

基金项目：2016年度广西高校中青年教师基础能力提升项目《广西膨胀土边坡变形破坏和防治措施调查研究》的阶段性能果（项目编号：KY2016YB682，主持人：庞毅玲）

## 微型桩在广西百色膨胀土边坡中的应用研究

□ 庞毅玲

**摘要** 本文围绕中国南方电网百色局百色变电站及串补站膨胀土边坡出现的滑坡病害，分析研究膨胀土边坡的滑坡特征及致滑因素。提出利用微型桩进行加固的膨胀土边坡治理手段，分析微型桩加固膨胀土边坡机理。并通过Midas-GTS NX研究分析微型桩各物理参数对加固边坡效果的影响。

**关键词** 膨胀土；Midas-GTS NX；微型桩

**文献标识码** B **中图分类号** TU443 **文章编号** 1672-7045 (2019) 11-120-05

### 1 引言

我国膨胀土分布地域广泛，与其相对应的治理手段巧妙多样，可因地制宜。而西南地区的膨胀土治理工程尤其以南宁市、崇左市宁明县、百色市等地最为典型。膨胀土由于其特殊的矿物成分往往具有高收缩性、崩解性和多裂隙性，这使得膨胀土边坡发生地质灾害的概率极高。

殷宗泽等提出膨胀土边坡的地质灾害具有浅层性、牵引性、平缓性、长期性、季节性和方向性六个特点<sup>[1]</sup>。笔者认为在膨胀土边坡治理时需从以上六个方面入手。刘龙武等通过对膨胀土边坡的岩土分布模式的分析提出滑坡受二元结构活动带控制。将边坡进行岩土分层来分析边坡的滑动机理<sup>[2, 3, 4]</sup>。提出在边坡治理工程中，一般采用挡墙、抗滑桩、喷锚支护等，而在膨胀土边坡中再采用这些支挡手段时，往往会出现支挡失效而再次发生地质灾害的现象。范秋雁等追踪了广西地区部分膨胀岩土滑坡治理工程，总结了膨胀土边坡治理中的部分技术盲区。尤其在工程设计时合理选用物理参数尤为重要<sup>[5]</sup>。

近年来微型桩技术在边坡治理中的应用逐渐普遍起来。微型桩技术主要指的是直径小于300mm，长细比一般大于30的各类桩式支挡结构。此类结构具有布置灵活、施工简便等特点。孙书伟等在研究微型桩加固

边坡时发现：当微型桩布置在边坡中上部时，加固效果最优，而且微型桩还能够进行修剪处理且不会影响边坡安全系数<sup>[6, 7]</sup>。而微型桩锚固稳定时，桩身自由段以弹性弯曲变形为主，能够适应膨胀土的部分胀缩性能。另外，当微型桩按照一定的逻辑顺序设置时，又能形成群桩效应，进一步加固边坡。

综上所述，微型桩在膨胀土边坡防护工程中，边坡稳定性对微型桩的物理参数敏感性较强。且在不同的膨胀土边坡破坏模式上，边坡稳定对微型桩的各个物理参数敏感性强弱又不尽相同。因此，本文结合中国南方电网百色局百色变电站及串补站膨胀土边坡出现的滑坡病害实例，在分析研究膨胀土边坡的滑坡特征及致滑因素基础上，提出利用微型桩加固膨胀土边坡的治理手段，通过数值模拟研究分析了微型桩各物理参数对加固边坡效果的影响。

### 2 工程概况

中国南方电网百色局500kV百色变电站、串补站地处百色城区西南侧，分别于2002年和2005年投运。由于百色变电站和串补站周围土层为膨胀土，变电站以及串补站护坡、挡墙均出现了病害：部分护坡出现开裂，部分设备区存在变形。

表1 边坡病害勘察结果

编号	平面形态	主滑方向(°)	纵向轴长(m)	前缘横宽(m)	平面面积(m <sup>2</sup> )	滑体厚度(m)	平均厚度(m)	边坡体积(m <sup>3</sup> )	备注
HP1	弧形	52	20	35	450	1~3	2.1	945	小型土质滑坡
HP2	弧形	320	25	30	500	1~3.8	2.4	1200	小型土质滑坡

对变电站和串补站病害边坡勘察显示：串补站周围边坡共发生2处小型滑塌，均为挖方边坡的变形破坏。其中，西南侧HP1滑坡、东侧HP2滑坡的勘察结果如表1所示。

此外，HP1坡脚整体倾斜，坡脚浆砌石挡墙（水沟）已经严重变形、破坏，局部“顶住”对面的散水，将水沟堵塞，局部坡面已经剪切、隆起。坡顶和坡面都出现了5mm~40mm不等的裂缝，最大裂缝长度约30m，部分坡底排水沟内抹平表层脱落，砌筑块石挤出，破坏严重。HP2坡脚挡墙出现整体垮塌，局部出现整体解体式破坏，整体水平位移较大，已露出护坡底层黄土，坍塌土方已将站外排水沟堵塞。坡顶和坡面出现宽4mm~35mm不等的裂缝，最大裂缝长度约15m，砌筑块石挤出，破坏严重。为了防止雨水进入坡体，临时采用彩条布进行覆盖坡面处理，如图1所示。



图1 病害边坡现场

另根据室内试验结果显示：该区域黏土的自由膨胀率 $\delta_{e1}$ 为35.0%~63.5%，平均值为53.59%；按《广西膨胀土地区建筑勘察设计施工技术规程》（DB45/T 396—2007）判定该黏土为中等膨胀性土。其物理指标室内试验结果如表2所示。

### 3 微型桩加固膨胀土边坡机理分析

#### 3.1 膨胀土边坡的滑坡特征及致滑因素分析

膨胀土主要由含有蒙脱石、伊利石及高岭土等矿物成分而表现出剧烈的胀缩性。因此，膨胀土边坡中的表

层土壤在大气环境影响下，土壤中的水分逐渐蒸发，导致其含水率也逐渐降低，形成向土层下部发展的裂隙。而裂隙的形成是膨胀土边坡病害的控制因素。

一方面裂隙形成的深度决定了滑坡体的厚度。实际上，当出现降雨时，雨水往往是通过边坡裂隙渗入到边坡土层。在裂隙形成的深度范围的土层含水率增加更为明显，表现出更大的膨胀变形、产生更大的膨胀压力，其物理强度下降得更为明显。但是在裂隙深度范围以外的土层雨水渗入量较小，土体的膨胀性表现相对较弱<sup>[3, 8]</sup>。裂隙在膨胀土边坡发展深度是有限的，这个发展范围也被称为膨胀土边坡的大气影响深度。在膨胀土边坡出现滑坡时，大气影响深度便表现为滑坡的浅层性。

另一方面，裂隙的形成位置决定了滑坡体的体量或者滑坡病害的严重程度。大多数膨胀土边坡的滑坡体最开始并不是从边坡顶部形成的。此类边坡往往是先从边坡中部形成滑坡体，然后又在此类边坡的牵引性作用下边坡上部才逐渐形成滑坡体。杨文琦等通过计算发现裂隙出现在边坡中部时边坡的安全系数往往小于裂隙出现在边坡顶部的情况<sup>[9]</sup>。同时，有学者还发现使用微型桩在边坡中部布置时效果最好<sup>[10, 11]</sup>。



图2 膨胀土边坡滑坡特征示意图

结合中国南方电网百色局500kV百色变电站、串补站边坡的破坏模式，可以分析得到其失稳机理为：该边坡表面土层结构松散，透水性强，在大气降水和蒸发作用下，岩土体含水量变化较大，膨胀土易产生湿胀干缩循环作用，岩土体的原始结构逐渐破坏，裂隙逐渐发

表2 膨胀土室内试验结论

重度 kN/m <sup>2</sup>	天然土快剪		残余强度		饱和土快剪		压缩模量 MPa
	C (kPa)	$\Phi$ (°)	C (kPa)	$\Phi$ (°)	C (kPa)	$\Phi$ (°)	
19.0	19.9	15.2	17.4	13.2	17.5	12.8	6.4

表3 模型参数表

土体	重度 $\gamma$ /kN/m <sup>3</sup>	黏聚力c/kPa	内摩擦角 $\phi$ /°	泊松比 $\mu$	弹性模量E/MPa
黏土	19	13	11	0.36	30
强风化砂质泥岩	21	42	20	0.24	55
中风化砂质泥岩	22	50	35	0.2	65
微型桩	23	-	-	0.2	20000

展。遇到降雨天气时，雨水通过裂隙渗入使得土体抗剪强度降低，导致边坡失稳。另根据边坡的变形特征分析，边坡目前总体上处于蠕变变形—滑动阶段，在雨季处于基本稳定—不稳定状态。由于边坡稳定性较差，需尽快展开治理，在暴雨或持续降雨工况下，边坡土体饱和，自重荷载加大，滑带土的抗剪强度指标将降低，边坡体将发生变形破坏并且极有可能发生边坡整体失稳快速下滑，对串补站的正常运行带来不利影响。

### 3.2 微型桩加固机理

在边坡加固技术中，无论是针对浅层滑坡还是中厚层滑坡，抗滑桩无疑是一种较为有效的手段<sup>[12]</sup>。同样，微型桩加固边坡时也利用了“将桩身穿过滑坡体并锚固在稳定层中”这一加固机理。虽然在一定程度上微型桩可以简单地理解为尺寸缩小的抗滑桩，但微型桩与抗滑桩的加固机理却不尽相同。

微型桩具有桩径小、长细比大等特点。在进行边坡加固时，微型桩通常布置成微型桩群。其布置方式主要有规则布置和梅花形布置两种形式<sup>[13、14、15]</sup>，如图3所示。而在微型桩的施工工艺方面，主要有重力灌注、加压灌注、二次灌注以及多次重复灌注等多种工艺。

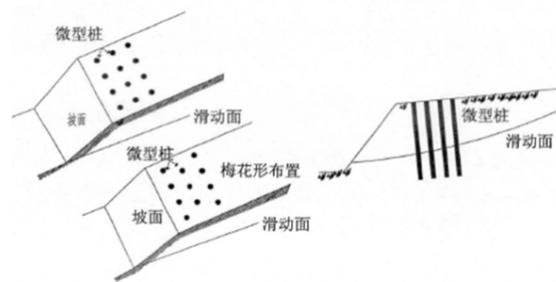


图3 微型桩的两种布置形式

结合微型桩的自身结构特点以及布置规则和施工工艺，其加固机理主要包括如下几点：首先，微型桩对黏土边坡的主要作用包括挤密作用和微型桩群效应，因而微型桩加固的边坡岩土性质在宏观表现上得到提高。也正是由于微型桩的这种效应，微型桩最初还被划分为土工加筋技术类；其次，当微型桩采用多次灌注施工工

艺时，二次灌注浆体在压力作用下在土体内部流动并结硬。这些结硬的二次注浆体一方面提高了微型桩桩身周围土体的强度，另一方面注浆体堵塞了土体中的部分缝隙，阻止了水在土体内部的渗流。因此，微型桩在加固膨胀土边坡时具有独特的优势。除此之外，微型桩对施工场地要求不高，其施工机具普遍较小、振动较弱。因而，施工过程中对边坡的人为扰动微弱，更有利于边坡的稳定性。

## 4 微型桩设计参数分析

### 4.1 模型的建立

假定围岩性质为连续、均质及各向同性，不考虑构造应力，初始地应力场为自重应力，模型采用摩尔库伦屈服准则。模型边坡尺寸主要参照广西百色变电站膨胀土边坡进行建立，总共分为3层土，其中坡高为11m，模型总高度（z方向）为20m，模型水平方向（x方向）长度为30m，纵向（y方向）长度40m，对模型四周跟边界施加法向位移约束，模型参数如表3所示。

### 4.2 微型桩加固设计参数分析

微型桩加固边坡在许多工程中取得了良好的效果，但是微型桩加固边坡的设计参数往往很难确定，过强的设计参数虽然能取得良好的效果，但是容易造成不必要的浪费；设计参数太弱了，不能达到理想的效果。微型桩锚固稳定时，桩身自由段以弹性弯曲变形为主，能够适应膨胀土的部分胀缩性能。以百色变电站边坡为原型，主要以变形为主要的分析依据，建立不同锚固深度、不同微型桩直径、不同桩间距的微型桩边坡加固模型，通过分析边坡的变形、微型桩的位移等，得到依托工程的最优的工程设计参数。

#### 4.2.1 微型锚固长度分析

微型锚固长度的确定是微型桩设计最重要的部分，这不仅涉及微型桩治理效果问题，更影响到工程造价，为了研究微型桩锚固长度对加固效果的影响规律，选取微型桩自由端长度Ha与锚固长度Hb的比值分别为0、0.8、1.0、1.2、1.4进行分析，不同锚固长度下边坡的水平位移云图如图4所示，锚固长度与边坡最大位移的

关系曲线图如图5所示。

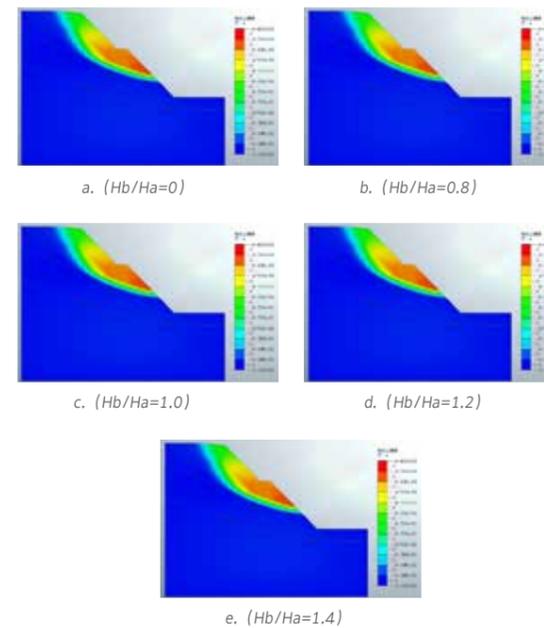


图4 不同锚固长度边坡水平位移云图

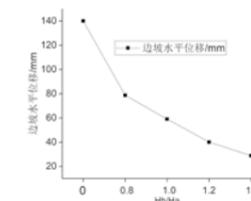


图5 锚固长度与边坡水平位移关系曲线图

由图4（a）可以看出，当不施加微型桩的情况下，边坡的位移从坡顶至坡脚逐渐增加，其中坡脚的水平位移较大，有失稳的风险。由图4（b—e）可以看出，当施加微型桩后，边坡的最大水平位移主要集中在微型桩附近，并且随着微型桩的嵌入深度增加，边坡的最大水平位移主要集中在微型桩上方，主要是随着嵌入深度的增加，微型桩能提供更大的抗滑力，更好地约束边坡的位移。由图5可知，随着嵌入深度的增加，边坡的最大水平位移逐渐减少，当Hb/Ha大于1.2之后，边坡的最大水平位移的减少量相对较少，说明增加锚固长度不会一直提高边坡的稳定性。

图6为桩顶水平位移与锚固长度关系曲线图，桩顶水平位移随着锚固长度的增加，桩顶的水平位移逐渐减少，当Hb/Ha大于1.2之后，桩顶的水平位移减少的速度开始降低，当锚固长度到达一定的数值后，增加锚固长

度并不能有效地增加加固效果，建议该工程Hb/Ha取1.2。

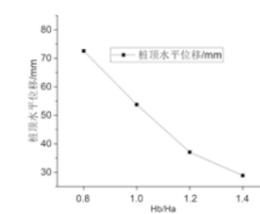
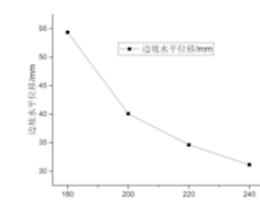


图6 锚固长度桩顶水平位移关系曲线图

### 4.2.2 微型桩直径分析

为了研究微型桩直径对加固效果的影响规律，选取直径分别为180mm、200mm、220mm、240mm进行分析，不同微型桩直径与边坡水平位移的关系曲线图如图7所示。



如图9所示。

由图9可知,微型桩的间距越小,边坡的水平位移越小,两者之间呈现正相关,当微型桩间距小于1m后,微型桩间距的减小对边坡的水平位移减少效果逐渐降低,过小的微型桩间距对于边坡的加固效果并不明显。

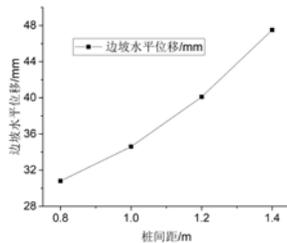


图9 微型桩直径与边坡水平位移关系曲线图

微型桩桩间距与桩顶的位移关系曲线如图10所示。从图10可以看出,随着微型桩桩间距的增加,微型桩桩顶的位移不断增大,两者呈现出正相关,间距大于1m后,增长速度加快,结合边坡水平位移与微型桩桩间距的关系,建议本工程微型桩桩间距取1m。

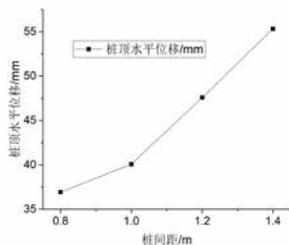


图10 微型桩桩间距与桩顶水平位移关系曲线图

## 5 结语

本文结合中国南方电网百色局百色变电站及串补站膨胀土边坡出现的滑坡情况进行滑坡机理分析,并通过Midas-GTS NX研究论证了微型桩加固方案,主要得到如下结论:

1. 膨胀土边坡表层土壤含水率变化剧烈,自然胀缩后的裂隙发展。当降雨暴增土体强度陡降,边坡稳定性变弱,滑坡风险增大。但膨胀土边坡滑坡体的形成主要受坡面上的裂隙发展深度、形成位置等因素控制。当坡面裂隙在边坡中部位置发展时对边坡最不利。

2. 微型桩嵌入长度越大越有利于边坡的稳定,当 $H_b/H_a$ 大于1.2,边坡的最大水平位移的减少量相对较少,建议本工程 $H_b/H_a$ 的值取1.2。

3. 微型桩的直径越大对于边坡的稳定越有利,当直

径大于220mm后,加固增强效果减弱,建议本工程微型桩直径取220mm。

4. 微型桩的桩间距越小对于边坡的稳定越有利,当桩间距小于1.0m之后,加固增强效果减弱,建议本工程微型桩桩间距取1.0m。

## [参考文献]

- [1]殷宗泽,韦杰,袁俊平等.膨胀土边坡的失稳机理及其加固[J].水利学报,2010,41(1):1-6.
- [2]廖世文.膨胀土与铁道工程[M].北京:中国建筑工业出版社,1984.
- [3]刘龙武,郑健龙,缪伟.广西南明膨胀土胀缩活动带特征及滑坡破坏模式研究[J].岩土工程学报,2008(1):28-33.
- [4]刘龙武,郑健龙,周桂成.膨胀土台阶式滑坡破坏模型及处治措施[C]第二届全国非饱和土学术研讨会论文集(657-662).杭州,2005.
- [5]范秋雁,徐炳连,朱真.广西膨胀岩土滑坡治理工程实录[J].岩石力学与工程学报,2013,32(S2):3812-3820.
- [6]李生林.中国膨胀土工程地质研究[M].南京:江苏科学技术出版社,1992.
- [7]孙书伟,陈冲,丁辉等.微型桩群加固土坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2306-2314.
- [8]秦禄生,郑健龙.膨胀土路基边坡雨季失稳破坏机理的应力应变分析[J].中国公路学报,2001,14(1):25-30
- [9]杨文琦,周成,王林等.降雨作用下考虑膨胀推力的膨胀土边坡稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2018,38(5):874-880.
- [10]闫金凯,殷跃平,门玉明.滑坡微型桩加固工程模型试验研究[J].土木工程学报,2011,44(4):120-128.
- [11]孙书伟.微型桩加固土质边坡极限抗力分析方法[J].中国公路学报,2018,33(2):115-123.
- [12]Canton R, Collotta T, Ghionna V N. A design method for reticulated micropiles structure in sliding slopes[J]. Ground Engineering, 1989, 22(1):41-47.
- [13]李志雨.微型桩加固膨胀土滑坡数值模拟研究[D].西安:西安工业大学,2014.
- [14]孙书伟,陈冲,丁辉.微型桩群加固土坡稳定性分析[J].岩土工程学报,2014,36(12):2306-2314.
- [15]吴顺川,高永涛等.失稳高陡路堑边坡桩锚加固方案分析[J].岩石力学与工程学报,2005,24(21):3954-3958.

## [作者简介]

庞毅玲, 硕士, 高级工程师, 广西建设职业技术学院建筑工程技术团队带头人, 研究方向为建筑工程、岩土工程、BIM技术应用。