

上拔荷载作用下的土体细观结构分析

刘文白¹, 田 桥²

(1. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 200135; 2. 大连市港口与口岸局, 辽宁 大连 116001)

摘要: 对上拔荷载作用下桩-桶基础周围土体细观结构特征进行试验研究。通过对桩-桶基础的全模和半模模型试验, 研究土中破坏面, 对土中破坏面和桩侧不同位置的测点进行图像拍摄。桩-桶基础的上拔破坏为: 桶上部土体的压缩变形-塑性区开展-整体剪切破坏的渐进性破坏; 桶-桩周围的土体由于桶和桩侧的摩擦力, 致使土中的塑性区开展-整体剪切破坏的渐进性破坏。土表裂缝是以基础中心为圆心的同心圆环状裂缝, 并伴有放射状裂缝。分析土体结构细观结构特征变化, 随荷载增加, 土的大孔隙增多, 土结构变化从土孔隙体积变化为主导作用逐渐变为土颗粒的定向为主导作用, 土结构松弛, 颗粒接触点减少, 颗粒的咬合接触减少, 在破坏面上颗粒有显著的定向性。研究破坏面的细观结构参数与抗拔强度的关系, 上拔荷载作用下破坏面的孔隙率、孔隙率增量、颗粒总数、颗粒面积和颗粒偏心度均有明显的突变, 其变化率均为最大值。随荷载增加, 孔隙率增加, 而颗粒总数、颗粒面积和颗粒偏心度减少。沿桩侧的土结构孔隙性受上拔荷载影响显著, 不仅受桩的滑移影响, 还受土体的整体剪切的影响。分析结果对上拔地基破坏的细观力学研究具有重要价值。

关键词: 土力学; 上拔荷载; 砂土; 破坏面; 细观结构; 强度

中图分类号: TU 41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2007)增 2-4311-08

ANALYSIS OF SOIL MESO-STRUCTURE UNDER UPLIFT LOAD

LIU Wenbai¹, TIAN Qiao²

(1. College of Communications and Transportation, Shanghai Maritime University, Shanghai 200135, China;

2. Dalian City Harbor and Port Bureau, Dalian, Liaoning 116001, China)

Abstract: Meso-structure characterization of sand was studied on pile-bucket foundation bearing uplift load. Based on a series of uplift loading model tests, analysis of the failure modes and the development of slide rupture body in soil of pile-bucket foundation and the deformation process of soil is performed. Then soil meso-structure on plane of rupture and pile side is recorded with photos. Uplift failure of the pile-bucket foundation can be analyzed as compressive deformation of soil on the top part of the bucket-developed plastic zones—complete shear fracture of progressive failure. The frictional force of the bucket and pile will cause an increase in the shear stress of the soil surrounding the bucket and pile, and it will also cause developed plastic zones—complete shear fracture and progressive failure in the soil. The cracks on the surface of the soil are based on the centre of the concentric circle ring cracks in the centre of the foundation. The radius of the outer flank of the circle ring cracks has a good correlative relationship with the width of the foundation, about approximate 5.6 times against that of the bucket radius. Change of soil meso-structure characterization was researched. Load increasing, quantities of large pores increasing, and pore volumes will play leading roles in the change of soil structure; and gradually the direction of sand grains plays a leading role. Therefore, soil structure is loose, and contact points of grains are decreased; interlocking contact of grains are decreased. The grains have been marked directionality on plane of

收稿日期: 2006-07-28; **修回日期:** 2006-10-30

基金项目: 上海市重点学科科研资助项目(J50601); 上海市教育委员会科研资助项目(07ZZ99)

作者简介: 刘文白(1955-), 男, 博士, 1982年毕业于内蒙古工学院建筑工程系建筑结构专业, 现任教授, 主要从事土力学方面的教学与研究工。E-mail: liuwb8848@163.com

rupture. The relation of meso-structure parameters and pull strength on plane of rupture, porosity, incremental porosity, total grains, grains area and eccentricity of grains of rupture of plane have sudden change on uplift load; and their rates of change all are maximum. When load increasing and porosity are increased, the total grains, grains area and eccentricity are decreased. The porosity of soil structure of pile side is influenced by the uplift load, it will be influenced by pile sliding, and be influenced by general-shear failure. The results have important values on meso-mechanics study of subgrade bearing uplift load.

Key words: soil mechanics; uplift load; sand; plane of rupture; meso-structure; strength

1 引言

关于土体细观结构的研究经历了从概念、术语到定性描述及结构分类阶段，再到图像研究和宏观与细观相结合的定量分析阶段，以及对结构性本构模型的研究阶段。N. K. Tovey^[1]对土体结构的电子显微照片进行了定量分析，在 1991 年开发了系列软件，利用计算机对黏性土的细观结构图像进行处理；施斌^[2]利用图像分析系统对黏性土的微观结构进行了比较详细的研究；谭罗荣和孔令伟^[3]对红黏土微观特征进行了研究，在颗粒定向性和图形处理领域取得了一定的进展。J. Deh-Jeng 等^[4, 5]研究了初始应力对砂土细观结构的影响，描述了砂土试样破坏时的孔隙率，评价了砂土颗粒的方向性和砂土颗粒剪切范围的形成，数值模拟结果与试验可视图像是一致的；张洪武^[6]提出了微观接触颗粒岩土非线性力学分析模型。张嘎等^[7]对土与结构接触面的颗粒细观运动进行了量测分析；刘志斌等^[8]对膨胀土的微观孔隙定量研究；周翠英等^[9]对软岩软化的微观机制研究。人们认识到土的结构对土体的性质起着决定性作用，这意味着对过去的各种弹性、弹塑性数学模型需要从新的角度去认识和发展，上述学者对这些问题进行了深入的研究，对土体结构的图像分析及其与宏观力学的关系进行了大量的基础性试验研究工作。但是，需要对工程基础与土体的承载机制进行细观力学的研究，尤其是需要对基础的上拔承载性能的细观力学研究，更重要的是建立宏观力学特性与细观结构分析相关联的宏细观研究方法。对桩基础和桶基础的研究，有 M. Hesham

等^[10, 11]关于抗拔承载性能的试验与研究以及 L. Zdravkovic^[12]的桶基础上拔承载参数的分析。

通过试验分析砂土地基桩 - 桶基础在上拔承载性能及其规律，通过对试验过程中土体细观结构数码相机拍摄和图像分析，系统地研究在上拔荷载作用下地基土的细观力学特性，土体细观结构变化与宏观力学现象的关联，揭示基础与土体的相互作用机制，并将其应用于上拔桩的承载理论研究。

2 基础资料

2.1 模型试验

采用上海奉贤海滩砂土为室内模型试验用土样。经土的颗粒分析，土粒组成主要集中在细砂粒部分，细砂粒占 98.6%，级配均匀，颗粒的磨圆度差，定名为细砂。模型试验在一模型箱中进行，模型箱长 0.5 m，宽 0.5 m，高 0.6 m。模型试验采用的土的物理力学性质指标见表 1。

桩 - 桶基础模型采用了全模和半模 2 种形式。全模基础主要用于测试基础受拔时土的力学行为；半模基础主要用于观测基础受拔后土体的变形、位移以及土体的破坏形状。共进行 8 次全模型上拔试验，3 次半模型试验。图 1 给出了桩 - 桶基础结构设计和试验示意图，桩 - 桶基础模型尺寸见表 2。

2.2 土体在上拔荷载作用下的破坏形态

在模型试验中，观测了半模试验过程中土体中破裂面开展和位移，全模试验的土表破裂面的出现与发展。荷载等级较小时，桩 - 桶上抬使桩的底端与土体分离，桶侧壁和桩侧壁摩擦力带动桶和桩周围一部分土体向上位移，荷载增大到一定阶段，形

表 1 土的物理力学性质指标
Table 1 Physico-mechanical properties of sand

试验 编号	含水量 w/%	密度 $\rho/(g \cdot cm^{-3})$	土粒 相对 密度	土粒百分含量/%				孔隙 比 e	黏聚力 c_q/kPa	内摩擦 角 $\varphi_q/(^\circ)$	压缩系数 a_{1-2}/MPa^{-1}	压缩模量 $E_{S(1-2)}/MPa$	岩性		
				>1 mm	1~0.5 mm	0.5~ 0.25 mm	0.25~ 0.1 mm							0.1~ 0.075 mm	<0.075 mm
3	5.90	1.46	2.65	0.01	0.12	0.53	96.10	2.51	0.73	1.57	0.00	38.30	0.21	12.14	细砂

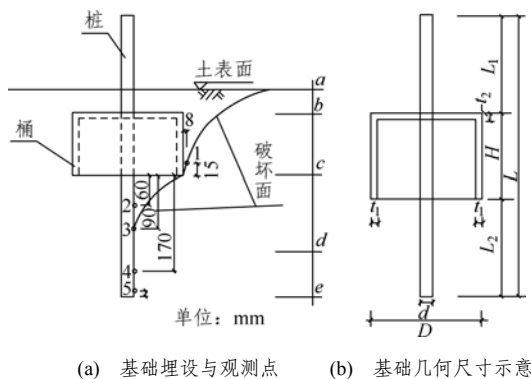


图 1 桩 - 桶基础结构设计和试验示意图
Fig.1 Design and tests of pile-bucket foundation

表 2 桩 - 桶基础模型尺寸
Table 2 Size of pile-bucket foundation model mm

桶外径 D	桶侧壁厚 t_1	桶顶壁厚 t_2	桶高 H	桩直径 d	桩长 L	桩长 L_1	桩长 L_2
120	5	5	54	8	800	286	460

成了近似锥形的破坏面(见图1)。土表面至桶底 ac 部分: 荷载较小时, 桩 - 桶周围土体未发生裂缝, 土体表面也没有隆起, 该荷载阶段的上拔位移由桶顶上 ab 部分的土体压缩引起的; 当荷载增加, 由于桩 - 桶侧表的摩擦力, 使桩 - 桶周围一定范围内土中剪应力增加, 土表开始隆起, 土中出现塑性; 至破坏荷载, 土中破裂面迅速开展, 土表隆起直至连通产生整体滑动。土体的破坏形状为: ac 段的二次曲线回转体, cd 段的二次曲线回转体, de 段的沿桩侧表的圆柱体, 组合形成桩 - 桶基础的上拔破坏形状, 破坏面在 c 点通过桶的底端。桩 - 桶基础的上拔破坏为: 桶上部土体的压缩变形 - 塑性区开展 - 整体剪切破坏的渐进性破坏; 桶和桩周围的土体由于桶和桩的摩擦力, 使桩和桶周围土体的剪切应力增加, 致使土中的塑性区开展 - 整体剪切破坏的渐进性破坏。

土表裂缝是以基础中心为圆心的同心圆环状裂缝, 外侧圆环裂缝半径与基础宽度有着良好的相关关系, 约为桶半径的 5.6 倍, 并伴有放射状裂缝。全模和半模试验的土表与土中上拔破坏形态如图 2 所示。

2.3 试验过程中的土结构拍摄

将试验砂土分层填入模型箱内, 每层 15 cm, 用锤夯击至要求密实度, 并进行分层检测。将基础压入土体内, 使半模基础紧贴玻璃, 便于观测拍摄。静置大约 24 h 后进行加荷试验, 用百分表记位移, 量力环控制加载。根据全模和半模试验的破坏面位



(1) 全模试验(土表破坏形态) (2) 半模试验(土中破坏形态)

图 2 土表与土中上拔破坏形态
Fig.2 Photos of uplift failure in soil

置作统计分析, 绘制土中破坏面, 确定观测点 1 位于 bc 段土中破坏面, 观测点 2~5 位于桶下 ce 段桩侧表的土中。土中破坏面和拍摄观测点 1~5 位置见图 1(a)。在各观测点位置, 设置体视显微镜物镜, 将数码相机与显微镜连接, 在加荷过程中拍摄观测点分析区域的土结构图像, 分析土结构的细观变化。对拍摄的分析区域的图像利用 MiVnt 图像分析系统进行了细观结构参数分析。分析区域的总面积为 $800 \mu\text{m} \times 840 \mu\text{m}$ 。

根据对试验编号 3 的半模试验结果分析, 该试验的破坏上拔荷载为 0.487 kN, 即加荷等级 $I = 15$, 对试验编号 3 的半模试验图结果变化进行了拍摄观测。为便于照片拍摄, 控制土体的变形速率, 施加上拔荷载按上拔位移控制, 即在加荷初期每次加上拔荷载使基础上拔位移为 0.03 mm, 在加荷中后期每次加上拔荷载使基础上拔位移为 0.02 mm。对不同上拔位移时的土结构进行了拍摄(见图 3)。基础上拔位移、上拔荷载与图 3 照片编号的对应关系见表 3。当 $I = 12$ 即基础上拔位移为 0.36 mm 时, 观测区域颗粒无明显变化, 之后每一次加荷以上拔位移等于 0.02 mm 为一加荷等级。当加荷到 0.42 mm 时土体破坏, 即 $I = 15$, 从分析区域的图片中可以明显看出土体出现破裂面, 土体破坏。

3 砂土剪切破坏面的细观结构分析

土的微结构形态可以由颗粒形态、颗粒排列形式、孔隙性及颗粒接触关系 4 项“结构要素”加以确定^[13]。在上拔试验过程中, 对分析区域的土结构特征进行了研究。

孔隙率的变化特征。随荷载增加, 砂土结构发生改变, 主要表现为孔隙分布的变化和孔隙体积的增加。孔隙率的改变量明显, 孔隙体积增加, 而孔隙率增加。随荷载的增加, 土颗粒重新组合和定向

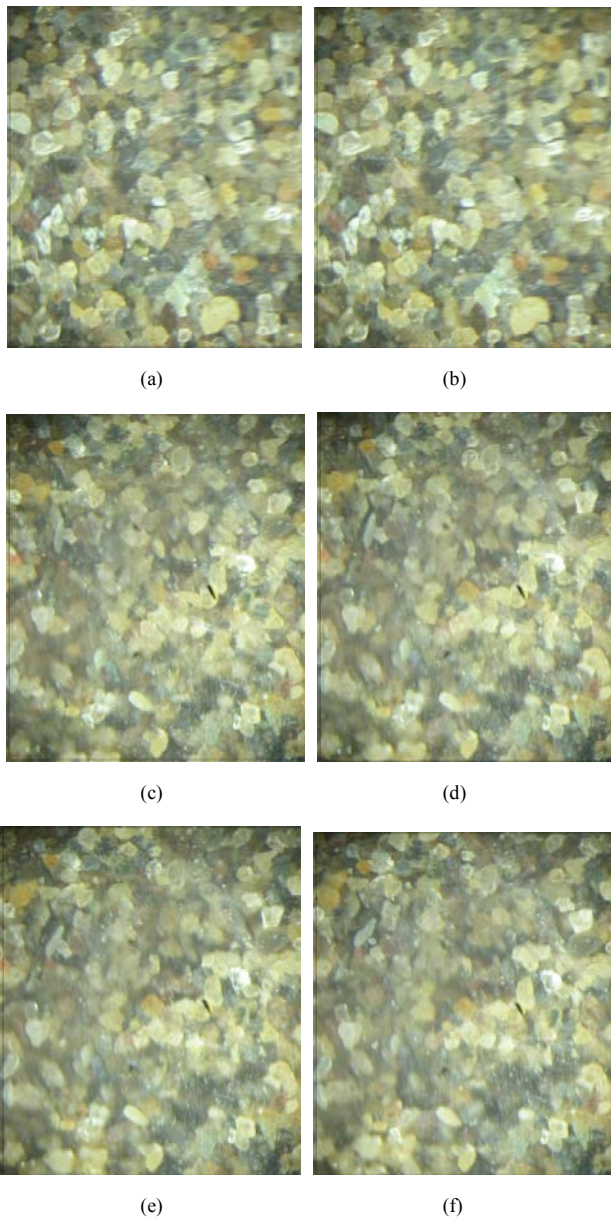


图3 不同荷载下的分析区域土颗粒分布

Fig.3 Sand grains distribution of observation area in different load grades

表3 加荷等级与相关照片
Table 3 Load grades and relative photos

<i>I</i>	对应荷载 <i>T</i> /kN	基础上拔位移 <i>S</i> /(0.01 mm)	对应图4照片编号
0	0.000	0.0	
12	0.417	60.0	
13	0.440	65.5	(a)
14	0.463	72.8	(b)
15	0.487	101.5	(c)
16	0.492	132.5	(d)
17	0.498	160.3	(e)
18	0.501	195.5	(f)

排列，土结构的变化由孔隙体积变化起主导作用逐渐变为由土颗粒的定向排列的主导作用，在破坏面附近土体逐渐疏松，孔隙率增加，孔隙的个数减少而大孔隙的数量增多。

孔隙的几何变化特征。在上拔荷载作用下，大孔隙的体积增加较多，变化较大。大孔隙的数量增多，其原因是小孔隙在上拔荷载作用下，由于土体受剪切体胀，小孔隙的体积增加，变为大孔隙；大孔隙体积增大，原来的小孔隙有一部分变为大孔隙。这一原理，可以称为“大孔隙优先改变原则^[10]”。孔隙的形状改变可以从颗粒方向改变做出判断。随荷载的增加，孔隙的形状由圆滑型逐渐改变为狭长形，破坏面的孔隙形状以剪切方向的狭长形为主。

颗粒的接触关系。土体的初始状态较为密实，颗粒之间形成互相咬合的稳定结构。随上拔荷载增加，土结构松弛，孔隙增加，颗粒接触点减少，颗粒的咬合接触减少，摩擦力逐渐发挥。颗粒之间的摩擦由咬合摩擦为主导作用改变为滑动摩擦为主。

颗粒排列的定向特征。颗粒的方向定义为颗粒长轴与水平 *x* 轴的夹角 θ 。随上拔荷载的增加，土颗粒的排列由紧密逐渐疏松，土颗粒之间的距离逐渐增大，土颗粒的方向性有变化，但不很显著；在破坏荷载作用下，土颗粒的方向性有显著变化，颗粒排列表现出明显的定向性，在破坏荷载之后继续上拔，颗粒的定向性继续保持。在破坏面上颗粒具有显著的定向性。

4 破坏面的微观结构特征与抗拔强度的关系

4.1 破坏面的微观结构参数与抗拔强度的关系

在上拔试验过程中，对所确定分析区域的土结构进行显微体视图像拍摄，分析土结构微观图像，获取和分析了土颗粒的方向性、孔隙率、颗粒面积、颗粒长轴和颗粒的偏心度的变化及其规律，以及与抗拔强度的关系。表4给出了不同加荷等级下破坏面的微观结构参数。对土结构孔隙性的分析用平面孔隙率 *n* 表示，分析区域的孔隙面积与总面积的比值为 *n*，*n_i* 为加荷等级 *I* = 1, 2, ..., *i*, ... 对应分析区域土体的孔隙率； Δn 为每次加荷前后土体的孔隙率增量；颗粒总数 *N* 为分析区域的土颗粒的总个数；颗粒面积 *A₀* 为分析区域内的全部土颗粒的平面投影面积；颗粒面积率为分析区域的颗粒平面投影面积与分析区域总面积的比值；颗粒的偏心度均值 *E*

表 4 破坏面的细观结构参数

Table 4 Parameters of meso-structure for plane rupture

I	n_i	Δn	颗粒总数 N	颗粒面积 $A_0/(10^5 \mu\text{m}^2)$	颗粒面积率/%	偏心度均值 E
13	0.316 9		322	1.649	24.54	0.275 9
14	0.342 9	0.026 1	317	1.611	23.97	0.266 9
15	0.580 9	0.238 0	251	1.293	19.24	0.230 9
16	0.602 3	0.021 4	254	1.175	17.49	0.222 1
17	0.654 9	0.052 6	229	1.095	16.29	0.226 7
18	0.653 1	-0.001 7	212	1.279	19.03	0.222 1

为颗粒短轴 B 与长轴 A 比值的平均值, $E = B/A$, 表明颗粒在分析平面内的圆度。偏心度取值为(0, 1), 其值越小, 颗粒越狭长。

从表 4 中可以看出, 砂土细观结构参数中, 随荷载的增加, 孔隙率是增加的; 颗粒的总数、颗粒面积、偏心度均值是减少的; 孔隙率增量随荷载增加而增加, 在破坏荷载后随荷载增加而减少。孔隙率增加, 表明随上拔荷载增加, 土体的密实度是由初始的密实状态随上拔位移增加而结构疏松。同样, 颗粒的个数减少和颗粒面积减少, 均表明土结构随上拔位移增加而结构疏松。若以某一级荷载的细观结构参数作基数 a , 在荷载等级增加后相应的结构参数为 b , 则该细观结构参数的变化率 R 定义为: $R = [(a - b)/a] \times 100\%$ 。则破坏时细观结构参数的变化率 R_f 取 b 为 $I = 15$ 时的结构参数, 计算孔隙率的变化率为 $R_f = 71.71\%$, 孔隙率增量的变化率 $R_f = 792.13\%$, 颗粒总数的变化率为 $R_f = 20.82\%$, 颗粒面积变化率为 $R_f = 19.74\%$, 偏心度变化率为 $R_f = 13.49\%$ 。土体受破坏上拔荷载作用, 孔隙率的变化率最大, 其次为颗粒的个数和颗粒的面积(变化率较为接近), 说明受破坏荷载时土的细观结构参数变化最显著的是孔隙率。

图 4 表示分析区域细观结构参数孔隙率 n_i 与加荷等级 I 的关系, n_i 突然增大处在 $I = 15$, 可以分析出加荷到此时土体破坏, 即形成剪切带, 此后继续加荷, n_i 增大速率变缓。

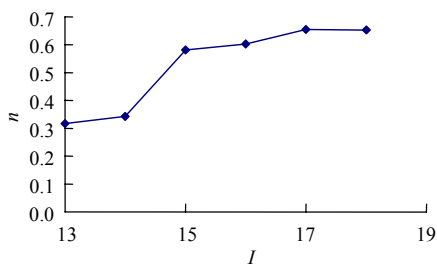


图 4 $I-n$ 关系曲线

Fig.4 Relation curve between I and n

图 5 表示分析区域孔隙率增量 Δn 随荷载增加的变化关系, 土体孔隙率的变化大致可以分为 3 个阶段: 第 1 阶段是 $I = 13 \sim 14$ 阶段, Δn 的增量较小, 表现土体的结构变化较小。第二阶段是加荷等级到 $I = 15$, 此过程 Δn 的增量很大, 即孔隙率的增大是显著的, 表明土体的强度已发挥, 剪切带已经形成, 土体破坏, 对应的 $I = 15$ 为破坏荷载, 即基础上拔位移为 0.42 mm。第 3 阶段是 $I = 16$ 及以后, 此过程对应于土体在破坏后继续上拔, 上拔位移持续增加, 而上拔荷载维持在破坏荷载, 分析区域的孔隙率增量 Δn 变化小, 其变化幅度趋于平稳, 土的孔隙特征达到一个新的稳定状态。

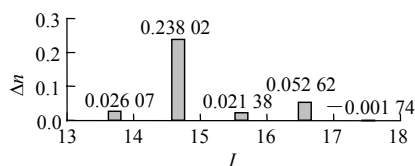


图 5 $I-\Delta n$ 关系曲线

Fig.5 Relation between I and Δn

图 6, 7 对分析区域的颗粒总数 N 、颗粒面积 A 与荷载等级 I 的关系曲线, 随上拔荷载的增加, 颗粒面积逐渐减少, 在 $I = 15$ 时颗粒面积有一突变, 表明土体的孔隙增大剪切破坏形成, 当荷载超过 15 时继续上拔, 颗粒面积的减小趋于平缓。从颗粒总数和面积率(见表 4)的变化同样有上述的分析结果。在破坏荷载下, 颗粒总数和面积的变化最大。

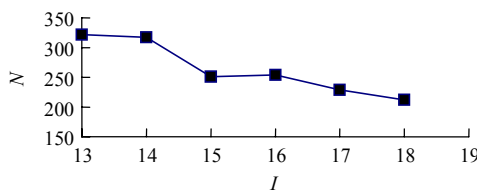


图 6 $I-N$ 关系曲线

Fig.6 Relation curve between I and N

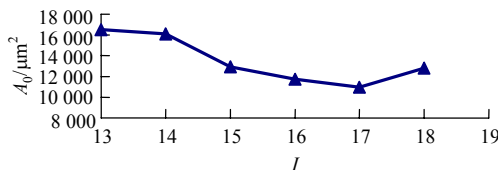


图 7 $I-A_0$ 关系曲线

Fig.7 Relation curve between I and A_0

从图 8 中可以明显看出, $I = 14 \sim 15$ 阶段的颗

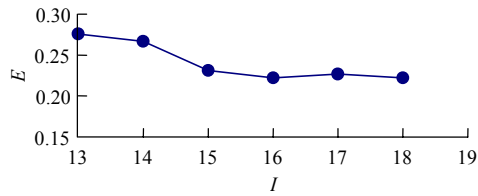


图 8 I-E 关系曲线

Fig.8 Relation curve between I and E

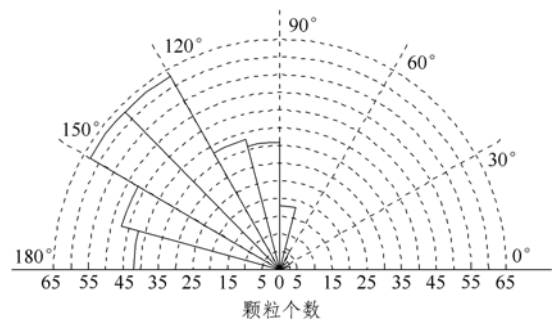
粒偏心度均值变化相比 $I = 13 \sim 14$ 加荷阶段有明显的变化。从颗粒偏心度均值来看, $I = 13$ 和 14 时颗粒偏心度均值基本相等, 大约为 0.27 左右, 变化率为 $R = 3.26\%$ 。当施加荷载到 $I = 15$ 时, 颗粒偏心度有最大的下降幅度, 变化率为 $R_f = 13.49\%$, 表明颗粒产生显著的旋转, 颗粒的空间位置发生了变化。表明在破坏荷载作用下, 颗粒长短轴重新调整, 颗粒发生旋转, 颗粒的空间排列发生大的改变。破坏荷载以后, 当 $I = 16$ 时, 变化率为 $R = 3.81\%$; 当 $I = 17$ 时, 变化率为 $R = 2.07\%$, 颗粒的偏心度变化稳定, 表明土破坏后继续上拔, 土颗粒的空间排列变化趋于稳定。

表 5 中数据为颗粒在各荷载等级下在不同颗粒长轴方向范围内的颗粒个数统计, 表示了随荷载变化, 颗粒的长轴方向的改变。图 9(a)和(b)分别表示了 $I=13$ 和 15 所对应的颗粒方向玫瑰图。由于颗粒方向在 $0^\circ \sim 180^\circ$ 和 $180^\circ \sim 360^\circ$ 的对称性, 以 $0^\circ \sim 180^\circ$ 的玫瑰图表示颗粒方向性的概率分布。从总体上来看, 长轴与水平 x 轴夹角成锐角的颗粒占很少一部分, 主要都呈钝角。而剪切带的发展方向是向右上与水平成 45° 左右, 整体上分析区域内的颗粒方向与剪切带方向呈正交。从土体破坏前的颗粒方向性来看, 在 $I = 13$ 时, 即破坏荷载的前 2 级荷载, 如表 5 中的 $I = 13$ 列和图 9(a)所示土颗粒夹角为 $135^\circ \pm 15^\circ$ 占较大一部分, 在 $105^\circ \pm 15^\circ$ 和 $165^\circ \pm 15^\circ$ 也有较多的分布, 说明此时颗粒的方向性是随机的, 而且颗粒的主导方向是 $120^\circ \sim 150^\circ$, 与剪切破坏面的方向大致成正交。在 $I = 14$ 时, 即破坏荷载的前 1 级荷载, 如表 5 的 $I = 14$ 列所示, 颗粒的主导方向是 $105^\circ \sim 165^\circ$, 颗粒的主导方向仍与剪切破坏面的方向大致成正交。在 $I = 15$ 作用下, 表 5 中的 $I = 15$ 列和图 9(b)所示, 土颗粒的主导方向分布在 $165^\circ \sim 180^\circ$, 由于上拔荷载作用下的剪切变形的发展, 颗粒的方向性显著, 以水平向为主。破坏后上

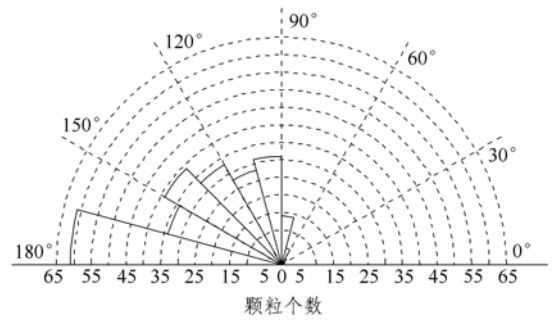
表 5 不同颗粒方向的颗粒个数统计

Table 5 Grains total in different direction on failure area

I	0°~	90°~	105°~	120°~	135°~	150°~	165°~
	90°	105°	120°	135°	150°	165°	180°
13	21	36	38	63	63	47	42
14	25	37	54	46	53	59	41
15	19	31	28	33	39	34	62
16	27	24	29	29	26	34	55
17	23	21	31	32	31	29	58
18	13	27	24	37	41	28	37



(a) I=13



(b) I=15

图 9 分析区域颗粒方向的玫瑰图

Fig.9 Direction of grains on failure area

拔位移继续增加, 土颗粒的方向性没有显著的变化, 如表 5 中的 $I = 16, 17, 18$ 列所示, 颗粒的主导方向仍以 $165^\circ \sim 180^\circ$ 为主, 由于此时剪切破坏面已经形成, 土颗粒的方向性趋于稳定, 土颗粒已经完成了随机排列 - 颗粒旋转 - 定向排列的过程。

4.2 桩侧土体的孔隙性分析

桩的上拔位移达到一定值后, 桩侧表面与土体产生滑动摩擦, 沿桩侧土中形成剪切带。剪切带的土结构受到严重扰动, 颗粒发生位移或转动, 引起土结构的变化, 孔隙性也会有相应的变化。观测在加荷等级 $I = 15$ 时, 观测点的孔隙率变化。选取桩侧 4 个点作为观测分析对象, 观测点 2~5 的位置如

图 1 所示。观测点 2 位于图 1 中 cd 段土中破坏面内的桩侧, 观测在土中破坏面内桩侧的孔隙性; 观测点 3 位于图 1 中点 d 的土中破坏面与桩侧交接处, 观测破坏面与桩侧交接处的孔隙性; 观测点 4 和 5 位于图 1 中土中破坏面下方的桩侧, 观测点 4 近破坏面的起点 d , 观测点 5 近桩端, 观测 de 段桩侧的土孔隙性。为了将土体破坏前后孔隙变化进行对比分析, 取加荷前的 4 个观测点(观测点 6~9)的孔隙率求其平均值, 观测点 6~9 的孔隙率分别为 $n_6=0.28355$, $n_7=0.31085$, $n_8=0.30914$ 和 $n_9=0.29099$, 其孔隙率的平均值记为 $n_0=0.29863$ 。观测点的孔隙率见表 6。

分析孔隙率的数据可知, n_3 最大, 可以说明点观测点 3 处土的结构受上拔影响的程度最严重, 因观测点 3 位于破坏面与桩侧滑移面的交接处; $n_4 < n_2$ 和 $n_5 < n_2$, 观测点 4 和 5 处土体受扰动的程度小于点 2, 因点 2 位于破坏面与桩之间, 同时受到破坏面和桩侧滑移的影响; n_4 和 n_5 接近, 仅受桩土的相互摩擦作用的影响, de 段的桩侧土结构受上拔影响程度是一致的, 也符合为 ac 段的二次曲线回转体的土体破坏形状的试验结果。

将桩侧土体破坏前后孔隙率变化记为 $\Delta n_i = n_i - n_0$ (i 表示观测点 2~5), 孔隙率变化率 $R_i = \Delta n_i / n_0$, (见表 6), 从表中可以看出, 破坏面与桩侧交接处的孔隙率变化率最大, 观测点 3 孔隙率变化率 R_i 超过 50% 桩侧土体受扰动也是很显著的, 观测点 2, 4, 5 孔隙率变化率 R_i 超过 25%。桩侧土结构的孔隙性不但受桩侧与土的摩擦作用影响, 而且还受土体整体剪切破坏的剪切带影响。

表 6 土体破坏前后的孔隙率及变化率

Table 6 Porosity and porosity change rates of soil failure

观测点 i	n_i	Δn_i	$R_i/\%$
2	0.417 79	0.119 16	39.90
3	0.456 93	0.158 30	53.00
4	0.382 59	0.083 96	28.12
5	0.379 42	0.080 79	27.05
n_0 (对比点)	0.298 63		

5 结 论

采用试验方法研究了在上拔荷载的作用下桩 - 桶基础周围土体细观结构的变化, 分析了土结构细

观特征与上拔破坏的关系, 包括孔隙率、颗粒总数、颗粒面积、和颗粒偏心度等细观结构参数的变化与上拔破坏的定量分析。试验中, 以上拔位移作为加荷等级控制条件是恰当的, 便于土结构的观测拍摄。

砂土剪切破坏面的细观结构分析表明, 随荷载的增加, 土结构的变化由孔隙体积变化起主导作用逐渐变为由土颗粒的定向排列的主导作用, 土颗粒的重新组合和定向排列, 在破坏面附近土体逐渐疏松, 孔隙率增加, 孔隙的个数减少而大孔隙的数量增多。由于土体受剪切体胀, 小孔隙的体积增加, 变为大孔隙, 孔隙变化遵循“大孔隙优先改变原则”。随上拔荷载的增加, 颗粒的接触关系, 土结构松弛, 孔隙增加, 颗粒接触点减少, 颗粒的咬合接触减少, 摩擦力逐渐发挥。颗粒之间的摩擦由咬合摩擦为主导作用改变为滑动摩擦为主。在破坏面上颗粒具有显著的定向性。

通过土破坏面图像分析, 探讨了破坏面的细观结构参数与上拔破坏的关系。随荷载的增加, 孔隙率增加, 颗粒的个数、颗粒面积、偏心度减少。孔隙率增加, 表明随上拔荷载增加, 土体的密实度是由初始的密实状态随上拔位移增加而结构疏松。同样, 颗粒的个数减少和颗粒面积减少, 均表明随上拔位移增加而结构疏松。受破坏荷载时土的细观结构参数变化最显著的是孔隙率。孔隙率增量、颗粒的个数、颗粒的面积和颗粒偏心度在破坏荷载下均有突变, 表明土体孔隙增大而剪切破坏形成。在破坏荷载作用下, 土颗粒长轴的主导方向分布在 $165^\circ \sim 180^\circ$, 破坏后上拔位移继续增加, 土颗粒的方向性已趋于稳定, 土颗粒已经完成了随机排列 - 颗粒旋转 - 定向排列的过程。

通过对桩侧与土摩擦作用的细观结构孔隙性分析, 观测点 3 位于破坏面与桩侧滑移面的交接处, 土结构受上拔影响最大; 观测点 2 同时受到破坏面和桩侧滑移的影响, 土结构受上拔影响次之; 观测点 4 和 5 仅受桩的摩擦影响。随测点位置的不同, 桩侧土结构的孔隙性不但受桩侧与土的摩擦作用影响, 而且还受土体整体剪切破坏的剪切带影响。

参考文献(References):

- [1] TOVEY N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure[C]// Proc. International Symposium on Soil Structure. PUSCH R ed. Stockholm: Swedish Geotechnical Institute, 1973: 50 - 57.

- [2] 施斌. 黏性土击实过程中微观结构的定量评价[J]. 岩土工程学报, 1996, 18(4): 57 - 62.(SHI Bin. The quantitative assessment of microstructure of clayey soil in the process of compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(4): 57 - 62.(in Chinese))
- [3] 谭罗荣, 孔令伟. 某类红黏土的基本特征与微观结构模型[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(4): 457 - 462.(TAN Luorong, KONG Lingwei. Fundamental property and micro-structure model of red clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(4): 457 - 462.(in Chinese))
- [4] DEH-JENG J, DAVID FROST J. Use of image analysis to study the microstructure of a failed sand specimen[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 137(5): 1 141 - 1 149.
- [5] WAN R G, GUO P J. Effect of microstructure on undrained behaviour of sands[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(1): 16 - 28.
- [6] 张洪武. 微观接触颗粒岩土非线性力学分析模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(1): 12 - 15.(ZHANG Hongwu. The mechanical model of nonlinear mechanical behaviours on micro-level contact of the granular geomaterials[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 12 - 15.(in Chinese))
- [7] 张嘎, 张建民, 梁东方. 土与结构面接触试验中的土颗粒细观运动量测[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(8): 903 - 907.(ZHANG Ga, ZHANG Jianmin, LIANG Dongfang. Microscopic measure of soil particle movement on soil-structure interface tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(8): 903 - 907.(in Chinese))
- [8] 刘志斌, 施斌, 王宝军. 改性膨胀土微观孔隙定量研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(4): 526 - 530.(LIU Zhibin, SHI Bin, WANG Baojun. The quantitative analysis of micro-pores on modified expansive soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 26(4): 526 - 530.(in Chinese))
- [9] 周翠英, 谭祥韶, 邓毅梅, 等. 特殊软岩软化的微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 394 - 400.(ZHOU Cuiying, TAN Xiangshao, DENG Yimei, et al. The micro-mechanism study of softening mechanism of soft rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 394 - 400.(in Chinese))
- [10] HESHAM M, EL N, JIN Q W. Uplift behaviour of tapered piles established from model tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, 37(1): 56 - 74.
- [11] DASH B K, PISE P J. Effect of compressive load on uplift capacity of model piles[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(11): 987 - 992.
- [12] ZDRAVKOVIC L, POTTS D M, JARDINE R J. A parametric of the pull-out capacity of bucket foundation in soft clay [J]. Geotechnique, 2001, 51(1): 55 - 67.
- [13] 胡瑞林, 李向全, 官国琳. 21世纪工程地质学生长点: 土体微结构力学[J]. 水文地质工程地质, 1999, 26(4): 5 - 8.(HU Ruilin, LI Xiangquan, GUAN Guolin. Growing point of engineering geologists in the 21st century: soil micromechanics[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 1999, 26(4): 5 - 8.(in Chinese))