

基于抗剪强度参数综合取值的滑坡稳定性分析

卢继强

中国能源建设集团浙江省电力设计院有限公司, 中国·浙江 杭州 310012

摘要: 滑带土抗剪强度参数是滑坡稳定性分析的核心。论文以重庆某滑坡为研究对象, 基于工程地质勘察资料, 采用现场大剪切试验、室内直剪试验及极限平衡传递系数法反演分析三种方法, 对滑带土抗剪强度参数展开研究。通过工程地质类比法综合三种方法结果, 得出综合参数为 $C=21.4\text{kPa}$ 、 $\varphi=17.87^\circ$, 并利用 Geo-studio 软件开展渗流场下的稳定性分析。结果表明: 直剪试验参数最小, 大剪切试验参数最大, 反演参数居中; 对应工况稳定性系数分别为 0.67、1.18、0.97, 而综合取值下稳定性系数为 0.978, 验证了综合参数的可靠性。研究为滑坡稳定性评价提供了多方法协同分析的参考依据。

关键词: 滑坡; 抗剪强度参数; 稳定性

Landslide Stability Analysis Based on Comprehensive Determination of Shear Strength Parameters

Jiqiang Lu

China Energy Construction Group Zhejiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310012, China

Abstract: The shear strength parameters of slip zone soil are at the core of slope stability analysis. This paper takes a landslide in Chongqing as the research object and, based on engineering geological investigation data, employs three methods—field large-scale shear tests, laboratory direct shear tests, and inverse analysis using the ultimate equilibrium transfer coefficient method—to study the shear strength parameters of slip zone soil. By integrating the results from these three methods through engineering geological analogy, a composite parameter $C=21.4\text{kPa}$, $\varphi=17.87^\circ$ is derived, and stability analysis under seepage field conditions is conducted using Geo-studio software. The results show that the direct shear test parameters are the smallest, the large-scale shear test parameters are the largest, and the inverse analysis parameters fall in between; the stability coefficients for corresponding conditions are 0.67, 1.18, and 0.97, respectively, while the stability coefficient under the composite value is 0.978, verifying the reliability of the composite parameters. This study provides a reference for the evaluation of landslide stability using multi-method collaborative analysis.

Keywords: landslide; shear strength parameter; stability

0 前言

滑带土抗剪强度参数的获取方法主要有室内土工试验、现场大剪试验、参数反演分析、统计分析和加权平均法^[1-2], 但各方法均存在局限性。室内土工试验易扰动滑带土样, 土样随机性大且颗粒细小, 仅能反映局部滑带土性质^[3], 致使参数偏小^[4], 且不同试验方案(如慢剪、蠕变试验等)下, 滑带土强度特性差异显著^[5]; 现场大剪试验虽能真实还原滑带土受力与颗粒形态, 但经济与时间成本高昂^[6]。Bhat、Maio、Wen 等^[7-9]基于蠕变试验对滑带土的残余状态的蠕变强度进行了研究, 发现其土样会沿着特定的预测曲线进行破坏, Miao 等^[10]通过自制的与环剪试验相匹配的渗流装置, 研究发现不同渗剪条件下滑带土的残余抗剪强度会体现出较大的差异; 而现场大剪试验法, 虽然其剪切面的受力状态和土样的颗粒形态与实际滑坡滑带土几乎相近^[11], 土样所受到的干扰很小, 但现场大剪试验所需的经济成本较大, 时间成本较高^[12]。

鉴于此, 论文针对上述方法的局限性, 结合滑带土由

大小颗粒交错构成的特性, 提出直剪试验反映小颗粒强度、大剪试验反映大颗粒强度、反演分析反映颗粒相互作用强度的思路。通过对应方法获取参数, 并利用工程地质类比法综合考量, 最终获得更接近实际的综合抗剪强度参数, 同时借助 Geo-studio 开展滑坡稳定性分析。

1 滑坡概况

1.1 滑坡基本特征

根据研究区内滑坡的空间形态和变形特征, 可将研究区分为①号滑坡、②号滑坡和强变形区, 其具体分布见图 1, 各个坡体的主要具体特征见如下描述:

①号滑坡: 滑坡呈圆弧状, 前缘高程 690m, 后缘高程 760m, 滑动方向约 115° , 斜坡坡度约 30° 。经勘查修正后, 滑坡区长约 120m, 平均宽度约 90m, 滑坡土层平均厚度约 13.0m, 总方量约 $14.0 \times 10^4\text{m}^3$ 。

②号滑坡: 滑坡方向约 178° , 长约 160m, 横宽约 150m, 根据本次勘查揭露堆积体土层平均厚度修正为 19m, 总方量约为 $45.6 \times 10^4\text{m}^3$, 变形不明显。

强变形区：该区域为局部强变形地段，滑动方向约 198°，斜长约 90m，平均宽度约 50m，滑体土层平均厚度约 5m，总方量约为 22500m³。已滑塌区于 2020 年 7 月 4 日上午 10 时左右在持续降雨条件下于强变形区右侧发生滑移破坏，滑坡的纵向滑移区长约 60m，宽约 50m，土层厚度约 5m，总滑坡方量约 15000m³。



图 1 滑坡平面图

1.2 滑坡变形特征

大丛树①号滑坡从 2017 年开始变形至今仍持续发展，②号滑坡未见明显的分裂发育，而强变形区已产生大量的拉张、剪切裂缝，裂缝呈弧形及羽状发展，已经完全贯通，并且已经发生了约 15000m³ 的局部滑坡。因此初步判定目前大丛树①号滑坡处于蠕变阶段；强变形区处于强变形阶段；大丛树②号不稳定斜坡目前变形迹象不明显。

为分析整个研究区内滑坡从变形开始到出现局部滑移的形变快慢，采用 INSAR 对滑坡所在的区域进行了遥感解译，滑坡变形迹象明显解译结果较为可观，同时将卫星所获的变形方向转换到了滑坡主滑方向，根据变形速率结果可知，①号滑坡的变形主要集中在后缘和前缘左侧，②号滑坡变形速率较小，强变形区的速率最大，每年变形速率达到 57.08mm/年。

2 滑带土抗剪强度参数综合取值

论文研究通过现场大剪切试验、室内直剪试验、反演分析方法，结合工程地质类比法对抗剪强度参数进行综合确定。

2.1 现场大剪试验分析

滑带土物质成分主要为第四系残坡积碎石土和粉质黏土，其重度根据碎块石及粉质粘土的天然重度的试验值，按土石比考虑架空等因素、现场大容重试验综合确定，代替重度取值：天然重度 19.5kN/m³，饱和重度 20.5kN/m³。同时在强变形区已发生的滑坡两侧边界做了 2 组大剪切试验，大剪切试验的综合结果为：天然抗剪强度值 C=27.4kPa，φ=23.3°，饱和抗剪强度值：C=24.8kPa，φ=21.0°。

2.2 室内直剪试验分析

根据所取滑带土样统计分析，因为②号滑坡处于弱变形阶段，因此②号滑坡滑带土抗剪强度取试验值峰值，但②号滑坡的强变形区处于强变形阶段，同时在强变形区内产生了局部滑坡，因此对其滑带土抗剪强度要分开分析，所以直接在已滑区内采取滑带土进行试验，对于强变形区采用峰值强度，已滑动地段采用残余抗剪强度，具体参数见表 1。

2.3 反演法取值分析

传递系数法也称不平衡推力传递法或剩余推力法，是一种比较实用的稳定性分析方法，得到了广泛应用。而传递系数法的基本原理为上一条块滑动力与抗滑力之差剩余下滑力不断传递下一条块直至最后条块，当计算最后的条块的抗滑力与下滑力的比值即可得到滑坡的稳定性系数。

基于滑坡的变形分析，强变形区目前变形明显，周界裂缝已经形成，且局部坡体已经发生滑移破坏，应选择已经发生滑动破坏的已滑区为剖面进行分析，并且还原滑坡发生之前的地貌作为研究对象。同时已滑塌区滑面稳定系数应在 0.95~1.00 取值，根据工程地质调查，因此稳定性系数取值为 0.98，与稳定性评价相符合，计算结果可信。因此，根据还原原始地面后的反演结果，对滑坡滑面强度参数取值见表 2。

表 1 室内测试滑带土抗剪强度指标标准值

天然峰值		饱和峰值		天然残值		饱和残值	
C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)	C (kPa)	φ (°)
17.1	8.2	13.3	8.75	12.6	7.0	9.8	7.19

表 2 反演取值表

反演位置	C (kPa)	φ (°)	变形阶段	稳定性评价	稳定性系数
已滑区	21.0	17.5	滑动阶段	失稳	0.98

2.4 综合取值分析

本研究区的滑带土的抗剪强度参数取值，根据工程地质类比法，结合现场大剪试验、直剪试验和反演分析的参数得到综合参数。依据各种分析方法反映的实际程度赋予不同的权重，由于反演的考虑的是整个坡体的相互结果，拥有整

体性的概念，因此其值权重取 0.5，由于现场大剪切试验更能反映滑带土体的物质结构等，相对于室内试验更具有真实性，所以现场大剪试验取值权重 0.4，由于室内试验的制样原因，其所得结果偏低，因此室内试验值权重 0.1，综合得到滑带土抗剪强度参数如表 3。

表 3 滑面强度参数综合取值表

参数	反演取值			室内试验值			现场大剪			综合取值	
	C (kPa)	φ (°)	权重	C (kPa)	φ (°)	权重	C (kPa)	φ (°)	权重	C (kPa)	φ (°)
结果	21	17.5	0.5	9.8	7.19	0.1	24.8	21	0.4	21.40	17.87

3 滑坡稳定性分析

3.1 滑坡计算模型及参数

以滑区主滑方向的剖面为基础建立二维计算模型（见图 2），采用 GeoStudio 软件的 SEEP/W 模块、SLOPE/W 模块的耦合计算，稳定性计算方法选择 Morgenstern-Price，模型网格划分采用四边形和三角形混合网格，节点为 34186 个，单元有 34766 个，其中滑体处网格划分较密，X 轴向右为正向，Y 轴向上为正向，坡体表面为降雨渗透水边界。

计算参数根据开展的室内直剪试验、现场大剪切试验、反演分析结果和综合参数作为滑带的基本物理力学参数、抗剪强度参数和变形模量等参数，滑体和滑床（基岩）的主要物理力学参数具体取值见表 4，初始含水率选择天然含水

量，对于滑带的基质吸力和渗透系数函数采用软件自带的经验函数采用 VG 模型，其中残余含水率为 0.1，选择滑坡发生之前的前 7 日的降雨量为渗流分析，以此渗流场为基础，计算不同分析方法下的滑坡稳定性系数进行对比研究。

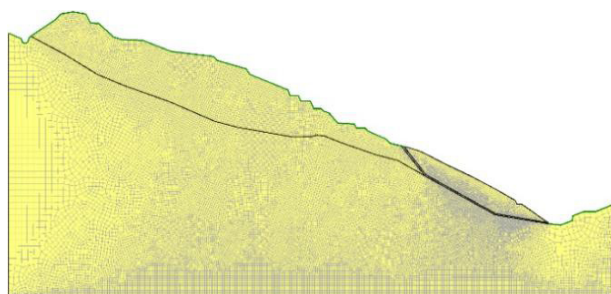


图 2 计算模型

表 4 岩土体参数

参数	含水率 %		重度 (kN/m ³)		粘聚力 C (kPa)		内摩擦角 φ (°)		渗透系数 (m/s)
	天然	饱水	天然	饱水	天然	饱水	天然	饱水	
滑体	20.8	26.2	20.4	20.6	30.5	25.1	25.2	21.5	1.9×10^{-6}
滑带	25.4	27.5	19.5	20.1	28.7	21.4	19.4	17.8	2.8×10^{-7}
基岩	\	\	26.7	27.8	95	\	45	\	1.5×10^{-10}

3.2 滑坡渗流场分析

渗流计算表明，随降雨持续，滑坡体上部土体含水率渐饱和并向下推移，孔隙水压力转为正值。监测显示，降雨初期含水率接近天然及残余状态，孔隙水压力负值，因 6 月 28~29 日雨量少，渗流场变化小。6 月 30 日起雨量增大，含水率和孔隙水压力急剧上升，随累计雨量增加，不同深度含水率渐饱和，孔隙水压力随深度增加而上升。

3.3 滑坡稳定性分析

基于上述分析的渗流场，对不同方法下的抗剪强度参数进行滑坡稳定性分析，根据数值计算可得：在现场大剪试验的参数工况下，滑坡的稳定性系数为 1.18，在室内直剪试验的参数工况下，滑坡的稳定性系数为 0.67，在反演的参数工况下，滑坡的稳定性系数为 0.97，在综合参数工况下，滑坡的稳定性系数为 0.978。由此可以看出，采用不同方式得到的参数来评价滑坡的稳定性状态，其差距相对较大，尤其是直剪试验的参数，相差最大，其次为大剪，见表 5。

表 5 各类分析方法下的滑坡稳定性

分析工况	直剪	大剪	反演	综合参数
F_s	0.67	1.18	0.97	0.978

根据整个渗流场的变化，对综合参数工况下的稳定性变化进行分析可知，当前期降雨较小时稳定性系数基本在

1.15 以上，滑坡处于稳定状态，当 7 月 1 日发生暴雨时，滑坡接近了欠稳定状态，随着降雨的持续推进，累计降雨量的增加，坡体内不同深度的含水率也逐渐增加，导致在中雨的条件下发生了滑坡。

4 结论

论文通过现场大剪切试验、室内直剪试验、滑坡参数反演分析，采用不同的方法获得滑坡土的抗剪强度参数，依据工程地质类比法将三者进行整合分析，得到具有可靠性的综合参数，同时将各个参数代入数值模拟软件中进行计算分析，验证其可适用性。论文主要研究成果如下结论：

①不同方法得到的滑带土抗剪强度参数，结果各异，具有较大的区别，直剪试验的参数最小，大剪切试验的抗剪强度参数最大，反演的抗剪强度参数适中，因此滑带土抗剪强度参数的取值应该综合考虑，不能单一取值，经过综合分析得到滑带土的抗剪强度参数为 $C=21.4\text{kpa}$ 、 $\varphi=17.87^\circ$ 。

②基于渗流场的分析，对各个方法的抗剪强度参数进行滑坡稳定性分析，直剪试验工况下的稳定性为 0.67，大剪切试验工况下的为 1.18，反演工况下的为 0.97，综合取值条件下的稳定性系数为 0.978，由此综合取值更具有可靠。

参考文献：

[1] 张迪,李岚星,胡新丽,等.长期静水浸泡对三峡库区滑带土物理一

- 化学—力学性质的影响[J].地质科技通报,2021,40(5):281-289.
- [2] 卢雪松,翁新龙,范文彦,等.金乐滑坡滑带土抗剪强度参数分析与确定[J].煤田地质与勘探,2009,8(4):57-60.
- [3] 马磊,李满意,魏燕珍,等.古滑坡滑带土强度特性及其影响因素研究[J].工程勘察,2016,44(2):23-26.
- [4] 周剑,张路青,戴福初,等.基于黏结颗粒模型某滑坡土石混合体直剪试验数值模拟[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S1):2650-2659.
- [5] 杨文剑,刘怀忠,谢红强,等.基于直剪试验的堆积碎石类材料细观参数标定方法及模拟验证[J].工程科学与技术,2022,54(3):46-54.
- [6] 刘梦琴,陈勇.基于直剪试验的滑带土强度再生特征研究[J].人民长江,2018,49(18):92-96.
- [7] Di Maio C, Scaringi G, Vassallo R. Residual strength and creep behaviour on the slip surface of specimens of a landslide in marine origin clay shales: influence of pore fluid composition[J]. Landslides,2015,12(4):657-667.
- [8] Wen B, Jiang X. Effect of gravel content on creep behavior of clayey soil at residual state: implication for its role in slow-moving landslides[J]. Landslides,2017,14(2):559-576.
- [9] Bhat D R, Bhandary N P, Yatabe R. Residual-state creep behavior of typical clayey soils[J]. Natural Hazards,2013,69(3):2161-2178.
- [10] Miao F, Zhao F, Wu Y, et al. A novel seepage device and ring-shear test on slip zone soils of landslide in the Three Gorges Reservoir area[J]. Engineering Geology,2022(307):106779.
- [11] 习小山,刘成光,景辉.原位大剪试验与室内剪切试验的对比探讨[J].中国新技术新产品,2011(8):76-77.
- [12] 王其洪,叶四桥,王凯,等.滑坡强度参数遴选方法研究及应用[J].科技资讯,2008(32):74-76.
- 作者简介: 卢继强 (1977-), 男, 中国浙江杭州人, 硕士, 高级工程师, 从事岩土工程勘察及工程地质技术管理研究。