

文章编号: 1674—8247(2020)06—0069—05

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2020.06.013

## 膨胀土边坡溜塌岩体力学性质衰变综合测试

熊招美

(中铁十七局集团第二工程有限公司, 西安 710043)

**摘 要:**膨胀土性质特殊,地区差异性明显,其易扰动的特性决定了对该类土体的评价方法多为原位测试。本文通过对云南省弥蒙铁路某膨胀土边坡溜塌段进行高密度电法、高密度面波的原位测试实验,分析了边坡土质分布特征,评价了该边坡的溜塌原因。结果表明,路基边坡溜塌的主要原因在于区域土体裂隙发育,结构性变化较弱,具体表现为土体电阻率的增大、横波波速的降低和弹性模量的减小。在降雨及工程扰动作用下,裂隙土内部物质组成、颗粒接触关系、孔隙性急剧变化,进而影响其物理力学特性,边坡稳定性降低而产生溜塌。高密度电法和高密度面波两种原位测试方法的结合适用于评价此类边坡岩体力学性质的衰变。本文研究成果对云南地区的膨胀土边坡防护具有指导意义。

**关键词:**铁路边坡; 膨胀土; 溜塌; 原位测试; 裂隙土

**中图分类号:** TU443

**文献标志码:** A

## Comprehensive Test of Mechanical Property Decay of Collapsed Rock Mass on Expansive Soil Slope

XIONG Zhaomei

(The 2nd Engineering Co., Ltd of China Railway 17 Bureau Group Corporation, Xi'an 710043, China)

**Abstract:** Expansive soil has special properties and obvious regional differences, and it is easily disturbed, which determines that the evaluation method of this kind of soil is mostly in-situ test. In this paper, the in-situ tests with high-density electrical method and high-density surface wave method are carried out on the collapsed section of the expansive soil slope of Mile-Mengzi Railway in Yunnan Province, and the soil distribution characteristics of the slope are analyzed, and the reasons for the collapse of the slope are evaluated. The results show that the main reason of subgrade slope collapse lies in the development of regional soil fissures and weak structural changes, which are manifested in the increase of soil resistivity, the decrease of transverse wave velocity and the decrease of elastic modulus. Under the action of rainfall and engineering disturbance, the internal material composition, particle contact relationship and porosity of fissure soil change rapidly, which further affects its physical and mechanical properties, and the slope stability decreases, resulting in collapse. The combination of high-density electrical in-situ test method and high-density surface wave in-situ test method is suitable for evaluating the decay of mechanical properties of this kind of slope rock mass. The research results of this paper have guiding significance for expansive soil slope protection in Yunnan.

**Key words:** railway slope; expansive soil; collapse; in-situ test; fissure soil

收稿日期:2020-06-24

作者简介:熊招美(1979-),男,工程师。

基金项目:地震联合基金重点项目(U1939209);中铁十七局科研开发项目(202010030)

引文格式:熊招美.膨胀土边坡溜塌岩体力学性质衰变综合测试[J].高速铁路技术,2020,11(6):69-73.

XIONG Zhaomei. Comprehensive Test of Mechanical Property Decay of Collapsed Rock Mass on Expansive Soil Slope [J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(6):69-73.

我国膨胀土发育,分布区域主要集中在西南、西北、东北,黄河中下游地区,总面积在 10 万  $\text{km}^2$  以上。膨胀土的粘土矿物成分主要由亲水矿物组成,同时具有吸水显著膨胀软化和失水收缩干裂两种特性,为具有湿胀干缩往复变形的高塑性粘土<sup>[1]</sup>。膨胀土土质性质特殊,给工程设计和施工带来巨大影响,处理不当将给路基、边坡等带来严重的安全隐患。因此,明确膨胀土的工程性质对于膨胀土地区的工程建设具有重大意义。

膨胀土易受扰动,室内测试结果往往不能真实地反映现场情况,因此,膨胀土的原位测试就显得十分重要。高密度电法测试和面波勘探是目前相对安全、快速、经济、无损、可靠的探测方法,对膨胀土路基检测是行之有效的。李建文等人<sup>[2]</sup>采用高密度电法和浅层地震法综合物探与钻探相结合进行了采空区勘察,查明膨胀土下伏采空区的深度、范围及工程特性,并开展膨胀土的土性试验。张继令等人<sup>[3]</sup>将面波勘探应用在南昆铁路路基基床膨胀土病害检测中,探查出在基床换填渗水土与原基床顶面之间有一薄层软化层。目前,国内对于膨胀土的原位测试方法较为单一,采用多种方法结合并对膨胀土边坡进行现场测试的手段仍然较少。

本文以云南弥蒙铁路某溜塌路段的膨胀土路基边坡为研究对象,采用高密度电法测试和高密度面波勘探相结合的联合勘探方法,研究该类型铁路边坡内部电参数、剪切波波速等变化,分析路基边坡溜塌原因,

进而研究边坡溜塌的破坏模式,为后续膨胀土路基边坡研究提供参考。

## 1 边坡特征

选取云南省弥勒至蒙自铁路某路段的膨胀土路基边坡作为研究对象。该边坡位于竹园一册普断陷盆地内,该盆地属北东构造沉陷带,为一新第三纪湖积盆地。测区地形平缓,起伏较小,地面高程 1 140 ~ 1 181 m,相对高差约 41 m。根据地质调查揭露结果,本段线路以挖方路基通过,中心最大挖深约 13.1 m,表层覆盖松软土、膨胀土、泥炭质土、淤泥质土、粉细砂。其中松软土褐黄、灰褐等色,软塑状,土质不纯,局部含砂质及少量细圆砾,黏性较强,可见钙质结核。膨胀土硬塑状,厚度大于 20 m,综合判定为中等~强膨胀土。泥炭质土呈灰黑、黑色,硬塑状,内含大量腐植物,质轻,污手,夹黏性土,呈透镜体状。段内地下水对混凝土结构侵蚀等级为 H1。

边坡地表为黏土(松软土),厚 1.5 ~ 6 m,下部为第三系中强膨胀土,厚度大于 50 m,地下水埋深 1 ~ 2 m。设计按两级边坡防护,一级边坡为锚杆框架梁灌草护坡,防护高度为 6 m,坡率为 1:2,锚杆长度为 8 m;二级边坡防护为方格型截水骨架护(无锚杆),高 0 ~ 6 m,坡率为 1:2,间距为 2.5 m × 2.5 m,边坡平台宽度为 3 m。一级边坡坡脚设置桩板墙锚固桩防护,桩长 16 m,桩间距 6 m,锚固桩截面尺寸为 1.5 m × 2 m。路堑坡顶设置截水天沟,如图 1 所示。

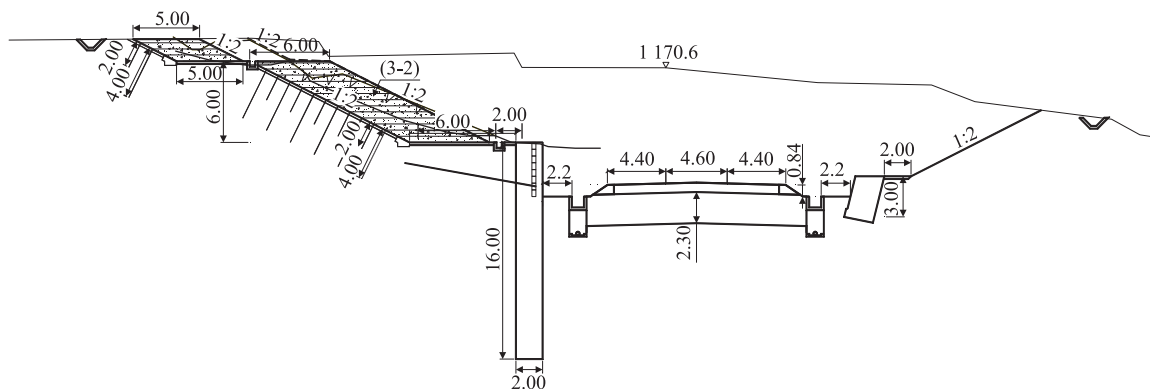


图1 路基设计图(m)

## 2 现场测试方法

该段路基边坡存在着大量膨胀土,工程开挖扰动及降雨会对土的性质及结构等产生影响,存在诱发边坡溜塌的风险。基于该地区膨胀土的工程特性,需对该边坡进行原位测试研究,为后续施工及工程处治措

施提供依据。

### 2.1 高密度四极电测深法及高密度面波法测试原理

本次测试采用高密度四极电测深法和高密度面波法。其中,高密度四极电测深法是基于直流电测深开发的,存在 4 个电极的电测深法,它是在地面的 1 个测深点上(即测量电极 MN 的中点),通过逐次加大供电

电极(AB极距)的大小,测量同一点的不同AB极距的视电阻率。其计算表达式为:

$$\rho = K \frac{\Delta V_{MN}}{I} \quad (1)$$

式中: $\rho$ ——两被测量电极间的电阻率( $\Omega \cdot m$ );

$K$ ——与电极排序相关的装置系数;

$\Delta V_{MN}$ ——电极间的电压值;

$I$ ——电极间的电流值。

高密度面波勘探方法具有精度高、可靠性好等特点,在国外被广泛应用在工程地质勘探中。该方法利用人工激发产生的面波,根据瑞雷面波的频散特性,通过对原始数据的分析,进一步反演,来获得浅层、超浅层的地质结构及介质物理参数。数据处理流程包括预处理、波形处理、频散分析、二维分析与作图。其基本原理为均匀介质中含面波速度的瑞雷波动方程的求解<sup>[4]</sup>,如式(2)所示。

$$\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^6 - 8\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^4 - \frac{2(2-\sigma)}{1-\sigma}\left(\frac{V_R}{V_s}\right)^2 - \frac{8}{1-\sigma} = 0 \quad (2)$$

式中: $V_R$ ——面波波速(m/s);

$V_s$ ——横波波速(m/s);

$\sigma$ ——泊松比。

## 2.2 测线布设

为探测地下的地层分布情况,在弥蒙 DK 44 + 710 至 DK 44 + 970 段边坡进行高密度四极电测深法和高密度面波法勘探。其中高密度四极电测深法共布设4条测试,横纵剖面各2条,电极间距2 m,测线1长度约为250 m,测线2长度约为220 m,测线3位于DK 44 + 730处,属于未溜塌区域,测线4位于DK 44 + 860处,属于溜塌区域,长度各约180 m。高密度面波法共布设2条测线,横纵剖面各1条,分别为测线1方向,长240 m,测线3方向,长180 m,如图2所示。检波器间距设为2 m,为1 × 24排列,每次测试移动12个检波器的位置,直至完成整条测线的测试。

## 2.3 高密度四极电测深法测试结果

利用高密度四极电测深法对地下岩土进行勘探,得到开挖后4条剖面线地下深度方向的电阻率分布,如图3所示。

从图3可以看出,沿测线1、2的路基纵剖面的电阻率沿深度分布逐渐改变,反映了地质构造的逐渐变化。从沿测线方向的电阻率分布来看,除去表面环境等因素的影响,DK 44 + 710 ~ DK 44 + 820 段(未溜塌区域)电阻率分布较为均匀,结合地质勘查资料,该区

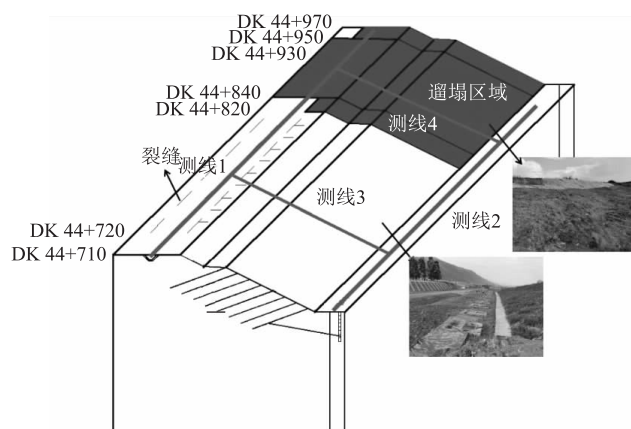


图2 边坡高密度四极电测深法和高密度面波法测线布设图

域深度方向主要以低电阻率的膨胀土为主,电阻率约为数10 ~ 30  $\Omega \cdot m$ ; DK 44 + 820 ~ DK 44 + 970 段(溜塌区域)内存在电阻率增大的现象,电阻率可达50  $\Omega \cdot m$ 以上。对横向剖面电阻率分布进行分析,可以看出,测线3(未溜塌区域)电阻率分布较为均匀,主要分布于0 ~ 100  $\Omega \cdot m$ ,高电阻率区域较小;测线4(溜塌区域)内的高电阻率(> 300  $\Omega \cdot m$ )区域较大,且主要集中在路基边坡部分。

基于此现象,对电阻率频数进行统计,如图4所示。在纵剖面上以转折点作为阈值,即电阻率为50  $\Omega \cdot m$ 时,进行土性材料划分;在横剖面上以转折点作为阈值,即电阻率为80  $\Omega \cdot m$ 时,进行土性材料划分。划分结果如图5所示。

从图4、图5可以看出,主要溜塌区域(DK 44 + 820 ~ DK 44 + 970 段)存在着较多的高电阻率土性材料(裂隙土),裂隙发育,与未溜塌区域(DK 44 + 710 ~ DK 44 + 820 段)以低电阻率土性材料为主的现象存在着差异,土的结构、力学等性质存在差异。

## 2.4 高密度面波法测试结果

对边坡路基相交剖面进行高密度面波法勘探,得到地下介质剪切波波速分布结果,如图6所示。

从图6可以看出,由于上部环境的影响以及工程的扰动,该层土体剪切波速度较小,分布于0 ~ 2 m范围内。随着深度的增加,剪切波速度逐渐增大。结合钻孔资料,以250 m/s为阈值,0 ~ 8 m深度处存在膨胀土夹裹松软土,局部夹杂泥炭质土;深度8 m以下,主要以膨胀土结构为主,剪切波速度大于250 m/s,结构性完整度稍高,弹性模量等物理力学特性较强。在DK 44 + 820 ~ DK 44 + 970 区域段,土层的剪切波速度减小,结构性完整度稍低,弹性模量等物理力学特

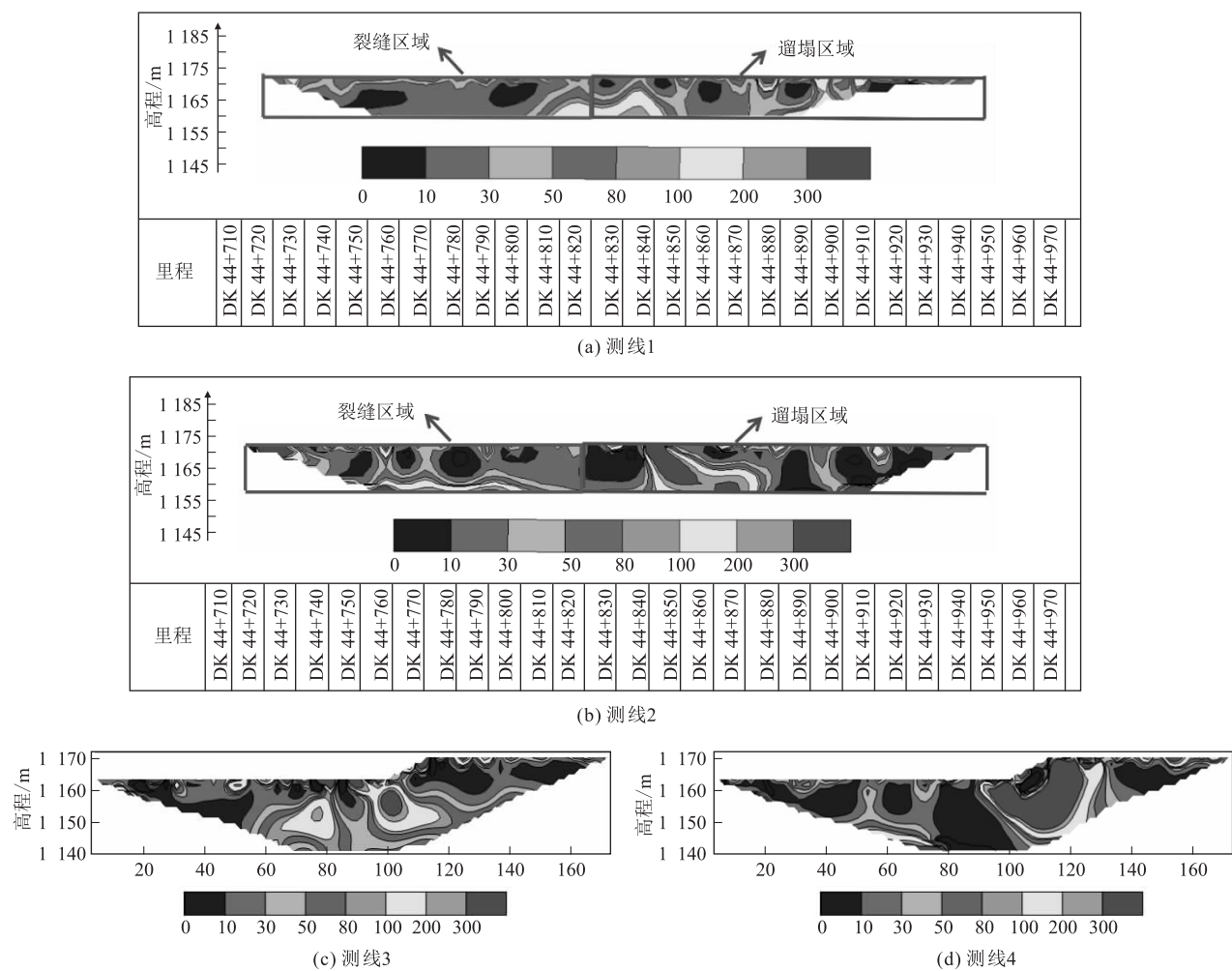


图3 基于电阻率频数统计的土体材料划分图

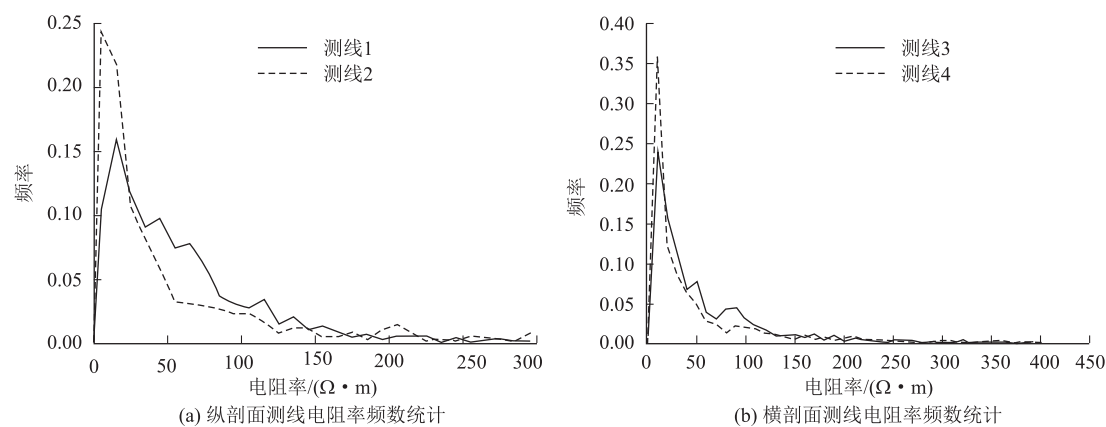


图4 电阻率频数统计图

性较弱。

### 3 联合分析

根据高密度四极电测深法、高密度面波法测试结果可知,路基边坡溜塌的主要原因在于区域土体裂隙发育,结构性变化较弱,具体表现为土体电阻率的增

大、横波波速的降低和弹性模量的减小,如图7所示。DK 44 + 710 ~ DK 44 + 820 区域内(边坡未溜塌区域)的平均电阻率为  $75.3 \Omega \cdot m$ , 平均剪切波速度为  $262.3 \text{ m/s}$ ; 而DK 44 + 820 ~ DK 44 + 970 区域内(边坡溜塌区域)的平均电阻率为  $103.6 \Omega \cdot m$ , 存在着增大趋势, 平均剪切波速度为  $244.9 \text{ m/s}$ , 存在着减小



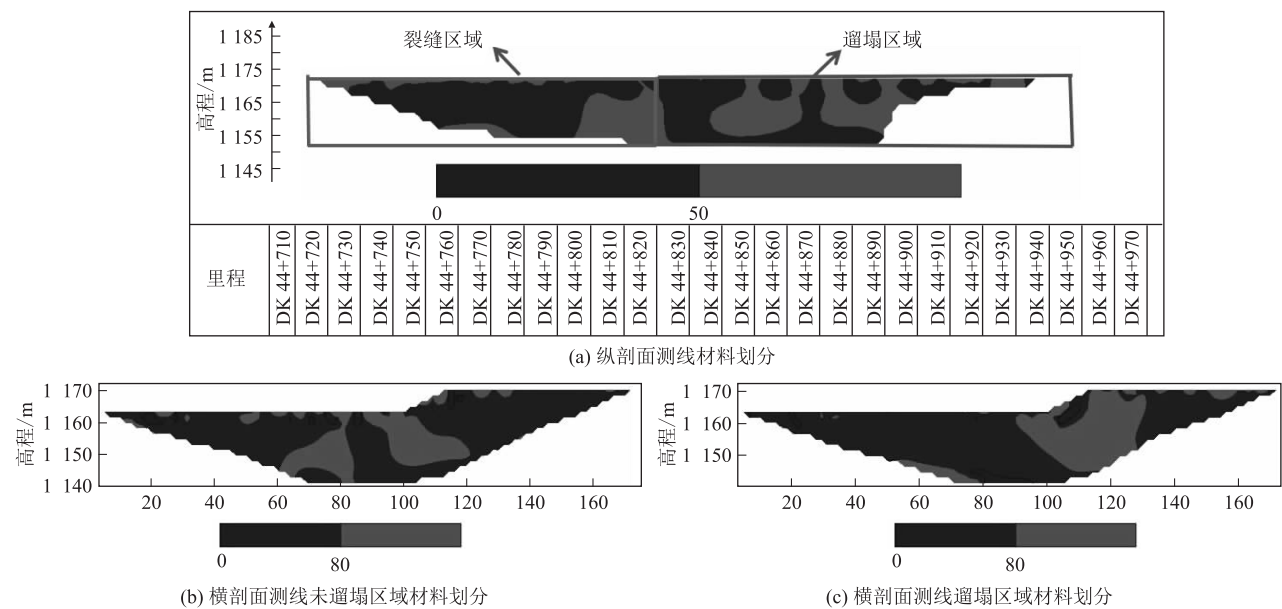


图5 材料划分图

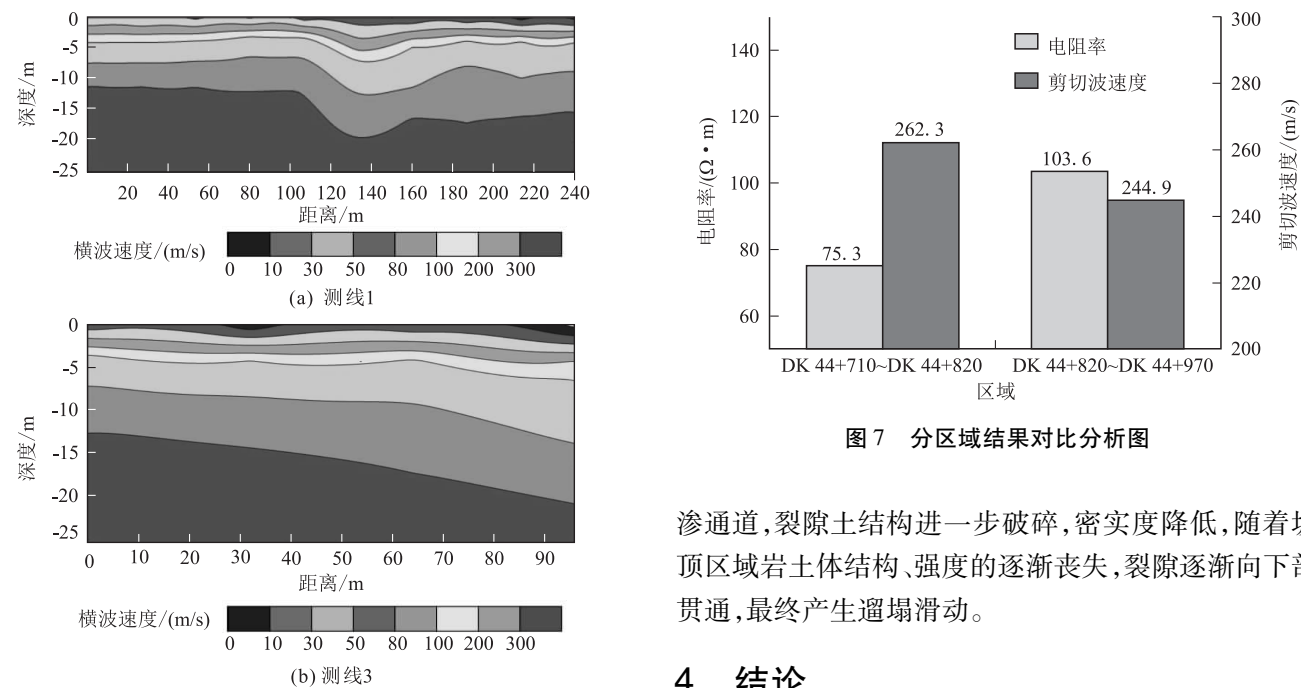


图6 边坡的面波结果图

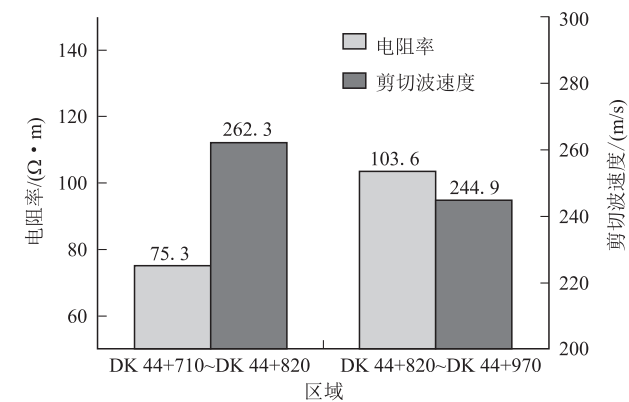


图7 分区域结果对比分析图

趋势。

由以上分析可知,由于边坡局部区域存在裂隙土,开挖和降雨两种扰动对膨胀土路基边坡具有较大的影响,主要表现为改变裂隙土内部物质组成、颗粒接触关系、孔隙性等,进而影响其物理力学特性。其破坏过程为:开挖导致坡顶土体产生临空方向上的回弹,该区域土体内部产生拉张应力,原生裂隙进一步扩展。同时,坡脚位置出现应力集中,表层土体强度均有所降低。降雨过程中,在裂隙土区域内的坡顶裂隙形成优势入

渗通道,裂隙土结构进一步破碎,密实度降低,随着坡顶区域岩土体结构、强度的逐渐丧失,裂隙逐渐向下部贯通,最终产生溜塌滑动。

4 结论

本文结合现场高密度四极电测深法和高密度面波法两种方法,对弥蒙铁路某段膨胀土路基边坡进行了原位测试,分析得出了以下结论:

- (1) 结合电阻率频数统计对路基边坡土体进行材料划分,弥蒙铁路某段膨胀土路基边坡未溜塌区域的电阻率分布于 0 ~ 50  $\Omega \cdot m$ ,平均电阻率为 75.3  $\Omega \cdot m$ ;溜塌区域存在局部大于 80  $\Omega \cdot m$  的高电阻区域,平均电阻率为 103.6  $\Omega \cdot m$ ,疑似土体裂隙发育。
  - (2) 结合高密度面波法反演分析对边坡土层进行
- (下转第 99 页)

业组织以及区间列车追踪方式复杂化,这也从另一方面说明了移动闭塞用于重载铁路乃至客运铁路的可行性。

参考文献：

[1] IEEE Std1474.1-2008 IEEE Recommended Practice for Communications-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations[S].

[2] TB 10007-2017 铁路信号设计规范[S].

TB 10007-2017 Code far Design of Railway Signaling [S].

[3] 江明. 移动闭塞与准移动闭塞列车追踪间隔对比分析[J]. 铁路通信信号工程技术, 2017, 14(2): 1-3.

JIANG Ming. Comparison and Analysis of Headway between Trains in Moving Block System and Quasi-moving Block System[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2017, 14(2): 1-3.

[4] 杨志刚. LKJ 列控技术与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.

YANG Zhigang. LKJ Train Control Technology and Application[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

[5] TB/T 3530-2018 CTCS-3 级列车运行控制系统系统需求规范[S].

TB/T 3530-2018 System Requirements Specification for CTCS-3 Train Control System[S].

[6] 诸蓉萍, 吴汶麒. 移动闭塞技术及其应用[J]. 城市轨道交通研究, 2004, 7(2): 81-82.

ZHU Rongping, WU Wenqi. Application of Moving Block Technology in UMT[J]. Urban Mass Transit, 2004, 7(2): 81-82.

[7] 金娟, 杨梅, 王长林. 基于移动闭塞原理的地铁列车线路通过能力的研究[J]. 铁路计算机应用, 2008, 17(6): 7-10.

JIN Juan, YANG Mei, WANG Changlin. Research on Carrying Capacity for Subway Track Based on Principle of Movable Block[J]. Railway Computer Application, 2008, 17(6): 7-10.

[8] 唐涛. 列车运行控制系统[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012.

TANG Tao. Train Operation Control System [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012.

(上接第 73 页)

了划分。在未溜塌区域段,土层的剪切波速度较大,平均剪切波速度为 262.3 m/s;在溜塌区域段,土层的剪切波速度减小,平均剪切波速度为 244.9 m/s,系结构性完整度稍低,弹性模量等物理力学特性较弱。

参考文献：

[1] 李斌. 膨胀土地区[M]. 北京: 人民交通出版社, 1993.

LI Bin. Expansive Soil Regions[M]. Beijing:China Communications Press,1993.

[2] 李建文,唐咸远,肖杰,等. 公路膨胀土地基下伏采空区勘察及处治[J]. 中外公路, 2013, 33(4): 14-17.

LI Jianwen, TANG Xianyuan, XIAO Jie, et al. Investigation and

Treatment of Underlying Goaf in Highway Expansion Land [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2013, 33(4): 14-17.

[3] 张继令,董晨. 瑞雷波法在南昆线路基基床膨胀土病害检测中的应用[J]. 勘察科学技术, 2000(2): 56-60.

ZHANG Jiling, DONG Chen. Application of Rayleigh Wave to Detect the Swelling Soil Disease of Railway Foundation Subgrade of Nankun Railway[J]. Site Investigation Science and Technology, 2000(2): 56-60.

[4] 王德咏,陈雷,罗先启,等. 面波法在水工隧洞混凝土质量无损检测中的应用[J]. 混凝土, 2010(11): 131-135.

WANG Deyong, CHEN Lei, LUO Xianqi, et al. Application of Surface Wave Method for Nondestructive Testing of Hydraulic Tunnel Concrete[J]. Concrete, 2010(11): 131-135.