

DOI: 10.11779/CJGE201911013

粗颗粒盐渍土地基掏挖基础抗拔承载模型试验研究

许 健^{1,2}, 高靖寓^{1,2}, 李彦锋^{1,2}, 袁 俊³, 程东幸³, 谭青海⁴

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 陕西 西安 710055; 3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 4. 中国电建集团青海省电力设计院有限公司, 青海 西宁 810008)

摘 要: 考虑不同粗颗粒盐渍土层状态(结晶、溶蚀)和厚度, 通过对粗颗粒盐渍土地基掏挖基础进行抗拔承载模型试验, 分析了掏挖基础的抗拔承载特征。研究表明, 上拔加载过程中地面以基础为中心产生明显隆起现象, 逐渐形成以基础为中心的环状和放射状裂缝。地面隆起范围近似呈圆形扩大趋势; 上拔位移随距基础中心距离增大而不断减小, 上拔位移梯度随荷载增加逐渐增大。荷载-位移曲线呈现出典型的“软化型”特征; 结晶状态下基础抗拔承载力随着盐渍土层厚度增加显著增加; 结晶状态下基础抗拔承载力显著高于溶蚀状态。粗颗粒盐渍土地基破坏面形态表现为分段直线方程形式; 普通粗颗粒土层、结晶状态粗颗粒盐渍土层及溶蚀状态粗颗粒盐渍土层上拔角分别约为 32° , 34° 及 18° 。

关键词: 粗颗粒盐渍土; 掏挖基础; 模型试验; 抗拔承载力; 破坏面

中图分类号: TU448; TU475

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2019)11-2079-07

作者简介: 许 健(1980—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊土与环境岩土工程研究。E-mail: xujian@xauat.edu.cn。

Model tests on uplift behaviors of belled pier foundation in coarse-grained salty soils

XU Jian^{1,2}, GAO Jing-yu^{1,2}, LI Yan-feng^{1,2}, YUAN Jun³, CHENG Dong-xing³, TAN Qing-hai⁴

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 3. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 4. Qinghai Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Electric Power Construction Group, Xining 810008, China)

Abstract: Based on the uplift model tests, the uplift working behaviors of belled pier foundation with different thicknesses and crystalline and dissolved states of coarse-grained salty soils are obtained. The results show that the uplift loads lead to obvious ground heave surrounding the belled pier foundation, which induces circumferential and radial cracks in the soils around the foundation. Moreover, the ground heave extent is approximately circular as the uplift loads increase. The uplift displacement decreases with the growing distance from the center of foundation, and the uplift displacement gradient increases with the increasing uplift loads. The load-displacement curves exhibit a typical softening tendency. The uplift bearing capacity of salty soils in the crystalline state increases at larger thickness of coarse-grained salty soils, and is also higher for the salty soils in crystalline state than that for the salty soils in dissolved state. The geometric shape of failure surface can be described by a straight line equation with slope in the underlying coarse-grained soils different from that in the surface salty soils. The uplift angles of the surface salty soils in crystalline and dissolved states are approximately 34° and 18° , respectively, while 32° for the underlying soils without salt.

Key words: coarse-grained salty soil; belled pier foundation; model test; uplift bearing capacity; failure surface

0 引 言

随着西电东送工程和一带一路建设的逐步推进, 势必要在西北地区进行大规模的基础工程建设, 但在戈壁滩、沙漠边缘等特殊地区常常遇到粗颗粒盐渍土^[1]。这些地段土石胶结良好, 承载力较高, 具有良好的工程力学性能^[2]。从工程力学角度出发, 该类土体既区

别于胶结较好的黏性土, 又不同于黏结性较差、排水良好的砂土, 也异于一般的碎石土和粗颗粒填料^[3-4]。

基金项目: 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司科技项目 (HQ-2015-P-PN-026)

收稿日期: 2019-03-04

由于该类土体赋存的特殊工程地质、气候与环境条件，该类地基的承载机理、地基承载力特征值、基础选型以及工程设计施工方法与常规地区地基有较大差异。但相关设计技术规程尚未明确这一问题的详细设计规定^[5]，设计人员主要参照普通地质条件的设计方法，而现有的设计、施工和运营方案偏于保守，未能充分利用这种特殊土质的承载优势，对这种特殊地基业界还没有形成可靠的设计理论。

在输电线路基础设计中得到广泛应用的掏挖基础是一种新型基础型式，能够充分利用原状土体的承载性能，并依据其特殊的几何构造提高基础的抗拔承载力。研究人员通过理论分析、模型试验和现场原位试验^[6-11]对掏挖基础抗拔承载性能进行了大量研究，给出了极限抗拔承载力的经验计算方法。同时研究人员对掏挖基础在戈壁碎石土地基中的应用也进行了一定基础性的研究。刘生奎等^[12]从理论及工程实践方面对戈壁碎石土地基掏挖基础的设计及施工工艺进行探讨，提出了理论计算上的修正及较为可行的施工工艺。安维忠等^[13]对戈壁碎石土地基进行大量的现场直剪试验，得到了具有代表性的黏聚力和内摩擦角取值范围。鲁先龙^[14]等针对输电线路戈壁滩碎石土地基，开展了掏挖基础现场原型试验研究并基于此提出了抗拔承载力经验计算公式。Qian 等^[15]采用 4 种典型方法评价了戈壁碎石土扩底掏挖基础的抗拔承载性能。但前人研究成果尚未涉及针对粗颗粒盐渍土地质条件下掏挖基础抗拔承载性能试验、设计与相关技术研究。

基于此，本文针对新疆昌吉州吉木萨尔县五彩湾镇典型粗颗粒盐渍土地层特点（见图 1），并从粗颗粒盐渍土地区高等级输电线路掏挖基础的工程需求角度出发，结合不同粗颗粒盐渍土层状态（结晶、溶蚀）和不同盐渍土层厚度实际工况，遵循缩尺试验方法构建了粗颗粒盐渍土地基掏挖基础抗拔模型试验，分析得到了试验过程中基础及周围地基土层的变形特征及荷载-位移曲线。同时通过对破裂锥体的几何特征分析，进一步拟合得到了粗颗粒盐渍土地基破裂面的数学方程。相关研究成果可为粗颗粒盐渍土地质条件下基础抗拔设计及选型提供合理建议和数据支撑。

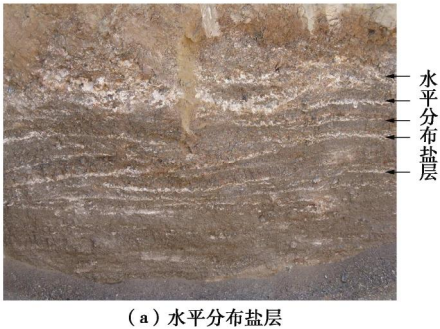


图 1 五彩湾试验场地粗颗粒盐渍土地层断面
Fig. 1 Strata of coarse-grained salty soils in Wucai Bay

1 试验方案

1.1 试样制备

粗颗粒盐渍土地基抗拔模型试验所用土料以五彩湾试验场地的粗颗粒盐渍土为依据，采用室内多次试配的方法综合确定。五彩湾试验场地天然粗颗粒盐渍土的基本物理特性参数见表 1。依据《盐渍土地区建筑技术规范》（GB/T 50942—2014），对所取天然粗颗粒盐渍土试样进行了室内易溶盐分析试验，如图 2 所示。从图 2 中可以看出，样品中硫酸根离子含量最高，其次为钠离子，易溶盐的主要成分为硫酸钠。

表 1 粗颗粒盐渍土基本特性参数

Table 1 Basic properties of coarse-grained salty soils			
G_s	密度 $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	含水率 $w/\%$	渗透系数 $k/(\text{cm}\cdot\text{s}^{-1})$
2.68	2.0	1.2	2.4×10^{-3}

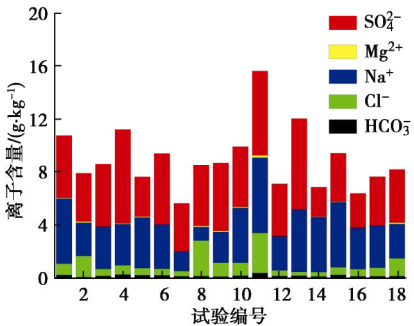


图 2 粗颗粒盐渍土离子种类及含量

Fig. 2 Salinity determination for coarse-grained salty soils

为尽量保持与天然粗颗粒盐渍土的颗粒级配基本一致，人工配备粗颗粒土主要由碎石、砂子和黄土 3 种土料混合均匀而成，质量配合比分别为 55%，20% 和 25%，颗粒级配曲线如图 3 所示。从图 3 中可以看出，人工配备粗颗粒土与天然粗颗粒盐渍土的颗粒级配情况较为接近，所配粗颗粒土可用作试验用土。此外，中国西北内陆干旱地区上层粗颗粒土盐分聚集且常呈结晶状态，下层盐分较少，同时考虑降雨量较大时上层易溶盐完全溶解，因此试验分别配备不含盐普通粗颗粒土、结晶状态粗颗粒盐渍土和溶蚀状态粗颗

粒盐渍土 3 种试样。结合五彩湾试验场地天然粗颗粒盐渍土物理力学特性,干密度均设定为 2.2 g/cm^3 左右,普通粗颗粒土和结晶状态粗颗粒盐渍土的含水率为 4.0% 左右,溶蚀状态粗颗粒盐渍土含水率约为 10.6%。考虑到硫酸盐在粗颗粒盐渍土地层中占比较大,粗颗粒盐渍土层易溶盐采用无水 Na_2SO_4 ,其质量分数为 8%。

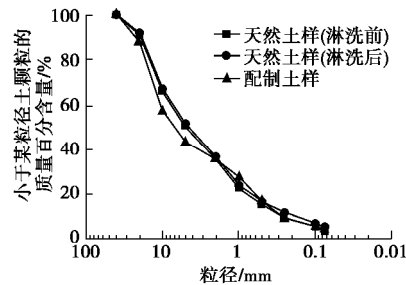


图 3 颗粒级配曲线

Fig. 3 Grain-size distribution curves

1.2 模型试坑与基础几何尺寸

考虑到基础上拔时地基破裂面的扩展及影响范围,模型试坑尺寸定为 $2.8\text{ m}\times 2.8\text{ m}\times 1.5\text{ m}$,两侧承载砖柱加高到 2.2 m,如图 4 所示。参照哈密南—郑州 $\pm 800\text{ kV}$ 特高压直流输电线路粗颗粒盐渍土地基掏挖基础设计原型,对掏挖基础抗拔承载性能进行缩尺为 1:10 的模型试验分析,试验基础设计尺寸如图 5 所示。掏挖基础采用钢筋混凝土浇筑,其中埋深 $H=0.78\text{ m}$,底板直径 $D=0.3\text{ m}$,立柱直径 $d=0.15\text{ m}$,扩底高度 $m=0.23\text{ m}$,扩大端圆台高度 $n=0.03\text{ m}$,基础外露高度 $s=0.04\text{ m}$ 。

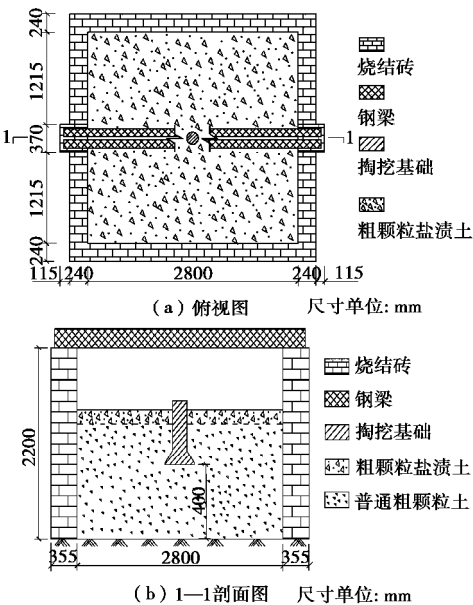


图 4 模型试验坑几何尺寸

Fig. 4 Geometrical sizes of foundation pit

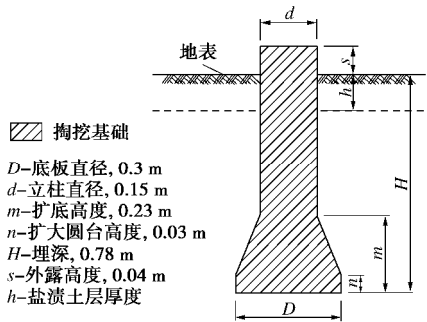


图 5 试验基础设计尺寸

Fig. 5 Geometrical sizes of belled pier foundation

1.3 试验工况

为分析表层盐渍土地基状态变化条件下(结晶、溶蚀)基础抗拔承载性能的变化规律,共进行 4 个工况的模型试验。其中,表层粗颗粒盐渍土结晶状态模型试验 3 个,分别进行盐渍土层厚度 h 为 50, 100, 150 mm 的抗拔承载试验,溶蚀状态模型试验 1 个,进行盐渍土层厚度为 100 mm 的抗拔承载试验,试验工况具体见表 2。

表 2 模型试验工况

Table 2 Model test conditions			
工况编号	深径比 ($H-n$)/ D	盐渍土层厚度 h/mm	盐渍土层 状态
1	2.5	50	结晶
2	2.5	100	结晶
3	2.5	150	结晶
4	2.5	100	溶蚀

1.4 测试方案

基于表层粗颗粒盐渍土的状态变化规律,基础抗拔承载模型试验分为两种情况:工况 1, 2, 3 需待表层盐渍土层中的盐分充分结晶亦即完全风干后再加载,其风干时间分别约为 12, 28, 57 d;工况 4 试验填料完成后即开始加载。

基础上拔加载系统根据试验基础的预估极限承载力设计,由 2 根 3.6 m 长的工字钢梁、承载砖柱、1~2 个千斤顶、荷载传感器、连接螺栓、螺纹钢拉杆及连接钢板等组成,如图 6 所示。拉杆及连接钢板承载力远高于试验基础预估极限承载力,可消除这些部位上拔加载过程中的变形对试验结果精度的影响。试验通过 JLBV 轮辐式压力传感器自动监测作用在基础顶部的上拔荷载,测试精度 0.1 kN。采用差动式位移传感器自动监测基础顶部位移及地面隆起范围,测试精度 0.01 mm;模型坑纵横两个方向每隔 10 cm 分别布置一支位移传感器,动态监测上拔加载过程中地面位移变化规律。

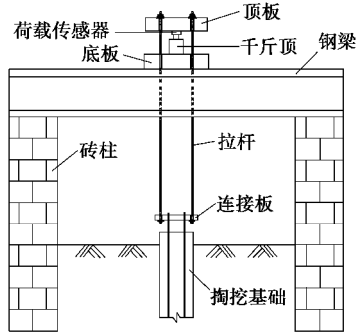


图 6 试验基础加载系统

Fig. 6 Loading system of belled pier foundation

2 试验结果与分析

2.1 地基破坏表现特征

图 7 给出试验工况 2 上拔加载过程中地基破坏表现特征。从图 7 中可以看出，试验过程中地面以基础为中心产生明显隆起现象，逐渐形成以基础为中心的环状和放射状裂缝。随着上拔荷载增加，地表微裂缝不断扩展。当荷载达到或接近极限承载力时，地基裂缝迅速开展并贯通，形成较为完整的剪切滑动面并延伸至地表，地基发生整体剪切破坏，最后地基基础破裂锥体被整体拔起。

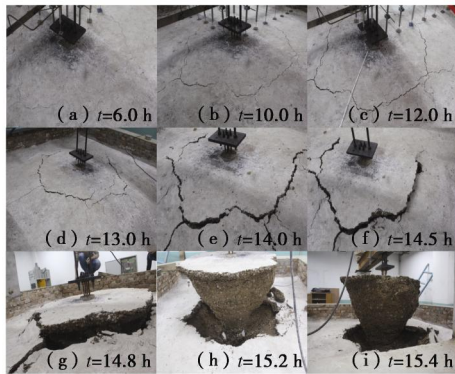


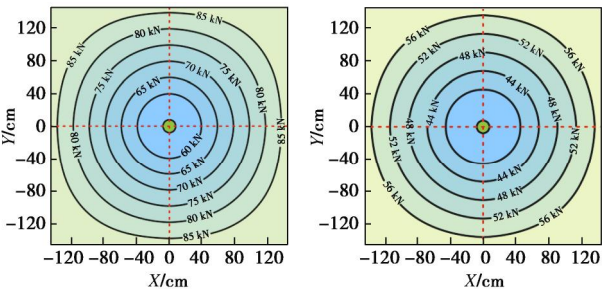
图 7 加载过程地基破坏表现特征

Fig. 7 Failure of foundation during loading process

2.2 地面位移

图 8 所示为试验工况 2 和 4 上拔加载过程中地面隆起范围，图中的等值线代表每级荷载作用下地面位移相对稳定的边界范围。从图 8 中可以看出，加载过程中地面隆起范围近似呈圆形扩大趋势，这与上述试验加载过程中观测到的地面环向裂缝是一致的。图 9 给出了地面上拔位移随荷载变化过程。从图 9 中可以看出：上拔荷载作用下基础周围附近地面上拔位移最大，随距基础中心距离增大而不断减小，即距离基础较远土体受上拔荷载的影响显著减小；随上拔荷载增大，基础周围地面上拔位移不断增加，且影响范围逐

渐增大。值得注意的是，加载初期地面上拔位移缓慢增加，位移梯度较为均匀；随着上拔荷载增大，基础附近地面上拔位移显著增加且位移梯度增大，直至加载至地基破坏。

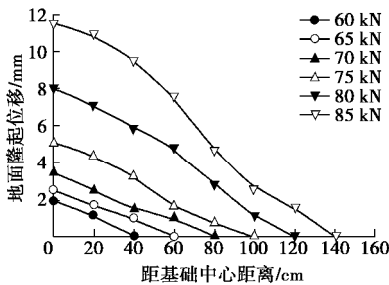


(a) 试验工况 2

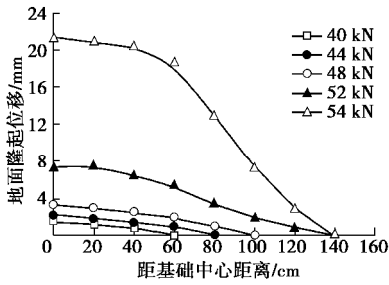
(b) 试验工况 4

图 8 加载过程地面隆起范围

Fig. 8 Upheaval range of ground under various loads



(a) 试验工况 2



(b) 试验工况 4

图 9 加载过程地面上拔位移

Fig. 9 Ground displacements during uplift loading

2.3 荷载 - 位移关系

图 10 给出了加载过程上拔荷载 - 位移关系。从图 10 (a) 中可以看出，粗颗粒盐渍土地基上拔荷载 - 位移曲线表现为典型的有峰值荷载“软化型”曲线。图 10 (b) 中荷载位移比指不同上拔荷载与对应位移的比值，结合试验工况 2 荷载位移比的变化曲线，可以看出上拔加载过程中荷载 - 位移变化关系可以明显分为 3 个阶段：初始阶段近似表现为弹性直线段，基础位移随上拔荷载的增加近似呈线性变化，这是由于上拔荷载较小时，掏挖扩底基础底板上部土体被压密，应力状态处于弹性状态且变形以弹性压缩变形为主；随着上拔荷载增加，基础位移随上拔荷载的增加呈非线性变化，位移变化速率明显大于初始弹性直线段，地

基土体应力由弹性状态转为塑性状态, 土体塑性区开始出现并逐渐扩展; 达到或接近极限抗拔承载力后, 地基裂缝迅速开展并贯通, 地基发生整体剪切破坏, 抗拔承载力迅速降低, 存在一个荷载卸载过程。

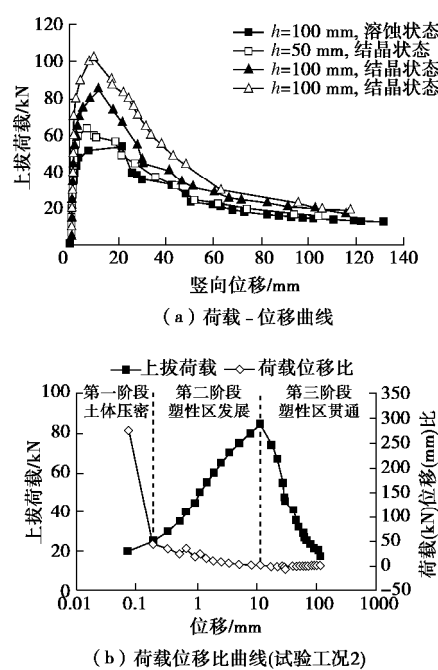


图 10 加载过程荷载 - 位移关系

Fig. 10 Load-displacement relationship during uplift loading

以试验基础上荷载 - 位移曲线峰值点荷载作为极限抗拔承载力, 可得到 4 个试验基础的抗拔承载力及其相应的极限位移, 见图 11。从图 11 中可以看出: 表层粗颗粒盐渍土层结晶状态下随着盐渍土层厚度的增加, 基础抗拔承载力显著增加; 结晶状态下基础抗拔承载力显著高于溶蚀状态。基础极限位移表现出非线性变化特征, 溶蚀状态下基础极限位移显著高于结晶状态。由此可见, 表层粗颗粒盐渍土层状态对掏挖基础抗拔承载力和位移的影响十分显著, 设计过程中应予以重视。

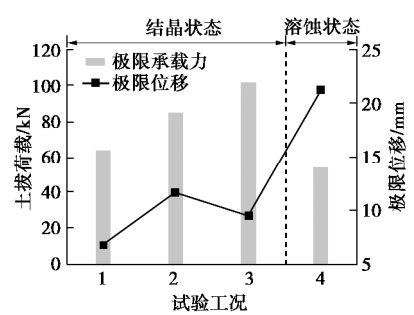


图 11 试验基础极限承载力和位移

Fig. 11 Ultimate uplift bearing capacities and displacements

2.4 地基破裂面

图 12 给出了 4 个模型试验工况地基破裂锥体在地面上的投影亦即地基表面破裂范围分布规律。从图 12

可以看出, 地基表面破裂范围均以基础中心为圆心, 近似表现出圆形分布特征, 其偏差主要是由于地基填料不均匀以及加载过程中荷载分布不均等因素引起。值得注意的是, 表层粗颗粒盐渍土层结晶状态下地基表面破裂范围相对较大, 说明结晶状态下上拔荷载对基础周围土体影响范围较大, 地基土体所提供的极限抗拔承载力亦较高。

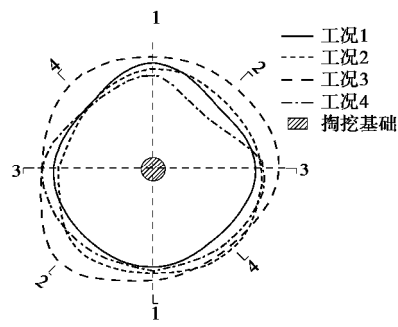


图 12 上拔破裂锥体平面投影

Fig. 12 Planar projection of failure cone

选取 4 个典型剖面分别对 4 个模型试验工况的地基破裂锥体进行测量, 以获取 4 个剖面方向的破裂面数据, 进而绘制出地基破裂面形状变化规律图, 如图 13 所示。从图 13 中可以看出, 无论上部粗颗粒盐渍土层结晶或溶蚀状态, 上拔地基土体的破坏模式均表现为从基础底部向上近似以直线形态变化。由于地基土质及压实等方面的离散性, 掏挖基础两侧破裂面形态表现出一定的不对称特征。

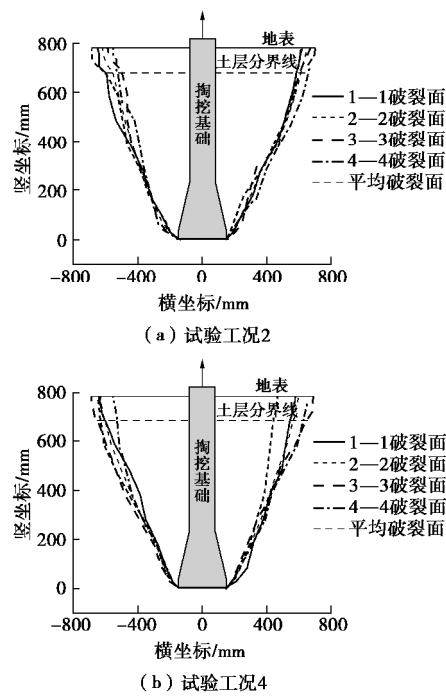


图 13 掏挖基础粗颗粒盐渍土地基破裂面

Fig. 13 Failure planes of coarse-grained salty soil foundation

基于上述地基基础破裂面几何形态规律分析, 地

表 3 地基破裂面分段直线方程拟合结果
Table 3 Fitting data for failure planes

破裂面编号	土层	位置	m	$\cot\theta$	区间/mm	R^2
1—1	粗颗粒盐渍土	左	-101.5	-1.28	$-685 < x < -575, 630 < z < 780$	0.981
		右	-166.4	1.22	$651 < x < 775, 630 < z < 780$	0.999
	普通粗颗粒土	左	-234.5	-1.48	$-575 < x < -150, 0 < z < 630$	0.993
		右	-233.2	1.32	$150 < x < 651, 0 < z < 630$	0.988
3—3	粗颗粒盐渍土	左	-100.2	-1.26	$-690 < x < -580, 630 < z < 780$	0.976
		右	-23.92	1.16	$559 < x < 690, 630 < z < 780$	0.994
	普通粗颗粒土	左	-268.3	-1.51	$-580 < x < -150, 0 < z < 630$	0.988
		右	-256.6	1.58	$150 < x < 559, 0 < z < 630$	0.993

基土体上拔破裂面形态近似表现为直线方程形式。因此，采用最小二乘法对表层粗颗粒盐渍土层及下伏普通粗颗粒碎石土地基的破裂面形态分别按如下直线方程进行拟合：

$$z = m + x \cot \theta \quad , \quad (1)$$

式中， x ， z 分别为测量点的横坐标和纵坐标， m 为数据拟合参数， θ 为地基上拔破裂面角度（°）。

以试验工况 3 为例，其数据拟合结果见表 3，由于篇幅所限，仅给出 1—1 和 3—3 剖面的拟合结果。从表 3 中可以看出，通过式（1）进行的直线方程数据拟合相关指数 R^2 均大于 0.97，表明采用式（1）对粗颗粒盐渍土地基破裂面形态特征进行拟合分析是合理的。此外，拟合参数 $\cot \theta$ 亦即地基上拔破裂角 θ 分别接近于稳定数值，由此表明上拔破裂锥体的不同剖面其形状大体一致，粗颗粒盐渍土地基上拔破裂面几何形态表现为理想的分段直线方程形式。

基于上拔破裂角 θ 拟合数据，分别对普通粗颗粒土、结晶状态粗颗粒盐渍土层及溶蚀状态粗颗粒盐渍土层上拔角度 θ 进行统计分析，并选取各地基土层上拔角统计均值作为上拔角取值依据，结果如图 14 所示。结果表明，上拔角 θ 随地基土层土质不同而表现出明显的差异，普通粗颗粒土层上拔角 θ_1 约为 32°，结晶状态粗颗粒盐渍土层上拔角 θ_2 约为 34°，溶蚀状

态粗颗粒盐渍土层上拔角 θ_3 约为 18°。分析各地基土层上拔角 θ ，由于干旱蒸发条件下上部结晶状态粗颗粒盐渍土层与下伏普通粗颗粒土地基的承载力与强度均较高，因而上拔角差别不大；降雨溶蚀条件下，上部溶蚀状态粗颗粒盐渍土层的承载力与强度大大降低，因而上拔角大大降低，与下伏普通粗颗粒土地基的上拔角差异较大。

3 结 论

（1）上拔加载过程中地面以基础为中心产生明显隆起现象，逐渐形成以基础为中心的环状和放射状裂缝；随着上拔荷载增加，地表微裂缝不断扩展；当荷载达到或接近极限荷载时，地基裂缝迅速开展并贯通，地基整体剪切破坏。

（2）加载过程中地面隆起范围近似呈圆形扩大趋势；上拔位移随距基础中心距离增大而不断减小；加载初期上拔位移缓慢增加，位移梯度较为均匀；随着上拔荷载增大，基础附近地面上拔位移显著增加且位移梯度增大。

（3）粗颗粒盐渍土地基荷载 - 位移关系表现为有峰值荷载的“软化型”曲线；结晶状态下抗拔承载力随着盐渍土层厚度增加显著增加；结晶状态下抗拔承载力显著高于溶蚀状态。

（4）粗颗粒盐渍土地基上拔破裂面几何形态表现为理想的分段直线方程形式；普通粗颗粒土层上拔角约为 32°，结晶状态粗颗粒盐渍土层上拔角约为 34°，溶蚀状态粗颗粒盐渍土层上拔角约为 18°。

参考文献：

[1] 华遵孟, 沈求武. 西北内陆盆地粗颗粒盐渍土研究[J]. 工程勘察, 2001(1): 28 - 31. (HUA Zun-meng, SHEN Qiu-wu. Study on coarse saline soil of north-western inland basin[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2001(1): 28 - 31. (in Chinese))

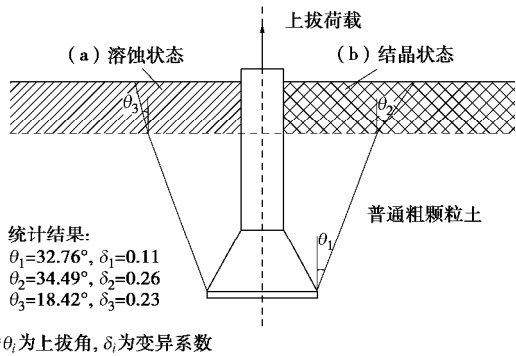


图 14 掏挖基础粗颗粒盐渍土地基破裂模式

Fig. 14 Failure modes of coarse-grained salty soil foundation

- [2] 程东幸, 许 健, 刘志伟, 等. 粗颗粒盐渍土大型剪切强度试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2017, **15**(5): 149 - 153. (CHENG Dong-xing, XU Jian, LIU Zhi-wei, et al. Experiments on large-scale direct shear strength of coarse-grained saline soil[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2017, **15**(5): 149 - 153. (in Chinese))
- [3] 鲁先龙, 乾增珍, 童瑞铭, 等. 戈壁地基扩底掏挖基础抗拔试验及其位移计算[J]. 岩土力学, 2014, **35**(7): 1871 - 1877. (LU Xian-long, QIAN Zeng-zhen, TONG Rui-ming, et al. Uplift field tests and displacement prediction on belled piers in Gobi[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, **35**(7): 1871 - 1877. (in Chinese))
- [4] 刘志伟, 程东幸, 张希宏. 粗颗粒盐渍土回填碾压试验研究[J]. 工程勘察, 2012(6): 18 - 21. (LIU Zhi-wei, CHENG Dong-xing, ZHANG Xi-hong. Experimental study on back filling and rolling compaction of coarse-grained salty soil[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2012(6): 18 - 21. (in Chinese))
- [5] DL/T 5219—2014 架空输电线路基础设计技术规程[S]. 2014. (DL/T 5219—2014 Technical code for design of foundation of overhead transmission line[S]. 2014. (in Chinese))
- [6] 郝冬雪, 张永建, 陈 榕, 等. 输电线路掏挖基础极限上拔承载力变分解法[J]. 岩土力学, 2015, **36**(1): 163 - 170. (HAO Dong-xue, ZHANG Yong-jian, CHEN Rong, et al. Variational solution of ultimate uplift capacity for excavated foundation of transmission tower[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, **36**(1): 163 - 170. (in Chinese))
- [7] GURUNG S B, NAKAZIMA Y, SAKAJO S, et al. Centrifugal modeling of enlarged base foundation subjected to pull-out force[J]. Soils and Foundations, 1998, **38**(4): 105 - 113.
- [8] CHAE D, CHO W, NA H Y. Uplift capacity of belled pile in weathered sandstone[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2012, **22**(4): 297 - 305.
- [9] NAZIR R, MOAYEDI H, PRATIKSO A, et al. The uplift load capacity of an enlarged base pier embedded in dry sand[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, **8**(9): 7285 - 7296.
- [10] DICKIN E A, LEUNG C F. The influence of foundation geometry on the uplift behaviour of piles with enlarged bases[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2011, **29**(3): 498 - 505.
- [11] LU X L, QIAN Z Z, YANG W Z. Axial uplift behaviour of belled piers in sloping ground[J]. Geotechnical Testing Journal, 2017, **40**(4): 579 - 590.
- [12] 刘生奎, 李永祥. 掏挖基础在西北戈壁地区的应用探讨[J]. 电网与水力发电进展, 2008, **24**(1): 46 - 49. (LIU Sheng-kui, LI Yong-xiang. Research on application of excavated foundation for steel towers in northwest stone desert[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, **24**(1): 46 - 49. (in Chinese))
- [13] 安维忠, 李永祥, 刘生奎. 输电线路戈壁碎石土地基现场直剪实验[J]. 电力建设, 2010, **31**(5): 66 - 69. (AN Wei-zhong, LI Yong-xiang, LIU Sheng-kui. Field direct shearing tests of gobi gavel soil in northwest for 750 kV transmission line engineering[J]. Electric Power Construction, 2010, **31**(5): 66 - 69. (in Chinese))
- [14] 鲁先龙, 郑卫锋, 程永锋, 等. 戈壁滩输电线路碎石土地基全掏挖基础试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1779 - 1783. (LU Xian-long, ZHENG Wei-feng, CHENG Yong-feng, et al. Experimental study on excavated foundation of transmission line gravelly soils in gobi area of Northwest China[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1779 - 1783. (in Chinese))
- [15] QIAN Z Z, LU X L, HAN X, et al. Interpretation of uplift load tests on belled piers in Gobi gravel[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2015, **52**(7): 992 - 997.