

# 直流电阻率测深 在川西高原康定白土坎滑坡勘探中的应用

唐声海

(四川地勘局一〇一探矿工程队, 广汉, 618300)

**提要** 结合勘探实例, 介绍电测深用于高原滑坡勘探的野外方法及该类滑坡的电测深曲线特征、资料解释。证明电测深在高原滑坡勘探中的有效性, 对此类滑坡的电探工作提出某些见解。

**关键词** 电测深 滑坡 破裂面 (带)

## 一、引言

滑坡是灾害地质研究的主要课题。电测深法是电探中的一个分支, 是成熟而较老的方法, 用于滑坡勘探的范例甚少, 目前处于探索与发展中。

电探勘察的目的是: 查明滑体结构、滑面埋深、地下水的分布状况。滑坡断面电性, 平面电性是对滑坡作出地质解释的主要依据。要使测深资料作出符合实际的地质解释, 必须了解滑坡的主要地质特征及所产生的电性特征。依据电性特征, 综合分析滑坡岩土体结构, 找出在地面反映微弱的滑坡结构信息, 查明影响滑坡稳定或诱发滑坡滑移的隐伏小断层、破裂面 (带) 的形态及位置, 为地质分析研究提供翔实资料。

\* 滑坡勘探目前使用网格化布置工程, 孔 (井) 间距有限。对于孔间的小断层、隐性破裂面 (带) 的控制是困难的。高密度的地球物理手段能加以弥补, 提供更加详细的资料。某些崩塌滑坡与变形斜坡经数值法计算, 认为是稳定的, 而实际情况却在蠕动, 危岩、斜坡变形在发展。“微观”研究滑坡的人们已把目光移向高密度的综合物探与高精度的位移监测。地质人员依据地面变形特征, 综合物探的地质解释, 深部监测等资料, 对滑坡的稳定性作出符合实际的评价, 对治理提出经济合理的设计方案, 已成为发展的必然趋势。运用综合物探手段, 分析地质资料, 研究物探图件, 对滑坡作出合理的地质解释, 对物探人员尤为重要。本次电测勘探经钻探和深部位移监测证实效果较好, 经济效益明显。

本文旨在结合实例, 提出粗浅见解, 总结经验, 提高认识, 使电探工作在灾害地质勘查中发挥更大作用。

## 二、概述

电测工作布置前, 必须认真分析滑坡地质环境背景, 了解所要达到的地质目的, 在此基础上着手布置工作。

### 1. 地形、地貌

白土坎滑坡处于甘孜高原深切河谷地带, 是老滑坡北侧部分经后期多次滑动而形成。滑坡地貌纵向上

\* 作者简介 唐声海, 男, 43 岁, 工程师。从事物探技术方法研究。

台阶迭置, 横向上稍有起伏, 平面上呈圈椅状(图1)。顶点标高2810 m, 前缘标高2535 m, 高差275 m, 均长540 m, 均宽560 m。后缘断壁清楚, 高20~40 m, 宏观上可见三级平台, 其中、级平台前缘坡角均在30°以上。

级平台前缘坡角在10~15°, 整体地形呈前、后陡, 中部平缓之态势。

折多河由南向北经滑坡前缘, 并不断侧蚀掏挖前缘坡脚, 使得前缘部分地段经常发生溜滑、坍滑, 且规模呈增大之趋势, 对滑坡的稳定构成威胁。

2. 构造与地震

康定地区属于甘孜地槽东部的印支褶皱带雅江复向斜东端, 与康滇台背斜北段相接。在区域断裂构造上, 滑坡位于鲜水河断裂南东段的康定断裂带。

康定城区位于著名NNW向鲜水河大断裂、NNE向龙门山大断裂及近SN向安宁河大断裂的交汇部。地质构造异常复杂, 地层经多次构造错动而破碎、缺失, 节理裂隙十分发育。与滑坡较为密切的断裂主要为F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>断层。F<sub>1</sub>断层为逆断层, 区域走向近于南北, 沿断裂带有多温泉出露, 断层错动, 下盘千枚岩破碎, 产状极为紊乱, F<sub>1</sub>断层被后期的平移断层F<sub>2</sub>错断, F<sub>2</sub>走向NNW, 为滑坡北侧边界。

康定城处于鲜水河、龙门山及安宁河地震带的交汇部位, 鲜水河地震带是一条活动的大地震带, 三条带组成一个“Y”字形(见图2)。地震活动频繁。1748年10月到1976年8月, 康定及康定地区发生4.7~7.5级地震18次, 烈度~度, 构造与地震活动或多或少要影响滑坡稳定性与地貌形态。

滑坡复活地段除区域性构造及断层F<sub>1</sub>、F<sub>2</sub>外, 还存在近于垂直滑移方向上的裂隙带, 据地质力学分析判断与多个典型古滑坡复活后的考证得知: 坡体上存在这类性质裂隙或断裂较多时, 且它们相间排列平行状分布坡体之中, 将成为控制斜坡地貌形态或形成坡体病害的主控构造, 因此查明垂直滑移方向上的断裂或裂隙等的分布与隐伏位置, 以及其中地下水的分布, 成为研究滑坡病害成因机制及稳定性评价, 并为防治工程设计提供依据所关注的主要问题。

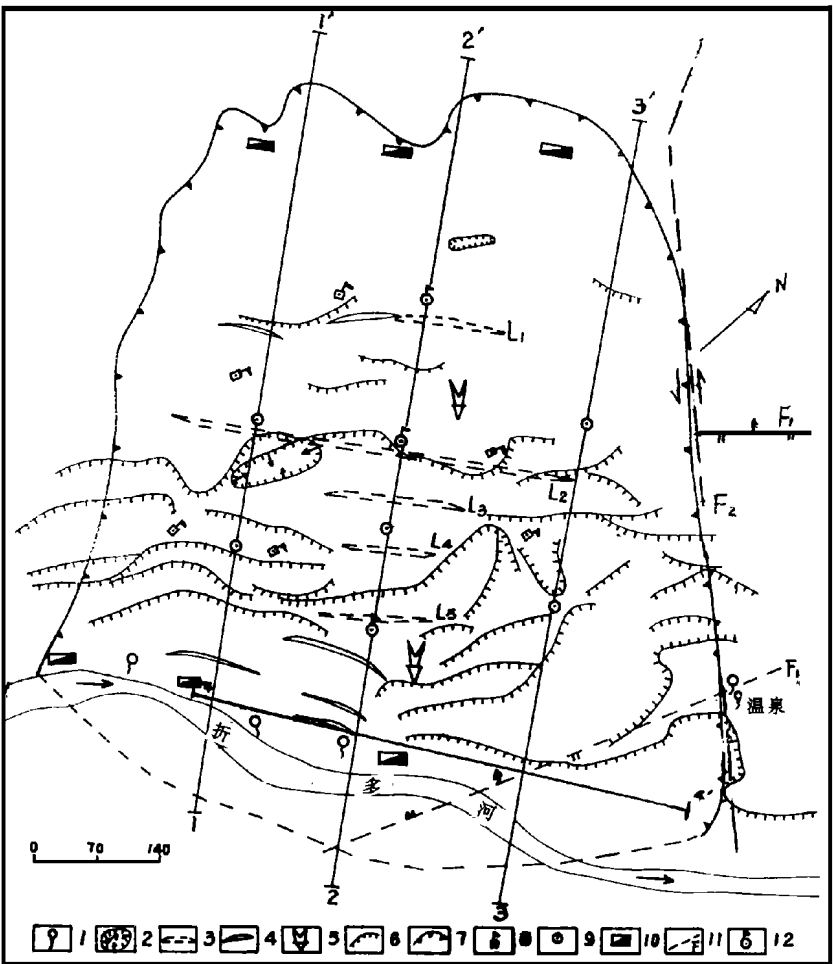


图1 康定白土坎滑坡勘察平面图

### 3. 滑坡区地层与岩性

滑坡区主要地层为志留系茂县群第一岩组  $S_{mx}^1$ , 岩性为灰绿色绢云母千枚岩, 另见少量黑色碳质千枚岩夹薄层白云质大理岩, 产状  $260 \sim 320^\circ 25' \sim 55'$ ; 强 ~ 弱风化。节理裂隙发育, 主要为  $130^\circ 58'$ ;  $95^\circ 53'$ ;  $184^\circ 37'$  三组节理。

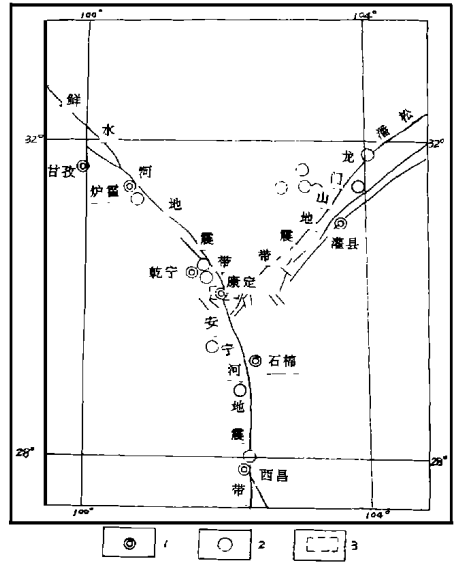
### 4. 滑坡地球物理特性

根据定量计算和区域物性资料, 水的电阻率  $15 \sim 25 \Omega \cdot m$ ; 大理岩电阻率  $725 \sim 3000 \Omega \cdot m$ , 千枚岩电阻率  $89 \sim 460 \Omega \cdot m$ 。因此有  $\rho_{\text{大}} > \rho_{\text{千}} > \rho_{\text{水}}$  的关系, 岩石风化程度越强, 含水时电阻率越低。水在岩石中的含量, 引起岩体电阻率显著变化, 滑坡电性特征则是三种物质电阻率的综合反映。研究三者之间的关系, 成为分析滑体结构、滑床埋深、地下水分布的主要依据。水量的变化直接影响岩体力学性质参数  $C$ 、 $\Phi$  的大小。并可概略为反比关系, 水量与岩体的电阻率也可概略为反比关系, 由此可近似认为滑体土电阻率与滑体力学参数  $C$ 、 $\Phi$  值成正相关, 可以解释滑体土电阻率低, 滑体力学参数  $C$ 、 $\Phi$  值小, 抗剪强度低。通过滑坡电场的研究, 可查明滑体结构, 分析滑体地质特征。因而滑坡具有开展电探的地球物理前提。

### 5. 电测工作布置原则

- ①电测深剖面应布置在主滑方向上 (与地质勘探剖面重合), 便于资料对比, 提高资料准确程度。
- ②布极方向应与主滑方向近于垂直, 可综合分析滑坡横向上电性特征。
- ③点距一般  $20 \sim 40 m$ , 便于查明拉裂状况, 提高勘探质量。
- ④装置选用不连续对称四极装置, 减小微地貌的影响。
- ⑤极距: 最大供电距必须超过估计滑床埋深  $3 \sim 4$  个极距点。

对突变点加密测量, 增加原始数据的可靠性和实用性, 为了保证观测精度, 应选较小的  $MN/2$ 。白土坎滑坡布置剖面 4 条, 并在前缘布置横剖面, 点距  $5 \sim 40 m$ ,  $AB/2 (\min) = 1.0m$ ,  $AB/2 (\max) = 250 m$ , 采用不等比非连续装置, 布极方向与主滑方向大致垂直。



1. 县城; 2. 震中位置; 3. 工作区

图 2 地震带分布示意图

## 三、滑坡电测深曲线

### 1. 定性分析

滑坡破裂带 (或裂隙带) 形成的低阻体及滑动界面 (或滑带土) 的土体形成的低阻界面在测深曲线上呈低阻点显示 (图 3)。白土坎滑坡测深曲线类型主要有  $QQ$  型、 $KQ$  型、 $HK$  型几大类。曲线首枝反映表层较干燥的粉质粘土夹碎块石或散粒状的层状碎裂岩。上升段对应的是较大块体的大理岩或细粒物少、湿度小的滑体土。下降段对应的是湿度大, 细粒物多, 风化程度高的滑体土。测深曲线右枝多为下降段低阻点, 反映含水性好的破裂带 (或裂隙带) 的下延界面或滑带土界面, 尾枝曲线一般呈低阻渐近平缓, 尾枝的上升段表明滑床为大理岩或起码接进于微风化的岩石。钻探基本证实了定性解释成果。

### 2. 定量解释

白土坎滑坡横向起伏小, 微地貌对  $MN/2$  影响小, 定量解释采用量板法和切线法相配合进行, 以提高解释的合理性。定量解释后, 结合滑坡地质资料及电测深参数统计规律, 参照等  $\rho_s$  断面图, 利用经验系数进行修正, 使电探结果与实际地质情况吻合。经验表明勘探深度  $H$  等于经验系数  $K$  与定量解释结果  $H$  的

乘积。 $K = 0.80 \sim 0.95$ ，随着勘探深度的增大， $K$  值有逐渐减小的趋势。电探成果经钻探及地质编录资料证实，解释精度较高。例如图 4 的 3 号钻孔，6 m 以上为层状碎裂岩，21 m 段风化强，湿度大，至 22 m 段含水性好，35 ~ 38.4 m 段粘土夹碎块石，底部有 0.20 m 厚粘土夹碎屑，地质上定为滑带土，38.4 m 后为弱风化千枚岩。

# 四、滑体土、滑带土、滑床岩石电性

## 1. 滑体土电性

白土坎滑坡滑体土电阻率  $120 \sim 3000 \Omega \cdot m$ ，电性离散度大，电阻率的高低主要与土体含水量的多少有关。后缘滑体土含水量少，电阻率高，大于中、前部滑体土电阻率，滑体土上部电阻率大于滑体土下部电阻率。陡坎地段，滑体土松散，呈饱气状态，形成高阻隆起；破裂带电阻率呈低阻体显示，钻孔及深部位移监测证实破裂带存在。 $\rho_s$  断面图滑体后部呈条带状，中前部等值线为封闭的高、低阻交替异常，推测为“古拉裂（破裂）”所致。拉裂带为低阻体，远离拉裂电阻率增高呈高阻体。随着深部地下水

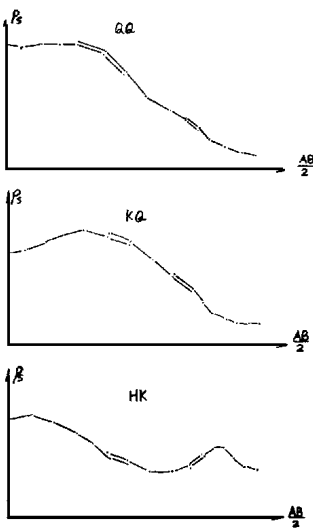
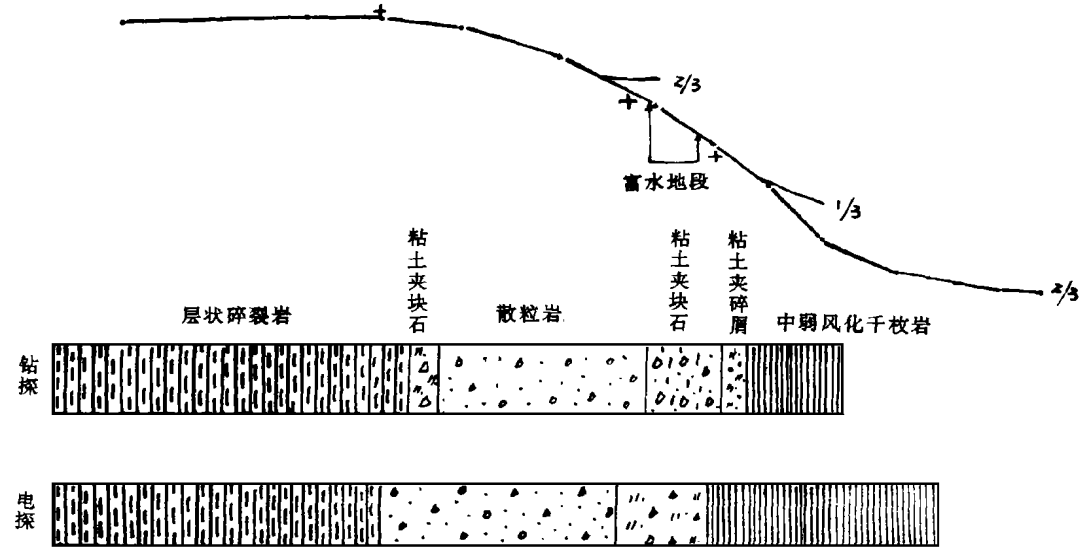


图 3 主要曲线类型



+ 电性层标志点 1/n 上、下层电阻比值  
图 4 3 号钻孔柱状图和电测深曲线解释成果图

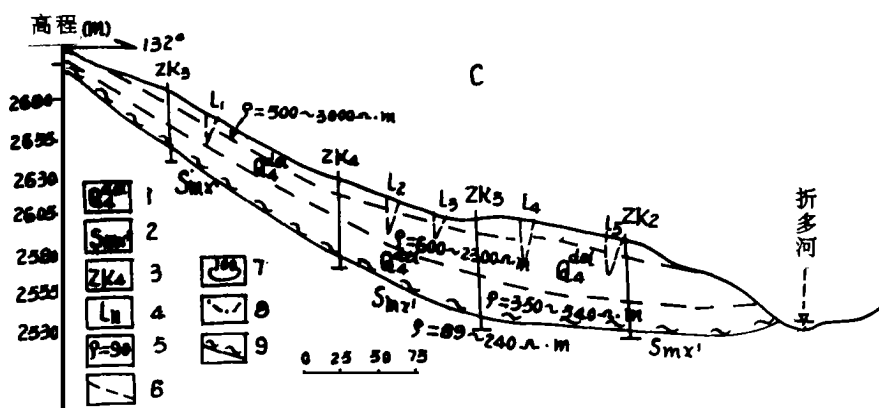
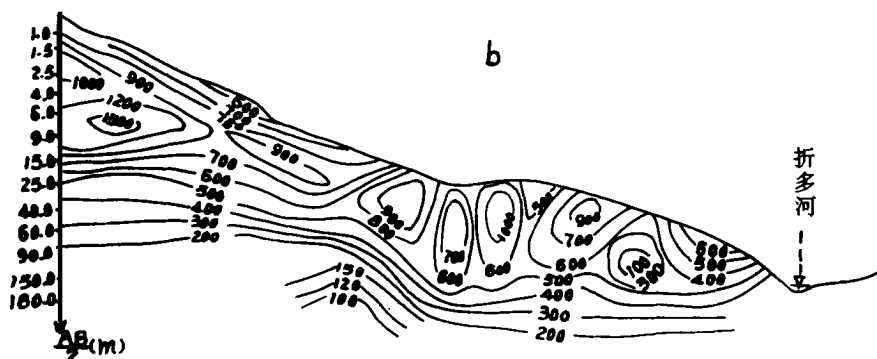
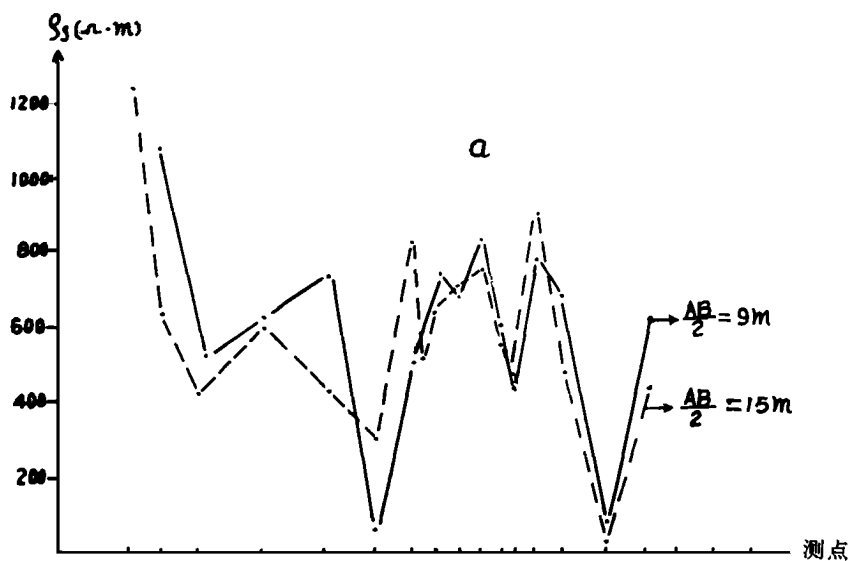
的连通，水位附近  $\rho_s$  等值线渐变成条带状（图 5）。

## 2. 滑带土电性

滑带土为粘土含碎屑，电阻率为数  $10 \Omega \cdot m$ 。它是岩土体滑移时的动力作用在滑动界面附近一定厚度内使岩土体发生物质结构变化的产物。该段土体与上部、下部（滑床）存在电性差异。滑带土含水性好，矿化度高，电阻率低，可塑性好，抗剪强度低。测深曲线区别困难；当滑带土厚度较大、滑床岩石呈微风化时，较易判断。

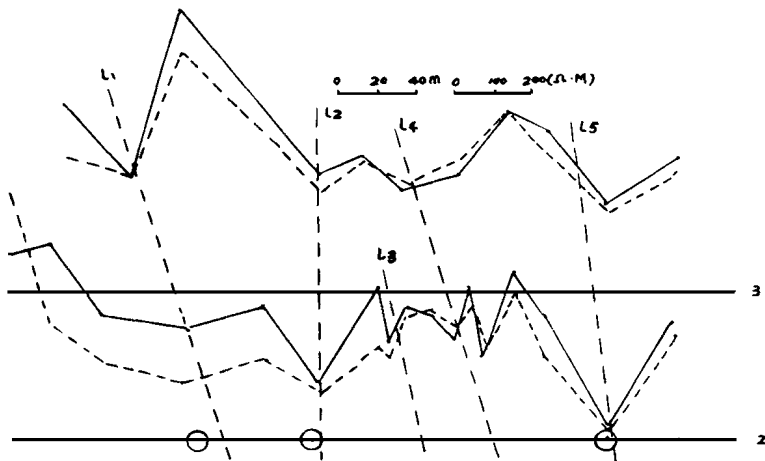
## 3. 滑床电性

滑床电性离散度小。因局部岩性差异，滑床电性呈多样化，总体上呈条带状，电阻率  $89 \sim 360 \Omega \cdot m$ 。



1. 第四系滑坡堆积物; 2. 志留系茂县群第一岩组; 3. 勘探孔; 4. 推断古拉裂;  
5. 岩性段电阻率; 6. 推断岩性界线; 7.  $\rho_s$  断面等值线; 8.  $\rho_s$  剖面异常; 9. 推断滑面位置

图 5 a、等电极距  $\rho_s$  剖面 b、 $\rho_s$  断面等值图 c、地电断面图



$L_1$  拉裂缝 深部位移监测孔

图 6 等电极  $\rho_s$  平面剖面图

## 五、破裂带在 $\rho_s$ 平面、断面图上的特征

破裂带呈低阻区区别于正常地段，在  $\rho_s$  等值图上形成高低阻交替出现的封闭等值线，在等电极  $\rho_s$  剖面与等电极  $\rho_s$  平面剖面图上呈高低峰上下起伏（图 5、图 6），可确定破裂带的走向和延伸深度及宽度。

## 六、结论

通过电测深勘查，基本查明白土坎滑坡在控制段内滑床标高 2527~2697 m，滑体厚度 11~52 m。滑床呈南高北低，滑面倾角西陡东缓，推测坡体存在 5 条破裂面（古拉裂）。根据破裂面的排列，岩石破碎、搓柔、挤压的特征，推断古滑坡是构造和地震活动综合作用的产物，近几十年的地震活动及构造活动使滑坡稳定性趋差。坡体上相间排列呈平行的裂隙（破裂面）与折多河淘蚀作用，成为控制滑坡地貌形态的主控因素。

直流电阻率测深用于灾害地质勘查是可行的，通过各种图件的分析、研究，可以查明滑坡要素和形态，查出某些诱发滑坡、斜坡变形的隐患因素，并可节约勘查经费，产生良好的社会效益。本文中曾得到水文地质工程地质高级工程师鲜文凯、郑勇、郑万模的帮助，在此表示谢意。由于水平有限，文中不足之处请同行指正。

### 参考资料

- [1] 孙广忠. 地质灾害勘察工作中的若干问题. 中国地质灾害与防治学报. 1994
- [2] 唐声海. 电测深在滑坡勘查中的应用. 四川地质学报, 第 4 期, 1997