

古滑坡复活抗剪强度参数取值研究

韩晓伟, 卢智玲, 李株莹, 王小勇*

(广西生态工程职业技术学院, 广西 柳州 545000)

摘要 大型滑坡抗剪强度参数的取值是一个复杂的问题, 尤其是在地质情况复杂多变的情况下会受到人为活动、地下水、地震等多方面的影响导致滑坡复活。在滑坡治理过程中, 准确地确定边坡的岩土体综合性抗剪强度参数 c 、 ϕ 值至关重要。但是对于参数的确定不能仅依靠实验室数据, 本文采用反演法进行参数分析, 综合评定得到一个相对合理的参数, 以期为复杂地质情况下边坡参数选取提供参考。

关键词 抗剪强度; 滑坡; 不平衡推力法; 反演法

基金项目: 2022 年度广西生态工程职业技术学院校级课题, 项目名称: 西南地区巨型滑坡治理过程中相关参数选择机制研究, 项目编号: 2022ZRKX07; 2023 年度广西高校中青年教师科研基础能力提升项目, 项目名称: 基于 FLAC3D 的膨胀岩土复合边坡稳定性分析及支护参数研究, 项目编号: 2023KY1261。

中图分类号: TU47

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.24.001

0 引言

大型滑坡参数 (抗剪强度参数 c 和 ϕ) 的选取是滑坡稳定性分析与防治的关键问题。目前, 国内外研究主要通过以下方法获取参数: (1) 试验法: 滑坡滑带土经过长期剪切作用, 常处于残余强度状态, 需区分峰值与残余强度, 且试验结果易受取样扰动影响^[1]。国际学者提出以有效应力法替代传统 c - ϕ 组合模型。(2) 反演法: 单参数反演通过假定一个参数已知来求解另一个参数, 而双参数反演则通过多剖面极限平衡方程联立求解, 显著提高了参数与实际工程状况的匹配程度^[2]。(3) 工程经验类比法: 参考类似地质条件和滑坡类型的工程案例, 结合滑带土力学性质普遍低于滑体与滑床的规律进行参数修正。目前对于大型滑坡的研究大多采用多方法综合应用, 结合试验法、反演分析和监测动态校核, 以降低参数主观性误差^[3]。此外, 降雨、地下水、人为因素等外部因素都会影响参数变化, 如暴雨工况下粘聚力 c 的衰减显著高于内摩擦角 ϕ , 需通过渗流—应力耦合模型量化其动态变化。

1 工程概况

滑坡位于南盘江八渡镇, 主滑坡长约 300 m, 宽 460 ~ 570 m, 面积 16.40 万 m^2 , 平均厚度约 23 m, 体积约 377.20 万 m^3 , 属于一座古滑坡。根据前期勘察发现, 坡体已经经历过多次滑坡, 铁路修建前尚处于稳

定状态, 后来因为修建铁路, 导致古滑坡复活。铁路线从滑坡体的中部穿过将古滑坡体分割为上下两部分, 在多重因素综合作用下, 由于勘察设计时参数选取不当导致滑坡体复活。

滑坡出口处位于线路右侧堑坡。鉴于此, 施工中在三个山梁上设置了边坡防护桩共 31 根, 抗滑桩 76 根 (嵌入滑床以下基岩中), 以及截排地表水的整治措施。经过 4 年的地表位移观测, 以及钻孔动态监测, 线路左侧主滑体出现贯通性裂纹 3 道, 深部检测孔被剪断, 观测点位移量达 20 ~ 46 mm。上述结果表明线路上部边坡已经复活。

2 特征参数选取的讨论

2.1 滑带土位置确定及岩性分析

滑带位置确定至关重要, 现场确定滑带区域的位置主要靠钻孔取样、探槽探坑、平硐观察相结合的方法。对于这种复杂的边坡, 钻孔取样的方法受到观察范围的影响, 导致勘察结果的偏差, 平硐则能够更好地揭露滑带土的分布规律, 此处我们采用钻探和平硐相结合的方法, 通过平硐发现滑坡出现新滑带。

2.2 室内试验成果分析

根据《岩土工程勘察规范》(GB 50021-2001) 分别对滑坡体和滑带土分开取样进行室内试验。按照规范中不平衡推力法计算进行反演, 主要计算参数是选

*本文通信作者, E-mail: 563251287@qq.com。

取滑带土的抗剪强度参数 (c 、 ϕ) 值。滑带土在室内试验时选取土体的残值强度, 滑坡体复活由于滑带土发生了较大范围的剪切变形, 残值强度更接近真实工作状态^[4]。对于取样扰动的问题, 钻孔取样相比平硐取样更容易造成扰动, 因此在取样时在平硐中取样。对于新滑带土取样 18 组, 老滑带土取样 24 组。下面对室内式样数据进行误差分析:

1. 平均值:

$$\phi_m = \frac{\sum_{i=1}^n \phi_i}{n} \quad (1)$$

2. 标准差:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^n \phi_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n \phi_i)^2}{n} \right]} \quad (2)$$

3. 变异系数:

$$\delta = \frac{\sigma_f}{\phi_m} \quad (3)$$

根据《岩土工程勘察规范》中数据处理方法, 对室内试验的数据进行误差分析, 得出参数标准值。试验中老滑带土的饱和反复直剪强度 c 、 ϕ 值平均值分别是 15.04、13.51, 变异系数为 0.38、0.21, 修正系数为 0.84、0.91, 标注差为 5.96、2.81, 说明通过平硐取样样本的扰动小, 具有一定的代表性。

新滑带土饱和反复直剪强度 c 、 ϕ 值平均值分别是 18.53、16.39, 标准差 4.09、3.87, 变异系数为 0.22、0.24, 修正系数为 0.86、0.85。

通过对数据的误差整理修正, 最终得到, 新滑带土 (饱和状态) 反复直剪试验抗剪强度标准值 c 、 ϕ 分别为 15.97、13.97, 老滑带土 (饱和状态) 反复直剪试验抗剪强度标准值 c 、 ϕ 分别为 12.6、12.3。

2.3 现场试验成果

通过钻探和平硐可知, 滑带的平均深度大约 15 m, 埋藏较深, 为了得到准确的原位试验数据, 现场直剪试验只能选择在平硐中进行, 对新老滑带分别进行了现场直剪试验。

2.4 岩土参数综合取值

根据《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 0218-2006) 中的推荐比例为 0.5 ~ 0.9 的范围。张建华在研究黄土的现场试验和室内试验中得出重要结论, 受到试验条件、滑带土所处应力环境的影响, 原位试验与室内试验的参数比摩擦角在 0.77 ~ 0.87 之间, 粘聚力在 0.84 ~ 0.89 之间^[5]; 经过三峡库区蓄水后大量的滑坡治理, 推荐的经验权重比在 0.6 ~ 0.9 之间^[6]。结合本项目

特征现场试验和室内试验的参数权重比取 0.9 和 0.1。

2.4.1 老滑带土综合取值

由于老滑带土中含有大量碎石, 因此室内试验参数存在误差代表性差, 现场试验更能真实反映滑带土的实际情况, 滑带抗剪强度综合取值现场直剪试验及室内试验标准值的权重分别为 0.9、0.1。

2.4.2 新滑带土综合取值

滑坡复活后, 滑坡后部出现明显的拉裂缝, 拉裂缝连续性好, 连贯贯通, 滑坡前缘的抗滑桩则出现严重变形, 说明滑坡体整体性好。此时新滑动带土体强度低于峰值强度, 而又高于反复剪切试验的残值强度, 因此此处取值滑坡新变形带室内试验综合值取峰值标准值和残余值标准值的均值。

3 参数敏感性分析及反演分析

3.1 参数敏感性分析

由于参数变化会对稳定性系数产生影响, 因此需要对参数进行敏感性分析, 为下一步参数的反演法计算提供前提条件。选取剖面 18-18' 进行反演分析, 假设土体完全饱和 (见图 1)。18-18' 剖面滑动面呈现出近似折线形分布, 选择传递系数法来进行敏感性分析。

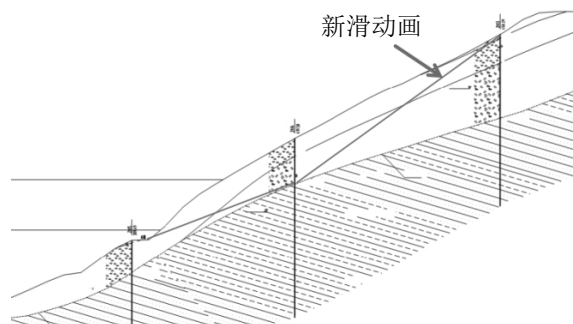


图 1 剖面 18-18'

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (R_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + R_n}{\sum_{i=1}^{n-1} (T_i \prod_{j=i}^{n-1} \psi_j) + T_n} \quad (4)$$

$$\psi_j = \cos(\theta_i - \theta_{i+1}) - \sin(\theta_i - \theta_{i+1}) \tan \phi_{i+1} \quad (5)$$

式中: F_s 表示滑坡稳定性系数; ψ_i 表示传递系数。 R_i 表示第 i 计算条块滑体抗滑力 (kN/m); T_i 表示第 i 计算条块滑体下滑力 (kN/m); N_i 表示第 i 计算条块滑体在滑动面法线上的反力 (kN/m); c_i 表示第 i 计算条块滑动面上岩土体的粘结强度标准值 (kPa); ϕ_i 表示

第 i 计算条块滑带土的内摩擦角标准值 ($^{\circ}$) ; l_i 表示第 i 计算条块滑动面长度 (m) ; α_i 表示第 i 计算条块地下水流线平均倾角, 一般情况下取浸润线倾角与滑面倾角平均值 ($^{\circ}$) , 反倾时取负值; W_i 表示第 i 计算条块自重与建筑等地面荷载之和 (kN/m) ; θ_i 表示第 i 计算条块底面倾角 ($^{\circ}$) , 反倾时取负值。

经过对参数的敏感性分析可以得出结论: 当 c 值一定, φ 值每降低 2 度, 滑坡体稳定系数降低 0.11 ~ 0.13; 当 φ 一定, c 值每降低 2 kPa, 滑坡体稳定系数降低 0.01 ~ 0.02。通过对比发现 F_s 对于 φ 值的敏感性远高于 c 值, 该滑坡的稳定性受 φ 的影响更大。因此, 在反演法计算中可以假定 c 值为定值, 对 φ 值进行反演计算, 更加符合实际工程需要。

3.2 新滑动面反演计算分析

反演计算分析采用的是变形最大的剖面 17-17' (见图 2), 反演计算的原理是利用公式 (4) 和公式 (5), 滑动面较为清晰地沿折线分布, 采用传递系数法计算边坡稳定性系数较为合理。从公式中可以看出, 未知参数有三个: c 、 φ 值和边坡的稳定性系数 F_s 。

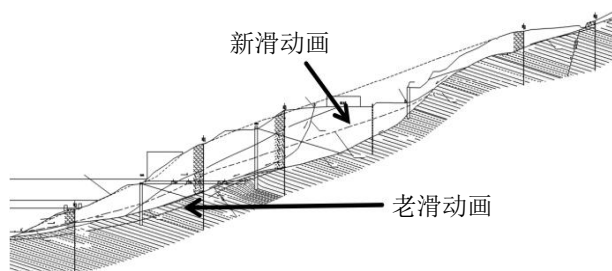


图 2 剖面 17-17'

1. 参数 F_s 的取值: 根据现有的规范《滑坡防治工程勘察规范》(DZ/T 0218-2006), 对边坡稳定性评价做了相应规定。

结合现场勘察实际情况, 根据现场深孔监测资料 Z6-08-24 号钻孔显示, 经过一年的位移观测, 该孔侧向位移累计 6.9 mm, Z6-8-21 号累计位移量为 9.8 mm, 并且滑坡体的顶部后缘出现大量拉裂缝, 局部抗滑桩出现剪切破坏, 滑坡前缘据深孔位移监测资料可知, 主滑坡中前部已复活, 复活后形成的新变形体后缘边界主要以拉张裂缝为界, 两侧及前缘与原滑坡边界一致, 属于整体变形, 微滑阶段特征。因此 F_s 的取值在 0.9 ~ 1.0 之间较为合适。此处假设 F_s 为 0.99。

2. c 值取值: 经过参数敏感性分析可知, c 对于安全系数的影响较小, 采用同样的方法进行室内试验和

现场试验, 分别按照 0.1 和 0.9 的权重比进行综合取值。得到 c 值为 12.72 kPa。

3. 反演计算 取剖面 17-17' 计算, 滑坡的前缘部分未出现大范围位移, 滑坡剩余推力取 0, 并将 $c=12.72$ kPa, 剩余推力为 0, 代入公式 (4)、(5), 最终得到滑坡的综合内摩擦角为 $\varphi=17.5^{\circ}$ 。

按照此参数取值方法, 综合取值, 对滑坡进行了重新治理, 经过监测显示, 滑坡位移得到了必要的控制。

4 结论

1. 滑动带位置的确定。参数选取中的第一步是确定滑动带的位置, 可以通过钻孔、平硐的方式找到滑动带位置。从钻心取样中可知, 老滑带土经过反复剪切后存在以下特征: (1) 钻孔中滑动土层与上下层存在较大差异; (2) 滑带土中砂石磨圆度较好。

2. 现场试验和室内试验综合取值。现场试验常见的是大型剪切试验, 现场原位试验比室内试验得到的参数更具代表性。通常情况下, 室内试验权重占比 0.1 ~ 0.3, 现场试验权重占比 0.9 ~ 0.7。这里我们选取了 0.9 和 0.1 经过验证, 是合理的。

3. 反演取值。由于边坡的复杂性, 地层变化的多样性, 同一边坡可能地层差异巨大, 无法通过试验反应整体的抗剪强度。但是可以根据边坡的位移监测结果或者变形结果来进行反算抗剪强度参数计算, 反算出来的 c 、 φ 值是边坡整体的抗剪强度参数。反演分析要根据滑坡体特征, 选定稳定性分析方法, 如传递系数法。反演分析是建立在现场试验和室内试验基础上的一套完整的取值方法。

参考文献:

- [1] 邓君君. 某土质滑坡参数选取及稳定性分析评价[J]. 土工基础, 2020, 34(03): 313-315, 325.
- [2] 江巍, 欧阳晔, 闫金洲, 等. 边坡岩土体抗剪强度的逆向迭代修正反演方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(08): 2287-2295.
- [3] 隆然, 刘兴东. 基于致灾机理分析的公路滑坡稳定性评价及治理方案研究[J]. 铁道勘察, 2023, 49(02): 33-37.
- [4] 吴必胜. 滑坡特征参数的选取探讨及应用研究[J]. 工程与建设, 2024, 38(02): 323-325, 336.
- [5] 冯阳, 李伟, 杨川. 基于 GeoStudio 的降雨-渗流耦合作用下边坡稳定性研究[J]. 土木工程, 2025, 14(04): 727-738.
- [6] 朱冬雪, 许强, 李松林. 三峡库区大型-特大型层状岩质滑坡成因模式及地质特征分析[J]. 地质科技通报, 2020, 39(02): 158-167.