

文章编号: 1000-7598 (2014)增 2-0332-06

安哥拉格埃路砂地层的承载力研究

彭友君¹, 岳 栋¹, 彭 博², 安育芳¹

(1.北京城建勘测设计研究院有限责任公司, 北京 100101; 2.北京城建设计发展集团股份有限公司, 北京 100037)

摘 要: 安哥拉格埃路地层 (Quelo) 棕红色砂土形成年代较长, 低含水率下地基承载力较高, 但遇水后地基承载力降低幅度较大, 地基处理方案常有争议。大量的工程实践和专项研究表明, 地基土的承载力与含水率有明显的相关性, 通过探井取样和原位测试, 查明了地基土的物理力学特性, 分析不同含水率条件下的静力触探试验(CPT)和平板载荷试验(PLT)数据, 建立了适用于该地层的地基承载力与含水率的幂函数关系式以及地基承载力与锥头阻力的线性经验公式。静力触探试验结果表明, 地层锥头阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s 随深度增加而逐渐提高, 土质均匀, 但摩阻比 R_f 较小。分析认为, 采用不经碾压的砂土作为地基, 具有较高的风险; 对于多层及 9~13 层建筑的地基处理, 采用换填垫层法较桩基更合理。

关 键 词: 安哥拉; Quelo 砂; 平板载荷试验; 静力触探; 含水率; 承载力公式

中图分类号: TU 431

文献标识码: A

Research on bearing capacity of Angola Quelo sand strata

PENG You-jun¹, YUE Dong¹, PENG Bo², AN Yu-fang¹

(1. Beijing Urban Construction Exploration & Surveying Design Research Institute Co., Ltd., Beijing 100101, China;

2. Beijing Urban Construction Design & Development Group Co., Ltd., Beijing 100037, China)

Abstract: Brownish-red(Quelo) sand in Angola has formed for a long time. In low moisture content, the soil has high bearing capacity; but it will reduce largely when meeting water. Ground treatment schemes often have different views. An amount of project practice and special researches prove that, there is a obvious correlation between bearing capacity and moisture content. Through sampling in pit and in-situ tests; the physico-mechanical properties of the soil are identified; through analyzing the cone penetration test (CPT) and plate loading test (PLT) results with different moisture content, a power function relationship between bearing capacity (f_{ak}) and moisture content for this soil is built; and a linear empirical formula between bearing capacity(f_{ak}) and cone resistance(q_c) is given too. CPT results indicate that cone resistance(q_c) and side friction resistance(f_s) gradually increase with depth; soil is even, but friction-resistance ratio(R_f) is small. According to the analysis, it is high risk taking the non-rolled soil (original soil) as subsoil. For multi-storey and 9-13 storey buildings, using replacement layer of compacted fill is more reasonable than pile foundation.

Key words: Angola; Quelo sand; plate loading test; static cone penetration test; moisture content; bearing capacity formula

1 引 言

非洲安哥拉首都罗安达及以北的大西洋沿海城市的浅层广泛分布了一种名为格埃路 (Quelo) 地层的红色粉细砂, 是多层建筑的主要地基持力层, 由于这种砂土遇水之后, 承载力显著降低, 出现了很多比较严重的房屋建筑开裂案例, 受到在安哥拉从事岩土工程勘察的工程技术人员及国内专家学者的高度关注和重视。研究这种土层的承载力特征, 对

于在安哥拉体量巨大的工程建设中, 确定经济合理的地基处理方案具有重要的意义。

安哥拉自 2002 年国家和平稳定以来大量吸收了中资公司为其开发建设住房、公共建筑和大型基础设施, 但由于多年来中资公司对岩土工程系统研究主导性不足, 中西方在建筑理念和执行的标准方面存在差异, 需要通过技术交流进行沟通。为此, 笔者等在该地基土上开展了系列岩土工程试验, 重点研究承载力特征值的取值和沉降变形分析, 研究

收稿日期: 2014-04-15

第一作者简介: 彭友君, 男, 1962 年生, 本科, 教授级高级工程师, 注册岩土工程师, 主要从事工程勘察、地基检测和岩土工程设计与施工。E-mail: pengyj0005@163.com

成果对正在商谈的各类建筑地基设计可提供更多的技术支持。

2 地基土层概述

罗安达 KK150 栋项目是 KK 一期工程的延续工程, 紧邻 KK 一期工程之南, 由西向东依次分为 7 个地块, 分别建设 5、9、11 层 3 种类型的居民住房, 建设场地地表下均为格埃路 (Quelo) 砂土层, 无明显层理, 不均匀系数 $C_u = 11.15$, 曲率系数 $C_c = 2.02$, 平均粒径 $d_{50} = 0.169$, 颗粒级配良好^[1]。不同地块或同地块植被稀疏不同, 含水率明显不同, 地基强度有显著差异。

2.1 土层的成因年代

安哥拉地质勘探服务公司编制了安哥拉全境 1:10 万地质图, 供工程建设技术人员参考使用。该图表明, 格埃路 (Quelo) 地层代号为 N_2-Q_{q1} , 为更新世 $N_2 \sim Q_2$ 时期形成的棕红色砂土^[2]。一般厚度为 6.0~17.0 m, 中密~密实, 天然状态砂土上部的超固结比 $OCR = 1.1 \sim 3.5$, 主要为超压密土^[3]。格埃路 (Quelo) 砂土之下局部可见冲洪积成因的砂卵石层, 其下的基岩为渐新世的泥岩、灰岩、泥灰岩、砂岩等。

2.2 土层的颗粒组成

在项目勘察过程中对格埃路 (Quelo) 砂土层做了 200 多例的颗粒分析试验, 试验结果总体差异性不大, 平均值为: 砂粒 ($2 \text{ mm} \geq d > 0.075 \text{ mm}$) 占总重的 75%, 粉粒 ($0.075 \text{ mm} \geq d > 0.005 \text{ mm}$) 占总重的 20%, 黏粒 ($d \leq 0.005 \text{ mm}$) 占总重的 5%, d 为粒径。

按照《土工试验方法标准》^[4]进行颗分试验, 定名为粉砂、细砂。因将采用欧洲标准的分类方法, 从收集到安哥拉 MOTA - ENGIL 公司地基及岩土工程部对 Quelo 砂层场地的勘察报告看, 采用 ASTM 土的统一分类标准, 该砂土层定名为粉土质砂或黏土质砂。

砂土样的矿物成分鉴定结果为: 石英占 90%, 高岭土占 5%, 氧化铁占 5%。通常情况下以石英砂为主的地层, 裸露的边坡容易被地表水冲刷, 很难形成直立的陡坎, 但在安哥拉随处可见格埃路砂层上近于直立的开挖边坡, 没有任何加固措施长年在雨水冲刷作用下也基本稳定^[5], 可能是砂土中的高岭土成分对砂粒的黏结起着关键作用。

2.3 土的主要物理力学性质指标

在格埃路 (Quelo) 红砂土地层中, 由于砂土层

中无水 (地下水埋深 95 m), 钻孔取原状砂样比较困难, 当砂土层的含水率大于 4.0% 时, 采用探井取样能够获得变异系数较小的试验结果, 在 KK 建设场地约 4 km^2 的勘察中, 对 60 多个探井土样试验结果进行了统计, 见表 1。

表 1 地基土的主要物理力学指标
Table 1 Main physico-mechanical indices of foundation soil

指标	w / %	$\rho / (\text{g}/\text{cm}^3)$	$\rho_d / (\text{g}/\text{cm}^3)$	孔隙比 e	$E_{s0.1-0.2} / \text{MPa}$
均值	5.1	1.85	1.65	0.625	12.0

注: w 为含水率; ρ 为密度; ρ_d 干密度; e 为孔隙比; $E_{s0.1-0.2}$ 为压缩模量。

采用重型击实试验获得砂土的最大干密度 ρ_d 为 2.05~2.10 g/cm^3 , 最优含水率为 6.5%~7.5%, 较大的击实试验干密度是格埃路 (Quelo) 砂土层作为碾压换填垫层的最佳材料。

砂土在最优含水率下经过 18 t 以上的振动碾碾压 8~11 遍后, 压实系数 $\lambda \geq 0.95$, 孔隙比的平均值 $e = 0.4$, 具有欠固结砂岩的感观。在 1.0~2.0 m 厚的换填垫层上进行平板载荷试验表明, 最大加载到 720~800 kPa 时, 累计沉降量仅为 1~3 mm, p - s 曲线均为一条直线, 承载力很高。

3 土层的现场测试

已有的研究表明, 湿陷性土的湿陷变形量随含水率的增加而增加, 当含水率达到一定的量级后, 湿陷性基本消除^[6]。鉴于湿陷性消失后, 类似地基土的承载力研究多采用载荷试验和静力触探试验相结合的方法^[7], 因此, 除了已完成的载荷试验外, 笔者等又开展了大量的静力触探试验。

3.1 静力触探设备

静力触探为 5 t 贯入力的车载自行式设备, 采用国际通用的双桥探头^[8], $\phi = 43.7 \text{ mm}$, 锥头顶角为 60° , 探头横截面积 $A_c = 15 \text{ cm}^2$, 摩擦筒面积 $A_s = 300 \text{ cm}^2$, 采样间隔为 0.1 m。

3.2 原生态场地的静力触探

A 地块地表为原生态, 植被自然生长, 人类活动痕迹很少, 在选定的 A6 楼试验场地上, 完成 3 个孔的静力触探, 孔号为 A6-2~A6-4, 地面标高相对 $\pm 0 = 109.95 \text{ m}$, 为 -1.0 m, 3 个静力触探孔的锥头阻力 q_c 和侧壁摩阻力 f_s 数值大小和随深度变化的曲线特征基本相同, 如图 1 所示。

在同一场地钻孔 6 个, 孔深 15.0 m, 取样间隔为 1.0 m, 共取 69 个土试样, 取样过程中发现砂层

钻进非常困难,地面 2.0 m 以下的砂层干燥呈粉碎状,无法获取高质量的原状土样,现场改为取环刀样,取样过程中发现,由于土层的含水率极低,土样制备受人为因素影响,除了含水率试验数据可信度较高外,其他土工试验数据非常离散,不宜用于砂土层的工程性质评价。 w 、 q_c 和 f_s 参数见表 2。

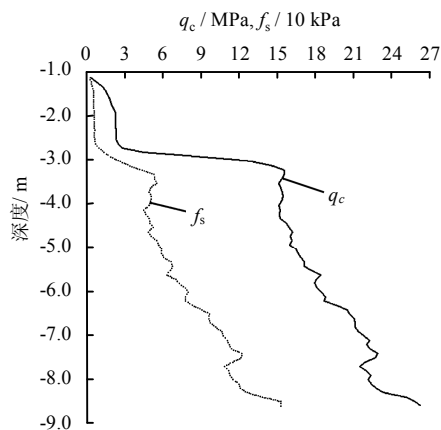


图 1 A6-2 孔静力触探曲线

Fig.1 A6-2 CPT curves

表 2 原生态场地的静力触探平均值

Table 2 CPT mean values in original ecological sites

标高/m	q_c / MPa	f_s / kPa	含水率 w / %
-1.0~-2.8	1.6	6	4.5
-3.0~-4.0	15.9	72	3.2
-4.0~-5.0	18.2	86	3.7
-5.0~-6.0	19.3	103	3.4
-6.0~-7.0	21.1	121	3.4
-7.0~-8.0	22.6	147	3.3
-8.0~-9.0	23.9	149	3.3

由表 2 和图 1 可以看出, (1) 地表下 0.0~1.8 m 为常年大气降水渗入与蒸发的深度,土的含水率随季节变化。试验期间为雨季,砂土的含水率 4.5% 比下面的砂土层高, q_c 和 f_s 较低,土质松散; (2) 标高-3 m 以下土层含水率均小于 4.0%,砂土层的 q_c 和 f_s 突然变大,从标高-3~-9 m, q_c 从 15.9 MPa 随深度线性增加到 23.9 MPa, q_c 值较大,地层具有较高的强度; (3) 根据北京地区的砂土层静探经验,当 q_c 达到 15~20 MPa 时, f_s 可达到 200~350 kPa,而本砂土层天然状态下 $q_c > 20$ MPa 时, f_s 尚不到 150 kPa,摩阻比 $R_f = 0.3 \sim 0.6$,比较异常。

3.3 土层浸水作用下的静力触探

在上述试验场地开挖基坑到基底设计标高 -2.5 m (挖深 1.5 m),对基底地基土洒水,用 18 t 的振动碾碾压 6~8 遍,然后在基坑中部开挖边长为 5.0 m、深度为 0.5 m 的正方形浸水坑,在坑内连续

注水 7 d,保持水面不低于 0.4 m,待浸水坑的水未全部渗入到土层中之前,回填浸水坑,在浸水坑范围内分别完成取土和静力触探 3 个孔,本试验开挖和碾压步骤与 KK 一期换填垫层之下地基土的处理方式和深度相同,砂土地基处于极端浸水饱和状态后, w 、 q_c 和 f_s 成果见图 2 和表 3。

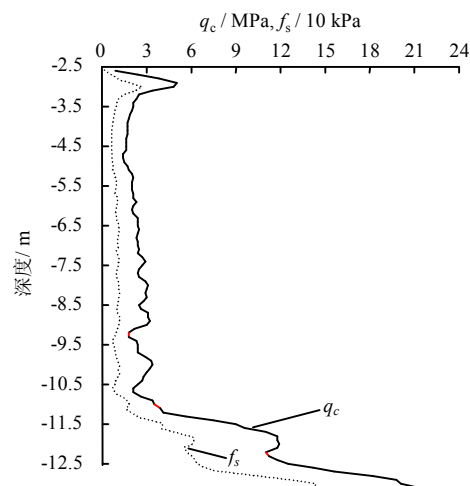


图 2 A6w-1 孔的静力触探曲线

Fig.2 A6w-1 CPT curves

表 3 浸水作用下静力触探平均值

Table 3 CPT mean values after water immersion

标高/m	q_c / MPa	f_s / kPa	含水率 w / %
-2.5~-3.0	3.8	15	6.0
-3.0~-3.5	2.2	10	6.1
-3.5~-4.5	1.7	6	8.1
-4.5~-5.5	1.9	7	8.6
-5.5~-6.5	2.4	9	9.0
-6.5~-7.5	2.6	10	9.1
-7.5~-8.5	3.0	12	9.4
-8.5~-9.5	3.1	13	9.5

从图 2 和表 3 中可以看出, (1) 标高-2.5~-3.5 m 处, q_c 和 f_s 明显比其下的地层高,可以判定地基土洒水碾压的有效加固厚度为 1.0~1.1 m,之下的砂土层与表 2 中相同标高相比, q_c 和 f_s 均大幅度减少; (2) 地层连续浸水 8 d,饱和土深度为 8.7 m,水渗透影响深度为 10.5 m; (3) 标高-3.5~-5.5 m 的砂土地层,是换填垫层之下的主要受力层, q_c 平均值达到 1.7~1.9 MPa; (4) 摩阻比 R_f 为 0.2~0.3, f_s 平均值在标高-2.5~-11.5 m 之间仅为 6~21 kPa,采用静探数据进行桩基设计时,可获得的摩擦力较少^[9]。

3.4 人类活动区的静力触探

由于安哥拉罗安达地区年降雨量仅为 400 mm,地层的含水率较低,原生态条件下的 A、B 地块试

验结果说明了埋深 2 m 以下, 地层的含水率小于 4.0% (见表 2), 但居民住房建成后, 由于人类活动的作用, 特别是雨污水管道渗漏和植被养护, 增加了地层的含水率, 为查明该条件下的静力触探数据, 在拟建场地的施工营地内进行了 7 个静力触探试验, 静力触探孔位置围绕人工开挖的储水池东南西 3 个方向布置。储水池已经建成和储水 4 年多, 面积大约为 25 m×30 m, 常年人工注水保持水体厚度大于 1.0 m, 水面比地面低 0.8 m, 水池内有芦苇生长并豢养水鸭数只, 紧靠储水池边缘 1.0 m 的 3 个静力触探孔号为 C3~C5, 用洛阳铲在孔边取含水率试样。3 个静力触探的 q_c 和 f_s 数值大小随深度变化曲线特征基本相同, 并且与图 2 的情形非常近似, w 、 q_c 和 f_s 成果见表 4。

表 4 人类活动区的静力触探平均值
Table 4 CPT mean values in area of human activity

深度 / m	q_c / MPa	f_s / kPa	含水率 w / %
0.0~1.0	2.4	11	6.0
1.0~2.0	2.7	13	6.5
2.0~3.0	2.8	10	6.7
3.0~4.0	2.8	10	6.8
4.0~5.0	3.1	11	6.2
5.0~6.0	3.4	12	6.0
6.0~7.0	3.8	14	
7.0~8.0	4.4	18	
8.0~9.0	5.3	24	
9.0~10.0	5.7	27	

表 4 中仅列出了 10.0 m 深度内的部分数据, 可以看出, (1) 由于受人工储水池渗漏的影响, 静力触探试验点含水率在 5.6%~6.8% 之间; (2) 砂层的 q_c 和 f_s 比表 2 所列数据低很多, 深度 13 m 内含水率均大于 4.0%; (3) 地基主要受力层 (埋深 2.0~3.0 m) 最小平均值 $q_c = 2.8$ MPa, 往下逐渐缓慢增大, 没有发现更加软弱的下卧层; (4) 深度为 10.0 m 内的 $f_s = 10 \sim 27$ kPa。

3.5 现场载荷试验

为了查明格埃路 (Quelo) 地层的地基承载力, 在 KK 一期工程中的每个地块都进行了天然地基土的载荷试验、地基土浸水 24 h 后的载荷试验及在稳定 200 kPa 压力下开始浸水的现场载荷试验; 两次专项研究在试验场完成载荷试验后, 又分别开展了静力触探的对比测试, 在试验场中间的浸水坑还进行了取土、标贯和静力触探试验, 载荷试验在不同的深度进行, 取得了比较丰富的测试结果。

3.5.1 天然状态下的载荷试验

天然状态下地基土的载荷试验在地表之下

1.5~2.0 m 进行, 圆形压板面积为 0.50 m² 和 0.25 m² 两种规格, 根据载荷试验 $p-s$ 曲线, 地基承载力特征值按照《建筑地基基础设计规范》^[10] 附录 C 规定的方式取值, 当砂土层的含水率小于 4.0% 时, 载荷试验在设计最大荷载条件下, 沉降累积量均小于 3 mm, 一般为一条平缓的直线, 没有得到确定的承载力特征值; 当土层的含水率大于 4.0% 时, 载荷试验均能按规范确定承载力特征值, 试验成果见表 5。

表 5 天然状态下的载荷试验成果
Table 5 PLT results in soil strata

试验 编号	试验 日期/年-月	深度 / m	含水率 w / %	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	孔隙比 e	承载力 f_{ak} / kPa
12-27	2008-03	1.60	5.1	1.72	0.549	150
16-15	2008-03	1.85	3.2	1.66	0.663	240
13-17	2008-04	1.55	4.8	1.62	0.654	147
17-12	2008-04	1.55	2.8	1.71	0.641	>300
20-1	2008-05	1.60	5.9	1.60	0.676	131
19-12	2008-07	1.55	3.9	1.71	0.665	>360
15-G	2008-07	1.75	2.3	1.60	0.672	>360
22-31	2008-08	1.70	3.6	1.62	0.653	>400
18-24	2008-09	1.50	4.1	1.65	0.651	220

注: 试验编号为 KK 一期工程的地块号和建筑楼号。

天然地基土的承载力特征值与孔隙比和土的干密度关系不明显, 当天然地基土的含水率大于 4.0% 时, 载荷试验能够获得承载力的准确数值。

3.5.2 地基土浸水作用下的载荷试验

承压板规格同上, 承压板下铺设 2 cm 厚的砾石层, 试验土层浸水 24 h 后开始试验。试验中继续浸水, 完成后采用环刀和洛阳铲取载荷试验影响深度范围内的砂土试样, 测定含水率和密度等指标, 载荷试验成果见表 6。由表可以看出, 地基土不间断浸水 24 h 或连续浸水 8 d 后, 地基土的含水率为 7.4%~10.5%, 当地基处于最不利的浸水作用状态时, 承载力特征值 f_{ak} 较低。

表 6 浸水作用下的载荷试验成果
Table 6 PLT results after water immersion

试验 编号	试验 日期/年-月	深度 / m	含水率 w / %	干密度 ρ_d /(g/cm ³)	孔隙比 e	承载力 f_{ak} / kPa
18-24	2008-09	1.60	10.5	1.62	0.667	95
ST1-2	2011-08	1.00	7.4			130
ST1-3	2011-08	1.00	11.1			100

4 地基承载力分析

格埃路 (Quelo) 红色砂土地层在含水率 $w < 4.0\%$ 时, 湿陷系数一般为 0.030~0.070, 属于中等湿陷土^[11]。大型试坑浸水试验表明, 在砂土层自重压力

下浸水 288 d 的过程中, 试坑内 15 个浅层沉降标和 22 个深层沉降标均没有测量到沉降值, 所有的沉降标反而抬升了 13~19 mm, 说明试验场地属于非自重湿陷场地^[3]。天然状态下格埃路(Quelo)砂含水率较低, 属于非饱和土范畴, 而对于非饱和湿陷性土, 其湿陷过程就是由于水的楔入导致广义吸力的逐渐丧失, 土体的结构性遭到破坏, 孔隙比变小, 湿陷性基本消失^[12], 这一湿陷机理通过浸水载荷试验和湿陷固结试验也得到了证明。但是, 土层浸水后如何根据土工试验指标和现场试验成果确定承载力, 也是地基设计计算非常关心的问题。

4.1 承载力特征值与含水率的关系式

当土的 $w < 4.0\%$ 时, 承载力特征值 f_{ak} 均大于 300 kPa, 分析表 5、6 中的 10 个载荷试验结果绘出散点图发现, 载荷试验与含水率具有幂函数关系, 通过回归分析建立了地基土承载力特征值 f_{ak} (kPa) 与含水率 w 相关关系:

$$f_{ak} = 652w^{-0.831} \quad (1)$$

式中: 相关系数 $R^2 = 0.942$, 拟合信度高, 如图 4 所示。

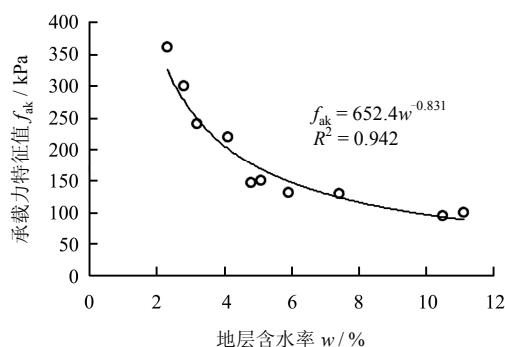


图 3 含水率与承载力特征值关系
Fig.3 Correlation between w and f_{ak}

取土样情况表明, 格埃路(Quelo)红色砂土地层在极端浸水后, 最大含水率 $w = 10.8\%$, 土中的水开始析出, 所以式(1)的适应范围为: 含水率 $4.0\% \sim 10.0\%$, 埋深为 1.5~5.0 m 的地基土层。

4.2 承载力特征值与锥头阻力的关系式

格埃路(Quelo)红色砂土地层的静探曲线均无锯齿形状, 土层内无硬质粗颗粒, 土质均匀。试验表明, 当含水率小于 4.0% 时, 地面下 3.0~5.0 m 深度的 q_c 值平均达到 15.9 MPa; 在极端浸水状态下, 含水率由小于 4.0% 变为 8.6% 时, q_c 值平均下降到 1.7 MPa, 同地点同深度的 q_c 减少了 9.3 倍, f_s 减少了 14 倍, 可见含水率对锥头阻力值的影响很大。规范要求确定地基承载力特征值采用不低于塑限含水

率的试验结果^[11], 因此, 评估地基的承载力时地层宜符合 $4.0\% \sim 8.6\%$ 的含水率条件或采用浸水后的测试数据。

目前载荷试验与静力触探试验的对比研究成果还较少, 但已获得了埋深 2.0~4.0 m 承载力特征值 f_{ak} 与锥头阻力 q_c 的代表性对应数据, 见表 7。

表 7 q_c 、 f_{ak} 数据组
Table 7 q_c and f_{ak} corresponding data

对比试验组	q_c / MPa	f_{ak} / kPa
1	1.66	120
2	2.24	140
3	2.93	160

查阅《工程地质手册》(第四版)^[13]中所有的经验公式, 涉及砂土及粉土的锥头阻力计算承载力公式主要是线性和幂函数经验公式, 考虑到目前载荷试验与静力触探试验的对比资料还比较少, 为了开展下步工作, 按照表 7 的数据, 建立了 f_{ak} (kPa) 与 q_c 的线性关系:

$$f_{ak} = 31.4q_c + 68 \quad (2)$$

式中符号意义同前。

式(2)相关系数 $R^2 = 0.9975$, 拟合信度很高, 如图 5 所示。

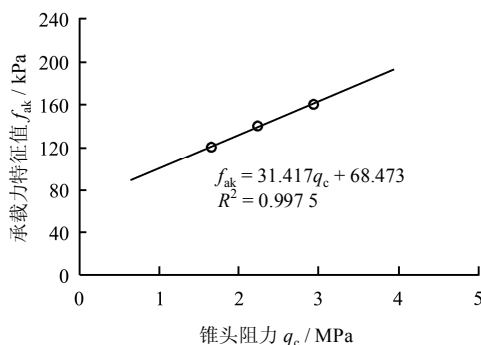


图 4 f_{ak} 与 q_c 关系
Fig.4 Correlation between f_{ak} and q_c

需要指出的是, 当地层含水率小于 4.0% 时, 锥头阻力 q_c 一般大于 10 MPa, 根据表 5 的成果, 地基土的承载力特征值 f_{ak} 一般大于 300 kPa, 式(2)不适用。

5 结 论

(1) 罗安达地区降雨渗透深度为地表下 1.6~1.8 m, 砂土层松散, 承载力较低, 如果该深度的砂土层不经处理而采用浅埋基础, 在雨季或地下水环

境改变时, 容易产生过大的差异沉降。

(2) 格埃路(Quelo)砂土地层的承载力与含水率具有幂函数关系, 当含水率低于 4.0% 时, 承载力特征值均超过 300 kPa, 地层遇水后, 地基承载力明显减少, 地基强度和稳定性评估需考虑地基土具有合适含水率的前提。

(3) 格埃路(Quelo)砂土地层的锥头阻力和侧壁摩阻力随深度逐渐提高, 没有软弱下卧层, 地层中大于 2 mm 的粗颗粒很少。载荷试验表明, 在地表长期渗漏水的情况下, 天然地基承载力特征值为 160 kPa, 极端浸水条件下地基土的承载力为 120 kPa。实践证明, 对于多层和 9~13 层建筑, 即使考虑地基在极端浸水的情况下, 采用加设一定厚度的碾压换填垫层, 在满足基础应力扩散要求的条件下, 满足沉降变形要求是有保障的。

(4) 格埃路(Quelo)砂土地层可以通过测定含水率, 利用式(1)估算地基承载力特征值, 也可以根据静力触探试验, 利用式(2)计算地基承载力特征值, 这两个公式都是经过采用载荷试验比核定的, 可信度较高。

(5) 采用换填垫层方法进行地基处理时, 如果在地基分层换填前, 对基坑底部洒水振动碾压 6~8 遍, 有效加固厚度为 1.1 m, q_c 值可提高 0.5 MPa 以上, 该施工步骤对提高地基的强度和稳定性、降低建筑物的总沉降量非常有利。

(6) 格埃路(Quelo)砂土地层在浸水条件下, 静力触探测到的侧壁摩阻力很小, 如果业主坚持使用浸水后的侧摩阻力测试数据, 则桩基计算获得的摩擦力很小, 基础工程造价会显著提高。

参考文献

- [1] 于永堂, 郑建国, 刘争宏. 安哥拉 Quelo 砂抗剪强度特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(增刊 1): 136—140. YU Yong-tang, ZHENG Jian-guo, LIU Zheng-hong. Test study of shear strength properties of Angola Quelo sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(Supp.1): 136—140.
- [2] Angolan Geological Services. 1:100000 geological map[M]. Luanda: Mapa De Angola, 2004.
- [3] 中信建设有限责任公司南部非洲区. 地基土工程特性及地基处理技术研究报告[R]. 罗安达: 中信建设有限责任公司, 2013.
- [4] 南京水利科学研究院. GB/T 50123—2003 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- [5] 刘争宏, 廖燕宏, 张玉守. 罗安达砂物理力学性质初探[J]. 岩土力学, 2010, 31(增刊.1): 121—126. LIU Zheng-hong, LIAO Yan-hong, ZHANG Yu-shou. Preliminary study of physico-mechanical properties of Luanda sand[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(Supp.1): 121—126.
- [6] 邓洪亮, 尹金宽, 谢向文, 等. 宁夏非饱和黄土浸水后变形特性研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊): 98—102. DENG Hong-liang, YIN Jin-kuan, XIE Xiang-wen, et al. Study on distortion characteristics of unsaturated loess in Ningxia when inundation[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(Supp.): 98—102.
- [7] 单红仙, 陈勇, 刘正银, 等. 现代黄河三角洲粉质类土承载力确定[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增刊 2): 4089—4095. SHAN Hong-xian, CHEN Yong, LIU Zheng-yin, et al. Determination of slity soil bearing capacity on modern Yellow River delta in china[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(Supp.2): 4089—4095.
- [8] 建设部综合勘察研究设计院. GB50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- [9] 中国建筑科学研究院. GB 50007—2011 建筑地基基础设计规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [10] 中国建筑科学研究院. JGJ94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [11] 陕西省建筑科学研究设计院. GB 50025—2004 湿陷性黄土地区建筑规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [12] 程钰, 周正明. 非饱和土稳态孔隙比变形理论研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1399—1404. CHENG Yu, ZHOU Zheng-ming. Study of deformation of unsaturated soil based on steady-state void ratio[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(5): 1399—1404.
- [13] 常士骧, 张苏明. 工程地质手册(第四版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.