DOI:10.3969/j.issn.1001-5485.2013.12.016 2013,30(12):87-90,96

水平竖直组合荷载作用下桩基承载特性的离心模型试验研究

柴红涛[1],文松霖[2]
(1.中国煤炭科工集团北京华宇工程有限公司 岩土工程二所,河南 平顶山 467092;
2.长江科学院 水利部岩土力学与工程重点实验室,武汉 430010)

摘要:通过几组离心模型试验及成果分析,研究桩基在水平荷载 H、竖直荷载 V 组合荷载作用下的承载机理。研究结果表明:在相同位移条件下,桩基的水平承载力随着桩基施加下压荷载的增加而减小;在相同水平荷载作用下,桩头水平位移随着施加的下压荷载值增大而增大;桩基受到的下压荷载越大,桩头转角(桩身倾斜程度)越大;桩基在承受水平、竖直组合荷载作用时,二者是相互影响的,在设计过程中必须要注意水平荷载 H 和竖直荷载 V 的组合作用。

关 键 词:离心模型试验;组合荷载;承载机理;桩基
中图分类号:TU443 **文献标志码**:A **文章编号**:1001-5485(2013)12-0087-04

1 研究背景

桩基在实际工程中由于风力、波浪等外界因素的影响,往往受到组合荷载(水平荷载 H、竖直荷载 V)的作用,其承载机理极为复杂。对于组合荷载作用下的桩基础,目前的桩基设计理论很难满足工程需要,而采用传统的简化方法进行的桩基设计,又会使得建筑物桩基承载力存在比较大的随意性,如果桩基承载力取值不合理,易造成桩基础失稳或者沉降过大,对工程的安全运行影响很大。如何合理地评价组合荷载作用下的桩基础承载力以及组合荷载之间的相互影响作用,关系到建筑物的安全和设计优化,对基础工程的投资也起着控制性的作用,是一个急需解决的课题。

对于水平荷载 H、竖直荷载 V 组合荷载作用下桩基承载特性,国内外有关专家、学者做了不少研究工作,例如,郑刚、王丽[1-2]利用 ABAQUS 研究了竖向及水平荷载作用下超长桩的荷载传递与变形特点;赵明华、张天翔[3]通过建立倾斜或轴、横向荷载同时作用下基桩挠曲微分方程,对桩基在受倾斜荷载作用下的有关受力特性进行研究;Chari 等[4-8]通过大量试验对倾斜荷载作用下桩基的承载机制进行了较深入的研究;文松霖[9-10]对铅直、水平荷载作用下扩底桩的承载机理做了一些基础研究工作等。

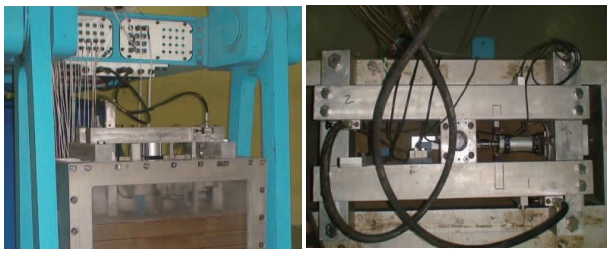
作为基金项目《桩基承载力空间屈服面基本特性研究》(50978034)的研究环节之一,本文通过离心模型试验及结果分析,主要探讨了水平荷载和竖直荷载组合荷载作用下桩基承载力的基本特性。

2 离心试验装置及试验概要

2.1 试验加载装置及概要

本次试验在长江科学院的土工离心机上进行,试验所用模型箱尺寸为1.0 m(长)×0.4 m(宽)×0.8 m(高),所用的加载装置如图 1 所示。离心模型试验采用的离心加速度 $n=95\ g$,水平荷载和竖直荷载的加载装置为笔者自己设计的一套简易加载装置,桩头连接杆件上安装轴承来实现桩的水平方向的移动,荷载采用气缸进行施加,荷载值采用荷载传感器进行测定,用 1 个激光位移传感器测定竖直位移,用 2 个激光位移传感器测定桩头水平位移,应变片测定模型桩的桩身应变,加载方式采用荷载控制方法。加载方法为:当离心加速度达到 95 g 时,施加竖直下压荷载,当桩基在竖直方向变形稳定后,开始施加水平荷载,直到桩基破坏为止,水平方向每次施加的荷载值为 30~50 N。

收稿日期:2012-11-20;**修回日期**:2013-01-21
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50978034)
作者简介:柴红涛(1985-),男,河南平顶山人,助理工程师,硕士,主要从事桩基、地基处理方面的研究工作,(电话)18768956108(电子信箱)chaihongtaocom@126.com。



(a) 侧视图 (b) 俯视图

图 1 离心试验加载装置

Fig. 1 Loading device for the centrifugal model test

2.2 模型桩

模型桩替代材料为不锈钢管,模型桩相对于地基为半刚性桩,模型桩在地基中埋设深度 H = 32 cm,桩径 D = 16 mm,不锈钢管壁厚 t = 0.6 mm,试验离心加速度 n = 95 g,试验用的模型桩数量 m = 3 根,长度 L = 37.5 cm。

模型桩桩身应变通过在桩身上面粘贴应变片来实现,共 9 对 18 个应变片(图 2),应变片采用 1/4 桥路连接,在桩体的对称位置各贴 1 个应变片,粘贴距离为2.5,5.0,7.5,10.0,12.5,15.0,17.5,22.5,27.5 cm。通过在模型桩上钻小孔,应变片导线从模型桩管内部引出,底部用木塞塞住,并用环氧树脂密封,模型桩通过桩头连接杆件与加载装置进行连接。

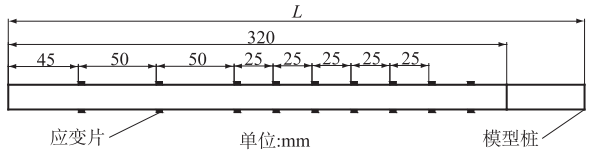


图 2 模型桩尺寸图

Fig. 2 Size of the model pile

模型桩制备好后,对模型桩进行标定[11],标定结果为 1 N · m 的弯矩对应的应变为101.8 με左右,模型桩弹性模量 E = 28.2 GPa。

2.3 模型地基

试验所用土料为重庆的黏性土,土体有关参数如表 1 所示,由此得到的塑性指数分别记为 I_{p17}, I_{p10}。W_{L17},W_{L10}分别为圆锥入土深度为 17,10 mm 处对应的含水量,即塑限,制作模型地基的土料过 5 mm筛,通过击实试验得其最优含水量为 15%,最大干密度1.97 g/cm^3,击实曲线如图 3 所示,模型制备时模型的控制干密度为1.77 g/cm^3,控制含水量为 15%,相对密实度为 90%。模型地基为匀质黏土地基,地基厚度 46 cm,采用分层击实,每层 2 cm,模型桩埋深为32 cm。

表 1 试验土料参数

Table 1 Physical parameters of the test soil

液限/%		塑限 W_p/%	塑性指数/%		颗粒组成/%		
W_{L17}	W_{L10}		I_{P17}	I_{P10}	0.075 ~ 0.005 mm	黏粒 <0.005 mm	胶粒 <0.002 mm
42.6	35.5	20.1	22.1	15.0	55.1	44.9	29.2

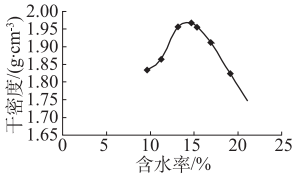


图 3 黏性土含水率与干密度关系曲线

Fig. 3 Relationship between moisture content and dry density of cohesive soil

2.4 试验方案

本次水平、竖直组合荷载试验方案共分 3 组,垂直荷载 V = 0, 765, 845 N,水平荷载用 H 表示。水平荷载加载高度 h = 90 mm,离心加速度 n = 95 g,模型桩桩径 D = 16 mm,桩长 L = 32 cm。

3 试验成果及分析

3.1 不同竖直荷载作用下桩基 $H-S$ 曲线及承载特性分析

根据试验采集到的数据,得出桩基在不同竖直下压荷载作用下的水平荷载 H 和水平位移 S 关系曲线,如图 4 所示。

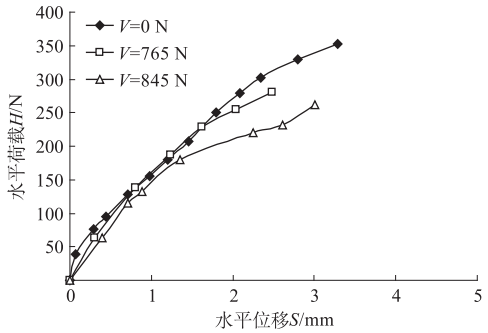


图 4 不同竖直荷载作用下桩基 $H-S$ 曲线

Fig. 4 $H-S$ curves of model pile under different vertical loads

由试验数据可知,在桩基承受 V = 765,845 N 的下压荷载时,桩基在竖直方向的位移均不超过 1 mm;参照相关文献[9-10],为便于分析,以 10% 桩径水平位移所对应的水平荷载为桩基在下压荷载作用下所对应的极限水平荷载。按照上述极限荷载的取值方法,得到桩基在下压荷载 V = 765,845 N 时对应的极限水平荷载,如表 2 所示。

表 2 不同下压荷载作用下桩基极限水平荷载

Table 2 Limit horizontal loads of pile foundation under different vertical loads N

下压荷载 V	桩基极限水平荷载 H
0	225
765	220
845	190

由表 2 可知,在桩头水平位移为 10% 桩径时,下压荷载 V = 0,765,845 N 的极限水平承载力分别为

225,220,190 N,即在某一下压荷载范围内,相同的位移条件下,桩基施加的下压荷载越大,桩基的水平承载力越小,桩基的水平承载力随着桩基施加下压荷载的增加而减小。参照文松霖[9-10]对砂土地基中扩底桩在水平荷载和竖直荷载组合作用下的承载特性以及屈服包络特性的研究成果发现:砂土地基中,在某一下压荷载范围内,扩底桩的水平承载力随着施加下压荷载的增加而增加;通过对其屈服包络特性的研究发现:超过某一下压荷载后,扩底桩的水平承载力随着施加下压荷载的增加而减小,这与本文中的研究成果是一致的。通过对下压荷载 $V=0$ N 和下压荷载 $V=765$ N 的 $H-S$ 曲线观察发现,二者 $H-S$ 曲线大致重合,这就说明存在一个临界荷载,使不同下压荷载作用下的桩基 $H-S$ 曲线重合。综上所述,桩基承受 H,V 荷载的组合作用时,在相同位移条件下,下压荷载存在一个临界荷载 V_{cr}:当下压荷载小于临界荷载 V_{cr}时,桩基的水平承载力随着施加下压荷载的增加而增加;当施加的下压荷载大于临界荷载 V_{cr}时,桩基的水平承载力随着下压荷载的增加而减小。

在水平荷载 $H=100$ N 时,下压荷载 $V=765$ N 的桩头水平位移为0.4 mm左右,下压荷载 $V=845$ N 的桩头水平位移为0.6 mm左右,即某一下压荷载范围内,相同水平荷载作用下,随着桩基承受的下压荷载增大,桩头水平位移也随着增大;当然这里也存在一个临界下压荷载 V_{cr}:当下压荷载大于临界荷载 V_{cr}时,桩头水平位移随着竖直荷载的增加而增加;当下压荷载小于临界荷载 V_{cr}时,桩头水平位移随着竖直荷载的增加而减小。

3.2　不同竖直荷载作用下桩身挠度曲线和桩身转角曲线及承载特性分析

试验时通过 2 个激光位移传感器测定桩基在水平、竖直组合荷载作用下桩头的水平位移,两激光位移传感器间距 $\Delta h=80$ mm,由试验数据得出下压荷载 $V=765,845$ N 时水平荷载和 $\tan\theta$ 关系曲线,如图 5 所示,其中,θ 为水平转角。

由图 5 可知,在水平荷载 $H=100$ N 时,下压荷载 $V=765$ N 的 $\tan\theta=0.006$,下压荷载 $V=845$ N 的水平转角 $\tan\theta\approx0.007\,5$,即在某一下压荷载范围内,桩基承受相同水平荷载作用下,桩基受到的下压荷载越大,桩头转角(桩身倾斜程度)越大;通过前面的研究成果可知,存在一个临界荷载 V_{cr},超过这个临界荷载时会呈现另一种变化趋势。

由采集到的试验前后的图片得出在不同下压荷载作用下桩基试验前后变形情况,如图 6 所示。由图 6 可知,试验结束后,下压荷载 $V=845$ N 的桩基

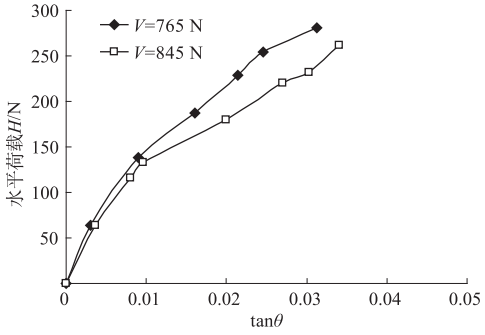
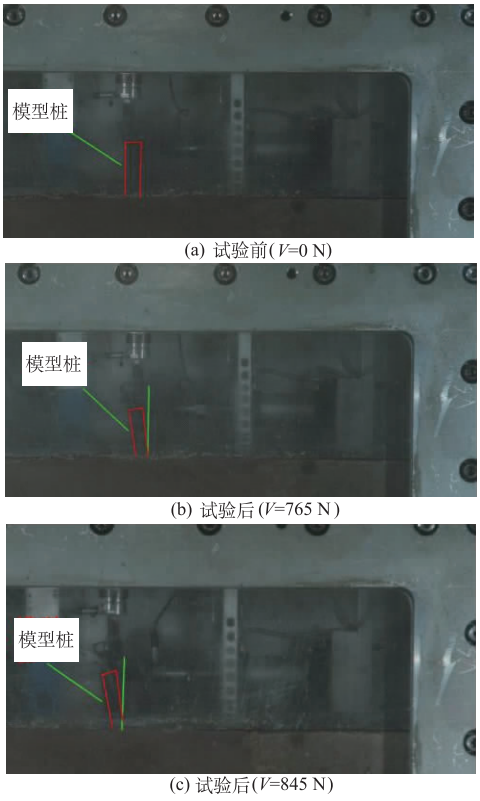


图 5　不同下压荷载作用下水平荷载和 tanθ 曲线

Fig. 5　Relationship between tanθ and horizontal load under different vertical loads



(a) 试验前(V=0 N)

(b) 试验后(V=765 N)

(c) 试验后(V=845 N)

图 6　不同下压荷载时桩基受水平荷载试验前后变化

Fig. 6　Variation of model pile deformation before and after centrifugal model test under different vertical loads

偏转倾斜程度要比下压荷载 $V=765$ N 的要大,这和桩基的水平荷载和桩头转角曲线中观察到的现象是一致的。

参照桩基工程手册有关桩基挠度的计算公式,得到桩基在相同水平荷载作用下,不同下压荷载作用时的挠度曲线如图 7 所示。

由桩基在 V 和 H 荷载组合作用下的桩身挠度曲线可知,下压荷载对桩身的挠度变形是有影响的。从图 7 中可看出,在某一下压荷载范围内,下压荷载越大,桩身对应的挠度变形也就越大,桩身的挠度变形随着下压荷载的增加而增加,这与图6中反映的

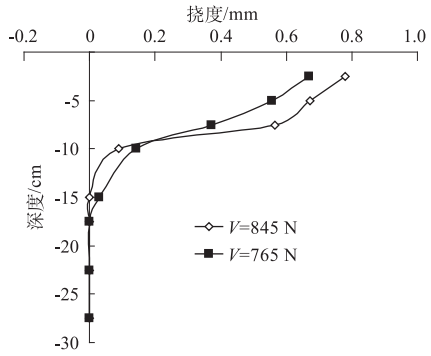


图 7 水平荷载 H = 184 N 时不同下压荷载作用下桩身挠度曲线

Fig. 7 Deflection curves of pile under different vertical loads when H = 184 N

桩基试验前后变化情况和 tanθ 曲线(图 5)中观察到的是一致的。综上所述,桩基的水平荷载 H 和下压荷载 V 是相互影响的,因此桩基设计过程中必须注意水平荷载 H 和下压荷载 V 的组合作用对桩基的变形的影响。

3.3 不同竖直荷载作用下桩身弯矩曲线及承载特性分析

由试验结束时采集到的桩身应变值,参照桩基标定的有关数值,即 1 N · m 的弯矩对应的应变为 101.8 με,得出桩基在下压荷载 V = 0,765,845 N 时,桩基在承受水平荷载 H = 184 N 时的弯矩变化曲线如图 8 所示。

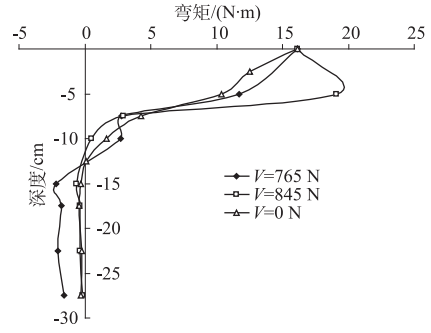


图 8 水平荷载 H = 184 N 时不同下压荷载作用下桩身弯矩变化曲线

Fig. 8 Curves of bending moment of pile under different vertical loads when H = 184 N

由桩身弯矩分布图可知,桩基只承受水平荷载时(V = 0 N),桩基弯矩分布曲线大致为从桩基顶部逐渐向下减小,弯矩 0 点位于地表以下12.5 cm处,之后随着深度的增加,桩身弯矩值大致不变;桩基承受下压荷载 V = 845 N 时,桩基弯矩曲线变化趋势大致为:弯矩值从桩顶处逐渐增大,大致在地表以下 5 cm处桩身弯矩达到最大值,之后桩基弯矩随着深度的增加又逐渐减小,弯矩 0 点位于地表以下 12.5 cm处,之后随着深度的增加桩身弯矩值大致相同,对比可知,桩基在承受水平荷载 H 时的弯矩变化趋势和桩基在承受水平荷载 H 和下压荷载 V 的组合作用时弯矩变化趋势是不一样的,从而反映了 2 种加载模式下桩基的承载特性是不同的。通过试验数据发现,竖直荷载 V = 845 N 时,桩基最大弯矩为19.08 N · m。

4 结 论

通过对水平、竖直组合荷载作用下桩基离心模型试验数据的分析,探讨桩基水平、竖直组合荷载作用下的承载特性,在某一下压荷载范围内,有如下结论:

(1) 在相同位移条件下,桩基施加的下压荷载越大,桩基的水平承载力越小,即桩基的水平承载力随着桩基施加下压荷载的增加而减小。

(2) 在相同水平荷载作用下,随着桩基承受的下压荷载增大,桩头水平位移也随着增大,即桩头水平位移随着施加的下压荷载值增大而增大。

(3) 桩基承受相同水平荷载作用下,桩基受到的下压荷载越大,桩头转角(桩身倾斜程度)越大。

(4) 桩基在承受水平、竖直组合荷载作用时,水平荷载 H 和下压荷载 V 是相互影响的,因此桩基设计过程中必须注意水平荷载 H 和下压荷载 V 的组合作用对桩基变形的影响。

参考文献:

[1] 郑 刚,王 丽. 竖向及水平荷载加载水平、顺序对单桩承载力的影响[J]. 岩土工程学报,2008,30(12):1796 - 1804. (ZHENG Gang, WANG Li. Effect of Loading Level and Sequence of Vertical and Lateral Loads on Bearing Capacity of Single Pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796 - 1804. (in Chinese))

[2] 郑 刚,王 丽. 成层土中倾斜荷载作用下桩承载力有限元分析[J]. 岩土力学,2009,30(3):680 - 687. (ZHENG Gang, WANG Li. Finite Element Analysis of Bearing Capacity of Pile under Inclined Load in Layered Soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(3): 680 - 687. (in Chinese))

[3] 赵明华,张天翔. 轴、横向荷载下桥梁基桩受力分析及实验研究[J]. 中南公路工程,2002,26(1):32 - 34. (ZHAO Ming-hua, ZHANG Tian-xiang. Study of the Behavior Analysis and Model Test of Bridge Piles under Simultaneous Axial and Lateral Loading[J]. Central South Highway Engineering, 2002, 26(1): 32 - 34. (in Chinese))

[4] CHARI T R, MEYERHOF G G. Ultimate Capacity of Rigid Single Piles under Inclined Loads in Sand[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1983, 20(4): 849 - 954.

(下转第 96 页)