

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.05.15

安哥拉罗安达湿陷性砂的载荷试验研究

唐国艺^{1,2}, 唐立军^{1,2}, 刘智^{1,2}, 刘争宏^{1,2,3}, 于永堂^{1,2}, 乔虎¹

(1. 机械工业勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710043; 2. 陕西省特殊岩土性质与处理重点实验室, 陕西 西安 710043; 3. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 安哥拉罗安达广泛分布的湿陷性砂(Quelo 砂), 是一种对水十分敏感的特殊砂土, 具有浸水后强度降低, 并产生湿陷变形的特殊性质, 由于缺乏相应的资料和工程经验, 其湿陷程度和承载特性是评价的难点。本文通过天然和浸水饱和条件下的载荷试验, 实测和研究了罗安达 Quelo 砂的湿陷变形特点和不同条件下的承载力特征。试验研究结果显示, 罗安达 Quelo 砂是一种湿陷程度为轻微—中等的湿陷性土; Quelo 砂的承载力对水分异常敏感, 地基土含水率的微小变化即可导致承载力数倍的降低, 且饱和后的承载力较小, 试验场地浸水饱和后的地基承载力深度修正系数可取 1.07。试验表明, 在工程实践中考虑地基土含水率变化对地基承载力的影响, 不采用消除地基全部湿陷量或部分湿陷量的方法, 而将红砂地基当做一般地基进行设计是可行的。

关键词: 罗安达; 湿陷性砂; 承载力; 平板载荷试验; 深层载荷试验

中图分类号: TU 441⁺.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)05-0108-06

Research on collapsible sand under plate load test in Luanda, Angola

TANG Guoyi^{1,2}, TANG Lijun^{1,2}, LIU Zhi^{1,2}, LIU Zhenghong^{1,2,3}, YU Yongtang^{1,2}, QIAO Hu¹

(1. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of the Property and Treatment of Special Soil and Rock, Xi'an, Shaanxi 710043, China; 3. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: The collapsible sand (Quelo sand), which occurs widely in Luanda of Angola, is sensitive to water content with the properties of soften and may causes collapsible deformation during soaking. Due to the lack of relevant data and engineering experience, it is difficult to evaluate the engineering properties of the collapsibility and bearing capacities. In this paper, the characteristics of the collapsible deformation and bearing capacities of Luanda Quelo sand are measured and studied by the plate load test (PLT) under the natural and soaking conditions. The experimental results show that the Quelo sand is a collapsible soil with slight to moderate collapsibility; the bearing capacity of the Quelo sand is sensitive to moisture. With the increasing moisture content of foundation soil, the bearing capacity will be reduced significantly with slight change in moisture and can make the bearing capacity several times lower than before during soaking. If the Quelo sand becomes saturated, the bearing capacity can be revised by the embedment depth with the coefficient of 1.07 in the design of foundation. Thus, the foundation treatment, which according with the

收稿日期: 2018-01-26; 修订日期: 2018-03-27

基金项目: 科技部科技伙伴计划项目资助(KY201502002); 陕西省岩土工程(黄土工程特性研究)“三秦学者岗位”基金项目资助

第一作者: 唐国艺(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事岩土工程勘察、特殊土的工程性质及地基处理技术研究。

E-mail: t971@163.com

通讯作者: 刘智(1987-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事工程物探、特殊土的工程性质及地基处理技术研究。

E-mail: liuzhi.0319@163.com

ordinary design theory and using the bearing capacity value under the condition of subsoil moisture change, could conform to the requirements while construction without eliminating all collapse or partial collapse of subsoil.

Keywords: Luanda; collapsible sand; bearing capacity; the plate load test (PLT); deep PLT

罗安达是非洲西部国家安哥拉的首都,位于宽扎河下游地带的宽扎盆地,濒临大西洋本戈湾。2002 年停止内战后,安哥拉开始了战后重建工作,罗安达因人口众多,是战后重建的主要区域,近年来开展了大规模的住房、公共建筑和大型基础设施建设。然而,在罗安达及其周边地区,靠近地表附近广泛分布有呈棕红色或棕黄色的粉砂层,在已有文献中被称为 Muceque (“穆赛格”)或 Quelo (“盖路”)砂^[1-2],在工程实践中,发现该粉砂层地基土具有和一般砂土不同的性质,集中表现在含水率较低条件下,具较高强度和较好直立性;但在浸水条件下地基土强度迅速降低,并产生湿陷变形的特点^[3-4]。

本文收集和分析了罗安达地区的不同工况下的平板载荷试验和深层载荷试验成果,对罗安达湿陷性砂的承载力特征及湿陷特征进行了相关研究,平板载荷试验深度在 1.5 ~ 2.0 m 之间,采用 0.25 m² 的承压板,深层载荷试验深度分别为 1.5 m 和 3.0 m,采用 0.50 m² 的承压板。这些试验均依照《岩土工程勘察规范》^[5]和《湿陷性黄土地区建筑规范》^[6]的相关技术要求,对于掌握罗安达砂的主要工程性质,从而针对性的得出适宜的承载力值,对地基基础设计和提出经济适宜的地基处理方法具有重要的参考意义。

1 基本物理力学性质

罗安达地区的地层分布较为简单,区域地层发育变化不大^[1],浅部地层为第四纪沉积层,岩性以棕红色及棕黄色粉细砂为主,其下为前第四纪海相沉积层,岩性以灰黄或灰白色强风化—全风化砂岩(呈砂状)与泥岩(呈土状)互层,工程地质钻探揭示的地层自上而下可分为:①层表土 Q₄^{ml}:含有机质,呈浅棕红色;②层粉砂 Q_p:颜色较单一,以棕红色为主;③层粉砂 Q_p(俗称“花斑土”):杂色;④层砂泥岩 Q_p:砂岩以灰白色为主,一般含黄色和红色调斑点,局部颜色较纯,泥岩呈灰绿色。图 1 为场地内某一工程地质剖面图。②层和③层均属 Quelo 组,但因②层棕红色粉砂经常被作为基础的持力层,以及其特殊性质表现得更为充分,本文重点分析研究②层砂土的载荷试验特征。

②层 Quelo 砂的物理力学指标统计平均值见表 1,

其具有的一个显著特点是含水率较低,孔隙比较小,却有较明显的湿陷性,以湿陷系数 0.015 作为评价标准评价^[6],Quelo 砂从轻微湿陷至强烈湿陷均有分布。

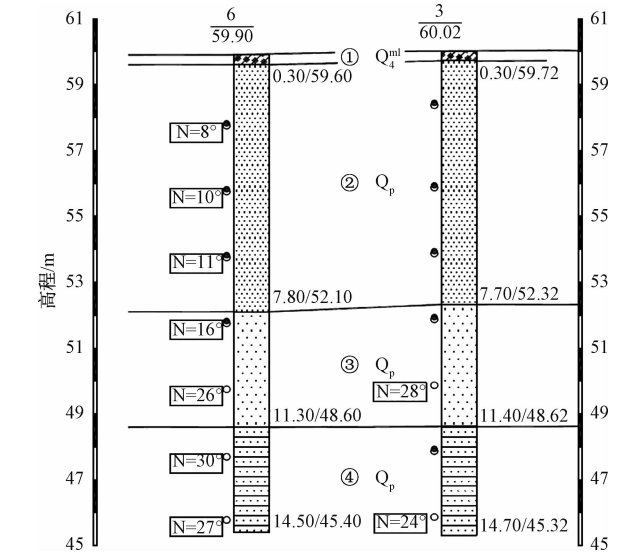


图 1 场地某一工程地质剖面图
Fig. 1 Engineering geological section of the site

表 1 Quelo 砂常规物理力学性质指标统计平均值
Table 1 Physico-mechanical properties of the Quelo sand in Luanda

含水率	重度	饱和度	孔隙比	压缩系数	湿陷系数
$w/\%$	$\gamma/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$	$S_r/\%$	e	a_{1-2}/MPa^{-1}	δ_s
5.9	17.5	26	0.608	0.15	0.020

图 2 为某工程场地内 Quelo 砂不扰动土样天然含水率与 200 kPa 压力下湿陷系数的相关关系,可以得出 Quelo 砂湿陷系数随初始含水率变化关系与黄土是类似的,含水率大小对湿陷性的发挥具有重要影响^[7-8],湿陷系数随含水率增大而强化,随含水率减小而退化。图 2 中以含水率 4.0% 为界线,当含水率小于 4.0% 时,Quelo 砂具有较大的湿陷系数,反之其湿陷系数则大为减小。参考湿陷性黄土湿陷系数取 0.015 的界线值,当 Quelo 砂含水率超过 6.0% 左右时,其湿陷性可不予考虑。

刘争宏等研究了天然和浸水条件下罗安达湿陷性砂的标贯试验^[3],浸水后砂土的实测标准贯入试验锤击数大幅度降低(图 3),可见罗安达砂土的力学性质

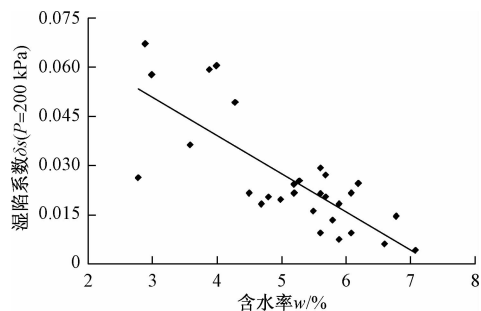


图2 天然 Quelo 砂湿陷系数随含水率变化散点图

Fig. 2 Scatter plot of collapsible coefficient vs moisture content of the natural Quelo sand

对水极其敏感,受雨季及早季交替变化的影响,罗安达砂的工程性质不宜单纯用标贯试验来评价。

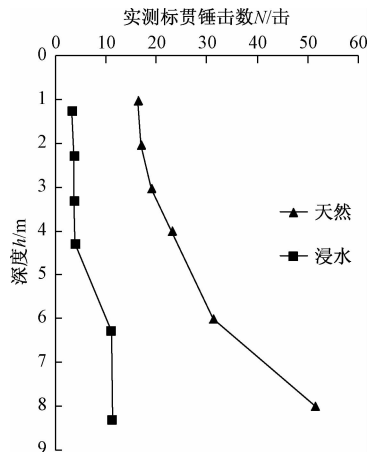


图3 天然及浸水条件下标贯试验结果

Fig. 3 SPT blows under the natural and wetted conditions

2 200 kPa 压力下浸水载荷试验

开展 200 kPa 压力下的浸水载荷试验,其目的是为了现场实测罗安达 Quelo 砂的附加湿陷量,从现场试验的角度对 Quelo 砂的湿陷程度进行判断。试验均采用面积为 0.25 m^2 的圆形承压板,对应的直径 $d = 564 \text{ mm}$,换算为方形承压板的宽度 $b = 479 \text{ mm}^{[9]}$ 。按换算后的 b 值,以《岩土工程勘察规范》中 $\Delta Fs/b$ 值为判断标准,得到的试验结果见表 2。

试验结果表明,参考《岩土工程勘察规范》的判断标准,罗安达 Quelo 砂在 200 kPa 压力下浸水载荷试验的附加湿陷量 ΔFs 与承压板宽度 b 之比大于 0.023,判定为湿陷性土。结合图 2 室内土工试验结果,即可从室内试验及现场试验的角度证明了罗安达砂土为湿陷性土,且湿陷程度可判定为轻微一中等。

表 2 200 kPa 压力下浸水载荷试验结果

Table 2 Results of Watering PLT under 200 kPa load

序号	初始含水率/%	附加湿陷量 $\Delta Fs/\text{mm}$	$\Delta Fs/b$	湿陷程度
1	3.3	17.06	0.036	轻微
2	3.6	36.81	0.077	中等
3	3.7	20.19	0.042	轻微
4	3.7	33.65	0.070	中等
5	4.3	15.37	0.032	轻微
6	4.8	25.67	0.054	中等
7	5.6	20.91	0.044	轻微

3 天然条件下的载荷试验

从标准贯入试验结果可以做出判断,罗安达砂的承载力会受水分的影响,在含水率大的情况下其承载力必然会降低。通过已有的载荷试验数据,将 $p-s$ 曲线绘于图 4 中,在含水率变化较小的情况下,可以看到曲线族大致可分为上下 2 个部分,中间形成一块空白区域,反映出 Quelo 砂的一个宏观规律,即以土层的含水率进一步区分,除了个别情况,Quelo 砂大体上可以以含水率 4.0% 为界线,上部分曲线对应的试验土层含水率小于 4.0%,其承载力特征值可达到 300 ~ 500 kPa,而下部分曲线对应试验土层的含水率一般都大于 4.0%,其承载力特征值仅为 120 ~ 180 kPa。也就是说当罗安达砂的含水率超过 4.0% 时,其承载力会有非常明显的降低,且对含水率的变化十分敏感,甚至小于 1% 的微小变化即可导致承载力数倍的降低。

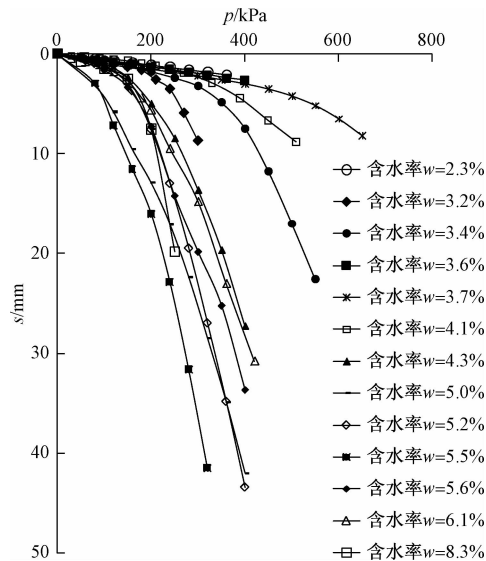


图4 天然条件下 Quelo 砂载荷试验结果

Fig. 4 PLT Results of the Quelo sand under the natural conditions

此时,含水率的大小同样决定了 Quelo 砂的湿陷

强度(图2),罗安达 Quelo 砂的承载力与湿陷可能导致的地基变形则形成了一对矛盾体。当地基土含水率较小时具有较大的地基承载力,但却具有较大的湿陷变形。当地基土含水率较大且大到一定程度时,Quelo 砂的湿陷系数将大大减小,若湿陷变形可满足设计对沉降的要求,其承载力又可能降低到无法满足上部荷载的要求。加之安哥拉的气候分为雨季和旱季,分布于地表面的罗安达湿陷性砂的含水率变化受季节影响则较大,以天然土层载荷试验得出的地基承载力具有很大的风险,是不适宜作为地基承载力设计参数的。

4 浸水饱和条件下的载荷试验

天然状态下罗安达 Quelo 砂的承载力对水十分敏感,且自然条件下 Quelo 砂的含水率的大小是随机的,无法保证其承载力处于稳定的状态。因此,考虑极端不利条件下的承载力对工程建设的安全具有重要意义。本文收集了6组浸水载荷试验结果(图5),试验前在试坑中预先浸水超过24 h后开始加荷,并在试验过程中始终保持一定的水头。

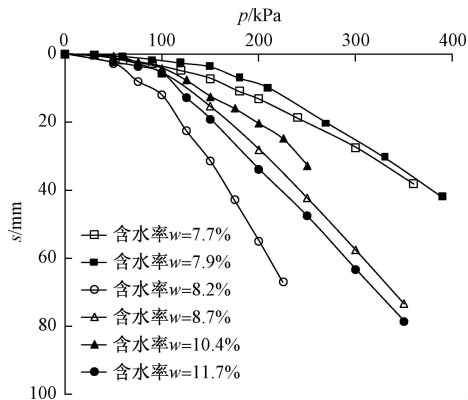


图5 浸水饱和条件下载荷试验结果

Fig.5 PLT Results of the Quelo sand under the watering conditions

从图5的试验结果来看,Quelo 砂浸水饱和后的承载力较低, $p-s$ 曲线缓变型为主,以沉降量为 $0.01b$ 时对应的荷载值作为承载力特征值^[5,10],Quelo 砂饱和条件下的承载力特征值大多在60~100 kPa,且随着荷载的增加,其沉降量持续增大。因此对于荷载较大的多数建筑物而言,Quelo 砂的承载力不足,且可能发生较大的变形,对工程设计存在较大的风险。

5 不同深度的载荷试验

为研究 Quelo 砂不同深度的承载力性状,开展了探井内不同深度天然及浸水条件下的深层载荷试验各

2组,试验深度分别为1.5 m和3.0 m,采用 0.5 m^2 的圆形荷载板,试验过程满足《建筑地基基础设计规范》的要求。深层载荷试验布置在直径0.9 m的探井中,天然状态下的试验在探井开挖到试验深度后立即安装设备开始试验。浸水条件下的试验则在探井底部预留20 cm土层并预先在井底保持30 cm水头浸水24 h,停水后开挖井底浮土后安装好设备,然后保持继续浸水并完成试验,测试浸水饱和后土层的承载力。

图6为本次深层载荷试验的结果曲线,结果显示天然条件下3.0 m深度的地基承载力反而比1.5 m处的低,究其原因因为场地内靠近地表的土层因 Quelo 砂的水分被植物根系吸收以及当地日照强度高、蒸发量大等原因导致其含水率普遍低于下部较深地层,因而天然条件下3.0 m深度处地基承载力低于1.5 m处地基承载力,符合前述红砂承载力随含水率增大而衰减的规律。根据图6中 $p-s$ 曲线,以沉降量为 $0.01b$ 时对应的荷载值作为承载力特征值^[10],对各试验数据进行插值计算,确定的1.5 m和3.0 m深度深层载荷试验的承载力特征值分别为599 kPa和457.5 kPa,浸水饱和条件下承载力特征值分别为82 kPa和110 kPa,可见含水率的增加对不同深度 Quelo 砂的承载力同样具有显著降低的影响,且衰减幅度较大,采用天然条件下的承载力特征值是偏于危险的。

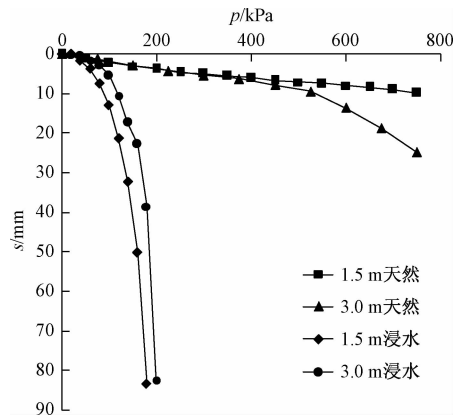


图6 天然及浸水条件下载荷试验结果

Fig.6 PLT results of the Quelo sand under the natural and soaking conditions

从不同深度的浸水载荷试验结果来看(图7),随着试验深度的增加,承载力具有一定的提高,且其 $p-s$ 曲线形态类似,具有相同的破坏模式,参考《湿陷性黄土地区建筑规范》中对黄土地基承载力的深宽修正公式:

$$f_a = f_{ak} + \eta_b \gamma (b - 3) + \eta_d \gamma_m (d - 1.50) \quad (1)$$

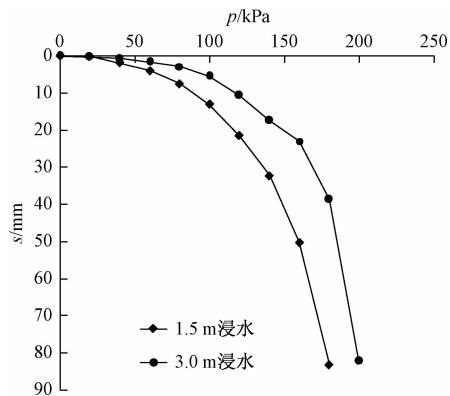


图7 浸水条件下载荷试验结果

Fig. 7 PLT results of the Quelo sand under the soaking conditions

以浸水饱和条件下深层载荷试验计算,不考虑宽度修正,取 $\gamma_m = 17.5 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-3}$,通过反算,可得出本次试验场地内的罗安达红砂地基承载力的深度修正系数 $\eta_d = 1.07$ 。但试验数量较少,对红砂的深度修正系数还需要进一步开展和收集试验资料,开展统计研究。

6 红砂地基基础设计的讨论

对红砂的地基基础设计,一种是根据建筑物类别消除红砂地基的全部湿陷量或部分湿陷量,参考湿陷性土的处理方法进行设计;另一种是将红砂当做一般地基,确定出可靠的承载力值后进行设计。

虽然湿陷性试验结果表明红砂是一种湿陷性土,然而,由于目前对红砂地基湿陷性的研究成果不多,湿陷系数取多大值作为红砂地基湿陷性的判别标准还没有一个明确的结论,如何确定红砂的地基承载力是工程实践中首要解决的问题。图8为参考《湿陷性黄土地区建筑规范》^[6]取湿陷系数为0.015作为红砂湿陷性的判定标准,室内试验得出的红砂湿陷起始压力值为8 kPa至超过200 kPa,当中多数结果小于《湿陷性黄土地区建筑规范》中对乙类建筑和丙类多层建筑地基处理后,下部未处理湿陷性土层湿陷起始压力不小于100 kPa的要求,再加上红砂地基的承载力对水分的变化十分敏感,此时沿用湿陷性黄土地基的设计理论需要对整个红砂地层进行消除湿陷性的处理或采用桩基础,对于一般的建筑物,可能造成投资的大幅增加。

从含水率对承载力影响的结果来看,即使在完全浸水饱和的极端条件下,承载力还是可以进行一定程度修正的,因此,按一般地基基础设计理论,充分考虑红砂地基土的含水率变化对地基承载力的影响,通过

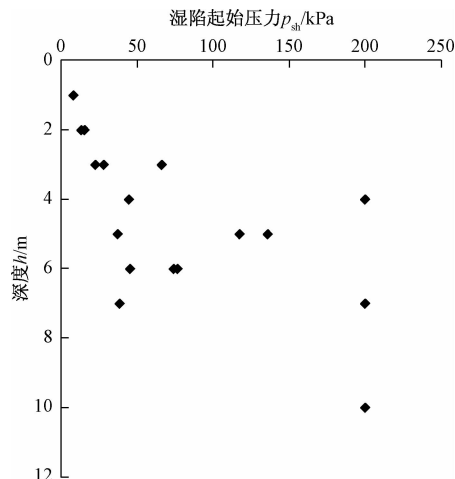


图8 红砂湿陷起始压力随深度变化散点图

Fig. 8 Scatter plot of the initial collapse pressure vs. depth of the red sand

相应的地基处理并满足下卧层承载力要求的条件下进行工程设计是可行的。

7 结论

(1)水对罗安达 Quelo 砂的湿陷性影响十分显著, Quelo 砂的湿陷系数随初始含水率的增大具减小的趋势,以含水率4.0%为界线,当 Quelo 砂含水率超过4.0%时,湿陷系数迅速减小。若以湿陷系数0.015为判定标准,当 Quelo 砂的含水率超过6.0%左右时,其湿陷性可不予考虑。

(2)因对 Quelo 砂的湿陷性缺乏室内试验判定标准,通过200 kPa压力下的浸水载荷试验可进一步判定罗安达 Quelo 砂为湿陷性土,其湿陷程度为轻微—中等。

(3)天然条件下, Quelo 砂的含水率小于4.0%时具有较大的承载力,当含水率超过4.0%时,其承载力会有非常明显的降低,且对含水率的变化十分敏感,小于1%的微小变化即可导致承载力数倍的降低。Quelo 砂浸水饱和条件下的承载力特征值较小,且随着荷载的增加,其沉降量持续增大, Quelo 砂的承载力和沉降变形特性对工程具有较大风险。

(4)对水极其敏感的 Quelo 砂承载力与湿陷程度具有同时变大或变小的同向变化特点,工程实践中难于兼顾承载力和变形的要求,应采用适宜的地基处理方案。而在湿陷系数0.015的标准下, Quelo 砂的湿陷起始压力是无法满足基于湿陷性理论的要求进行地基处理和基础设计的。建议 Quelo 砂地基基础设计时根据深层载荷试验的结果,充分考虑红砂地基土含水率

变化对地基承载力的影响,按照一般地基基础的设计理论来指导工程建设。

参考文献:

- [1] Maria Luisa Putignano, Alessio Valente, André Buta Neto. Carta geológica de Luanda (1: 25000) [M]. LUANDA: Departamento de geologia, Faculdade de ciências, Universidade Agostinho Neto, 2000. (in Portuguese)
- [2] Horta Da Silva J A, Gomes Teixeira J A P. Carta geotécnica da região de Luanda-1. a aproximação[J]. Técnica e Economia Ultramarinas, 1973, 11(2): 91 - 100. (in Portuguese)
- [3] 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 Z H, LIAO Y H, ZHANG Y S. Preliminary study of physic-mechanical properties of Luanda sand[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(Sup 1): 121 - 126. (in Chinese)]
- [4] 孙宏伟, 董勤, 石峰. 南部非洲红砂地基工程特性初探[J]. 建筑结构, 2015, 45(18): 105 - 107. [SUN H W, DONG Q, SHI F. Preliminary discussion on geotechnical characteristics of red sand in southern Africa[J]. Building Structure, 2015, 45(18): 105 - 107. (in Chinese)]
- [5] 中华人民共和国建设部. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50021—2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009. (in Chinese)]
- [6] 中华人民共和国建设部. 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. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50025—2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004. (in Chinese)]
- [7] 张苏民, 张炜. 减湿和增湿时黄土的湿陷性[J]. 岩土工程学报, 1992, 14(1): 57 - 61. [ZHANG S M, ZHANG W. The collapsibility of loess during moistening and drying processes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 14(1): 57 - 61. (in Chinese)]
- [8] 刘祖典. 黄土力学与工程[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997. [LIU Z D. Mechanics and Engineering of Loess[M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1997. (in Chinese)]
- [9] 刘彬, 张庚成, 李荣先. 尼日尔风积砂土湿陷性试验研究与评价[J]. 中国海洋大学学报, 2016, 46(7): 99 - 104. [LIU B, ZHANG G C, LI R X. Experimental study and evaluation on collapsibility of wind-blown sand in Niger[J]. Periodical of Ocean University of China, 2016, 46(7): 99 - 104. (in Chinese)]
- [10] 中华人民共和国建设部. 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, 2009. [Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB 50007—2011 Code for design of building foundation[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)]

责任编辑: 张明霞