dam is only 300 meters, which is a typical ancient landslide with a total volume of 1.327×10^4 cubic meters. The stability of Wujiang landslide significantly affects the operation and safety of the dam and discharge structure. The observed displacement of landslide is analyzed in this paper. The strength parameter of landslide is determined by limit analysis method with an assumption of safety factor of 1.0 during slow creep. The internal displacement of landslide is observed creep annually in the borehole observation. Assuming that the landslide satisfied Mohr-Coulomb yield criterion, viscoplastic strain rate is calculated using based on the assumption of Perzyna, the finite element calculation program of elasto-viscoplastic is adopted to analysis the landslide combined with the finite element model of typical profile of landslide, thus the elastic modulus and viscosity coefficient of landslide and sliding zone are obtained with inversion by the combination of orthogonal design and optimization algorithm, the results can provide the basis for stable deformation analysis and monitoring of the landslide and offer reference for similar projects.

Keywords: landslide; sliding zone; measured deformation; elasto-viscoplastic parameters; feedback

1 引 言

沅天河水库是潇水流域梯级开发的龙头水库。为增加水库调节能力, 在现水库下游兴建沅天河水库扩建工程。沅天河水库扩建工程具有灌溉、

防洪、下游补水、发电和兼顾航运等综合利用效益的大型水利水电工程。雾江滑坡位于现沅天河水库右岸, 下游边界距沅天河现坝体约 300 m, 距水库扩建工程推荐坝轴线约 590 m, 上游边界距现坝体约 1 000 m, 滑坡总体积为 $1.327 \times 10^4 \text{ m}^3$, 是一个典

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No.51209124); 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 (No.2011CB013505)。

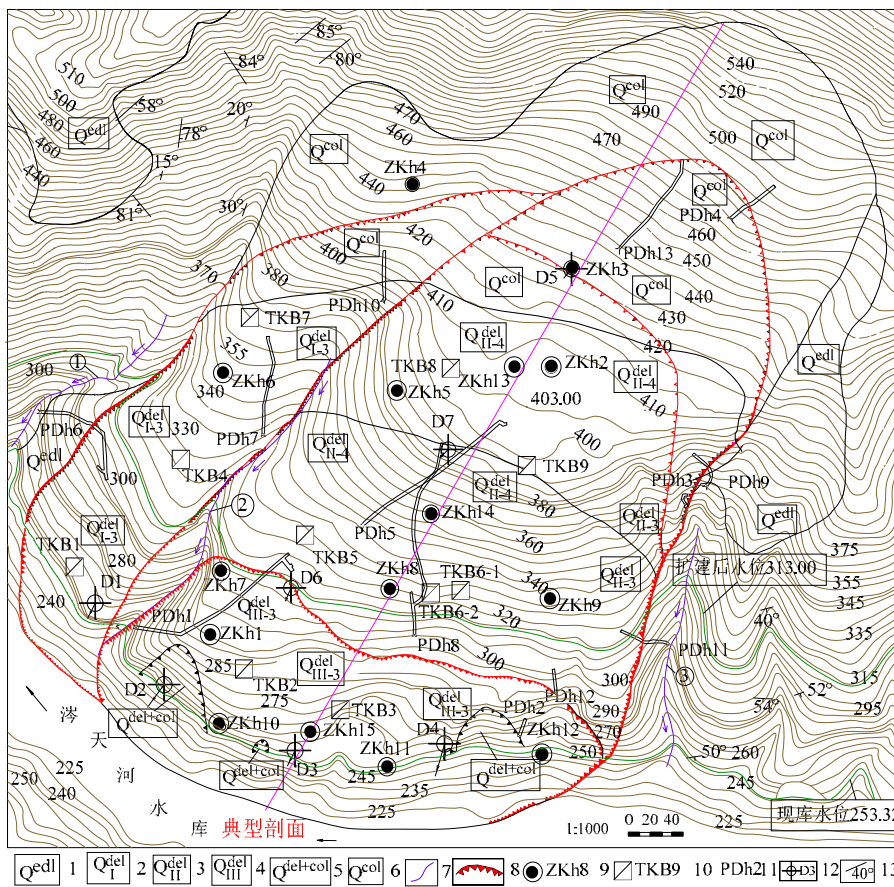
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (51209124) and the National Basic Research Program of China (973 Program) (2011CB013505).

第一作者简介: 黄耀英, 男, 1977 年生, 教授, 主要从事水工结构安全监控、数值计算及岩土流变方面的研究。E-mail: huangyaoying@sohu.com

型的古滑坡。

滑坡区山顶高程为 650~700 m, 河床高程为 220 m, 相对高差为 380~480 m, 边坡地形较陡峻, 冲沟发育。滑坡前缘顺河向宽约 700 m, 呈舌状伸入河床, 以致河流流向由 270° 偏向 300°。滑坡区地形呈台阶状, 可见两级台阶, 1 级台阶高程为 300~310 m, 宽 50~70 m, 长约 350 m, 前缘边坡坡角为 26°~33°, 局部达 45°; 2 级台阶高程为 400~410 m, 宽为 40~100 m, 长约 250 m, 前缘山坡坡角为 22°~28°; 滑坡后缘壁分布高程为

510~700 m, 地形坡角为 42°~53°, 沿后缘壁崩塌现象显著。初步探明: 滑体表部为砾质黏土, 上部为散体结构, 下部为碎裂结构岩体, 滑体最大厚度 84 m; 滑带的黏粒含量较高, 含有较多的亲水矿物, 且滑带的黏土矿物主要为伊利石和伊利石与蒙脱石混层。滑坡区发育 3 条冲沟, 延伸较长, 切割较深, 其中 ①号冲沟位于滑坡体下游边界; ②号冲沟位于滑坡体中部; ③号冲沟位于滑坡体上游边界。从整体上看, ①、②号冲沟和 ③号冲沟都有同源的趋势, 如图 1 所示。



注: 图例中, 1 为残坡堆积物 (碎石、块石黏土); 2 为第四系第一期地滑堆积物 (含少量壤土的碎块石及变形岩体, 下同); 3 为第四系第 2 期地滑堆积物; 4 为第四系第 3 期地滑堆积物; 5 为近期崩滑堆积体; 6 为崩积堆积碎块石; 7 为冲沟编号, 图上含有 3 条冲沟; 8 为滑坡体边界及滑坡体分期界限; 9 为钻孔编号; 10 为取样试坑及其编号; 11 为平测编号; 12 为表部变形观测点及其编号; 13 为岩层产状

图 1 雾江滑坡平面示意图
Fig.1 Plane view of Wujiang landslide

设计院对雾江滑坡形成机制进行了多次论证, 认为雾江滑坡属于基岩拉裂-顺层滑移型, 通过多次滑动演变, 目前仍存在滑动变形的古滑坡。显然, 水库扩建工程下闸蓄水后, 库水位上升, 雾江滑坡的稳定与否严重影响到大坝及泄水建筑物的运行与安全。针对雾江滑坡滑动面黏土的蠕变特性, 王文星等^[1]利用陈氏加载法对取自涇天河水库边坡的雾江古滑坡滑动面的 4 个试件进行了蠕变试验, 并根

据遗传蠕变理论对试验结果进行回归分析, 最后求出了该黏土的积分蠕变方程。王祥秋等^[2]利用陈氏循环增量加载方法, 对涇天河水库雾江段古滑坡面软弱夹层进行单剪蠕变试验, 通过对试验结果的分析, 发现其具有明显的非线性流变特性。由于雾江滑坡的物理力学特性复杂, 而由室内或现场原位试验确定的滑坡体力学参数一般为点参数, 另外, 由于滑坡的非均质性等, 使得试验结果不具有代表性。

采用这些参数作为输入数据进行数值分析，计算结果往往与实际情况存在较大偏差，难以为工程实践提供有效的参考。

自 Kavanagh 等^[3]采用有限元法反演固体材料的弹性模量后，因其具有明显的实用价值，从而为寻找滑坡体力学参数提供了一种有效方法。谭万鹏等^[4]将弹-黏塑性有限元法、复变量求导法和迭代优化计算方法结合，研制了弹-黏塑性参数反演分析程序，并采用厚壁圆筒和均质岩石边坡算例进行了程序验证。陈卫兵等^[5]结合京珠高速 K108 边坡的实测变形，对软弱夹层的广义 Kelvin 模型参数进行了反演。但目前基于实测变形进行库区大型滑坡堆积体弹-黏塑性参数反演的报道很少。为此，本文基于滑坡体实测变形反馈雾江滑坡的弹-黏塑性参数，以对滑坡体做出切合实际的评价和变形监控提供参考。

2 弹-黏塑性本构模型及数值分析方法

2.1 弹-黏塑性本构模型

当假定岩土材料的应力达到屈服极限时，就要产生黏塑性变形。由于弹-黏塑性模型构造简单，同时也可反映材料的黏塑性变形^[6-7]，为此，本文采用弹-黏塑性模型分析雾江滑坡体的蠕滑变形。

设复杂应力状态下的应力为 σ 和应变为 ϵ ，则总应变速率为

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^{vp} \quad (1)$$

式中： $\dot{\epsilon}$ 为总应变速率； $\dot{\epsilon}^e$ 为弹性应变速率； $\dot{\epsilon}^{vp}$ 为黏塑性应变速率。

应力速率计算公式为

$$\dot{\sigma} = D\dot{\epsilon}^e \quad (2)$$

式中： D 为弹性矩阵。

据 Perzyna 假设，黏塑性应变率 $\dot{\epsilon}^{vp}$ 与瞬时应力之间有如下关系式^[6-7]：

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\partial Q}{\partial \sigma} \quad (3)$$

式中： Q 为塑性势， $Q = Q(\sigma, \epsilon^{vp}, k)$ ； k 为内变量； γ 为流动系数； $\Phi(F)$ 为屈服函数的函数。符号 $\langle \rangle$ 的意义如下

$$\left. \begin{aligned} \langle \Phi(x) \rangle &= \Phi(x) & (x > 0) \\ \langle \Phi(x) \rangle &= 0 & (x \leq 0) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

曾经有人提出过不同的函数 Φ ，但有时简单地取为

$$\Phi(F) = F / F_0 \quad (5)$$

式中： F 为屈服函数； F_0 为常数。

如果采用关联流动法则，即假定 $Q \equiv F$ ，则有

$$\frac{\partial Q}{\partial \sigma} = \frac{\partial F}{\partial \sigma} = \frac{\partial F}{\partial I_1} \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} + \frac{\partial F}{\partial (J_2^{1/2})} \frac{\partial (J_2^{1/2})}{\partial \sigma} + \frac{\partial F}{\partial J_3} \frac{\partial J_3}{\partial \sigma} = C_1 \frac{\partial I_1}{\partial \sigma} + C_2 \frac{\partial (J_2^{1/2})}{\partial \sigma} + C_3 \frac{\partial J_3}{\partial \sigma} \quad (6)$$

$$\frac{\partial I_1}{\partial \sigma} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (7)$$

$$\frac{\partial (J_2^{1/2})}{\partial \sigma} = \frac{1}{2J_2^{1/2}} [s_x \quad s_y \quad s_z \quad 2\tau_{xy} \quad 2\tau_{yz} \quad 2\tau_{zx}]^T \quad (8)$$

$$\frac{\partial J_3}{\partial \sigma} = \left\{ \begin{array}{l} s_y s_z - \tau_{yz}^2 \\ s_z s_x - \tau_{zx}^2 \\ s_x s_y - \tau_{xy}^2 \\ 2(\tau_{yz} \tau_{zx} - s_z \tau_{xy}) \\ 2(\tau_{xy} \tau_{zx} - s_x \tau_{yz}) \\ 2(\tau_{xy} \tau_{yz} - s_y \tau_{zx}) \end{array} \right\} + \frac{1}{3} J_2 \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} \right\} \quad (9)$$

式中： s_{ij} 为偏应力； I_1 为应力第 1 不变量； J_2 和 J_3 分别为应力偏量第 2、3 不变量。

边坡工程上常采用摩尔-库仑屈服函数：

$$F = \frac{1}{3} I_1 \sin \varphi + \sqrt{J_2} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cos \varphi \quad (10)$$

式中： c 为凝聚力； φ 为内摩擦角。

由式 (6) 有

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= \frac{1}{3} \sin \varphi; \quad C_3 = \frac{\sqrt{3} \sin \theta + \sin \varphi \cos \theta}{2J_2 \cos 3\theta}; \\ C_2 &= \cos \theta \left[1 + \tan \theta \tan 3\theta + \frac{\sin \varphi (\tan 3\theta - \tan \theta)}{\sqrt{3}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

其中， θ 为罗德角，可表示为

$$-\frac{\pi}{6} \leq \theta = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3}{J_2^{3/2}} \right) \leq \frac{\pi}{6} \quad (12)$$

2.2 弹-黏塑性有限元公式及计算步骤

弹-黏塑性的有限元公式为

$$K\delta = R + F^{vp} \quad (13)$$

$$F^{vp} = \sum_e \int_v B^T D \epsilon^{vp} dv \quad (14)$$

式中： K 为刚度矩阵； δ 为位移列阵； R 为外荷载列阵； F^{vp} 为黏塑性应变引起的等效荷载列阵。

具体计算步骤归纳如下：

(1) 设已知第 n 次时步的应力 σ_n 、位移 δ_n 、黏塑性应变 ϵ_n^{vp} 、外荷载 R_n ，由式 (3) 计算出黏塑性应变率 $\dot{\epsilon}_n^{vp}$ 。

(2) 采用前差分式 (显式) 计算黏塑性应变 ϵ^{vp} 的增量

$$\Delta\epsilon_n^{vp} = \dot{\epsilon}_n^{vp} \cdot \Delta t \tag{15}$$

如果外荷载 R_n 在该时刻也有变化，取为 R_{n+1} ；又

$$F_{n+1}^{vp} = \sum_e \int_v B^T D \epsilon_{n+1}^{vp} dv \tag{16}$$

其中， $\epsilon_{n+1}^{vp} = \epsilon_n^{vp} + \Delta\epsilon_n^{vp}$

(3) 解式 (13)，计算出 $n+1$ 时刻位移 δ_{n+1} ，计算公式为

$$\delta_{n+1} = K^{-1}(R_{n+1} + F_{n+1}^{vp}) \tag{17}$$

(4) 由几何方程确定 $n+1$ 时刻的应变 ϵ_{n+1} ，由物理方程

$$\sigma = D(\epsilon - \epsilon^{vp}) \tag{18}$$

求得 $n+1$ 时刻应力 σ_{n+1} ，则 t_{n+1} 时步的 σ_{n+1} 、 δ_{n+1} 、 ϵ_{n+1}^{vp} 、 F_{n+1}^{vp} 都已知，则可重复计算下一时步。依次类推，可求得应力和应变随时间变化的发展曲线。

弹-黏塑性有限元程序流程图如图 2 所示 程序采用 Visual Fortran 研发^[8]。

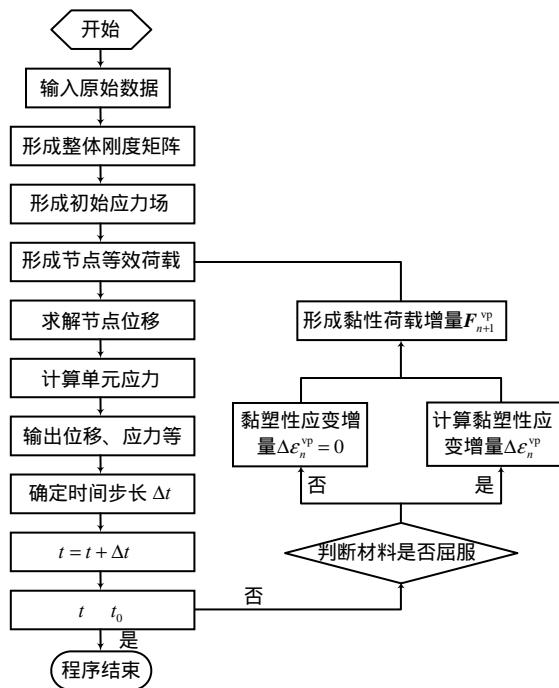


图 2 弹-黏塑性有限元程序流程图

Fig.2 The flow chart of elastic-viscoplastic FEM program

2.3 基于正交设计法和优化算法的弹-黏塑性参数反演

本文采用正交设计法和优化算法相结合进行弹-黏塑性参数反演，分两个步骤。

步骤 1：采用正交设计-数值计算方法确定弹-黏塑性参数的初始值。

步骤 2：在步骤 1 获得初始值的基础上，采用优化算法-数值计算方法进行弹-黏塑性参数优化反演。

步骤 1 的主要思想是首先设置待反演参数的取值水平，利用正交设计方法在待反演参数的可能取值空间中构造参数取值组合，形成待反演参数的若干个取值集合。把每一个待反演参数取值集合输入给雾江滑坡弹-黏塑性有限元模型进行正分析，计算出关键点的位移值，比较计算和实测位移，选取计算与实测位移最接近的参数组合作为步骤 2 优化反演分析的初始值。

步骤 2 的基本思想是基于步骤 1 确定的弹-黏塑性参数初始值，假定若干待反演弹-黏塑性参数的值 将其代入雾江滑坡弹-黏塑性有限元模型进行正分析，计算出雾江滑坡在假定参数下的位移 U ，再将此计算位移 U 与实测位移 U^* 进行比较，当两者的差值达到最小值时，认为该假定的参数值为最优参数。

本文采用单纯形优化算法进行雾江滑坡弹-黏塑性参数优化反演。

3 雾江滑坡体变形监测

根据雾江滑坡成因、地形、岩性和后期变形特征，将滑坡分为 3 个区，如图 3 所示。I 区：在平面上为整个滑坡区，上游以 号冲沟、下游以 号冲沟为界，后缘包括崩塌堆积区。 区：在平面上为 号冲沟—2 级平台— 号冲沟及前缘构成的区域，包含在 区内，两侧与第 2 期滑动的区域相当，底部沿袭第 2 期滑面，后缘边界位于 2 级平台后侧。

区：位于滑坡前缘，在平面上为 号冲沟—1 级平台—PD_h12 平硐旁小冲沟及前缘构成的区域，包含在 区内。

3.1 内部测斜变形观测

为了获得雾江滑坡的变形状态，2011 年补充了 3 个钻孔 (VL1C、VL2C、VL3C) 的深部变形观测仪器的埋设工作，测斜观测孔位置见表 1 和图 3。VL1C 孔 (EL362.88 m) 在 2011 年 4 月 2 日~2012 年 7 月

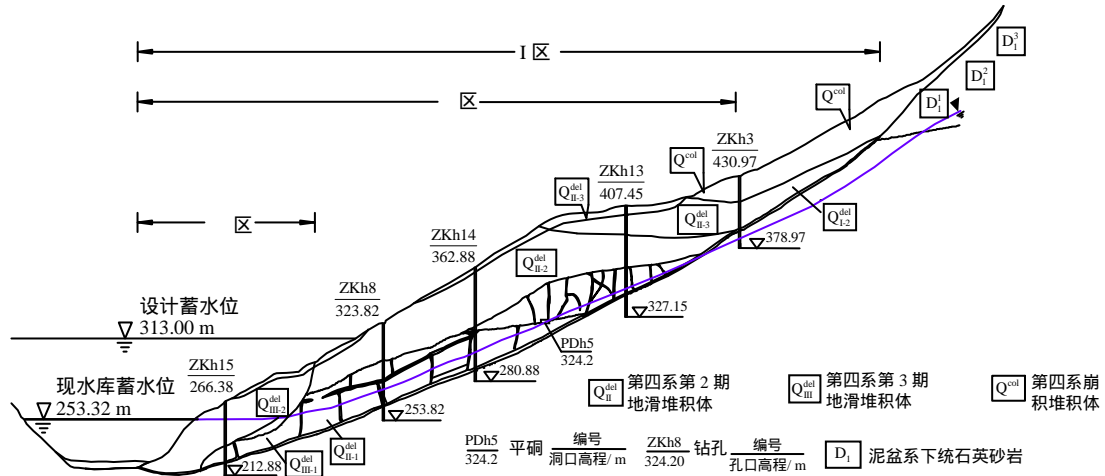


图 3 典型剖面滑坡分区示意图
Fig.3 Typical profile of landslide

10 日期间观测了 12 次，VL2C 孔 (EL407.45 m) 和 VL3C 孔 (EL266.38 m) 在 2011 年 11 月 22 日 ~ 2012 年 7 月 10 日期间观测了 4 次，其中，VL2C、VL3C 这两个孔有一次数据异常已剔除，即 VL2C、VL3C 这两个孔有效测值 3 次。2012 年 7 月 10 日不同钻孔深度处位移和钻孔深度 1 m 处位移过程曲线如图 4 所示。

表 1 滑坡内部测斜观测孔位置表
Table 1 Position of inclination survey observation hole in landslide

孔号	X 坐标/m	Y 坐标/m	高程/m	备注
VL1C	82 516.396 1	67 700.438 2	362.88	钻孔 ZKh14
VL2C	82 641.584 7	67 773.817 3	407.45	钻孔 ZKh13
VL3C	82 311.807 7	67 580.655 0	266.38	钻孔 ZKh15

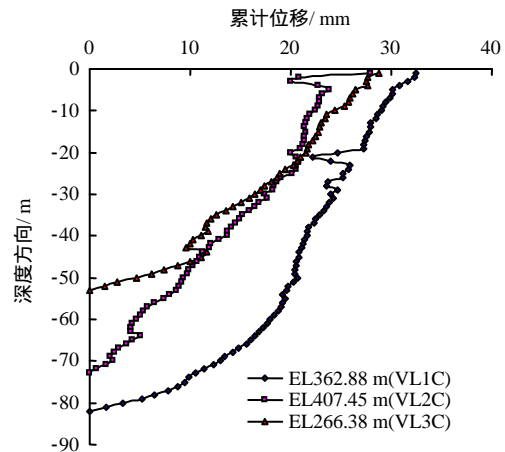
监测表明，由于影响因素较多，滑坡体内部位移监测数据变幅较大，以 2011 年 4 月 2 日监测位移为基准，VL1C 钻孔深度 1 m 处在 2012 年 7 月 10 日监测到的最大位移量为 32.5 mm；以 2011 年 11 月 22 日监测位移为基准，VL3C 钻孔深度 1 m 处在 2012 年 7 月 10 日监测到的最大位移为 28.7 mm；而 VL2C 钻孔在边坡浅层观测位移波动较大，以 2011 年 11 月 22 日监测位移为基准，VL2C 钻孔深度 1 m 处监测到的最大位移为 28 mm。

总体来看，滑坡体目前仍处于缓慢蠕滑过程中。

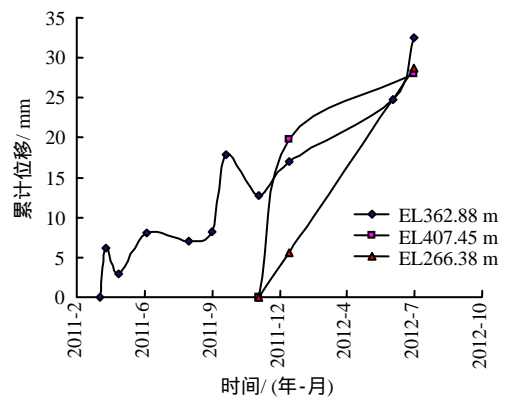
3.2 反馈位移的选取

由于 VL1C、VL2C、VL3C 钻孔的基准时刻不同，考虑到雾江滑坡体总体上处于缓慢蠕滑过程中，由上述 3 个钻孔现有的观测变形计算年蠕滑

率，钻孔深度 1 m 处的年蠕滑率分别为 25.6、44.4 和 45.5 mm。从图 4 可见，VL2C 钻孔的观测位移的第 2 次观测有突变，为此，选取 VL1C 孔和 VL3C 孔的深度 1 m 处的年蠕滑率作为反馈目标位移。



(a) 不同钻孔深度处位移(2012 年 7 月 10 日)



(b) 钻孔深度 1 m 处位移过程线

图 4 典型钻孔观测位移

Fig.4 Displacement of typical observation borehole

4 雾江滑坡体力学参数反馈

针对多参数反演存在不惟一性,为此,首先进行滑坡体强度参数的反演,然后基于实测变形进行滑坡体弹-黏塑性参数反演,对于滑坡体的重度和泊松比等参数则依据室内试验或工程类比确定。

4.1 雾江滑坡体强度参数反演

边坡的不同稳定状态对应不同的力学参数。由于雾江滑坡是沿控制型剪切面长期蠕滑的边坡,该滑面的剪应力已经接近或达到长期强度^[9-11]。假定目前滑坡体处于极限平衡状态,即认为当前安全系数为 1.0,选取平行于滑动方向的典型剖面(见图 1)为计算剖面,根据室内试验规律,水下强度与水上强度的比值为 $\lambda = 0.84$,采用现水库水位(253.3 m),通过等安全系数法对滑坡强度参数进行反算,反演获得的雾江滑坡体强度参数见表 2。

表 2 雾江滑坡强度参数反演结果
Table 2 Inversion results of strength parameter for Wujiang landslide

岩土结构类型	状态	泊松比	重度 (kN/m^3)	抗剪强度	
				摩擦 系数	凝聚力 /kPa
滑坡体	水上	0.32	21.7	0.521	31.25
	水下	0.34	22.1	0.469	26.04
河床含泥砂砾石	水下	0.35	22.1	0.420	5.00
滑动面(带)	水上	0.36	21.9	0.396	25.00
	水下	0.37	22.3	0.344	20.84
后缘崩塌碎块石 与基岩接触面	水上	0.31		0.550	15.00
基岩		0.22	22.3		

4.2 基于正交设计法和单纯形优化算法反馈雾江滑坡体弹-黏塑性参数

采用 2.3 节的反演分析原理^[12-13],首先采用正交设计法获得优化反演分析的初始值,然后基于上一步骤获得的初始值,采用单纯形优化算法进行局部寻优,从而获得最优的反演参数。

4.2.1 反演参数的确定和反演参数取值范围

虽然雾江滑坡体开展了变形观测,但变形观测资料仍显不足,又由于基于观测变形反演滑坡体的力学参数是综合等效参数,为此,假设水上、水下的滑坡体、滑带的弹性模量相同,且滑坡体和滑带的黏滞系数相同,即选取滑坡体的综合等效弹性模量 E_{sm} 、滑带的综合等效弹性模量 E_{sb} 和综合等效黏滞系数 η 作为待反演参数。依据工程经验及敏感性数值分析,参数取值范围为 $E_{sm} \in [100, 200]$ MPa、 $E_{sb} \in [5, 45]$ MPa、 $\eta \in [2, 10] \times 10^4$ Pa·d。采用 3 因素 5 水平的正交表进行参数组合,给出了 25 种不同的

参数组合,见表 3。

表 3 典型钻孔高程处年蠕滑率
Table 3 Annual creep rate of typical boreholes with different elevations

试验号	滑坡体 E_{sm} / MPa	滑带 E_{sb} / MPa	黏滞系数 $\eta / 10^4$ Pa·d	EL266.38 u_1 / (cm/a)	EL362.88 u_2 / (cm/a)
1	100	5	2	16.715	5.654
2	100	15	4	7.564	2.659
3	100	25	6	5.139	1.799
4	100	35	8	3.970	1.372
5	100	45	10	3.272	1.118
6	125	5	4	8.368	3.195
7	125	15	6	5.261	1.811
8	125	25	8	3.967	1.347
9	125	35	10	3.237	1.084
10	125	45	2	14.801	5.241
11	150	5	6	6.069	2.503
12	150	15	8	4.098	1.422
13	150	25	10	3.256	1.088
14	150	35	2	12.730	5.157
15	150	45	4	7.034	2.608
16	175	5	8	4.911	2.152
17	175	15	10	3.402	1.197
18	175	25	2	12.919	5.232
19	175	35	4	7.267	2.618
20	175	45	6	4.829	1.724
21	200	5	10	4.197	1.930
22	200	15	2	13.745	5.350
23	200	25	4	7.953	2.661
24	200	35	6	4.855	1.717
25	200	45	8	3.709	1.271

4.2.2 有限元模型和计算荷载

以雾江滑坡体典型剖面(见图 1、3)建立有限元模型,见图 5,共剖分 2 643 个四边形等参单元,其中,滑床 1 885 个单元,滑体 674 个单元,滑带 84 个单元。计算荷载为滑坡体的自重和库水位 253.3 m 对应的渗流体荷载。滑坡体底部为完全位移约束,左、右侧为法向位移约束。

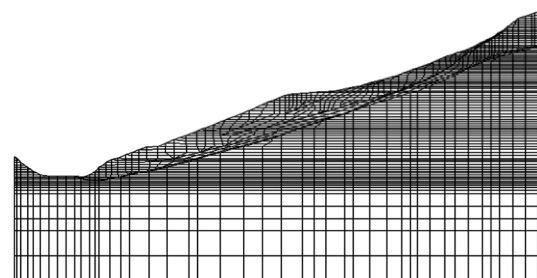


图 5 雾江滑坡有限元模型

Fig.5 The finite element model of Wujiang landslide

工程实践表明,由于自重引起滑坡的变形已经完成,自重应当作为初始应力施加。而在渗流体荷载作用下,滑坡体有限元模型首先产生一个瞬时变

形, 然后产生减速蠕变和等速蠕变。此时, 计算位移和实测位移难以直接进行比较。由于监测表明, 雾江滑坡体目前处于缓慢蠕滑过程中, 即选取关键点实测年蠕滑率和计算年蠕滑率进行对比是可行的, 而且当采用年蠕滑率进行对比时, 由于对比的位移是相对位移, 此时自重可以作为初始应力考虑, 也可以外荷载考虑, 两种考虑方式对年蠕滑率的影响很小。为此, 本文采用关键点年蠕滑率(相对值)进行反演分析。

4.2.3 基于正交设计法获得初始值

首先根据雾江滑坡体多年实测地下水位条件进行滑坡体的稳定渗流场分析, 然后由势头函数计算渗流体积力, 将自重和渗流体积力施加于滑坡体, 浸润线以下采用水下重度, 反之采用水上重度; 浸润线以下的渗流体积力在垂直向考虑浮力。假定滑坡体满足摩尔-库仑屈服准则, 同时假定滑坡体满足理想黏塑性体, 由 Perzyna 假设计算黏塑性应变率, 设 $\Phi(F) = F/F_0$, $F_0 = c \cos \varphi$, 结合典型剖面的有限元模型, 采用弹-黏塑性有限元计算程序进行滑坡体蠕变分析, 累计计算时间为 5 400 d, 时间步在初期采用 10 d, 在后期采用 20 d。

计算表明, 由于滑坡体和滑带的强度参数是假定滑坡体稳定系数为 1.0 反演所得, 因此, 滑坡体首先产生一个瞬时变形, 然后产生减速蠕变, 最后处于缓慢等速蠕滑状态, 等速蠕滑率与滑坡体的弹性模量和黏滞系数关系密切。通过计算, 获得了 25 种不同参数组合下的 VL3C 钻孔 (EL266.38 m) 深度 1 m 处和 VL1C 钻孔 (EL362.88 m) 深度 1 m 处的等速年蠕滑率。见表 3。由表可见, 试验号 16 和 21 的参数组合对应的关键点位置的计算年蠕滑率与实测年蠕滑率较接近, 即滑坡体的弹性模量较大, 而滑带的弹性模量较小。

4.2.4 基于单纯形优化算法的局部寻优

分别选取表 3 中试验号 16、21 的参数组合(具体数值见表 3)作为初始值, 采用单纯形优化算法进行局部寻优。由于单纯形优化反演方法在反演分析时容易陷入局部最优, 为此, 在反演过程中, 寻优 10 次后, 在当前最优值的基础上按一定幅度扰动, 如此反复, 直到获得最优反演值。优选出滑坡体弹性模量 $E_{sm} = 228.462$ MPa、滑带弹性模量 $E_{sb} = 3.363$ MPa 和黏滞系数 $\eta = 10.952 \times 10^4$ Pa·d。

4.2.5 反演参数检验

将优选出的滑坡体参数进行弹-黏塑性有限元分析, 经计算获得滑坡体不同高程处的年蠕滑率见表 4。

表 4 关键点年蠕滑率

Table 4 Annual creep rate of key points

关键点	EL266.38	EL285	EL322.368	EL362.88	EL390	EL433.9
年蠕滑率 / (cm/a)	4.348	2.875	2.500	2.267	2.073	0.938

由表可见, VL1C (EL 362.88 m) 钻孔深度 1 m 处的年蠕滑率为 2.267 cm, VL3C (EL 266.38 m) 钻孔深度 1 m 处的年蠕滑率为 4.348 cm, 与实测年蠕滑率 2.56 cm 和 4.55 cm 接近。这说明本文基于实测位移反馈的滑坡体弹-黏塑性参数是可靠的。

5 结 论

(1) 由于雾江滑坡是沿控制性剪切面长期蠕滑的边坡, 该滑面的剪应力已经接近或达到长期强度。假定目前滑坡体处于极限平衡状态, 稳定系数为 1.0, 选取平行于滑动方向的典型剖面为计算剖面, 反演获得了雾江滑坡体的强度参数。

(2) 选取滑坡体内部钻孔观测位移年蠕滑率, 假定滑坡体满足摩尔-库仑屈服准则, 由 Perzyna 假设计算黏塑性应变率, 结合滑坡体典型剖面有限元模型, 采用弹-黏塑性有限元计算程序进行滑坡体分析, 将正交设计和单纯形优化算法相结合, 反演获得了滑坡体弹性模量 $E_{sm} = 228.462$ MPa、滑带弹性模量 $E_{sb} = 3.363$ MPa 和黏滞系数 $\eta = 10.952 \times 10^4$ Pa·d, 反演得到的年蠕滑率与实测年蠕滑率非常接近。

参 考 文 献

- [1] 王文星, 张继业. 雾江滑坡滑动面黏土蠕变试验及积分蠕变方程[J]. 中南工业大学学报, 1996, 27(4): 392 - 395.
WANG Wen-xing, ZHANG Ji-ye. creep test and integral creep equation of clay on the sliding surface of Wujiang River landside-mass[J]. *Journal of Central South University of Technology*, 1996, 27(4): 392 - 395.
- [2] 王祥秋, 高文华, 杨林德, 等. 边坡滑移面软弱夹层时间效应与相关特性的试验研究[J]. 湘潭矿业学院学报 2002, 17(1): 65 - 68.
WANG Xiang-qiu, GAO Wen-hua, YANG Lin-de, et al. The test of weak interlayer for time effect and character on the sliding surface[J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 2002, 17(1): 65 - 68.
- [3] KAVANAGH K T, CLOUGH R W. Finite element application in the characterization of elastic solids[J]. *International Journal of Solids Structures*, 1971, 7(1): 11 - 13.

- Computers and Geotechnics**, 2015, 65: 147 - 163.
- [25] ANDERSON T B, JACKSON R. A fluid mechanical description of fluidized beds[J]. **Equation of motion, Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, 1967, 6: 527 - 539.
- [26] ISSA R. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. **Journal of Computational Physics**, 1986, 62(1): 40 - 65.
- [27] 刘军, 于刚, 赵长兵, 等. 不同尺度分布散粒材料砂堆形成过程的二维离散元模拟[J]. **计算力学学报**, 2008, 25(4): 568 - 573.
- LIU Jun, YU Gang, ZHAO Chang-bing, et al. 2D DEM simulation on the sandpile formation for granular materials with different grain size distributions[J]. **Chinese Journal of Computational Mechanics**, 2008, 25(4): 568 - 573.
- [28] ZHOU Y C, XU B H, YU A B, et al. An experimental and numerical study of the angle of repose of coarse spheres[J]. **Powder Technology**, 2002, 125: 45 - 54.
- [29] DASGUPTA P, MANNA P. Geometrical mechanism of inverse grading in grain-flow deposits: An experimental revelation[J]. **Earth-Science Reviews**, 2011, 104: 186 - 198.
- [30] ZURIGUEL I, MULLIN T, ROTTER J M. Effect of particle shape on the stress dip under a sandpile[J]. **Physical Review Letters**, 2007, 98: 028001-1-4.
- [31] ERGUN S. Fluid flow through packed column[J]. **Chemical Engineering Progress**, 1952, 48(2): 89 - 94.

上接第 1745 页

- [4] 谭万鹏, 郑颖人. 岩质边坡弹黏塑性计算参数位移反分析研究[J]. **岩石力学与工程**, 2010, 29(增刊 1): 2988 - 2993.
- TAN Wan-peng, ZHENG Ying-ren. Study of displacement back analysis of elasto-viscoplastic parameters of rock slope[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2010, 29(Supp.1): 2988 - 2993.
- [5] 陈卫兵, 宋丰波, 高鹏. 京珠高速 K108 边坡软弱夹层流变参数的智能反演[J]. **地下空间与工程学报**, 2011 7(3): 485 - 490.
- CHEN Wei-bing, SONG Feng-bo, GAO Peng. Intelligent back analysis on rheological parameters of weak intercalation in K108 slope of Jingzhu expressway[J]. **Chinese Journal of Underground Space and Engineering**, 2011, 7(3): 485 - 490.
- [6] OWEN D R J, HINTON E. Finite elements in plasticity[M]. Swansea U K: Pineridge Press, 1980.
- [7] 朱伯芳. 有限单元法原理与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000.
- ZHU Bo-fang. The finite element method theory and application[M]. Beijing: China Waterpower Press, 2000.
- [8] 黄耀英. 高坝与基岩时变效应的正反分析方法及其应用[D]. 南京: 河海大学博士学位论文, 2007.
- HUANG Yao-ying. Forward and back analysis methods of time-dependent effect in high dam and rock foundation and its application[D]. Nanjing: Hohai University, 2007.
- [9] 冯树荣, 彭士标. 边坡工程与地质灾害防治[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- FENG Shu-rong, PENG Tu-biao. Slope engineering and geological disaster prevention and control[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2013.
- [10] 中华人民共和国水利部. SL386-2007 水利水电工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- The Ministry of Resources of the People's Republic of China. Water RSL386-2007 Design code for engineered slopes in water resources and hydropower projects[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T 5353-2006 水电水利工程边坡设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- National Development and Reform Commission. DL/T 5353-2006 Design specification for slope of hydropower and water conservancy project[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2006.
- [12] 方开泰, 马长兴. 正交与均匀试验设计[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- FANG Kai-tai, MA Chang-xing. Orthogonal and uniform experimental design[M]. Beijing: Science Press, 2001.
- [13] 冯夏庭, 周辉, 李邵军, 等. 岩石力学与工程综合集成智能反馈分析方法及应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2007, 26(9): 1737 - 1744.
- FENG Xia-ting, ZHOU Hui, LI Shao-jun, et al. Integrated intelligent feedback analysis of rock mechanics and engineering problems and its application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2007, 26(9): 1737 - 1744.