

安哥拉 Quelo 砂场地渗透特性试验研究

刘争宏^{1,3,4}, 于永堂^{2,3,4}, 唐国艺^{3,4}, 刘 智^{3,4}

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 机械工业勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710043; 4. 陕西省特殊土工程性质与地基处理技术重点实验室, 陕西 西安 710043)

摘 要: 安哥拉 Quelo 砂具有浸水后软化的特殊性质, 研究其渗透特性具有重大工程价值。通过室内变水头渗透试验及现场双环注水试验测定了安哥拉 Quelo 砂天然土和击实土的渗透系数。基于试验结果, 统计了 Quelo 砂渗透系数的范围, 分析了渗透系数与孔隙比的关系, 探讨了地表水的下渗浸润规律。试验研究结果显示, 上部棕红色 Quelo 砂的渗透系数大, 保水性差, 地表水极易下渗, 而下部杂色 Quelo 砂渗透系数小, 具有形成上层滞水给工程带来危险的条件; 棕红色 Quelo 砂渗透系数与孔隙比之间近似成对数函数关系, 而下部杂色 Quelo 砂不具这种关系; 压实后的棕红色 Quelo 砂渗透系数仍较大, 防渗效果不佳。

关 键 词: Quelo 砂; 红砂; 渗透系数; 注水试验; 水敏性土; 浸润线

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2017)增2-0177-06

Permeability tests on Angola Quelo sand

LIU Zheng-hong^{1,3,4}, YU Yong-tang^{2,3,4}, TANG Guo-yi^{3,4}, LIU Zhi^{3,4}

(1. College of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China; 2. College of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China; 3. China Jikan Research Institute of Engineering Investigation and Design Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710043, China; 4. Shaanxi Key Laboratory of Engineering Behavior and Foundation Treatment for Special Soil, Xi'an, Shaanxi 710043, China)

Abstract: Angola Quelo sand possesses the characteristics of softening and collapsibility when immersed with water; it is of significance to study its permeability for engineering. The permeability coefficient of natural and compacted Angola Quelo sand is measured by laboratory variable head penetration test and double-ring water infiltration test. Based on the test data, the ranges of permeability coefficient of natural and compacted Quelo sand is summarized; the relationship between permeability coefficient and void ratio is analyzed. In addition, the surface water infiltration laws of Quelo sand stratum are discussed. The test results show that the brown-red Quelo sand in the upper stratum is high permeability coefficient and poor water retention; so the surface water is easy to infiltrate into underground, whereas the permeability coefficient of the variegated Quelo sand in the lower stratum is low, which has the conditions for forming perched water, and it will be detrimental for engineering. There is an approximately logarithmical function relationship between permeability coefficient and void ratio of the natural brown-red Quelo sand; however, the variegated Quelo sand in lower stratum does not show this regularity. The permeability coefficient of the compacted brown-red Quelo sand is still higher, and anti-seepage effect is poor.

Keywords: Quelo sand; brown-red sand; permeability coefficient; water infiltration test; water sensitive soil; phreatic line

1 引 言

安哥拉是非洲西部大西洋沿岸国家, 罗安达是安哥拉的首都和第一大城市, 人口占全国人口的 26.9% (2014 年), 2002 年停止内战后安哥拉开始了战后重建工作, 开展了大规模的住房、公共建筑

和大型基础设施建设。在罗安达及其周边的浅部地层中广泛分布着一种棕红色粉砂, 被称为 Quelo 砂或 Muceque 砂^[1-2], 是大量建(构)筑物基础持力层。与一般砂土的工程性质不同, Quelo 砂具有明显的水敏性特点, 在自然状态下砂层可直立, 浸湿后强度指标迅速降低(如承载力降低约 1/2)^[3], 按

收稿日期: 2017-05-25

基金项目: 科技部科技伙伴计划资助项目(No. KY201502002)。

This work was supported by the Science and Technology Partnership Program, Ministry of Science and Technology of China (KY201502002).

第一作者简介: 刘争宏, 男, 1980 年生, 硕士, 教授级高工, 主要从事湿陷性土工程性质评价与地基处理技术、桩基工程技术研究。E-mail: liu_zh2004@163.com

照我国岩土工程勘察规范^[4]判定 Quelo 砂属于湿陷性土。近些年来,大量中国公司在该地区承担工程建设任务,有工程曾出现过对 Quelo 砂的工程性质掌握不清,仍按照中国国内一般地基土的处理方法进行设计和施工,导致因处理措施不当,建成后地基土增湿引发不均匀沉降和房屋开裂的工程问题^[5]。Quelo 砂的湿陷性、水敏性和崩解性等工程性质都与水的渗透有着密切的联系,湿陷性黄土地区建筑规范^[6]针对湿陷性土地建筑提出的包括地基处理措施、防水措施和结构措施的综合应对 3 种措施,经工程实践检验其同时兼顾安全性和经济性,适应包括安哥拉在内发展中国家的经济水平,在水敏性土地地区具推广价值,也可作为 Quelo 砂场地建筑的应对措施,3 种措施中的地基处理措施和防水措施都与场地的渗透特性相关,研究 Quelo 砂场地的渗透特性具有重大工程意义。目前针对 Quelo 砂工程性质的研究主要集中在湿陷性、抗剪强度特性、承载性状和压实特性等方面^[7-11],对渗透特性的研究鲜见报道。本研究针对 Quelo 砂场地的渗透特性开展研究,考虑到 Quelo 砂压实垫层是当地工程建设中常用的一种地基处理形式,其防水效能如何,没有现成成果,将压(击)实 Quelo 砂的渗透特性纳入研究范围。

本次在典型 Quelo 砂分布场地,通过室内变水头渗透试验和现场双环注水试验方法,测试了

Quelo 砂天然土和压(击)实土的渗透系数,统计了 Quelo 砂各土层渗透系数的范围,分析了天然土及击实土的渗透系数与孔隙比的关系,探讨了地表水的下渗浸润规律,可为该地区或类似地区工程建设提供参考。

2 试验概况

2.1 试验土层的基本性质

现场试验及取样场地位于安哥拉首都罗安达省南部某大型住房项目场地内,是安哥拉 Quelo 砂的典型分布区,地势平坦,地面有自然生长的野草,零星分布有灌木,地形未受到人类活动的改变。

2.1.1 土层岩性

钻探深度范围内所揭示的 Quelo 砂场地地层自上而下为(见图 1):①层表土,含有机质,呈浅棕红色;②层粉砂,颜色较单一,以棕红色为主;③层粉砂(俗称“花斑土”),杂色,分为③₁层粉砂和③₂层粉砂两个亚层,③₁层粉砂以棕红色为主,含黄色和白色斑点,是②层和③₂层之间的过渡层,③₂层粉砂以灰白色粉砂为主,夹棕黄色和棕红色斑点;④层砂泥岩,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。场地地层与区域地层一致^[1],②、③层均属 Quelo 砂,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,②层砂土的工程

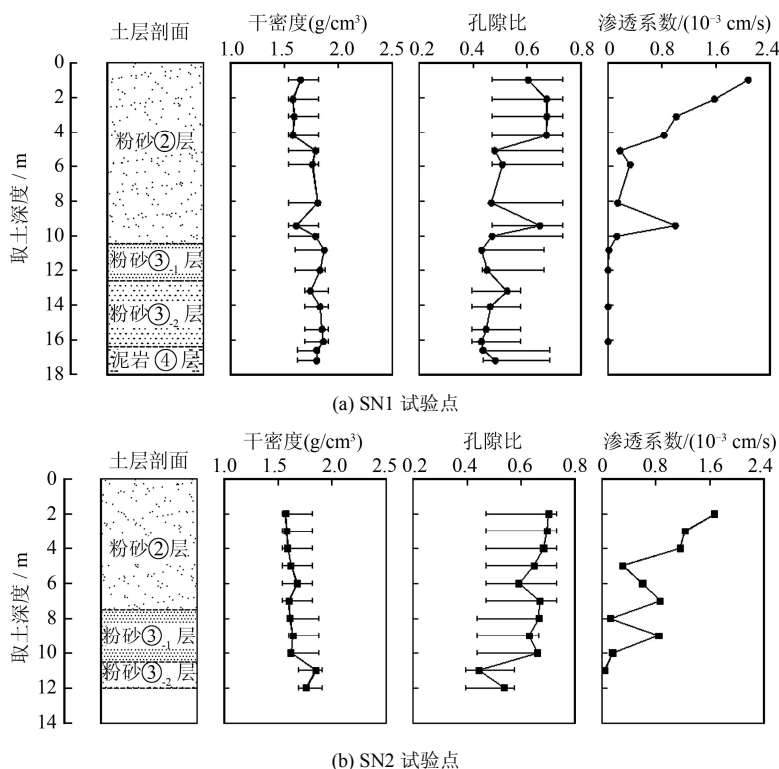


图1 试验点的岩土性质及 Quelo 砂地层渗透系数随深度变化曲线

Fig.1 Geotechnical characteristics of test sites and variation of permeability coefficients of Quelo sand stratum with depths

性质是工程上关注的重点。

2.1.2 基本性质

对试验点所取 Quelo 砂土样采用筛析法和密度计法^[12]测试颗粒级配, 根据试验结果, 统计了 Quelo 砂 (②层粉砂 17 组、③₁层粉砂 4 组、③₂层粉砂 6 组) 小于各粒径的重量百分比平均值, 绘制颗粒分析曲线如图 2 所示。从图中可以看出, 试验场地 Quelo 砂以粒径 $d = 0.075 \sim 0.5 \text{ mm}$ 的颗粒 (中细砂颗粒) 为主, $d < 0.075 \text{ mm}$ 的颗粒 (粉黏粒) 为辅, $d > 0.5 \text{ mm}$ 的砂颗粒较少。②层粉砂、③₁层粉砂和③₂层粉砂的颗粒分析统计结果显示, 中细砂颗粒含量平均值分别为 71%、65%、59%, 粉黏粒含量平均值分别为 26%、32%、37%。随着深度增加, 中细砂颗粒含量有减小的趋势, 而粉黏粒含量有增加的趋势。另外, 根据比重试验结果, Quelo 砂土相对密度平均值在②层粉砂为 2.67, ③₁层粉砂为 2.68, ③₂层粉砂为 2.68。

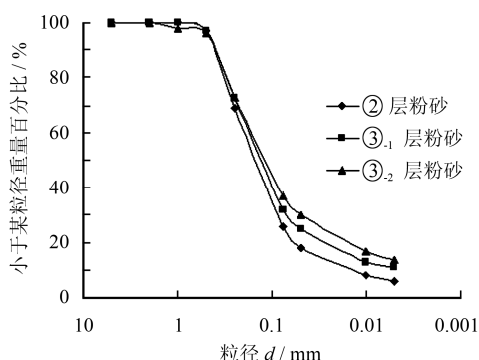


图 2 颗粒分析曲线
Fig.2 Grain analysis curves

采用重型击实试验标准^[12]获得的 Quelo 砂的击实曲线如图 3 所示。根据图中的击实试验结果, ②层粉砂、③₁层粉砂和③₂层粉砂最优含水率 w_{op} 分别为 6.8%、7.6%、6.5%, 最大干密度 ρ_{dmax} 分别为 2.13、2.16、2.17 g/cm^3 ; ②层粉砂的击实试验曲线相较其他砂土层曲线要平缓, 即含水率对压实干密

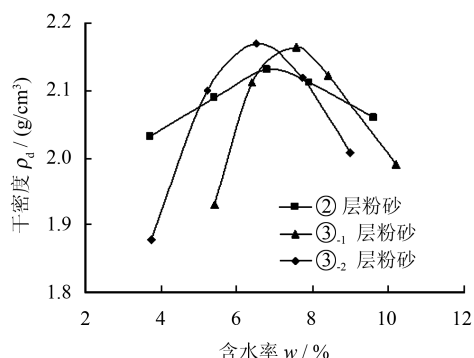


图 3 击实曲线
Fig.3 Compaction curves

度的影响相对不敏感, 更易获得较大干密度, 压实效果较佳, 即是当地工程中常将②层粉砂作为垫层法地基处理的换填材料不采用③层粉砂的本质原因。

2.2 试验方法及步骤

本次 Quelo 砂的渗透系数测试采用室内变水头渗透试验和现场双环注水试验两种方法。

2.2.1 室内变水头渗透试验

试验参照土工试验方法标准^[12], 分别测试天然土和击实土的渗透系数。试验设备为 TST-55 型渗透仪, 试样直径为 61.8 mm、高 40 mm。制备天然原状试样共 26 组, 取土深度为 1.0~16.1 m。制备击实土试样共 25 组, 取土深度为 5.2~16.0 m。击实试样制备时按设计含水率范围 3.7%~10.2%配制土料, 采用重型击实试验控制, 将土样击实后切取渗透试样, 放入保湿器中存放 24 h 后进行试验。本次试验中击实②层粉砂试样的干密度 $\rho_d = 1.94 \sim 2.10 \text{ g/cm}^3$, 对应压实系数 $\lambda = 0.91 \sim 0.99$; 击实③₁层粉砂试样的干密度 $\rho_d = 1.86 \sim 2.10 \text{ g/cm}^3$, 对应压实系数 $\lambda = 0.86 \sim 0.97$; 击实③₂层粉砂试样的干密度 $\rho_d = 1.86 \sim 2.14 \text{ g/cm}^3$, 对应压实系数 $\lambda = 0.84 \sim 0.99$ 。本次试验中每种天然及击实试样均进行 2 组平行试验。

2.2.2 现场双环注水试验

试验参照水利水电工程注水试验规程^[13], 分别测试了②层粉砂天然土及换填垫层的渗透系数。试验装置的外环内径为 49.3 cm, 壁厚 0.8 cm, 内环内径为 25.5 cm, 壁厚 1.0 cm。试验时将内外环压入土体内约 5 cm, 环底铺厚度为 2~3 cm、粒径为 5~10 mm 的砾石, 试验过程控制内外环水头高度为 10 cm, 并量测内环注水量。

本次在天然土上进行了 10 组试验, 测试土层的深度为 0.3~3.8 m, 在②层粉砂现场碾压而成的换填垫层上进行了 4 组试验。试验开始阶段, 每隔 5 min 量测一次水流量, 连续量测 5 次, 每隔 15 min 量测一次, 连续量测 2 次。以后每隔 30 min 量测一次并至少量测 6 次, 当连续 2 次量测的注入流量之差不大于最后一次流量的 10% 时试验结束。试验土层的渗透系数 $K(\text{cm/s})$ 为

$$K = \frac{16.67Qz}{F(H + z + 0.5H_a)} \quad (1)$$

式中: Q 为内环的注入流量(L/min); z 为从试坑底算起的渗入深度(cm); F 为内环的底面积(cm^2); H 为试验水头高度(cm), 本次 $H = 10 \text{ cm}$; H_a 为试验土层的毛细上升高度(cm), 对粉砂取经验值 30 cm。

3 试验结果与分析

3.1 天然土的渗透系数范围

室内变水头渗透试验及现场双环注水试验测定的天然土渗透系数(取对数)变化范围如图4所示。图中,天然土的干密度变化范围:②层粉砂为 $1.57\sim 1.82\text{ g/cm}^3$, ③₁层粉砂为 $1.61\sim 1.88\text{ g/cm}^3$, ③₂层粉砂为 $1.75\sim 1.87\text{ g/cm}^3$ 。

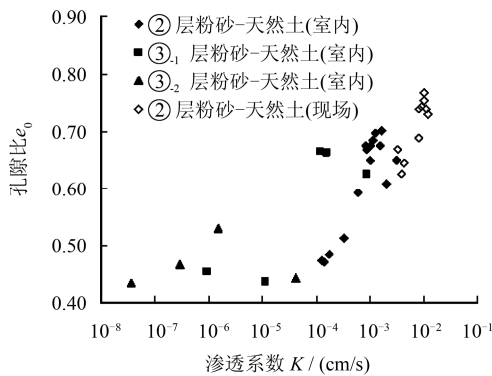


图4 天然砂渗透系数散点图

Fig.4 Scatter plot of permeability coefficients of natural sand

从图4中可以看出,②层粉砂渗透系数主要分布在 $10^{-4}\sim 10^{-3}\text{ cm/s}$ 数量级(中等透水土),③₁层粉砂渗透系数主要分布在 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{ cm/s}$ 数量级(中等透水~弱透水土),③₂层粉砂渗透系数主要分布在 $10^{-8}\sim 10^{-6}\text{ cm/s}$ 数量级(微透水~极微透水)。试验点的岩土性质及 Quelo 砂地层渗透系数随深度变化曲线见图1。由图可见,Quelo 砂地层中渗透系数自上而下渗透系数总体呈降低趋势,其中天然②层粉砂、③₁层粉砂的渗透系数较大,当地面有积水时可较快的渗入到地下;③₂层粉砂及其下部的④层砂泥岩(渗透系数 $K < 10^{-7}\text{ cm/s}$ 数量级),渗透系数较小,会起到相对隔水的作用。若地面渗水易在③层粉砂及其以上土层中形成上层滞水,若水位上升浸润②层使地基压缩层软化或湿陷,可能给建筑物安全带来威胁,该现象值得工程中谨慎对待,规避可能风险。另外,图4中室内变水头渗透试验与现场双环注水试验的渗透系数测试结果具有一定差异,本次采用双环注水试验实测的天然②层粉砂渗透系数主要在 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{ cm/s}$ 数量级,高于室内变水头渗透试验的测试结果。

3.2 击实土的渗透系数范围

室内变水头渗透试验及现场双环注水试验测定的击实土渗透系数(取对数坐标)变化范围如图5所示。图中,击实土的干密度变化范围:②层粉砂为 $1.94\sim 2.10\text{ g/cm}^3$, ③₁层粉砂为 $1.86\sim 2.10\text{ g/cm}^3$,

③₂层粉砂为 $1.83\sim 2.11\text{ g/cm}^3$,压实土的干密度分别为 $1.92、1.95\text{ g/cm}^3$ 。从图5中可以看出,采用重型击实试验控制,根据室内变水头渗透试验结果,当压实系数 $\lambda = 0.91\sim 0.99$ 时,击实②层粉砂的渗透系数主要在 $10^{-5}\sim 10^{-3}\text{ cm/s}$ 数量级,当 $\lambda = 0.86\sim 0.97$ 时,击实③₁层粉砂的渗透系数主要在 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{ cm/s}$ 数量级;当 $\lambda = 0.84\sim 0.99$ 时,击实③₂层粉砂的渗透系数多数小于 10^{-5} cm/s 量级。现场双环注水试验结果也显示,当 $\lambda = 0.90\sim 0.92$ 时,以②层粉砂为填料的换填垫层(采用振动碾压压实),其渗透系数主要分布在 $10^{-5}\sim 10^{-4}\text{ cm/s}$ 数量级。

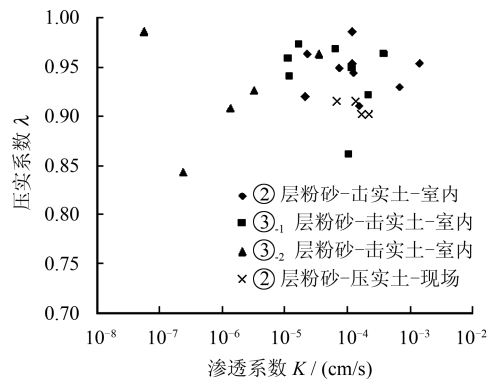


图5 击实砂的渗透系数散点图

Fig.5 Scatter plot of permeability coefficients of compacted sand

以上试验结果表明,②层土经压实后起不到特别好的防渗效果,③₂层杂色粉砂压实后可以起到较好的防渗效果,但其与②层粉砂相比,现场施工不易获得较高的压实系数。

3.3 孔隙比对渗透性的影响

绘制②层粉砂的渗透系数 K 与孔隙比 e_0 之间的关系如图6所示。

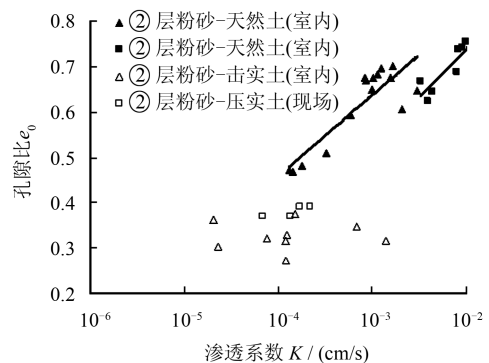


图6 孔隙比与渗透系数关系

Fig.6 Relationships between void ratio and permeability coefficient

从图中可以看出,孔隙比变化对天然土的渗透系数影响明显。室内变水头渗透试验与现场双环注

水试验测得的天然②层棕红色粉砂的渗透系数与孔隙比之间的变化规律相同, 采用最小二乘法对渗透系数 K 与孔隙比 e_0 进行对数线性回归分析, 可得经验关系:

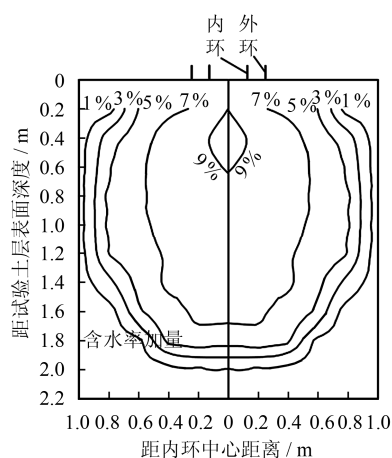
$$\lg K = me_0 + n \quad (2)$$

式中: m 、 n 为拟合参数。

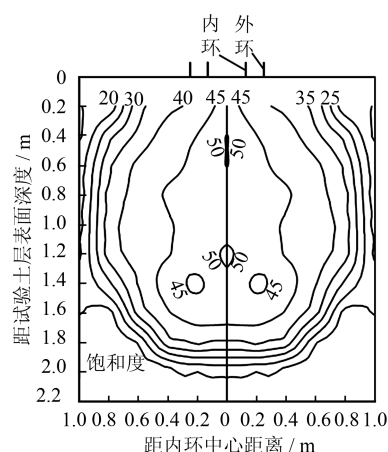
图 4 显示, 天然③₁层粉砂、天然③₂层粉砂的孔隙比与渗透系数之间看不出有特别明显的规律关系, 因此可采用类似式 (2) 的回归公式预估不同孔隙比②层粉砂的渗透系数, 但难以采用同样办法对③层粉砂的渗透系数进行预估, ③层粉砂的黏粒含量和结构变异较大, 而②层粉砂相对均匀是造成该现象的原因。

3.4 地表水的下渗浸润规律

本次在双环注水试验结束后随即以内环圆心为起点, 沿径向在水平方向及竖直方向间距 0.2 m 取土并测试含水率, 了解水的浸润入渗情况。根据浸水前后的含水率、密度测试结果, 计算各测点的饱和度及含水率增加量。典型试验点深度方向剖面的含水率增加量等值线及饱和度等值线如图 7 所示。



(a) 含水率增加量等值线



(b) 饱和度等值线

图 7 天然砂的浸润线图

Fig.7 Phreatic line of natural sand

从图 7 中可以看出, 地表水在垂直入渗的同时产生了较大范围的侧向渗透, 维持 10 cm 水头、连续注水 5 h 时, 水平方向与垂直方向的最大浸润边界均接近于 2 m。从浸润峰下行的速度 (0.4 m/h) 来看, 当有地表有充足水源补给时, 10 m 厚度的水敏性②层粉砂仅需 1 d 就可全部下渗浸湿。由图 7(a) 可知, 天然②层粉砂的含水率最大增量约为 9.0%, 实测最大含水率约为 13.8%。由图 7(b) 可知, 浸水后②层粉砂的饱和度仍较低, 基本不超过 50% (同为湿陷性土的中国黄土, 浸水后其饱和度一般超过 85%)。另外, 在换填垫层上进行的 4 组双环注水试验, 浸水后最大含水率为 7.5%~9.2%, 最大饱和度也不超过 70%。以上现象说明, 天然及击实的天然②层粉砂的保水性均较差, 根据饱和度测试结果推测, 地表水的下渗过程在②层粉砂中为非饱和渗透。

4 结 论

(1) 室内变水头渗透试验实测天然②层棕红色粉砂的渗透系数主要在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ cm/s 数量级, 天然③₁层杂色粉砂的渗透系数主要在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s 数量级, 天然③₂层杂色粉砂的渗透系数主要在 $10^{-8} \sim 10^{-6}$ cm/s 数量级, 工程中应谨慎对待③₂层以上形成上层滞水的可能和危害。

(2) 当压实系数 $\lambda = 0.91 \sim 0.99$ 时 (采用重型击实试验控制, 下同), 击实②层棕红色粉砂的渗透系数主要在 $10^{-5} \sim 10^{-3}$ cm/s 数量级, 表明该层土经压实后仍起不到特别好的防渗效果。对于③层杂色粉砂, 当③₁层杂色粉砂 $\lambda = 0.86 \sim 0.97$ 时, 其渗透系数主要在 $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/s 量级, 当③₂层杂色粉砂 $\lambda = 0.84 \sim 0.99$ 时, 其渗透系数多小于 10^{-5} cm/s 数量级, 表明③₂层杂色粉砂压实可以获得相对好的防渗效果, 但其存在不易压实的缺点。

(3) 天然②层棕红色粉砂的渗透系数与孔隙比之间近似呈对数函数关系, 天然③层杂色粉砂的渗透系数与孔隙比之间的关系不明显。

(4) Quelo 砂场地中②层棕红色粉砂的保水性较差, 地表水的垂直入渗速度可达 0.4 m/h, 下渗过程很可能是非饱和渗透。

参 考 文 献

- [1] PUTIGNANO M L, VALENTE A, NETO A B. Carta geológica de Luanda(1:25000)[M]. Luanda: [s.n.], 2000.
- [2] HORTA Da Silva J A, GOMES Teixeira J A P. Carta geotécnica da região de Luanda-1. Aproximação[J]. Técnicae Economia Ultramarinas, 1973, 11(2): 91—

- 100.
- [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 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.
- [4] 建设部综合勘察研究设计院. GB 50021—2001 岩土工程勘察规范[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2009.
- Comprehensive Survey and Design Institute of Ministry of Construction. GB 50021-2001 Code for investigation of geotechnical engineering[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2009.
- [5] 彭友君, 岳栋, 彭博, 等. 安哥拉格埃路砂地层的承载力研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(增刊 2): 332—337.
- PENG You-jun, YUE Dong, PENG Bo, et al. Research on bearing capacity of Angola Quelo sand strata[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2014, 35(Supp.2): 332—337.
- [6] 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.
- Shaanxi Province Construction Science Research and Design Institute. GB 50025-2004 Code for building construction in collapsible loess regions[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2004.
- [7] 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.
- [8] 彭友君, 岳栋, 陈华盛, 等. 安哥拉砂土地基碾压施工技术研究[J]. 施工技术, 2015, 44(13): 38—42.
- PENG You-jun, YUE Do, Chen Hua-sheng, et al. The research on the rolling compaction construction technology for sandy soil foundation in Angola[J]. **Construction Technology**, 2015, 44 (13): 38—42.
- [9] SOARES A J L D A, VISSER A T. The performance of stabilized pebble bases under light urban traffic in Luanda, Republic of Angola[C]//Proceedings of the 26th Southern African Transport Conference(SATC). Pretoria, South Africa: [s. n.], 2007: 267—276.
- [10] 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): 100, 105—107.
- SUN Hong-wei, DONG Qin, SHI Feng. Preliminary discussion on geotechnical characteristics of red sand in southern Africa[J]. **Building Structure**, 2015, 45(18): 100, 105—107.
- [11] 田予东, 赵伟, 宋义平, 等. 安哥拉 Quelo 砂湿陷性地区垫层法地基处理及基础设计研究[J]. 建筑结构, 2016, 46(24): 66—69.
- TIAN Yu-dong, ZHAO Wei, SONG Yi-ping, et al. Research on replacement cushion foundation treatment and foundation design of collapsible Quelo sand area in Angola[J]. **Building Structure**, 2016, 46(24): 66—69.
- [12] 南京水利科学研究院. GB/T 50123—1999 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 1999.
- Nanjing Hydraulic Research Institute. GB/T 50123-1999 Standard for soil test method[S]. Beijing: China Planning Press, 1999.
- [13] 水利部水利水电规划设计总院. SL 345—2007 水利水电工程注水试验规程[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- Water Conservancy and Hydropower Planning and Design Institute. SL 345-2007 Code of water injection test for water resources and hydropower engineering[S]. Beijing: China Water & Power Press, 2007.