

上砂下黏地基中竖向力-扭矩联合 受荷单桩承载特性

邹新军^{1†}, 周长林²

(1. 湖南大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

摘要:为探讨上砂下黏地基中桩顶竖向力(N)与扭矩(T)联合作用下单桩基础的承载特性,基于室内模型试验,获得一系列 N - T 联合作用时的桩顶荷载-位移曲线及桩身内力分布,并经无量纲化处理与曲线拟合,得到 N - T 联合受荷单桩的承载力包络线及其简化计算公式;在此基础上,进一步采用ABAQUS对 N - T 联合受荷单桩进行数值模拟,获得桩身弹性模量 E_p 、长径比 L/D 及相对砂土层厚度 l_0/L 对桩身承载特性的影响规律.结果表明:相比于单一受荷, N - T 联合作用会导致桩身竖向和扭转承载力明显降低,且施加 N (或 T)会引起桩身扭转角(或沉降)增大.通过数值分析还发现桩身变形主要发生在 $0\sim 0.6L$ 范围;增大 L/D 和 l_0/L 可明显提高桩身承载力,而增大 E_p 对提高桩身承载力的作用较小,故建议提高桩身承载力的优选措施是适当增加桩长或砂土层厚度;另外,上下土层分界面处会发生明显的应力突变.

关键词:桩基础;上砂下黏地基;联合受力;承载特性;模型试验;数值分析

中图分类号:TU473

文献标志码:A

Bearing Behavior of a Single Pile under Combined Vertical-Torsional Loads in Sand Overlying Clay Soils

ZOU Xinjun^{1†}, ZHOU Changlin²

(1. College of Civil Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100082, China)

Abstract: In order to study the bearing behavior of a single pile under combined vertical-torsional (N - T) loads in sand overlying clay soils, based on an indoor model test, a series of load-displacement curves and inner force distribution of pile shaft under combined N - T loads were obtained. By dimensionless treatment and curve fitting, the envelope of pile bearing capacity and its simplified calculation formula were obtained. Further numerical simulation on the single pile under combined N - T loads was carried out by ABAQUS to find out the influence law of elastic modulus (E_p), slenderness ratio (L/D) and relative thickness of the sand layer (l_0/L) on the pile behavior. Results show that compared with a pile under a single load, the ultimate vertical and torsional bearing capacity of pile under combined N - T loads obviously decrease, and applying N (or T) causes the increase in twist angle (or settlement) of the

* 收稿日期:2021-09-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178329,51578231), National Natural Science Foundation of China(52178329,51578231)

作者简介:邹新军(1975—),男,湖南湘阴人,湖南大学教授,博士

† 通信联系人, E-mail: xjzouhd@hnu.edu.cn

pile shaft. It is also found by numerical analysis that pile deformation mainly occurs in the range of $0\sim 0.6L$, increasing L/D and l_u/L causes the bearing capacity of the pile shaft significantly increase, but increasing E_p has little effect on improving the pile capacity. Therefore, it is suggested that the effective method to improve the bearing capacity of the pile shaft is to appropriately increase pile length or thickness of the sand layer. Additionally, obvious sudden changes of stress occur at the interface between upper and lower soil layers.

Key words: pile foundation; sand overlying clay soils; combined loading; bearing behavior; model test; numerical analysis

随着我国交通运输的发展和近海新能源的不断开发,桩基础在城市立交桥、跨江跨海大桥和风力发电塔等工程中的应用越来越广泛.这类桩基础不仅承受着上部结构物传递下来的竖向力(N),还可能受到由于不均匀水平力或侧向冲击荷载等作用而产生的扭矩(T)作用^[1],而常规设计中往往忽略扭矩的作用,导致评估桩身承载力时出现偏差,甚至造成工程事故.如2007年佛山九江大桥因船只撞击导致相邻桥墩产生扭矩而引发桥面坍塌^[2],美国也曾报道过因忽略风力所引起的扭矩作用而导致桩基破坏的事件^[3].因此,深入研究 N - T 联合作用下的单桩承载特性具有重要的工程意义.

对于纯受扭桩,Stoll^[4]最早完成了砂土地基中钢管桩受扭试验,发现桩顶扭矩-扭转角曲线类似于竖向荷载-位移曲线.Poulos^[5]通过黏土地基中的受扭桩模型试验,获得了一系列桩顶扭矩-扭转角曲线,为之后受扭桩的研究奠定了基础.此后,赵明华等^[6]、Zhang^[7]、邹新军等^[8]分别基于非线性规划法、能量法、荷载传递法分析了单层、双层及成层地基中的单桩受扭承载特性.Zhang等^[9]基于离心机试验探究了松砂和密砂两种地基中的单桩受扭性状,发现当桩顶扭转角达到 4° 左右时,桩身扭转阻力均已完全发挥.Li等^[10]进行了足尺单桩扭转试验,并基于试验获得的桩身内力分布提出了估算基桩扭转承载力的方法.

对于 N - T 联合受荷桩,Georgiadis等^[11]基于理论分析和模型试验讨论了软黏土中扭矩 T 对桩身竖向承载特性的影响,发现桩顶预先施加 T 会削弱桩身竖向承载力并增加桩身沉降,即 N 和 T 之间存在相互耦合关系.Volmer^[12]通过有限元程序分析了黏性土和非黏性土中 N - T 联合作用下的单桩承载性状,但此研究也仅针对单一土层.为此,邹新军等^[13]、Bassack等^[14]分别基于剪切位移法和边界元法,导出了

双层及多层地基中 N - T 联合受荷桩的桩身内力位移解答.在室内模型试验方面,郭沛翰和邹新军^[15]开展了砂土地基中竖向力 N -水平力 H -扭矩 T 组合加载下的单桩模型试验,发现预先施加 N 对桩身扭转承载力有削弱作用,且当 T 达到极限值时,桩顶沉降出现陡增,但其未考虑荷载施加顺序的影响.之后,江杰等^[16]针对黏土地基中 T - N 这一特定加载顺序下的单桩承载特性完成了室内模型试验,结果表明:当桩顶预先施加的扭矩 T 超过其极限值的 $1/3$ 时,其对桩身竖向承载力的削弱作用更明显.郭沛翰等^[15]和江杰等^[16]的研究结果进一步证实了 N 和 T 之间存在复杂的耦合作用.此外,范庆来等^[17]还利用ABAQUS对 N - T 联合作用下的桶形基础进行了数值模拟.综上所述,目前有关 N - T 联合受荷桩的试验研究仅针对砂土或黏土的单一土层,且大多未考虑 N 、 T 作用顺序.而对于像中国南海及欧洲北海等局部海域中的桩基础,其可能会支撑于上层以砂性土为主、下部以软黏土为主的上砂下黏型地基中^[18],因此有必要针对这一地层工况中的桩基开展研究.

鉴于此,本文先通过模型试验探讨上砂下黏地基中 N - T 联合受荷单桩的承载特性,获得了 N - T 联合作用时的桩顶荷载-位移曲线及桩身内力分布,并经无量纲化处理及曲线拟合,得到了适用于不同加载顺序的桩身承载力包络线及其简化计算公式.然后,基于建立的有限元计算模型,通过参数分析进一步得到了桩身弹性模量、长径比及上下土层分布等对单桩承载特性的影响规律,以供工程实践参考.

1 模型试验

1.1 模型土的制备与填筑

本试验土层为上砂下黏双层地基,上下土层厚度分别为30 cm和50 cm.上覆砂土层由硅质砂制成,

并经土工试验测得砂样曲率系数 $C_c = 1.29$, 不均匀系数 $C_u = 2.49$, 平均粒径 $d_{50} = 0.38$ mm, 由此判定该砂样为均质中细砂, 砂土其余参数见表 1. 下卧软黏土层采用湘江淤泥质土, 其不排水抗剪强度一般小于 10 kPa, 孔隙比为 1.5, 含水率大多在 30%~60%. 黏土从现场取回后, 在室内对所取原状黏土进行重塑并充分搅拌均匀, 然后将所有黏土样堆积在模型箱中密封静置 15 d, 以保证土样的均匀性. 对制备好的黏土取样进行室内土工试验, 最后测得其基本参数如表 1 所示.

表 1 试验砂土样参数

Tab.1 Parameters of tested soils

黏土		砂土	
参数	参数值	参数	参数值
重度/($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	17.0	相对密度	2.680
液限/%	44.6	最大干密度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.752
塑限/%	23.5	最小干密度/($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	1.354
不排水抗剪强度/kPa	4.6	内摩擦角/($^\circ$)	34.000

地基填筑时, 首先预铺 200 mm 桩端土, 并将模型桩固定于预定位置, 再按层厚 150 mm 继续分层填筑桩周土, 每层土填筑完成后采用铁板满夯三遍. 最后, 通过地基 -0.15 m、-0.3 m、-0.45 m 和 -0.7 m 等 4 个深度处预埋的标定盒取样测得地基各层的砂土相对密实度为 $27\% \pm 2\%$, 黏土含水率为 $59\% \pm 2\%$, 表明制备的地基均匀性较好, 从而确保试验的可重复性和一致性.

1.2 模型桩的制作与布置

模型桩原型选自江苏海域风电场工程中的试桩, 桩径为 1.8 m, 埋深为 29.25 m. 取几何缩尺比 1:50, 依据相似理论确定模型桩尺寸: 外径 d 为 36 mm, 壁厚为 1 mm, 埋深为 600 mm. 模型桩采用铝合金管加工制成, 其弹性模量为 69 GPa, 泊松比为 0.33, 并对桩端进行封底. 沿桩身外表面 8 个横截面对称正交布置 BF350-3A 型 (v) 和 BF350-3HA 型 (t) 应变片, 相邻截面间距均为 80 mm, 如图 1 所示. 应变片粘贴完成后, 在其外层涂抹环氧树脂进行保护. 考虑铝合金管表面比较光滑, 将试验用砂与环氧树脂混合后均匀裹于桩身外表面, 以增加其粗糙度^[19].

图 2 所示为模型桩平面布置图, 模型桩间距及桩身与模型箱侧壁的距离均大于 $8d$, 足以消除桩间相互影响作用及边界效应^[20].

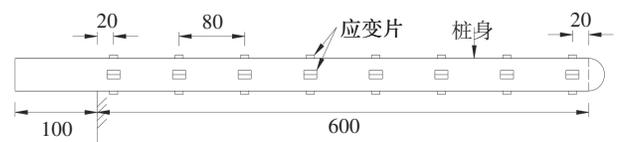


图 1 应变片布置图(单位:mm)

Fig.1 Layout of strain gages(unit:mm)

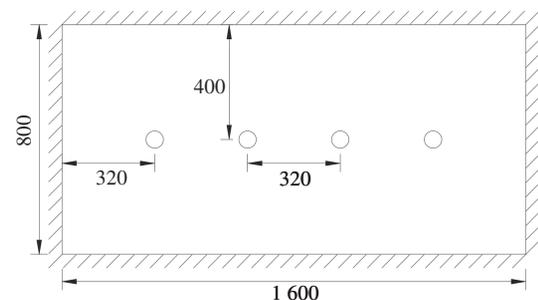


图 2 模型桩平面布置图(单位:mm)

Fig.2 Plane layout of model piles(unit:mm)

1.3 加载测量系统

模型桩加载测量系统如图 3 所示, 通过自制组合加载构件(由扭转轴和转盘等组成), 可实现竖向力与扭矩同时且独立作用于桩顶. 其中, 竖向力采用气缸加载, 并由力传感器测定竖向力的大小; 扭矩采用砝码加载, 即通过转盘、钢丝绳和滑轮将砝码的重量转化为桩顶扭矩, 由此可确保力臂长度 L_t 在桩身扭转过程中保持不变. 测得 L_t 为 15 cm, 滑轮的摩擦因数 μ 为 0.95, 则桩顶施加的扭矩为 μmgL_t , 其中, mg 为砝码重力, 单位为 kN.

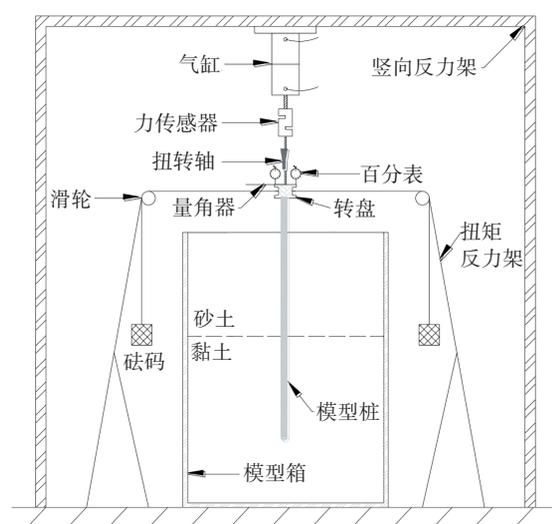


图 3 加载测量系统

Fig.3 Loading and measurement system

加载过程中,对桩顶位移及桩身应变进行实时监测.其中,桩顶沉降由两只对称放置在转盘两侧的数显百分表进行测定,桩顶扭转角则通过固定在转盘上的数显角度尺进行读取,桩身轴压应变和扭转应变分别由应变片 v 和 t 测得.

1.4 试验方案设计与加载过程

本次试验加载过程采用慢速维持荷载法,具体试验加载方案见表 2.在加载过程中,竖向力和扭矩每级荷载稳定的依据分别为 $0.01 \text{ mm}/5 \text{ min}$ 和 $0.05^\circ/5 \text{ min}$.加载终止标准分别为:竖向加载以容许最大竖向位移作为第一终止加载标准;而对于受扭单桩,桩顶扭转角发生突变时认为扭矩加载达到极限状态.

表 2 试验加载方案

Tab.2 Loading schemes of tests

组号	荷载工况	竖向力 N		扭矩 T		加载顺序
		大小	性质	大小	性质	
1	纯 N	N_u	分级加载	0	恒定	—
2	纯 T	0	恒定	T_u	分级加载	—
3	$T_u/3-N_{u1}$	N_{u1}	分级加载	$T_u/3$	恒定	$T \rightarrow N$
4	$2T_u/3-N_{u2}$	N_{u2}	分级加载	$2T_u/3$	恒定	$T \rightarrow N$
5	$N_u/3-T_{u1}$	$N_u/3$	恒定	T_{u1}	分级加载	$N \rightarrow T$
6	$2N_u/3-T_{u2}$	$2N_u/3$	恒定	T_{u2}	分级加载	$N \rightarrow T$

注: $T \rightarrow N$ 表示桩顶预先作用扭矩后再施加竖向力; $N \rightarrow T$ 表示桩顶预先作用竖向力后再施加扭矩. N_u 表示极限竖向力; T_u 表示极限扭矩.

2 试验结果与分析

2.1 扭矩对桩身竖向承载特性的影响

图 4 所示为预先施加不同恒定扭矩 T 下的桩顶竖向力 (N)—沉降 (s) 关系曲线,取桩顶沉降为 $0.05d$ 时对应的竖向力为桩身竖向极限承载力,则得到桩顶预先作用 0 、 $T_u/3$ 、 $2T_u/3$ 时桩身竖向极限承载力分别为 125 N 、 120 N 、 105 N .由此可见:桩顶预先作用扭矩将导致桩身竖向承载力减小.当预先作用的扭矩 ($T = T_u/3$) 较小时,其对应的桩顶 $N-s$ 曲线与 $T = 0$ 时接近,桩身竖向极限承载力仅减小 4% ;而当预先作用的扭矩 ($T = 2T_u/3$) 较大时,桩身竖向极限承载力减幅达到了 16% ,说明随着 T 的增大,其对单桩竖向承载特性的影响也逐渐增大.此外,当 $N = 0$ 时,桩身

及桩顶转盘自重导致扭矩引起的初始沉降随扭矩增大而有所增加.

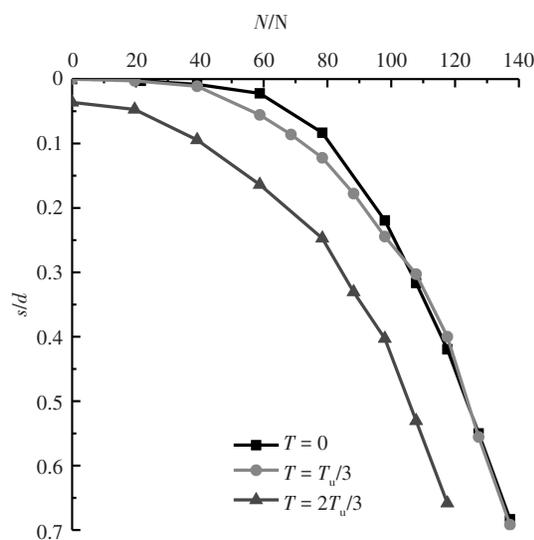


图 4 桩顶 $N-s$ 曲线

Fig.4 $N-s$ curves at the pile top

图 5 所示为预先施加不同恒定扭矩 T 下竖向力 N 引起的桩身轴力分布,可得:1)总体上,桩身轴力沿深度 z 递减,这是因为竖向荷载向下传递的过程需要不断克服桩侧竖向摩擦力;2)同一 T 下,桩身轴力及其沿深度衰减的速率随竖向力增大而增大;3)同一 N 下,总体上表现为桩身轴力随着预加扭矩的增大而减小;4)随着 N 的增大,轴力逐渐向下传递至桩端,当 N 达到极限值左右 ($N = 118 \text{ N}$) 时,桩端处轴力也仅约为桩顶竖向力的 20% ,表明上砂下黏地基中桩端阻力对竖向承载力的贡献较小.

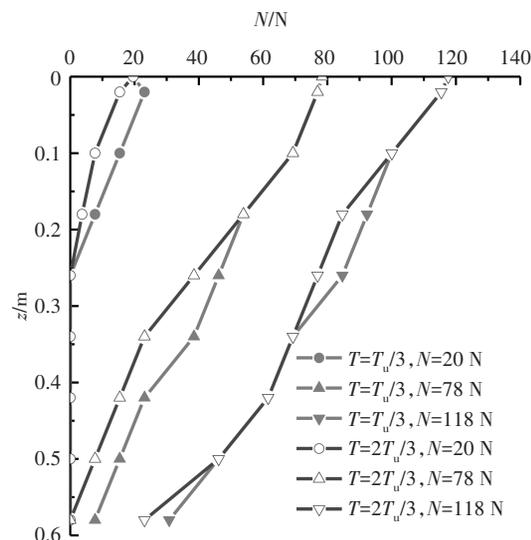


图 5 桩身轴力沿深度分布图

Fig.5 Distribution of axial force along pile shaft

2.2 竖向力对桩身扭转承载特性的影响

图6所示为预先施加不同恒定竖向力 N 下的桩顶扭矩(T)-扭转角(ψ)关系曲线.由图6可见,各试桩 T - ψ 曲线在桩顶扭转角达到 $3^\circ\sim 5^\circ$ 时发生突变,这与Stoll^[4]及郭沛翰等^[15]的研究结论一致.取 T - ψ 曲线突变点对应的扭矩值作为桩身扭转极限承载力,得到桩顶预先作用 0 、 $N_u/3$ 、 $2N_u/3$ 时的桩身扭转极限承载力分别为 $4.38\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $3.81\text{ N}\cdot\text{m}$ 、 $3.32\text{ N}\cdot\text{m}$.由此可知:预先作用 $N_u/3$ 和 $2N_u/3$ 时,桩身扭转极限承载力分别减小约13%和24%,即桩顶预先作用竖向力会明显削弱桩身扭转承载力.分析其原因可知:桩顶预先作用竖向力所产生的桩-土相对位移使桩侧摩阻力预先发挥了一部分,导致桩侧极限扭转阻力减小,从而降低了桩身极限扭转承载力^[13-14].此外,在扭矩加载初期,图6中3条曲线接近,主要原因是此时桩-土系统处于弹性阶段,竖向力对桩身扭转性状的影响还没有充分发挥.

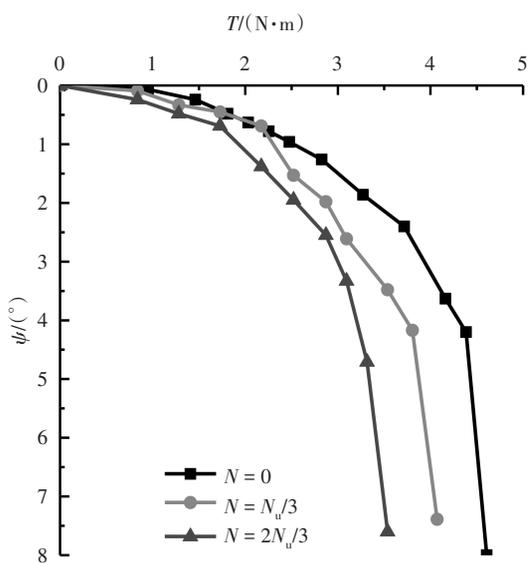


图6 桩顶 T - ψ 曲线
Fig.6 T - ψ curves at the pile top

图7所示为预先施加不同恒定竖向力 N 下扭矩 T 引起的桩身扭矩分布.可见:1)总体上,桩身扭矩沿深度 z 递减,这是因为扭矩向下传递的过程中也需要不断克服桩侧扭转阻力;2)同一 N 下,桩身扭矩及其沿深度衰减的速率随扭矩增大而增大;3)同一 T 下,桩身扭矩随预加竖向力增大而减小.

由图7中的桩端扭矩值可近似推算出桩端扭转阻力的大小,则可得:1)竖向力不会影响桩端扭转阻力的发挥;2)桩端土对桩身扭转承载力的贡献占

比(λ)随着扭矩增大而增大,如当 $T = 2.17\text{ N}\cdot\text{m}$ 和 $T = 3.09\text{ N}\cdot\text{m}$ 时, λ 分别约为11%和16%,且与文献^[15]中单一砂土地基的测试结果相比,本文双层地基中 λ 值明显偏大.

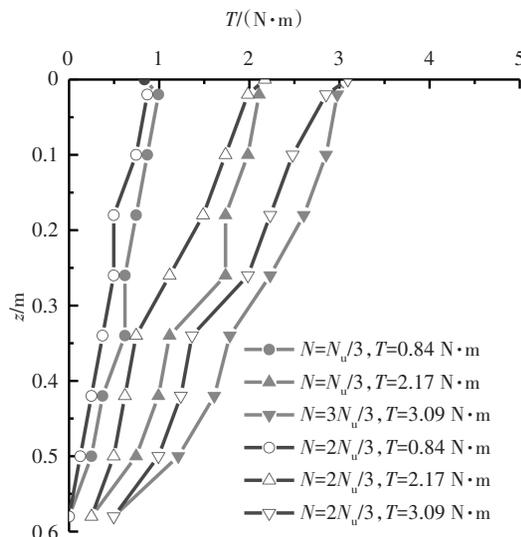


图7 桩身扭矩沿深度分布图
Fig.7 Distribution of torque along pile shaft

2.3 N - T 相互影响下的桩顶位移响应

为探究 N - T 相互影响下的桩顶位移响应,在进行 $N \rightarrow T$ 加载顺序下的基桩测试时,除监测桩顶扭转角外,还记录了桩顶沉降的变化,得到了不同恒定竖向力 N 下的桩顶扭矩(T)-沉降(s)曲线,如图8所示.同理,在进行 $T \rightarrow N$ 加载顺序下的基桩测试时,可以得到不同恒定扭矩 T 下的桩顶竖向力(N)-扭转角(ψ)关系曲线,如图9所示.

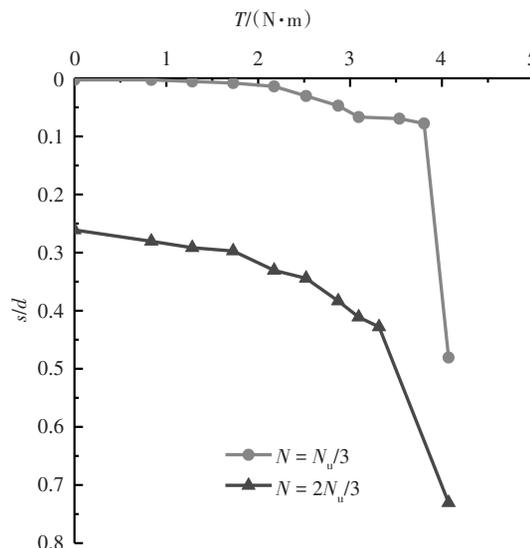


图8 桩顶 T - s 曲线
Fig.8 T - s curves at the pile top

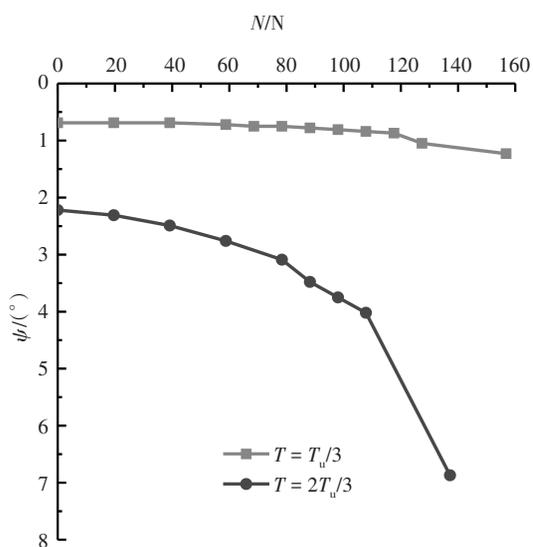


图9 桩顶N-ψ曲线
Fig.9 N-ψ curves at the pile top

由图8可知:1) 当桩顶预先作用竖向力N时,桩身沉降会随扭矩增大而增大;2) 当桩顶扭矩较小时,2/3N_u对应的桩顶沉降随扭矩变化速率较1/3N_u时明显增大,即扭矩对沉降的影响随竖向力增大而增大;3) 当扭矩达到极限值时,不同N作用下的T-s曲线均发生突变,即桩顶沉降陡增,说明桩身受扭达到极限状态时,单桩竖向承载力也达到其极限值。

由图9可知:1) 当桩顶预先作用扭矩T时,桩顶扭转角随竖向力增大而增大;2) 当桩顶预加扭矩较小时(1/3T_u),竖向力达到极限值之前的桩顶扭转角随竖向力变化极小,而当预加扭矩较大时(2/3T_u),桩顶扭转角随竖向力增大而显著增加;3) 当竖向力达到极限值时,不同T作用下的N-ψ曲线也均发生突变,表明桩身竖向承载达到极限状态时,单桩扭转承载力也达极限值,且扭矩越大,此现象越显著。

结合图8和图9,经分析表明:1) 当单桩在竖向(或环向)上已产生相应的位移时,再于另一个方向上施加荷载会引起附加的桩身沉降(或扭转角),且随着联合荷载增大,N-T之间相互影响逐渐增大;2) N-T联合作用下,单桩竖向和扭转承载力分别由桩侧竖向摩阻力和扭转阻力控制. 桩顶T(或N)达到极限值时,同时桩身沉降(或扭转角)也发生突变,此时桩侧竖向摩阻力(或扭转阻力)全部发挥,说明桩侧竖向和扭转阻力存在紧密的相互依存关系,且同时产生和发挥。

2.4 N-T联合受荷桩承载力包络线

分别根据图4和图6中的荷载-位移曲线得到N→T和T→N两种加载顺序下的桩身扭转和竖向极限

承载力,再经无量纲化处理获得N-T平面上的承载力散点值,并对该散点值进行拟合处理得到如图10所示的桩身承载力包络线. 为便于工程应用,给出了桩身承载力包络线的简化计算公式:

$$\left(\frac{N}{N_u}\right)^{6.34} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{0.83} = 1, N \rightarrow T \quad (1a)$$

$$\left(\frac{N}{N_u}\right)^{1.67} + \left(\frac{T}{T_u}\right)^{4.63} = 1, T \rightarrow N \quad (1b)$$

图10表明:不同加载顺序下的桩身承载力包络线存在交叉,当N/N_u<0.82或T/T_u>0.75时,N→T组合对应的包络线位于T→N组合对应的包络线内侧,即后者较前者能承受更大的N-T联合荷载,但当N/N_u>0.82或T/T_u<0.75时,结果相反. 为安全起见,桩身可承受的安全荷载应取两包络线涵盖的交集范围。

实际应用时,先确定单桩在单一荷载作用下的桩身极限承载力N_u和T_u,再将桩顶实际作用的竖向力N和扭矩T代入式(a)和式(b)中验算,分两种工况:1) N、T作用顺序已知,N→T:若N/N_u<0.82,将N和T代入式(a)中,反之则代入式(b)中;T→N:若T/T_u<0.75,将N和T代入式(b)中,反之则代入式(a)中;2) N、T作用顺序未知,将N和T代入式(a)和(b)中. 若等式左侧计算结果小于1,表明设计满足桩身承载力要求;否则,桩身处于危险状态,需调整设计。

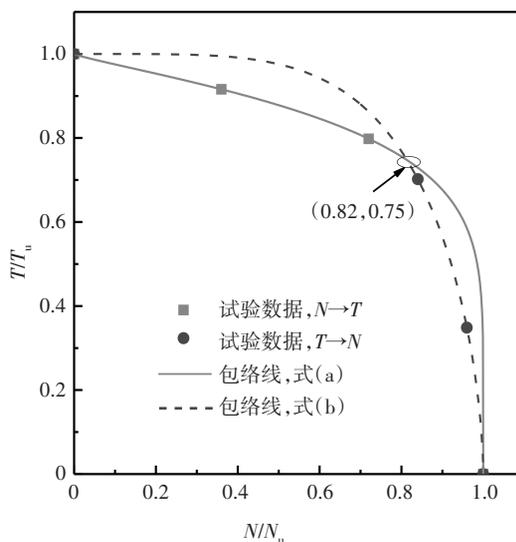


图10 桩身承载力包络线
Fig.10 Bearing capacity envelope of pile shaft

3 数值模型与参数分析

3.1 有限元模型的建立与验证

3.1.1 有限元模型的建立

基于ABAQUS建立了上砂下黏地基中单桩有限

元计算模型,其网格划剖面如图 11 所示.模型桩、土单元网格单元类型均采用 C3D8R,模型径向范围取 $20d$ (d 为桩径),深度为 $2L$ (L 为桩长).桩身为线弹性材料,砂和黏土均采用摩尔-库伦本构模型^[21].桩顶中心处设置为参考点 RP,并将其与桩顶面绑定,相应荷载施加于 RP 上.

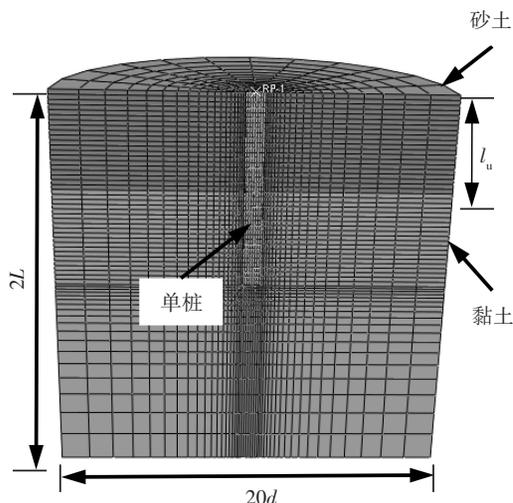


图 11 $N-T$ 联合受荷桩有限元分析模型

Fig.11 FE analysis model of combined $N-T$ loaded pile

3.1.2 模型验证

为验证模型的可靠性,计算模型桩体尺寸完全等同于本文模型试验中的试桩尺寸,并尽可能考虑模型桩圆形封底等相关桩-土系统的几何特征,进行了 $N-T$ 联合作用下的单桩有限元计算分析.计算模型土体参数的取值:松砂,弹性模量和泊松比分别取 20 MPa 和 0.25;软黏土,弹性模量和泊松比分别取 2.5 MPa 和 0.4,内摩擦角为 5° ;其余砂、黏土参数与表 1 保持一致.此外,ABAQUS 计算得到的桩身扭转(或竖向)极限承载力的确定方法同前文试验部分的处理方式一致.表 3 和图 12 分别为桩顶极限扭矩、桩身扭矩分布的数值计算值与试验值的对比结果,可见:数值计算结果与试验结果相差控制在 10% 以内,且桩身扭矩 T 沿深度 z 的分布规律也基本一致,从而验证了本模型的可靠性.

表 3 桩顶极限扭矩的对比

Tab.3 Comparison of ultimate torques at the pile top

桩顶荷载 组合工况	桩顶极限扭矩/(N·m)		相对误差/%
	数值计算值	试验结果	
纯 T	4.70	4.38	7.3
$N_u/3-T$	4.00	3.80	5.3
$2N_u/3-T$	3.45	3.31	4.2

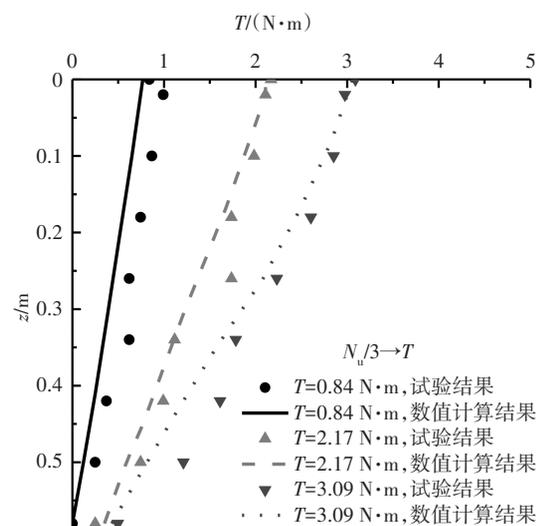


图 12 桩身扭矩分布的对比

Fig.12 Comparison of torque distribution along pile shaft

3.2 参数分析

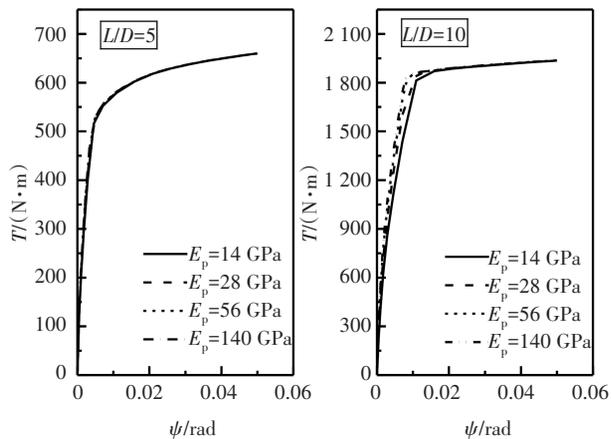
在参数分析时,桩体计算参数取值为:桩径 1.8 m,桩长 9~36 m,弹性模量 14~140 GPa,泊松比 0.3.土体计算参数参考典型海相土体取值:1) 砂土,有效重度 10 kN/m^3 ,弹性模量 20 MPa,泊松比 0.25,内摩擦角 30° ;2) 黏土,有效重度 8 kN/m^3 ,不排水抗剪强度 c_u 为 10 kPa,弹性模量取 $500c_u$ ^[18],泊松比 0.4.关于桩-土间接接触行为,法向采用“硬”接触来定义,切向采用“粗糙”接触来模拟.

3.2.1 桩身弹性模量 E_p 及长径比 L/D 的影响

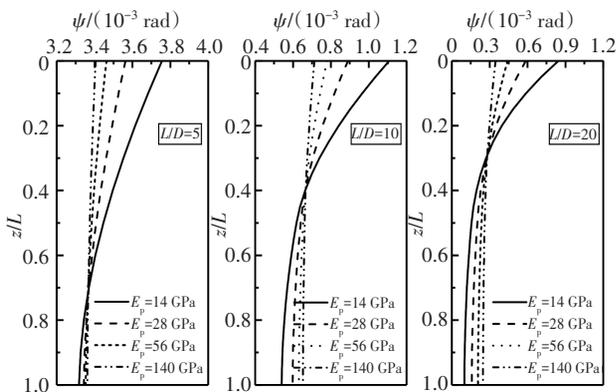
为探讨桩身弹性模量 E_p 、长径比 L/D 对 $N-T$ 联合作用下桩身承载变形的影响,分别取 4 级 E_p 和 3 级 L/D ,得到 $N \rightarrow T$ 加载顺序下桩顶扭矩 (T) - 扭转角 (ψ) 曲线及桩身扭转角沿深度 z 的分布,如图 13 所示.由图 13(a)可知:1) 对于 $L/D = 5$ 的单桩,不同 E_p 对应的桩顶荷载-位移曲线相近,说明 E_p 对 $N-T$ 联合受荷桩的扭转承载力的影响极小;2) 对于 $L/D = 10$ 的单桩,在达到其极限扭转角前,增大 E_p 可提高桩身扭转承载力;3) L/D 由 5 增至 10 时,桩身扭转极限承载力增大 3 倍多,即增大 L/D 可以明显增加桩身扭转承载力.

图 13(b)表明:1) 同一 L/D 下,桩身变形量及其沿深度衰减的速率随着 E_p 的增大而减小,如对于 $L/D = 5$ 的单桩, E_p 由 14 GPa 增至 140 GPa 时,即 E_p 增大 10 倍,桩顶扭转角仅减小 9.3%,说明增大 E_p 对提高桩身抗扭能力的效果有限;2) 同一 E_p 下,桩身扭转角会随着 L/D 的增大而显著减小,如当 $E_p = 28 \text{ GPa}$, L/D 由 5 增至 10 时,桩顶扭转角减小达到 75%;3) 不

同 E_p 下桩身扭转角分布曲线发生相交, 交点随着 L/D 的增大逐渐上移, 且交点以下桩身变形沿深度变化速率逐渐变小. 桩顶荷载的影响深度有限, 桩身变形主要发生在一定桩长范围 (约为 $0 \sim 0.6L$) 内, 故工程中也不可一味增加桩长来提高桩身抗变形能力.



(a) 桩顶 $T-\psi$ 曲线



(b) 桩身扭转变形分布

图 13 E_p 对桩身承载变形的影响

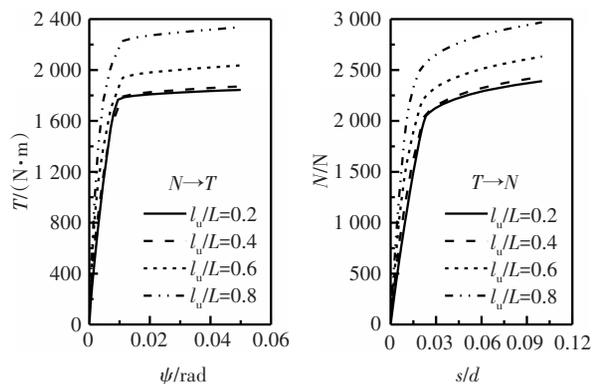
Fig.13 Effect of E_p on bearing and deformation of pile shaft

综上, 相比增大桩身弹性模量, 增大桩身长径比对减小桩身变形的效果更显著, 因此建议实际工程中可优先采用适当增大桩长的方式来提高联合受荷桩的桩身承载力并改善其桩身扭转变形.

3.2.2 相对砂土层厚度 l_u/L 的影响

为探讨上下土层分布 l_u/L 对 $N-T$ 联合作用下桩身承载特性的影响, 取 4 组不同 l_u/L 下的桩顶荷载 (T 或 N)-位移 (ψ 或 s) 曲线, 如图 14 所示. 由图 14 可知: 当 l_u/L 由 0.2 增至 0.4 时, 桩身承载力基本不变, 但 l_u/L 继续增大时, 桩身扭转、竖向极限承载力均随着 l_u/L 的增大而显著增大, 且增幅也逐渐增大, 如 l_u/L 由 0.6 增至 0.8 时, 桩身扭转、竖向极限承载力分别增大了 14.8%、12.9%, 表明增加上层砂土层厚度可有效提高

联合受荷桩的桩身承载力.

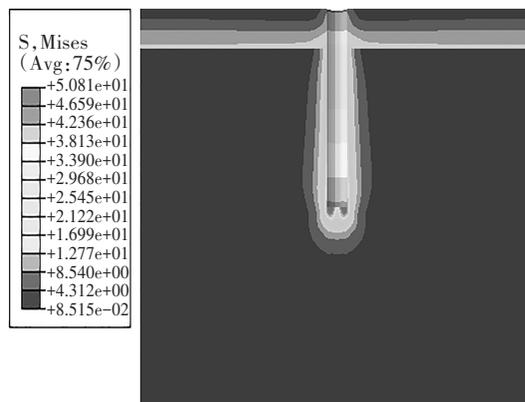


(a) 桩顶扭矩-扭转角曲线 (b) 桩身竖向力-沉降曲线

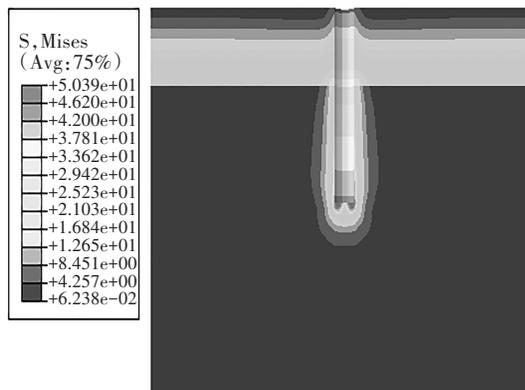
图 14 l_u/L 对桩身承载力的影响

Fig.14 Effect of l_u/L on bearing capacity of pile shaft

图 15 给出了不同相对砂土层厚度 l_u/L 对应的桩周土体米氏应力分布, 发现: 1) 应力等值面在土层分界面处出现明显界面, 且发生应力突变, 同时桩端存在应力增强现象; 2) 上层砂土中的应力等值面为近似喇叭形, 分布范围较广, 而下层黏土中的应力等值面为近似纺锤形, 且分布范围较小; 3) l_u/L 由 0.2 增至 0.4 时, 桩周土体中的应力基本不变, 但 l_u/L 继续增至 0.6 时, 桩周土体中的应力开始有了较明显的增大, 这也与上述 l_u/L 对桩身承载力的影响规律相符.



(a) $l_u/L = 0.2$



(b) $l_u/L = 0.4$

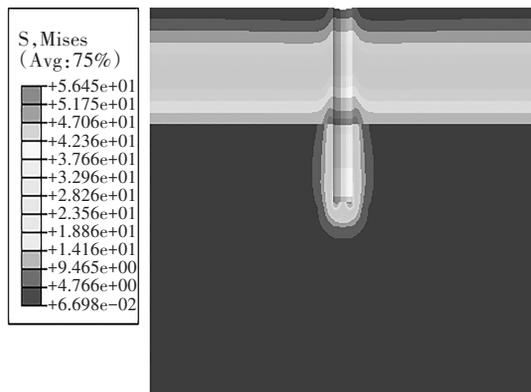
(c) $l_u/L = 0.6$

图15 桩周土体应力分布图

Fig.15 Stress distribution of surrounding soil

4 结论

通过室内模型试验,并结合有限元模拟,深入探讨了上砂下黏地基中竖向力(N)-扭矩(T)联合受荷单桩的桩身承载特性,主要结论如下:

1)相比于单一受荷,预先施加扭矩导致桩身竖向极限承载力减小约4%~16%,预先施加竖向力导致桩身扭矩极限承载力减小约13%~24%,因此实际设计时应充分考虑竖向力和扭矩之间相互耦合影响对桩身承载力的削弱作用。

2) N - T 联合作用下,桩身沉降(或扭转角)随扭矩(或竖向力)增大而增加,且当桩顶 T (或 N)达到极限值时,桩侧扭转阻力(或竖向摩阻力)全部发挥,导致桩身沉降(或扭转角)发生突变,即桩侧竖向摩阻力和扭转阻力同时存在和发挥。

3)通过拟合试验数据获得了 N - T 联合作用下的桩身承载力包络线,得出 $N \rightarrow T$ 和 $T \rightarrow N$ 两种加载顺序下的承载力包络线存在交叉,基于工程安全性考虑,宜取两包络线的交集范围。同时,给出了可依据荷载作用顺序及荷载大小选用的承载力包络线简化计算公式,可供工程应用参考。

4)桩身扭转变形主要发生在地下一定深度范围内,增加桩身长径比 L/D 相比增大桩身弹性模量 E_p 更有助于减小桩身扭转变形;增大上层相对砂土层厚度 l_u/L 也可以明显提高桩身极限承载力,因此建议工程中优选适当增加桩长或上层砂土层厚度的方式来提高桩身承载力;在上下土层分界面处,桩周土体应力出现分界,且发生明显的应力突变。

本文相关结论仅针对上砂下黏地基中竖向力和扭矩联合作用下的单桩基础,对于其他地基类型(如上黏下砂地基)及其他基础形式(如群桩基础)等,后续将进一步开展研究。

参考文献

- [1] AZADI M R E, NORDAL S, SADEIN M. Nonlinear behavior of pile-soil subjected to torsion due to environmental loads on jacket type platforms [J]. Journal of WSEAS Transaction on Fluid Mechanics, 2008, 3(4): 390-400.
- [2] 朱海涛, 陈国虞. 不让桥塌船沉的灾害性事故再发生[J]. 今日科苑, 2013(20): 114-115.
ZHU H T, CHEN G Y. Prevent bridge collapse and ship sinking from happening again [J]. Modern Science, 2013(20): 114-115. (In Chinese)
- [3] VICKERY B J. Wind effects on buildings and structures—critical unresolved problems [M]//Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1980: 823-828.
- [4] STOLL U W. Torque shear test of cylindrical friction piles [J]. Civil Engineering, 1972, 42(4): 63-65.
- [5] POULOS H G. Torsional response of piles [J]. Journal of the Geotechnical Engineering Division, 1975, 101(10): 1019-1035.
- [6] 赵明华, 刘湘宁, 杨超炜, 等. 基于非线性规划法的单桩受扭研究[J]. 公路交通科技, 2018, 35(5): 49-56.
ZHAO M H, LIU X N, YANG C W, et al. Study on single pile subjected to torsion based on nonlinear programming Method [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2018, 35(5): 49-56. (In Chinese)
- [7] ZHANG L Y. Nonlinear analysis of torsionally loaded piles in a two-layer soil profile [J]. International Journal of Geomechanics, 2010, 10(2): 65-73.
- [8] 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 X J, XU D B, WANG Y X. Elastic-plastic analysis of torsional single pile in layered subsoil [J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2014, 41(9): 72-78. (In Chinese)
- [9] ZHANG L M, KONG L G. Centrifuge modeling of torsional response of piles in sand [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2006, 43(5): 500-515.
- [10] LI Q, STUEDLEIN A W, BARBOSA A R. Torsional load transfer of drilled shaft foundations [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2017, 143(8): 04017036.
- [11] GEORGIADIS M, SAFLEKOU S. Piles under axial and torsional loads [J]. Computers and Geotechnics, 1990, 9(4): 291-305.
- [12] VOLMER B P. A study of static torsional loading on drilled shafts

- [D]. Colorado: University of Colorado Denver, 2008.
- [13] 邹新军,杜昊桐,王亚雄. 双层非均质地基中V-T联合受荷桩承载特性分析[J]. 岩土工程学报,2018,40(10):1843-1851.
ZOU X J, DU H T, WANG Y X. Bearing behavior of a single pile in double-layered nonhomogeneous subsoil under V-T combined loads[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10):1843-1851. (In Chinese)
- [14] BASACK S, SEN S. Numerical solution of single pile subjected to simultaneous torsional and axial loads[J]. International Journal of Geomechanics, 2014, 14(4):06014006.
- [15] 郭沛翰,邹新军. 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[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(11):2593-2600.
GUO P H, ZOU X J. Bearing capacity of a single pile in sand under combined vertical force-horizontal force-torque load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(11):2593-2600. (In Chinese)
- [16] 江杰,王顺苇,欧孝夺,等. 黏土地基中桩顶扭矩-竖向荷载加载路径下单桩承载特性分析[J]. 岩土力学,2020,41(11):3573-3582.
JIANG J, WANG S W, OU X D, *et al.* Analysis of the bearing characteristics of single pile under the T→V loading path in clay ground[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(11):3573-3582. (In Chinese)
- [17] 范庆来,栾茂田. V-H-T荷载空间内海上风机桶形基础破坏包络面特性分析[J]. 土木工程学报,2010,43(4):113-118.
FAN Q L, LUAN M T. Failure envelopes of bucket foundation for offshore wind turbines in V-H-T loading space[J]. China Civil Engineering Journal, 2010, 43(4):113-118. (In Chinese)
- [18] ZOU X J, HU Y X, HOSSAIN M S, *et al.* Capacity of skirted foundations in sand-over-clay under combined V-H-M loading[J]. Ocean Engineering, 2018, 159:201-218.
- [19] 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 G H, ZHANG Y Q, YANG M. 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)
- [20] 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 G M, ZHANG W M. Study on particle size effect and boundary effect in centrifugal model[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, 18(3):80-86. (In Chinese)
- [21] 邹新军,鲁彭焜. 中砂和软黏土中桩顶竖向力对桩身水平承载力影响对比分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2018,45(11):110-119.
ZOU X J, LU P K. Contrastive analysis on effect of vertical force on horizontal bearing capacity of a single pile in medium sand and soft clay[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2018, 45(11):110-119. (In Chinese)