

文章编号: 1673-9469 (2019) 03-0057-05

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2019.03.011

砂黄土塔基边坡破坏机理研究

王 镨, 党于航

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710000)

摘要: 以陕北定边县砂黄土塔基边坡为研究对象, 通过室内试验手段研究了砂黄土的物理力学特性, 并与西安粘黄土的物理力学性质进行了对比。在此基础上, 借助有限元软件 MIDAS 模拟不同工况下塔基边坡的应力应变特征, 进而揭示了砂黄土地区塔基边坡的破坏机理。结果表明: 砂黄土的天然密度与干密度较低, 孔隙比较高, 粗粉粒含量较多, 摩擦强度明显较大, 粘聚力较小; 有限元模拟表明, 随着影响因素的增加, 坡肩拉应力不断增加, 坡脚剪应力不断集中, 边坡稳定性逐渐减小, 最终形成潜在滑动面并发生破坏, 其中风荷载和降雨是影响边坡稳定性和应力应变的主要因素。

关键词: 砂黄土; 塔基边坡; 破坏机理

中图分类号: TU431

文献标识码: A

Study on Failure Mechanism of Sand-Soil Loess Tower Foundation Slope

WANG Kai, DANG Yuhang

(College of Geology Engineering and Surveying, Chang 'an University, Xi' an, Shaanxi 710000, China)

Abstract: Taking the sand-soil tower foundation slope of Dingbian County in northern Shaanxi as the research object, the physical and mechanical properties of sand loess were studied by means of laboratory tests, and compared with the physical and mechanical properties of Xi'an sticky loess. On this basis, the finite element software MIDAS was used to simulate the stress-strain characteristics of the tower foundation slope under different working conditions, and the failure mechanism of the tower foundation slope in the sand loess area is revealed. The results show that the natural density and dry density of sand loess are lower, the pores are higher, the coarse silt content is more, the friction strength is obviously larger, and the cohesive force is smaller. The finite element simulation shows that with the increase of influencing factors, the tensile stress of the slope shoulder increases continuously, the shear stress of the slope foot is continuously concentrated, the stability of the slope is gradually reduced, and the potential sliding surface is finally formed and destroyed, wherein the wind load and rainfall are major factors affecting slope stability and stress strain.

Key words: sandy loess; tower foundation slope; failure mechanism

陕西省是典型的黄土分布区, 其覆盖范围、厚度及连续性都是世界罕见的^[1]。黄土本身是一种弱胶结的土, 具有土体疏松、垂直节理和较大空隙发育等特点。在各种地质环境因素的共同作用下, 陕西地区频繁遭受着滑坡等地质灾害的影响, 严重威胁到群众的生命安全, 同时可能造成巨大的经济损

失^[2-3]。陕西地区的黄土颗粒组成具有明显的条带状分布规律, 黄土高原从北向南可以划分为砂黄土、典型黄土及粘黄土三个黄土带^[4], 其中砂黄土大多分布在陕北地区。前人的研究成果表明: 三个黄土区带的灾害类型、发育特征及主控因素等都有着较大的差别, 且砂黄土区地质灾害最严重^[5]。近年来,

收稿日期: 2019-08-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (4167020392)

作者简介: 王镨(1994-), 男, 山西运城人, 硕士研究生, 主要从事黄土边坡破坏机理等方面的研究。

随着陕北地区能源电力等基础设施建设的大力推进,形成了大量的砂黄土塔基边坡,这些塔基边坡的稳定是电塔正常运营的保障,因此,开展砂黄土塔基边坡稳定性及破坏机理的研究,对陕北输电系统的稳定运营和抗灾防灾工作具有重要的参考意义。基于此,本文以陕北定边县后刘村砂黄土塔基边坡为研究对象,利用室内试验和数值模拟等手段对砂黄土塔基边坡的破坏机理进行了研究。

1 室内试验

1.1 试验材料

对榆林市定边县冯地坑乡塔基边坡的砂黄土进行取样,将土样制作成直径20 cm,高30 cm的圆柱体,并将陕北定边县冯地坑乡砂黄土的物理力学试验结果与西安市长安区中甘村的典型粘黄土^[6]进行对比分析,得出二者在物理特性和力学特性上的差异。

1.2 基本物理指标

对试验土样的含水率、天然密度、干密度和孔隙比测定后的试验结果进行整理并取平均值,其统计结果见表1。

从表1可以看出,陕北砂黄土的含水率、天然密度和干密度均低于西安粘黄土,孔隙比高于西安粘黄土。砂黄土含水率低说明当地的降雨量少、地下水埋深比较大,这与取样地的实际情况相符;

而土体内的含水率和颗粒组成又决定了土体的天然密度和干密度。孔隙比的大小很大程度上影响着土体的强度,砂黄土土体的孔隙比大,代表其平均粒径大,这种黄土更易形成大孔架空结构,在外力和内力作用下更容易发生土体破坏。

1.3 粒度特征指标

采用 Bettersize2000 激光粒度仪对土体试样进行粒组分析,处理后的试验结果见图1。

将陕北砂黄土的粒径级配曲线(图1)与西安粘黄土的粒径级配曲线(图2)^[6]进行对比分析可以看出,砂黄土颗粒成分的主要特点为粒径大于0.075 mm的颗粒含量约为15%,0.01~0.075 mm的粗粉粒含量超过70%,小于0.01 mm的细粒含量不到15%;粘黄土颗粒成分的主要特点为粒径大于0.075 mm的颗粒含量为4%,0.01~0.075 mm的粗粉粒含量约64%,小于0.01 mm的细粒含量约32%。相对于西安粘黄土,陕北砂黄土的粗粉粒含量明显较多,细粒含量较少。此外,两个地区的黄土粒度成分都存在不连续的现象,即某一粒组的颗粒含量急剧减少甚至缺失,从而表现出粒组相对含量曲线(图1、图2中灰色曲线)呈双峰的曲线变化特征,这也是黄土所具有的独特性质。

1.4 渗透性试验

渗透性试验采用 TST-50 渗透仪来测定陕北定

表1 基本物理指标统计表

Tab.1 Table of basic physical indicator statistics

	含水率 /%	天然密度 /(g·cm ⁻³)	干密度 /(g·cm ⁻³)	孔隙比
陕北砂黄土	14.65	1.41	1.32	1.031
西安粘黄土	20.55	1.62	1.45	0.816

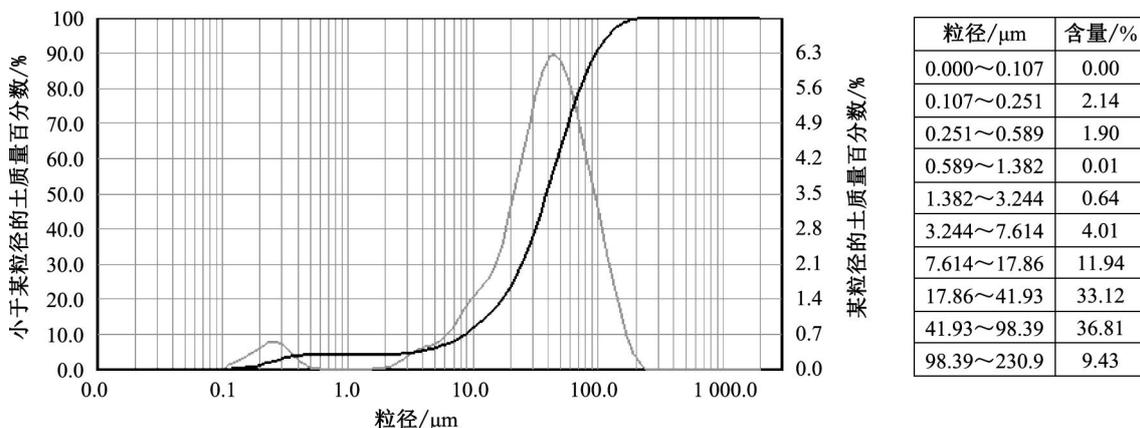


图1 陕北砂黄土粒径级配曲线

Fig.1 Grain size gradation curve of sand loess in northern Shaanxi

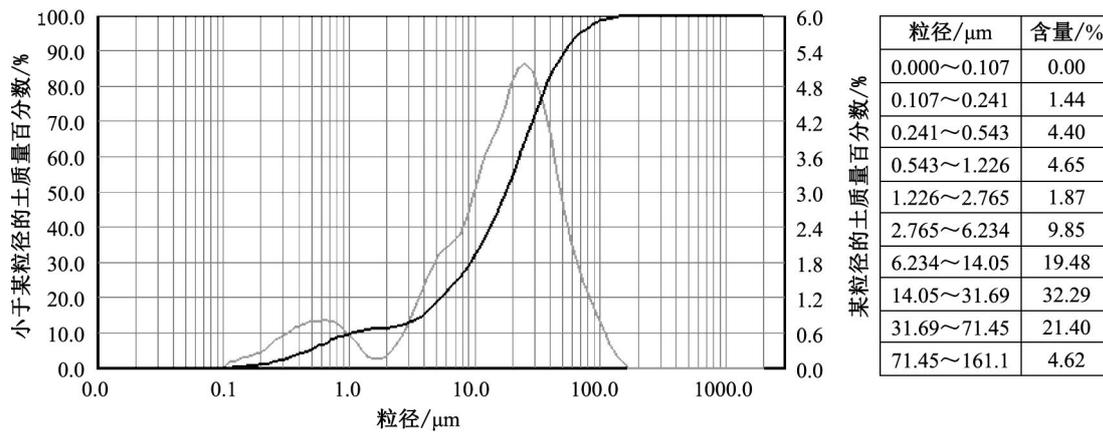


图2 西安粘黄土粒径级配曲线

Fig.2 Grain size gradation curve of sticky loess in Xi'an

边县砂黄土在变水头下的渗透系数，根据渗透系数试验数据进行计算得出定边县砂黄土的渗透系数为 3.48×10^{-4} cm/s。将之与西安长安区粘黄土的渗透系数 5.77×10^{-5} cm/s^[6] 进行对比发现，两种土体的渗透系数相差一个量级，即砂黄土的渗透性远大于粘黄土，砂黄土的这一特性使得水对砂黄土边坡的稳定性影响较大，在降雨条件下雨水入渗的深度更大，对边坡土体的影响范围也更大。

1.5 三轴剪切试验

采用南京土壤仪器厂生产的SLB-1型应力应变控制式三轴剪切渗透仪进行三轴剪切试验。

根据实验结果绘制应力路径曲线图(图3)：

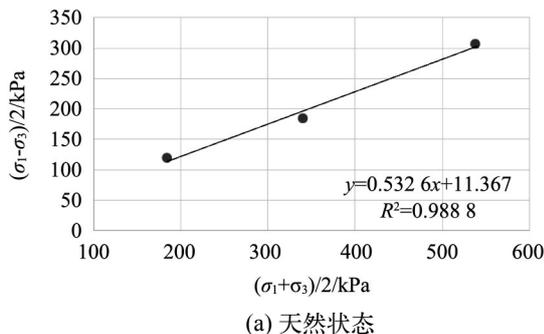
$$\varphi = \sin^{-1} \tan \alpha \quad (1)$$

式中： φ —内摩擦角(°)； α —应力路径图上破坏点连线的倾角(°)。

$$c = \frac{d}{\cos \varphi} \quad (2)$$

式中： c —粘聚力(kPa)； d —应力路径上破坏点连线在纵轴上的截距(kPa)。

依照式(1)和式(2)进行计算，得到陕北砂黄土



在不同工况下的力学参数分别为：天然状态下的内摩擦角为 32.2° ，粘聚力为 13.43 kPa；饱和状态下的内摩擦角为 28.27° ，粘聚力 c 为 8.84 kPa。

将试验结果和西安粘黄土的力学参数(天然状态下的内摩擦角为 20.15° ，粘聚力为 36.85 kPa；饱和状态下的内摩擦角为 19.05° ，粘聚力为 18.5 kPa^[6])对比可以发现，相比于西安粘黄土，陕北砂黄土的摩擦强度明显较高，粘聚力明显较小。产生这一现象的主要原因是两种黄土在颗粒组成上具有较大的差异，砂黄土组成颗粒中粉砂粒和粗粉土粒含量较高，在微观上形成粗骨架状架空结构，这种结构通常具有非常微弱的连结作用，使得砂黄土相较于西安粘黄土具有较高的摩擦强度，而砂黄土极低的粘粒含量导致了砂黄土较低的粘聚力 c 。

2 数值模拟分析

2.1 模拟工况选取

通过分析调查，将塔基边坡稳定性的影响因素分为三种：电塔自重、电塔风荷载以及降雨。本文首先对原始边坡进行数值模拟，在原始边坡的基础

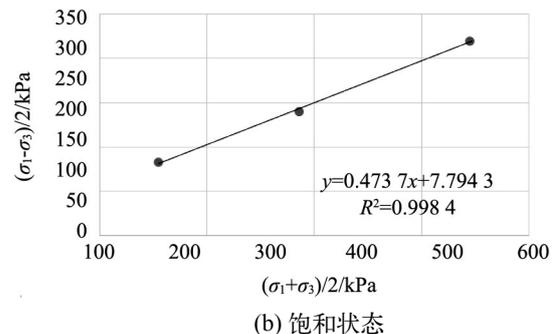


图3 应力路径曲线图

Fig.3 Graph of stress path

上依次增加电塔自重、电塔风荷载和降雨因素。共计四种工况：工况一：天然边坡；工况二：考虑电塔自重；工况三：考虑电塔自重+电塔风荷载；工况四：考虑电塔自重+电塔风荷载+暴雨。

2.2 数值模拟结果分析

2.2.1 稳定性分析

通过对不同工况下塔基边坡的稳定性进行模拟分析，使用强度折减法对边坡稳定性和应变情况进行分析，得出各工况边坡稳定系数如表 2 所示。

表 2 各工况边坡稳定系数

Tab.2 Slope stability coefficient under various working conditions

工况	稳定系数
工况一 天然状态	1.206 3
工况二 考虑电塔自重	1.187 5
工况三 考虑电塔自重+电塔风荷载	1.115 3
工况四 考虑电塔自重+电塔风荷载+暴雨	1.034 6

分析表 2 可以发现，随着影响因素的增加边坡稳定性逐渐减小，且相对于前一种工况，工况二、工况三和工况四的稳定系数减小量分别为 0.018 8、0.072 2、0.080 7，可见风荷载和降雨对边坡稳定性影响较大。

2.2.2 位移分析

使用静力分析法对边坡位移进行分析，塔基边坡在各工况下累计位移变化如表 3 所示。

表 3 各工况边坡位移变化表

Tab.3 Slope displacement change table under various working conditions

工况	水平向最大位移 /m	竖向向最大位移 /m
工况一	0.104	0.153
工况二	0.222	0.188
工况三	0.577	0.348
工况四	0.903	0.366

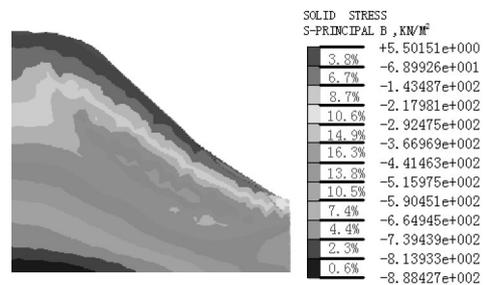
由表 3 可知：工况一整个坡体水平位移和竖直位移较小；工况二相当于在坡顶增加一个垂直荷载，使得边坡水平位移和竖直位移有所增加，但由于边坡规模较大且土体经历长时间的固结，因此电塔自重对边坡水平位移和竖直位移影响较小，其数值与天然状态相差不大；工况三风荷载对电塔的水平推力，通过电塔桩基础作用在边坡上，对边坡产生了一个较大的水平推力和一个竖向的压应力，从而使得塔基边坡水平位移和竖直位移明显增大，坡体的

稳定性显著减小；工况四暴雨条件下土体重度增加，摩擦系数和粘聚力减小，使塔基边坡的水平位移和竖直位移进一步增加，边坡趋于不稳定。

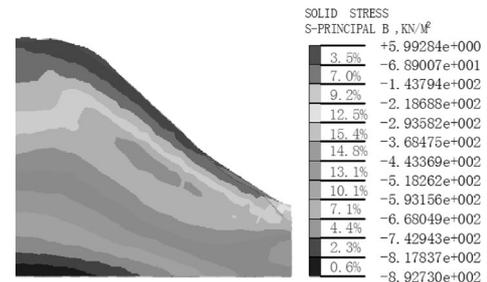
综上所述：随着影响因素的增加，边坡的水平位移和竖直位移不断增大，其中风荷载和暴雨对水平位移和稳定性影响较大。

2.2.3 应力分析

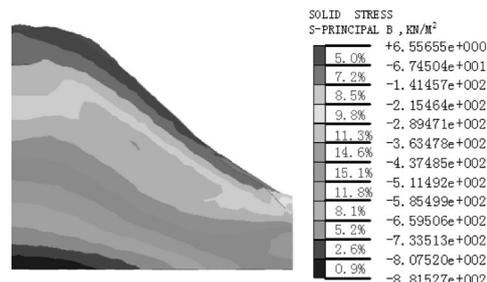
分析图 4 最大主应力云图可以发现，在四种工况下，坡体表面从外到内最大主应力逐渐增多，其最大主应力方向在斜坡坡面附近基本与坡面平行，在斜坡底部呈近水平状态。坡体最大应力分布符合普遍规律。随着影响因素逐渐增加，坡肩处产生了



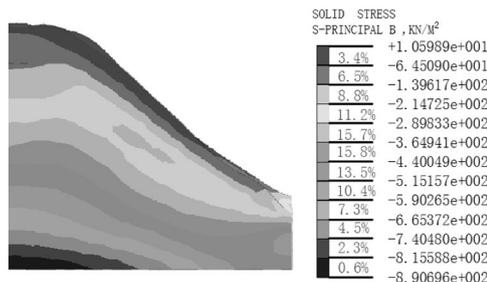
(a) 工况一



(b) 工况二



(c) 工况三



(d) 工况四

图 4 最大主应力云图

Fig.4 Maximum principal stress cloud map

明显的拉应力集中。当拉应力增大到一定数值时就会在坡肩形成张拉裂缝，使边坡的稳定性降低。

2.2.4 塑性应变分析

由图5塑性应变云图可知，四种工况下，边坡塑性应变区基本从坡脚贯通到坡顶。同时随着影响因素的逐渐增多，应变集中区范围和数值逐渐增大，集中分布在斜坡坡脚和中部。对比工况一（图5(a)）、工况二（图5(b)），在考虑自重因素后坡顶的塑性区没有明显变化，工况三（图5(c)）增加风荷载

后，塑性应变区数值和范围明显增大，表明相对于电塔自重，风荷载对边坡的变形破坏影响更加显著。工况四（图5(d)）塑性应变在坡体中下部数值明显增大，说明降雨对坡脚处的受力状态和土体性质有较大影响，坡体趋于不稳定。

综上所述：随着影响因素的增加，塑性应变区范围和数值逐渐增大，边坡稳定性逐渐减小，其中风荷载和暴雨对塑性应变的影响较大。

3 结论

1) 通过物理特性研究可以得出：陕北砂黄土的天然密度与干密度均低于西安粘黄土，孔隙比高于西安粘黄土；相对于西安粘黄土，陕北砂黄土的粗粉粒含量明显较多，粘粒含量较少。

2) 通过室内三轴试验得出：天然状态下的内摩擦角为 32.2° ，粘聚力为3.43 kPa；饱和状态下的内摩擦角为 28.27° ，粘聚力 c 为8.84 kPa。与西安粘黄土相比，陕北砂黄土的摩擦强度明显较大，粘聚力较小。

3) 随着影响因素的增加，边坡稳定性逐渐减小，塔基边坡的水平 and 竖直位移明显增加；其中风荷载和降雨是影响边坡稳定性的主要因素。

4) 电塔荷载使得坡肩拉应力增加，从而产生张拉裂缝，加之降雨减弱土体强度并对坡脚入渗侵蚀，使得坡肩拉应力不断增加，坡脚剪应力不断集中，最终形成潜在滑动面并发生破坏。

参考文献：

[1] 彭建兵, 林鸿州, 王启耀, 等. 黄土地质灾害研究中的关键问题与创新思路 [J]. 工程地质学报, 2014, 22(4): 684-691.

[2] 徐张建, 林在贯, 张茂省. 中国黄土与黄土滑坡 [J]. 岩石力学与工程学报, 2007(7): 1297-1312.

[3] 李喜安, 彭建兵, 郑书彦, 等. 公路黄土洞穴灾害与水土流失研究 [J]. 公路, 2004 (12): 70-73.

[4] 刘东生. 黄土的物质成分和结构 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[5] 王永焱, 林在贯. 中国黄土的结构特征及物理力学性质 [M]. 北京: 科学出版社, 1990.

[6] 史尧. 黄土边坡坡面浅表层破坏机理研究 [D]. 西安: 长安大学, 2018.

(责任编辑 王利君)

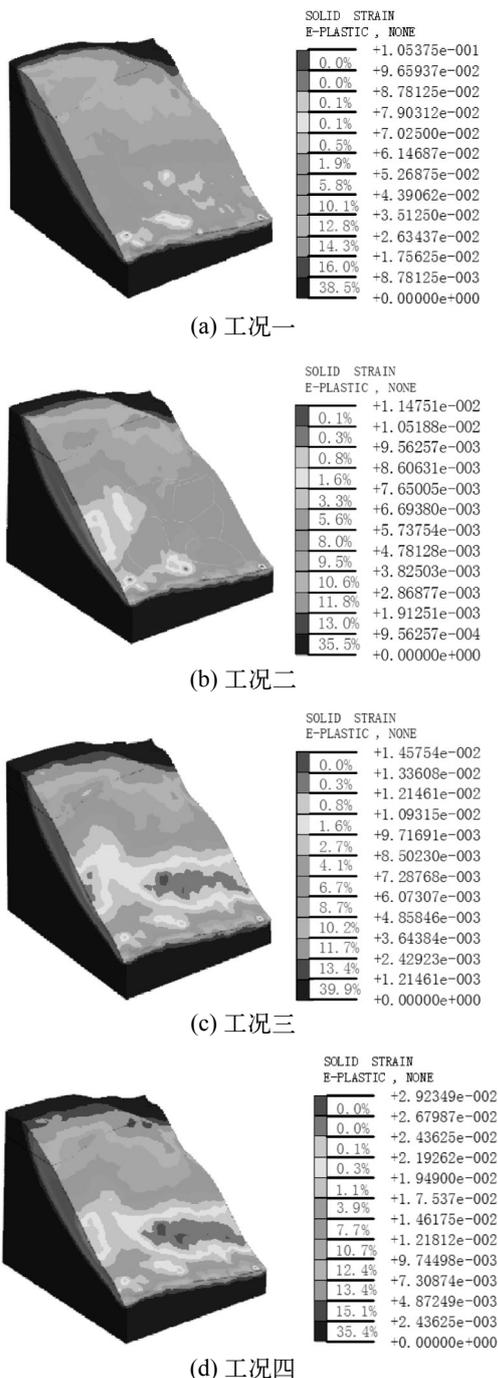


图5 塑性应变云图

Fig.5 Plastic strain cloud map