

复合地基垫层刺入量模型试验与计算方法研究*

朱小军^{1,2},孔伟阳¹,费康¹,许朝阳¹,李文帅¹

(1.扬州大学 建筑科学与工程学院,江苏 扬州 225127;2.东南大学 土木工程学院,南京 210096)

摘 要:为了研究复合地基垫层刺入量有关因素,通过可视化模型箱对不同垫层厚度、密实度、桩径以及桩帽的刚性桩复合地基进行室内模型试验。利用数字图像无标点量测技术,对在加载过程中垫层土体颗粒的位移场进行观测与分析,研究了复合地基垫层的位移场与变形模式,得到了垫层的刺入量、变形范围以及滑动面位置与形状。根据球孔扩张理论推导出垫层刺入量的求解公式,并与模型试验数据进行了对比分析,验证了理论方法的合理性,且理论计算结果与试验数据吻合较好。垫层刺入量的研究对复合地基垫层厚度、桩径等设计具有一定参考价值,垫层刺入量可协调桩土的荷载分担,使桩土共同承担上部结构荷载,为复合地基沉降研究提供了理论依据和数据支持。

关键词:复合地基;垫层;刺入量;模型试验

中图分类号:TU473.1

文献标识码:A

文章编号:1673-0836(2018)02-0412-08

Experimental Research and Calculation Methods of Cushion Penetration in Composite Foundation

Zhu Xiaojun^{1,2}, Kong Weiyang¹, Fei Kang¹, Xu Zhaoyang¹, Li Wenshuai¹

(1.School of Civil Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225127, P.R.China;

2.School of Civil Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, P.R.China)

Abstract: In order to study the factors of cushion penetration in composite foundation. The model tests of rigid pile composite foundation were carried out in a visual box, considering different cushion thickness, compactness, pile diameter and pile cap. The digital speckle correlation technique was used to observe and analyse the displacement field of soil particles in cushion during the loading procedure. The displacement fields and deformation modes of cushion in composite foundation were researched. The penetration, deformation scope, sliding position and shape of the cushion were obtained. Based on spherical cavity expansion theory, a formula for solving the penetration in cushion was derived. The theoretical calculation results were compared with the model test data. The rationality of the method was verified, and the theoretical calculation results agreed well with the test data, which could meet the engineering of accuracy. The research of cushion penetration is helpful to design the cushion thickness and pile diameter of composite foundation. The cushion penetration can coordinate load sharing of pile-soil and bear the load of superstructure, which can provide theoretical basis and data support for the research of composite foundation settlement.

Keywords: composite ground; cushion; penetration; model test

* 收稿日期:2017-11-15(修改稿)

作者简介:朱小军(1987-),男,江苏东台人,博士,硕士生导师,主要从事深基础、复合地基、隔震基础方面的研究及教学工作。E-mail:459388809@qq.com

基金项目:江苏省高校自然科学基金(15KJB580013);国家自然科学基金(51278446)

0 引言

随着地基处理技术的不断发展,复合地基在工程中已得到广泛应用。复合地基由增强体和地基土组成,在荷载作用下能共同承担荷载^[1],而垫层刺入量的研究是研究复合地基的关键。毛前等^[2]通过理想球形孔扩张模式探讨了桩顶刺入垫层的破坏模式;冯亮亮等^[3]在 ABAQUS 的框架下通过二次开发建立了有限元计算模型,通过数值计算,对于桩体刺入垫层量随时间的变化特性进行了对比分析;亓乐、施建勇、张东刚等学者从不同角度对垫层刺入变形的影响因素及对刺入量公式的推导进行了深入的研究^[4-6]。桩体荷载分担的能力与桩顶刺入垫层的刺入量有很大关系,要保证复合地基桩间土共同承担荷载,需保证桩顶向垫层有一定刺入变形,刺入量对桩土的荷载分担比起协调作用,这是研究复合地基的重要内容^[7-8]。

本文从细观方面来研究垫层刺入变形及刺入量,利用数字图像量测技术^[9],对试验中图片进行处理,量测在加载过程中的垫层土体颗粒位移场,根据土体位移场得到垫层的刺入量^[10],并且利用球形孔扩张理论推导出垫层刺入量的求解公式。

1 模型试验

1.1 试验设计

复合地基垫层刺入量试验装置如图 1 所示。模型箱尺寸为 800 mm(长)×600 mm(宽)×600 mm(高),正面为 20 mm 厚透明钢化玻璃,其余四面为 10 mm 厚钢板,试验装置主要由模型箱、千斤顶、数据采集系统、土压力盒及数码相机等组成。

模型桩采用半模钢管桩并贴于模型箱钢化玻璃内侧,桩身表面贴有应变片并用硅胶包裹。桩顶铺设碎石垫层,并用染色砂设置标志层。桩顶及土顶分别埋设量程为 3 MPa 和 4 个 0.5 MPa 的土压力盒。

试验采用快速荷载法,预估极限荷载为 240 kPa,每级加载值为 40 kPa,共 6 级,每级加载 30 min 后依次进行土体位移场记录、桩身应变记录、桩顶和桩间土的土压力盒数据采集、垫层位移读数,并拍摄数字照片,记录土体变形观测点和染色砂标志层的位移变化。

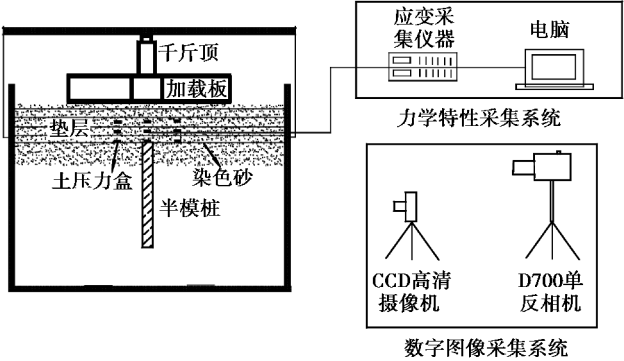


图 1 加载板-垫层-桩-土试验布置示意图

Fig. 1 Layout of loading plate-cushion-pile-soil test devices

1.2 试验参数

本次模型试验共完成 15 组,主要设计了不同垫层厚度、密实度、桩径及桩帽的复合地基垫层刺入量模型试验。模型桩长为 40 cm,试验 12 和 13 桩帽直径分别为 8 cm 和 12 cm,试验 14 和 15 垫层相对密实度分别为 0.6 和 0.5,其余试验垫层相对密实度为 0.7,详细参数如表 1。

表 1 模型试验参数

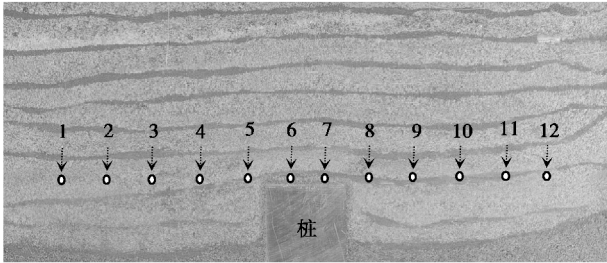
Table 1 Model test parameters

编号	试验内容	垫层厚度	垫层厚度与桩径比
		H_c/cm	H_c/D
试验 1	桩径 $D_1 = 5\text{ cm}$	3	0.6
试验 2		5	1.0
试验 3		8	1.6
试验 4		10	2.0
试验 5		12	2.4
试验 6	桩径 $D_2 = 8\text{ cm}$	5	0.62
试验 7		8	1.0
试验 8		10	1.25
试验 9	桩径 $D_3 = 10\text{ cm}$	8	0.8
试验 10		10	1.0
试验 11		12	1.2
试验 12	带桩帽	5	1.0
试验 13		5	1.0
试验 14	考虑土体	5	1.0
试验 15	密实度	5	1.0

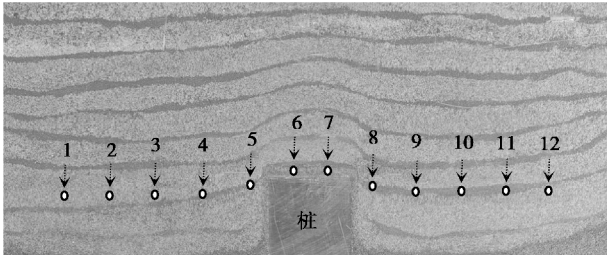
2 试验结果分析

在试验前后拍摄的数码照片上布置测点,通过数字图像处理方法量测桩顶和桩间土的位移,如图

2 所示。取测点 6、7 的平均值作为桩顶位移,并取其
其余测点平均值作为桩间土的位移,而桩间土位移
与桩顶位移之差即为桩顶刺入垫层的刺入量。



(a) 加载前测点分布



(b) 加载后测点分布

图 2 各测点分布图

Fig. 2 Distribution of measuring points

2.1 垫层厚度对垫层刺入量的影响

由图 3 可知,当桩径为 5 cm 时,垫层厚度为 3 cm,其刺入量最小仅为 0.11 mm;垫层厚度增大至 12 cm 时,刺入量达到 15.13 mm。可见,垫层越厚,刺入量越大,刺入量与垫层厚度的相关度较高。

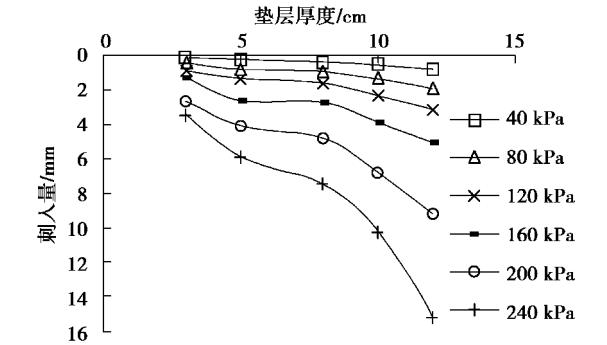


图 3 垫层厚度-刺入量曲线(桩径 5 cm)

Fig. 3 Curves of cushion thickness vs. penetration
(pile diameter is 5 cm)

2.2 桩径对垫层刺入量的影响

由图 4 可知,当垫层厚度为 8 cm 时,桩径由 5 cm 增大至 8 cm 时刺入量变化较小,而当桩径 8 cm 增大至 10 cm 时刺入量明显减小,随着荷载等级的增加,桩径对复合地基垫层刺入量影响逐渐增大,表明增大桩径能有效地控制桩顶刺入垫层的刺入量。

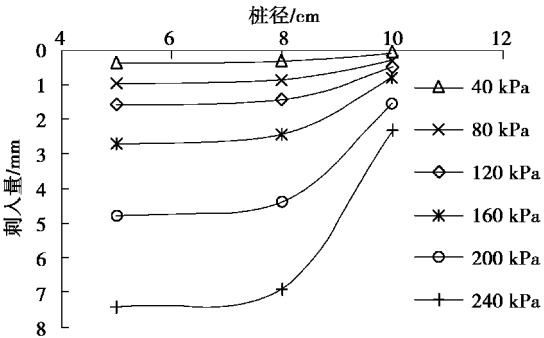


图 4 桩径-刺入量曲线(垫层厚 8 cm)

Fig. 4 Curves of pile diameter vs. penetration
(Cushion thickness is 8 cm)

2.3 桩帽对垫层刺入量的影响

由图 5 可知,桩帽能够有效地控制垫层刺入量,带帽桩较无桩帽情况刺入量减小了 30.1%;桩帽直径越大,垫层刺入量越小。

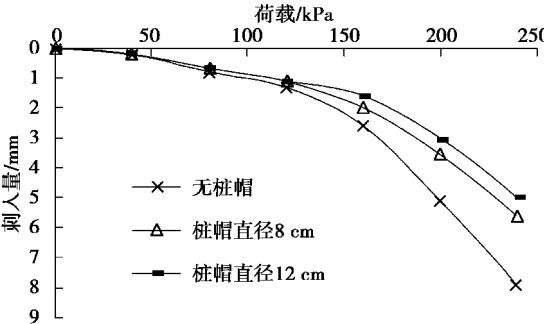


图 5 桩帽-刺入量曲线(桩径 5 cm)

Fig. 5 Curves of pile cap vs. penetration
(pile diameter is 5 cm)

2.4 垫层密实度对刺入量的影响

由图 6 可知,垫层密实度的改变对刺入量的影响较大,垫层相对密实度由 0.7 减小至 0.6 和 0.5 时,刺入量分别增大了 29.3% 和 83.2%。说明垫层密实度过低,桩顶易刺穿垫层,不利于发挥垫层的作用。为了控制桩顶刺入量,建议碎石垫层相对密实度不低于 0.6。

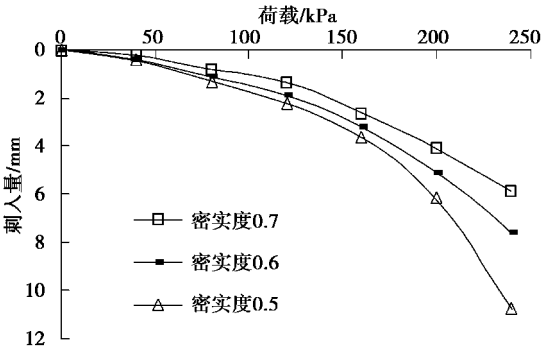


图 6 垫层密实度-刺入量曲线(桩径 5 cm)

Fig. 6 Curves of cushion compactness vs. penetration
(pile diameter is 5 cm)

2.5 垫层厚度(H_c)与桩径(D)之比对垫层刺入量的影响

由图 7 可知,随着 H_c/D 比值的增大,刺入量呈现 3 个阶段: H_c/D 比值在 0.6~0.8 之间时,刺入量变化较小;而当 H_c/D 比值由 0.8 增大至 1.2 时,刺入量出现直线下降;其后当 H_c/D 比值大于 1.25 时,趋于平缓。因此,为了控制桩顶刺入垫层的刺入量, H_c/D 比值不宜大于 1.0。

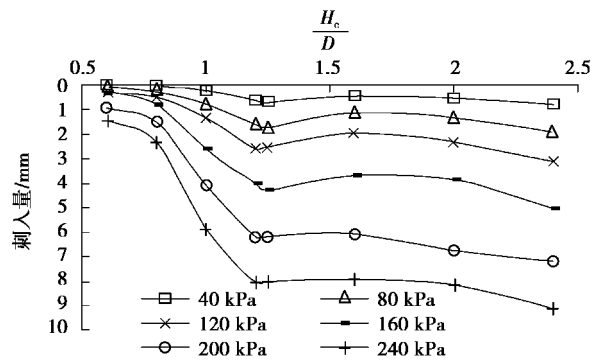


图 7 H_c/D -刺入量曲线

Fig. 7 Curves of H_c/D vs. penetration

2.6 垫层土体位移场

将各级荷载下拍摄的图片,通过无标点位移量测技术^[9]和数字图像处理软件分析得出的垫层土体位移、剪应变等值线图,图 8~10 中横、纵坐标表示实际模型试验照片数字化分析的范围(坐标单位为 mm),图例表示土体位移值大小(位移单位为 mm)。

图 8 为垫层厚 3 cm 时的复合地基在荷载作用下的土体水平和竖向位移等值线图。由图可知,水平位移集中在桩顶附近,且以桩体为对称轴两侧土体扩散开来,土体颗粒从桩顶分别往左右两侧挤出。由竖向位移等值线图可以看出,桩体位移很小,在桩顶垫层颗粒形成 2 个三角核心区。当加载到极限荷载时,碎石垫层破坏曲线分别从桩顶左右 2 个三角核心区一直延伸到颗粒碎石表面。

图 9 为垫层厚 10 cm 时的复合地基在荷载作用下的土体水平和竖向位移等值线图。由图可知,在桩顶处垫层颗粒形成 1 个三角核心区,当加载到极限荷载时,碎石颗粒形成 1 个完整的滑移曲线,从桩顶核心区一直延伸到土体表面。

土体剪切带的形成是反映土体破坏时的重要特征之一。图 10 为垫层厚 5 cm 时复合地基在荷

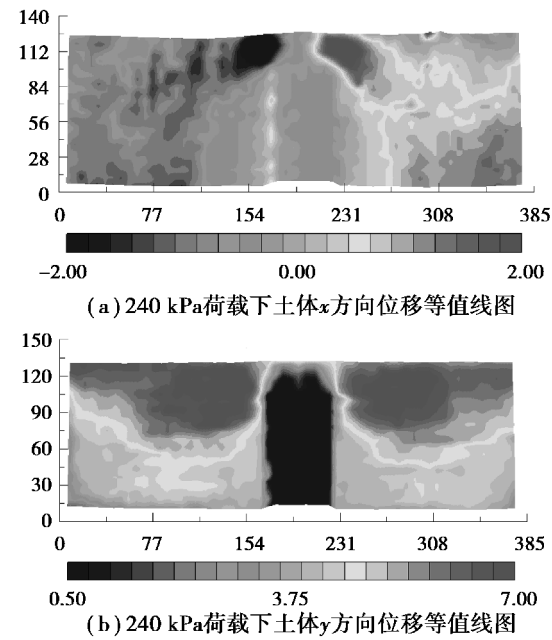


图 8 垫层厚 3 cm 时的土体位移等值线图(单位:mm)

Fig. 8 Displacement contour of cushion with thickness of 3 cm(unit: mm)

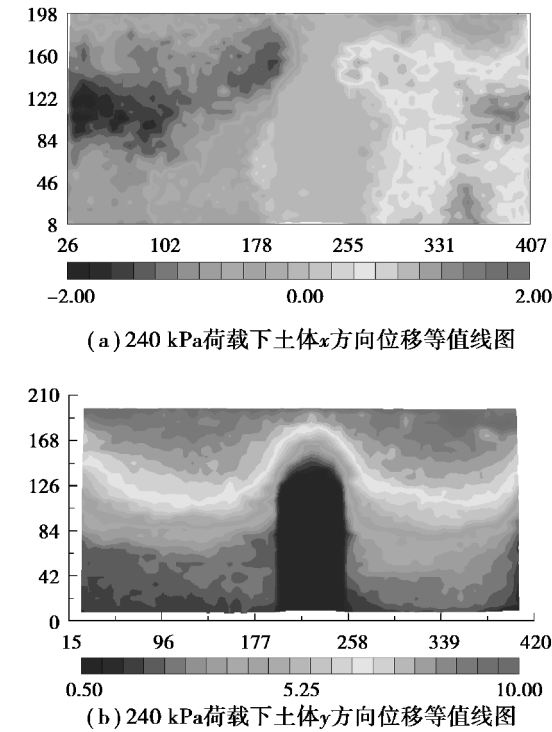


图 9 垫层厚 10 cm 时的土体位移等值线图(单位:mm)

Fig. 9 Displacement contour of cushion with thickness of 10 cm(unit: mm)

载作用下不同阶段的土体剪应变等值线图。在加载第一阶段,垫层土体下沉,桩间土受到垫层土体挤压,桩体位移较小,这样桩间土与桩体产生不均匀沉降,桩侧土体产生剪切变形,并不断发展形成明显的剪切带;在不断加载过程中,桩间土由于受

到垫层土体挤压产生错动,在几个局部区域有细小裂纹产生,垫层土体不断挤压,桩间土剪切变形进一步发展,裂纹不断扩展,局部裂纹相互贯通;最终,裂纹贯通形成完整的剪切带,剪切带自桩顶分别向左右方向扩展并完成贯通,而桩侧剪切带更是早已稳定形成,2 条剪切带相互独立并在桩顶处形成交叉。

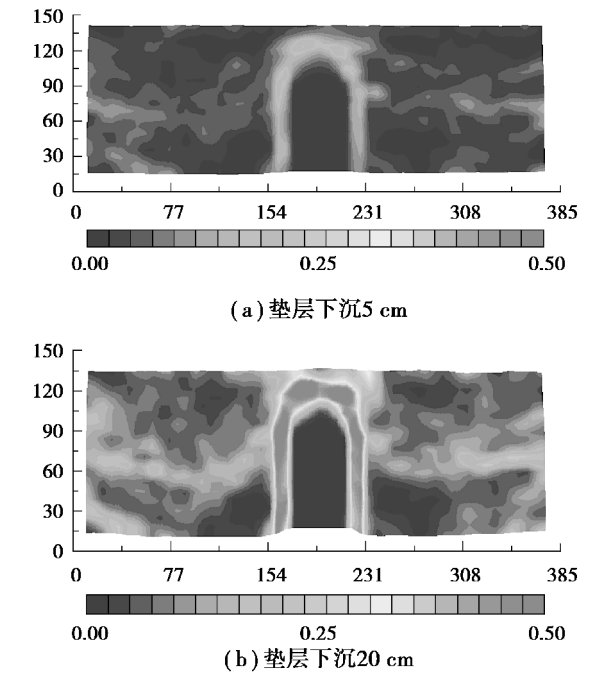


图 10 垫层厚 5 cm 时的土体剪应变等值线图 (单位:mm)

Fig. 10 Shear strain contour of cushion with thickness of 5 cm (unit: mm)

2.7 碎石垫层细观参数分析

图 11 为试验加载过程中 CCD 高清摄像机拍摄的碎石垫层图片,对桩顶刺入碎石垫层的过程中垫层内碎石颗粒的位移进行了图片处理。该试验数码照片为 4 526×2 832 像素,实际分析范围为 2 400×1 200 像素,对应的实际模型尺寸 400 mm×200 mm,单位像素对应的实际模型尺寸为 0.027 mm,即图片处理精度为 0.027 mm。试验图片分析时以像素为对象,最后再将像素与实际尺寸进行转换,从而可以得到图片中土体的实际位移场。图 11 中横、纵坐标表示实际模型试验照片数字化分析的范围(坐标单位为 mm)。

图 11(a)为桩顶正上方垫层颗粒水平向位移量的变化云图。可见,桩顶正上方垫层颗粒的水平向位移量分布关于桩体中心轴对称分布,沿中心向两侧移动。其中,中心处的颗粒位移量最小,两侧最大水平位移量均约为 5.0 个单位像素值。图 11(b)为桩顶正上方垫层颗粒竖向位移量的变化云图。

可见,在桩顶正上方区域内形成了 1 个三角形核心区,这个核心区的竖向位移量在 9.84~11.9 个单位像素范围内,与其他区域颗粒相比位移量最大,也进一步说明了这个核心区内的颗粒被进一步压缩挤密。通过上述两幅图的对比,可以明显地发现,在桩体上刺过程中,桩顶正上方垫层颗粒的竖向位移量明显大于水平向的位移量,垫层碎石颗粒的运动以向上滑移为主。

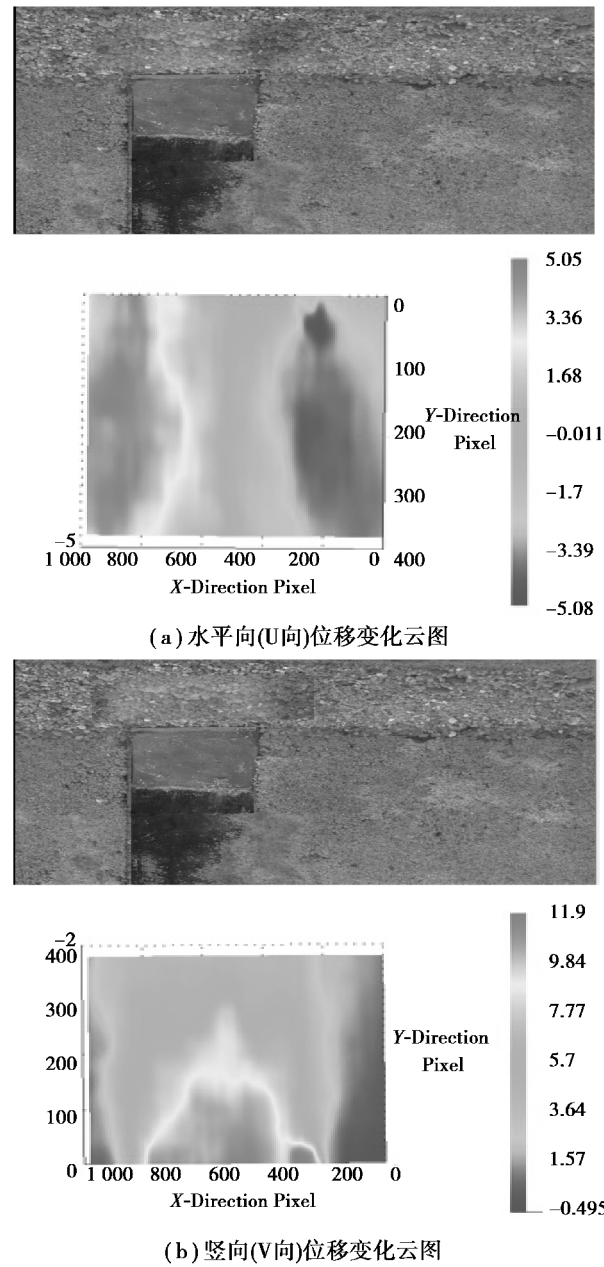


图 11 桩顶正上方区域位移场变化分析图
(x 方向以向左为正值,y 方向以向下为负值) (单位:mm)

Fig. 11 Displacement field analysis above pile top
(x direction is left positive, y direction is downwards negative) (unit: mm)

3 理论计算与试验结果对比

3.1 理论公式

当碎石垫层受到上部荷载作用时,较多荷载传给刚性桩,较小部分荷载传递给桩间土。随着荷载增加,桩间土压缩下沉,而桩顶沉降较小,势必在桩顶产生刺入变形。桩、土分担荷载的能力与桩顶刺入垫层的刺入量有很大关系,要保证复合地基桩间土共同承担荷载,需保证桩顶向垫层有一定刺入变形,刺入量对桩土的荷载分担比具有协调作用,如图 12 所示。

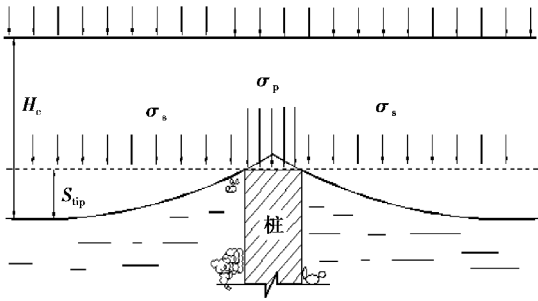


图 12 桩与土位于同一平面时桩与桩间土受力情况

Fig. 12 Stress situation of soil and soil between piles when pile and soil are in the same plane

根据桩顶刺入垫层时土体的受力情况,在轴对称弹性半平面内建立桩顶应力与桩顶刺入垫层刺入量的理论,集中荷载作用下根据 Vesic 球孔扩张理论^[11],以桩顶应力为球形孔,建立桩顶应力为:

$$p_e = \frac{4(c \cos \varphi + \rho_s \sin \varphi)}{3 - \sin \varphi} \tag{1}$$

式中: ρ_s 为土体初始应力。

球孔区域最大半径为:

$$r_p = \left(\frac{c \cot \varphi + \rho_s + P}{c \cot \varphi + \rho_s + P_e} \right)^{\frac{4 \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} r_i} \tag{2}$$

式中: r_i 为球孔初始半径。

当时 $r=r_p, p=p_e$ 时,可得弹塑性交界面上土体径向位移为:

$$\mu_p = \frac{1 + \nu}{2E} r_p P_e \tag{3}$$

球孔体积变化为:

$$\Delta V = \Delta V_1 + \Delta V_2 = \frac{2\pi}{E} [3(1 - \nu)r_p^2 P_e - 2(1 - 2\nu)Pr_i^3] \tag{4}$$

式中: $\Delta V_1, \Delta V_2$ 分别为球孔弹性、塑性体积变化。

桩顶力为 p_p , 作用于半球面的球孔扩张力为:

$$P = P_p / (\pi r_p^2) \tag{5}$$

当桩顶刺入垫层刺入量为 S_{tip} 时,则桩顶刺入垫层刺入体积为:

$$\Delta V_p = \pi r_p^2 S_{tip} \tag{6}$$

由于是半球面刺入,根据刺入体积等于球体的弹塑性体积变化可得:

$$\Delta V_p = \frac{1}{2} \Delta V \tag{7}$$

由于桩顶铺设为碎石垫层,则只需代入球孔弹性体积应变 ΔV_1 , 得到

$$S_{tip} = \frac{1 + \nu}{E} r_p P_p \tag{8}$$

将桩顶近似为一个刚性压块,带入桩体相关参数,及修正系数,得到桩顶刺入垫层刺入量方程如下:

$$S_{tip} = \frac{1 + \nu_s}{E} \lambda_{tip} D_p P_p \tag{9}$$

式中: S_{tip} 为桩顶刺入位移; ν_s, E, G 分别为桩端土体泊松比、弹性模量、剪切模量; λ_{tip} 为系数; r_p, D_p, P_p 分别为桩半径、桩径及桩顶土压力。

对于桩端刚性压块, Randolph 建议可用 Boussinesq 公式求解,其系数 λ_{tip} 取 0.79。桩端刺入时是桩体主动压入土体中,桩体主动,土体处于被动状态;而刚性桩复合地基中垫层受力传递给桩体及桩间土,垫层土体为主动状态,桩体为被动,所以桩顶刺入垫层的位移量要比上述桩端位移大;考虑 2 种不同土压力状态的土体位移,且考虑土体刚度指标,并且将上述公式中土体的弹性模量替换成土体的压缩模量将更准确,则可以将系数进行改进,如下:

$$\lambda_p = 0.79 \frac{I_{cr}}{I_r} \tag{10}$$

式中: I_{cr}, I_r 分别为垫层土体临界刚度指标和土体实际刚度指标。

桩顶刺入垫层的刺入量方程为:

$$S_{tip} = \frac{1 + \nu_s}{2E_s} \lambda_p D_p P_p \tag{11}$$

式中: E_s 为垫层土体压缩模量; D_p 为桩体直径; σ_p 为桩顶应力。

3.2 试验验证

桩顶刺入量与桩顶应力值、桩径及垫层土体密实度等因素相关,计算出桩顶刺入量与模型试验实测值进行对比,如表 2 所示。

表 2 垫层刺入量实测值与理论值对比
Table 2 Comparison of measured values and theoretical values on penetration in cushion

试验组	垫层刺入量		
	实测值/mm	计算值/mm	相对误差/%
试验 1	3.41	11.33	232.2
试验 2	5.88	7.81	32.8
试验 3	7.44	7.56	1.6
试验 4	10.16	7.47	-26.5
试验 5	15.13	7.42	-50.9
试验 6	4.72	9.79	107.4
试验 7	6.90	7.42	7.5
试验 8	13.02	11.76	-9.5
试验 9	5.31	7.97	50.1
试验 10	7.82	7.32	-6.4
试验 11	12.89	14.48	12.3
试验 12	5.63	6.79	20.6
试验 13	5.51	5.83	5.8
试验 14	7.60	8.14	7.1
试验 15	10.77	12.28	14.0

试验 1、6 相对误差较大,试验 5、9 相对误差达到 50%,其余 11 组试验相对误差率控制在 30%以内,其中有 8 组试验计算值与实测值吻合度较高,相对误差在 15%以内。

误差分析:试验 1 相对误差大是由于垫层厚度较薄为 3 cm,桩顶发生应力集中。而试验 6 相对误差大是因为垫层厚度与桩径之比较小,导致试验时桩顶应力集中。试验 5 误差原因是垫层厚度与桩径比较大,在荷载作用下,导致桩顶刺入垫层量

偏多。其次,试验 1、6、5、9 由于桩顶刺入量是根据桩顶沉降与桩间土沉降的关系转换所得,并不是直接测试所得,且桩间土沉降是取桩间土体一系列测点位移的平均值,由此所得桩间土的沉降为近似值,再根据桩顶与桩间土沉降的关系计算出的桩顶刺入量就会与实测值出现误差累计。桩顶刺入量的理论计算公式与桩顶应力值相关,若桩顶应力实测值与理论值相差较大,必然导致桩顶刺入量的计算值偏差较大。桩顶刺入量的实测值与计算值均出现不同程度的误差,所以导致桩顶刺入量的试验值与理论值相比误差较大。其余试验的相对误差则主要由桩顶刺入量的实测值误差所致。

4 结论

(1)垫层越厚,桩顶刺入量越大,刺入量与垫层厚度的相关度较。增大桩径和设置桩帽均能够有效地控制桩顶刺入垫层的刺入量,而桩帽直径大小对垫层刺入量影响较小。

(2)垫层密实度改变对刺入量影响较大,垫层密实度过低,桩顶易刺穿垫层,不利于发挥垫层作用。为控制刺入量,垫层密实度不宜低于 0.6,且垫层厚度与桩径比值不宜大于 1.0。

(3)垫层上部荷载在开始加载时,垫层土体下沉,桩间土受到垫层土体挤压,桩体位移较小,桩间土与桩体产生不均匀沉降,从而桩侧形成剪切带。在不断加载过程中,垫层土体挤压桩间土产生错动,桩间土剪切变形进一步发展,最终形成完整的剪切带,土体剪切带的形成是反映土体破坏时的重要特征之一。

(4)将理论结果与试验结果进行对比,分析了产生误差的原因,结果表明本理论计算方法与实测结果较为接近,验证了本计算方法的适用性。

参考文献 (References)

[1] 龚晓南.复合地基理论及工程应用[M].杭州:浙江大学出版社,2002.(Gong Xiaonan. Theory and engineering application of composite foundation [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press,2002.(in Chinese))

[2] 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 Qian,

Gong Xiaonan. Reseach on the properties of cushion of the composite foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 1998,19(2):67-73.(in Chinese))

[3] 冯亮亮,叶华静.刚性桩复合地基的非线性有限元数值分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(6):1170-1175. (Feng Liangliang, Ye Jinghua. Non-linear numerical analysis of rigid-pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009,5(6):1170-1175.(in Chinese))

[4] 亓乐,王青松,刘薇.刚性桩复合地基桩端向下卧层刺入量计算方法[J].地下空间与工程学报,2014,10(3):533-538. (Qi Le, Wang Qingsong, Liu Wei. Research on the pile penetration into underlying layer of rigid pile composite ground [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2014,10(3):533-538.(in Chinese))

[5] 张东刚,张震,闫明礼,等.端承刚性桩复合地基增强体上刺入试验研究[J].建筑科学,2014,30(5):52-57.(Zhang Donggang, Zhang Zhen, Yan Mingli, et al. Model tests reseach on the pile penetration into cushion in end-bearing pile composite foundation[J]. Building Science, 2014,30(5):52-57.(in Chinese))

[6] 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):815-820. (Qi Le, Shi Jianyong, Hou Qian. Reseach on the pile penetration into cushion of composite ground [J]. Rock and Soil Mechanics, 2011,32(3):815-820.(in Chinese))

[7] 张忠苗,陈洪,吴慧明.柔性承台下复合地基应力和沉降计算研究[J].岩土力学,2004,25(3):451-454. (Zhang Zhongmiao, Chen Hong, Wu Huiming. Reseach on stress and settlement of composite ground with soft base slab[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004,25(3):451-454.(in Chinese))

[8] 王律明,陆华东,吴慧明.柔性基础复合地基沉降计算[J].中南公路工程,2005,30(3):77-80. (Wang Lüming, Lu Huadong, Wu Huiming. Settlement of composite foundation with soft base slab [J]. Central South Highway Engineering, 2005,30(3):77-80. (in Chinese))

[9] 李元海,朱合华,上野胜利,等.基于图像相关分析的砂土模型试验变形场量测[J].岩土工程学报,2004,26(1):36-41.(Li Yuanhai, Zhu Hehua, Katsutoshi, et al. Deformation field measurement for granular soil model using image analysis [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004,26(1):36-41. (in Chinese))

[10] 朱小军,赵学亮,龚维明,等.复合地基垫层破坏模式的试验研究与数值模拟[J].东南大学学报,2013,43(3):629-633. (Zhu Xiaojun, Zhao Xueliang, Gong Weiming, et al. Experimental study and numerical simulation of cushion failure mode in composite foundation[J]. Journal of Southeast University, 2013,43(3):629-633.(in Chinese))

[11] Vesic A S. Expansion of cavities in infinite soil mass[J]. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div, 1972,98(1):75-91.

(上接第 411 页)

$$\varphi_1^{(1-3)}(z_1) = \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{c(c z_1 - c^2 + R_2^2)} - \sum_{n=1}^k (A_{-n} z_1^{-n}) \quad (\text{A.3})$$

$$\psi_1^{(1-3)}(z_1) = \frac{p_0 R_1^2}{z_1} + \left(\frac{R_2^2}{z_1 - c} + c \right) \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{(c z_1 - c^2 + R_2^2)^2} - \frac{R_1^2}{z_1} \sum_{n=1}^k (n A_{-n} z_1^{-(n+1)}) - \sum_{n=1}^k (\overline{A_n} / z_1^n) \quad (\text{A.4})$$

④隧道2孔边作用由地应力施加于单孔(隧道1)平面产生的面力所对应的复位势:

$$\varphi_1^{(2-1)}(z_1) = \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{c(c z_1 - c^2 + R_2^2)} + \sum_{n=1}^k (B_{-n} z_1^{-n}) \quad (\text{A.5})$$

$$\psi_1^{(2-1)}(z_1) = \frac{p_0 R_2^2}{z_1 - c} + \left(\frac{R_2^2}{z_1 - c} + c \right) \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{(c z_1 - c^2 + R_2^2)^2} +$$

$$\frac{R_1^2}{z_1} \sum_{n=1}^k (n B_{-n} z_1^{-(n+1)}) + \sum_{n=1}^k (\overline{B_n} / z_1^n) \quad (\text{A.6})$$

⑤隧道2内边界作用内压对应的复位势:

$$\varphi_1^{(2-3)}(z_1) = - \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{c(-c z_1 + R_1^2)} - \sum_{n=1}^k (D_{-n} (z_1 - c) - n) \quad (\text{A.7})$$

$$\psi_1^{(2-3)}(z_1) = \frac{p_0 R_2^2}{z_1 - c} - \frac{R_1^2}{z_1} \cdot \frac{p_0 R_1^2 R_2^2}{(-c z_1 + R_2^2)^2} - \frac{R_2^2}{z_1 - c} \sum_{n=1}^k (n D_{-n} (z_1 - c) - (n + 1)) - \sum_{n=1}^k (\overline{D_n} / (z_1 - c)^n) - c \cdot \varphi_1^{(2-3)}(z_1) \quad (\text{A.8})$$

其中, $c = d + R_1 + R_2$ 为两隧道的圆心距, $A_{-n}, A_n, B_{-n}, B_n, D_{-n}$ 和 D_n 为面力分布函数的级数形式的系数。