

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2019.048



桩体刺入全过程褥垫层的工作特性

周志军¹, 郑昊²

(1. 五邑大学 土木建筑学院, 广东 江门 529020; 2. 通山县交通建设工程质量监督站, 湖北 通山 437600)

摘要:褥垫层是复合地基的核心构成,能协调桩、土之间的差异变形。在桩体刺入褥垫层的过程中,褥垫层的工作特性在发生变化,这方面研究还较少见。通过室内模型试验,观测桩体刺入褥垫层不同深度的桩顶压力、桩顶位移量、褥垫层的变形等试验结果,来研究褥垫层的全过程工作特性,并分析桩间土压力、桩径等对褥垫层的影响。结果表明:在桩体刺入过程中,褥垫层存在压密变形、剪切变形、压碎变形 3 个阶段;桩间土压力对褥垫层的整个变形过程均有影响,在其他条件相同时,褥垫层抵抗的桩顶压力、褥垫层的承载厚度均随着桩间土压力的增大而增大;桩径对褥垫层的影响主要在压碎变形阶段,褥垫层的承载厚度随桩径的增大而增大,且基本呈线性增长。

关键词:褥垫层;复合地基;桩;模型试验;工作特性

中图分类号:TU472 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2019)03-0041-08

Working characteristics of cushion subjected to pile penetration

Zhou Zhijun¹, Zheng Hao²

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Wuyi University, Jiangmen 529020, Guangdong, P. R. China;

2. Quality Supervision Station of Traffic Construction Projects in Tongshan County, Tongshan 437600, Hubei, P. R. China)

Abstract: Cushion is the core of composite foundation, which can coordinate the differential deformation between piles and soils. The working characteristics of the cushion may change when the pile penetrated into the cushion, which is lack of investigation at present. In this paper, by means of model tests, the working characteristics of the cushion during the penetrating of pile were analyzed by measuring the pile top's pressure, displacement and deformation of cushion. Besides, the effects of the pressure between piles and soil, and the pile diameter on the cushion were analyzed. The results show that, during penetration process, there are three different deformation stages, i. e., compaction deformation, shear deformation and crush deformation. The pressure between piles and soils affects the whole process of the cushion's deformation, and the bearing capacity and the bearing thickness of the cushion are increased with the pressure. The effect of the pile diameter on the cushion is significant in the crushing deformation stage. The bearing thickness of the cushion increased linearly with the pile diameter.

Keywords: cushion; composite foundation; pile; model test; working characteristics

收稿日期:2018-06-28

基金项目:广东高校优秀青年创新人才培养计划(2012LYM_0128);五邑大学 2014 年青年科研基金(2014zk12)

作者简介:周志军(1979-),男,博士,主要从事道路与地基处理研究,E-mail:zzjwyu@163.com。

Received:2018-06-28

Foundation item: Foundation for Distinguished Young Talents in Higher Education of Guangdong(No. 2012LYM_0128); Wuyi University Youth Research Fund Project in 2014(No. 2014zk12)

Author brief: Zhou Zhijun (1979-), PhD, main research interests: road and foundation treatment, E-mail: zzjwyu@163.com.

褥垫层是桩体复合地基的核心构成^[1-7],通过褥垫层的变形协调作用,使得桩、土共同承担上部荷载。

在褥垫层发挥变形协调作用时,桩体逐渐刺入褥垫层。目前,关于桩体刺入褥垫层的研究较多^[8-14],毛前等^[8]认为褥垫层在桩体刺入时呈球孔破坏模式,适用 Vesic 小孔扩张理论;陶景晖等^[9]基于 Meyerhof 理论分析褥垫层的作用机理;刘杰等^[10]、元乐等^[11]、肖耀廷等^[12]基于桩顶垫层刺入破坏模式及等沉面思想推导出桩体刺入量计算公式;郑俊杰等^[13]分别采用 Terzaghi 破坏模式、Mandel-Salencon 破坏模式、冲剪破坏模式研究褥垫层厚度不同时的工作特性;朱小军等^[14]通过可视化模型箱研究了复合地基垫层刺入量的有关因素。研究表明,桩体刺入时褥垫层的变形过程较复杂,存在多种破坏模式。现有研究大多是基于褥垫层为某一厚度时,其变形特性符合某种理论破坏模式假定。然而,事实证明,在桩体刺入褥垫层的过程中,随着刺入深度变化,褥垫层的受力与变形特性会发生很大变化。目前,对桩体刺入褥垫层的全过程工作性状的研究还较少见。

通过室内模型试验,观测桩体刺入褥垫层不同深度的桩顶压力、桩顶位移量、褥垫层变形等试验结果,来研究褥垫层的全过程工作特性,并分析了桩间土压力、桩径等对褥垫层的影响。

1 室内模型试验

1.1 试验模拟条件

实际工程中,随上部荷载逐级施加,褥垫层所受压力多变,另一方面,地基土的固结、蠕变变形,导致桩、土之间的荷载转移^[15]。因此,褥垫层的实际受力情况很难完全模拟,试验模拟条件做如下简化:1)褥垫层受到的桩间土压力在某一工况下恒定不变,不同工况对应不同的恒载值。2)桩体以匀速刺入褥垫层。3)试验仅考虑刚性基础的情况。

为了方便分析,把图 1(a)所示褥垫层受力模型倒置过来,桩体从上往下刺入,褥垫层底部为刚性基础,如图 1(b)所示。

1.2 试验装置

模型桩:采用不同直径的金属压杆模拟桩体,杆径分别为 50、76、100 mm,模型试验的比例系数为 1:8,模拟的实际桩径分别为 400、608、800 mm。

试验箱:内径 360 mm,高 300 mm 的金属筒。按一根桩所分担的处理地基面积的等效圆直径

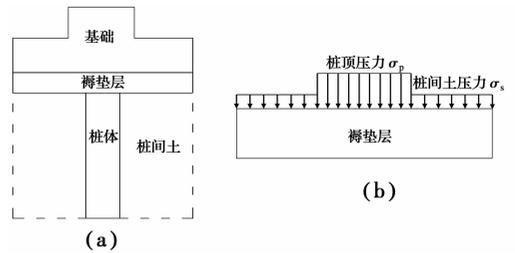


图 1 褥垫层受力图

Fig. 1 Stress diagram of the cushion

$d_e = 360$ mm,反算桩间距 s 与桩径 d 的比值,结果见表 1。由表 1 可知,桩间距在 3~7 倍桩径范围内,属于桩体复合地基的常见情况。

表 1 桩间距与桩径的比值 s/d

Table 1 Ratio of pile spacing s to pile diameter d

布桩形式	50 mm 桩径	76 mm 桩径	100 mm 桩径
正方形布桩	6.4	4.2	3.2
正三角形布桩	6.9	4.6	3.4

褥垫层:采用干燥中细砂,最大粒径不超过 1.18 mm,由筛分实验测得其级配曲线见图 2,计算不均匀系数 $C_u \approx 2.86$,曲率系数 $C_c \approx 0.94$ 。按模型比例,试验模拟的现场褥垫层材料最大粒径不大于 10 mm,符合规范^[16]要求。由直剪试验测得平均内摩擦角约为 36.2° 。试验中,褥垫层厚度均大于 150 mm(对应于实际厚度 1.2 m),目的是研究桩体刺入时褥垫层从厚变薄整个过程的工作性状。

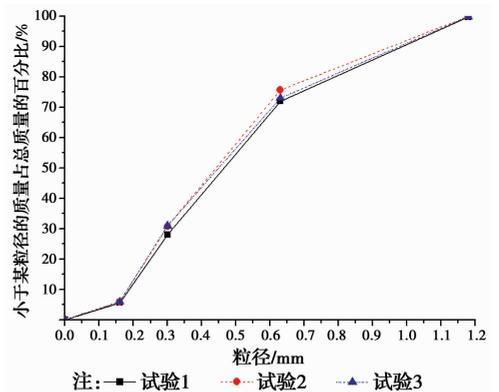


图 2 砂的级配曲线

Fig. 2 Grading curves of the sand

褥垫层的初始密实度是模型试验的重要影响因素,由于试验的褥垫层为干燥中细砂,故以干重度 γ_d 作为控制指标。实验通过称量褥垫层总重 G 和褥垫层初始厚度 h_0 算得干重度 γ_d 值,结果见表 2。

表 2 褥垫层在各工况下的试验参数值
Table 2 Parameter values of the cushion under various test conditions

模型桩直径/mm	工况	褥垫层附加恒载值/N	褥垫层干重度 $\gamma_d/(kN \cdot m^{-3})$		
			试验 1	试验 2	试验 3
50	工况 1	0	15.58	15.75	16.01
	工况 2	270	16.08	15.99	16.04
	工况 3	578	16.41	15.94	15.93
	工况 4	1 195	16.05	15.79	15.96
76	工况 1	0	15.70	15.63	15.62
	工况 2	270	15.34	15.53	15.71
	工况 3	578	15.18	15.48	15.58
	工况 4	1 195	15.31	15.37	15.71
100	工况 1	0	15.84	15.87	15.69
	工况 2	270	15.49	15.59	15.50
	工况 3	578	15.52	15.53	15.78
	工况 4	1 195	15.80	15.80	15.85

加压装置:采用 SANS 压力试验机,通过与电脑连接自动控制加载过程,试验数据方便保存。

1.3 试验主要过程

先把装有褥垫层的试验箱放在 SANS 压力试验机加载平台,再在褥垫层上施加恒载模拟桩间土压力,然后开机加载,使模型桩以速率 2 mm/min 刺入褥垫层,当桩顶压力接近 10 MPa 时停止加载。电脑实时记录试验测得的桩顶压力值和位移量。

以恒载 0、270、578、1 195 N 分别模拟 4 种工况的桩间土压力,模型桩直径分别为 50、76、100 mm,褥垫层在各工况下的试验参数见表 2。图 3 显示了 50 mm 模型桩在 4 种工况下的试验场景。

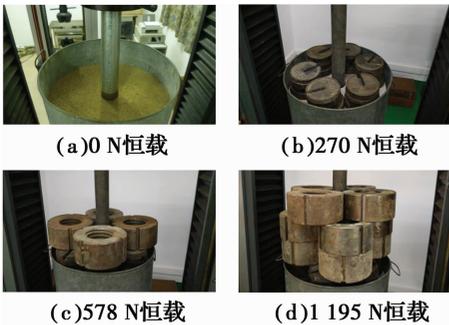


图 3 50 mm 模型桩刺入褥垫层的试验场景
Fig. 3 Test scene of the 50 mm model pile penetrating into cushions

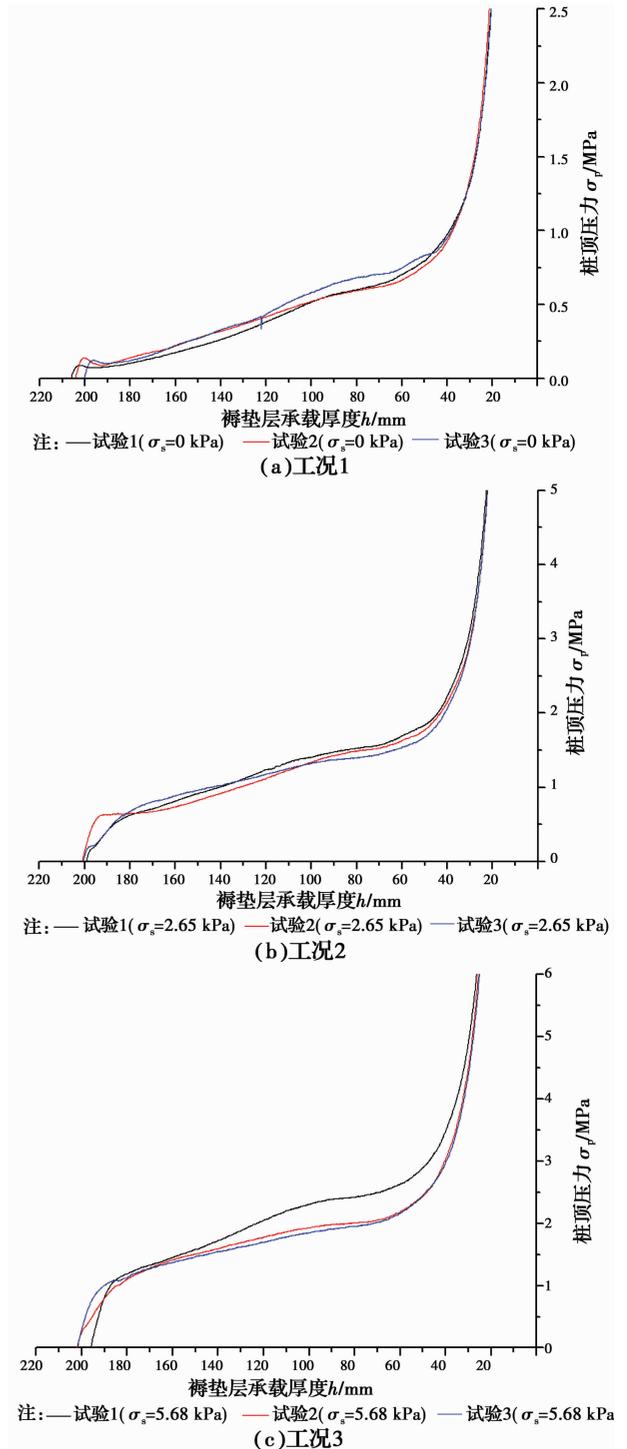
1.4 试验结果

做了 12 组试验(3 种桩、4 种工况),且每组试验重复做了 3 次,共做了 36 个试验。

用“褥垫层承载厚度 h ”表示褥垫层初始厚度与

桩体刺入深度的差值,把褥垫层附加恒载值转化为桩间土压力 σ_s ,整理试验数据,以褥垫层承载厚度 h 为横坐标,“桩顶压力 σ_p 为纵坐标绘制褥垫层的 σ_p 与 h 关系曲线,图 4 显示了 50 mm 模型桩刺入时,褥垫层在每种工况下的 3 次试验曲线。

为了便于对比分析,在图 4 各工况下的 3 次试验曲线中选取居中的曲线作为代表,如图 5 所示。同理,76、100 mm 模型桩刺入时,代表曲线对比情况见图 6 和图 7。



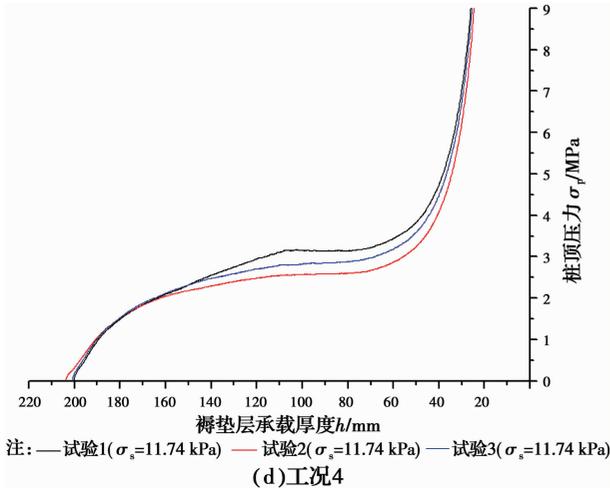


图4 50mm模型桩刺入时 σ_p 与 h 曲线图

Fig. 4 Relation curves between σ_p and h of the cushion when the 50 mm model pile penetrating

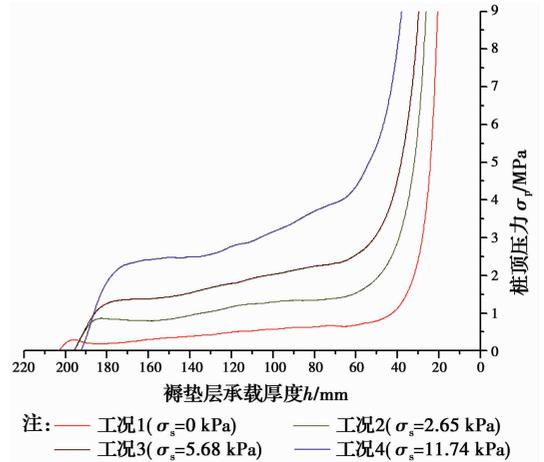


图7 100 mm模型桩刺入时 σ_p 与 h 代表曲线对比图
Fig. 7 Comparison diagram of the representative curves between σ_p and h when the 100 mm model pile penetrating

2 褥垫层的全过程工作特性分析

2.1 褥垫层的压密变形阶段

在桩体刺入初期,褥垫层表面除了靠近桩头附近稍有沉陷外,其他基本没有变形,如图8所示。同时,随着桩体刺入深度的增加桩顶压力,大致呈线性增大,见图4~图7曲线的初始上升段。结果表明,桩体刺入褥垫层,桩顶下砂颗粒向下沉降,砂颗粒被逐渐压密,褥垫层以局部压密变形为主。

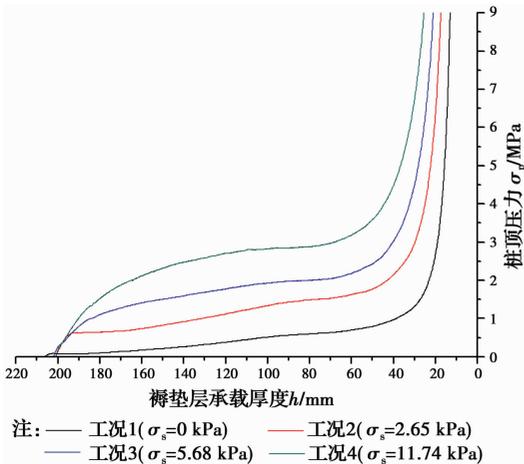


图5 50 mm模型桩刺入时 σ_p 与 h 代表曲线对比图

Fig. 5 Comparison diagram of the representative curves between σ_p and h when the 50 mm model pile penetrating

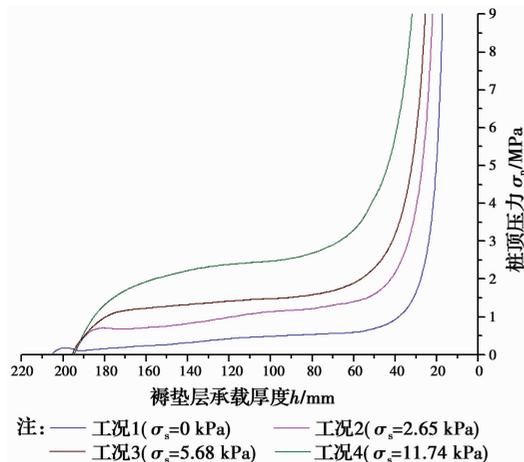


图6 76 mm模型桩刺入时 σ_p 与 h 代表曲线对比图

Fig. 6 Comparison diagram of the representative curves between σ_p and h when the 76 mm model pile penetrating



(a)加载前



(b)桩体刺入初期

图8 50 mm模型桩在刺入初期的试验场景
Fig. 8 Test scene of the 50 mm model pile at initial penetration

2.2 褥垫层的剪切变形阶段

在桩体刺入中期,观测到褥垫层表面出现环形隆起,见图9,褥垫层局部发生向桩周围、向上的剪切隆起变形,此部分褥垫层大多已处于极限状态。在此阶段,桩顶压力总体上随着刺入深度的增加而逐渐增大,对应于图4~图7的中间平缓上升段曲

线。桩体刺入深度增加,桩顶周围的超载值增大,因而桩顶压力值也增大。褥垫层在此阶段的承载特性符合地基极限承载力理论。



图9 76 mm模型桩刺入中期时褥垫层表面的局部隆起

Fig.9 The local uplift of the cushion surface in the middle penetration of the 76 mm model pile

2.3 褥垫层的压碎变形阶段

在桩体刺入末期,图4~图7曲线的桩顶压力呈快速增长态势。试验结束后,分离出桩顶下剩余的褥垫层,发现砂颗粒大都被压碎,形成一个很密实的薄饼状块体,见图10,说明这个阶段褥垫层主要是砂颗粒的压碎变形。颗粒破碎、颗粒间的孔隙变小,垫层材料更加致密,其承担的桩顶压力越来越大。显然,以剪切变形为主的地基极限承载力理论在此阶段已不太适用。



图10 压碎变形的褥垫层

Fig.10 The Crushing deformation of the cushion

综上,褥垫层在桩体刺入的全过程中,表现出完全不同的三阶段工作特性。褥垫层既有压密变形,又有剪切变形和材料压碎变形,图4-7的试验曲线大致呈“N”字形的三段式。如前所述,现有研究成果大都局限于揭示褥垫层在某个阶段的工作性状,还不全面。

2.4 桩间土压力的影响分析

由图5-7可知:在相同桩径条件下,桩间土压力大,曲线就往坐标值大的方向偏移,曲线的相对位置越高,即相同桩径和相同褥垫层承载厚度时,桩间土压力越大,褥垫层能承受的桩顶压力就越大。

以桩顶压力 $\sigma_p=9\text{ MPa}$ 为例,从图5-7的试验曲线中读取褥垫层承载厚度值,见表3。由表中数据绘制褥垫层承载厚度 h 与桩间土压力 σ_s 的关系曲线,见图11。

表3 $\sigma_p=9\text{ MPa}$ 时褥垫层的承载厚度 h 值(mm)

Table 3 The thickness value of cushion when the pressure at the top of the pile is 9 MPa(mm)

桩径/mm	桩间土压力/kPa			
	0	2.65	5.68	11.74
50	13.14	17.52	21.12	25.55
76	17.20	22.07	25.50	31.94
100	20.80	26.35	29.83	38.11

由图11和表3可知:相同桩径和桩顶压力时,褥垫层承载厚度随桩间土压力的增大而增大,且增长率总体呈先大后小趋势。

2.5 模型桩直径的影响分析

在图5-7中,选取相同工况条件下各模型桩的试验曲线进行对比,以桩间土压力 $\sigma_s=5.68\text{ kPa}$ 为例,结果见图12所示。

图12的曲线初始段和中间段与桩径之间没有明显的相关性,但在曲线急速上升阶段,各曲线的先后位置与桩径之间又存在关联,其定量关系见表3。桩径的影响主要在褥垫层压碎变形阶段,相同桩间土压力和桩顶压力时,褥垫层在压碎变形阶段的承载厚度随桩径的增大而增大,且基本呈线性增加。

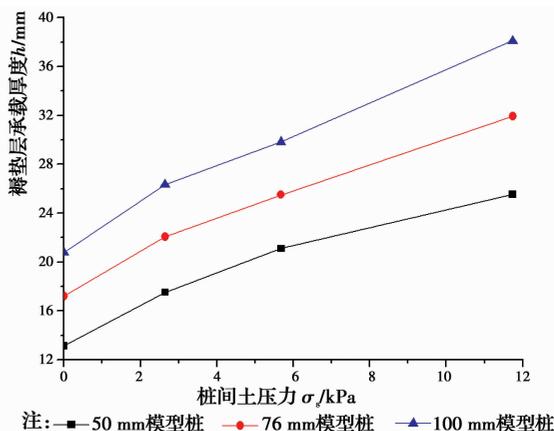


图11 $\sigma_p=9\text{ MPa}$ 时 h 与 σ_s 的关系曲线

Fig.11 Relation curves of h and σ_s when $\sigma_p=9\text{ MPa}$

3 几个关键问题的探讨

3.1 规范推荐的褥垫层厚度

《建筑地基处理技术规范》^[16]对褥垫层设计厚度,有规定:CFG桩复合地基的褥垫层厚度宜取0.4~0.6倍桩径;水泥搅拌桩的褥垫层厚度可取200~300 mm。

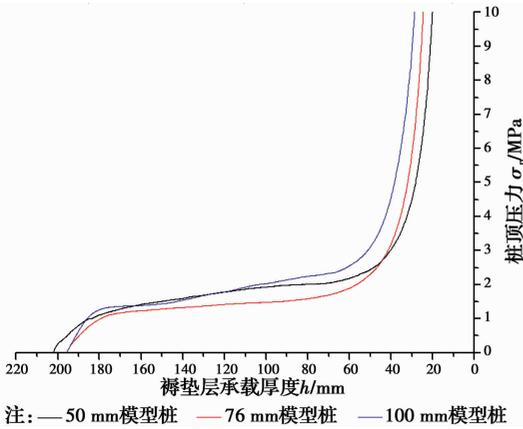


图 12 $\sigma_s = 5.68$ kPa 时 3 种桩的代表曲线

Fig. 12 Representative curves of the three kinds of piles when $\sigma_s = 5.68$ kPa

试验的桩径为 50~100 mm,按规范的 0.4~0.6 倍桩径计算,褥垫层试验厚度在 20~60 mm 之间。按规范的 200~300 mm 取值,因模型比例为 1:8,对应于试验厚度为 25~37.5 mm。

从图 5-7 的试验曲线来看,褥垫层的压碎变形厚度基本上在 0~60 mm 范围内。如按规范推荐的褥垫层厚度,褥垫层只可能有初始的压密变形和后期的材料压碎变形,而剪切滑移变形很难发生。

文献[6]的褥垫层试验,模型桩径 300 mm,褥垫层厚度在 100~240 mm,与规范推荐厚度差不多。文献[6]的图 4 表示了桩体刺入量与加载值的关系,桩体刺入量在加载初期增速较快,在荷载值较大时桩体刺入量反而增长较慢。并未出现褥垫层在加载到某个阶段后,刺入量持续增大而荷载值增加不多的情况,因此,文献[6]也说明了褥垫层在规范推荐厚度时很难发生剪切变形。

3.2 褥垫层的最小极限承载力

取褥垫层在剪切变形阶段承受的最小桩顶压力作为褥垫层的最小极限承载力 p_u ,该承载力是一个与褥垫层的内摩擦角、密实度、附加荷载等紧密相关的重要设计参量。从图 5-7 中读取各次试验的褥垫层最小极限承载力值,结果列于表 4。

表 4 模型试验曲线读取的褥垫层最小极限承载力

Table 4 The minimum ultimate bearing capacity of cushion obtained from model test curves

模型桩直径/ mm	褥垫层的最小极限承载力 p_u /kPa			
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4
50	72.93	686.07	1 007.74	1 980.60
76	106.67	699.71	1 158.86	1 992.72
100	185.31	799.11	1 372.46	2 465.01

需要说明:当图 5-7 的曲线中间段有波峰和波谷时,取各波谷的最小值作为最小极限承载力;当曲线中间段无波峰和波谷时,通过对曲线中间段的线性拟合来确定最小极限承载力,图 5 和图 6 的工况 3、工况 4 曲线都属于此情况,限于篇幅,仅把图 6 的工况 3 曲线拟合情况列出,见图 13 所示。

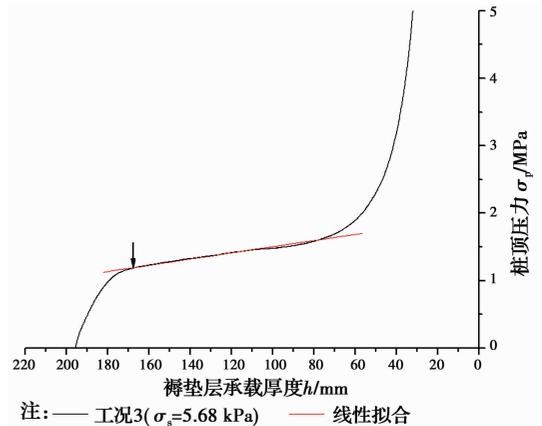


图 13 76 mm 模型桩在工况 3 下的试验曲线中间段的拟合情况

Fig. 13 The fitting of the test curve in the middle section about the 76 mm model pile under the third working condition

由表 4 可知,桩径一定时,褥垫层的最小极限承载力随着桩间土压力的增大而增大,桩间土压力一定时,褥垫层的最小极限承载力也随桩径的变大而增大。假定褥垫层的最小极限承载力 p_u 与桩径 d 、桩间土压力 σ_s 均为线性关系,拟合分析后按下式计算

$$\begin{cases} p_u = a\sigma_s + b \\ a = 0.688\ 14d + 116.645\ 66 \\ b = 1.873\ 6d + 57.410\ 82 \end{cases} \quad (1)$$

式中: a 、 b 为待定系数。根据式(1)及表 4 数据绘制褥垫层最小极限承载力 p_u 与桩径 d 、桩间土压力 σ_s 的关系曲线,见图 14。由图 14 可知,试验值与拟合值相差不多,基本符合线性变化规律。

3.3 试验曲线的波峰和波谷

在图 5-7 的曲线中,当桩间土压力 $\sigma_s = 0$ 时,3 种模型桩的试验曲线在剪切变形阶段均有明显的波峰和波谷;当桩间土压力 $\sigma_s \neq 0$ 时,试验曲线的波峰和波谷有的不明显,有的就没有出现,如图 5、图 6 的工况 3、工况 4 曲线。

褥垫层在桩体刺入初期是个逐渐压密的过程,即使 $\sigma_s = 0$,桩头以下的褥垫层在剪切阶段也达到密实状态,所以试验曲线出现波峰和波谷,这与密砂的应变软化特性是相符的^[17]。然而,褥垫层在桩间土压力作用下本应该更加密实,试验曲线却未有明显的应变

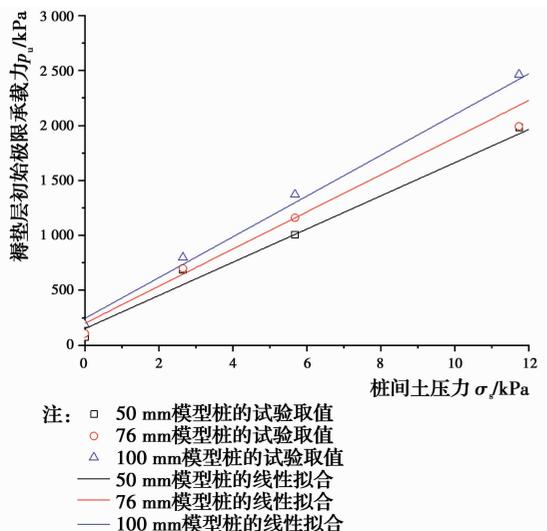


图 14 最小极限承载力与桩径、桩间土压力的关系曲线

Fig. 14 The relationship among the minimum ultimate bearing capacity and pile diameter and the pressure between piles and soil

软化特征。经分析发现,本试验的桩间土压力是采用刚性混凝土板上堆重物的方法施加的,见图 15,刚性混凝土板会阻止褥垫层局部向上隆起变形,导致砂的剪切变形被限制,所以波峰和波谷就不明显。



图 15 刚性混凝土承载板

Fig. 15 Rigid concrete bearing plate

3.4 对比试验的差异性

比较图 4 各工况下的 3 个试验曲线,总体而言,差异主要在褥垫层的压密变形阶段和剪切变形阶段,最后压碎变形阶段的曲线基本趋于相同。

经对比分析,造成差异的原因主要是褥垫层的初始密实度,密实度(或干密度)大的褥垫层,砂颗粒的咬合作用较大,颗粒之间发生相对滑移较为困难,例如,图 4(d)中,试验 1 的曲线中间段相对位置最高,试验 2 最低,试验 3 居中,从表 2 中读取各试验的干密度,试验 1 为 16.05 kN/m^3 ,试验 2 为 15.79 kN/m^3 ,试验 3 为 15.96 kN/m^3 ,说明了干密实大的褥垫层在剪切变形阶段能承担更大的桩顶压力,其他几组试验也都表现出相同规律。在压碎变形阶段时,桩顶下的褥垫层所受压力越来越大,材料破碎并慢慢趋于致密状态,因此褥垫层初始密实度的影响逐渐降低

4 结论

1)通过室内模型试验,揭示了褥垫层在桩体刺入全过程中存在 3 个阶段,分别为桩体刺入初期的压密变形阶段,桩体刺入中期的剪切变形阶段,桩体刺入末期的压碎变形阶段;并获得了褥垫层承载能力(即桩顶压力)与褥垫层承载厚度的关系曲线。

2)分析了桩间土压力、桩径对褥垫层的影响,结论为:桩间土压力对褥垫层的整个刺入过程均有影响,相同桩径和褥垫层承载厚度时,桩顶压力随着桩间土压力的增大而增大;相同桩径和桩顶压力时,褥垫层承载厚度随桩间土压力的增大而增大,且增长率总体呈先大后小趋势;桩径对褥垫层的影响主要在压碎变形阶段,相同桩间土压力和桩顶压力时,褥垫层承载厚度随桩径的增大而增大,且基本呈线性增加。

3)讨论了规范推荐的褥垫层厚度、褥垫层最小极限承载力等问题,结果表明:褥垫层在规范推荐厚度时很难发生剪切变形;褥垫层的最小极限承载力与桩径、桩间土附加压力等密切相关;褥垫层的密实度对其压密变形和剪切变形存在影响。

参考文献:

- [1] CHEN Q N, ZHAO M H, ZHOU G H, et al. Bearing capacity and mechanical behavior of CFG pile composite foundation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(Sup2): 45-49.
- [2] SHEN Y P, WANG H H. Optimization design on CFG-pile foundation with different cushion thickness in Beijing-Shanghai high-speed railway [J]. Transportation Infrastructure Geotechnology, 2016, 3(1): 3-20.
- [3] HAN X L, LI Y K, JI J, et al. Numerical simulation on the seismic absorption effect of the cushion in rigid-pile composite foundation[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2016, 15(2): 369-378.
- [4] ZHAO X L, ZHANG Q, ZHANG Q, et al. Numerical study on seismic isolation effect of gravel cushion [C]// Proceedings of the 7th International Conference on Discrete Element Methods. Dalian China, August 1-4, 2016 : 1055-1063.
- [5] SHARMA V J, VASANVALA S A, SOLANKI C H. Behaviour of cushioned composite piled raft foundation under lateral forces[J]. Indian Geotechnical Journal, 2015, 45(1): 89-97.
- [6] 郑刚,刘双菊,伍止超.不同厚度褥垫层刚性桩复合地基工作特性研究[J].岩土力学,2006,27(8):1357-1360.

ZHENG G, LIU S J, WU Z C. Study on behavior of

- rigid pile composite ground with different cushion thicknesses [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2006, 27(8): 1357-1360. (in Chinese)
- [7] 周志军, 王连坤, 王敏容, 等. 复合地基中褥垫层的极限下限分析[J]. *中国科技论文*, 2013, 8(11): 1153-1158.
- ZHOU Z J, WANG L K, WANG M R, et al. Lower bound limit analysis of cushion in composite foundation[J]. *China Sciencepaper*, 2013, 8(11): 1153-1158. (in Chinese)
- [8] 毛前, 龚晓南. 桩体复合地基柔性垫层的效用研究[J]. *岩土力学*, 1998, 19(2): 67-73.
- MAO Q, GONG X N. Study on behavior of rigid pile composite ground with different cushion thicknesses [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1998, 19(2): 67-73. (in Chinese)
- [9] 陶景晖, 卢中强, 金如元, 等. 刚性桩复合地基桩顶埋入式垫层机理分析[J]. *建筑结构学报*, 2017, 38(2): 158-167.
- TAO J H, LU Z Q, JIN R Y, et al. Mechanism analysis of pile-top embedded cushion of rigid pile composite foundation [J]. *Journal of Building Structures*, 2017, 38(2): 158-167. (in Chinese)
- [10] 刘杰, 张可能. 复合地基中垫层作用机理[J]. *中南工业大学学报(自然科学版)*, 2001, 32(6): 568-572.
- LIU J, ZHANG K N. The mechanism of cushion in composite foundation [J]. *Journal of Central South University of Technology(Natural Science)*, 2001, 32(6): 568-572. (in Chinese)
- [11] 亓乐, 施建勇, 侯仟. 复合地基桩体对垫层的刺入量研究[J]. *岩土力学*, 2011, 32(3): 815-819, 824.
- QI L, SHI J Y, HOU Q. Research on pile penetration into cushion of composite ground[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(3): 815-819, 824. (in Chinese)
- [12] 肖耀廷, 党发宁. 复合地基褥垫层厚度的设计方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(5): 1331-1335.
- XIAO Y T, DANG F N. Research on the design method of composite foundation cushion thickness[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2016, 12(5): 1331-1335. (in Chinese)
- [13] 郑俊杰, 陈健, 骆汉宾, 等. 刚性桩复合地基垫层破坏模式及厚度分析[J]. *华中科技大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(7): 120-123.
- ZHENG J J, CHEN J, LUO H B, et al. Analyzing failure modes and appropriate thickness of the cushion on rigid pile composite ground[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science)*, 2008, 36(7): 120-123. (in Chinese)
- [14] 朱小军, 孔伟阳, 费康, 等. 复合地基垫层刺入量模型试验与计算方法研究[J]. *地下空间与工程学报*, 2018, 14(2): 412-419.
- ZHU X J, KONG W Y, FEI K, et al. Experimental research and calculation methods of cushion penetration in composite foundation [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2018, 14(2): 412-419. (in Chinese)
- [15] 章定文, 范礼彬, 刘松玉, 等. 水泥土搅拌桩复合地基固结机理室内模型试验[J]. *中国公路学报*, 2014, 27(12): 1-9.
- ZHANG D W, FAN L B, LIU S Y, et al. Laboratory model tests on consolidation mechanism of soft clay improved by deep mixing cement columns[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2014, 27(12): 1-9. (in Chinese)
- [16] 建筑地基处理技术规范: JGJ79-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- Technical code for ground treatment of buildings: JGJ79-2012 [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 李广信. 高等土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2016.
- LI G X. *Advanced soil mechanics*[M]. 2th. Beijing: Tsinghua University Press, 2016. (in Chinese)

(编辑 胡玲)