

砂土地中组合荷载下单桩竖向承载特性研究

赵春风^{1,2}, 刘丰铭^{1,2}, 王卫中³, 赵程^{1,2}

(1. 同济大学 岩土及地下工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092;
3. 河南省交通规划勘察设计院有限责任公司, 河南 郑州 450052)

摘要: 考虑砂土地中单桩承受水平和弯矩荷载的共同影响, 完成了五组共十根单桩的室内模型试验, 分析了在组合荷载作用下砂土中单桩的竖向承载特性。研究表明: 在不考虑竖向荷载作用的情况下, 随着水平荷载作用点高度的增加, 由于出现了弯矩荷载, 单桩的水平极限承载力降低, 但降低幅度逐渐减小; 水平或弯矩荷载的增大, 均会导致单桩沉降的增大和竖向承载力的降低, 但只有当水平荷载达到相应位置水平极限承载力的 0.5 倍以上时, 这种变化幅度才较明显; 预先施加的水平和弯矩荷载在产生水平位移后, 再施加竖向荷载, 将会出现 $P-\Delta$ 效应, 造成单桩水平位移的增大和水平承载力的降低; 水平和弯矩荷载共同作用时对单桩的沉降和桩端阻力的影响程度, 与水平和弯矩荷载产生的桩顶水平位移的大小正相关。

关键词: 砂土地; 水平荷载; 弯矩荷载; 模型试验; 竖向承载特性

中图分类号: TU473.1

文献标志码: A

Model Tests on Vertical Bearing Behavior of Single Pile Under Combined Loads in Sandy Ground

ZHAO Chunfeng^{1,2}, LIU Fengming^{1,2}, WANG Weizhong³, ZHAO Cheng^{1,2}

(1. Key Laboratory of Geotechnical and Underground Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. Henan Provincial Communications Planning Survey & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Based on five groups of ten-pile indoor model test, considering the influence of lateral load size and its loading position, the vertical bearing capacity of the single pile under combined loads in sandy ground are studied. The results of model test show that without regard to vertical load, horizontal ultimate bearing capacity decreases of the single

pile with the height of the point of application by lateral load apart from the ground increases, while its magnitude is reduced gradually. The settlement of pile top increases and vertical bearing capacity decreases with the increases of the pre-applied lateral or moment loads of the single pile, and its effect on the magnitude is dependent on the lateral load. The vertical load produced a $P-\Delta$ effect when it was applied after the lateral and moment loads, which causes the horizontal displacement increases and the ultimate horizontal bearing capacity of the single pile decreases. The experiment data indicate that the horizontal displacement at the top of pile is positively associated with settling volume of single pile, tip resistance of pile.

Key words: sandy ground; lateral load; moment load; model test; vertical bearing behavior

随着桩基础在建设工程中的广泛应用, 基桩的实际受力状况越来越复杂, 经常受到水平、竖向和弯矩荷载(即组合荷载)的共同作用, 但在目前的桩基设计中^[1], 一般不考虑组合荷载的相互影响, 这对于一般房屋建筑工程中的基桩设计而言是合理的^[2]。然而, 对于处于复杂地质条件下的建筑物和构筑物(如修建在山坡顶面上的支档结构、高耸塔型构筑物、高架桥梁等), 以及需要承受较大风力和波浪力的近海工程和跨海大桥等建筑物, 其基桩不仅要承受垂直的竖向荷载, 还同时受到较大的水平和弯矩荷载的作用, 在考虑这些建筑物或构筑物的竖向承载特性时, 则不能忽略水平和弯矩荷载的影响。

目前, 国内外很多学者对水平、竖向和弯矩三种或其中任意两种荷载组合情况下的单桩承载特性做了大量的研究工作, 尚未得出完全一致的结论, 对两种以上荷载作用情况下单桩承载特性的认识仍不够

收稿日期: 2015-11-09

基金项目: 国家自然科学基金(41672265, 41272295, 41572262); 广东省交通运输厅科研项目([2012]1379号)

第一作者: 赵春风(1964—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为岩土工程的理论与应用。E-mail: tjzhchf@tongji.edu.cn.

通讯作者: 刘丰铭(1987—), 男, 博士生, 主要研究方向为桩基工程。E-mail: 168liufm@tongji.edu.cn.

深入. Meyerhof 和 Sastry^[3-5]通过一系列室内模型试验研究了砂土、黏土和成层土中偏心倾斜荷载作用下的桩侧土压力分布,并结合试验结果提出了不同土层的土压力分布假设,最后给出了基于这些假设的单桩极限承载力公式. Guo 等^[6]通过模型试验发现,桩顶竖向荷载的存在有利于减小上层土体横向运动引起的桩周土体反力、桩身最大弯矩和最大变形. S Karthigeyan 等^[7]利用三维有限元数值分析,发现竖向荷载的存在能提高砂土中单桩的水平承载力,至于具体提高的幅度则与荷载的施加顺序等有关. 赵明华等^[8-9]采用矩阵计算方法和改进的有限杆单元法,考虑 $P-\Delta$ 效应的影响,分别对单层土和成层土中倾斜偏心荷载作用下单桩的受力进行了分析,得出地面以上桩身自由段较长时,荷载偏心对倾斜荷载作用下单桩的承载特性影响较大,当埋深超过一定范围时,埋深对桩身内力及位移分布影响可忽略等结论. 周健等^[10]通过室内试验对砂土中桩顶自由的水平受荷短桩的承载特性进行了研究,结果表明刚性短桩地面以下约为桩身入土深度 80% 处存在一个近似固定的转动点,在该转动点偏上位置的桩侧土压力为零,但未考虑水平荷载作用点位置不同情况的影响. Liang 等^[11]通过积分方程法,分析了竖向荷载对单桩水平承载特性的影响,结果表明竖向荷载的存在对单桩水平承载力有降低作用. 郑刚等^[12]利用有限元方法对倾斜荷载作用下的单桩承载特性进行了分析,结果表明当荷载倾斜度不大时,荷载竖向分量的存在对单桩的水平承载力有提高作用. 笔者^[2, 13]也通过室内模型试验对砂土中竖向和弯矩荷载下单桩的水平承载特性,以及水平荷载和竖向荷载分别对单桩竖向和水平承载特性的影响进行了一系列的研究,得出预先施加竖向荷载对单桩的水平承载力有提高作用,预先施加水平荷载对单桩的竖向承载力有削弱作用等系列结论,这和 Guo 等的研究成果基本一致.

在上述相关研究的基础之上,结合课题组已有的研究成果和经验^[2, 13-14],本文利用自行研发的组合荷载下的加载装置,以砂土场地中单桩的竖向承载特性为研究对象,通过对工程实际中基桩的受力工况进行模拟,开展了相关室内模型试验研究. 研究成果可以加深对组合荷载下砂土中单桩竖向承载特性的认识,供相关科研人员使用时参考.

1 室内试验介绍

1.1 试验土样

依据相似理论的相关要求^[15],对于用砂土进行的室内模型试验,为保证其合理性,应主要控制配土的颗粒级配曲线与原型土体相似. 本次试验针对的原型土为某高架工程静荷载试桩地区的第⑤₂层砂土,厚度分布范围约 6.0~17.3m,颜色呈灰黄~褐黄,密实度为中密~密实,该砂土为全区分布的粉砂,砂质较纯,颗粒级配稍好,主要成分为长石、石英,次为云母碎片,见贝壳碎屑,局部含有钙质结核. 为达到配土要求,本次试验的砂土原料主要取自上海某工程的现场土料,辅以不同目数的铸造砂作为掺配材料. 如图 1 所示,根据对土体粒径筛分试验结果的分析,原型砂土和现有砂土大于 0.25 mm 和小于 0.005 mm 的粒径成份的含量都较少,因此,本次试验重点考虑了 0.05~0.1 mm(质量百分比约为 40%)和 0.1~0.25 mm(质量百分比约为 60%)两组粒径的配土.

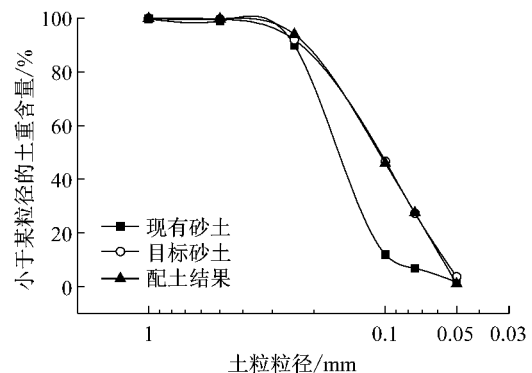


图 1 颗粒级配曲线对比

Fig. 1 Comparison of grain size distribution

为使试验模型土体分布均匀,将配备好的土体填入模型槽时应分层填入,每层厚度约 15 cm,然后从模型槽四周向中心用橡皮锤夯实. 填筑完成后静置 10 d 待土体达到稳定后,对配备的土体进行土工试验,得到模型砂土相关参数如表 1 所示.

表 1 模型试验砂土参数

Tab. 1 Sand parameters of model test

土样	重度 $r/(\text{KN} \cdot \text{m}^{-3})$	含水率 $\omega/\%$	孔隙比 e	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	压缩模量 $E_{\text{Si-2}}/\text{MPa}$
原型土	19.0	29.0	0.832	26.2	12.57
模型土	18.8	29.3	0.801	25.5	12.55

1.2 试验设备

试验是在同济大学岩土与地下工程教育部重点实验室内的大型模型槽里进行的,模型槽的长和高均为 3 m,宽为 2.1 m. 与模型槽配套的试验加载装置为课题组自行研发,如图 2 所示,其具体构造和加载原理可参考文献[2]相关介绍. 该加载装置的主要特点为:水平加载点位置可调节,以施加位于不同水平荷载作用点高度 e_0 的水平力,从而实现弯矩荷载的施加;可以通过调节竖向荷载的加载方向,使得在存在水平位移的情况下,保持竖向荷载作用方向在试验过程中不产生倾斜而始终保持竖直;可以实现对位于模型槽内任意一点桩体竖向和水平荷载的独立施加.

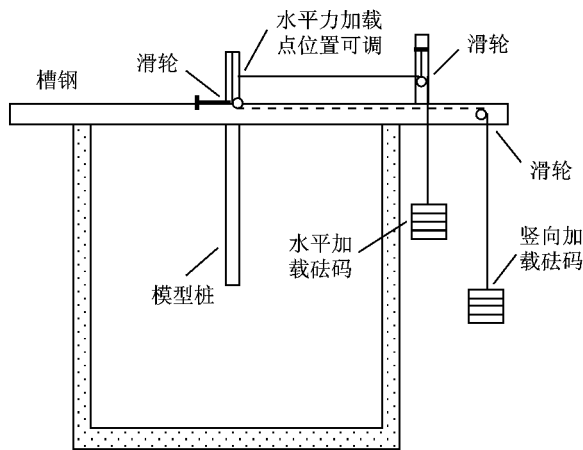


图 2 试验加载装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of test loading system

1.3 模型桩的布置

根据工程桩的长径比、室内试验的条件,并结合相似原理,综合确定试验模型桩的几何相似比约为 1/30,模型桩参数见表 2. 模型桩为 C20 细骨料混凝土预制,桩芯为边长 20 mm 的正方形铝管,模型桩具体制作方法以及应变片的设置详见文献[2],试验的模型桩长径比约为 32,为摩擦桩. 桩身共分布 7 组应变片(每组 2 片,测试结果取平均值),前 6 组应变片主要用于测试桩侧阻力,第 7 组位于桩端以上略大于 1 倍桩径处的应变片用于近似测试桩端阻力^[16].

表 2 模型桩参数

Tab.2 Parameters of model piles

桩径 d / mm	桩长 l / mm	桩的入土深度 l_0 /mm	弹性模量 E /MPa
46	1 750	1 450	21 000

对于在模型槽内进行单桩试验,需要考虑槽壁

对桩周土体约束的边界效应以及桩中心距 s_a 过小时相邻桩的挤土效应. 文献[17]认为当模型桩与模型槽壁间距在 $3d$ 以上时,边界效应较小,本次模型试验中设置的模型桩与槽壁的最小间距为 600 mm(约 $13d$),其尺寸可以使模型桩在试验中忽略边界效应的影响. 文献[18]认为对于超长桩,当桩中心距 s_a 达到 $10d$ 左右时可忽略群桩效应的影响,《建筑桩基技术规范》(JGJ 94-2008)^[1]将疏桩($s_a > 6d$ 的桩)等同于单桩考虑,本次模型试验中设置的最小桩中心距 s_a 为 541 mm(约 $12d$),可满足要求. 模型桩的平面布置如图 3 所示.

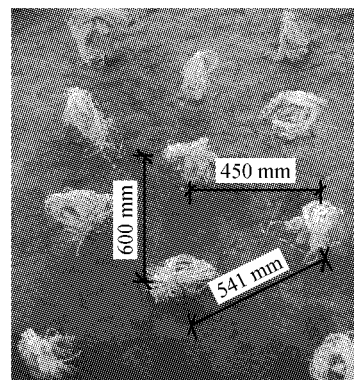


图 3 模型桩的平面布置

Fig.3 Plane layout of model pile

2 试验加载方案

试验加载时采用慢速维持荷载法,详见《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106-2014)^[16]相关规定. 具体加载方案见表 3,所用模型桩数量共 10 根,分为 5 组:第 1 组测试无竖向荷载作用,仅考虑水平和弯矩荷载(通过改变水平荷载作用点高度实现)作用时的水平极限承载力 $H_{u11}(e_0 = 0)$, $H_{u12}(e_0 = 10 \text{ cm})$ 和 $H_{u13}(e_0 = 20 \text{ cm})$;第 2 组测试纯竖向荷载作用时的单桩竖向极限承载力 Q_{u21} ;第 3 组测试水平荷载作用点高度均为 $e_0 = 0$,预先施加的水平荷载大小分别为 $H_{u11}/3$ 和 $H_{u11}/2$ 时的竖向极限承载力 Q_{u31} 和 Q_{u32} ;第 4 组测试水平荷载作用点高度均为 $e_0 = 10 \text{ cm}$,预先施加的水平荷载大小分别为 $H_{u12}/3$ 和 $H_{u12}/2$ 时的竖向极限承载力 Q_{u41} 和 Q_{u42} ;第 5 组测试水平荷载作用点高度均为 $e_0 = 20 \text{ cm}$,预先施加的水平荷载大小分别为 $H_{u13}/3$ 和 $H_{u13}/2$ 时的竖向极限承载力 Q_{u51} 和 Q_{u52} .

对于竖向荷载,根据《建筑基桩检测技术规范》(JGJ 106-2014)^[16]相关规定综合确定,取 $Q-s$ 曲线

发生明显陡降的起始点对应的荷载为单桩的竖向极限承载力. 对于水平荷载, 参考文献[19], 认为当地面处的桩体水平位移达到一定值时, 桩周局部土体产生塑性破坏, 即可终止加载, 本次模型试验取 $0.15d=6.9\text{ mm}$ 为容许最大水平位移值, 其对应的水平荷载即为单桩的水平极限承载力.

表 3 试验加载方案
Tab.3 Loading schemes

组号	编号	竖向荷载		水平荷载		e_0/cm
		荷载大小	荷载性质	荷载大小	荷载性质	
1	P11	0	恒定	H_{u11}	分步施加	0
	P12	0	恒定	H_{u12}	分步施加	10
	P13	0	恒定	H_{u13}	分步施加	20
2	P21	Q_{u21}	分步施加	0	恒定	0
3	P31	Q_{u31}	分步施加	$H_{u11}/3$	恒定	0
	P32	Q_{u32}	分步施加	$H_{u11}/2$	恒定	0
4	P41	Q_{u41}	分步施加	$H_{u12}/3$	恒定	10
	P42	Q_{u42}	分步施加	$H_{u12}/2$	恒定	10
5	P51	Q_{u51}	分步施加	$H_{u13}/3$	恒定	20
	P52	Q_{u52}	分步施加	$H_{u13}/2$	恒定	20

3 模型试验成果及分析

3.1 水平荷载作用点位置对单桩承载特性的影响分析

试验的弯矩荷载主要通过改变水平荷载作用点高度 e_0 的位置实现, 根据表 3 的试验加载方案, e_0 的取值分别为 0, 10 和 20 cm, 为研究预先施加的水平荷载对单桩竖向承载特性的影响, 水平荷载的取值标准为相同条件下无竖向荷载时的极限水平承载力的 1/3 和 1/2. 因此, 有必要先测试出在无竖向荷载作用时, e_0 分别为 0, 10 和 20 cm 情况下单桩的极限水平承载力(即表 3 中第 1 组试验成果).

图 4 为不考虑竖向荷载情况下, 在不同水平荷载作用位置时的单桩水平荷载 - 位移曲线. 图中水平点划线对应的水平位移为 $0.15d=6.9\text{ mm}$; 竖向点划线对应的水平荷载即为按照前文定义的模型桩 P11, P12 和 P13 的水平极限承载力 H_{u11} , H_{u12} 和 H_{u13} . 为了分析作用点高度 e_0 对水平承载力的影响, 将作用点位置进行量纲为一处理(即用水平荷载作用点高度 e_0 除以桩的入土深度 l_0 的百分数来量纲为一), 得出水平极限承载力与水平荷载作用点位置量化长度的关系如图 5 所示.

从图 4 与图 5 中可以看出: 在不考虑竖向荷载作用的情况下, 随着水平荷载作用点高度 e_0 的增加, 水平极限承载力减小. 这主要是因为随着 e_0 的增加, 作用在桩顶的弯矩也在增大, P11, P12 和 P13

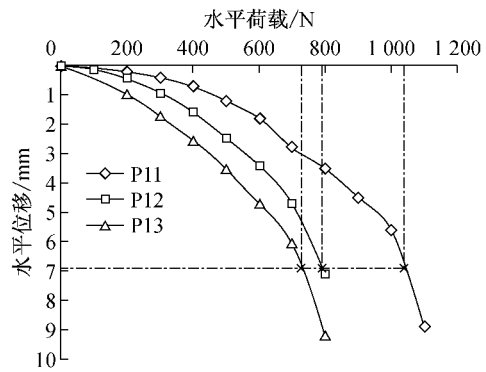


图 4 模型桩水平荷载-位移曲线

Fig.4 Lateral load-displacement curves of model piles

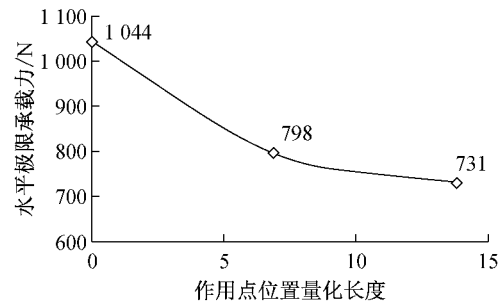


图 5 水平极限承载力随作用点位置量化长度变化曲线

Fig.5 Variation curve of ultimate lateral bearing capacity- length quantization

的水平极限承载力 H_{u11} , H_{u12} 和 H_{u13} 分别为 1 044, 798 和 731N, 所对应的弯矩分别为 0, 79.8 和 146.2 $\text{N}\cdot\text{m}$, 随着弯矩对桩顶水平位移贡献的增加, 在相同的容许最大水平位移值的限制下, 水平极限承载力自然会减小. 从图 4 中可知, 在相同的水平荷载作用下, 随着 e_0 的增加, 水平位移不断增大, 说明在工程中桩基设计时, 水平荷载作用点的确定对水平位移的影响较大, 为减小水平位移, 应该采取有效措施使水平荷载合力的作用点尽量降低. 从图 5 中可知, 随着作用点位置量化长度的增加, 水平极限承载力不断降低, 曲线最后趋于平缓. 说明随着 e_0 的增加, 水平极限承载力并不会持续降低, 而可能会趋于一个稳定值. 同样, 从图 4 中可以看出, 在相同的水平荷载作用下, 水平位移的增大幅度也在不断变小, 说明 e_0 的变化对水平极限承载力的影响主要集中在一定的范围内, 至于具体的影响范围大小, 则有待进一步的试验研究.

3.2 水平和弯矩荷载作用下的单桩沉降分析

图 6 为不同水平和弯矩荷载作用下单桩的竖向荷载 - 沉降曲线, 表 4 给出了各模型桩预先施加的水平和弯矩荷载组合情况, 以及特定竖向荷载作用下的沉降值.

图 6a 是模型桩 P21, P31 和 P32 的竖向荷载 - 沉降曲线图, 此三根模型桩的 $e_0 = 0$, 从图中可以看出: 桩顶无弯矩荷载作用时, 单桩的沉降随着水平荷载的增大而增大, 说明水平荷载的存在会增大单桩的沉降. 模型桩 P21 没有承受水平荷载, 模型桩 P31 和 P32 承受的水平荷载分别为 348 N 和 522 N, 从沉降曲线上看, P21 和 P31 几乎重合, P32 的沉降却有较大增幅, 三根模型桩的竖向极限承载力均为 3 300 N, 所对应的沉降分别为 1.15 mm, 1.21 mm 和 1.83 mm, P31 和 P32 相对于 P21 的沉降增量分别为 1.05 倍和 1.59 倍, 说明较小的水平荷载对单桩的沉降影响不大, 只有当水平荷载增大到一定程

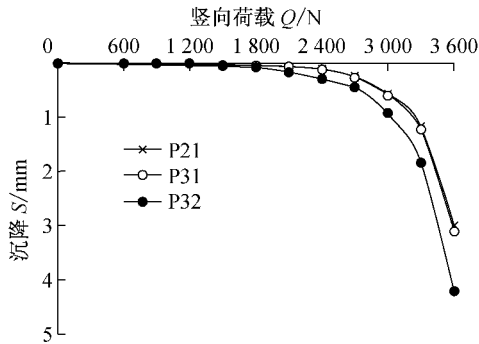
度, 其对单桩的沉降影响才会发挥. 本次试验结果表明, 在不考虑桩顶弯矩的情况下, 预先施加的水平荷载达到水平极限承载力的 0.5 倍时, 水平荷载对单桩的竖向沉降有较大影响.

图 6b 是模型桩 P41 和 P51 的竖向荷载 - 沉降曲线图, 从表 4 数据可知, 此两根桩预先施加的水平荷载均较小, 分别为 266 N 和 244 N, 均为所在位置水平极限承载力的 1/3, P51 所承受的弯矩荷载是 P41 的 1.8 倍, 在竖向荷载为 3 300 N 时, 对应的沉降 P51 较 P41 增加了约 1.2 倍, 说明弯矩荷载的存在也会增大单桩的沉降, 但在水平荷载较小时, 弯矩荷载对沉降的影响有限.

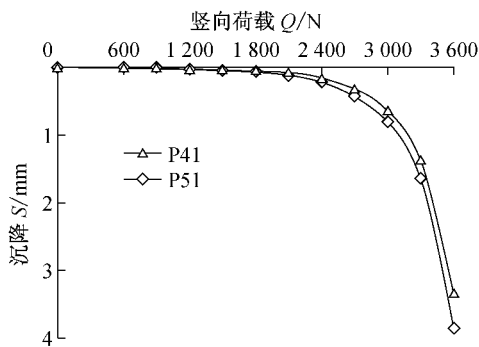
表 4 各模型桩水平和弯矩荷载组合情况以及相应沉降表
Tab.4 Lateral load, moment load and settlement of piles

桩号	P21	P31	P41	P51	P32	P42	P52
e_0/cm	0	0	10	20	0	10	20
H/N	0	348	266	244	522	399	366
$M/N \cdot m$	0	0	26.6	48.8	0	39.9	73.2
S_1/mm	0.56	0.59	0.64	0.81	0.91	1.11	1.55
S_2/mm	1.15	1.21	1.38	1.63	1.83	2.35	6.38

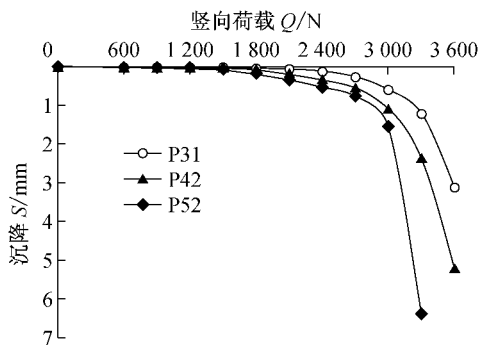
注: H 为水平荷载; M 为桩顶弯矩; S_1 为竖向荷载为 3 000 N 时对应的沉降; S_2 为竖向荷载为 3 300 N 时对应的沉降.



a



b



c

图 6 水平和弯矩荷载恒定下的模型桩竖向荷载-沉降曲线
Fig.6 Vertical load-settlement curves of model piles under the same lateral and moment load

图 6c 是模型桩 P31, P42 和 P52 的竖向荷载 - 沉降曲线图, 从表 4 数据可知, 此三根桩预先施加的水平荷载均较大, 分别为 348, 399 和 366 N, 其中模型桩 P42 和 P52 所预先施加的水平荷载均为相应位置水平极限承载力的 0.5 倍, 三根模型桩所受的弯矩荷载分别为 0, 39.9 和 73.2 N · m. 从图中可以看出, 三者的沉降曲线差别较大, 且 P31 和 P42 的竖向极限承载力均为 3 300 N, 但 P52 降低至 3 000 N, 降低幅度达 9.1%. 说明当水平荷载较大时, 弯矩荷载对单桩沉降的影响显著.

综合分析图 6 中所有单桩的竖向荷载 - 沉降曲线以及表 4 中给出的相关数据, 可知在相同竖向荷载作用下, 模型桩 P21, P31, P41, P51, P32, P42 和 P52 的沉降依次增大, 但以上模型桩预先施加的水平荷载或弯矩荷载的大小均不与沉降量大小成对应比例关系, 而是存在一个组合关系, 即弯矩荷载对单桩竖向承载特性的影响程度受到水平荷载大小的影响, 只有当水平荷载较大时 (试验结果表明水平荷载应达到相应位置水平极限承载力的 0.5 倍), 弯矩荷载的影响才能较为明显的发挥. 若考虑前文分析结果, 随着 e_0 的增加, 产生的桩顶弯矩荷载增大, 但水平极限承载力会减小, 则说明在预先施加水平和弯矩荷载共同作用下, 对单桩的沉降影响较为复杂, 水

平和弯矩荷载对单桩竖向承载特性的影响存在组合效应,本次试验结果表明在模型桩 P52 的组合荷载下,对单桩的竖向承载力削弱最为明显.

3.3 预先施加水平和弯矩荷载作用时竖向荷载对水平位移影响的试验成果及分析

图 7 为在预先施加不同的水平和弯矩荷载情况下,单桩的竖向荷载-水平位移变化曲线,图 8 为按照在相同竖向荷载下沉降量递增关系给出的各模型桩的初始状态和极限状态时的水平位移对比图,表 5 则具体给出了图 8 中的水平位移数值以及增幅.为了数据具有对比性,模型桩 P52 的极限状态水平位移取竖向荷载为 3 300N 时的水平位移.

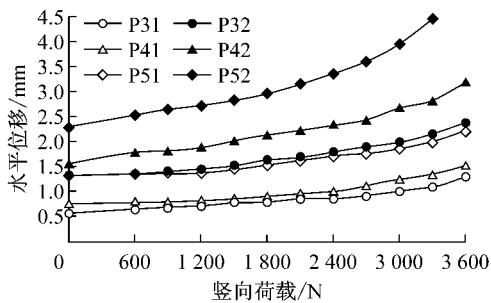


图 7 水平和弯矩荷载恒定下模型桩竖向荷载-水平位移曲线

Fig. 7 Vertical load-horizontal displacement curves of model piles under the same lateral and moment load

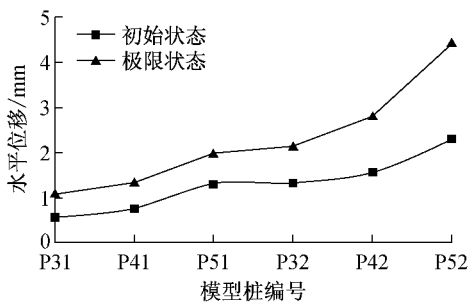


图 8 不同模型桩水平位移对比图

Fig. 8 Horizontal displacement of model piles

表 5 水平和弯矩荷载恒定下模型桩水平位移表

Tab. 5 Horizontal displacement of model piles under the same lateral and moment load

桩号	P31	P41	P51	P32	P42	P52
h_0 /mm	0.570	0.760	1.310	1.332	1.570	2.300
h_u /mm	1.100	1.345	1.996	2.156	2.818	4.450
增幅/%	93.0	77.0	52.4	61.9	79.5	93.5

注: h_0 为未施加竖向荷载时的初始水平位移; h_u 为竖向荷载达到极限状态(3 300N)时的水平位移.

从图表中可以看出:对于已经产生水平位移的

单桩来讲,竖向荷载的施加导致桩体产生附加水平位移,即 $P-\Delta$ 效应^[13].本次试验中,在预先施加一定的水平和弯矩荷载作用时,基桩产生了一定的水平位移,之后随着竖向荷载的逐渐施加, $P-\Delta$ 效应开始发挥,促使水平位移进一步发展.与此同时,水平位移的增大,使得单桩在较小的水平荷载作用下就能达到水平位移容许值,反过来又降低了单桩的水平极限承载力.表明基桩在承受组合荷载的情况下,当基桩产生的水平位移达到一定值时,作用在基桩上的竖向荷载将促使这种水平位移持续增大,对基桩的竖向和水平承载力都会产生很大的削弱.这对于四周承受不均匀土压力的基桩,如边坡附近的基桩、近海工程的基桩以及在基桩附近进行土方开挖等工程活动时尤其需要注意.从基桩水平位移的变化规律上看,对于桩顶有无弯矩荷载作用的比较,模型桩 P52 预先施加的水平荷载是 P31 的 1.05 倍,但初始和极限水平位移前者均约为后者的 4.04 倍,说明弯矩荷载的存在会极大地增加单桩水平位移;对于作用不同弯矩荷载大小的比较,模型桩 P51 预先施加的水平荷载是 P41 的 0.92 倍,二者较为接近,而弯矩前者是后者的 1.83 倍,对应的初始和极限水平位移前者分别是后者的 1.72 倍和 1.48 倍,水平位移的增幅减小,对比模型桩 P52 和 P42 的相关数据,也可得出类似规律.说明在较大的弯矩荷载作用下,单桩的初始水平位移已经较大,所产生的桩侧土体抗力也较大,此时竖向荷载对基桩水平位移的增大作用将降低. P52 模型桩的竖向极限承载力较其它模型桩小,但水平位移却较大,说明较大的水平和弯矩荷载在产生较大的水平位移后,也促使竖向荷载产生较显著的 $P-\Delta$ 效应,在削弱竖向承载力的同时,也使得单桩的水平承载力降低.注意到图 8 所显示的初始和极限状态水平位移,其变化规律按模型桩 P31, P41, P51, P32, P42 和 P52 的顺序依次增大,而由前文分析知,在相同的竖向荷载作用下,上述模型桩的沉降也依次增大,说明水平和弯矩荷载共同作用时对单桩沉降的影响程度是和其产生的水平位移正相关的.

3.4 水平和弯矩荷载对桩身轴力、桩侧阻力和桩端阻力的影响试验成果及分析

图 9 为竖向荷载在 3 000N 时各模型桩的桩身轴力分布图,图 10 为根据桩身轴力计算的桩侧摩阻力分布图.

从图 9 可以看出:模型桩的桩身轴力分布曲线类似,说明水平和弯矩荷载对桩身轴力的传递影响

不大. 在同一桩身埋深下, 桩身轴力基本按照模型桩 P21, P31, P41, P51, P32, P42 和 P52 的顺序依次增大, 这和桩顶水平位移和沉降变化规律相一致. 主要原因是桩身轴力是根据桩身应变算出的, 而桩身应变和沉降是正相关的, 所以桩身轴力的变化规律与沉降相一致.

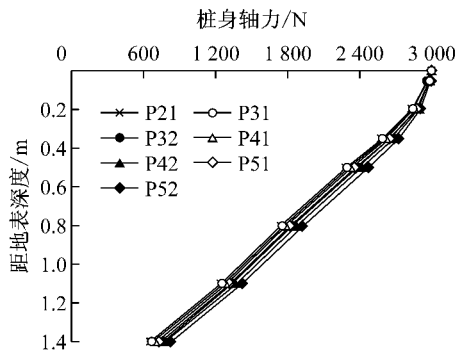


图 9 竖向荷载为 3 000N 时的桩身轴力分布图
Fig. 9 Axial forces of model piles under 3 000N vertical load

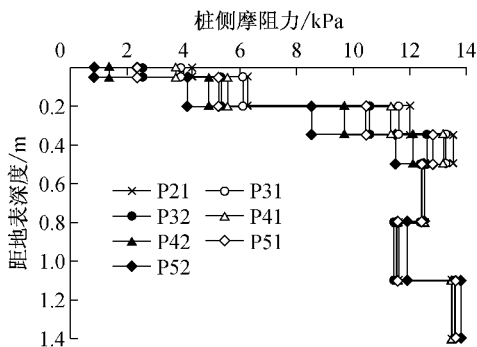


图 10 竖向荷载为 3 000N 时的桩侧摩阻力沿桩身分布
Fig. 10 Distribution of pile side resistance along model pile shaft under 3 000N vertical load

从图 10 可以看出: 预先施加水平和弯矩荷载, 对桩身上部的桩侧阻力有较大的影响. 图中显示在桩身埋深小于 0.50 m 时, 桩侧阻力差别较大; 而当桩身埋深大于 0.50 m 时, 7 根模型桩的桩侧摩阻力几乎不再有明显变化, 说明水平和弯矩荷载对单桩桩侧摩阻力的影响具有一定的深度范围, 主要集中在地面以下 10 倍桩径范围以内. 注意到在桩身埋深小于 0.50 m 时, 桩侧阻力基本按照模型桩 P21, P31, P41, P51, P32, P42 和 P52 的顺序依次减小, 这主要是因为上述模型桩的桩顶位移依次增大, 减小了桩土间的接触面积, 从而减小了桩侧阻力. 注意到模型桩 P52 在埋深小于 0.50 m 时的桩侧阻力最小, 而在埋深大于 0.50 m 时反而变得最大, 这主要是因为当竖向荷载为 3 000N 时, 模型桩 P52 已经达到极

限竖向承载力, 桩身下部的侧阻力已经充分发挥. 单就水平荷载对桩侧阻力的影响分析, 比较模型桩 P21, P31 和 P32 的数据, 三者预先施加的水平荷载分别为 0, 348N 和 522N, P32 的水平荷载为 P31 的 1.5 倍, 在地面以下 0.20~0.35 m 范围内, 桩侧摩阻力 P31 较 P21 减少 3.46%, P32 较 P31 减少 9.16%, 说明随着水平荷载的增大, 桩侧摩阻力减小幅度增大. 就弯矩荷载对桩侧阻力的影响分析, 比较模型桩 P41 和 P51, P42 和 P52 的数据, 这两组模型桩的水平荷载接近而弯矩荷载相差较大, 在地面以下 0.20~0.35 m 范围内, P51 较 P41 减小了 7.76%, P52 较 P42 减小了 12.38%. 说明弯矩的增大也会导致桩侧阻力的减小. 若考虑水平和弯矩荷载共同作用对桩侧阻力的影响, 则可以桩顶位移为量化指标.

图 11 为在不同水平和弯矩荷载作用下, 桩端阻力随竖向荷载变化曲线; 图 12 是从图 11 中提取的竖向荷载为 3 000N 时, 各模型桩的桩端阻力对比.

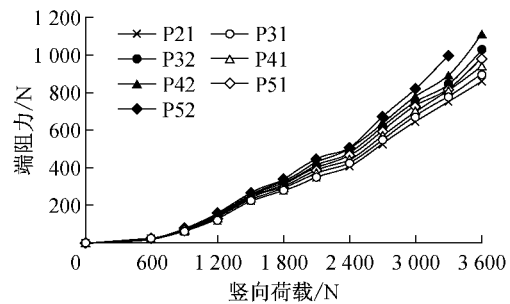


图 11 模型桩端阻力-竖向荷载变化曲线
Fig. 11 Pile end resistance-vertical load curves of model piles

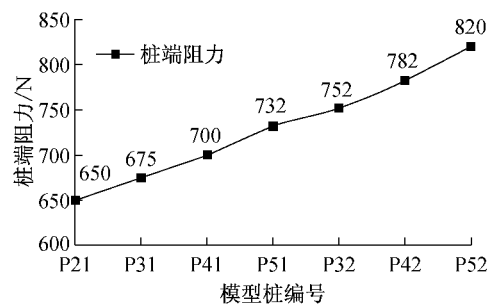


图 12 竖向荷载为 3 000N 时各模型桩桩端阻力
Fig. 12 Pile end resistance of model piles under 3 000N vertical load

由图 11 和图 12 可知: 当竖向荷载在 0~1 500N 范围内变化时, 7 根模型桩的桩端阻力曲线近乎重合, 说明在较小的竖向荷载作用下, 水平和弯矩荷载尚未对桩端阻力产生有效的影响. 当竖向荷载大于 1

500N 时,各模型桩桩端阻力曲线开始分离,且随着竖向荷载的增大,这种分离趋势越明显,说明水平和弯矩荷载对桩端阻力影响的发挥是和竖向荷载大小相关的.在整个竖向荷载施加的过程中,桩端阻力近乎成双曲线发展,表明在竖向荷载加载后期,桩端阻力也并未达到极限值.赵春风等^[20]研究了竖向荷载下大直径深长钻孔灌注桩在分层土中的荷载传递规律,指出桩侧、桩端阻力非同步发挥且相互影响,同时上下层侧阻力亦先后发挥至极限.就本次试验而言,对于纯竖向受荷模型桩 P21,其竖向极限承载力为 3 300N,此时的桩端阻力为 750N,桩端阻力承担的竖向荷载约占 25%,为典型的摩擦型桩.水平和弯矩荷载的存在虽然导致桩身上部侧摩阻力减小,使竖向荷载向下传递,最终导致桩端阻力的增加,但桩端阻力仍未充分发挥.比较分析图 12 中的数据,可知在相同竖向荷载条件下,预先施加了水平和弯矩荷载的模型桩,其桩端阻力较纯竖向受荷桩 P21 大;在水平荷载作用点位置相同的条件下,水平荷载越大,桩端阻力越大,如图 12 所示,P32 端阻力较 P31 增加 11.4%,P42 较 P41 增加 11.7%,P52 较 P51 增加 12.0%.可见水平和弯矩荷载的施加使得桩端分担了更多的竖向荷载.注意到图 12 中桩端阻力的增大顺序与图 8 中水平位移的增大顺序一致,说明水平和弯矩荷载组合情况下对桩端阻力的影响幅度也与桩顶水平位移正相关.

4 结论与展望

通过室内模型试验,分析了砂土中组合荷载下的单桩承载特性.主要研究结论和展望如下:

(1) 在不考虑竖向荷载作用的情况下,随着水平荷载作用点高度的增加,由于出现了弯矩荷载,单桩的水平极限承载力将会降低,但降低幅度逐渐减小.通过将作用点位置进行量纲为一处理后发现,随着作用点位置量化长度的增加,单桩水平极限承载力逐渐降低且有趋于稳定的趋势,今后应加强关于水平荷载作用点位置对承载力影响的相关研究.

(2) 水平或弯矩荷载的增大,均会导致单桩沉降的增大,进而导致单桩的竖向极限承载力降低.水平和弯矩荷载对单桩竖向承载特性的影响程度与相应水平荷载大小相关,当水平荷载达到相应位置水平极限承载力的 0.5 倍时,这种影响才会显著发挥.

(3) 预先施加的水平和弯矩荷载在产生水平位移后,再施加竖向荷载,会出现 $P-\Delta$ 效应,造成单桩

水平位移的增大和水平承载力的降低.水平和弯矩荷载共同作用时对单桩沉降的影响程度和其产生的水平位移正相关.

(4) 水平和弯矩荷载的存在对地面以下 10 倍桩径范围内的桩侧阻力分布有显著影响,该范围内的桩侧阻力随着桩顶位移的增大而减小.水平和弯矩荷载对桩端阻力的影响幅度,与其产生的桩顶水平位移大小正相关.

水平和弯矩荷载共同作用下,对单桩的竖向承载特性的影响存在组合效应,这种组合效应的影响程度可以通过桩顶水平位移的大小来判断,且二者正相关.但对于组合荷载下,水平和弯矩荷载对水平位移的贡献程度以及如何用定量化的指标来衡量,则需要进一步的理论和试验研究.

参考文献:

- [1] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 94-2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 94-2008 Technical code for building pile foundations [S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2008.
- [2] 赵春风, 刘丰铭, 邱志雄, 等. 砂土中竖向和水平荷载共同作用下的单桩承载特性研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 183.
ZHAO Chunfeng, LIU Fengming, QIU Zhixiong, *et al.* Study on bearing behavior of a single pile under combined vertical and lateral loads in sand [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 183.
- [3] Sastry V V R N, Meyerhof G G. Behaviour of flexible piles in layered sands under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1994, 31(4): 513.
- [4] Sastry V V R N, Meyerhof G G. Behaviour of flexible piles in layered clays under eccentric and inclined loads[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1995, 32(3): 387.
- [5] Sastry V V R N, Meyerhof G G. Flexible piles in layered soil under eccentric and inclined loads[J]. Soils and Foundations, 1999, 39(1): 11.
- [6] GUO W D, GHEE E H. Behavior of axially loaded pile groups subjected to lateral soil movement [C]//Foundation Analysis and Design: Innovative Methods-Proceedings of Sessions of GeoShanghai 2006. Shanghai: [s. n.], 2006: 174-181.
- [7] Karthigeyan S, Ramakrishna V V G S T, Rajagopal K. Influence of vertical load on the lateral response of piles in sand [J]. Computers and Geotechnics, 2006, 33(2): 121.
- [8] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下单桩计算分析[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 670.
ZHAO Minghua, LI Weizhe, YANG Minghui, *et al.* Analysis of single piles under eccentric and inclined loads in layered soils [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 670.
- [9] 赵明华, 李微哲, 单远铭, 等. 成层地基中倾斜荷载桩改进有

- 限杆单元法研究[J]. 工程力学, 2008, 25(5): 79.
ZHAO Minghua, LI Weizhe, SHAN Yuanming, *et al.* Behavior analysis of piles in layered clays under eccentric and inclined loads by improved finite pole element method[J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(5): 79.
- [10] 周健, 张刚, 曾庆有. 主动侧向受荷桩模型试验与颗粒流数值模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(5): 650.
ZHOU Jian, ZHANG Gang, ZENG Qingyou. Model tests and PFC2D numerical analysis of active laterally loaded piles[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2007, 29(5): 650.
- [11] Liang F Y, Chen H B, Chen S L. Influences of axial load on the lateral response of single pile with integral equation method [J]. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2012, 36(16): 1831.
- [12] 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.
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.
- [13] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 砂土中竖向和弯矩荷载下单桩水平承载特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(1): 184.
ZHAO Chunfeng, WANG Weizhong, ZHAO Cheng, *et al.* Lateral bearing capacity of single piles under vertical and moment load in sand[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(1): 184.
- [14] 赵春风, 刘丰铭, 杨砚宗, 等. 砂土中泥浆循环时间对单桩竖向承载特性的影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 3323.
ZHAO Chunfeng, LIU Fengming, YANG Yanzong, *et al.* Study of bearing capacity of a single pile in sand considering the mud cycle time[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 3323.
- [15] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
YANG Junjie. *Similarity theory and structural model test*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2005.
- [16] 中华人民共和国行业标准编写组. JGJ 106-2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
The Professional Standards Compilation Group of People's Republic of China. JGJ 106-2014 Technical code for testing of building founding piles[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 2014.
- [17] 孔纲强, 杨庆, 郑鹏一, 等. 考虑时间效应的群桩负摩阻力模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(12): 1913.
KONG Gangqiang, YANG Qing, ZHENG Pengyi, *et al.* Model tests on negative skin friction for pile groups considering time effect [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2009, 31(12): 1913.
- [18] 戴国亮, 戴永兴, 刘云忠, 等. 超长钻孔灌注桩群桩效应系数研究[J]. 土木工程学报, 2011, 44(10): 107.
DAI Guoliang, DAI Yongxing, LIU Yunzhong, *et al.* Study of pile group effect coefficient for super-long bored piles [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(10): 107.
- [19] 赵明华, 李微哲, 杨明辉, 等. 成层地基中倾斜偏心荷载下基桩位移特性室内模型试验研究[J]. 土木工程学报, 2006, 39(12): 95.
ZHAO Minghua, LI Weizhe, YANG Minghui, *et al.* A model test study on displacement of piles under inclined and eccentric loads in layered soils [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(12): 95.
- [20] 赵春风, 鲁嘉, 孙其超, 等. 大直径深长钻孔灌注桩分层荷载传递特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(5): 1020.
ZHAO Chunfeng, LU Jia, SUN Qichao, *et al.* Experimental study of load transmission property of large-diameter bored cast-in-situ deep and long pile in different soil layers [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(5): 1020.