

均质砂土地基中竖向力 - 水平力 - 桩顶扭矩共同作用下单桩承载特性试验研究

郭沛翰, 邹新军

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 为探讨单桩在竖向力(V)、水平力(H)与桩顶扭矩(T)共同作用下的承载特性, 基于自行设计的 $V-H-T$ 组合加载装置, 完成一系列室内单桩载荷模型试验, 获得 $V-H-T$ 共同作用时的桩身内力变形曲线, 以及 3 个荷载分量对桩身承载力的相互影响曲线和桩身承载力包络线, 并通过无量纲化处理与拟合, 得到相应的桩身承载力计算公式。试验结果表明: 相比于纯受扭桩的桩身扭转极限承载力(T_u), H 和 V 的作用将导致桩身扭转承载力降低, 如在 $0.6V_u$ (桩身竖向极限承载力) - $0.6H_u$ (桩身水平极限承载力)组合下桩身极限扭矩减幅达 66%; $V-H-T$ 组合作用时, 预先施加的 V 削弱了桩身扭转承载力, 但同时有利于提高桩身水平力, 而 H 对于桩身竖向承载力的影响可忽略不计; 另外, 3 个荷载分量间存在复杂耦合关系, 随 T 增大, 桩身水平和竖向位移均会有所增加, 说明桩侧摩阻力与水平抗力存在相互影响, 因此, 在工程设计中不能简单地基于叠加原理来评估组合载荷作用下桩身承载能力。

关键词: 桩基础; 砂土地基; 竖向力 - 水平力 - 桩顶扭矩($V-H-T$)共同作用; 模型试验; 承载力包络线

中图分类号: TU 470

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2018)11 - 2593 - 08

Bearing capacity of a single pile in sand under combined vertical force-horizontal force-torque load

GUO Peihan, ZOU Xinjun

(College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: In order to study the bearing behavior of a single pile in sand under combined loads of vertical force V , horizontal force H and torque T , a special device for combined loads was designed and a series of model tests were carried out. The internal force-deformation under combined loads and the interaction curves of three loading components on the bearing capacity were obtained. The envelope of pile bearing capacity was obtained, and a simplified formula of the bearing capacity was given through dimensionless treatment and fitting. The results show that the effect of V and H leads to the reduction of torsional bearing capacity of the pile, for instance, the torsional bearing capacity is reduced by 66% under the combination of $0.6V_u-0.6H_u$, compared with the ultimate torsional bearing capacity of pile shaft under pure T (T_u). Under combined loads, the pre-applied vertical load weakens the torsional bearing capacity of single pile, but improves the horizontal bearing capacity. However, the influence of H on the vertical bearing capacity can be neglected. There is a complex coupled relationship between the load components. The horizontal and vertical displacements of a pile increase with the increasing of T . The friction resistance and the horizontal reaction of piles interact, so the bearing capacity of composite pile cannot be evaluated simply based on the principle of superposition.

Key words: pile foundations; sand subsoil; vertical force-horizontal force-torque($V-H-T$) combined loads; model test; envelope of bearing capacity

收稿日期: 2018 - 07 - 17; **修回日期:** 2018 - 08 - 24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51578231, 51378197)

Supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant Nos. 51578231 and 51378197)

作者简介: 郭沛翰(1993 -), 男, 2015 年毕业于湖南大学土木工程专业, 现为硕士研究生, 主要从事桩基础方面的研究工作。E-mail: abcd6610292@hnu.edu.cn。通讯作者: 邹新军(1975 -), 男, 博士, 现任副教授。E-mail: xjzouhd@hnu.edu.cn

DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2018.0857

1 引言

近年来,随着我国近海资源的持续性开发,桩基础在跨海大桥、海上发电机组等工程中得到越来越广泛应用。由于环境的复杂性,桩的实际受力状况也十分复杂,其经常受到上部结构传递的竖向荷载(V),以及风、波浪、潮汐等产生的水平荷载(H)和扭矩荷载(T)。对于这类桩基,目前工程中尚只能基于小变形迭加原理进行设计计算,没有考虑组合作用各荷载分量间的相互影响,这使得难以准确评估桩身承载力甚至导致设计偏于危险。因此,加强 $V-H-T$ 组合受荷桩承载特性的研究对工程应用具有很高的指导意义。

目前,一些学者对竖向力(V)和水平力(H)两种荷载共同作用下的桩基承载特性做了大量工作,但尚未得出完全一致的结论,如皇甫明等^[1-2]研究了 $V-H$ 组合作用下的单桩承载机制,认为竖向荷载将削弱单桩水平承载力。但郑刚等^[3-4]分别通过有限元和模型试验得出竖向荷载分量的存在对单桩的水平承载力有提高作用。包含扭矩荷载(T)的组合受荷桩也有学者做了研究工作,如M. Georgiadis和S. Saflekou^[5]通过理论分析和在软黏土中进行的轴向和扭转荷载组合模型试验,发现施加在桩头的扭矩会显著影响桩身沉降和轴向承载力,证实了 $V-T$ 的相互耦合作用。Z. H. Hu等^[6]基于离心机试验发现了扭矩可导致桩身水平承载力下降30%~50%。L. M. Zhang和L. G. Kong^[7]认为,扭矩荷载会使桩基承载力降低,更容易遭到失稳破坏,并提出了一种砂土地基中单桩受扭破坏准则。L. G. Kong等^[8-9]基于群桩受扭试验发现水平力对桩身抗扭性能有所提高,并据此提出了耦合因子 β 来描述此种耦合作用。邹新军等^[10-12]先后探讨了桩基受 T 、 $V-T$ 以及 $H-M-T$ 等不同荷载组合下的内力变形问题进而求得桩身内力位移解答,并基于此获得了桩身承载力包络图。此外邹新军等^[13]还通过室内模型试验研究了砂土地基中不同大小及加载顺序对 $H-T$ 联合受荷桩承载特性的影响规律。但截至目前,考虑3个力及以上的组合受荷桩研究大多基于数值模拟,现场或室内模型试验仍较鲜见。

鉴于此,本文根据组合荷载特点,自行设计制作出一套组合加载设备,可按特定顺序分别在桩顶施加竖向力(V)、水平力(H)及扭矩(T)。通过一系列的室内模型单桩组合加载试验,获得了 $V-H-T$ 共同作用下的桩身内力位移,据此研究地面处桩身水平

位移、桩顶沉降及扭转角等变形特性,及3个荷载分量对桩身承载力的相互影响曲线。此外,通过组合受荷桩的破坏形态分析了桩基破坏机制。最后,经过无量纲化处理与曲线拟合,得到了 $V-H-T$ 共同作用下的桩身承载力包络线与相应的桩身承载力简化计算公式,可供工程应用参考。

2 模型试验设计

2.1 桩土材料参数

(1) 模型桩制作

针对海上风电机组直径为1.6 m,埋深30 m的传统长桩基础,选取比尺为1:34.4,最终确定模型试验中所用单桩基础外径 $D = 46.5$ mm,内径 $d = 44.5$ mm,长1 000 mm,入土深度 $L = 880$ mm。整个模型桩桩体由Q235型钢管制成,泊松比为0.3。沿桩身等间隔100 mm黏贴BF350-3AA型和BF350-3HA型应变片分别监测桩身弯拉应变和剪切应变,共9个截面。应变片通过AB胶黏附和保护,并从桩顶侧面打孔处引出其导线。为改善桩侧摩阻力^[14],将试验用砂均匀裹于桩身表面。同时,为了方便桩身固定和防止土体堵塞进入空心模型管桩中,在桩底黏结一个半球形的铝合金盖。

(2) 砂土参数

为模拟海洋地基土质环境,本试验用砂以我国南海海底中细砂土层为参考,根据相似理论原则,自行配置的土样粒径级配曲线如图1所示。将试验用砂分层填入模型箱并压实,静置10 d后进行土工试验,所得土体的物理、力学参数见表1。

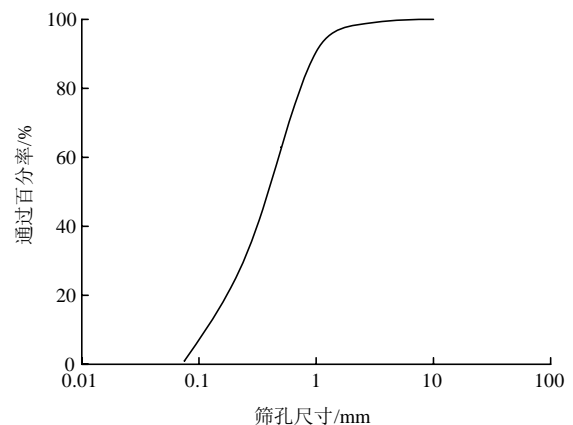


图1 级配曲线

Fig.1 Gradation curve

2.2 试验装置

(1) 模型箱及模型桩的布置

表 1 砂土参数

Table 1 Summary of properties of sand

相对密度 G_s	最大干密度 $\rho_{dmax}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	最小干密度 $\rho_{dmin}/$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	相对密实度 $D_r/\%$	内摩擦角 $\varphi(^{\circ})$
2.65	1 766	1 492	65	34.5

本次模型试验的砂箱尺寸为：长 1 500 mm×宽 1 500 mm×高 1 300 mm，模型桩的剖面布置如图 2 所示。当荷载施加到桩身后，会对桩周土地产生挤压作用，影响范围在 $7D$ 左右^[15]。本试验为消除相互影响及边界效应，模型桩的间距及与箱壁距离均大于 $10D$ 。

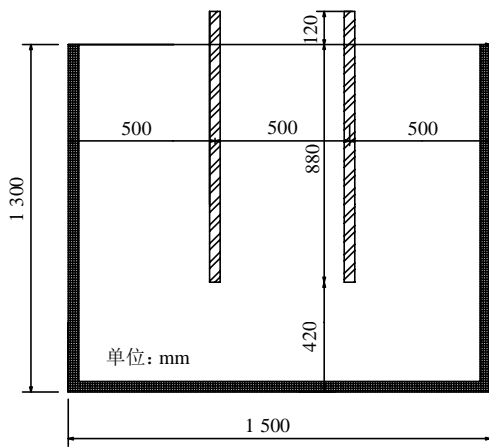


图 2 模型桩剖面布置图

Fig.2 Layout of model piles

(2) 砂土填筑和模型桩安装

砂土填筑分成 6 层，底部层厚 300 mm，其余每层厚 200 mm，各层相对密实度均控制为 65%。为达到要求密实度，首先计算每层填土的密度和所需质量，然后于每层均匀地填充砂土，最后用木板锤夯实。各组试验实际各层的相对密实度与所要求的相对密实度均只相差 2%(63%~67%)，表明制备的砂土地基相对均匀，确保了试验的可重复性和一致性。

模型桩安装采用预埋方式，填筑过程中先将砂土填至桩底，用特定装置将模型桩临时固定于预定位置，然后继续填砂直至达到预定高度。此过程中，确保桩身保持垂直。

(3) 加载与测试装置

为实现桩顶 $V-H-T$ 的共同作用，设计制作了一个桩顶组合加载构件，其主要由转盘和球铰组成。通过此构件连接桩身和加载装置，以保证 3 个力同时作用于桩顶，且当桩身发生沉降和偏移时，水平

和竖向荷载的加载方向恒定不变且彼此垂直。

其中，竖向和横向加载采用气动加载方式，该装置包括气泵、调压阀、气压表、气缸等。当桩身发生偏移后为保持 V 和 H 的相互关系，通过螺栓将加载气缸固定在可滑动导轨上，以实现竖向与水平荷载的施加方向始终保持不变。扭矩荷载通过桩顶转盘施加，使得力的方向始终与转盘相切，以保证扭矩力臂始终保持不变(见图 3)。

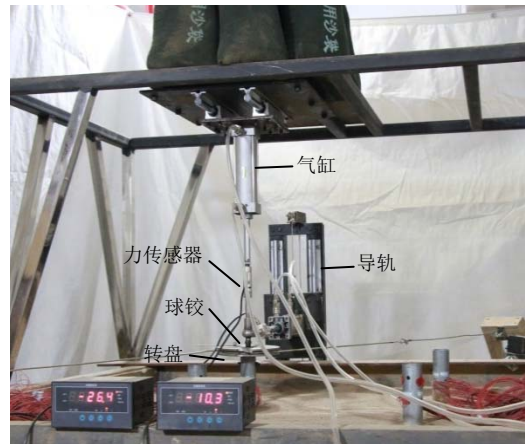
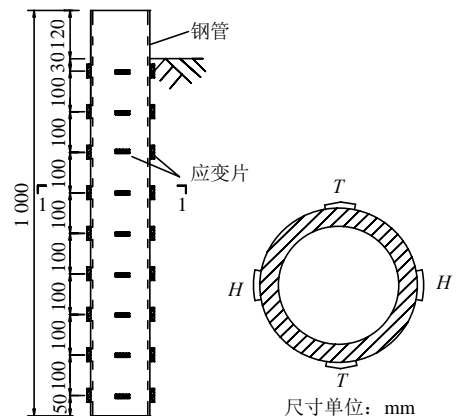


图 3 模型箱和组合加载系统

Fig.3 Model box and loading system

位移测量：桩身水平位移通过沿水平力作用方向在砂面处设置的千分表测量；沿垂直于水平力加载方向对称固定设置 2 只千分表，以测量桩顶的竖向位移；桩顶扭转角测量通过一头固定于转盘、一头用磁铁吸附在支架上的量角器进行。

桩身应变测量：沿桩身表面布置的两类应变片中，应变片 T 采用半桥连接用以测量剪应变；应变片 H 采用 1/4 桥接用以测量弯拉应变，均通过导线连接至 DH3816 型静态电子应变箱进行测量。其具体布置如图 4 所示。



(a) 立面图

(b) 1-1 剖面图

图 4 模型桩应变片布置

Fig.4 Arrangement of strain gages

2.3 试验加载方案

通过正交设计, 试验共分为 9 组, 如表 2 所示, 测试桩顶先施加不同竖向力 $0.2V_u, 0.4V_u, 0.6V_u(V_u$ 摘要中已经交代含义) 后再施加不同水平力 $0.2H_u, 0.4H_u, 0.6H_u(H_u$ 摘要中已经交代含义) 的桩身扭转承载力 T_{uvht} 。

表 2 试验加载方案
Table 2 Loading schemes

序号 编号	竖向力		水平力		扭矩	
	荷载大小	荷载性质	荷载大小	荷载性质	荷载大小	荷载性质
1	P_1	$0.2V_u$	恒定	$0.2H_u$	恒定	T_{u1} 逐级施加
2	P_2	$0.2V_u$	恒定	$0.4H_u$	恒定	T_{u2} 逐级施加
3	P_3	$0.2V_u$	恒定	$0.6H_u$	恒定	T_{u3} 逐级施加
4	P_4	$0.4V_u$	恒定	$0.2H_u$	恒定	T_{u4} 逐级施加
5	P_5	$0.4V_u$	恒定	$0.4H_u$	恒定	T_{u5} 逐级施加
6	P_6	$0.4V_u$	恒定	$0.6H_u$	恒定	T_{u6} 逐级施加
7	P_7	$0.6V_u$	恒定	$0.2H_u$	恒定	T_{u7} 逐级施加
8	P_8	$0.6V_u$	恒定	$0.4H_u$	恒定	T_{u8} 逐级施加
9	P_9	$0.6V_u$	恒定	$0.6H_u$	恒定	T_{u9} 逐级施加

加载方法: 由于本文旨在研究 $V-H-T$ 共同作用下的桩身静承载力, 故采用慢速维持法进行加载, 每级加载及稳定标准等参照《建筑基桩检测技术规范》(JGJ106—2014) 等相关规范执行。关于终止加载条件: 竖向极限承载力取 $Q-s$ 曲线发生明显拐点对应的荷载; 水平极限承载力取 $P-y$ 曲线发生明显拐点对应的荷载; 桩身扭矩承载力取桩顶 $T-\psi(\psi$ 为扭转角) 曲线发生明显拐点对应的荷载。

3 模型试验结果

试验过程中, 首先通过 V, H, T 单一作用时的载荷试验, 获得了相应桩身极限承载力值分别为: $V_u = 2\ 550\text{ N}, H_u = 1\ 274\text{ N}, T_u = 55.8\text{ N}\cdot\text{m}$ 。在此基础上, 再进行 $H-T$ 和 $V-T$ 组合加载, 最后按表 2 组合加载方案获得相应的试验结果如下。

3.1 桩身受扭承载特性

图 5 为桩顶水平力分别为 $0.2H_u, 0.4H_u$ 和 $0.6H_u$ 时, 不同竖向力 V 作用下的试桩桩顶扭矩(T) - 扭转角(ψ) 曲线。由图可得: 当 $H = 0.2H_u$ 时, 桩身抗扭性能随 V 的增大而减小, 且减幅逐渐增大; 但当 $H = 0.4H_u$ 时, V 对桩身抗扭能力的影响呈现非线性, 此时较小的竖向力($V = 0.2V_u, 0.4V_u$) 对桩身抗扭能力影响不大, 但竖向力较大($V = 0.6V_u$) 时, 桩

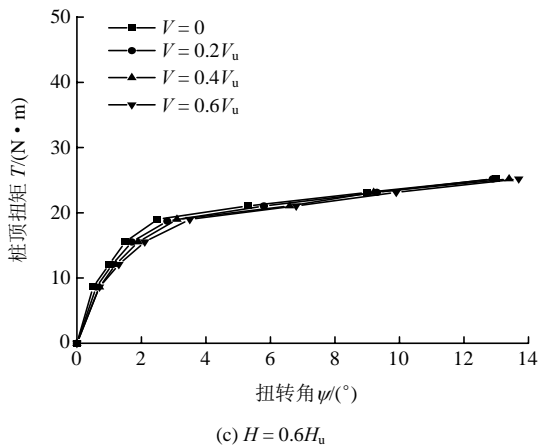
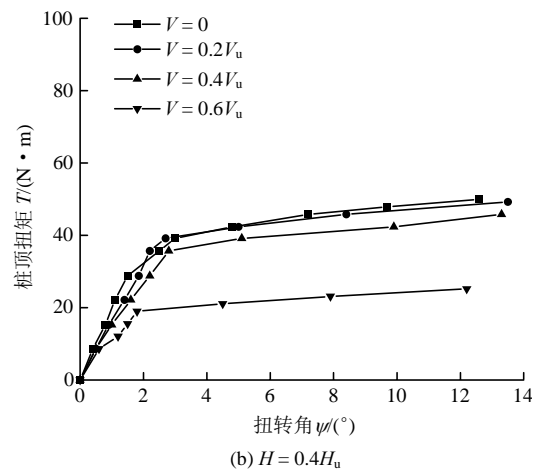
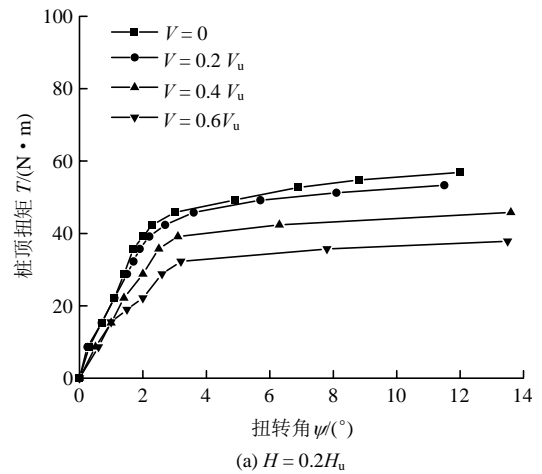


图 5 桩顶 $T-\psi$ 曲线

Fig.5 $T-\psi$ curves at the pile top

身扭转性能显著减小, 桩顶极限扭矩较 T_u 减小 66%; 当桩顶承受较大水平力($H = 0.6H_u$) 时, V 对桩身抗扭性能几乎无影响, 即 T 保持不变, 随着 V 的增大, 桩顶扭转角(ψ) 仅微微增大, 但桩顶能承受的极限扭矩基本不变。

图 5 表明: (1) 桩顶竖向力 V 会降低桩身扭转承载力, 且随着水平力 H 增大, V 对桩身抗扭能力的影响逐渐减小, 当 $H = 0.6H_u$ 时, V 几乎无影响。(2) 在同一 H 作用下, 当 T 保持不变, 随 V 增加,

桩顶扭转角(ψ)有所增大, 且增大速率基本不变。

通过桩身应变片测得扭转荷载 T 作用下桩身各截面应变值, 进而获得扭矩沿桩身的分布曲线。当桩顶扭矩荷载 $T = 22.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 时, 桩身扭矩如图 6 所示, 从图中可看出: 对于 V - H - T 组合加载方式, 桩身扭矩随深度增大而逐渐减小, 且 V 和 H 的增加均会降低桩身扭矩值, 但减幅不一。同时, 桩顶预先施加的竖向力 V 越大, 桩身各截面的扭矩随深度的变化越明显, 即 V 对桩身扭矩的影响较 H 更大。

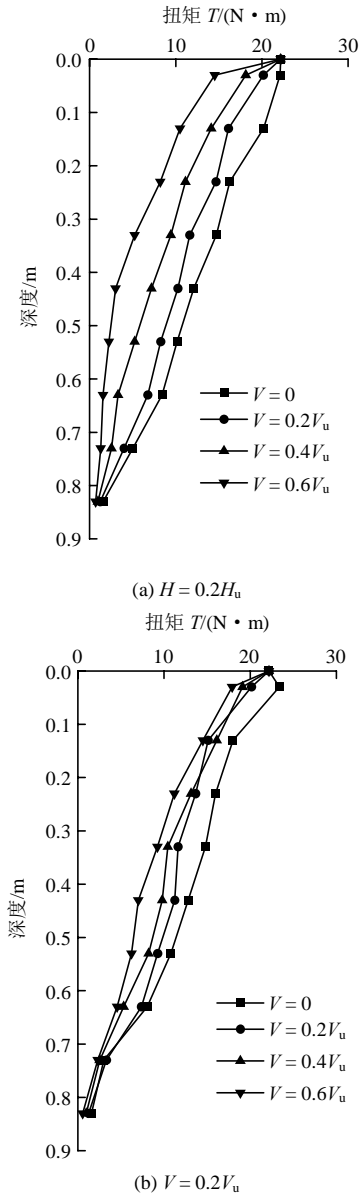


图 6 $T = 22.8 \text{ N} \cdot \text{m}$ 桩身扭矩分布
Fig.6 Torques along the pile when $T = 22.8 \text{ N} \cdot \text{m}$

3.2 桩身水平、竖向承载特性

(1) 水平承载特性

图 7 为桩顶水平力分别为 $0.2H_u$ 和 $0.4H_u$, 不同竖向力 V 下试桩桩顶扭矩(T) - 砂面处桩身水平位

移(x)变化曲线。图 7 表明: ① 桩顶施加水平力 H 后再逐步施加扭矩 T , 随着 T 增大, 砂面处桩身初始水平位移(x)(之后简称水平位移)逐渐增大, 且基本呈线性增长, 但当 T 达到极限扭矩时, x 基本不再变化。② 桩顶预先施加不同竖向力 V , 再施加 H 和 T , 初始 x 随 V 的增大而减小, 且当 V 越大, 随 T 的增加, x 的增大速率越小。

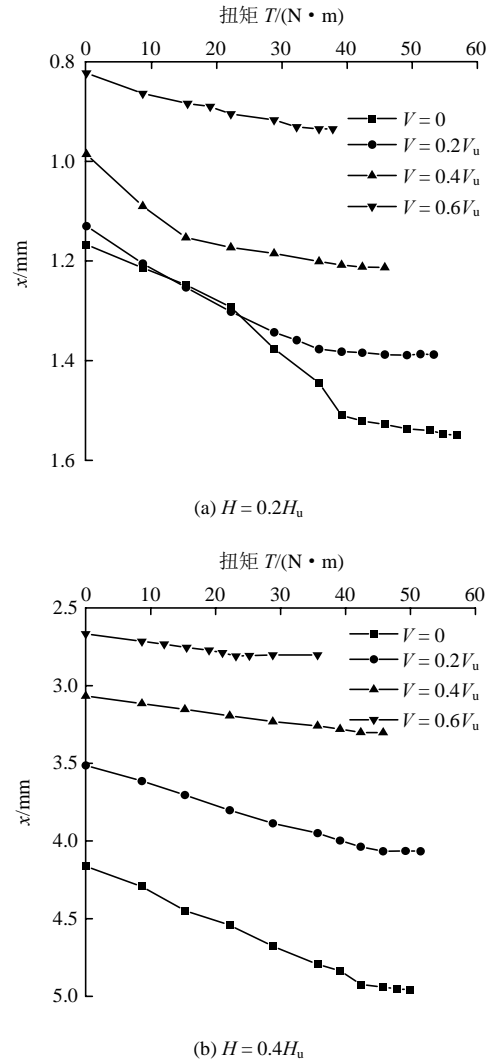


图 7 桩顶扭矩(T) - 水平位移(x)曲线
Fig.7 T - x curves

因此, 由图 7 可知: ① 预先施加的竖向力 V 将导致水平位移的减小, 与赵春风等^[16]的研究类似。② 单桩的水平承载力是由桩周土体的水平反力所决定的, 而单桩扭转承载力是由桩侧摩阻力所决定的。当桩基受扭矩荷载作用时, 桩身产生扭转变形, 桩侧摩阻力逐渐发挥, 导致桩身前后土体水平反力发生变化, 进而在桩顶水平荷载不变的情况下影响桩身水平位移。而当 T 达到极限扭矩时, x 基本不再变化, 说明桩周土体的水平反力与桩侧摩阻

力存在复杂的依存关系。

图8为桩顶水平力分别为 $0.2H_u$ 和 $0.6H_u$ ，不同竖向力 V 作用下试桩桩身弯矩分布曲线。由图可以看出，桩身弯矩随着埋深先增大后急剧减小，桩底部弯矩趋于0，最大弯矩约位于砂面下 $7d$ 深度处。桩身弯矩随着预先施加的 V 增大而逐渐减小。当 $V=0.6V_u$ 时试桩弯矩较 $V=0$ 时最大可减小43.18%。可以看出，桩顶预先施加的 V 越大，相同 H 下，桩身弯矩越小，说明竖向荷载可提高桩侧土体水平抗力。联系图7可以表明，预先施加 V 可以改善单桩的水平承载特性，减小桩身水平位移和桩身弯矩。

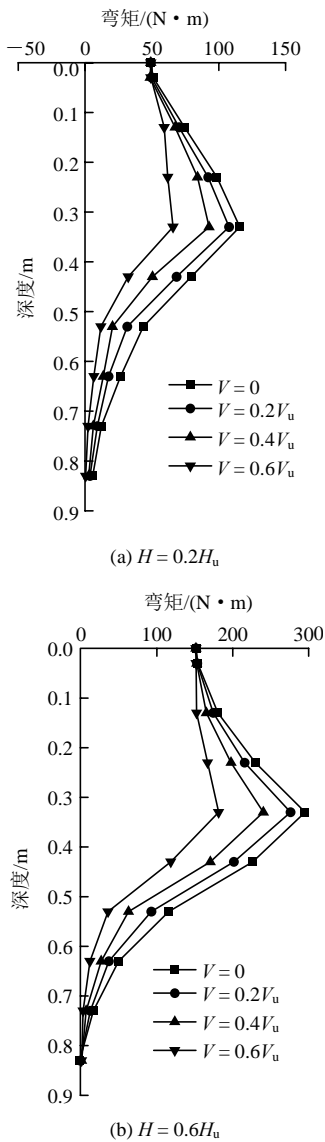


图8 桩身弯矩分布曲线
Fig.8 Moment along the pile shaft

(2) 竖向承载特性

图9为桩顶竖向力分别为 $0.2V_u$ 和 $0.6V_u$ ，不同 H 作用下试桩桩顶扭矩(T) - 竖向位移(s)变化曲线。由图可得：(1) 桩顶先施加 V 后再逐步施加 T ，随

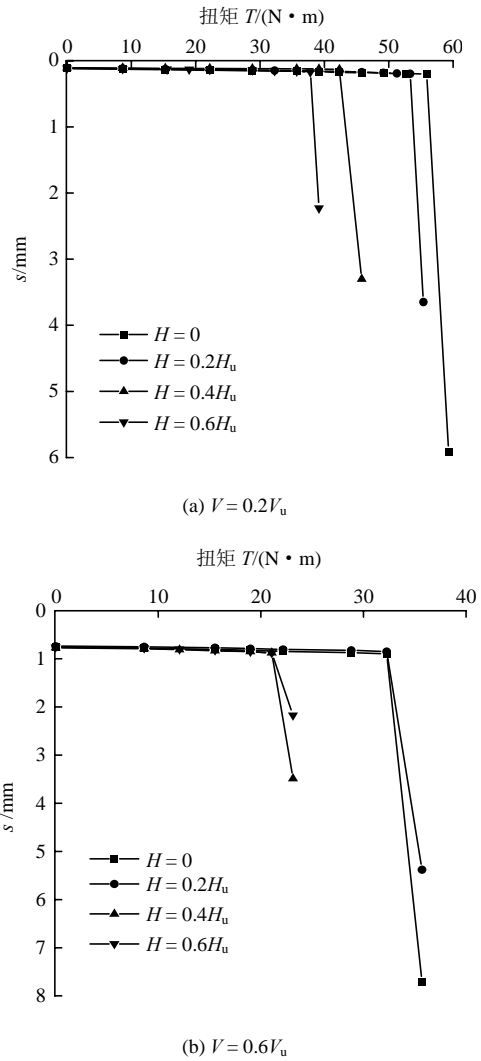


图9 桩顶扭矩(T) - 竖向位移(s)曲线
Fig.9 T - s curves

着 T 增大，桩顶竖向位移(s)逐渐增大，如 $V=0.2V_u$ 时，最大增幅为71.8%；且当 T 达到极限扭矩时， s 会突然急剧增大。(2) 当桩顶施加不同 H 时， s 依然会随 T 的增大而逐渐增大，但增幅随 H 的增大而有所减小，当 T 达到极限扭矩后，最终 s 也会随 H 的增大而减小。

因此表明：(1) 水平力 H 对单桩的竖向位移有抑制作用，但效果并不明显。赵春风等^[17]认为，对于有效内摩擦角 $\phi \geq 30^\circ$ 的砂土而言，可忽略 H 对单桩竖向承载力的影响。(2) 单桩的竖向承载力是由桩侧竖向摩阻力所决定的，而单桩扭转承载力是由桩侧水平向摩阻力所决定的。当 T 达到极限扭矩，此时桩侧水平向摩阻力全部发挥， s 急剧增大，表明此时桩侧竖向摩阻力也完全发挥。说明桩侧水平与竖向摩阻力同时产生和发挥。

3.3 V→H→T 组合下的破坏形态

图 10 是编号为 P₃, P₇ 两组试桩的砂面破坏形态：图 10(a)为 $H = 0.6H_u$, $V = 0.2V_u$ 组合下的砂面破坏形态，当施加 T 达到极限扭矩时，扭转角突变，此时桩身可以轻易旋转且桩土轻度分离。同时因为施加的水平荷载较大，所以桩前土微微隆起，桩后土略微下陷；图 10(b)为 $H = 0.2H_u$, $V = 0.6V_u$ 组合下的破坏形态，当 T 达到极限值时，扭转角突变，桩身依然可以轻易旋转，且转动的角度相较于图 10(a) 更大。但也因为预先施加的竖向荷载较大，所以这种情况下桩周土体发生整体下陷，桩土分离程度更明显。

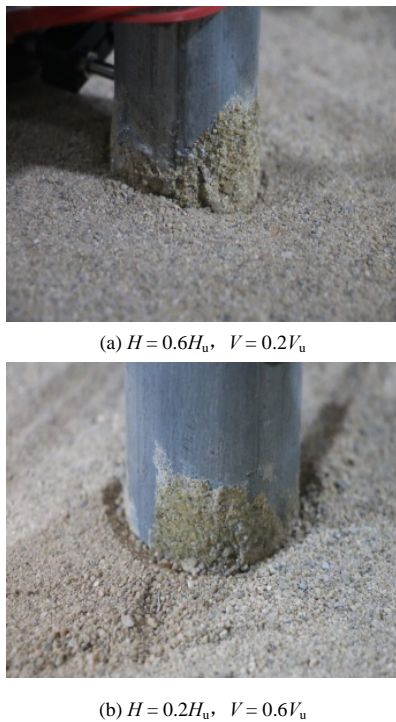


图 10 2 种组合加载下的破坏形态

Fig.10 Failure models under two different loading conditions

3.4 V→H→T 组合下单桩承载特性

对于 $V \rightarrow H \rightarrow T$ 组合加载，将最先施加的竖向力 V 加载于 $H-T$ 平面上，将桩身承载力试验结果经无量纲化处理后可获得 V 影响下的桩身 $H-T$ 承载力包络线，结果如图 11 所示，从图中可以看出：预先施加的 V 会使 $H-T$ 包络线向内移动，即桩身承载能力降低，且 V 对 T 的影响随 V 的增大而越大，而 V 对 H 的影响可以忽略。

为了便于工程设计参考，对图 11 中的桩身无量纲承载力包络线进行拟合，得到了相应的桩身承载力计算公式：

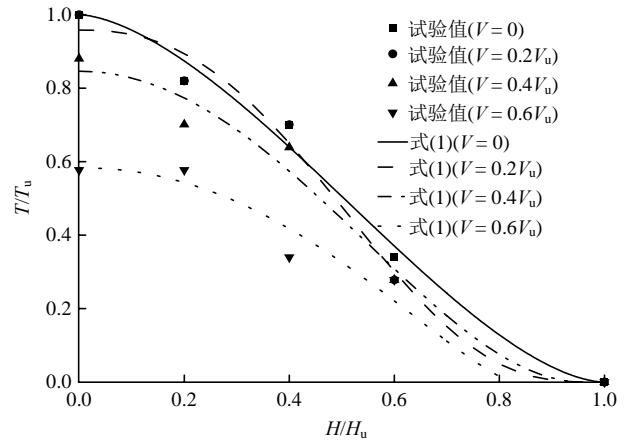


图 11 不同 V 作用下桩身水平和扭转承载力包络线

Fig.11 Bearing capacity envelopes of the pile under various vertical loads

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{H}{H_u}\right)^{1.60} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.59} &= 1 & (V = 0) \\ 1.02 \left[\left(\frac{H}{H_u}\right)^{2.42} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.30} \right] &= 1 & (V = 0.2V_u) \\ 1.09 \left[\left(\frac{H}{H_u}\right)^{2.00} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.49} \right] &= 1 & (V = 0.4V_u) \\ 1.37 \left[\left(\frac{H}{H_u}\right)^{2.10} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.73} \right] &= 1 & (V = 0.6V_u) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

实际应用时，首先分别确定竖向力、水平力与扭矩单独作用下的桩身极限承载力 V_u , H_u 及 T_u ，然后将桩顶实际受到的竖向力 V 、水平力 H 与扭矩 T 代入式(1)中。当等式左侧计算结果 ≤ 1 时，此时桩身承载状态位于包络线内部，表明满足设计要求，若相反(结果 > 1)则表明桩体处于不可靠状态，须调整设计。需要补充说明的是，式(1)没有考虑加载顺序的复杂性，即仅针对桩顶先受竖向力 V 作用，再施加水平力 H 与扭矩 T 时的桩身承载力计算。

4 结 论

基于自行设计的加载装置，研究了单桩在桩顶受 $V-H-T$ 组合荷载作用下的桩身承载特性，主要结论如下：

(1) $V-H-T$ 组合作用下， V 和 H 的作用降低了桩身扭转承载力，但减小幅度并不等于 $H-T$ 和 $V-T$ 两种组合下减小幅度的直接相加，且减幅随 V 增大而减小，说明 V , H , T 之间存在复杂的耦合关系。

(2) 预先施加的竖向力 V 增大，桩身水平位移

和桩身弯矩均有所减小,即桩身水平承载力得到改善,但同时水平力 H 对桩顶竖向沉降的抑制作用可忽略。

(3) 在 $V-H-T$ 共同作用下,桩身水平和竖向位移均会随 T 的增大而有所增加,且当 T 增大至极限受扭状态时,桩身水平和竖向位移发生突变,表明决定桩身扭转承载力的桩侧水平向摩阻力与决定桩身竖向承载力的桩侧竖向摩阻力及桩侧土抗力存在相互依存关系。

(4) 基于模型试验数据获得的 $V-H-T$ 组合加载下的桩身无量纲承载力包络线表明: V 将使得 $H-T$ 包络线向内移动,即桩身承载能力降低,且减幅随 V 增大而变大,而 V 对 H 的影响暂时可忽略。为方便工程设计参考,通过拟合分析给出了相应的 $V-H-T$ 组合受荷桩承载力简化计算公式。

诚然,上述结论仅针对单一均质砂土地基中的单桩基础,对于其他地基土类型,不同桩身长径比等,有待进一步的验证与深入研究。

参考文献(References):

- [1] 皇甫明,王幼青,王梦恕.水平力对竖直桩沉降和承载力影响的研究[J].岩土工程学报,2003,25(4):511-513.(HUANGFU Ming, WANG Youqing, WANG Mengshu. Study of effects of lateral loads on the settlement and bearing capacity of pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(4): 511-513.(in Chinese))
- [2] 赵明华,李微哲,杨明辉,等.成层地基中倾斜偏心荷载下桩位移动特性室内模型试验研究[J].土木工程学报,2006,39(12):95-99.(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): 95-99.(in Chinese))
- [3] 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 load on bearing capacity of single pile[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(12): 1796-1804.(in Chinese))
- [4] GUO W D, GHEE E H. Behavior of axially loaded pile groups subjected to lateral soil movement[C]// Foundation Analysis and Design. Shanghai: [s.n.], 2006: 174-181.
- [5] GEORGIADIS M, SAFLEKOU S. Piles under axial and torsional loads[J]. Computers and Geotechnics, 1990, 9(4): 291-305.
- [6] HU Z H, MCVAY M, BLOOMQUIST D, et al. Influence of torque on lateral capacity of drilled shafts in sands[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(4): 456-464.
- [7] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand[J]. Revue Canadienne De Géotechnique, 2006, 43(43): 500-515.
- [8] KONG L G, ZHANG L M. Centrifuge modeling of torsionally loaded pile groups[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(11): 1374-1384.
- [9] KONG L G, ZHANG L M. Experimental study of interaction and coupling effects in pile groups subjected to torsion[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(7): 1006-1017.
- [10] 邹新军,徐洞斌,王亚雄,等.非均质地基中单桩受扭弹塑性分析[J].土木工程学报,2015,48(11):103-110.(ZOU Xinjun, XU Dongbin, WANG Yaxiong, et al. Torsional elasto-plastic analysis of single piles in heterogeneous ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(11): 103-110.(in Chinese))
- [11] 邹新军,王亚雄,徐洞斌.弯梁桥中 $V-T$ 联合受荷桩承载力分析[J].中国公路学报,2015,28(10):51-58.(ZOU Xinjun, WANG Yaxiong, XU Dongbin. Bearing capacity analysis of $V-T$ combined loaded piles in curved girder bridges[J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(10): 51-58.(in Chinese))
- [12] 邹新军,徐洞斌,王亚雄.近海复杂环境下的 $H-M-T$ 受荷桩内力位移分析[J].防灾减灾工程学报,2014,34(6):736-741.(ZOU Xinjun, XU Dongbin, WANG Yaxiong. Analysis of piles under $H-M-T$ combined loading in offshore complex environment[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2014, 34(6): 736-741.(in Chinese))
- [13] 邹新军,丁仕进,徐洞斌.中密砂土地基中 $H-T$ 组合作用下单桩承载特性研究[J].土木工程学报,2017,50(11):107-114.(ZOU Xinjun, DING Shijin, XU Dongbin, et al. Bearing behavior of a single pile under combined $H-T$ loads in medium-dense sand subsoil[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(11): 107-114.(in Chinese))
- [14] 谭国焕,张佑启,杨敏.松砂土中桩侧面粗糙程度对桩承载力的影响[J].岩土工程学报,1992,14(2):50-54.(TAN Guohuan, ZHANG Youqi, YANG Min. Pile lateral surface roughness effects on pile bearing capacity in loose sand[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(2): 50-54.(in Chinese))
- [15] 徐光明,章为民.离心模型中的粒径效应和边界效应研究[J].岩土工程学报,1996,18(3):80-86.(XU Guangming, ZHANG Weimin. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3): 80-86.(in Chinese))
- [16] 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):184-190.(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): 184-190.(in Chinese))
- [17] 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):183-190.(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): 183-190.(in Chinese))