

考虑泥皮效应的大直径超长桩离心模型试验研究

张忠苗¹, 辛公锋², 吴庆勇¹, 王年香³, 曾友金³

(1. 浙江大学岩土工程研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 山东省交通科学研究所, 山东 济南 250031; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

摘要:应用离心模型试验研究了深厚软土地基中考虑泥皮效应的大直径超长单桩的承载变形特性。试验结果表明, 考虑泥皮效应后, 桩侧极限摩阻力约为不考虑泥皮的 65%~85%, 单桩极限承载力下降约 20%。同时研究了桩径、桩长、持力层性质对单桩极限承载力和桩侧摩阻力的影响。结果表明, 高荷载水平作用下, 大直径超长桩的桩侧土层摩阻力易发生软化, 导致桩产生渐进破坏; 淤泥质粘土中, 桩侧摩阻力随桩径增加而降低, 但降低幅度较小; 桩侧摩阻力具有深度效应, 对某一特定深度土层, 随着桩进入土层深度的增加, 桩侧摩阻力下降, 可表示为 (h/R) 的函数。

关键词:大直径超长桩; 泥皮; 离心模型; 试验研究; 软化

中图分类号: TU473

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2006)12-2066-06

作者简介:张忠苗(1961-), 男, 工学博士, 教授, 主要从事基础工程与桩基础的研究、教学和检测工作。

Centrifuge model tests on super-long piles with large diameters considering mudcake effect

ZHANG Zhong-miao¹, XIN Gong-feng², WU Qing-yong¹, WANG Nian-xiang³, ZENG You-jin³

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Shandong Transportation Institute, Jinan 250031, China; 3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024, China)

Abstract: Based on the centrifuge model tests, the bearing and deformation characteristics of super-long piles with large diameters considering mudcake effect were studied. It was shown that the ultimate shaft resistance of piles considering mudcake was about 65%~85% of that without mudcake and the ultimate bearing capacity decreased about 20%. The effect of pile diameters, pile lengths and bearing stratum on ultimate bearing capacity and shaft resistance was studied. The shaft resistance degraded under heavy load. The shaft resistance of super-long piles degraded little with the increasing diameters in mucky clay. The shaft resistance decreased with the increasing embedded depth in a soil layer at a given depth and could be expressed as the function of h/R .

Key words: super-long pile with large diameter; mudcake; centrifuge model; test; softening

0 引言

随着建(构)筑物向高、大、重方向的发展,对基础承载力的要求越来越高,桩也向超长大直径方向发展。虽然大直径超长桩得到了一定应用,但影响超长桩的因素比常规中短桩更为复杂,其承载变形机理到目前为止还没有全面阐述,其研究目前也多局限于现场实测^[1-3],模型研究较少。

土工离心模型试验是一项崭新的土工物理模型技术,已成为岩土工程领域重要的试验研究方法。Hon^[4]采用离心技术进行了不同比尺的桩基试验,并与原型试验结果进行了对比,证明了用离心试验来研究桩基承载变形形状的合理性。

文献[5]对桩基的离心试验做了回顾,从中可以看到,现有的桩基离心试验一般针对常规中短桩进行,

模型和施加的荷载都比较小。Renzi^[6]研究了超大直径短桩的受力性能,原型桩相当于直径 15 m、桩长 21 m,得到了桩入土深度与阻力,桩的破坏荷载与入土深度和固结时间的关系。王年香^[5]结合苏通长江公路大桥,研究了砂土中大直径超长钻孔桩单桩和群桩的承载变形性状,但试验中并没有考虑泥皮效应。

关于桩侧泥皮对侧阻和承载力的影响,目前学者的观点并不相同。Balakrishnan^[7]通过对比分析干成孔和湿成孔灌注桩的实测结果,认为由于水或者膨润土形成的泥皮对侧阻的峰值或者临界值影响不明显,只对荷载传递曲线的形状有影响。Yu^[8]对 8 根微型桩进

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50478080)

收稿日期:2005-11-07

行了干湿不同成孔方式的抗拔试验结果表明, 随着成孔后至浇灌前时间的增加, 湿成孔的桩极限侧摩阻力在成孔 0.5~2 h 和 24 h 后分别下降 5%~10%和 20%。笔者^[9]通过室内试验发现, 与桩间土相比, 桩侧泥皮具有含水率高、孔隙比大、压缩性高、摩擦力低、抗剪强度低等特点, 桩侧泥皮形成了桩土之间的薄弱层。

本文针对逐渐得到普遍应用的大直径超长桩, 进行了考虑泥皮效应的单桩和群桩试验, 分析了泥皮对桩侧摩阻力和承载力的影响, 研究了大直径超长单桩的承载变形机理。文章对桩基理论分析与工程设计具有重要的参考价值。

1 试验原理与方案

1.1 试验原理

离心试验的理论依据为三个相似定律。用模型来模拟原型, 二者应有相同的力学控制方程。可以把模型与原型的力学平衡方程写成

原型

$$\sigma_{ij,j}^p + \rho^p (g_i^p - \ddot{\xi}_i^p) = 0 \quad , \quad (1)$$

模型

$$\sigma_{ij,j}^m + \rho^m (g_i^m - \ddot{\xi}_i^m) = 0 \quad . \quad (2)$$

式中 σ_{ij} 为应力; ρ 为单位质量; g_i 为场加速度 (重力加速度); ξ 为位移; 上标 p 表示原型, m 表示模型。

对任一物理变量 x (x 可以是 σ 、 ρ 、 g 、 l 等), 定义其模型值与原型值之比

$$\bar{x} = x^m / x^p \quad . \quad (3)$$

把式 (3) 代入式 (2), 得

$$\bar{\sigma} \cdot \sigma_{ij,j}^p + \bar{\rho} \cdot \rho^p (\bar{g} \cdot \bar{l} \cdot g_i^p - \bar{\xi} \cdot \bar{l} \cdot (\bar{t})^{-2} \cdot \ddot{\xi}_i^p) = 0 \quad . \quad (4)$$

式 (4) 是通过模型方程得到的原型方程。如果模型与原型有相同力学表现, 式 (4) 应与式 (1) 相同, 得到模型与原型相似的条件, 即

$$\bar{\sigma} = \bar{\rho} \cdot \bar{g} \cdot \bar{l} \quad , \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} \cdot (\bar{t})^2 = \bar{\rho} \cdot \bar{\xi} \cdot \bar{l} \quad . \quad (6)$$

土的力学特性呈非线性, 这取决于应力水平, 即不同的应力水平作用下土体的力学特性不同。因此, 应满足 $\bar{\sigma} = 1$, 从而实现模型与原型应力水平相等。

1.2 试验方案

对模型箱和模型桩的选取与布置, 应满足三个条

件: 最小桩距, 粒径效应, 边界条件。

(1) 最小桩距

在上部荷载作用下, 桩对桩周一定范围内的土体产生影响。美国石油学会认为影响范围为 8 倍桩径, Cooke 在伦敦粘土中实测约为 12 倍桩径^[10]。

(2) 粒径效应

对于粗粒土, Craig^[11]经研究认为, 当桩基等结构物的尺寸与模型土的最大粒径之比大于或等于 40 时, 模型土料的粒径不相似性不会对基础承载力特性有影响。徐光明^[12]提出结构物尺寸与最大粒径之比大于 23 就足够了。大量研究和试验表明, 细粒土不存在粒径效应。Garnier^[13]指出, 当 $D/d_{50} > 100$ 时, 最大剪应力的发挥没用明显的尺寸效应。

(3) 边界条件

徐光明^[12]认为模型与箱壁的距离 B 与模型尺寸 b 之比应大于 3.0, 方可以消除边界效应。

本次试验采用 1000 mm×900 mm×1000 mm 模型箱, 综合试验目的及各因素, 选模型比尺 $n = 100$ 。遵循以上三个条件, 总共进行 9 组单桩和 4 组群桩试验。模型桩尺寸及布置如图 1 所示。限于篇幅, 本文仅讨论单桩试验成果, 群桩结果另文讨论。

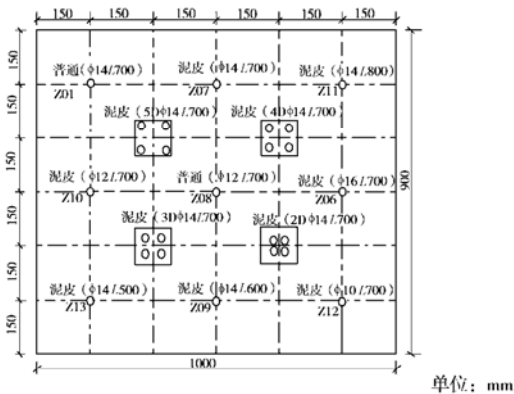


图 1 离心试验模型桩布置图
Fig. 1 Arrangement of centrifuge model piles

2 离心模型

2.1 地基土

试验采用宁波嘉和中心的现场土样, 其基本物理力学参数见表 1。

表 1 试验土样物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of test soils

土层名称	含水率 /%	重度 /(kN·m ⁻³)	孔隙比	液限 /%	塑性指数/°	压缩系数 /(MPa ⁻¹)	粘聚力 /kPa	摩擦角 /(°)
淤泥质粘土	45.6	16.1	1.7	52.6	18.1	0.95	9.8	4.2
粉砂	19.6	20.15	0.6			0.14	9.4	30.3

采用现场土样, 则可实现 $\bar{\rho}=1$ 。令 $\bar{g}=n$, $\bar{l}=1/n$, n 为模型比尺, 则式 (5) 可实现 $\bar{\sigma}=1$, 从而保证了模型每一点应力与原型相同。

以地基强度指标作为主要模拟量, 含水率、重度等参量都作为次要参量。为模拟成层地基, 根据重度及厚度求得各层土所需的湿土重, 然后经过浸饱、拌成泥浆, 从底层至上层分层静压固结, 按强度要求加预压荷载和作用时间, 直至形成整个地基土层。整个土层固结后, 淤泥质粘土高度 65 cm, 砂土 25 cm。

2.2 桩基模拟

原型桩为钻孔灌注桩, C30 水下混凝土, 弹性模量 33 GPa, 桩径分别为 1.0、1.2、1.4、1.6 m。相似率要求模型桩与原型桩刚度一致, 则应满足

$$n^2 E_m (2D_m - \delta) \delta = E_p D_p^2 \quad (7)$$

式中 n 为模型比尺; E_m 、 E_p 分别为模型桩与原型桩弹性模量; D_m 、 D_p 分别为模型桩与原型桩直径; δ 为模型桩壁厚。

试验模型桩选用封底的铝合金管, 弹性模量约 70 GPa, 外径分别为 10、12、14、16 mm, 壁厚 2 mm。按照式 (7) 计算后与原型桩刚度非常接近。

对于灌注桩粗糙度的模拟, 一般采用在桩表面粘结砂或者金刚砂纸^[8]。但这样会增加桩径, 尤其是试验比尺较大时, 影响更明显。鉴于此, 对普通桩通过拉毛来模拟桩身粗糙度; 对泥皮桩, 拉毛后在其上刷一层薄薄的泥浆, 模拟桩侧泥皮。

进行离心试验时, 应在设定离心加速度下入桩才符合现场条件。Craig^[11]研究了砂土中入桩时不同离心速度对桩基承载力的影响, 指出在较低离心加速度下入桩, 由于自重引起的应力增量会超过桩周土入桩引起的水平应力的初始增量, 导致桩承载力的显著降低。试验主要目的是研究桩基受力和变形的规律, 对于由于入桩时离心加速度不同引起的承载力改变的影响暂时不予考虑, 因此采用在 1g 环境下入桩。

2.3 加载与测量

通过计算机控制的电液伺服加荷系统对承台分级施加竖向荷载。由于单桩承载力较小, 采用位移控制方式加荷, 每次施加 0.05 mm, 每级荷载达到相对稳定后施加下一级荷载。

桩轴向应变测量采用聚胺脂精密级应变片, 基底为 3 mm×5 mm, 电阻值为 120±0.1%Ω, 测试灵敏系数为 2, 最大应变 2%。每组应变片形成全桥电路, 温度互为补偿, 并可消除弯曲影响。

位移测量采用非接触式的激光位移传感器。

3 试验结果分析

3.1 泥皮对桩侧摩阻力和桩承载力的影响

图 2 为普通桩与考虑泥皮效应桩的 $Q-s$ 曲线。极限荷载作用下各断面平均单位桩侧摩阻力见图 3。

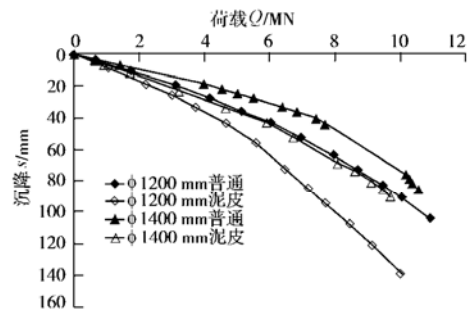


图 2 普通桩与考虑泥皮桩 $Q-s$ 曲线

Fig. 2 $Q-s$ curves of piles with or without considering mudcake

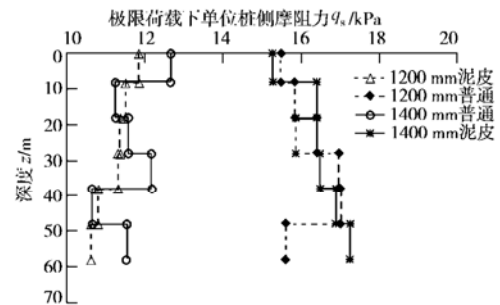


图 3 普通桩与泥皮桩极限荷载下单位桩侧摩阻力

Fig. 3 Unit shaft resistance of piles under the ultimate load with or without considering mudcake

从图 3 中可以看出, 泥皮对单桩承载力影响明显, 考虑泥皮效应时, 单桩极限承载力比普通桩小, 即在相同荷载作用下, 考虑泥皮后沉降增大, 主要是因为泥皮的存在形成了桩土之间的薄弱层, 导致桩土之间在较小相对位移下即易产生滑移, 使桩侧摩阻力降低, 这也可以从图 3 中看出, 从而导致沉降增大。

从图 2 中可以看出, 对持力层为粉砂的大直径超长桩, 考虑泥皮与不考虑泥皮桩的 $Q-s$ 曲线均为缓变型, 可见 $Q-s$ 曲线主要受桩端持力层性质的影响。按规范^[14]取桩顶沉降为 60 mm 时的承载力为极限承载力, 则考虑泥皮后单桩极限承载力分别为不考虑泥皮单桩极限承载力的 76% ($\phi 1200$ mm) 和 82% ($\phi 1400$ mm)。考虑泥皮后, 各层土单位桩侧摩阻力大大降低, 约为普通桩桩侧摩阻力的 65%~85%。

3.2 承载变形特性分析

淤泥质粘土层厚 65 cm (相当于 65 m 厚的原型地基), 对于不同桩长桩, 相当于模拟了两种持力层: 对 $L=50$ 、60 m 的桩, 持力层为淤泥质粘土, 相当于桩端有沉渣情况; 对 $L=70$ 、80 m 的桩, 持力层为粉细砂, 相当于桩端无沉渣情况。不同桩长 (持力层) Q

- s 曲线如图 4 所示。

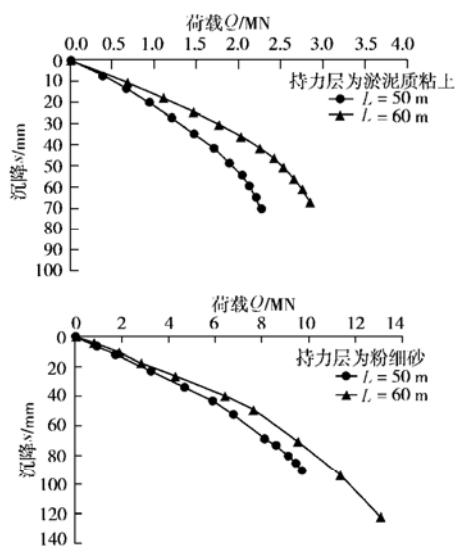


图 4 不同桩长（持力层） $Q-s$ 曲线

Fig. 4 Curve of piles with different length and different bearing strata

从图 4 中可以看出，对于持力层为淤泥质粘土层的桩，即桩端存在厚沉渣的情况，在荷载水平较高时，桩端土体破坏，产生刺入沉降， $Q-s$ 曲线存在显著的转折点，此时还没有达到规范要求变形。对持力层为粉细砂的桩，相当于桩端无沉渣情况，其 $Q-s$ 曲线为缓变型，没有明显的陡降点。这与实测规律^[3]一致。

因此，对于大直径的超长桩，在高荷载水平作用下，表现为端承摩擦桩性状，也存在清渣干净的要求。

3.3 侧阻发挥特性

将不同荷载水平作用下每层土单位桩侧摩阻力 q_s 与峰值 q_u 进行归一化，得到曲线如图 5 所示。

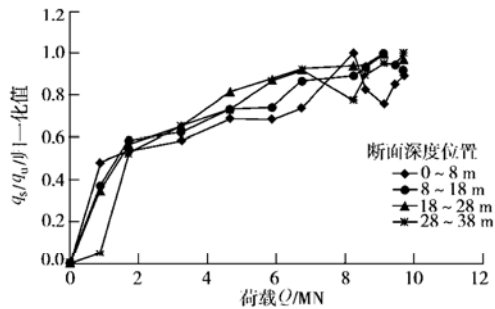


图 5 不同荷载水平作用下单位桩侧摩阻力

Fig. 5 Unit shaft resistance of model piles under different load levels

从图 5 中可以看出，随着荷载水平的增加，侧阻逐渐得到发挥，发挥到一定值后，基本不再增加，且上部土层出现不同程度的软化，与实测结果一致^[3,15]。因此对于超长大直径桩，如果持力层较好，随着荷载

水平的增加，桩侧土层侧阻会自上而下得到充分发挥，达到极值后产生软化，发生渐进破坏。

本次离心试验 Z07 模型桩、京杭运河^[15]和温州世贸中心^[3]实测发生软化土层的桩侧摩阻力峰值和残余值见表 2。从表中可看出，残余值约为峰值的 0.9 倍。

试验中部分结果表现为达到极值后不再增加，呈现为双曲线形式。主要因为人工制备的地基土为重塑土，破坏了土体结构性，难以模拟土体结构性的影响。

3.4 侧阻与桩径的关系

图 6 是极限荷载作用下各土层桩侧摩阻力与桩径的关系。采用指数形式拟合，可得二者关系为

$$q_s=14.27e^{-0.0001D} \quad (8)$$

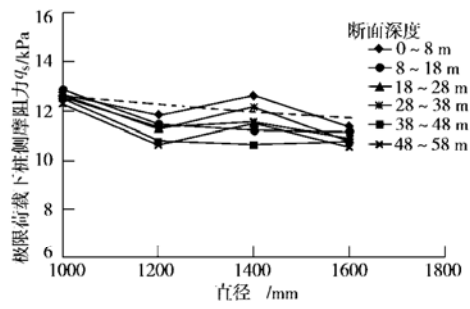


图 6 极限荷载下单位桩侧摩阻力与桩径关系

Fig. 6 Relationship between shaft resistance and diameter under the ultimate load

从图（6）和式（8）中可以看出，在淤泥质粘土中，随着桩径的增加，极限荷载作用下桩侧摩阻力整体呈下降趋势，但变化不大。即对于粘性土，桩径对侧阻的影响较小。

3.5 持力层性质对桩侧摩阻力的影响

图 7 为不同持力层极限荷载下单位桩侧摩阻力。可以看出，对 $L=50、60\text{ m}$ 的桩，即相当于桩端存在沉渣产生弱化的情况，不但会影响端阻导致桩端产生刺入破坏，而且使侧阻降低，远小于桩端持力层较好的桩（ $L=70\text{ m}$ ），与实测规律^[1,3]一致。

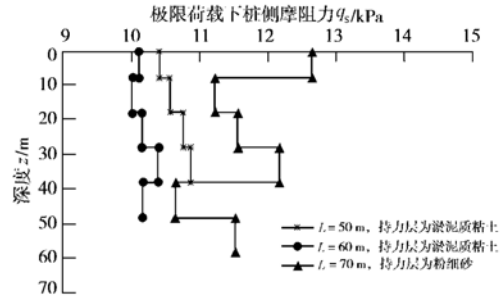


图 7 不同桩长（持力层）极限荷载下单位桩侧摩阻力

Fig. 7 The ultimate shaft resistance of piles with different lengths (bearing stratum)

表 2 试验与实测单位桩侧摩阻力残余值与峰值

Table 2 Residual and peak unit shaft resistances of lab and field tests

	离心试验		京杭运河试桩		温州世贸中心试桩		
断面深度/m	0~8.0	8.0~18.0	0~2.0	2~6.4	0~4.2	4.2~16.2	16.2~28.2
峰值/kPa	14.06	12.66	71.67	64.46	13.48	16.14	33.25
残余值/kPa	12.56	11.64	60.75	59.39	11.36	15.04	30.41
残余值/峰值	0.89	0.92	0.85	0.92	0.84	0.93	0.91

一般认为桩侧摩阻力是桩土相对位移和桩土摩擦性状的函数，与桩的入土深度无关。但从图 7 中可以看出，对某一特定深度土层， $L = 50\text{ m}$ 的桩其侧阻要大于 $L = 60\text{ m}$ 的桩，即桩侧摩阻力进入持力层具有深度效应，对某一特定深度的土层，随着桩进入土层深度的增加，桩侧摩阻力下降。Jardine^[16]认为桩侧水平应力即桩侧摩阻力以式 (9) 降低，即

$$q_s \propto (h/R)^{-r} \tag{9}$$

式中 r 为系数，根据统计结果取 0.38; h 为桩端以上深度; R 为桩半径。

将试验中测得 $L=50、60\text{ m}$ 的单位桩侧摩阻力平均值进行计算，得 $q_s^{-50}/q_s^{-60} = 1.05$ ，与按照 Jardine 公式计算结果 1.07 非常接近。

因此在桩基础设计尤其是超长桩的设计中，其桩侧摩阻力要考虑这种深度效应。

3.6 桩径对承载力的影响

不同桩径 $Q-s$ 曲线如图 8 所示，其极限承载力如图 9 所示。从图中可以看出，随着桩径的增加，单

桩承载力增大。随着荷载水平的进一步增加，桩径的影响更加明显。因此，对于超长桩，增大桩径能显著提高单桩承载力，但桩径增加会明显增加混凝土用量，并不经济，同时施工也变得相对困难，因此应根据工程实际选取一个合适的长径比。

4 结 语

(1) 大直径超长桩在高荷载水平作用下，表现为端承摩擦桩性状。桩端存在厚沉渣时易产生刺入破坏。持力层较好时， $Q-s$ 曲线呈缓变型，宜按照变形控制的原则确定其承载力。

(2) 桩侧泥皮对桩侧摩阻力和承载力有较大影响。考虑泥皮后，桩侧摩阻力约为不考虑泥皮的 65%~85%，单桩极限承载力下降约 20%。

(3) 在高荷载水平作用下，大直径超长桩的侧摩阻力易发生软化，导致桩产生渐进破坏。桩侧摩阻力残余值约为峰值的 0.9 倍。

(4) 淤泥质粘土中随着桩径增加，桩侧摩阻力降低，但降低幅度较小。桩侧摩阻力具有深度效应，对某一特定深度的土层，随着桩进入土层深度的增加，桩侧摩阻力下降，可表示为 h/R 的指数函数。桩侧摩阻力深度效应的机理还需要进一步的研究。

参考文献:

[1] 张忠苗. 软土地基超长嵌岩桩的受力性状[J]. 岩土工程学报, 2001,23(5): 552 - 556. (ZHANG Zhong-miao. The endurance of super-long piles in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(5): 552 - 556.)

[2] 朱向荣, 方鹏飞, 黄洪勉. 深厚软基超长桩工程性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003,25(1): 76 - 79.(ZHU Xiang-rong, FANG Peng-fei, HUANG Hong-mian. Research on super-long pile in soft clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(1): 76 - 79.)

[3] 张忠苗, 辛公锋, 夏唐代, 等. 高荷载水平下超长桩承载性状试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005,24(13): 2397 - 2402. (ZHANG Zhong-miao, XIN Gong-feng, XIA Tang-dai, et al. Experimental study on the behaviors of overlength piles under heavy load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and

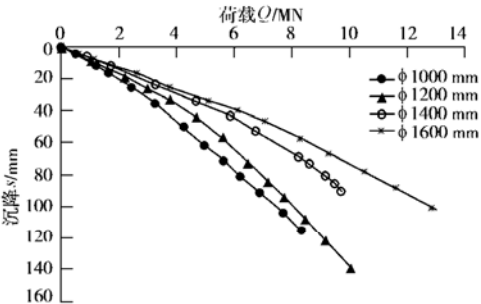


图 8 不同桩径 $Q-s$ 曲线 (考虑泥皮)

Fig. 8 $Q-s$ curves of piles with different diameters (considering mudcake)

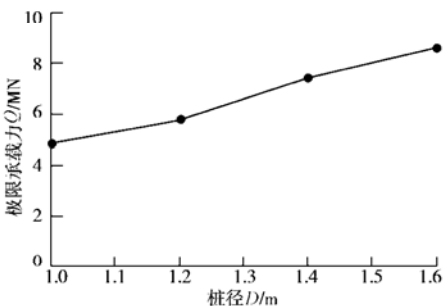


图 9 单桩极限承载力与桩径的关系

Fig. 9 Relationship between the ultimate capacity and the diameter of piles

- Engineering, 2005, **24**(13): 2397 - 2402.)
- [4] HON Y K, ATKINSON R H, GOBLE G G, et al. Centrifuge modeling of pile foundation[C]// Analysis and Design of Pile Foundation. 1984: 21 - 40.
- [5] 曾友金, 章为民, 王年香, 等. 桩基模型试验研究现状[J]. 岩土力学, 2003, **24**: 674 - 680. (ZENG You-jin, ZHANG Wei-min, WANG Nian-xiang, et al. Reviews of state-of-art of modeling simulation on pile foundations[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, **24**: 674 - 680.)
- [6] RENZI R, MAGGIONI W, SMITS F. A centrifuge study on the behavior of suction piles[C]// Proceedings of the International Conference Centrifuge, Colorado. 1991:169 - 176.
- [7] BALAKRISHNAN E G, BALASUBRAMANIAM A S, NOPPADOL Phien-wej. Load deformation analysis of bored piles in residual weathered formation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1999, **125**(2): 122 - 131.
- [8] YU J. Effects of construction on axial load transfer along bored piles in residual soils[D]. Singapore: Nanyang Technology University, 2000.
- [9] 张忠苗, 张广兴, 吴庆勇, 等. 钻孔桩泥皮土与桩间土性状试验研究[J]. 岩土工程学报, 2006, **28**(6): 695 - 699. (ZHANG Zhong-miao, ZHANG Guang-xing, WU Qing-yong, et al. Test study on the characteristics of mudcake and middle soil of bored piles[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, **28**(6): 695 - 699.)
- [10] 曾友金, 王年香, 章为民. 软土质地区微型桩基础离心模型试验研究[J]. 岩土工程学报, 2003, **25**(2): 242 - 245. (ZENG You-jin, WANG Nian-xiang, ZHANG Wei-min. Study on centrifuge model tests of mini-pile foundation in soft soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, **25**(2): 242 - 245.)
- [11] CRAIG W H. Installation studies for model piles[C]// Proceedings of Symposium on the Application of Centrifuge Modeling to Geotechnical Design, Manchester. 1984: 440 - 455.
- [12] 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 Guang-ming, ZHANG Wei-min. The study on the particle and boundary effect of centrifuge tests[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1996, **18**(3): 80 - 86.)
- [13] GARNIER J. Scale effects in piles and nails loading tests in sand[C]// Centrifuge 98, Rotterdam. 1998: 205 - 210.
- [14] JGJ 94-94 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1995. (JGJ 94-94 Technical code for building pile foundation[S]. Beijing: China Architecture and Building Press, 1995.)
- [15] 石明磊. 大直径钻孔灌注桩的承载力与沉降研究[D]. 南京: 东南大学, 2002. (SHI Ming-lei. Study on the capacity and settlement of large diameter bored piles[D]. Nanjing: Southeast University, 2002.)
- [16] JARDINE R J, CHOW F C. New design methods for offshore piles, MTD96/103[M]. London: Marine Technology Directorate, 1996: 85 - 106.