

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2015.06.003

双向简谐波荷载作用下群桩的力学性状分析

杨启斌

(福建工程学院 管理学院, 福建 福州 350118)

摘要: 为研究双向简谐波荷载作用下群桩的力学性状及其受力性能,采用 PLAXIS 有限元软件建立相应的数值模型,分析了群桩基础在双向简谐波荷载作用下内力、位移响应情况,探究了桩周土体的动应力应变关系,进而对其在循环水平荷载作用下的受力性能进行探讨。研究表明,与水平静载作用相比,桩基在循环水平荷载作用下的承载能力有所降低;桩顶荷载-位移曲线出现“滞回圈”,桩基产生“疲劳效应”;桩周土抗力的变化使得各排桩内力分配不均匀;桩周土体的动应力应变关系呈现滞后性、非线性及累积性。

关键词: 双向简谐波荷载;群桩基础;内力响应;力学性状

中图分类号: TU473

文献标志码: A

文章编号: 1672-4348(2015)06-0526-06

Mechanical characteristics analysis of multi-pile foundations under two-way simple harmonic loads

Yang Qibin

(School of Management, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: In practical engineering, multi-pile foundations are subjected to (significant) cyclic lateral loads. In this research, a numerical model of multi-pile foundation subjected to two-way symmetric harmonic loads was established via PLAXIS finite element software to investigate the interaction (effect) between the internal force and the displacement and the lateral bearing capacity of the foundation. The lateral bearing capacity slightly decreased compared to that in static load with a hysteresis loop-like load-displacement curve. The stiffness of multi-pile foundation (groups) reduced, and the displacement of soil in the pile group accumulated gradually with the internal forces of each pile row distributing unevenly. The results indicate that all the phenomena can be attributed to the swaying motion of the pile cap induced by two-way symmetric harmonic loads.

Keywords: two-way simple harmonic loading; multi-pile (group-pile) foundation; internal force response

桩基础是一种古老且应用非常广泛的深基础形式。近年来对于水平静力作用下桩基础的研究逐渐趋于成熟,但水平动力荷载作用的桩基础研究理论则相对较少,且因为土体本身的复杂特性及应用环境的动态变化,对于循环水平荷载作用下桩基础变形机理的认识远远滞后于实践。研究

动力桩的最大难题在于荷载的不确定性,其不确定性导致学者们的研究成果各有一些差异,一开始学者们的关注点在于动力方程求解,荷载参数方面,近年来离心机试验的应用给研究水平动力桩提供了方便,自 1970 年 Matlock 通过现场试验得出一套 $p-y$ 曲线以来^[1],人们便开始循着试验

收稿日期: 2015-11-06

作者简介: 杨启斌(1977-),男,福建莆田人,硕士,讲师,研究方向:高性能混凝土与基桩检测。

模拟和数值模拟两条线路来研究,关于水平动力桩的理论成果也越来越多。

目前,无论是求解析解,还是试验分析或数值分析,大部分研究理论都是在某种特定条件下的成果。首先是荷载来源的不同。由高层建筑传递的风荷载或者地震荷载,由桥梁墩台传递的车辆和刹车引起的制动荷载,由海洋平台传递的波浪荷载,由船只对港口结构的撞击荷载等,都是桩基础承受水平动力荷载的具体形式,相应的研究成果也非常多。如顾明^[2]通过1g大比尺模型试验以及离心机模型试验,分别研究了近海工程中高承台群桩在水平循环及偏心荷载作用下的受荷性状。张春辉^[3]考虑桩土相互作用,分析了曲线梁桥地震效应。杜鹏^[4]研究了交通荷载作用下碎石桩复合地基的动力特性等。

其次是桩周土体条件的不同。土体是否均质(单一均质土或多层土),桩周土的种类(黏土或砂土),或是饱和状态(饱和或非饱和)等,都会让桩基础的承载力受到不同程度的影响。张陈蓉^[5]等人通过软黏土中不排水条件下基于Tresca准则扩展而来的土体弱化模型和离心试验的结果修正静力双曲线形式 p - y 曲线,从循环荷载下桩土相互作用机理角度考虑水平循环荷载对单桩基础的影响。章敏^[6]针对非饱和土,对桩的动力响应与循环荷载进行了试验研究。黄占芳^[7]则针对可液化砂土中复合桩基体系的动力响应进行了研究。

再次是研究目标的侧重点不同,如竖向荷载与水平荷载共同作用时的耦合效应,群桩基础的“群桩效应”,水平动力荷载对桩基沉降的影响,桩对地震荷载的抗液化性能的减弱效应等都是目前学者们研究的焦点。如Martin Achmus^[8]等人研究了无粘性土在水平与竖向耦合荷载作用下的桩基础受荷性状。朱勇^[9]研究了多向水平荷载作用下的群桩效应研究。徐令宇^[10]研究了桩基础的水平响应计算方法及其抗液化性能。除上述外,还有其他种种相关报道^[11-14],这里不再一一详述,但总体来说,受循环水平荷载作用的桩基础研究目前仍处于探索阶段,并没有形成系统的理论和设计方法。

在本文中,双向简谐波荷载是循环水平荷载的一种,桥梁工程中的桩基础,其上部车辆的制动荷载往下传递,便是桩基础受双向简谐波荷载的

一种典型情况。据此,本文从群桩基础在动静荷载作用下所展现的不同性状出发,依据数值模型,观察双向简谐波荷载作用下群桩受荷性状和桩周土体形态,深层次探究产生其性状的机理,分析桩基础的水平承载性能,在一定程度上为动力桩设计提供更合理的依据。

1 动静荷载作用下群桩基础力学性状的差别

在静荷载作用下,影响桩基础水平承载力的因素很多,如桩体自身物理条件(桩径、是否有承台、桩长)、土层条件(如土的变形模量、桩土刚度比),桩间距和桩的排列方式等,在双向简谐波荷载的动力作用下,除了与静荷载条件下的相同影响因素外,影响桩基础水平承载力的最大因素是荷载条件,如荷载频率、循环次数、荷载幅值等。此时的桩基础与静荷载情况下相比其力学性状区别较大,相应地,其承载性能也不相同。

荷载幅值是指循环荷载达到的最大值,水平承载力随着荷载幅值的增大而降低。有研究表明^[12],在相同的循环次数下,荷载幅值越大,桩周土发生塑性应变的区域越大,桩周土的强度降低得越多,抵抗单桩运动的能力也就越弱。桩周土的土抗力降低,则桩的水平承载性能也降低。

荷载频率指的是一秒内循环加载的个数,随着荷载频率的提高,桩基础的水平承载性能发挥得越充分。这说明频率的增大对桩的水平承载力是有正面作用的,至于为什么频率增大能提高桩的承载力,国内外已经有较多的研究和探讨^[13],主要原因可能是荷载频率较高时,即循环荷载加载得较快时,桩周土体变密,从而提高了土的强度和桩的水平承载力。

随着循环次数的增加,桩的水平承载力是逐步减小的。这是因为,土体是弹塑性体,在周期性的荷载作用下,塑性应变随着循环次数的增加而不断积累。随着荷载的往复作用,发生塑性应变的区域逐步向桩身以下发展,从而使桩的水平承载力降低了。

在长期的循环荷载作用下,桩基础表现出承载性能降低的现象,本文通过对承受双向简谐波荷载作用的群桩基础进行数值模拟。

2 模型建立

为了探讨双向简谐波荷载作用下群桩基础的

承载性能, 设某工程 3×3 群桩基础如图 1 所示, 该模型可近似模拟桥梁工程中受到双向行驶车辆制动荷载的桩基础。

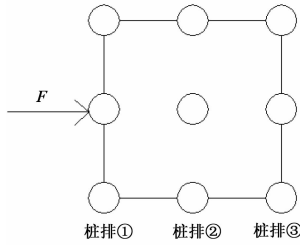


图 1 群桩的分布模式

Fig. 1 Distribution pattern of pile groups

把空间布置的群桩简化为二维模型, 则相当于取各排桩每延米长度的三排板桩。桩体直径 $D=1.0\text{ m}$, 桩长 L 取为 18 m 。桩排之间间距为 $6D$, 即 6 m 。建立模型时, 桩体单元选择板单元 (实体单元 PLAXIS 无法获得角位移), 采用 HSS 本构模型, 即小应变硬化模型 (小应变土体硬化模型考虑了土的受荷历史和刚度的应变相关性, 对于动力分析来说有很多优点), 将该模型建立在 PLAXIS 有限元软件进行计算。其中, 土体的变形模量 E_0 为 30 MPa , 为单一均质土层, 其他参量和换算成的本构模型参量分别如表 1 和表 2 所示。群桩中各基桩的物理参数如表 3。

表 1 土层参数表

Tab. 1 Soil (layer) parameters

变形模量 E_0 / MPa	泊松比 ν	粘聚力 c / 摩擦角 φ / kPa (°)	γ / ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$)
30	0.35	7 23	18

表 2 HSS 本构模型取值

Tab. 2 The value of HSS constitutive model

E_0 / MPa	E_{50}^{ref}/MPa	$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}/MPa$	$E_{\text{yr}}^{\text{ref}}/MPa$	m	$\gamma_{0.7}$	Rinter	G_0 / MPa
30	15	15	45	0.8	0.000 2	0.9	135

表 3 基桩材性参数表

Tab. 3 Foundation pile material parameters

桩径 D / m	桩长 L / m	弹性模量 E / MPa	泊松比 ν	桩土刚度比
1.0	18	3×10^4	0.167	1 ⁰⁰

为简化模型, 采用的荷载形式为双向简谐波荷载, 可以简单表达为: $F(t) = F\sin(\omega t + \varphi)$ 。设荷载幅值 600 kN , 频率 2 Hz , 加载时间为 10 s , 即循环次数 20 次, 初始相位角取值为 0。如图 2。

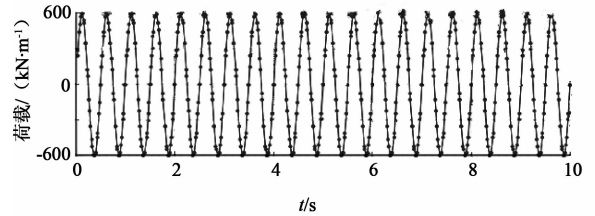


图 2 简谐波荷载示意图

Fig. 2 Schematic of simple harmonic loading

有限元模型及其网格划分如图 3, 在模型的左右两边施加水平方向位移约束, 底部设置标准吸收边界, 施加水平和垂直两方向位移约束。

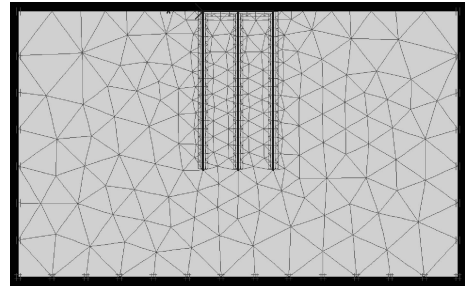


图 3 有限元模型及其网格划分

Fig. 3 Finite element model and meshing

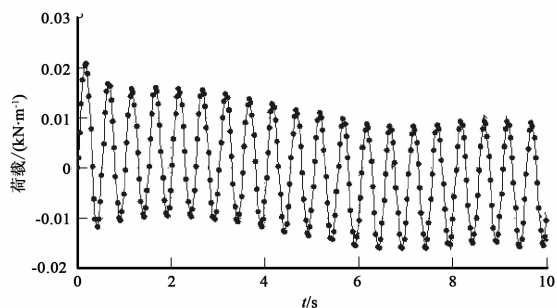
3 群桩基础力学行为的数值分析

3.1 桩身位移分析

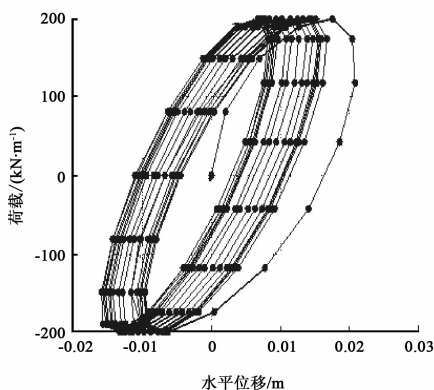
选取桩顶某一处, 其位移时程曲线如图 4。

在双向简谐波荷载作用下, 群桩基础承受着正向加载 - 正向卸载 - 反向加载 - 反向卸载 - 正向加载的循环过程, 各排桩发生左右摇摆。桩基础在 $t=0\text{ s}$ (桩基础开始受力) 至 $t=0.2\text{ s}$ (正向位移达到最大值), 再到 $t=0.375\text{ s}$ 时刻 (反向位移达到最大值), 最后到 $t=0.575\text{ s}$ 时刻 (恢复原位), 10 s 内不断重复摇晃了 20 次。从图 4(a) 看出, 随着双向循环荷载的周期性变化, 桩顶水平位移也不断发生相应的周期性变化。

从图 4(b) 看出, 桩顶的荷载 - 水平位移曲线在每个周期内并不重合, 存在着“回滞环”, 说明桩体受到不断扰动的同时, 出现了“疲劳效应”。



(a) 桩顶某一点的位移时程曲线



(b) 荷载-水平位移曲线

图 4 位移响应情况

Fig. 4 Displacement response

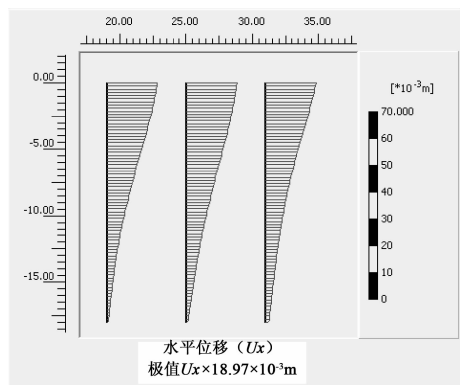


图 5 桩身水平位移图 ($t=0.2\text{ s}$)

Fig. 5 Schematic of pile lateral displacement ($t=0.2\text{ s}$)

由图 5 可见,在 $t=0.2\text{ s}$ 时刻,由于施加了较大的荷载,整个桩身发生了较大的位移,且桩顶处最大,随着桩入土深度的加深而逐步减小的趋势。但这个减小的过程并不是单调减小,而是呈非线性变化,减小的幅度逐步加大。

3.2 桩周土体位移分析

群桩基础在外荷载作用下发生左右摇晃的过程,其实对其周边土体也产生了巨大影响,如图 6, (a)、(b)、(c)、(d) 分别是在 t 为 0、0.2、0.375、0.575 s 时刻,即在一个周期内桩周土体的位移变化云图。从纵向上观察,无论任何时刻,土层在表面处受到的扰动程度最大,桩间土体松动最明显;在土层深处,即使外荷载较大,但引起的变形较小。

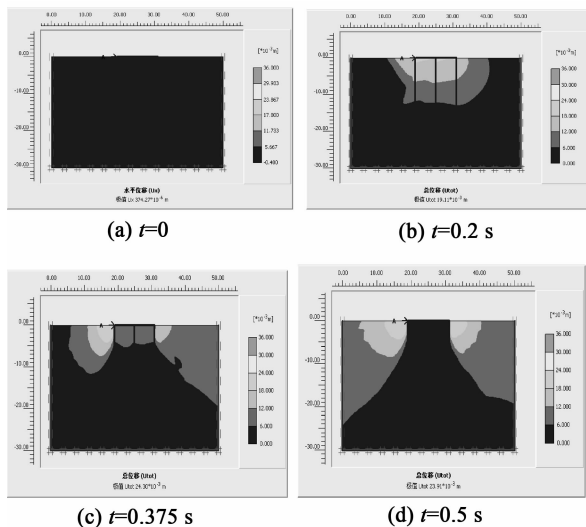


图 6 不同时刻下桩周土体随时间变化的位移云图

Fig. 6 The lateral displacement cloud diagram of soil close to the pile vs time

从水平向上观察,图 6(a), $t=0$ 时,桩周土体未受扰动,位移量基本为 0;图 6(b), $t=0.2\text{ s}$ 时刻是群桩基础达到正向位移最大值,也是正向加载达到最大值的时刻,此时桩周土体顺着荷载的方向,桩前土体位移:桩排③ < 桩排② < 桩排①。图 6(c), $t=0.375\text{ s}$ 时刻是反向荷载达到最大值的时刻,此时桩周土体顺着荷载的方向,桩前土体位移:桩排① < 桩排② < 桩排③。图 6(d), $t=0.5\text{ s}$ 时刻是第一次循环加载周期结束的时刻,此时外荷载为 0,但桩周土体并没有恢复原来的位置,而是产生了一定的累积位移。

在群桩基础发挥水平承载性能的过程中,自身强度大小虽然起着重要作用,但其实很大一部分来自于桩周土体的抗力大小。土体的位移变化其实反映了桩周土体的抗力大小,位移量越大,说明土体受到扰动程度越大,其发挥的抗力也越大。

由以上桩周土体位移的分析可见,群桩基础

在受到外荷载作用后,又把荷载传递给顺着荷载方向桩体四周的土体,土体产生抵抗,由于土体是弹塑性体,当水平荷载还比较小时,这一抗力是由靠近地面的土提供的,而且土的变形主要为弹性的,随着循环荷载由 0 不断增大直到最大值 600 kN 的过程中,表层土逐渐产生塑性屈服,发生了不可恢复的塑性应变,从而使水平荷载向更深处的土层传递,当变形增大到桩体不能容许的程度或桩周土失去稳定时,桩-土体系便趋于破坏。

3.3 桩土相互作用过程与群桩内力分配

在循环水平荷载作用下,桩体自身产生“疲劳效应”,其强度随之降低,桩周土体由表层开始逐渐屈服,并产生累积位移,这两个因素都会直接影响桩基础的承载性能,但桩身强度降低与桩周土体屈服并不是独立发生的,而是同时产生,因此,可以说桩身水平承载桩工作性能的发挥过程其实就是桩土之间相互作用的过程。

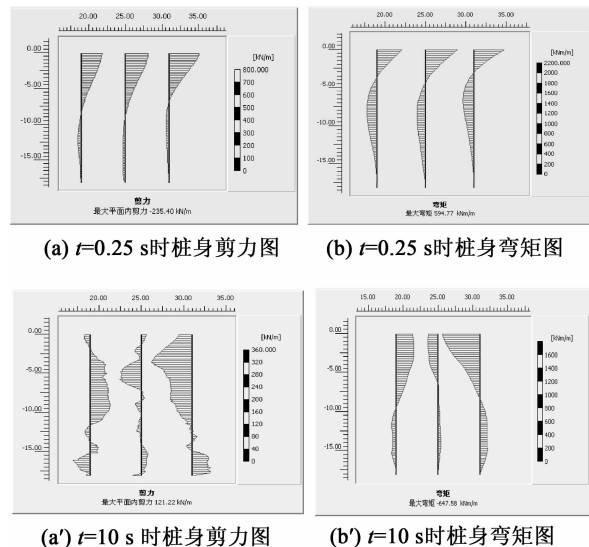


图 7 弯矩与剪力随桩深度的变化图

Fig. 7 Bending moment and shear force changing with the depth of pile

选取两个代表性时刻,输出桩身的剪力与弯矩图如图 7 所示,(a)、(b)分别为 $t=0.25$ s 时刻即正向卸载为 0 的最终时刻桩身所受剪力与弯矩,(a')、(b')分别为 $t=10$ s 时刻即外荷载在最后卸载为 0 的时刻桩身所受剪力与弯矩。

由图 7 可见,在各桩排其他条件同等的情况下,荷载分配大小并不一致,在 $t=0.25$ s 时刻,荷载分配大小为:桩排③ > 桩排② > 桩排①。桩的

荷载分配大小反映了桩的水平承载性能,而事实上桩的水平承载性能的发挥是由桩周土体抗力提供的,土抗力的变化,是导致各桩排产生不同的内力分配的原因。 $t=0.125$ s 时桩前土体抗力大小为:桩排③ > 桩排② > 桩排①,这也就决定了在各桩排的其他条件同等的情况下,荷载分配大小为:桩排③ > 桩排② > 桩排①。

相应地,当 t 为 0.25 ~ 0.5 s 的后半周期内,此时前半周期的桩后土体已变为各排桩的桩前土体,桩前土体抗力为:桩排① > 桩排② > 桩排③。此时荷载分配为:桩排① > 桩排② > 桩排③。不一样的是,此时各桩前土体在正向加载的过程中已经受到扰动,各排桩的桩前土体抗力比起相应时刻的桩周土抗力都已经降低。所以桩体即使恢复原位置,但土体已经有了一定位移量,位移量大小不一致,导致桩内力分配不一致,最终导致发挥水平承载性能的程度也不相同。

在 $t=10$ s 时,桩体受简谐波荷载循环共 20 次,土体位移受到多次往复扰动,发生塑性应变的土体越来越多,区域不断扩展,桩周土体抗力不断变小,则群桩的整体水平承载力也变小。其中,桩排②由于其桩前桩后土体受到的扰动最大,因此,在经过多次循环荷载后,桩排②所承担的荷载逐渐变得最小。 $t=10$ s 时刻,桩周土抗力大小为:桩排③ > 桩排① > 桩排②,相应地,其内力值也是桩排③ > 桩排① > 桩排②。 $t=10$ s 时刻,桩身弯矩值的大小反映了桩基础经过 10 s 的循环加卸载作用,桩身强度受到衰减的程度,弯矩值越大,说明此时桩的强度被降低得越多。

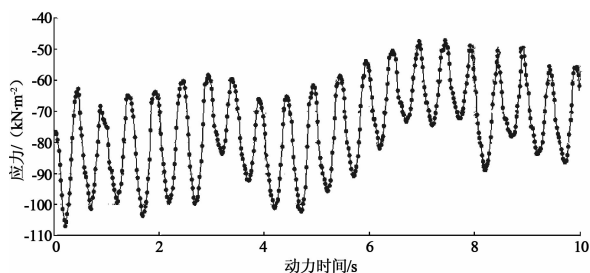
可见,各排桩的内力分配大小与桩土相互作用过程密切相关,外荷载的作用使桩体自身不断来回摆动,从而使得桩周土体也受到循环往复的扰动,受扰动后的土体对桩产生的抗力降低,又最终影响了桩基础的水平承载性能发挥及其内力分配的不均匀。

3.4 桩周土的动应力应变过程

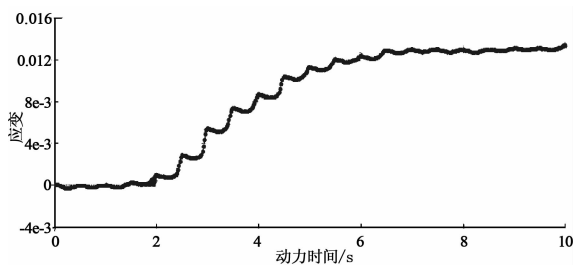
图 8(a)为桩顶某处的应力-时间曲线,由图可见:在 10 s 内,土体经过 20 个加载卸载过程,在周期性外荷载作用下,应力呈周期性变化,但已不能回到最初的应力状态,而是存在残余应力,这说明土体在正向加载-正向卸载-反向加载-反向卸载的循环过程中存在着能量消耗。

图 8(b)为桩顶时的应变-时间曲线,由图可

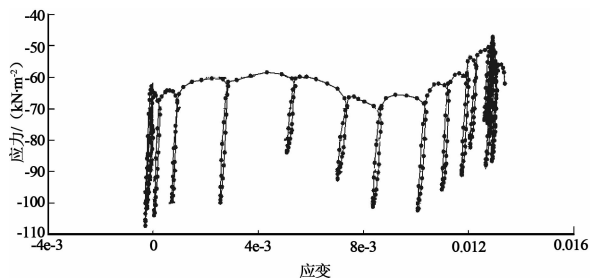
见: 应变随着循环荷载的加卸载过程, 只有一小部分弹性变形恢复原状, 而一部分应变无法恢复, 在 10 s 的过程内一直累积, 累积应变随着时间不断增大, 应变增量在 0 ~ 2 s 内发展得相对较慢, 在 2 ~ 8 s 内增长幅度迅速上升, 在 8 ~ 10 s 内, 应变增量又发展得较为缓慢。



(a) 应力 - 时间曲线



(b) 应变 - 时间曲线



(c) 应力 - 应变曲线

图8 桩顶动应力 - 应变关系 ($s = 6D$)

Fig. 8 Curve of pile top dynamic stress-strain relationship

如图 8(c), 在每个加卸载的循环过程中, 土样的塑性应变导致加载和卸载曲线不重合, 从而形成了滞回圈。从能量的角度来说, 滞回圈代表了机械能的耗散, 其中一部分转化为热能, 使土体内部温度升高, 另一部分以不可逆的形式储存在土体中, 造成土体内部损伤的积累。从滞回圈的形态特征可知, 塑性变形耗散的能量与每个循环

产生的塑性应变相对应, 塑性应变越大, 塑性变形耗散能越大。

从图 8(c) 中各个滞回圈之间的距离可以判断出, 随着荷载循环次数的增加, 滞回圈从紧密到稀疏再到越来越紧密的特征。当荷载循环次数 0 ~ 7 时, 滞回圈的面积比较小。N 为 7 ~ 15 时, 滞回圈面积逐渐变大, 当 $N > 15$, 各个滞回圈的面积又变小, 且逐渐变得密集。这说明, 塑性变形的增量幅度, 在初始一段时间内增长幅度较慢, 随着循环荷载次数增多, 塑性应变积累得越来越快。在加载的后期, 塑性变形虽然还是不断发生, 但是增量幅度已经越来越小。

滞回曲线说明了应变对应力具有滞后性, 而每个滞回圈的中心并不保持在同一条直线上, 说明了土的动力应力 - 应变关系还具有非线性, 由此可见, 滞后性、非线性及变形积累性这三大特征, 是土体在动力作用与静力作用下的最大区别, 也是影响桩体发挥水平承载力的决定性原因。

4 结论

1) 由于受到双向简谐波荷载的往复作用, 群桩力学性状与静荷载下相比相差较大, 较之于静荷载, 其水平承载性能有所降低。桩周土滞后性、非线性及变形积累性这 3 大特征, 是土体在动力作用与静力作用下的最大区别, 也是影响桩体发挥水平承载力的决定性原因。

2) 由于外荷载的循环作用, 桩顶处荷载 - 位移曲线出现“回滞环”, 随着时间的推移, 桩体自身出现“疲劳效应”, 其强度逐渐降低, 桩基础的承载力也逐步降低。

3) 桩周土层表面受到的扰动程度最大, 随着土层深处的加深逐渐变小。桩周土受到的扰动程度越大, 则提供的土抗力就越小, 进而也使得桩体发挥承载性能的程度越小。

4) 由于外荷载的循环作用, 出现了各排桩内力大小分配不均匀的现象。各排桩的内力分配大小与桩土相互作用中桩周土抗力的大小密切相关, 经过 20 次循环加载后, 最终桩周土抗力大小为: 桩排③ > 桩排① > 桩排②。

5) 本文所选参数尽量趋于工程实际, 其研究方法仅为数值方法, 目前还尚待试验的验证。

(下转第 536 页)

参考文献:

- [1] 钱劲松,凌建明. 路基拓宽工程中桩承式加筋路堤处理的数值分析[J]. 交通运输工程学报,2008,8(5):67-71.
- [2] 岳健,冷伍明. 深厚淤泥地基中高路堤桥台桩基工作性状的现场实测与分析[J]. 岩土力学,2011,32(11):3333-3340.
- [3] Moulton L K, Ganga Rao H V S, Halvorsen G T. Tolerable movement criteria for highway bridges[S]. Washington:Federal Highway Administration, 1982.
- [4] Barker R M, Duncan J M, Rojiani Et. Manuals for the Design of Bridge Foundations[R]. Washington:National Cooperative Highway Research Society, 1991.
- [5] Stewart D P, Jewell R J, Randolph M F. Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements[J]. Geotechnique,1994,44(2):277-296.
- [6] Jose L B. Three-dimensional analysis of embankments on soft soils incorporating vertical drains by finite element method [J]. Computers and Geotechnics,2004,31(8):665-676.
- [7] Kelesoglu M K, Springman S M. Analytical and 3D numerical modelling of full-height bridge abutments constructed on pile foundations through soft soils[J]. Computers and Geotechnics,2011,38(8):934-948.
- [8] Borges L J, Marques D O. Geosynthetic-reinforced and jet grout column-supported embankments on soft soils; Numerical analysis and parametric study[J]. Computers and Geotechnics,2011,38(7):883-896.
- [9] 费康,刘汉龙. 桩承式加筋路堤的现场试验及数值分析[J]. 岩土力学,2009,30(4):1004-1014.
- [10] Tanchaisawat T, Bergado D T. Numerical simulation and sensitivity analyses of full-scale test embankment with reinforced lightweight geomaterials on soft Bangkok clay[J]. Geotextiles and Geomembranes,2008,26(6):498-511.
- [11] 邢皓枫. 复合地基固结形状研究[D]. 杭州:浙江大学,2005.

(责任编辑:陈雯)

(上接第 531 页)

参考文献:

- [1] Matlock H. Correlation for design of laterally loaded pile in soft clay[J]. Proc 2nd Offshore Tech Conf,1970,108(4):577-594.
- [2] 顾明. 水平循环及偏心荷载作用下群桩性状模型试验研究[D]. 杭州:浙江大学,2014.
- [3] 张春辉. 考虑桩土相互作用的曲线梁桥地震效应分析[D]. 济南:山东建筑大学,2012.
- [4] 杜鹏. 交通荷载作用下碎石桩复合地基的动力特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.
- [5] 张陈蓉,俞剑,黄茂松. 软黏土中水平循环荷载作用下刚性短桩 $p-y$ 曲线分析[J]. 岩土工程学报,2011,33(2):78-82.
- [6] 章敏. 非饱和土中桩的动力响应与循环荷载试验研究[D]. 长沙:中南大学,2013.
- [7] 黄占芳. 可液化砂土中复合桩基体系的动力响应研究[D]. 太原:太原理工大学,2014.
- [8] Achmus M, Thieken K. On the behavior of piles in non-cohesive soil under combined horizontal and vertical loading[J]. Acta Geotechnica,2010,5(3):199-210.
- [9] 朱勇. 多向水平荷载作用下的群桩效应研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2011.
- [10] 徐令宇. 桩基础水平响应计算方法及其抗液化性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2013.
- [11] 郑中. 多向荷载下高承台群桩基础分析方法及应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2013.
- [12] 章敏,王星华,冯国瑞. 非饱和土中端承桩水平振动特性研究[J]. 岩土力学,2015,36(2):409-422.
- [13] 高笑娟,吕冰. 水平振动荷载作用下支盘桩承载性状研究[J]. 中外公路,2015,35(3):35-40.
- [14] 陈国成. 瞬态荷载下墩基-群桩动力非线性特性分析[D]. 长沙:湖南大学,2014.
- [15] 郑明燕. 考虑 SSI 的减隔震简支桥梁(渡槽)建模及地震动力响应研究[D]. 武汉:中国地质大学,2014.
- [16] 刘林超,杨骁. 地震作用下饱和土-桩-上部结构动力相互作用研究[J]. 岩土力学,2012,33(1):120-128.

(责任编辑:陈雯)