

文章编号: 1000-7598 (2010) 09-2716-07

水平荷载作用下 PCC 桩复合地基工作性状

刘汉龙^{1,2}, 陶学俊^{1,2}, 张建伟^{1,2}, 陈育民^{1,2}

(1. 河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210098; 2. 河海大学 岩土工程科学研究所, 南京 210098)

摘 要: 利用河海大学岩土所自行研制开发的大型试验模型槽进行 PCC 桩水平承载足尺试验, 实测得到了水平荷载作用下桩身弯矩分布。利用三维弹塑性有限元方法, 研究了 PCC 单桩与等截面实心圆桩、PCC 桩复合地基与等截面实心圆桩复合地基在水平荷载作用下的工作性状, 对其桩身弯矩和水平位移的分布规律进行了比较, 分析了竖向荷载、褥垫层厚度、基础埋深和置换率对 PCC 桩复合地基桩身性状的影响。研究表明, PCC 桩复合地基在水平荷载作用下, 随着竖向荷载、褥垫层厚度、基础埋深和置换率的增加, 其桩身弯矩和水平位移随之减小。因此, 在 PCC 桩复合地基设计时可以通过适度调整这些影响参数来减小水平荷载作用下的桩身弯矩和水平位移, 确保桩身的安全。

关 键 词: PCC 桩复合地基; 水平荷载; 足尺试验; 三维弹塑性有限元; 桩身弯矩; 水平位移

中图分类号: TU 473

文献标识码: A

Behavior of PCC pile composite foundation under lateral load

LIU Han-long^{1,2}, TAO Xue-jun^{1,2}, ZHANG Jian-wei^{1,2}, CHEN Yu-min^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to obtain distribution of bending moment along PCC pile under lateral load, full-scale model tests were carried out using large test tank developed by Hohai University. The three-dimensional elastoplastic finite element method was used to study the behavior of PCC pile and homalographic solid circular pile as well as PCC pile composite foundation and homalographic solid circular pile composite foundation under lateral load. The effects of different design parameters of PCC pile composite foundation on distribution of bending moment and deflection along pile were obtained. The study results show that the internal forces and deflection along pile decrease with the increment of vertical load, thickness of cushion, depth of foundation, and replacement ratio. It is concluded that the internal forces of pile can be reduced to ensure the safety of the pile by the appropriate adjustment of the main design parameters in the design of PCC pile composite foundation.

Key words: cast-in-situ concrete thick-wall pipe composite foundation; lateral load; full-scale test; three-dimensional elastoplastic finite elements; bending moment; deflection

1 引 言

现浇混凝土大直径管桩^[1-2](以下简称 PCC 桩)复合地基是在地基中置入 PCC 桩对地基加固所形成的一种复合地基, 因其造价低、承载力高、地基稳定性增加和沉降变形小等特点, 正被越来越多地用于加固软弱路基^[3]。

目前国内对 PCC 桩复合地基在竖向荷载作用下的性状进行了大量地分析^[3-5], 然而其在水平荷载作用下的性状研究却较少。对 PCC 桩复合地基用

于路堤时的重型车辆或高速列车制动引起的水平荷载, 用于江堤时的波浪荷载以及地震作用下的水平荷载等应用问题, 水平荷载的同时作用不可忽视。由于该复合地基中的 PCC 桩身一般不配筋, 在水平荷载作用下可能会断裂进而影响其正常使用, 须引起足够的重视。

对于实心桩复合地基在水平荷载作用下的研究目前也不多, 且桩径较小^[6-9]。大直径管桩复合地基和实心桩复合地基在竖向荷载作用下工作性状有较大差异, 在水平荷载作用下的差异性也值得探讨。

收稿日期: 2009-01-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 50778063); 江苏省自然科学基金创新学者攀登项目 (No. BK2008040)。

第一作者简介: 刘汉龙, 男, 1964 年生, 长江学者, 河海大学土木与交通学院院长兼岩土工程科学研究所所长, 主要从事土动力学与地基基础工程研究。E-mail: hliuhhu@163.com

对于桩式复合地基,褥垫层是其重要组成部分。在水平荷载作用下褥垫层铺设的厚度以及竖向荷载的大小都会对其工作性状产生一定的影响,另外基础的埋深以及置换率对此也有影响。

桩在水平荷载作用下的受力是一个复杂的桩-土相互作用过程。本文利用足尺试验得到了 PCC 桩在水平荷载作用下的桩身弯矩分布,利用三维弹塑性有限元方法探讨 PCC 单桩及其复合地基在水平荷载作用下的工作性状及其影响因素。

2 PCC 桩足尺试验

本次试验利用河海大学岩土所自行研制开发的大型试验模型槽进行双层地基中 PCC 桩水平承载足尺模型试验^[10-11]。试验中的 PCC 桩混凝土强度等级为 C20,长 6 m,外径为 1.0 m,壁厚 120 mm。模型槽的尺寸(长×宽×高)为 5 m×4 m×7 m。

试验桩周土体分为 2 层,上层为 3.5 m 为粉质黏土,下层为 2.5 m 为细砂。对试验用土进行了室内试验,得到了材料的主要计算参数,如表 1 所列。

表 1 试验材料参数

Table 1 Parameters of materials in test

参数	变形模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
桩体	25 000	0.17			25
黏土	4.6	0.33	27	24	19
砂土	17	0.3	38	15	16

试验加载采用单向多循环法,桩头自由,分级加载,荷载增量为 20 kN,最大水平荷载为 180 kN。由桩身各点钢筋测力计的读数可以计算出 PCC 桩在各级荷载下的弯矩分布,如图 1 所示,可见最大弯矩位于桩顶以下 2.5 m 左右。

3 计算模型的建立

3.1 研究内容和模型

本文主要研究 PCC 桩复合地基在水平荷载作用下的工作性状,为便于与单桩的水平受力特性作比较,选取复合地基中的桩为单桩。具体研究 PCC 单桩与实心圆形单桩、PCC 桩复合地基与实心圆形桩复合地基工作性状的差异以及 PCC 桩复合地基工作性状的影响因素。

本次通过有限元程序 ABAQUS 进行计算和分析。单桩模型由桩和土两部分组成,复合地基模型由桩、土、褥垫层和承台 4 部分组成。PCC 桩外径为 1.0 m,壁厚 120 mm,桩长 15 m。为进行等方量混凝土材料耗用情况下的比较,实心圆桩和 PCC 桩

的截面面积相等,故实心圆桩的直径为 0.65 m,桩长也为 15 m。承台厚 400 mm,尺寸为 4 m×4 m,即可模拟桩间距为 4 倍 PCC 桩外径的复合地基,该置换率为 0.021。

有限元模型解域侧面边界距离承台板边 2 倍承台板边长,解域底部距离桩底 1 倍桩长。边界条件为在土体侧面和底面约束其全部自由度。图 2 为 PCC 单桩及其复合地基计算模型剖面示意图。

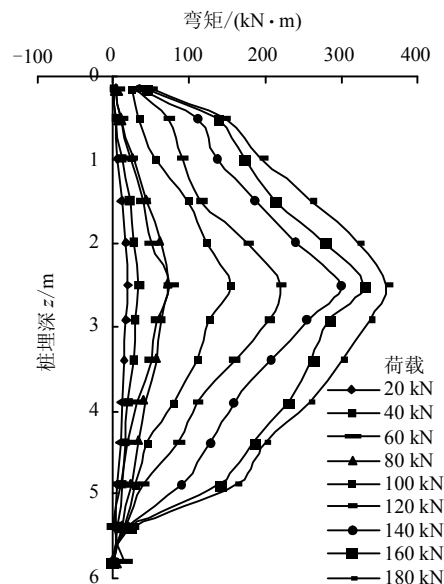


图 1 不同荷载作用下 PCC 桩的桩身弯矩

Fig.1 Bending moments of PCC pile under different loads

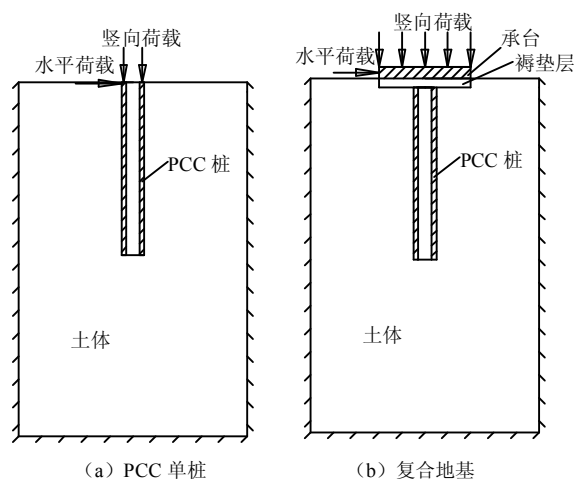


图 2 计算模型剖面示意图

Fig.2 Calculation diagram of model

假设模型中土体和褥垫层都为均质体,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性模型。PCC 桩为素混凝土桩,计算中假定其为线弹性材料。承台材料为强度等级较高的混凝土,刚度较大,也假定其为线弹性材料。材料典型计算参数见表 2。

表 2 模型材料计算参数
Table 2 Parameters of materials for the computation model

参数	变形模量 E/MPa	泊松比 ν	内摩擦角 $\varphi/(^\circ)$	黏聚力 c/kPa	土的重度 $\gamma/(\text{kN}/\text{m}^3)$
土体	10	0.30	20	20	18
桩体	25 000	0.17			25
褥垫层	30	0.30	35	5	22
承台	30 000	0.17			25

水平荷载作用在承台上，通过承台与褥垫层之间的摩擦力将水平力传递给褥垫层，再通过褥垫层和桩体、褥垫层和土体之间的摩擦将水平力传递给桩和土，包括桩周土和桩芯土。因此有限元计算中在不同部分的交界面上设置了接触单元。承台和褥垫层以及桩体和褥垫层间的摩擦系数均取 0.4，桩体和土体之间的摩擦系数取 0.2。

模型中的荷载包括模型各部分的自重以及施加于承台上的竖向和水平荷载，竖向荷载以均布荷载的形式施加在承台顶面；水平荷载在单桩模型中以集中力的形式施加在桩顶侧面，在复合地基模型中以均布荷载的形式施加在承台的侧面。计算时首先平衡地应力，然后施加预定的竖向荷载，最后分步施加预定的水平荷载。

3.2 模型验证

为验证所建模型的有效性，对以上 PCC 单桩水平承载足尺试验进行了模拟并比较了结果。由于该足尺试验得出了桩身弯矩分布，故将有限元模型计算的桩身弯矩和试验结果进行了对比，如图 3 所示。

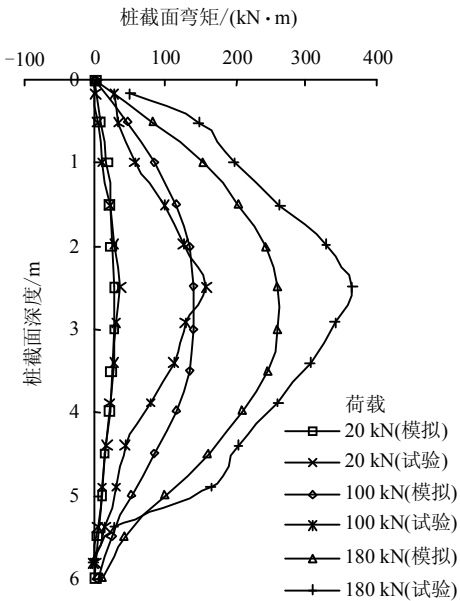


图 3 桩身弯矩比较
Fig.3 Comparison of bending moment along the pile

由图 3 可见，试验所得桩身最大弯矩位于桩顶以下 2.5 m 左右，模拟计算的结果与其基本吻合。另外，当荷载值较小时，模拟值与试验值吻合较好，当荷载较大时误差较大，由于本文计算为简单起见，桩身混凝土采用的是线弹性模型，实际情况是荷载较大时混凝土也呈现出塑性。虽有此误差，但模拟值和试验值的总体变化规律基本一致。以上分析表明，采用本文有限元模型进行计算是可行的。

4 计算结果分析

根据以上计算参数和条件进行水平荷载作用下 PCC 单桩及其复合地基的三维有限元分析，包括与实心圆桩的性状对比以及 PCC 桩复合地基工作性状的影响因素。不同计算工况参数见表 3。

表 3 不同计算工况列表
Table 3 Different calculation conditions

序号	计算工况	竖向荷载 /kPa	褥垫层厚度 /mm	基础埋深 /m	置换率
1	PCC 单桩	100			
2	实心圆形单桩	100			
3	PCC 桩复合地基	100	200	0	0.021
4	实心圆桩复合地基	100	200	0	0.021
5	PCC 桩复合地基	50	200	0	0.021
6	PCC 桩复合地基	200	200	0	0.021
7	PCC 桩复合地基	100	100	0	0.021
8	PCC 桩复合地基	100	300	0	0.021
9	PCC 桩复合地基	100	200	0.5	0.021
10	PCC 桩复合地基	100	200	1.0	0.021
11	PCC 桩复合地基	100	200	0	0.013
12	PCC 桩复合地基	100	200	0	0.037

4.1 PCC 桩和实心圆桩单桩性状对比

实心圆桩目前被广泛用于地基与基础工程中，下文将 PCC 桩和实心圆桩在受水平荷载 200 kN 条件下的工作性状进行对比分析，即工况 1、2。图 4(a)为 PCC 桩和实心圆桩单桩桩身弯矩分布对比曲线，由图可见桩身弯矩分布曲线相似，PCC 桩和实心圆桩的截面弯矩最大值都位于桩顶以下 3 m 左右，分别为 276.4 kN·m 和 251.6 kN·m。图 4(b)为桩身水平位移对比曲线，可见 PCC 桩和实心圆桩的桩身水平位移主要发生在桩顶以下 5 m 以内，最大值在桩顶，分别为 8.8 mm 和 27.1 mm。由此可见，等截面面积的前提下 PCC 桩身最大弯矩比实心圆桩大 10%左右，但桩顶的水平位移却只有实心圆桩的 1/3，表明在水平承载力以位移为控制指标情况下 PCC 桩的水平承载性能更好。

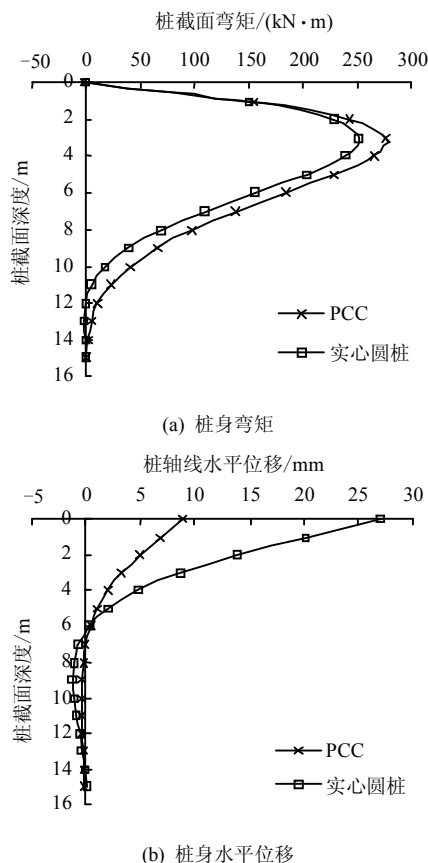


图 4 PCC 桩和实心圆桩单桩桩身弯矩和水平位移分布对比曲线

Fig.4 Contrast curves of distribution of bending moment and deflection along the pile of PCC and solid circular pile

4.2 PCC 桩和实心圆桩复合地基性状对比

对比工况 3 和工况 4 的计算结果, 图 5 为 PCC 桩复合地基和实心圆桩复合地基在受水平荷载为 125 kPa, 即合力大小为 200 kN 作用时两桩的桩身弯矩和位移对比曲线。由图可见, 两桩弯矩和位移分布曲线基本相似, 桩身弯矩和位移均出现反弯点。桩身弯矩最大值均位于桩顶下 4.0 m 左右, 位置均较单桩受力时有所下移。桩顶位移达到最大值, 但弯矩和位移值大小都较单桩大大减小。另外, 复合地基中由于褥垫层的作用, 两桩桩顶均产生了较大的负弯矩。PCC 桩和实心圆桩弯矩最大值分别为 71.0 kN·m 和 24.4 kN·m, 前者近似是后者的 3 倍; 位移最大值分别为 3.1 mm 和 3.0 mm, 二者相差不大。

与前面单桩的性状对比 (表 4), 不论是弯矩还是位移, 相同的条件下 PCC 桩复合地基传递到桩上的水平荷载较实心圆桩大, 这是由于在竖向荷载作用下桩顶刺入褥垫层, 褥垫层进行调整, 使得 PCC 桩内的上层土得到密实, 其受的水平力传递到桩上, 使得桩承担了更多的水平荷载。

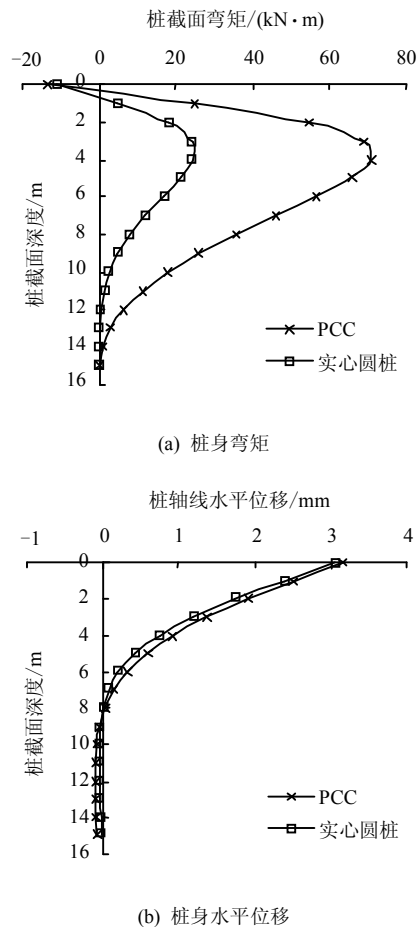


图 5 PCC 桩复合地基和实心圆桩复合地基桩身弯矩和水平位移分布对比曲线

Fig.5 Contrast curves of distribution of bending moment and deflection along the pile in composite foundation of PCC and solid circular pile

表 4 不同桩型单桩和复合地基性状比较

Table 4 Comparison of bending moment and deflection in different piles and composite foundation

参数	工况			
	PCC 复合地基	PCC 单桩	实心圆桩 复合地基	实心圆桩 单桩
弯矩 _{max} /(kN·m)	71.0	276.4	24.4	251.6
弯矩 _{max} 比值		0.257		0.097
位移 _{max} /mm	3.1	8.8	3.0	27.1
位移 _{max} 比值		0.352		0.111

尽管复合地基水平受力时 PCC 桩的弯矩比实心圆桩大了很多, 但由于 PCC 桩在竖向承载方面较实心圆桩有更大优势, 故不妨碍 PCC 桩复合地基的大面积推广和应用。只是在 PCC 桩复合地基设计时应进行可能发生的水平荷载作用下桩身弯矩和位移验算, 确保桩身不会断裂, 以免影响其正常使用。

4.3 竖向荷载对 PCC 桩复合地基性状的影响

基础埋深为 0, 褥垫层厚度取 200 mm, 置换率

为 0.021, 竖向荷载取 50、100、200 kPa 分别计算, 即工况 5、3、6。图 6 为竖向荷载不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线, 计算结果表明, 在相同的水平荷载 125 kPa 作用下, 竖向荷载越大, 桩身弯矩和位移越小, 反之越大。桩顶以下 4 m 深度处的截面弯矩分别为 73.5、71.0、63.9 kN·m, 桩顶位移分别为 3.3、3.2、3.0 mm。

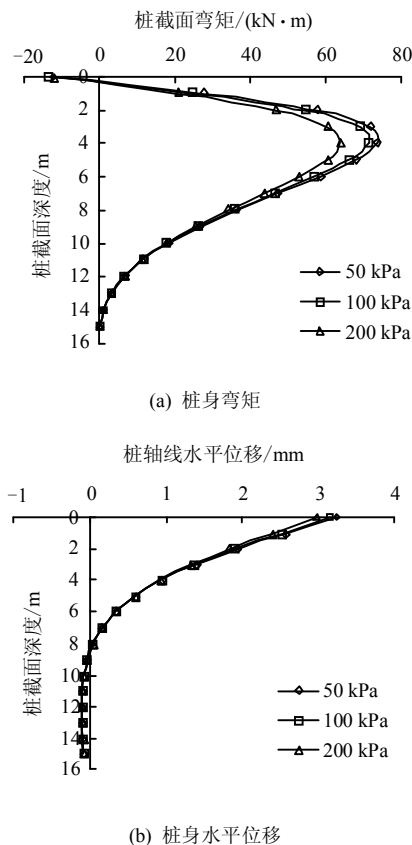


图 6 竖向荷载不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线
Fig.6 Distribution of bending moment and deflection along the pile in PCC pile composite foundation under different vertical load

承台所受的水平力通过褥垫层传递到桩和桩间土, 由桩和桩间土共同承担, 而桩间土所能承担的水平力又与其上的竖向荷载有关。由于当竖向荷载增大时, 褥垫层与土之间的接触压力增大, 褥垫层与土之间的摩擦力增大, 土承担的水平力增大, 则桩承担的水平力减小, 同时由于竖向荷载的增大, 土进一步压实, 提高了其对桩体水平变形的约束, 故竖向荷载增大时, 桩身弯矩和位移减小。

4.4 褥垫层厚度对 PCC 桩复合地基性状的影响

基础埋深为 0, 竖向荷载为 100 kPa, 置换率为 0.021, 褥垫层厚度取 100、200 mm 和 300 mm 分别计算, 即工况 3、7、和工况 8。图 7 为褥垫层厚度

不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线, 计算结果表明, 在相同的水平荷载 125 kPa 作用下褥垫层厚度越大, 桩身弯矩和位移越小, 反之越大。桩顶以下 4 m 深度处的弯矩分别为 74.8、71.0 kN·m 和 66.6 kN·m, 桩顶位移分别为 3.4、3.2 mm 和 2.9 mm。

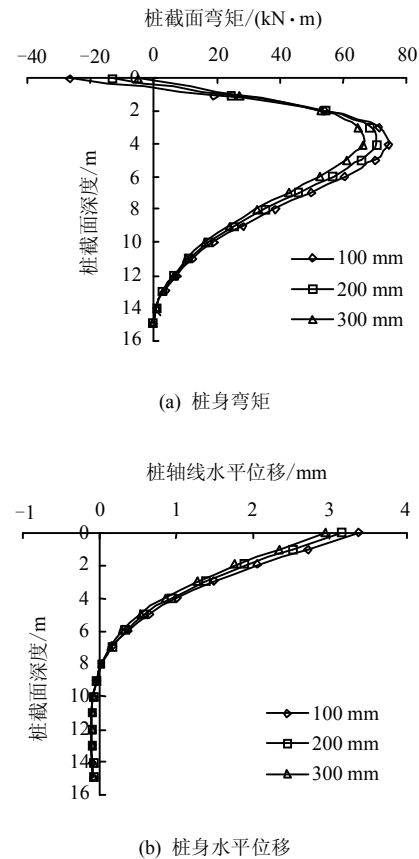


图 7 褥垫层厚度不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线
Fig.7 Distribution of bending moment and deflection along the pile in PCC pile composite foundation with different thickness of cushion

当褥垫层厚度较小时, 竖向荷载作用下由于桩顶的刺入, 桩、土竖向荷载分担比较大, 桩间土只分担了较小的竖向荷载, 则其分担的水平荷载也较小, 桩承担了大部分水平荷载。当褥垫层厚度增大时, 较厚的褥垫层可以较好地调节桩土间的竖向应力比, 使得桩间土的竖向应力增大, 故桩间土和褥垫层间的摩擦力也增大, 则桩间土分担更多的水平荷载, 桩分担的水平荷载则减小, 因此桩身弯矩和位移也减小。

PCC 桩复合地基设计时, 可以通过调整褥垫层的厚度来减小桩身的弯矩, 但厚度越大, 所需垫层材料越多, 造价越大, 故应从经济角度出发, 根据具体工程, 选择合适的褥垫层厚度。

4.5 基础埋深对 PCC 桩复合地基性状的影响

竖向荷载为 100 kPa, 褥垫层厚度为 200 mm, 置换率为 0.021, 基础埋深取 0 (无埋深)、0.5、1.0 m 分别计算, 即工况 3、9、10。图 8 为基础埋深不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线, 计算结果表明, 相同的水平荷载 125 kPa 作用下埋深越大, 桩身弯矩和位移越小, 反之越大。桩身 4 m 深度处的弯矩分别为 71.0、46.8、43.2 kN·m, 桩顶位移分别为 3.2、2.3、2.1 mm。

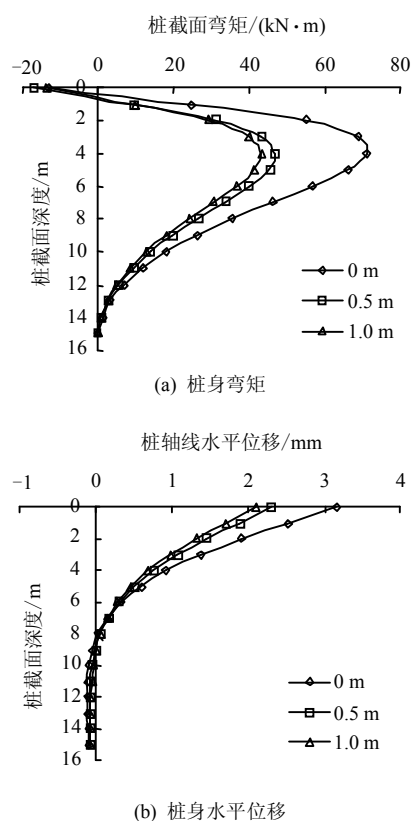


图 8 基础埋深不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线
Fig.8 Distribution of bending moment and deflection along the pile in PCC pile composite foundation with different depth of foundation

承台埋得越深, 其所受的水平荷载由其前侧土阻力和侧面摩擦力平衡得越多, 传递到褥垫层上的荷载就越少。进而由褥垫层传递到桩上的水平荷载就相应减小, 故桩身弯矩和位移也减小。另外, 从图 8 中还可以发现, 第 1 个 0.5 m 埋深对减小桩身弯矩和位移贡献较大, 继续增加的第 2 个 0.5 m 埋深贡献小了很多。因此, 在复合地基设计时可以适当增加基础的埋深, 而不是一味的增加。

4.6 置换率对 PCC 桩复合地基性状的影响

基础埋深为 0, 竖向荷载为 100 kPa, 褥垫层厚度为 200 mm, 承台尺寸为分别为 3 m×3 m、4 m×

4 m、5 m×5 m, 即可模拟桩间距分别为 3 倍、4 倍、5 倍 PCC 桩外径的复合地基, 置换率分别为 0.037、0.021、0.013, 即工况 3、12、11。图 9 为置换率不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线, 计算结果表明, 在等效的水平荷载 (单位承台体积所受的水平荷载相等, 即水平荷载分别为 93.75、125、156.25 kPa) 作用下, 置换率越大, 桩身弯矩和位移越小, 桩身弯矩最大值点和位移 0 点离桩顶越近。桩身弯矩最大值分别约为 57.1、71.0、77.2 kN·m, 桩顶位移分别为 2.1、3.2、4.1 mm。

置换率越大, 桩数越多, 桩数的增多使得分配到每根桩上的水平荷载减小, 故相同条件下传递到桩顶的荷载也减小, 因此, 桩身弯矩和位移减小。在复合地基设计时应选择合适的置换率, 不过这主要取决于竖向承载力的计算, 但应进行水平荷载作用下桩身工作性状的校核。

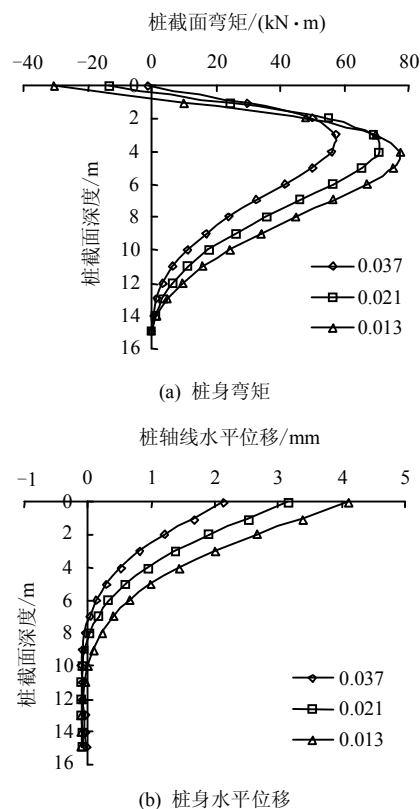


图 9 置换率不同时的桩身弯矩和水平位移分布曲线
Fig.9 Distribution of bending moment and deflection along the pile in PCC pile composite foundation with different replacement ratio

5 结 论

(1) 单桩受力时, 同等条件下 PCC 桩桩身最大弯矩比实心圆形桩大 10% 左右, 但桩顶水平位移只有实心圆桩的 1/3。复合地基受力时, 同等条件下

PCC 桩桩顶位移与实心圆桩相差不大,但最大弯矩是实心圆桩的 3 倍。不论是单桩还是复合地基,PCC 桩和实心圆桩的受力性状都有较大差异。

(2) 在水平荷载作用下,PCC 桩复合地基随着竖向荷载、褥垫层厚度、基础埋深和置换率的增加,其桩身弯矩和水平位移随之减小。因此,在 PCC 桩复合地基设计时,可通过适度调整褥垫层厚度、基础埋深和置换率来减小桩身弯矩和水平位移。

(3) 采用 PCC 桩复合地基时,由于其桩身弯矩较大,应进行可能的水平荷载作用下的桩身内力验算,确保桩身不会断裂以至于影响其正常使用。

参考文献

- [1] 刘汉龙,费康,马晓晖,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(I):开发研制与设计理论[J]. 岩土力学,2003,24(2): 164—168.
LIU Han-long, FEI Kang, MA Xiao-hui, et al. Cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile with vibrated and steel tube mould technology and its application (I): Development and design[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 4(2): 164—168.
- [2] 刘汉龙,郝小员,费康,等. 振动沉模大直径现浇薄壁管桩技术及其应用(II):工程应用与现场试验[J]. 岩土力学,2003,24(3): 372—375.
LIU Han-long, HAO Xiao-yun, FEI Kang, et al. Field pour concrete thin wall cased pile technology and its application (II): Application and in-situ test [J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2003, 24(3): 372—375.
- [3] 费康,刘汉龙,高玉峰. 路堤下现浇薄壁管桩复合地基工作特性分析[J]. 岩土力学,2004,24(9): 1390—1396.
FEI Kang, LIU Han-long, GAO Yu-feng. Performance of cast-in-situ concrete thin-wall pipe pile composite foundation under road embankment[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 24(9): 1390—1396.
- [4] 周云东,彭贵,刘汉龙,等. 现浇薄壁管桩(PCC)复合地基荷载变形特性[J]. 岩土力学,2005,26(增刊): 237—240.
ZHOU Yun-dong, PENG Gui, LIU Han-long, et al. Bearing capacity and deformation characteristic of a composite foundation with cast-in-place thin-wall concrete piles[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(Supp.): 237—240.
- [5] 刘汉龙,张波. 现浇混凝土薄壁管桩复合地基桩土应力比影响因素分析[J]. 岩土力学,2008,29(8): 2077—2080.
LIU Han-long, ZHANG Bo. Analysis of factors influencing stress ratio between pile and soil of composite foundation with cast-in-situ concrete thin-wall pipes[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(8): 2077—2080.
- [6] 阎明礼,张东刚. CFG 桩复合地基技术及工程实践[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.
- [7] 刘光磊,宋二祥. 刚性桩复合地基水平受力性能有限元分析[J]. 工业建筑,2004,40(11): 41—44.
LIU Guang-lei, SONG Er-xiang. Finite element analysis of rigid pile composite foundation under horizontal load[J]. **Industrial Construction**, 2004, 40(11): 41—44.
- [8] 郑刚,刘双菊. 刚性桩复合地基在水平荷载作用下工作性状的模型试验[J]. 岩土工程学报,2005,27(8): 865—868.
ZHENG Gang, LIU Shuang-ju. Experimental study on behavior of rigid pile composite ground under horizontal load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2005, 27(8): 865—868.
- [9] 屠毓敏,俞亚南. 刚性桩复合地基水平承载力特性[J]. 岩土力学,2007,28(11): 2329—2332.
TU Yu-min, YU Ya-nan. Characteristics of horizontal bearing capacity of rigid pile composite foundation[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(11): 2329—2332.
- [10] 刘汉龙,张建伟,彭劼. PCC 桩水平承载特性足尺模型试验研究[J]. 岩土工程学报,2009,31(2): 161—165.
Full-scale model test for the behavior of cast-in-place concrete large diameter pipe pile under lateral load[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(2): 161—165.
- [11] 刘汉龙,谭慧明,彭劼,等. 大型桩基模型试验系统的开发[J]. 岩土工程学报,2009,31(3): 452—457.
LIU Han-long, TAN Hui-ming, PENG Jie, et al. Development of large scale pile foundation model test system[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2009, 31(3): 452—457.