

# 水平力( $H$ )—扭矩( $T$ )组合受荷桩 承载特性模型试验研究\*

邹新军<sup>†</sup>, 丁仕进, 赵灵杰

(湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**为探讨单桩基础在桩顶水平力( $H$ )—扭矩( $T$ )组合作用下的承载特性,研制了 $H$ - $T$ 组合加载装置.通过室内砂箱模型对比试验,获得了8组 $H$ - $T$ 组合工况下的桩身内力变形与承载力结果.其表明:相比于单一水平受荷或受扭桩的极限承载力( $H_u$ 或 $T_u$ ),两种荷载的不同大小组合与加载顺序( $H \rightarrow T$ 或 $T \rightarrow H$ )均会导致相应桩身承载力的减小,且 $H \rightarrow T$ 组合的影响要比 $T \rightarrow H$ 组合明显,如 $2T_u/3 \rightarrow T$ 时桩身水平承载力减小约12.4%,而 $2H_u/3 \rightarrow T$ 组合下桩身扭转承载力减幅达48.5%,故工程设计时不宜基于叠加原理计算 $H$ - $T$ 受荷桩的承载力.在此基础上,采用基于MATLAB编制的可考虑桩周土约束及 $H$ - $T$ 耦合效应的改进杆系有限元法计算程序求解了不同工况下的 $H$ - $T$ 组合受荷桩的桩顶扭转角及桩身扭矩与弯矩,并将计算结果与模型试验值进行了对比分析.

**关键词:**单桩基础;承载特性;水平力;扭矩;组合作用;模型试验

**中图分类号:**TU473.1

**文献标志码:**A

## Model Testing Investigation on Bearing Behavior of a Single Pile under Combined $H$ - $T$ Loads

ZOU Xinjun<sup>†</sup>, DING Shijin, ZHAO Lingjie

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

**Abstract:** In order to study the bearing behavior of a single pile under combined loadings of horizontal force  $H$  and torque  $T$ , a loading device was first designed to apply  $H$  and  $T$  on the pile top simultaneously. 8 groups of indoor model were tested to obtain the inner forces and deformation as well as bearing capacities of the pile shaft. The result showed that, compared with the ultimate bearing capacity of pile shaft under pure  $H$  or  $T$  (i. e.,  $H_u$  or  $T_u$ ), the  $H$ - $T$  load combinations with various magnitudes and sequences (i. e.,  $H \rightarrow T$  or  $T \rightarrow H$ ) caused an obvious decrease of the bearing capacity. For example, the application of  $2T_u/3$  on the pile top reduced the horizontal bearing capacity by 12.4%, while the pre-loading of  $2H_u/3$  resulted in a reduction of the torsional bearing capacity up to 48.5%. Therefore, traditional superposition principles can not be used in engineering design to evaluate the bearing capacity of piles under combined loads. Considering the effects of  $H$ - $T$  combination and subsoil constraint on the torsional bearing capacity, the torsion angles at the pile top as well as the torque and moment distributions along the pile shaft were

\* 收稿日期:2016-06-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51378197, 51578231), National Natural Science Foundation of China(51378197, 51578231)

作者简介:邹新军(1975-),男,湖南湘阴人,湖南大学副教授,博士

<sup>†</sup> 通讯联系人, E-mail: xjzouhd@hnu.edu.cn

calculated by a MATLAB-based FEM program. The predictions were also compared with the model test data.

**Key words:** single pile foundation; bearing behavior; horizontal force; torque; combined loading; model tests

随着我国海洋资源的不断开发,海上钻井平台、风力发电塔等不断兴建,桩基础由于其诸多优点而在这类工程结构中得到广泛应用.这类桩基不仅承受竖向力( $V$ )、水平力( $H$ )和弯矩( $M$ )作用,还常常承受不可忽视的扭矩( $T$ ).当上部结构自重等竖向荷载相对较小时, $H$ 和 $T$ 两种荷载就成为控制桩身承载力的主要因素.为此,本文重点考虑 $H$ - $T$ 的组合,探讨单桩基础在其不同大小及加载顺序等组合工况下的承载特性.

已有学者对竖向力( $V$ )和水平力( $H$ )组合作用下的桩基受力变形进行了理论或试验研究,如赵明华等<sup>[1-2]</sup>、郑刚等<sup>[3]</sup>、赵春凤等<sup>[4]</sup>研究了 $V$ - $H$ 作用下的单桩承载特性及其相互影响规律.但直至今日,考虑扭矩( $T$ )的组合受荷桩的研究仍较鲜见. Hu等<sup>[5]</sup>通过 $H$ 和 $T$ 作用下的单桩离心机试验发现扭矩导致桩身水平承载力的降幅达30%~50%,但未探究水平力对桩身扭转承载力的影响. Kong等<sup>[6-7]</sup>通过群桩受扭离心机试验和理论分析,发现了水平和扭转2个自由度间存在耦合效应,且水平力对桩身扭转承载特性有明显提升作用,但扭矩对桩身水平承载性能影响较小. 陈仁朋等<sup>[8]</sup>通过考虑 $\rho$ 乘子和运用考虑推力弯矩影响的受扭计算模型探讨了群桩中各基桩间的相互作用和各自自由度的耦合.这些基于群桩试验的结论不能完全反映单桩的承载性能,有待针对单桩进一步探讨. 邹新军等<sup>[9-11]</sup>分别对非均质地基中单桩在 $T$ 、 $V$ - $T$ 以及 $H$ - $M$ - $T$ 三种不同载荷作用下的桩身承载特性进行了理论探讨.

为此,本文从试验的角度出发,利用研制的组合加载装置,进行了室内砂箱中单桩在水平力( $H$ )和扭矩( $T$ )组合作用下的室内砂箱模型试验.基于测得的桩身内力变形数据及改进的杆系有限元数值分析,探讨不同大小组合及加载顺序等对 $H$ - $T$ 组合受荷桩承载特性的影响规律.

## 1 模型试验设计

### 1.1 模型箱及模型桩的布置

模型试验在自制铁皮砂箱中进行,其净空(长 $\times$ 宽 $\times$ 高)为1 200 mm $\times$ 600 mm $\times$ 1 000 mm,模型桩

剖面布置如图1所示.为防止模型桩之间的相互影响及模型箱边界效应,模型桩间距及桩与箱壁距离分别约15 $D$ 和11.25 $D$ .

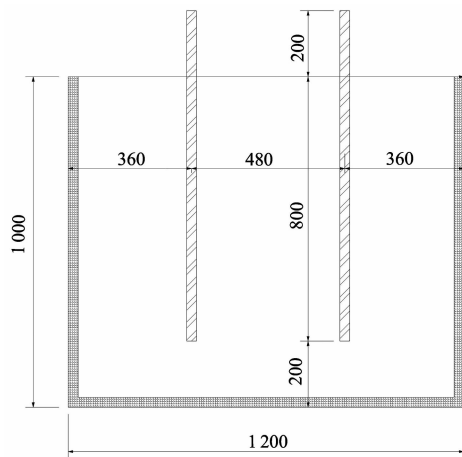


图1 模型桩剖面布置图

Fig. 1 Profile layout of model piles

### 1.2 模型桩的制作

模型桩采用Q235型钢管桩制成,长1 000 mm,外径 $D=32$  mm,内径 $d=29.5$  mm,泊松比 $\mu=0.3$ .沿桩身间隔100 mm的8个截面2个正交方向粘贴应变片(BX-120-3AA型,栅长3 mm,栅宽2 mm,电阻 $(120\pm 0.1)\ \Omega$ ,灵敏系数 $2.08\pm 1$ ).测试试验过程中扭矩和水平力引起的桩身剪切和弯拉(压)应变,应变片用AB胶粘贴保护后通过打孔从桩管内引出其导线.桩端用502胶粘贴直径为 $D$ 的钢片进行封口处理.因管壁较光滑,为提高桩身承载力<sup>[12]</sup>,于桩身外表面用502胶均匀粘贴一层试验所用细砂.模型桩平面布置如图2所示.



图2 模型桩的平面布置图

Fig. 2 Plane layout of model piles



表 1 试验加载方案  
Tab. 1 Loading schemes

组号	编号	水平力		扭矩	
		荷载大小	加载方式	荷载大小	加载方式
1	P <sub>11</sub>	H <sub>u</sub>	逐级施加	0	—
	P <sub>12</sub>	0	—	T <sub>u</sub>	逐级施加
	P <sub>21</sub>	H <sub>u</sub> /3	恒定	T <sub>u21</sub>	逐级施加
2	P <sub>22</sub>	H <sub>u</sub> /2	恒定	T <sub>u22</sub>	逐级施加
	P <sub>23</sub>	2H <sub>u</sub> /3	恒定	T <sub>u23</sub>	逐级施加
	P <sub>31</sub>	H <sub>u31</sub>	逐级施加	T <sub>u</sub> /3	恒定
3	P <sub>32</sub>	H <sub>u32</sub>	逐级施加	T <sub>u</sub> /2	恒定
	P <sub>33</sub>	H <sub>u33</sub>	逐级施加	2T <sub>u</sub> /3	恒定

试验加载方法:因旨在探讨 H-T 组合作用下桩身的静力承载特性,故试验加载采用慢速维持荷载法.每级加载稳定标准参照相关规范(规程)执行.关于终止加载条件:水平力以容许最大水平位移作为终止加载标准<sup>[13]</sup>,即取桩身地面处水平位移达到约 0.15D 时所对应的水平力作为极限水平承载力;而桩身极限扭矩则取桩顶 T-ψ 曲线陡降点对应的扭矩值.

## 2 模型试验结果

### 2.1 H→T 组合作用下桩身受扭承载特性试验结果

图 5 所示为桩顶水平力分别为 0, H<sub>u</sub>/3, H<sub>u</sub>/2 和 2H<sub>u</sub>/3 即编号为 P<sub>12</sub>, P<sub>21</sub>, P<sub>22</sub> 和 P<sub>23</sub> 四组试验的桩顶扭矩(T)-扭转角(ψ)变化曲线.当取 T-ψ 曲线的陡降(转折)起始点所对应的扭矩作为极限扭矩时,可得 4 组试验的桩顶极限扭矩分别为 16.54, 14.22, 9.08 和 8.47 N·m,同时图中结果表明:

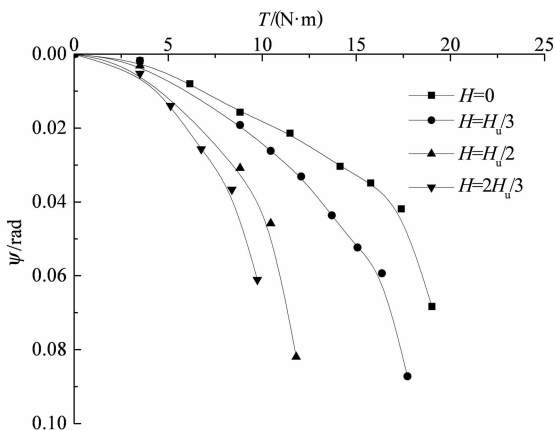


图 5 H→T 组合作用下桩顶扭矩(T)-扭转角(ψ)曲线  
Fig. 5 T-ψ curves at the pile top under H→T combined loads

1) 后 3 组的极限扭矩较 P<sub>12</sub> 分别减小 13.9%, 44.8% 和 48.5%, 即桩顶水平力会导致桩身抗扭能力减小,且随水平力的增加而减幅增大.

2) T 保持不变,随 H 增加,极限状态下的桩顶扭转角(ψ)增大,且增大速率加快.

图 6 为 P<sub>12</sub>, P<sub>21</sub>, P<sub>22</sub> 和 P<sub>23</sub> 四组试验中不同桩顶水平力恒定作用时桩顶扭矩引起的桩身扭矩分布,其表明:

1) 同一 H 值作用下,随 T 值增加,桩身扭矩随深度减小越来越快.

2) 同一 T 值作用下,桩身扭矩随 H 值增加而减小,但桩身扭矩随深度的变化规律变化不明显.

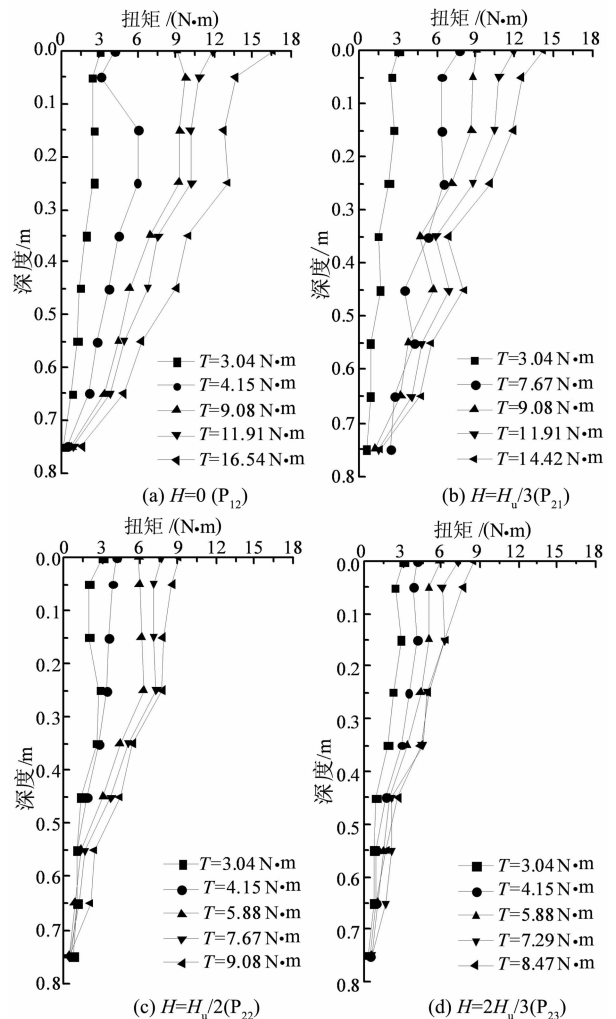


图 6 不同水平力恒定值时的桩身扭矩分布图  
Fig. 6 Torque along the pile shaft under various values of H

### 2.2 T→H 组合作用下桩身水平承载特性试验结果

图 7 为单一水平受荷及桩顶扭矩值分别为 T<sub>u</sub>/3, T<sub>u</sub>/2 和 2T<sub>u</sub>/3 即编号为 P<sub>11</sub>, P<sub>31</sub>, P<sub>32</sub> 和 P<sub>33</sub> 四组试验的桩身水平力(H)-挠曲位移(Y)对比曲线.

当取地面处桩身水平位移为  $0.15D=4.8\text{ mm}$  时对应的荷载为桩身极限水平承载力,  $P_{11}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{32}$  和  $P_{33}$  四组试验对应的桩身极限水平承载力分别为  $620\text{ N}$ ,  $593\text{ N}$ ,  $571\text{ N}$  和  $543\text{ N}$ , 由此可看出:

1) 后 3 组的水平承载力极限值较  $P_{11}$  分别减小  $4.4\%$ ,  $7.9\%$  和  $12.4\%$ , 说明桩顶作用扭矩会减小桩身水平承载力, 且随扭矩值增大而减幅更大.

2) 桩顶作用扭矩会导致桩身水平位移增大, 如  $H=376\text{ N}$  时测得地面处桩身水平位移分别为  $1.991\text{ mm}$ ,  $2.045\text{ mm}$ ,  $2.159\text{ mm}$  和  $2.354\text{ mm}$ , 后 3 组较  $P_{11}$  分别增大  $2.7\%$ ,  $8.4\%$  和  $18.2\%$ .

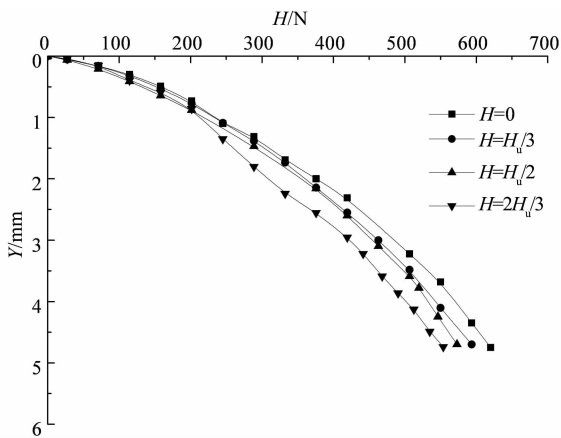


图 7  $T \rightarrow H$  组合下桩身水平力-水平位移曲线  
Fig. 7  $H-Y$  curves of the pile shaft under  $T \rightarrow H$  combined loads

图 8 为  $P_{11}$ ,  $P_{31}$ ,  $P_{32}$  和  $P_{33}$  四组试验中不同桩顶恒定扭矩  $T$  下  $H$  引起的桩身弯矩分布, 其表明:

1) 桩身弯矩沿整个桩身均有分布, 但主要分布于  $20D$  范围内.

2) 桩身最大弯矩  $M_{\max}$  作用点和第一弯矩零点均随  $H$  和  $T$  的增加逐渐下移, 桩身最大弯矩  $M_{\max}$  作用点基本稳定在地面下  $5D \sim 15D$  范围内.

3)  $H(T)$  相同时桩身的第一弯矩零点和  $M_{\max}$  位置随  $T(H)$  的增加逐渐下移, 但  $T(H)$  对桩身弯矩随深度的分布规律影响有限.

2.3  $H \rightarrow T$  与  $T \rightarrow H$  两种加载顺序下的破坏形态

图 9 所示为  $H \rightarrow T$  与  $T \rightarrow H$  两种加载顺序下的破坏形态: 图 9(a) 为  $H \rightarrow T$  组合下的破坏形态, 当施加的扭矩达到某一值时, 扭转角发生突变, 水平位移变化较小, 表现为桩身可以轻易转动, 桩土分离; 图 9(b) 为  $T \rightarrow H$  组合下的破坏形态, 水平位移随着水平力的逐级施加不断变大, 扭转角变化较小, 表现为桩前土微微隆起, 桩后土微微下陷.

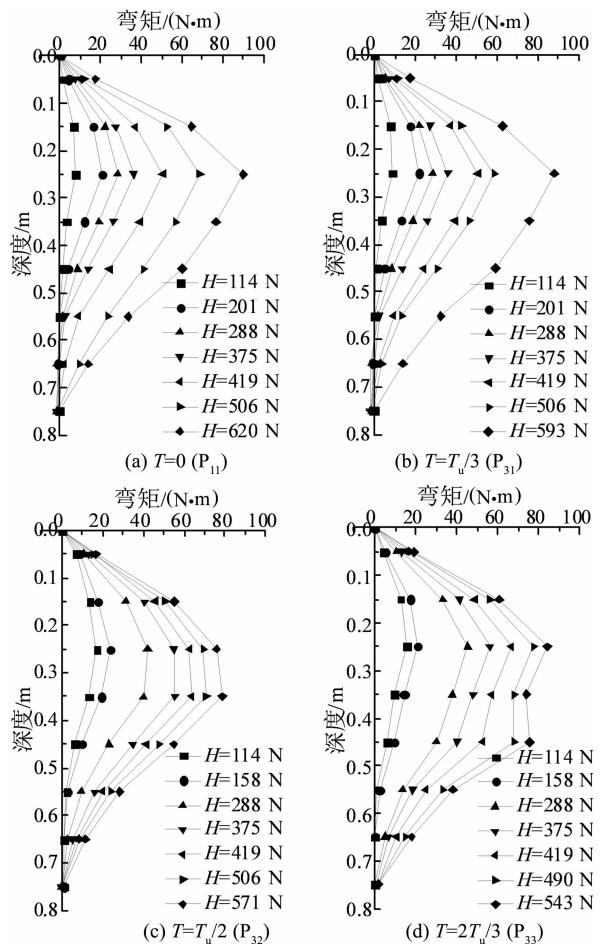


图 8 不同桩顶扭矩作用下的桩身弯矩分布图  
Fig. 8 Moment along the pile shaft under various values of  $T$



(a)  $H \rightarrow T$  组合下的破坏形态 (b)  $T \rightarrow H$  组合下的破坏形态

图 9 两种加载顺序下的破坏形态对比  
Fig. 9 Failure models under two different loading sequences

2.4  $H \rightarrow T$  与  $T \rightarrow H$  两种组合下的单桩承载特性对比

图 10 所示为对  $H \rightarrow T$  与  $T \rightarrow H$  两种组合下的桩身承载力测试结果经无量纲化后获得的桩身水平和扭转承载力包络线, 由图可看出:

1)  $T \rightarrow H$  组合下的承载力包络线位于  $H \rightarrow T$  组合对应的桩身承载力包络线外侧, 即前者较后者能承受更大的水平力  $H$  和扭矩  $T$  组合荷载.

2) 对于  $T \rightarrow H$  组合, 桩身水平承载力极限值会随桩顶扭矩增大而减小, 且当  $T$  增至某一值时桩身极限水平承载力降低速率由慢变快, 但  $H \rightarrow T$  组合下的桩身极限扭矩随  $H$  增加基本呈线性递减。

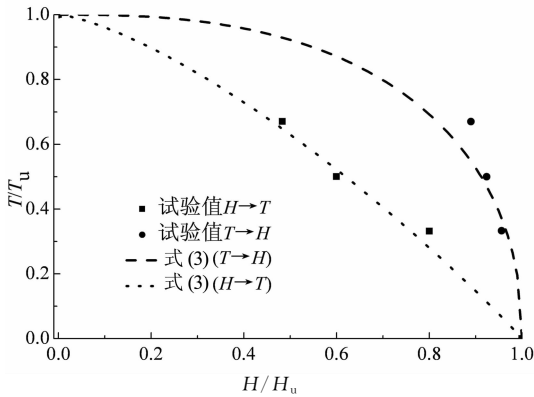


图 10 两种组合下的桩身水平和扭转承载力包络线  
Fig. 10 Bearing capacity envelopes of the pile shaft under two different combined  $H-T$  loads

为了便于应用, 对图 10 中的无量纲化桩身承载力包络线进行拟合, 得到相应的桩身承载力简化计算公式如式(3)所示。

$$\begin{cases} \left(\frac{H}{H_u}\right)^{1.39} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{1.04} = 1, H \rightarrow T; \\ \left(\frac{H}{H_u}\right)^{2.60} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{2.23} = 1, T \rightarrow H. \end{cases} \quad (3)$$

实际应用时, 先确定单一水平力与扭矩作用下的桩身极限承载力  $H_u$  及  $T_u$ , 然后将桩顶实际受到的水平力  $H$  与扭矩  $T$  值代入式(3). 若相应方程式左侧计算结果  $\leq 1$ , 则表明相应组合荷载作用位于包络线内部, 即桩身承载力满足要求; 反之(结果  $> 1$ ) 则表明桩身处于不安全的承载状态, 需调整设计。

### 3 试验结果分析与对比

#### 3.1 水平力对桩身扭转承载力的影响分析

为了分析和验证桩顶作用的水平力  $H$  对桩身扭转承载力的影响, 基于改进的杆系有限元和编制的 MATLAB 分析计算程序求解水平力  $H$  和扭矩  $T$  组合作用下的桩身内力位移<sup>[11]</sup>. 该法基于有限杆单元法和  $m$  法, 考虑了桩身单元两端水平力  $H$ 、弯矩  $M$  及扭矩  $T$  的共同作用, 引入了能反映水平力对桩身受扭承载力影响的桩侧扭转土抗力放大因子  $\alpha_{TH}$ <sup>[14]</sup> 后, 建立了统一的桩身综合刚度矩阵。

将桩身划分为若干单元, 通过确定桩身单元参

数( $G_p, E_p, A_p, I_p, J_p$  及  $b_0$ ) 和桩周土物理力学参数( $m, \mu$  和  $G_s$  等), 再结合桩端的边界约束条件, 求解桩身内力. 因本文模型试验土为密实干细砂, 参考相关经验数据取  $E_s = 40 \text{ MPa}$ ,  $m = 0.2$ ,  $m = 20 \text{ MN/m}^4$ , 其余参数同前。

由 FEM 获得不同  $H-T$  组合情况下桩身发生极限破坏时的内力计算结果, 并将其与模型试验测试结果对比, 其中桩顶扭转角( $\phi_0$ ) 的对比见表 2, 而桩身在  $H-T$  组合荷载作用下的扭矩和弯矩分布对比如图 11 所示。

表 2 桩顶扭转角 FEM 计算结果与试验结果比较  
Tab. 2 Torsion angles at the pile top by FEM and model tests

桩顶荷载组合工况	桩顶极限扭矩 / (N·m)	桩顶扭转角 $\phi_0$ / rad		相对误差 / %
		试验值	FEM 计算值	
$H_u/3-T$	14.22	0.059	0.092	55.9
$H_u/2-T$	9.08	0.056	0.057	1.8
$2H_u/3-T$	8.47	0.061	0.051	19.6

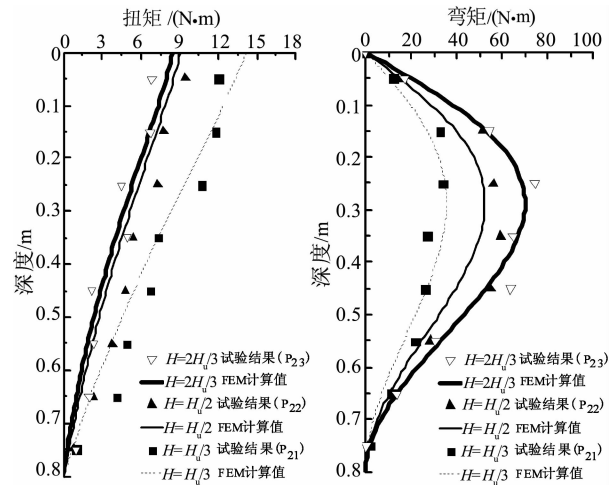


图 11  $H-T$  组合下桩身内力理论与试验结果  
Fig. 11 Calculated and measured inner forces along the pile shaft under  $H-T$  combined load

对于  $H \rightarrow T$  组合作用, 表 2 结果表明: 当桩顶先施加的水平力  $H$  较大即桩顶极限扭矩(扭转承载力)较小时, 改进有限杆单元法(FEM)求得的桩顶扭转角计算值与模型试验结果误差要小一些, 反之则误差偏大。

相应于不同桩顶  $H-T$  组合荷载的破坏状态下桩身扭矩图 11(a) 和弯矩图 11(b) 分布及大小与模型试验实测值也存在一定误差, 但两者沿深度的分布规律较为一致。

上述 FEM 计算结果与试验实测值存在误差的

原因,首先是基于平面问题所给出的改进有限杆单元法没有考虑  $H-T$  组合作用下桩-土体系的复杂空间受力状态;其次,基于  $m$  法考虑桩周土的约束作用不能考虑破坏状态下的桩周土体的塑性状态。

### 3.2 桩顶扭矩对桩身水平承载力的影响分析

桩顶先作用扭矩  $T$  后对桩身水平承载力的影响极为复杂,目前有关  $T \rightarrow H$  组合作用下的单桩基础承载力如何受  $T-H$  耦合效应的影响研究也鲜见报道,限于篇幅,拟另文探讨。此处,仅结合试验结果及已有研究成果从桩侧土体水平抗力的开展机理上讨论先施加扭矩  $T$  对桩身水平承载力的影响。

桩顶仅作用水平力  $H$  时,桩身水平承载力主要由桩侧土水平极限抗力所决定。目前已有不少计算桩侧土水平极限抗力的方法, Reese 等<sup>[15]</sup>认为:砂土地基中,桩顶施加  $H$  后,其水平地基反力自地面开始随深度呈线性增加。随着研究的深入,很多学者都发现桩侧土水平极限抗力  $P_u$  由桩前土抗力合力  $P_n$  和土体对桩身产生的剪切抗力合力  $P_\tau$  两部分组成<sup>[16-17]</sup>,即:

$$P_u = P_n + P_\tau = (\eta P_{\max} + \xi \tau_{\max}) D. \quad (4)$$

式中:  $P_{\max}$  为最大桩前土抗力;  $\tau_{\max}$  为土体对桩身产生的最大剪切抗力;  $D$  为桩径;  $\eta$  和  $\xi$  为分别与桩型有关的经验调整系数。

由式(4)可分析桩顶先施加扭矩  $T$  后对桩身水平承载力的影响:桩顶先施加扭矩  $T$  时,桩侧土体对桩身产生剪切抗力  $\tau$ ;再施加水平力  $H$  后,桩侧土体对桩身产生的剪切抗力与扭矩  $T$  作用时土体对桩身产生的剪切抗力相互影响和叠加,并表现出极为复杂的耦合作用机理,进而影响土体对桩身的剪切抗力分布与桩身极限承载力。本文模型试验中表现为桩顶扭矩  $T$  的施加导致桩身极限水平承载力的减小。因此,工程中应考虑这种不利影响,不能简单基于叠加原理评估桩身极限承载力。

## 4 结 语

考虑不同  $H-T$  组合(大小、加载顺序等),通过室内砂箱模型试验和有限元对比分析计算,探讨了单桩基础在桩顶水平力  $H$  与扭矩  $T$  组合作用下的桩身承载特性,主要结论如下:

1) 桩顶  $H-T$  组合作用下,桩身极限承载力较之单一水平受荷桩或受扭桩的极限承载力( $H_u$  或

$T_u$ )均减小,并有如下规律:对于  $H \rightarrow T$  组合,  $H$  会导致桩身扭转承载力大幅减小,且随  $H$  增加而减幅越大,如施加  $2H_u/3$  后的桩身极限扭转承载力减幅达 48.5%;而对于  $T \rightarrow H$  组合,  $T$  也会导致桩身水平承载力相应降低,但影响不如  $H \rightarrow T$  组合明显。如先施加  $2T_u/3$  时桩身水平承载力减小约 12.4%,故工程设计中不宜基于叠加原理评估组合受荷桩的承载力,而须考虑荷载组合效应的不利影响。

2) 获得了  $T \rightarrow H$  和  $H \rightarrow T$  两种组合加载下的桩身无量纲化承载力包络线,其表明:前者位于后者外侧,即前者较之后者能承受更大的  $H$  和  $T$  组合荷载。同时为方便应用,经拟合分析给出了相应的承载力简化计算公式。

3) 采用基于 MATLAB 编制的改进有限杆单元法程序求得桩顶  $H \rightarrow T$  组合作用下的桩顶扭转角及桩身扭矩与弯矩后,与模型试验结果进行了对比,并分析了  $T \rightarrow H$  组合作用下  $T$  的施加导致桩身极限水平承载力减小的承载机理。

诚然,因完成的模型试验与数值分析均针对单一均质地基,上述结论有待进一步验证,且对于更为复杂的地基及荷载组合问题,也有待深入研究。

## 参考文献

- [1] 赵明华, 吴鸣, 郭玉荣. 轴、横向荷载下桥梁基桩的受力分析及试验研究[J]. 中国公路学报, 2002, 15(1): 53-57.  
ZHAO Minghua, WU Ming, GUO Yurong. Study of the behavior analysis and model test of bridge piles under simultaneous axial and lateral loading[J]. China Journal of Highway and Transport, 2002, 15(1): 53-57. (In Chinese)
- [2] 赵明华, 吴鸣, 邹新军. 倾斜荷载下基桩的研究现状及发展动态[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2003, 30(4): 73-77.  
ZHAO Minghua, WU Ming, ZOU Xinjun. Research status quo and development trends of piles under inclined loads[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2003, 30(4): 73-77. (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] 赵春风, 王卫中, 赵程, 等. 组合荷载下单桩承载特性现场试验[J]. 中国公路学报, 2013, 26(6): 59-64.  
ZHAO Chunfeng, WANG Weizhong, ZHAO Cheng, et al. Field test study on bearing capacity of single pile under com-

- bined loads[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2013, 26(6): 59-64. (In Chinese)
- [5] 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.
- [6] KONG Linggang, ZHANG Limin. Centrifuge modeling of torsionally loaded pile groups[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2007, 133(11): 1374-1384.
- [7] KONG Linggang, ZHANG Limin. Experimental study of interaction and coupling effects in pile groups subjected to torsion[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2008, 45(7): 1006-1017.
- [8] 陈仁朋, 郑中, 孔令刚, 等. 水平及扭转荷载作用下群桩基础受力分析方法[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(8): 1463-1469.  
CHEN Renpeng, ZHENG Zhong, KONG Linggang, *et al.* Analysis method for pile groups subjected to lateral and torsional loads [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(8): 1463-1469. (In Chinese)
- [9] 邹新军, 徐洞斌, 王亚雄. 成层地基中单桩受扭弹塑性分析[J]. *湖南大学学报: 自然科学版*, 2014, 41(9): 72-78.  
ZOU Xinjun, XU Dongbin, WANG Yaxiong. Elastic-plastic analysis of torsional single pile in layered subsoil[J]. *Journal of Hunan University: Natural Sciences*, 2014, 41(9): 72-78. (In Chinese)
- [10] 邹新军, 王亚雄, 徐洞斌. Gibson地基中 $V-T$ 联合受荷桩承载力分析[J]. *工程力学*, 2015, 32(8): 149-155.  
ZOU Xinjun, WANG Yaxiong, XU Dongbin. Bearing capacity analysis of piles under  $V-T$  combined loading in Gibson subsoil [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(8): 149-155. (In Chinese)
- [11] 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)
- [12] 谭国焕, 张佑启, 杨敏. 松砂土中桩侧表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)
- [13] 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): 95-99.  
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)
- [14] 孔令刚, 张利民. 群桩扭转非线性模型[J]. *岩土力学*, 2009, 30(8): 2231-2236.  
KONG Linggang, ZHANG Limin. Nonlinear analysis of pile groups subjected to torsion [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(8): 2231-2236. (In Chinese)
- [15] REESE L C, COX W R, KOOP F D. Analysis of laterally loaded piles in sand[C]//*Proceedings of the VI Annual Offshore Technology Conference 1974*. Dallas: Offshore Technology in Civil Engineering, 1974: 473-485.
- [16] JANNOYAN K D, WHELAN M J. Interface stresses between soil and large diameter drilled shaft under lateral loading[C]//*GeoSupport 2004*. Orlando, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2004: 816-825.
- [17] ZHANG L Y, FRANCISCO S, RALPH G. Ultimate lateral resistance to piles in cohesionless soils[J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2005, 131(1): 78-83.