

长江三峡大石板滑坡计算参数反分析

高德军¹, 徐卫亚¹, 郭其达²

(1. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 2. 三峡大学土木工程学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 在研究长江三峡库区大石板滑坡约束条件和某一确定计算状态的基础上, 利用极限平衡理论方法对滑坡的滑带土进行了计算参数反分析, 并通过敏感性分析确定了计算参数的取值. 结果表明: 计算参数 c (黏聚力), φ (摩擦角) 值的反分析存在解的非唯一性, 只有确定了边坡的临界状态并选定相应的评估指标后, 才有可能获得准确结果; 反分析得到的滑带土 c, φ 值与临界状态的滑带赋存条件相对应, 当进行其他工况的稳定分析及工程设计时, 应根据经验及工程类比结果进行折减.

关键词: 长江三峡; 大石板; 滑坡; 反分析; 计算参数

中图分类号: P642.22 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1980(2006)01-0074-05

边坡滑带土的黏聚力(c)和内摩擦角(φ)等力学计算参数的取值正确与否, 会直接影响到边坡的稳定计算和工程设计. 目前确定 c, φ 值的方法有试验、工程类比和反分析 3 种. 试验方法是确定滑带土计算参数的途径之一, 但 c, φ 值需通过大量试验才能得出. 此外, 试样的失真、滑带土的非均匀性、试验误差和试验结果的多样性等, 也会给试验成果的选用带来识别上的很大困难. 工程类比法是一种经验估算方法. 由于滑坡的成因、结构条件、边界条件、土体性质及研究者的经验等存在一定的差异, 工程类比法也不可能准确地得出滑带土的计算参数. 在工程设计中, 常采用反分析方法确定计算参数[等效力学计算参数]^[1-5].

目前, 边坡稳定分析常用的方法是弹塑性有限元法和刚塑性体极限平衡法^[6-9]. 由于极限平衡法不仅物理概念清晰, 求解方便, 可同时求出滑坡的不平衡力(剩余下滑力), 为滑坡加固提供设计依据, 而且滑坡稳定分析与加固设计采用同一理论模型, 计算结果更为可靠, 因而在工程中得到广泛应用.

本文以长江三峡库区大石板滑坡为例, 在研究滑坡体边界条件和计算状态的基础上, 利用极限平衡理论方法对滑坡的滑带土进行了计算参数反分析.

1 反分析基本原理

1.1 土体边坡计算参数反分析的定义

边坡反分析就是先根据确定的边界条件和工况状态下的稳定状态评估指标建立数学模型, 然后利用此模型反演边坡土体的计算参数 c, φ 值. 由于反分析 c, φ 时是通过 1 个方程来求解 2 个未知参数, 因而其解具有不确定性. 一般情况下, 采用反分析方法时需结合试验、经验或敏感性分析等方法才能确定出参数的取值.

1.2 反分析过程

1.2.1 建模

反分析建模常用的方法是极限平衡分析法. 极限平衡分析法的基本假定是: 土体为理想刚塑性材料; 加载过程中土体不发生任何变形; 达到极限平衡状态时土体将沿某破裂面发生剪切变形.

工程上最常用的平面极限平衡计算方法为条分法. 条分法包括毕肖普法、改进瑞典条分法、传递系数法、分块极限平衡法和简布法等^[10]. 在条分法中, 稳定状态评估指标(稳定系数) K 的表达式为

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n E_i / \sum_{i=1}^n T_i}{\sum_{i=1}^n E_i (x_i, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}, \rho g, \rho_w g, c, \varphi) / \sum_{i=1}^n T_i (x_i, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}, \rho g, \rho_w g)} \quad (1)$$

式中： $\sum_{i=1}^n E_i$ ——阻滑力； $\sum_{i=1}^n T_i$ ——下滑力； $x_i, y_{1i}, y_{2i}, y_{3i}$ ——边坡的坡面横坐标、坡面纵坐标、滑面纵坐标及地下水水面纵坐标； ρ, ρ_w ——土体和水的密度； g ——重力加速度。

1.2.2 确定反分析的状态及稳定状态评估指标

在反分析中强调“状态”概念是十分重要的，因为一个确定的状态是由一个确定的评估指标来描述的。通常将反分析的状态称为临界状态。临界状态是指在确定工况的评估指标下的边坡即时状态，包括坡面形态、地下水位、滑带赋存条件和外荷载等因素。

对大多数土体边坡的稳定状态来说，起主导作用的是地下水位的变化，因此应尽量了解反分析拟定状态条件下的地下水位状况。

稳定评估指标主要依据边坡变形发展状态来确定，建议参考表 [11] 并结合实际情况选定。稳定评估指标具有一定的先验性，必须考虑边坡不同发育阶段的变形性质并详细查勘边坡前、后缘变形量和地形变化后才能做出正确选择。

1.2.3 确定计算参数

根据反分析结果，对 c, φ 值进行敏感性分析，以辨明 c, φ 值对稳定系数的敏感程度。首先确定对稳定系数变化不太敏感的参数，所取参数值一般应在试验值的包络范围内，也可以参照类似工程参数取值。在选取 c, φ 值时，应同时研究滑带土的颗粒组成、构造和滑带的赋存条件。一般而言， φ 的试验结果较为可靠。因此，一般先根据试验结果确定 φ 值，然后根据敏感性分析结果确定 c 值。

反分析得出的 c, φ 值为滑带土临界状态下的 c, φ 值，当分析工况发生变化时， c, φ 值也应随之变化。尤其是滑带赋存条件不同时， c 值可能会存在较大差异。在实际工程中，可根据分析工况与临界状态下的滑带赋存条件以及土体性质，利用经验和工程类比法对 c 值进行折减。

2 大石板滑坡计算参数反分析

2.1 大石板滑坡概况

大石板滑坡位于长江三峡库区黄腊石滑坡群的西部，与石榴树包滑坡毗邻。大石板滑坡是由台子角、大石板下段、大石板上段及宋家屋场 4 个滑坡组成的复合式滑坡，分布于高程 66~840 m 之间，纵向长约 1500 m，横向宽约 470 m，呈南北向长方形展布，滑体厚度为 13.0~33.8 m，滑坡体体积在 700 万~750 万 m^3 之间。

大石板滑坡上缓下陡，后缘为陡岩。滑坡区第四系崩坡积和滑坡堆积物广泛分布，基岩仅零星分布于冲沟底部，坡体后缘陡壁上出露面积不足全区的 5%。松散堆积物由碎石、块石、块石和黏土组成。覆盖层厚度分别为 20 m(大石板上段)、43.5 m(大石板下段)、32.92 m(台子角)。

宋家屋场滑坡上部以基岩为滑床，下部滑体沿少溪组灰质页岩层间软弱面剪出。大石板滑坡的滑带多为紫红色黏土夹泥岩、粉砂岩碎石，细颗粒含量较高，占全料的 60%，厚度为 2~30 cm，滑带土强度主要由细颗粒料控制。台子角滑坡的滑带土分为 2 类：一为紫红色黏土夹碎石，细粒含量占全料的 37.5%~43%，黏土呈硬塑状；二为灰绿色黏土夹碎石，细粒含量占全料的 38%，黏土呈硬塑状。大石板及台子角最低地下水位高于滑带。

2.2 反分析状态的确定

反分析状态的确定与形成该状态的荷载条件、计算边界及稳定评价指标等有关。

据调查 [12]：1983 年 7、8 月间，在大石板滑坡区 II、III 和 IV 级平台出现 7 条裂缝，9、10 月间，裂缝发展较快，尤其以 IV 级平台上 T₃ 与 T₄ 号裂缝延伸最远，长达 250.0~300.0 m，裂缝宽 0.4~0.5 m。1986 年开始进行变形观测。位移观测资料显示，裂缝 C₁、C₂ 和 D₂ 变形较大，月平均变形率为 0.1~0.2 mm。上述裂缝变化，说

Table 1 Stability coefficient for different development stages of landslide			
发育阶段	变形性质	稳定系数 K	变形状态
局部变形	蠕滑	1.05~1.00	前缘或后缘变形微弱，地表出现未连通微裂缝
	微滑	1.00~0.90	局部坡面变形异常，陡坎处出现小型局部滑崩，裂缝发展，逐渐连通
整体变形	剧滑	<0.90	坡面出现鼓丘、挤压变形和较长的大裂缝
稳定固结	固结	>1.05	

明滑坡上段正在复活中,下段复活现象较弱.因此,可以认为,在1983年前后的某一时段,由于滑坡区遭遇长久降雨过程,滑体内地下水位升高,使滑坡处于复活状态.本文以此状态作为反分析的计算状态.

计算状态确定后,还需寻求与确定状态相对应的反分析所需的边界条件与稳定系数.

2.3 边界条件与稳定系数的确定

2.3.1 滑坡复活降雨过程的确定

滑坡复活的开始时间为1983年.首先对1983年前后时段内的降雨最低阈值进行分析.从巴东水文站降雨历年资料的分析中发现^[13],以1983年的最大日降雨、最大一次性降雨以及最长一次性连续降雨作为诱发大石板滑坡复活的最低阈值降雨,则阈值太小.由土壤入渗曲线分析可知,短期暴雨的入渗量小于长期久雨的入渗量.当降雨强度适当时,降雨历时长的降雨往往会形成较大的土壤入渗量.由此可知,1983年6、7月间的连续2次降雨是诱发黄腊石滑坡复活的主要因素.该降雨过程的主要参数见表2.

表2 巴东1983年降雨过程的主要参数

Table 2 Main parameters of precipitation at Badong Hydrological Station in 1983							
参 数	降雨总量/ mm	降雨历 时/d	平均雨强/ (mm·d ⁻¹)	降雨频率	入渗量/ mm	入渗率	产流率
参数值	448.8	36.0	12.5	0.0115	379.6	0.846	0.154

经分析研究,以1983年6、7月间的连续2次降雨作为诱发黄腊石滑坡复活的最低阈值降雨.

2.3.2 地下水位的计算

按饱和-非饱和-非稳定的地下渗流理论,利用加拿大GEO-SLOPE公司开发的二维有限元程序SEEP/W软件进行地下水位线分析,并以此作为反分析计算时的动、静水压力的依据.1983年6、7月间的连续2次降雨过程中的地下水位线(长江水位按66.0m计)如图1所示.

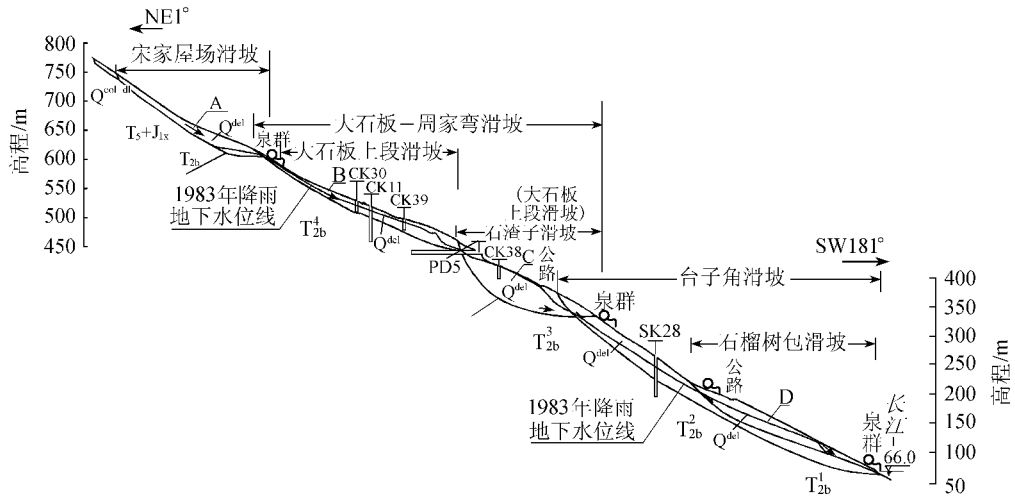


图1 稳定计算剖面
Fig.1 Profile of stability analysis

2.3.3 稳定系数的确定

参照1983年前后的滑坡位移观测资料(表3),依据表1条件并结合1983年滑坡区复活时的变形情况,确定了反分析时滑坡的稳定系数.即:宋家屋场、大石板上段滑坡变形较小,稳定系数取为1.05;大石板下段滑坡变形较大,稳定系数取为1.0;台子角滑坡变形较小,稳定系数取为1.05.

2.3.4 滑带几何形态的确定

滑坡的滑带是根据钻孔资料确定的.从观测资料分析结果可知,滑带的确定是符合实际情况的.

图2所示为1989年较大降雨期间CK27^①顺坡向孔深与位移关系曲线.从图中可以看出,孔深21~24m

表3 大石板位移观测资料统计
Table 3 Statistics of observed displacement of Dashiban landslide

滑坡单元	滑坡位移速率/(mm·月 ⁻¹)	
	平水年	丰水年
大石板下段	1.0	2.0
大石板上段	0.5	1.0
台子角	0.1	0.1

① 长江勘测规划设计研究院.长江三峡黄腊石工程地质勘察报告.武汉:1986.

处有明显的位移突变现象,顺坡向位移最大值为20 mm,其下部位移出现突然减小现象.由钻孔资料可知,孔深 21 ~ 24 m 处为岩土交界面,深层岩体没有滑移变形迹象.因此,可认为滑带是沿基岩与覆盖层接触面展布的.

从地质资料可知,滑坡主要发生在覆盖堆积层内,有明显的滑带,大石板、台子角为覆盖层滑坡.据此,反分析时计算剖面采用了地质剖面(图 1).

2.4 数学模型

在平面极限平衡计算方法中,传递系数法适用于折线形滑面的边坡计算,并能计算任一剖面处的剩余下滑力.传递系数法假定推力方向与分条底坡平行,分析中能顾及各条带间的推力作用.传递系数法计入孔隙水压力时,假定土壤孔隙水压力按线性分布,力学概念明确^[8].考虑孔隙水压力的计算公式为

$$F_i = K[(W_{i1} - W_{i2})\sin\alpha_i + \Delta p_i\cos\alpha_i] - \{c_i l_i + [(W_{i1} - W_{i2})\cos\alpha_i - p_{wi}l_i - \Delta p_i\sin\alpha_i]\tan\varphi_i\} + F_{i-1}\psi_{i-1}$$

(2)

$$\psi_{i-1} = \cos(\alpha_{i-1} - \alpha_i) - \tan\varphi_{i-1}\sin(\alpha_{i-1} - \alpha_i)$$

(3)

式中: W_{i1} ——地下水位线以上土体天然重量; W_{i2} ——地下水位线以下土体饱和重量; Δp_i ——分块土体两侧静水压力的合力; p_{wi} ——分块土体底部孔隙水压力; F_{i-1} ——剩余下滑力; l_i ——分块土体滑面长度; α_i ——分块土体滑面倾角; ψ_{i-1} ——推力传递系数.

按式(2)求各条块的不平衡力,令 $F_n = 0$ 则可得到含有 K 的一次方程.利用该方程对各条块进行递推可求出 K .

本文利用自编的极限平衡稳定分析程序进行了计算参数的反分析,同时对计算成果进行了敏感性分析,结果如图 3 所示.

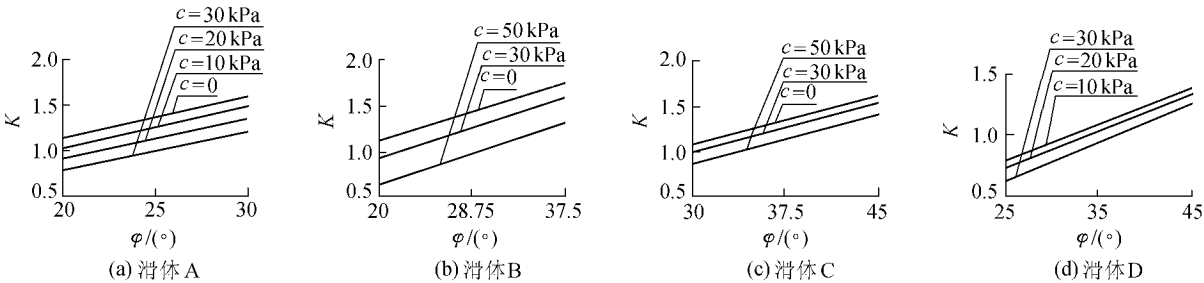


图 3 滑体敏感性分析

Fig.3 Sensitivity analysis of landslide

由图 3 可知,滑带土黏聚力 c 每降低 1 kPa,安全系数 K 将减小 0.000 3 ~ 0.000 5,摩擦角 φ 每降低 1° , K 值将减小 0.08 ~ 0.09.

2.5 滑坡各区 c 、 φ 值的确定

先根据试验资料和反分析成果分别确定 c 值,再选定各部位的 c 、 φ 值,如表 4 所示.计算参数接近于已固结滑带土试验值($\varphi = 28.4^\circ$, $c = 70$ kPa).

从长期的地下水位观测资料和理论计算成果可知,滑带土长期处于地下水位以下,不存在干湿交替的赋存条件,所以也不存在滑带土饱水或脱湿而造成的强度降低情况.

上述分析所得到的计算参数可作为大石板滑坡稳定分析和工程设计时的力学计算参数.

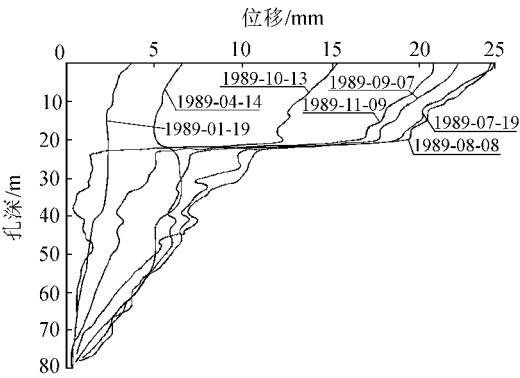


图 2 CK27 顺坡向孔深与位移关系曲线

Fig.2 Relationship between depth and displacement along the slope at monitoring hole No.27

表 4 大石板各部位的计算参数

Table 4 Calculation parameters of Dashiban landslide

计算参数	$\varphi/(^\circ)$	c/kPa
滑体 A	24.0	30
滑体 B	26.3	30
滑体 C	28.6	30
滑体 D	34.8	30

3 结 论

- a. 计算参数 c , φ 值的反分析存在解的非唯一性 , 只有确定边坡的临界状态并选定相对应的评估指标后 , 才有可能获得准确结果. 临界状态约束条件(尤其是地下水的水面线)的准确性 , 是影响反分析结果可靠性的重要因素.
- b. 反分析得到的滑带土 c , φ 值与临界状态的滑带赋存条件相对应 , 当进行其他工况的稳定分析及工程设计时 , 滑带赋存条件与反分析的临界状态会有所不同 , 因此 c 值应根据经验及工程类比结果进行折减.
- c. 利用反分析得出的参数进行滑坡的稳定分析和工程设计 , 方法简单 , 结果更为可靠.

参考文献 :

- [1] SONMEZ H , JULUSAY R , GOKCEOGLU C. A practical procedure for the back analysis of slope failures in closely jointed rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences , 1998 , 35(2) : 219-233.
- [2] 唐辉明. 用反算法确定岩体抗剪强度参数[C]//中国地质学会工程地质专业委员会 , 中国科学院地质研究所工程地质力学开放研究实验室. 第四届全国工程地质大会论文选集(三). 北京 : 海洋出版社 , 1486-1489.
- [3] 富凤丽 , 俱磊. 中里滑坡反分析及强度系数取值研究[J]. 长春科技大学学报 , 2000 , 30(2) : 165-169.
- [4] 林鲁生 , 蒋刚 , 白世伟 , 等. 土体抗剪强度参数取值的统计分析[J]. 岩土力学 , 2003 , 24(2) : 277-280.
- [5] 崔政权 , 李宁. 边坡工程理论与实践最新进展[M]. 北京 : 中国水利电力出版社 , 1999 : 185-199.
- [6] 徐秉业 , 沈新普 , 岑章志. 边坡工程与固体力学[J]. 力学进展 , 1994 , 24(4) : 518-524.
- [7] 张彬 , 王钊 , 彭亚明 , 等. 三峡库区某滑坡的稳定性分析与评价[J]. 人民长江 , 2003 , 34(4) : 14-16.
- [8] 龚玉锋 , 周创兵 , 梁轶 , 等. 参数反演在岩质高边坡变形与稳定分析中的应用[J]. 岩石力学 , 2002 , 23(5) : 570-574.
- [9] 吴刚 , 夏艳华 , 陈静曦 , 等. 可靠性理论在边坡反分析中的运用[J]. 岩石力学 , 2003 , 24(5) : 809-811.
- [10] 潘家铮. 建筑物的抗滑稳定和滑坡分析[M]. 北京 : 水利出版社 , 1980 : 23-28.
- [11] 徐汉斌 , 王军. 反算法中滑坡稳定系数的取值问题[J]. 四川地质学报 , 1999 , 19(1) : 86-89.
- [12] 吕贵芳. 黄腊石滑坡[G]//孙广忠. 中国典型滑坡. 北京 : 科学出版社 , 1988 : 272-277.
- [13] 谢守益 , 张年学 , 许兵. 长江三峡库区典型滑坡降雨诱发的概率分析[J]. 工程地质学报 , 1995 , 3(2) : 60-69.

Back analysis of calculation parameters for Dashiban landslide at Three-Gorges Reservoir on Yangtze River

GAO De-jun¹ , XU Wei-ya¹ , GUO Qi-da²

(1. Geotechnical Research Institute of Hohai University , Nanjing 210098 , China ;

2. Institute of Civil Engineering , Three Gorges University , Yichang 443002 , China)

Abstract : Based on a study of constraint conditions and specific computation status of the Dashiban landslide in the Three-Gorges Reservoir region , a back analysis was made of calculation parameters of the soil in slide zone by use of the limit equilibrium method , and the parameter values were determined by sensitive analysis. The result shows that the values of parameter c and φ derived from back analysis are not unique , and that the accurate values can be obtained only after determination of the critical state of the landslide and selection of the corresponding evaluation indices. It is also indicated that the values of parameter c and φ are in accordance with inherent conditions of the landslide in critical state. However , in other cases of stability analysis and engineering design , the values should be modified according to experiences and comparison with similar projects.

Key words : Three-Gorges on Yangtze River ; Dashiban ; landslide ; back analysis ; calculation parameter